

170, вып. 4.

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

КК

КИБЕРНЕТИЗАЦИЯ
НАУЧНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

4

Министерство высшего и среднего специального образования
Латвийской ССР

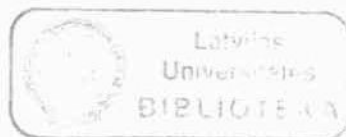
Латвийский ордена Трудового Красного Знамени
государственный университет имени Петра Стучки

Проблемная лаборатория физики полупроводников

Ученые записки
Латвийского государственного университета
имени Петра Стучки
том I70

КИБЕРНЕТИЗАЦИЯ НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Выпуск 4



Редакционно-издательский отдел ЛГУ им. Петра Стучки
Рига 1972

УДК 007.5:539.2

КИБЕРНЕТИЗАЦИЯ НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА
выпуск 4. 1972

В сборнике рассматриваются методические вопросы организации автоматизированного эксперимента в области физики твердого тела и принципы конструирования оптико-механических, криостатных и электронных программно-управляемых приборов. Приведен пример построения научно-исследовательской системы из подобных приборов.

Статьи обобщают опыт разработок научно-исследовательских систем, управляемых ЭВМ, накопленный коллективом Проблемной лаборатории физики полупроводников Латвийского государственного университета им. П.Стучки.

Сборник предназначен для научно-технических работников и студентов, интересующихся практическими вопросами применения вычислительной техники для управления экспериментом в области физики твердого тела.

Первый выпуск вышел в свет в 1968г., второй - в 1971 третий - в 1972 году.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ю.Кузьмин - главный редактор,
А.Бернуп - зам.главного редактора,
О.Аболиньш, И.Зилигис, Я.Страумен,
И.Тале, Э.Тарденак, Я.Цирулис, М.Штерн.

Ученые записки, том 470

КИБЕРНЕТИЗАЦИЯ НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Выпуск 4

Редактор Ю.Кузьмин. Тех. редактор М.Штерн. Корректор В.Полмина
Редакционно-издательский отдел ЛГУ им. Петра Стучки. Рига 1972

Появилась в печати 26.07.1972г. ЯТ08136, Заказ № 460. Тираж 600.
Ф/л 60х90. Бумага №1. Флз. печ. лист. 16,8. Уч. издат. лист 12,8.

ЦЕНА 1 рубль 30 коп.

Отпечатано на ротативе, г. Рига-80, ул. Вейдебаума, 5, ЛГУ.

21

И.А.Тале

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Создание автоматизированных систем исследования может существенно увеличить эффективность эксперимента в области физики твердого тела [1]. Для оценки целесообразности автоматизации эксперимента необходимо сопоставить информационные возможности применяемых методов исследования и дополнительные затраты ресурсов на создание автоматизированной научно-исследовательской системы (НИС) [2]. С этой целью в данном обзоре рассмотрены основные положения спектрально-кинетических люминесцентных методов и информационные возможности комплекса этих методов при исследовании электронно-ионных процессов в твердом теле. Обзор дает общее представление о научных проблемах, которые могут быть решены при помощи НИС с УВМ в конуре для люминесцентных исследований, рассмотренной в [3].

Виды спектрально-кинетических методов исследования

Под влиянием изменяющихся внешних воздействий твердое тело переходит из одного стационарного состояния в другое. Изменяются его оптические, электрические, магнитные и другие характеристики. Сущность спектрально-кинетических методов исследования составляет селективное создание электронных и ионных возбуждений (электроны, дырки, экситоны, неравновесные структурные дефекты) при помощи монохроматических световых квантов или моноэнергетических корпускулярных пучков и намерение развития во времени (кинетики) физических явлений, вызываемых электронно-дырочными, экситонными, ионными процессами в твердом теле.

Исследование кинетики нарастания и спада физического явления в зависимости от условий возбуждения и девозбуждения позволяет установить важную статистическую характеристику электронных и ионных микропроцессов - инерционность.

При возбуждении монохроматической радиацией одновременно или через цепь последовательных микрореакций развивается множество "элементарных" электронно-дырочных, экситонных, ионных процессов. Эти процессы обычно отличаются своей инерционностью. Поэтому измерение кинетики нарастания и спада физического явления в широком временном интервале, подобно развертке спектров монохроматором, часто позволяет осуществлять временную "развертку" сложного процесса. С течением времени на кривых нарастания и спада преимущественно проявляются все более инерционные стадии процесса. Анализ кинетических кривых не представляет существенных трудностей, если инерционности элементарных процессов достаточно отличаются друг от друга.

Современные исследования спектрально-кинетическими методами проводятся в широком временном интервале. Диапазон времен от 10^{-9} до 1 сек в настоящее время охватывается преимущественно осциллографическими методами измерения [4-9]. Для возбуждения и девозбуждения используются импульсные источники радиации, длительность которой охватывает тот же диапазон времени. Распространены также специфические ζ -метры, позволяющие непосредственно определить инерционность (см., например, [10]). Для спектрально-кинетических исследований малоинерционных процессов перспективны также разрабатываемые в настоящее время скоростные аналого-цифровые преобразователи, обладающие высокой точностью измерений [11, 12], стробоскопические методы [13] и др.

Аккумуляция и рекомбинация пространственно разделенных возбуждений в твердом теле часто протекает чрезвычайно медленно, что осложняет проведение эксперимента. Поэтому изучение инерционных стадий электронных и ионных релаксационных

процессов, помимо измерения кинетики релаксации физического явления, проводится специфическими методами, позволяющими провести эксперимент за обозримый промежуток времени.

Спектрально-кинетические методы исследования инерционных процессов, протекающих с преодолением активационного барьера, можно разделить на две группы:

а) методы изучения кинетики релаксации физического явления при воздействии на кристалл девозбуждающих факторов (радиация, температура, электрическое поле), имеющих постоянную интенсивность. При этом, как правило, необходимо измерять кривые спада (нарастания) физического явления при различных интенсивностях девозбуждающего фактора;

б) методы, основанные на измерении кинетики релаксации явления в условиях с непрерывно растущим девозбуждением [14]. К ним относятся неизотермические кинетические исследования, в которых релаксационные характеристики измеряются в режиме возрастающей температуры [15-21]. Кинетика при равномерном нагреве отличается от релаксации в изотермических условиях тем, что с течением времени инерционность отдельных элементарных процессов уменьшается, притом по-разному для процессов с отличной высотой теплового активационного барьера. В большинстве случаев сохраняется последовательность стадий релаксации, однако различия в инерционности элементарных процессов ввиду роста температуры оказываются незначительными.

Таким образом, методы исследования малоинерционных и инерционных стадий электронно-ионных релаксационных процессов в твердом теле различны. В обзоре ограничимся рассмотрением методов для изучения инерционных (постоянная времени 1 сек и больше) стадий этих процессов.

Функциональное определение эксперимента

Эксперимент должен обеспечить измерение кинетики релаксации по крайней мере одного физического явления и контро-

лируемо управлять одним деэвозбуждающим фактором. Постоянная времени измерительного канала должна быть меньше 1 сек.

Если измеряемым явлением является интенсивность люминесценции и деэвозбуждающим фактором температура, НИС реализует следующие функции:

- а) измерение зависимости слабых потоков света (интенсивности люминесценции) от времени ($J(t)$),
- б) измерение зависимости температуры образца от времени ($T(t)$),
- в) проведение нагрева и охлаждения образца по заданной зависимости температуры от времени ($T(t)$).

Не налагая дополнительных ограничений на функции исследовательской установки, можно осуществить следующие методы исследования нестационарных процессов:

1. Измерение зависимости интенсивности люминесценции от времени ($J(t)$) при постоянной температуре ($T = \text{пост.}$) - метод измерения кинетики послесвечения (КИ).

2. Изменение зависимости интенсивности люминесценции ($J(t)$) и температуры ($T(t)$) от времени в режиме линейного нагрева - метод термовысвечивания (ТВ).

3. Измерение зависимости интенсивности люминесценции ($J(t)$) и температуры ($T(t)$) от времени в режиме осциллирующего нагрева - метод фракционного термовысвечивания (ФТВ).

4. Измерение зависимости температуры от времени ($T(t)$), если интенсивность рекомбинационной люминесценции поддерживается постоянной ($J = \text{пост.}$) - метод постоянного сигнала (ПС).

Ниже, в представлениях феноменологической модели электронных рекомбинационных процессов [22, 23], рассматриваются основные положения перечисленных методов, а также термические режимы проведения измерений.

Феноменологическая модель электронно-ионных рекомбинационных процессов

Облучение кристаллофосфора ионизирующей радиацией приводит к образованию электронных и ионных возбуждений (электроны, дырки, межузельные атомы и ионы и др.), часть которых локализуется на структурных дефектах кристалла (центры захвата (ЦЗ) и рекомбинации (ЦР)). После прекращения возбуждения происходит релаксация образца к термодинамическому равновесию. Изучение кинетики релаксации направлено на определение феноменологической модели электронно-ионных неравновесных процессов и выявление микромеханизмов релаксации.

В представленных феноменологической зонной модели электронных неравновесных процессов дефекты решетки образуют локальные состояния в зоне запрещенных энергий (рис.1). Для каждого типа возбуждений (в рассматриваемом случае электронов) локальные состояния условно разделяются на ЦР (заполнены в термодинамически равновесном состоянии) и ЦЗ (заполняются при возбуждении). ЦЗ и ЦР характеризуются совокупностью феноменологических параметров (см.рис.1), определяющих кинетику неравновесных процессов: концентрацией ЦЗ (N_{z1}) и ЦР (N_{p1}); концентрацией неравновесных возбуждений на ЦЗ (n_{z1}) и ЦР (n_{p1}); вероятностью тепловой ионизации локального состояния, т.е. перехода электрона в зону проводимости (ω_{z1}) и дырки в валентную зону (ω_{p1}); сечением захвата электрона на ЦЗ (σ_{z1}^+) и дырки на ЦР (σ_{p1}^+); сечением захвата дырки на ЦЗ (σ_{z1}^-) и электрона на ЦР (σ_{p1}^-). Вероятность тепловой ионизации локального состояния равна

$$\omega = \omega_0 \cdot e^{-\frac{E}{kT}}, \quad //I/$$

где ω - частотный фактор; E - энергия тепловой ионизации локального состояния.

Баланс неравновесных возбуждений (например, электронов

и дырок) в зонах, на ЦЗ и ЦР, описывается системой линейных дифференциальных уравнений (кинетических уравнений) [22-24]. Однако в общем случае при тепловой ионизации возбуждений, наличии повторного захвата и рекомбинации система кинетических уравнений не решается.

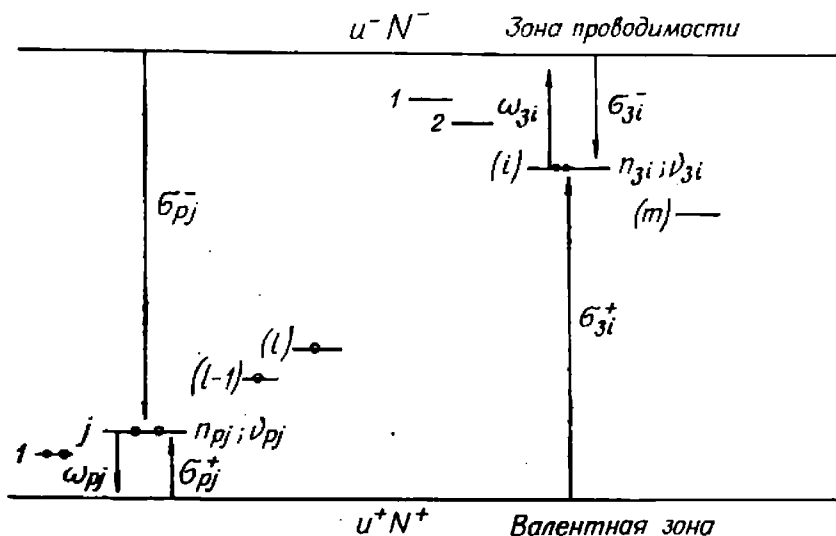


Рис. 1.

Аналитическое решение кинетических уравнений в настоящее время проведено для предельно упрощенных моделей и выяснены качественные закономерности кинетики релаксационных процессов. Результаты некоторых аналитических расчетов будут приведены ниже, при рассмотрении методики исследования.

Релаксация электронных и ионных возбуждений в общем случае включает три процесса:

- а) тепловую и оптическую делокализацию возбуждений, в результате которой уменьшается концентрация их на ЦЗ;
- б) перенос возбуждений от места делокализации в окрест-

ность ЦР;

в) рекомбинацию возбуждений одного типа с локализованными на ЦР возбуждениями противоположного типа.

Кинетика измеряемого физического явления (люминесценции) зависит от инерционности всех трех процессов. Вышерассмотренная феноменологическая зонная модель электронных неравновесных процессов справедлива в случае, если временем переноса и временем рекомбинации возбуждений можно пренебречь по сравнению с инерционностью исследуемого релаксационного процесса. Тогда инерционность, очевидно, определяется уменьшением концентрации возбуждений на ЦЗ.

Однако при многократном повторном захвате носителей на ЦЗ или диффузии возбуждений по узлам решетки может иметь место дисперсия времен переноса, сравнимая с инерционностью опустошения ЦЗ. Тогда существенным становится взаимное пространственное распределение дефектов и перенос возбуждений подчиняется диффузионным уравнениям [23, 25].

Экспериментальные работы по изучению кинетики люминесценции показывают, что, помимо малоинерционной внутрицентровой люминесценции и рекомбинации подвижных возбуждений одного типа с локализованными возбуждениями противоположного типа, имеет место спонтанные переходы между пространственно разделенными локальными состояниями возбуждений [26-38]. Появляется инерционная туннельная люминесценция. Вероятность туннельных процессов особенно высока в случаях, когда близкое расположение электронных и дырочных локальных состояний встречается в пропорциях, значительно превосходящих уровень, определяемый хаотическим распределением [39, 40].

Из-за многообразия явлений переноса и процессов в непосредственной окрестности центров рекомбинации интерпретация результатов спектрально-кинетических исследований может быть неоднозначной и физический смысл феноменологических параметров различным. Поэтому при изучении микромеханизма рекомбинации пространственно-разделенных электрон-

ных и ионных возбуждений прежде всего необходимо провести качественное изучение:

а) механизма переноса возбуждений и необходимости учета диффузионного характера перемещений носителей от мест декоагуляции к центрам рекомбинации;

б) вклада спонтанных туннельных переходов в рекомбинацию возбуждений одного типа с локализованными возбуждениями противоположного типа.

Затем определяется феноменологическая модель процесса. Рассмотрим возможности спектрально-кинетических методов при решении этих задач.

Кинетика послесвечения (КП)

После возбуждения образца при заданной температуре $T_{\text{возб}}$ проводится измерение зависимости интенсивности люминесценции от времени. Температура образца во время измерения $J(t)$ в общем случае может быть отличной от температуры возбуждения.

Основную информацию о микромеханизме релаксационного процесса содержит: а) закон затухания люминесценции, б) зависимость параметров кривых затухания от температуры (в общем случае от интенсивности девозбуждающего фактора).

Инерционное затухание люминесценции может быть обусловлено опустошением ЦЗ вследствие тепловой ионизации и туннельной рекомбинацией между пространственно разделенными локализованными состояниями.

Рассмотрим кинетику послесвечения при тепловом опустошении ЦЗ.

Рассмотрение мономолекулярных и бимолекулярных рекомбинационных процессов приводит к соответствующим характеристическим законам затухания, имеющимся рекомбинацией согласно кинетике первого и второго порядка.

В случае мономолекулярных процессов ЦР не ионизуется,

а только возбуждается, поэтому скорость излучательной рекомбинации

$$J \sim \frac{dn_p}{dt} = -\frac{1}{\tau} n_p; \quad n_p = n_{p0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad /2/$$

где n_{p0} — начальная концентрация возбужденных ЦР; τ — среднее время пребывания центра в возбужденном состоянии.

Затухание люминесценции в случае кинетических процессов первого порядка является экспоненциальным.

Вследствие разделения зарядов в случае бимолекулярных процессов при возбуждении возникают равные концентрации разделенных возбуждений — ионизованных центров рекомбинации и подвижных носителей. Скорость рекомбинации

$$J \sim \frac{dn_p}{dt} = -p \cdot n_p^2; \quad n_p = \frac{n_{p0}}{1 + p \cdot n_{p0} \cdot t}, \quad /3/$$

Таким образом, интенсивность люминесценции в процессах второго порядка убывает по гиперболе второго порядка.

Аналитическое решение кинетических уравнений для определения кинетики затухания рекомбинационного свечения при тепловом опустошении ЦЗ проведено для упрощенных феноменологических моделей и может дать качественную оценку основных закономерностей кинетики рекомбинационной люминесценции [23]. В асимптотических приближениях решение кинетических уравнений сводится к кинетике затухания, соответствующей процессам первого и второго порядка.

Рассмотрим следующее асимптотическое приближение: m сортов ЦЗ; один сорт ЦР; эффективно опустошается только ЦЗ k -того сорта, заполнение ЦЗ всех сортов мало ($n_j < \nu_j$) и $n_p = \sum_j n_{zj}$. Тогда интенсивность люминесценции затухает по кинетике первого порядка в следующих случаях:

а) $n_p \gg n_{zk}$;

б) $n_p = n_{zk}$; $\sigma_p n_p \gg \sigma_{zk} \nu_{zk}$, т.е. опустошается самый глубокий ЦЗ и вероятность рекомбинации намного больше вероятности повторного захвата.

В этих случаях постоянная времени $\frac{t}{\tau}$ имеет вид

$$\frac{t}{\tau} = \omega_{3k} \cdot \gamma = \omega_{3ko} \cdot \gamma \cdot e^{-\frac{E_k}{kT}}, \quad /4/$$

где

$$\gamma = 1 - \frac{\sigma_{3k}^- \nu_{3k}}{\sum_{i=k}^m \sigma_{3i}^- \nu_{3i} + \sigma_p^- n_p}. \quad /5/$$

Если $n_p = n_{3k}$ и $\sigma_p^- n_p \ll \sigma_{3k}^- \nu_{3k}$, т.е. вероятность повторного захвата намного больше вероятности рекомбинации, затухание люминесценции следует кинетике второго порядка. Тогда p в /3/ имеет вид

$$p = \frac{\sigma_p^-}{\sigma_{3k}^- \nu_{3k}} \cdot \omega_{3ko} \cdot e^{-\frac{E_k}{kT}}. \quad /6/$$

Таким образом, по измерениям кинетики затухания рекомбинационного свечения в принципе можно определить:

- а) порядок рекомбинационного процесса;
- б) энергию тепловой ионизации ЦЗ, если кинетика затухания свечения измерена при различных температурах. Однако, кинетика затухания в большинстве реальных случаев не соответствует рассмотренным выше асимптотическим приближениям и анализ результатов может быть проведен лишь моделированием рекомбинационных процессов на ЭВМ [24].

В отличие от рекомбинационных процессов с участием зонных состояний туннельная люминесценция представляет спонтанный процесс, не требующий энергии активации. Особенностью и признаком туннельных процессов поэтому является независимость кинетики затухания от температуры.

Инерционность туннельной рекомбинации занимает промежуточное место между быстро протекающими внутрицентровыми процессами и рекомбинационными явлениями, временные харак-

теристики которых определены пребыванием возбуждений на ЦЗ.

Кинетика туннельной люминесценции рассчитана теоретически при некоторых упрощенных предположениях. Принимается, что вероятность спонтанного распада изолированной донорно - акцепторной пары в зависимости от расстояния между компонентами имеет вид [41, 42]

$$\omega = \omega_0 \cdot e^{-\frac{r}{r_0}}, \quad /7/$$

где r_0 - половина радиуса Бора.

Вероятность образования пары определяется соотношением

$$p(r) = \frac{1}{R_0} \cdot e^{-\frac{r}{R_0}}, \quad /8/$$

где R_0 - постоянная величина.

Тогда интенсивность туннельной люминесценции равна 43

$$J = C \cdot F \cdot \int_0^{\infty} e^{-x \cdot \frac{r_0}{R_0}} \cdot e^{-\omega_0 t \cdot \exp(-x)} \times \\ \times \left\{ 1 - e^{-\omega_0 t_0 \cdot \exp(-x)} \right\} dx, \quad /9/$$

где $C \cdot F$ - концентрация созданных в единицу времени пар.

Зависимость содержит три параметра: ω_0 , t_0 (время возбуждения) и r_0/R_0 . Величина ω_0 существенно влияет только на начальных стадиях затухания, t_0 определяет форму кривой при $t \ll (3+4)t_0$. В конечных стадиях затухания

$$J = J_0 \cdot \left(\frac{1}{t} \right)^{\frac{r_0}{R_0} + 1}, \quad /10/$$

что является одним из признаков туннельной рекомбинации изолированных пар.

В случае хаотического распределения имеем для $t > (3 \div 4)t_0$

$$J \sim \alpha \cdot \frac{\ln^2(\omega_0 t)}{t}, \quad /II/$$

т.е. в отличие от изолированных пар крутизна закона затухания меньше по сравнению с $J \sim 1/t$.

Таким образом, изучением кинетики туннельной люминесценции удастся определить: а) топографию распределения возбуждений (изолированные пары, хаотическое распределение); б) параметры Γ_0/R_0 и ω_0 .

Рассмотрим термические режимы при измерении кинетики затухания люминесценции. Зависимость интенсивности люминесценции от времени как в случае зонных, так туннельных рекомбинационных процессов измеряется при постоянной температуре. Измерительная аппаратура должна обеспечить поддержание постоянной заданной температуры образца. Для определения энергий тепловой ионизации ЦЗ требуются измерения кинетики затухания при разных температурах, поэтому аппаратура должна обеспечить задание температуры измерения.

Для определения закона затухания туннельной люминесценции могут быть привлечены два методических приема: а) измерение кинетики затухания люминесценции при различных температурах и вычисление температурно независимых компонент в семействе кинетических кривых, б) "замораживание" активационных рекомбинационных процессов путем охлаждения образца после возбуждения. Преимуществом последнего метода является возможность непосредственно измерить и с высокой точностью определить закон затухания туннельной люминесценции.

Таким образом, для выявления механизмов рекомбинации и переноса возбуждений и определения феноменологических параметров рекомбинационного процесса ($E_K, \omega_{3KO}, \Gamma_0/R_0$) измерением кинетики затухания люминесценции целесообразно использовать исследовательскую установку, позволяющую под-

держивать постоянную температуру образца и скачком изменить ее до или во время измерений (рис.2). Следует стремиться по возможности уменьшить время перехода от начальной температуры к конечной, так как тепловая инерционность установки ограничивает возможности в исследовании начальных стадий кинетики затухания.

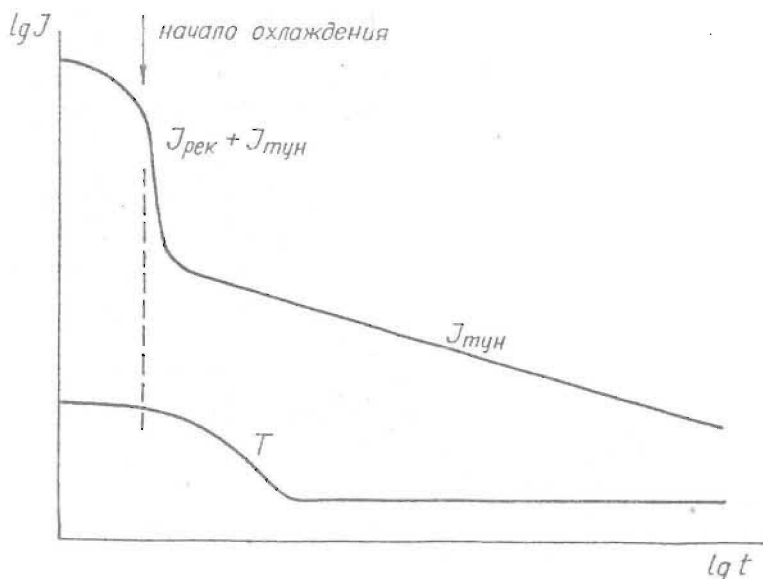


Рис. 2.

Метод термовысвечивания (ТВ)

Метод термовысвечивания [15-19, 23, 43-66], который относится к кинетическим методам с растущим девозбуждающим фактором, является одним из самых эффективных для исследования рекомбинационных процессов в твердом теле. Метод

привлекает простотой осуществления, наглядностью и возможностью непосредственно качественно оценить спектр и глубину центров захвата.

Идея метода заключается в измерении интенсивности свечения предварительно возбужденного образца в режиме нагрева с постоянной скоростью. Особенностью кинетики свечения в режиме нагрева является то, что с течением времени вероятность высвобождения возбуждений, локализованных на ЦЗ различных сортов, непрерывно увеличивается, притом неодинаково для ЦЗ с разной энергией тепловой ионизации E_k . Поэтому в режиме нагрева происходит последовательное нарастание и падение интенсивности свечения образца, обусловленное двумя процессами — нарастанием вероятности высвобождения локализованных возбуждений и уменьшением концентрации возбуждений на ЦЗ того сорта, которые наиболее эффективно опустошаются при данной температуре. Количественный расчет кривых термовысвечивания при тепловом опустошении ЦЗ и рекомбинации зонных возбуждений с локализованными на ЦР возбуждениями противоположного типа в упрощенной модели, рассмотренной при анализе кинетики затухания (m сортов ЦЗ, из которых опустошаются ЦЗ одного сорта с концентрацией N_{3k} , один сорт ЦР), сводится к следующему.

В режиме нагрева

$$T = T_0 + \beta t, \quad /12/$$

где T_0 — исходная температура, β — скорость нагрева, вероятность тепловой ионизации ЦЗ непостоянна, так как

$$\omega_{3k} = \omega_{3k0} \cdot e^{-\frac{E_k}{kT}}. \quad /13/$$

Интегрирование уравнений /2/, /3/ при учете /4/, /6/, полагая, что $T_0 = 0$, приводит к аналитическим выражениям для кривых термовысвечивания.

В случае кинетики первого порядка

$$J = q \cdot n_{\text{зко}} \frac{\sigma_p^- n_p}{\sum_{i=1}^m \sigma_{zi}^- \nu_{zi}} \cdot \omega_{\text{зко}} \cdot e^{\left[-\frac{E_k}{kT} - \frac{1}{\beta} \int_0^T \omega_{\text{зко}} dT \right]} \quad , /14/$$

а в случае второго порядка

$$J = q \cdot p \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\beta} \delta \omega_{\text{зко}} \int_0^T e^{-\frac{E_k}{kT}} dT \right)^2} \quad , /15/$$

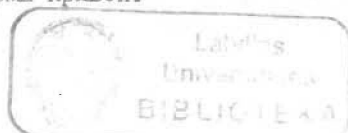
где

$$\delta = \frac{\sigma_p^- n_{\text{зко}}}{\sigma_{\text{зи}}^- \nu_{\text{зи}}} \quad , /16/$$

Из /14/, /15/ видно, что форма и положение максимума пика термовысвечивания определяется множеством параметров: глубиной E_k и частотным фактором $\omega_{\text{зко}} \nu_{\text{з}}$ k -того сорта, соотношением вероятностей захвата и рекомбинации, скоростью нагрева и порядком рекомбинационного процесса. Можно показать [16, 18, 19, 55, 58], что температура максимума пика приближенно пропорциональна глубине $\nu_{\text{з}}$, если остальные параметры постоянны, поэтому для оценки E_k можно пользоваться эмпирическим выражением

$$E_k = \frac{T_k(\text{макс})}{\alpha} \quad , \text{ где } \alpha = \{ 250 \div 700 \} \quad , /17/$$

Для оценки E_k и порядка рекомбинационного процесса по кривым термовысвечивания на практике наиболее часто используются способы анализа формы кривой.



Способ начальных приращений [17, 48, 49, 60, 61] основывается на допущении, что в начальных стадиях пика термовысвечивания заселенность центров захвата и рекомбинации меняется незначительно. Если $\Pi_{3n}, \Pi_r = \text{const.}$,

$$J \sim \omega_{3n0} \cdot e^{-\frac{E_n}{kT}}, \quad /18/$$

поэтому в координатной системе $\ln(J), 1/T$ начальная стадия кривой термовысвечивания представляет прямую, по наклону которой можно оценить E_n .

Если помимо кривой термовысвечивания определяется высвеченная светосумма, то для оценки энергии тепловой ионизации можно использовать результаты измерения всей кривой. Из сопоставления /2/, /3/ и /4/, /6/ следует, что в случае кинетики первого порядка

$$I_n \left(\frac{J}{n} \right) = A_1 - \frac{E_n}{kT}, \quad /19/$$

а в случае кинетики второго порядка

$$I_n \left(\frac{J}{n^2} \right) = A_2 - \frac{E_n}{kT}, \quad /20/$$

поэтому в соответствующей системе координат $(I_n(J/n), I_n(J/n^2), 1/T)$ весь пик термовысвечивания отображается прямой, по наклону которой можно определить E_n [17, 23]. Относительная концентрация заполненных ЦЗП_{3n} в зависимости от температуры вычисляется по измерениям высвеченной светосуммы.

Иногда для определения феноменологических параметров по кривым термовысвечивания пользуются геометрическими параметрами пика термовысвечивания: положением максимума и полушириной пика [18, 54], положением максимума пика при двух скоростях нагрева [19, 56] и др. Таким образом, для определения феноменологических параметров по кривым термовысвечивания развито множество способов. Однако эти способы применимы лишь при условии, что рассматриваемый пик термовы-

свечивания обусловлен опустошением ЦЗ одного сорта (см., например, [18, 23]). Если имеет место дисперсия ЦЗ по глубине или же одновременно в начальной или конечной стадиях пика опустошаются другие ЦЗ, определение параметров становится затруднительным. Поэтому метод термовысвечивания используется преимущественно для качественных исследований.

Рассмотрим требования к термическому режиму измерения кривых термовысвечивания. Кривые термовысвечивания измеряются преимущественно в режиме линейного нагрева. Скорость нагрева варьируется исследователем в пределах $0,01 - 15^{\circ}\text{K}/\text{сек}$. Чем ниже скорость нагрева, тем выше разрешение метода [18, 51], но уменьшается чувствительность и увеличивается время измерения. Поэтому наиболее приемлемыми являются скорости нагрева в пределах $0,01 - 0,2^{\circ}\text{K}/\text{сек}$. Перед измерением кривой термовысвечивания образец возбуждается при постоянной температуре, причем температура возбуждения может быть отличной от начальной температуры линейного нагрева. Поэтому желательно иметь возможность стабилизации заданной температуры возбуждения и малоинерционный переход к температуре начала линейного нагрева.

Метод фракционного термовысвечивания (ФТВ)

Среди неизотермических методов, применяемых для определения параметров центров захвата, метод фракционного термовысвечивания [67-71] занимает особое место не только из-за более высокой разрешающей способности, но и ввиду качественных отличий. Метод не требует предварительных предположений о моноэнергетичности ЦЗ. Дисперсия ЦЗ по глубине может быть установлена непосредственно по результатам эксперимента. Результатом измерений является четкая физическая величина - спектр энергий тепловой ионизации ЦЗ и функция распределения возбуждений по ЦЗ в момент опустошения. Существенным преимуществом метода представляется возможность

определить энергию тепловой ионизации ЦЗ в случае, когда одновременно опустошаются ЦЗ разной глубины.

Метод фракционного высвечивания является модификацией метода термовысвечивания. Идея метода составляет квазине-прерывное определение высвеченной светосуммы и средней энергии тепловой ионизации опустошаемых ЦЗ. Для измерения последней медленный нагрев образца модулируется осциллирующей температурой и определяется зависимость интенсивности люминесценции от температуры.

Рассмотрим основные положения метода в случае феноменологической зонной модели электронных рекомбинационных процессов и особенности применения метода, если необходимо учитывать диффузионный перенос и туннельную рекомбинацию возбуждений.

В случае произвольного набора моноэнергетических ЦЗ, которые могут опустошаться одновременно, интенсивность люминесценции

$$J = q \cdot \frac{dn_p}{dt} = q \cdot \delta \cdot \sum_{i=1}^m n_{zi} \cdot \omega_{zi0} \cdot e^{-\frac{E_i}{kT}}, \quad /21/$$

где

$$\delta = \frac{\sigma_p \cdot n_p}{\sum_{i=1}^m \sigma_{zi} \cdot v_{zi}} \quad /22/$$

q — квантовый выход рекомбинационной люминесценции.

Вводится средняя энергия тепловой ионизации эффективно опустошающихся ЦЗ, определяемая выражением

$$\hat{E} = \frac{-d[\ln(J)]}{d[1/kT]} = \frac{\sum_{i=1}^m E_i \omega_{zi0} e^{-\frac{E_i}{kT}}}{\sum_{i=1}^m \omega_{zi0} e^{-\frac{E_i}{kT}}} \cdot \quad /23/$$

$n_{zi} = \text{const}$

Условие $n_{zi} = \text{const}$ не может быть выполнено, так как свечение возникает лишь вследствие опустошения ЦЗ и после-

дущей рекомбинации. Для учета нестабильности n_{3i} зависимость интенсивности люминесценции от температуры измеряется как во время нагрева, так и во время последующего охлаждения образца (цикл "нагрев - охлаждение").

Зависимость $J(T)$ в течение одного цикла схематически представлена на рис. 3,а. Из-за непостоянства n_{3i} $J(T)$ в координатах $I_{\Pi}(J)$, $1/kT$ отклоняется от прямой, поэтому расчет энергии тепловой ионизации, согласно /23/, по измерениям во время нагрева приводит к заниженным значениям \hat{E} , а во время охлаждения - к завышенным. \hat{E} определяется как среднее по циклу "нагрев - охлаждение".

Таким образом, высвеченной в каждом цикле светосумме (определяется по зависимости интенсивности люминесценции от времени) соответствует некоторая средняя энергия тепловой ионизации I_{Σ} . Если число циклов "нагрев - охлаждение" достаточно велико, из эксперимента можно определить квазинепрерывную функцию $S(\hat{E})$. Энергетическим спектром ФТВ является зависимость $dS/d\hat{E}$ от \hat{E} [71]: высвеченная светосумма пропорциональна изменению заселенности I_{Σ} и в каждом цикле опустошаются преимущественно те I_{Σ} , энергия тепловой ионизации которых близка к \hat{E} . Размерность $dS/d\hat{E}$ соответствует плотности локальных состояний по энергиям.

Несмотря на конечную разрешающую способность и специфические погрешности, метод ФТВ позволяет получить более достоверную оценку спектра энергий тепловой ионизации и распределения возбуждений по I_{Σ} по сравнению с другими кинетическими методами [71].

При туннельных и диффузионных процессах опустошение I_{Σ} сопровождается кинетическими процессами переноса и рекомбинации, которые усложняют измерение энергии тепловой ионизации методом ФТВ.

Рассмотрим кратко несколько частных случаев, характерных для реальных кристаллофосфоров:

а) Помимо термоактивационных рекомбинационных процессов через зону проходит независимая от этих процессов туннель-

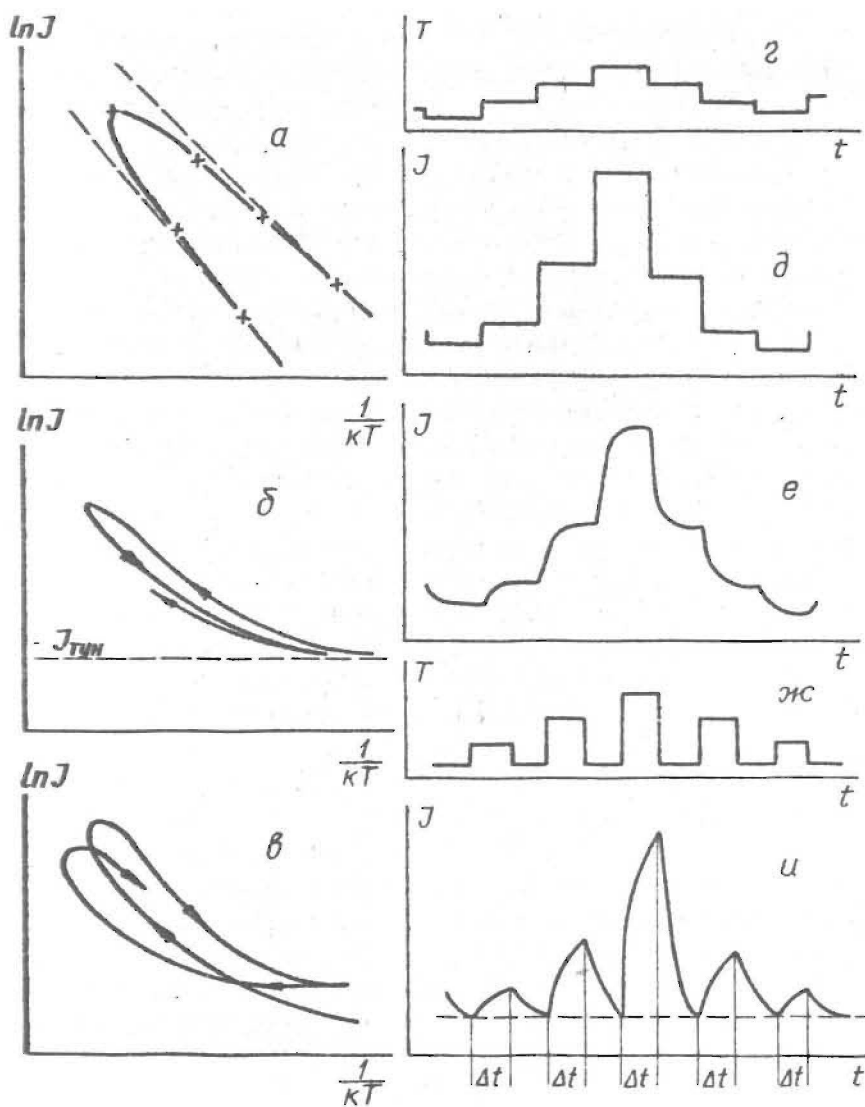


Рис. 3.

ная рекомбинация. Интенсивность люминесценции в этом случае складывается из температурно независимого свечения и свечения, обусловленного тепловым опустошением ЦЗ. Интенсивность люминесценции при охлаждении (рис. 3,б) стремится к определенной (зависящей от времени) величине, которая обусловлена туннельной рекомбинацией, что позволяет в эксперименте независимо определить туннельную составляющую в общем рекомбинационном свечении, вычислить интенсивность активационной люминесценции и среднюю энергию тепловой ионизации ЦЗ.

б) Рекомбинация в донорно-акцепторных парах. Носитель из ЦЗ делокализуется в зону, попадает на локальное возбужденное состояние донорно-акцепторной пары. Излучательный переход является спонтанным процессом, вероятность которого согласно [8] зависит от взаимного удаления донора и акцептора. Феноменологическая модель рекомбинационного процесса сводится к кинетическим уравнениям, если принять, что центры рекомбинации имеют "возбужденное" состояние и вероятность излучательного перехода в основное состояние распределена по закону, обусловленному функцией распределения донорно - акцепторных пар по расстояниям. Анализ кинетических уравнений и результатов эксперимента показывает, что зависимость интенсивности люминесценции от температуры в этом случае при фракционном нагреве является сложной функцией параметров режима (скорость нагрева и охлаждения, перепад температур в цикле), феноменологических параметров и функций распределения донорно-акцепторных пар. Это вызвано наложением двух кинетических процессов в неадиабатических условиях: опустошением ЦЗ и заполнением "возбужденных" состояний донорно - акцепторных пар (инерционность накопления является функцией вероятности рекомбинации). Зависимость $J(T)$ в координатах $I_p(J), 1/kT$ представлена на рис. 3,в. При повышении температуры нарастание интенсивности люминесценции запаздывает; при понижении вследствие рекомбинации ранее заполненных "возбужденных" состояний интенсивность люминесценции оказывается выше стационарного значения для соответствующей

температуры. В конечном счете наложение инерционных процессов излучения возбуждений в донорно-акцепторных парах приводит к тому, что фракционный режим нагрева с непрерывными осцилляциями температуры становится непригодным для определения \hat{E} .

Кинетика нарастания концентрации "возбужденных" состояний туннелирующих донорно-акцепторных пар в явном виде проявляется при скачкообразном изменении температуры образца (скорости генерации носителей в зону). Поэтому целесообразно видоизменить фракционный режим нагрева и непрерывные осцилляции температуры заменить ступенчатым режимом "нагрев - охлаждение" (рис. 3,г). При прямой рекомбинации зонных носителей с локализованными носителями противоположного типа в этом случае свечение безинерционно следует изменениям температуры (рис. 3,д). Интенсивность люминесценции измеряется при фиксированных постоянных температурах, из которых согласно /28/ рассчитывается \hat{E} .

В случае рекомбинации на донорно-акцепторных парах нарастание свечения после нагрева и спад после охлаждения становится инерционным (рис. 3,е). Анализ кинетических уравнений показывает, что стационарная интенсивность свечения не устанавливается вследствие накопления "возбужденных" пар с большим временем жизни. Однако кинетика нарастания люминесценции при одинаковых начальных условиях не зависит от температуры. Поэтому среднюю энергию тепловой ионизации ЦЗ можно определить по нестационарным значениям интенсивности, если измерения проведены в режиме с промежуточным охлаждением образца (рис. 3,ж,и).

в) Диффузионно контролируемые туннельные процессы. Рекомбинация возбуждений на ЦР в принципе может лимитироваться диффузией возбуждений, имеющей некоторую энергию тепловой активации (E_0) [42]. Кинетика люминесценции в этом случае зависит от температуры, однако при каждой температуре, спустя определенное время, устанавливается стационарное значение

люминесценции. Поэтому для определения E_D применим ступенчатый режим фракционного нагрева.

Таким образом, метод ФТВ имеет следующие информационные возможности:

- можно проследить механизм рекомбинационного процесса и обнаружить стадии туннельной и диффузионно контролируемой туннельной рекомбинации во время нагрева;
- метод позволит обнаружить температурно независимые компоненты в рекомбинационном свечении;
- в пределах разрешающей способности можно определить спектр энергий тепловой ионизации ЦЗ независимо от других феноменологических параметров;
- метод имеет более высокую разрешающую способность по сравнению с методом ТВ;
- удастся определить функцию заполнения ЦЗ в момент опустошения;
- при совместном измерении спектров ФТВ и ТВ можно найти частотные факторы ЦЗ;
- метод является единственным для определения E_i в случае одновременного опустошения ЦЗ разной глубины;
- спектры ФТВ могут служить критерием для выяснения моноэнергетичности ЦЗ.

Особенностью метода ФТВ является осциллирующий режим нагрева. Осцилляция температуры сопровождается медленным нарастанием температуры от цикла к циклу. В настоящее время используются два режима управления температурой: повышение и последующее понижение температуры образца с постоянной скоростью (рис. 4,а) [67-69] и ступенчатый "нагрев-охлаждение" (рис. 4,б).

Непрерывный осциллирующий режим нагрева характеризуется: скоростью нагрева (охлаждения) β , глубиной осцилляции $\Delta T_{\text{ц}}$ и приростом максимальной температуры $\Delta T_{\text{п}}$. Основным преимуществом непрерывного режима, по сравнению со ступенчатым, является простота криогенной аппаратуры и системы управле-

ния температурой, однако режим применим лишь при исследовании безинерционных (по сравнению с постоянной времени аппаратуры) термоактивационных рекомбинационных процессов. В противоположность этому ступенчатый режим универсален и позволяет, помимо зонных процессов, изучать рекомбинацию, в которой осуществляются туннельные и диффузионные явления. Реализация ступенчатого режима, однако, требует более сложной аппаратуры. Представляется целесообразным выбрать шесть ступенек в цикле, как это показано на рис. 4, б:

- 1 - для определения туннельных процессов;
- 2, 3 - для определения \hat{E} при нагреве;
- 4 - преимущественное опустошение ЦЗ;
- 5, 6 - для определения \hat{E} при охлаждении.

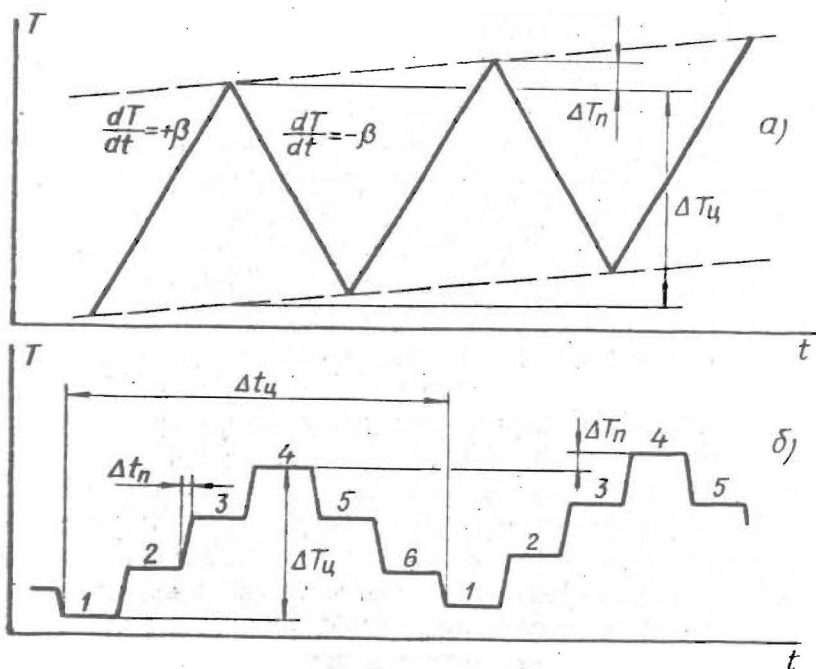


Рис. 4.

Анализ кинетики рекомбинации в режиме фракционного нагрева показывает, что важно выдерживать постоянным прирост максимальной температуры от цикла к циклу ΔT_n и времени цикла, так как эти параметры нагрева существенно сказываются на кинетике рекомбинационных процессов.

Метод постоянного сигнала (ПС)

Метод постоянного сигнала (ПС) [72] представляется перспективным для определения феноменологических параметров ПЗ, в том числе частотных факторов и порядка рекомбинационного процесса. Идея метода заключается в управлении температурой предварительно возбужденного образца с тем, чтобы поддерживать интенсивность рекомбинационной люминесценции постоянной. Информацию несет зависимость температуры образца от времени, которая измеряется, по крайней мере, при двух интенсивностях свечения.

Кратко рассмотрим основные положения метода ПС [72]. Для осуществления с какого-то момента режима $J = \text{const}$, в случае процессов первого порядка согласно уравнениям /2/, /4/ имеем

$$J = \frac{dn_{3k}}{dt} = J n_{3k} \omega_{3k0} \cdot e^{-\frac{E_k}{kT}}, \quad /24/$$

что осуществляется, если

$$n_{3k} = n_{3k0} \cdot e^{\frac{E_k}{kT}}, \quad /25/$$

Равенство /24/ справедливо при режиме нагрева

$$\frac{dT}{dt} = f(T), \quad /26/$$

Подстановкой /26/ в /24/, интегрированием уравнения /24/ и сравнением с /25/ можно получать аналитическую зависимость между t и T в виде:

$$\ln \left[-\frac{d(t-t_0)}{d(1/kT)} \right] = \ln E_k - \ln(\gamma \cdot \omega_{3k0}) + E_k \cdot \frac{1}{kT}, \quad /27/$$

где t_0 - момент начала высвечивания при постоянной J . Видно, что /27/ определяет прямую в координатах $\ln \left[- \frac{d(t-t_0)}{d(1/KT)} \right]$ $1/KT$, положение которой не зависит от T_0 , при которой осуществляется переход к режиму $J = \text{const}$. По наклону прямой определяется E_K , а по точке пересечения с осью ординат - величина $I_{\Pi}(\chi\omega_{3\text{к}0})$. В случае процессов второго порядка аналогичный расчет приводит к выражению:

$$\ln \left[- \frac{d(t-t_0)}{d(1/KT)} \right] = \ln \left(\frac{E_K}{2} \right) - t_{\Pi} \left(\frac{N_{3\text{к}0} \omega_{3\text{к}0} \sigma_p}{\sigma_{3\text{к}} \nu_{3\text{к}}} + \frac{E_K}{2kT_0} - \frac{E_K}{2kT} \right) \quad /29/$$

Очевидно, что при выборе различной величины постоянной интенсивности: люминесценции (различные T_0 при $t=t_0$) в этом случае получается семейство параллельных прямых, сдвинутых по оси ординат. Величины сдвигов определены членами соотношения /28/, содержащими T_0 и $N_{3\text{к}0}$. Это является основным признаком процессов второго порядка. Расчет в случае механизма диффузионно контролируемой туннельной люминесценции приводит к выражению типа /27/.

Таким образом, методом ПС в случае независимого опустошения ЦЗ можно определить:

- порядок рекомбинационного процесса;
- энергию тепловой ионизации;
- частотный фактор в случае процессов первого порядка.

Температура образца в методе ПС повышается по сложной зависимости, которая и является носителем информации. Для осуществления метода необходима исследовательская система с обратной связью, которая охватывает приборы измерения интенсивности свечения и аппаратуру управления температурой. Существенным представляется реализовать по возможности небольшие отклонения от заданной интенсивности, так как эти отклонения сказываются на кинетику опустошения ЦЗ. Нагрев образца, как правило, проходит с возрастающей скоростью, поэтому система должна обеспечить нагрев в широком диапазоне скоростей, перекрывающих по крайней

мере два порядка. Оптимальным диапазоном скорости нагрева является $\beta = 0,01^\circ\text{K}/\text{сек} - 1^\circ\text{K}/\text{сек}$.

Заключение

Выше рассмотрены четыре основных изотермических и неизотермических кинетических метода исследования рекомбинационных процессов при помощи измерения интенсивности свечения. Варьированием условий возбуждения и девозбуждения во время измерений представляется возможным осуществить богатый комплекс исследований микромеханизма рекомбинационных процессов, определения феноменологической модели и параметров.

Таким образом, для изучения инерционных стадий электронно-ионных релаксационных процессов в твердом теле с успехом могут быть применены как изотермические, так неизотермические спектрально-кинетические люминесцентные методы: измерение кинетики послесвечения, кривых термовысвечивания, спектров фракционного термовысвечивания и кривых постоянного сигнала. Эти методы дополняют друг друга при изучении механизма делокализации, переноса и рекомбинации возбуждений в твердом теле, спектра и феноменологических параметров центров захвата. Спектрально-кинетические люминесцентные методы незаменимы при исследовании таких малоизученных явлений, как диффузионный перенос и туннельная рекомбинация возбуждений. При измерении феноменологических параметров ЦЗ особенно перспективными представляются методы фракционного термовысвечивания и постоянного сигнала. Метод фракционного термовысвечивания, обладая высоким разрешением, позволяет непосредственно определить спектр энергий тепловой ионизации и функцию заполнения ЦЗ. Методом постоянного сигнала, независимо от других феноменологических параметров, измеряется частотный фактор и порядок рекомбинационного процесса.

Исследования комплексом методов КИ, ТВ, ФТВ и ПС могут быть проведены при помощи одной научно-исследовательской

системы, позволяющей измерять интенсивность слабых световых потоков, температуру образца, а также произвольно управлять температурой образца. Обязательными являются: термостатирование образца, импульсный нагрев - охлаждение с последующим термостатированием и нагрев с постоянной скоростью, т.е. режим слежения по заданной зависимости температуры от времени.

Л и т е р а т у р а

1. Кузьмин В.А. - Ученые записки ЛГУ, т.144. Кибернетизация научного эксперимента, вып.2. Рига, 1971, 3.
2. Тале И.А. - Ученые записки ЛГУ, т.160. Кибернетизация научного эксперимента, вып.3. Рига, 1972, II.
3. См. настоящий сборник, стр. 66.
4. Плявинь И.К. - Опт. и спектр., 1957, 2, 384; 1958, 4, 266; 1959, 7, 71.
5. Trinkler M.F., Plyavin I.K. - Phys.Stat.Sol., 1965, 11, 277.
6. Schulman J H., Boag J.W. - Phys.Stat.Sol., 1963, 2, 516.
7. Ueta M. - J.Phys.Soc.Japan, 1967, 22, 1265.
8. Сальков Е.А., Шейнкман М.К. - ФТТ, 1963, 5, 397.
9. Lashkarev V.E., Salkov E.A., Sheinkman M.K. Physic of Semiconductor. Dunod, Paris, 1964, p.973.
10. Haug A., Kohler B.E., Priestley E.B., Robinson G.W. - Rev.Sci.Instr., 1969, 40, 1439.
11. Schmid H. - Electr.Design, 1969, 17, 97.
12. Беломестных В.А., Касперович А.Н. - Автометрия, 1970, № 2, 53.
13. Blair I.M., Pooley D., Smith D. - Sol. St. Comm., 1969, 2 1615.
14. Клямбре Х.Ф., Луцкий Ч.Б. - Труды ИФА АН Эст.ССР, 1960, II, 150.
15. Urbah F. - Wien.Ber., Abt.II a, 1930, 139, 353.
16. Rendall J.T., Wilkins M.H.F. - Proc.Roy.Soc., 1945, A 184, 347, 366, 390.

17. Антонов-Романовский В.В. - Изв.АН СССР, сер.физ., 1946, 10, 477.
18. Лущик Ч.Б. - Труды ИФА АН Эст.ССР, 1955, 3, 17.
19. Парфианович И.А. - ЖЭТФ, 1954, 26, 697.
20. Bube R.H. - Phys.Rev., 1951, 83, 393.
21. Cowell T.A.T., Woods J. - Brit.J.Appl.Phys., 1967, 18, 1045.
22. Фок М.В. Введение в кинетику люминесценции кристаллофосфоров. М., "Наука", 1964.
23. Антонов-Романовский В.В. Кинетика фотолюминесценции кристаллофосфоров. М., "Наука", 1966.
24. Гайлитис А.А., Витол И.К. - Изв.АН СССР, сер.физ., 1971, 35, 1301.
25. Waite T.R. - Phys.Rev., 1957, 107, 463.
26. Добречо В.П., Шлимак И.С. - Физика и техника полупроводников, 1967, 1, 1478.
27. Williams F.E., Breazeale B.H. - Phys.Rev.Lett., 1967, 18, 1129.
28. Reiss H., Fuller C.S., Morin F.J. - Bell.Syst.Tehn.J., 1956, 35, 535.
29. Thomas D.G., Hopfield J.J., Colbow K. Radiative Recombination Semiconductor, Dunod, Paris, 1964, p.67.
30. Thomas D.G., Hopfield J.J., Augustyniak W.M. - Phys.Rev., 1965, 140, A 202.
31. Гросс Е.Ф., Сафаров В.И., Седов В.Е. - ФТТ, 1965, 7, 2217.
32. Prener J.S., Williams F.E. - Phys.Rev., 1956, 101, 1427.
33. Williams F.E. - J.Phys.Chem.Sol., 1960, 12, 265.
34. Apple E.A., Williams F.E. - J.Electrochem.Soc., 1959, 106, 224.
35. Shionoya S., Era K., Washizawa Y. - J.Phys.Soc.Japan, 1966, 21, 1624.
36. Delbecq C.J., Gnosh A.K., Yuster P.H. - Phys.Rev., 1966, 151, 599.
37. Keller F., Murray R.B. - Phys.Rev., 1966, 150, 670.
38. Patrick L. - Phys.Rev., 1966, 117, 6.
39. Kaufman R.G., Hadley W.B. - J.Chem.Phys., 1967, 47, 1.

40. Luchner K.M., Kallmann H.P., Kramer B., Wachter P. - Phys.Rev., 1963, 129, 2593.
41. Curia D. - J.Phys., 1967, 28, 5-6 Suppl., 105.
42. Тале И.А., Гайлитис А.А. - Изв.АН СССР, сер.физ., 1971, 35, 1336.
43. Бриллиантов Н.А., Моргенштерн З.Л. - ЖЭТФ, 1938, 8, 401.
44. Кац М.Л., Соломняк Р.Е. - ДАН СССР, 1939, 24, 682.
45. Дьяченко Л. - ЖЭТФ, 1940, 10, 288.
46. Garlich A., Wilkins M.H.F. - Proc.Roy.Soc., 1945, A184, 408.
47. Williams F.E., Eyring H. - J.Chem.Phys., 1947, 15, 289.
48. Кац М.Л. - ЖЭТФ, 1948, 18, 501.
49. Garlich A., Gibson A.F. - Proc.Phys.Soc.London, 1948, 60, 574.
50. Антонов-Романовский В.В. - ДАН СССР, 1949, 68, 457.
51. Williams F.E., Johnson P. - Proc.Phys.Soc., 1949, A 62, 318.
52. Bube R.H. - Phys.Rev., 1950, 80, 655.
53. Bull C., Masson D. - JOSA, 1951, 41, 718.
54. Grossweiner L. - J.Appl.Phys., 1953, 24, 1306.
55. Both A. - Canad.J.Chem., 1954, 32, 2.
56. Bohun A. - Czech.J.Phys., 1954, 4, 91.
57. Парфианович И.А. - ЖЭТФ, 1954, 26, 697.
58. Curie G., Curie D. - J.Phys.Rad., 1955, 16, 199.
59. Луцкий Ч.Б. - ДАН СССР, 1955, 101, 833.
60. Hill J.J., Schwed P.J. - J.Chem.Phys., 1955, 23, 652.
61. Naake C.H. - JOSA, 1957, 47, 649.
62. Weyl P.H. - J.Chem.Phys., 1957, 26, 547.
63. Hoogenstraaten W. - Philips Res.Rep., 1958, 13, 515.
64. Neulegerman F.G. - Ann.Physik, 1957, 20, 283.
65. Антонов-Романовский В.В. - Опт. и спектр., 1963, I, 207.
66. Halperin A., Brauer A. - Phys.Rev., 1960, 117, 408.
67. Gobrecht H., Hofmann D. - Phys.Kond.Materie, 1966, 2, 39.

2к

И.А.Тале

ПУТИ СОЗДАНИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К НИС ДЛЯ
СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Комплекс спектрально-кинетических люминесцентных методов измерения кинетики послесвечения (КП), кривых термовысвечивания (ТВ), спектров фракционного термовысвечивания (ФТВ) и кривых постоянного сигнала (ПС) можно осуществить одной научно-исследовательской системой, которая позволяет выполнить следующие функции [1]:

- а) измерение зависимости интенсивности люминесценции от времени ($J(t)$);
- б) измерение зависимости температуры образца от времени ($T(t)$);
- в) контролируемо управлять температурой образца.

В данной статье рассматриваются требования к соответствующим каналам измерений и каналу управления температурой с учетом возможностей создания автоматизированной системы исследования.

§ I. Требования к точности измерительных каналов

Рассматриваемые спектрально-кинетические люминесцентные методы требуют измерения трех величин: времени (t), температуры образца (T) и интенсивности люминесценции (J). В методе КП результатом измерений является непосредственная функциональная зависимость $J(t)$, полученная при постоянной температуре. Методом ТВ в режиме линейного нагрева измеряется зависимость $J(t)$, конечным результатом является непосредственно измеренная интенсивность.

Погрешности этих методов, следовательно, соответствуют погрешностям измерения интенсивности люминесценции и температуры.

Методом ПС измеряется зависимость температуры образца от времени ($T(t)$) при условии, что интенсивность рекомбинационной люминесценции соответствующим подбором температуры поддерживается постоянной ($J = \text{const.}$). Феноменологические параметры центров захвата (ЦЗ) — энергия тепловой ионизации (E) и частотный фактор (ω_0), а также порядок кинетики релаксации [2] определяются из всей совокупности измерений, проведенных в пределах опустошения ЦЗ одного сорта, поэтому погрешность определения феноменологических параметров методом ПС меньше погрешности измерения $T(t)$.

Метод ФТВ требует измерения $J(t)$ и $T(t)$ в осциллирующем (фракционном) режиме нагрева. Из измерений в пределах каждой осцилляции температуры (цикла "нагрев-охлаждение") определяются: высвеченная светосумма (ΔS) и средняя энергия тепловой ионизации ЦЗ (\hat{E}). ΔS вычисляется интегрированием $J(t)$, поэтому погрешность нахождения ΔS близка к погрешности измерения J . Определение \hat{E} методом ФТВ проводится по результатам измерения относительно небольших изменений T и J . Кроме того, число измерений в пределах каждого цикла ограничено. Метод ФТВ является наиболее чувствительным к погрешности измерения температуры и интенсивности люминесценции. Основные требования к точности измерительных каналов, видно, налагает именно этот метод, поэтому рассмотрим влияние погрешностей измерения температуры и интенсивности свечения на погрешности определения E методом ФТВ (определение времени, как правило, достаточно точно и погрешность в измерениях не вносит).

Средняя энергия тепловой ионизации ЦЗ методом ФТВ определяется из измерений люминесценции по крайней мере

при двух разных температурах T_1 и T_2 . Тогда [1, 3]:

$$\hat{E} = -k \frac{\ln\left(\frac{J_2}{J_1}\right)}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} = k \frac{T_1 \cdot T_2}{\Delta T} \cdot \ln\left(\frac{J_2}{J_1}\right), \quad /1/$$

Относительные ошибки в определении \hat{E} , вносимые погрешностями измерения $T, \Delta T, J$:

$$\frac{\sigma_{\hat{E}}(\Delta T)}{\hat{E}} = \frac{\sigma_{\Delta T}}{\Delta T}; \quad /2/$$

$$\frac{\sigma_{\hat{E}}(T)}{\hat{E}} = \frac{\sigma_T}{T}; \quad /3/$$

$$\frac{\sigma_{\hat{E}}(J)}{\hat{E}} = \frac{1}{\ln\left(\frac{J_2}{J_1}\right)} \cdot \frac{\sigma_J}{J}. \quad /4/$$

Общая относительная ошибка определения \hat{E} :

$$\frac{\sigma_{\hat{E}}}{\hat{E}} = \left\{ 2 \left(\frac{\sigma_T}{T} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2 + \left[\frac{1}{\ln\left(\frac{J_2}{J_1}\right)} \right]^2 \left[\left(\frac{\sigma_{J_2}}{J_2} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{J_1}}{J_1} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad /5/$$

Принимая, что основную погрешность в измерении интенсивности люминесценции вносят статистические флуктуации потока фотонов и квантового выхода фотоумножителя (измеряются слабые потоки света), согласно [4] имеем:

$$\frac{\sigma_{J_1}}{J_1} = \frac{\sigma_{J_2}}{J_2} \cdot \sqrt{\frac{J_2}{J_1}}. \quad /6/$$

Если известны \hat{E} и температура измерения T , то можно выразить относительную ошибку определения \hat{E} через величины $\Delta T, T_2, J_2$. Согласно [1] интенсив-

интенсивность рекомбинационной люминесценции пропорциональна вероятности тепловой ионизации ЦЗ:

$$J \sim \omega_0 \cdot e^{-\frac{E}{kT}} \quad /7/$$

Поэтому

$$\frac{J_2}{J_1} = e^{\frac{E}{kT_1} - \frac{\Delta T}{T_2 - \Delta T}}$$

и

$$\frac{\sigma_{\hat{E}}}{\hat{E}} = \left\{ 2 \left(\frac{\sigma_{T_2}}{T_2} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2 + \left[\frac{kT_2}{E} \cdot \left(\frac{T_2}{\Delta T} - 1 \right) \right]^2 \left(1 + e^{\frac{\hat{E}}{kT_2} \cdot \frac{1}{\frac{T_2}{\Delta T} - 1}} \right) \left(\frac{\sigma_{J_2}}{J_2} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad /8/$$

Таким образом, относительная погрешность измерения определяется относительными погрешностями измерения абсолютной температуры, разности температур и интенсивности люминесценции. Кроме того, точность определения \hat{E} зависит от выбора ΔT . На рис. I представлена зависимость относительной ошибки от разности температур измерения при следующих параметрах: $\sigma_{\Delta T} = 0,1^\circ$; $\sigma_T = 1^\circ$; $T = 100^\circ\text{K}$; $\hat{E} = 0,2$ эв; $\sigma_J / J = 0,1 - 10\%$. Видно, что имеется оптимальная разность температур измерений; погрешность определения \hat{E} в равной степени зависит от относительных погрешностей измерения T , ΔT , J . Анализ /8/ показывает что ошибки определения \hat{E} минимальны, если эти величины измеряются с равной относительной погрешностью. Относительная погрешность \hat{E} тогда в 2 - 3 раза выше погрешности измерения T , ΔT , J . Для определения \hat{E} с погрешностью, не превышающей 1%, необходимо создать измерительную систему, позволяющую измерить абсолютную температуру, разность температур и интенсивность люминесценции с погрешностью, не превышающей 0,3%.

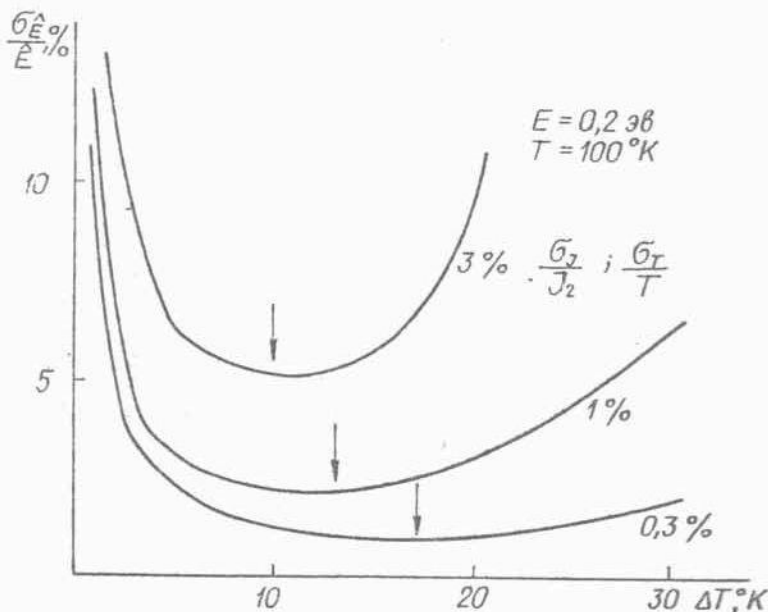


Рис. 1.

Анализ показывает, что эти требования обеспечивают высокую точность измерения методами КП, ТВ, ПС и могут быть приняты за исходные при проектировании исследовательской системы.

§ 2. Источники погрешностей измерительных каналов

Источники погрешностей при измерении слабых световых потоков [4, 5] :

- статистические флуктуации потока фотонов и квантового выхода приемника света;
- нелинейность приемника света;
- дрейф чувствительности приемника;

- дрейф и флуктуации темнового тока приемника;
- погрешности измерительного прибора.

Источниками систематических ошибок при измерении температуры образца термопарами могут быть [6 - 18] следующие:

- температура образца отличается от температуры спая термопары по следующим причинам: тепловое излучение окружающих предметов создает градиент температуры в образце; конечная теплопроводность проводов термопары приводит к отводу тепла через термопару;
- погрешности градуировки термопары;
- погрешности ванны опорной температуры;
- паразитные ЭДС в линиях термопар.

Источники случайных погрешностей:

- погрешности отсчета;
- шумы в термопарах и входных цепях измерительных приборов;
- динамические ошибки вследствие конечной постоянной времени установления теплового равновесия в системе образец-термопара.

Систематические ошибки доминируют при определении абсолютной температуры образца, случайные - при определении небольших разностей температур.

§ 3. Чувствительность и погрешность измерений слабых потоков света

Интенсивность свечения при проведении исследований методами ТВ и ПС обычно достаточно высока. В противоположность ТВ и ПС методы ФТВ и КП, как правило, требуют измерения предельно слабых потоков света.

Высокая чувствительность канала измерения люминесценции в методе ФТВ необходима для обеспечения большого

числа циклов "нагрев-охлаждение"; в методе КП инфракрасно в равной степени несет как начальные, так и конечные стадии послесвечения, в последних интенсивность люминесценции слаба.

В настоящее время разработаны измерительные приборы высокой точности, поэтому основную погрешность при измерении слабых потоков света вносит датчик - фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Чувствительность, точность и постоянная времени канала измерения интенсивности свечения взаимосвязаны ввиду статистических флуктуаций потока фотонов и квантового выхода фотоумножителя, а также наличия темнового тока. Флуктуации фото- и темнового тока проявляются в виде т.н. внутренних шумов фотоприемника, которые принципиально неустраняемы и определяют теоретическую границу точности и порога чувствительности ФЭУ.

Акты эмиссии отдельных фото- или термоэлектронов фотокатодом умножителя взаимно не связаны, и импульсы тока в анодной цепи, создаваемые отдельными электронами, случайно распределены во времени. Если в среднем за промежуток времени τ_0 поверхность катода испускает n электронов, то в отдельные промежутки времени τ_0 число электронов n может отличаться от этого среднего значения. Протекая по нагрузочному сопротивлению R_n , усиленный в M раз диодной системой, флуктуационный ток катода, называемый дробовым шумом, создает падение напряжения, среднее квадратичное значение которого равно [4]:

$$\overline{U_{др}^2} = \frac{1}{\tau_0} e i_0 R_n^2 M^2 \frac{m}{m-1} \approx 2 e i_0 R_n^2 M^2; \quad /9/$$

где $i_0 = i_{\phi} + i_{\tau} = \frac{e n_{\phi}}{\tau_0} + \frac{e n_{\tau}}{\tau_0} = \frac{e n_0}{\tau_0}$ - средний ток фотокатода, который является суммой фото- и темнового токов; e - заряд электрона; m - коэффициент усиления одного каскада диодной системы.

Наряду с шумами дробового эффекта пороговая чувствительность ФЭУ зависит от фликкер-шума катода, а также

от термозумов входных цепей измерительного прибора.

Фликкер-шум вызван флуктуациями чувствительности фотокатода во времени — случайными отклонениями квантового выхода облучаемой поверхности фотокатода от некоторой средней величины. Флуктуации чувствительности происходят в результате диффузионных процессов в катоде, приводящих к тому, что квантовый выход в каждой точке катода может отличаться от усредненного значения. Эти процессы протекают относительно медленно, поэтому фликкер-шум проявляется только в области низких частот: $f < 100$ гц.

Фликкер-шум в районе низких частот на порядок превышает дробовой шум фотокатода [4], поэтому для повышения пороговой чувствительности и точности предпочтительны модуляционные методы измерения с частотой модуляции 10^2 гц. Тепловые шумы входной цепи измерительного прибора равны:

$$U_T^2 = \frac{1}{C_0} 2 kT R_n . \quad /10/$$

Пороговую чувствительность и погрешность измерения интенсивности люминесценции характеризует отношение сигнал/шум:

$$\beta = \sqrt{\frac{U_c}{U_m^2}} = \frac{U_c}{\sqrt{U_{gp}^2 + U_T^2}} . \quad /11/$$

При постоянном световом потоке $U_c = J_{\Phi} R_n M$ отношение сигнал/шум равно:

$$\beta^2 = \frac{1}{C_0} \frac{i_{\Phi}^2}{2 e (i_{\Phi} + i_T) + \frac{2 kT}{R_n M}} . \quad /12/$$

При большом коэффициенте усиления диодной системы M влияние тепловых шумов сопротивлений нагрузки, очевидно, становится ничтожным и отношение сигнал/шум определяется дробовым эффектом. Тогда связь между погрешностью, обусловленной корпускулярной природой фотозффекта, чувствительностью и постоянной времени, выражается соотношении-

ем:

$$\beta = \frac{U_c}{\sqrt{U_m^2}} = \sqrt{C_0} \cdot \frac{i_{\Phi}}{\sqrt{2e(i_{\Phi} + I_T)}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{p_{\Phi}}{\sqrt{p_{\Phi} + n_x}} \quad /13/$$

Пороговая чувствительность измерительной системы вычисляется из условия $\beta = 1$:

$$i_{\Phi} = \frac{e}{C_0} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{I_T}{e/2C_0}} \right) \text{ или } p_{\Phi} = 1 + \sqrt{1 + 2n_x} \cdot /14/$$

Таким образом, пороговая чувствительность измерительного канала однозначно определяется темновым током ФЭУ. Из /13/ следует, что для повышения пороговой чувствительности необходимо:

- а) выбрать фотоумножитель с высоким квантовым выходом,
 - б) понизить темновой ток фотоумножителя,
 - в) увеличить постоянную времени измерительной системы.
- Последний способ увеличения чувствительности можно использовать при проведении исследований методом КП. В конечных стадиях наряду с уменьшением интенсивности кинетика после-свечения, как правило, стечивается инерционной. Поэтому для увеличения чувствительности желательно создать измерительный канал с управляемой постоянной времени.

Теоретический предел точности измерений также характеризуется отношением сигнал/шум и согласно /11/ определяется соотношением фото- и термотоков и постоянной времени измерительной системы. Уменьшение погрешностей измерений достигается теми же способами, как увеличение порога чувствительности.

Помимо шумов, на точность измерений существенно сказывается дрейф чувствительности фотоумножителя, который зависит от освещенности фотокатода. Дрейф чувствительности ФЭУ, как правило, медленный, но может достигь десятков процентов от начальной чувствительности [5]. Поэтому в из-

мерительном канале обязательно предусмотреть периодическое эталонирование измерений свечения относительно постоянного во времени светового потока.

§ 4. Пути создания канала измерения люминесценции

Основные требования к каналу измерения слабых потоков света следующие: а) максимальная чувствительность; б) точность не хуже 0,3 % (см. §1); в) постоянная времени измерительного прибора не больше 0,1 сек [I] ; г) возможность увеличить инерционность измерительного прибора во время эксперимента.

Канал измерения интенсивности люминесценции состоит из оптико-механической части, фотоприемника и измерительного прибора (рис.2).

Основные требования к оптико-механической части канала: а) высокая светосила для обеспечения чувствительности; б) возможность подачи эталонного света на фотоприемник для контроля дрейфа квантового выхода фотоприемника и обеспечения точности измерений. Оптико-механическая часть канала выполняет следующие функции (рис.2 а) : а) собирание измеряемого потока света на фотоприемник; б) спектральное разложение измеряемого света; в) подачу на фотоприемник эталонного света; г) периодическую коммутацию измеряемого и эталонного потоков света соответственно выбранному методу измерения.

Вариант оптико-механической части канала для измерения интегральных потоков света представлен на рис.2 б. Образец помещается в плоскости фокуса полированного эллипсоида, который собирает излучение образца на фотоприемник (ФЭУ, фотоспротивление), помещенный в плоскости второго фокуса. Этим осуществляется почти полное собирание измеряемого потока света на фотоприемник.

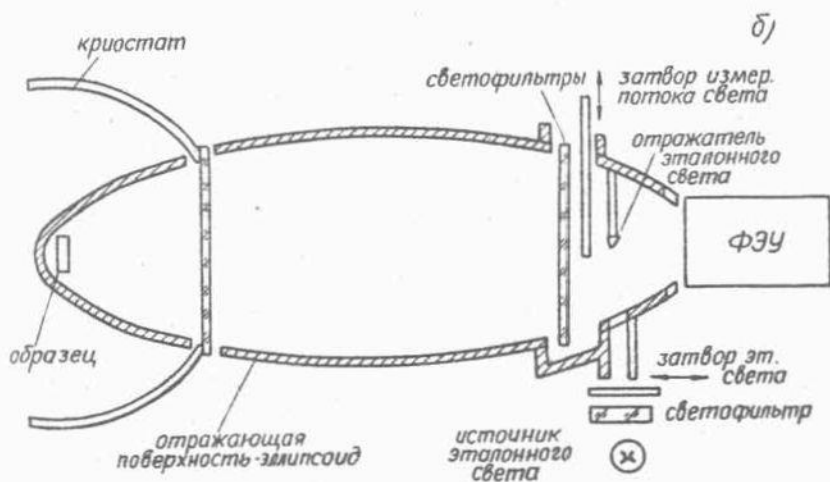
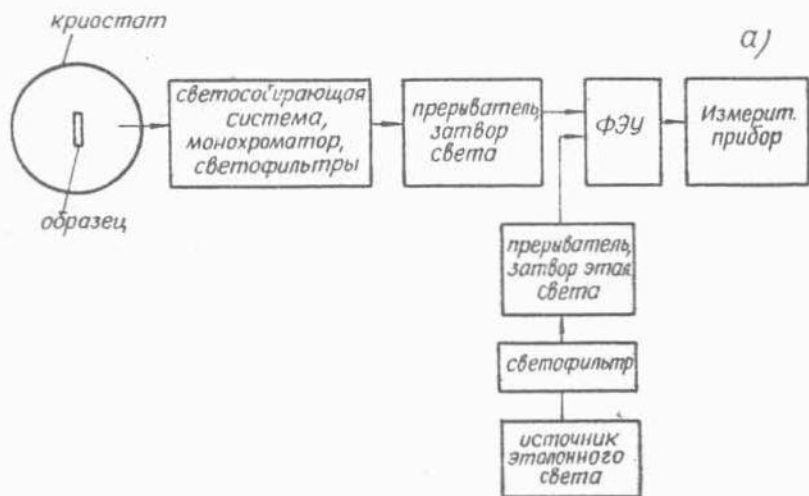


Рис. 2.

В эллипсоиде встроены затвор измеряемого потока света и предусмотрено место для помещения селективных светофильтров. Эталонный свет от соответствующего источника через небольшое отверстие в эллипсоиде попадает на отражатель света и затем на фотоприемник. Источником эталонного света может быть, например, лампа накаливания, питание которой стабилизировано, а сама лампа работает в изотермических условиях. При помощи затвора эталонный свет можно периодически подавать на фотоприемник. Сменные светофильтры позволяют варьировать спектральный состав эталонного света, который должен быть близким к спектральному составу измеряемого светового потока, особенно в длинноволновой области спектра (в районе сенсбилизации ФЭУ) [4] .

Алгоритмы измерения интенсивности люминесценции сводятся к следующему:

- а) измеряется эталонный свет ($J_{\text{эт}}$). При этом измеряемый свет перекрыт прерывателем (затвором) света;
- б) измеряется темновой ток фотоприемника (J_{T}). Прерывателем перекрыт измеряемый и эталонный свет;
- в) измеряется интенсивность свечения ($J_{\text{св}}$). Перекрыт эталонный свет.

Интенсивность люминесценции подсчитывается согласно выражению

$$J = \frac{J_{\text{св}} - J_{\text{T}}}{J_{\text{эт}} - J_{\text{T}}} \quad /15/$$

Высокоточные измерения возможны только при относительно высоких интенсивностях свечения, когда $J_{\text{св}}, J_{\text{эт}} \gg J_{\text{T}}$. Таким образом точность измерения интенсивности люминесценции определяется главным образом погрешностью двух непосредственно определяемых величин: $J_{\text{св}}$ и $J_{\text{эт}}$. Поэтому класс точности измерительного прибора должен по крайней мере в 2 раза превышать желаемую точность измерения интенсивности люминесценции. Этим требованиям удовлетво-

ряет измерительный прибор класса точности 0,1. Чувствительность измерительного прибора по току должна быть достаточной для измерения темнового тока фотоприемника. В случае применения ФЭУ чувствительность по току должна составить по крайней мере 10^{-11} а (темновой ток охлажденного ФЭУ составляет 10^{-10} а).

Измерительным прибором в канале (рис.2 а) может служить интегрирующий цифровой вольтметр или аналого-цифровой преобразователь (АЦП) [19, 20], счетчик фотонов [21] (методы измерения по постоянному току), синхродетектор [22], система цифрового синхродетектирования фототока [23], система цифрового синхродетектирования в режиме счета фотонов (модуляционные методы измерения).

В случае применения интегрирующего цифрового прибора регистрируется среднее значение фототока за время интегрирования (продолжительность интегрирования определяет инерционность). Применение интегрирующего аналого-цифрового преобразователя для измерения интенсивности люминесценции выгодно тем, что АЦП может обслуживать как канал измерения световых потоков, так и канал измерения температуры. Коммутатором каналов АЦП подключается либо к термодатчику, либо к фотоприемнику. Этим существенно упрощается электронная аппаратура измерительной системы.

Чувствительность счетчика фотонов несколько выше по сравнению с методом усреднения фототока. В этом приборе можно легко менять время счета, однако точность измерений при высоких интенсивностях ограничивается статистической вероятностью перекрывания однофотонных импульсов [21].

Преимуществом модуляционных методов измерения является возможность эффективного подавления фликкер-шумов ФЭУ [4]. Цифровое синхродетектирование представляет модуляционный вариант метода интегрирования, но в отличие от традиционных синхродетекторов (например, типа СД-1) позволяет непосредственно представить результаты в циф-

ровой форме и имеет более высокую точность. Система цифрового синхродетектирования в режиме счета фотонов представляется наиболее выгодной по пороговой чувствительности и при достаточно большой длительности счета (1 сек и больше) позволяет осуществить также измерения требуемой точности (0,1%). Следует отметить, что модуляционные методы измерения налагают жесткие требования на прерыватели в каналах измеряемого и эталонного световых потоков.

§ 5. Требования и пути создания канала измерения температуры

Для измерения спектров ФТВ (см. § 1) погрешность измерения абсолютной температуры (T) и разности температур (ΔT) в 10°K (см. рис. 1) не должна превышать 0,3%. Основные параметры канала измерения температуры следующие:

- диапазон измеряемых температур - $80^{\circ}\text{K} \div 550^{\circ}\text{K}$. Нижний предел определяется применяемым хладагентом - жидким азотом, верхний - температурами опустошения глубоких ЦЗ в ионных кристаллах и температурной зависимостью ионных процессов;

- погрешность измерения абсолютной температуры $\pm 0,3\%$, что составляет $0,25^{\circ}\text{K}$ при 80°K ;

- чувствительность и воспроизводимость измерений температуры $\pm 0,03^{\circ}\text{K}$. Этот параметр определяется необходимостью измерить небольшие разности температур в методах ФТВ и ПС;

- постоянная времени термодатчика не более 0,1 сек. Малоинерционность датчика необходима для проведения измерений непосредственно после нагрева или охлаждения образца.

- масса датчика не более 10 мг. Масса датчика должна быть намного меньше массы образца, которая, как правило,

порядка 0,1 г. Кроме того, конструкция системы должна обеспечить хороший тепловой контакт термодатчика с образцом и предотвратить отвод тепла по проводам датчика.

Таким образом, помимо высоких требований к точности, канал измерений температуры должен быть малоинерционным. Основную проблему составляет конструктивное решение размещения образца и термодатчика, а также выбор последнего. По малоинерционности наиболее подходящими термодатчиками являются термопары. В принципе параметры термопар удовлетворяют также остальным требованиям. Точность измерений термопарами ограничивается процессами диффузии в сплавах, из которых изготовлены термопары /что приводит к невоспроизводимости показаний/, разбросом чувствительности термопар вследствие непостоянства состава сплава, возникновением паразитных ЭДС в линиях термопары из-за неоднородности материала. Поэтому для проведения измерений термопарой с требуемой точностью и повторяемостью необходимо:

а) выбрать материал термопары, стабильный до температур 500°K ;

б) проводить индивидуальную градуировку термопары по месту вторичным термометром, с погрешностью не более 0,3 %;

в) термостатировать свободные концы термопары с погрешностью не более $0,01^{\circ}\text{K}$ (при 273°K).

Рассмотрим блок-схему канала измерения температуры и требования к измерительным приборам в случае, когда термодатчиком служит медно-константановая термопара. Эта термопара обладает относительно высокой чувствительностью - $16 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{K}$ при $T = 80^{\circ}\text{K}$. Максимальная ЭДС термопары ($80^{\circ}\text{K} - 500^{\circ}\text{K}$) составляет 16,3 мВ. Следовательно, требования к измерительному прибору следующие:

- диапазон 0 - 20 мВ;
- чувствительность $\pm 0,5 \text{ мкВ}$ ($\pm 0,3^{\circ}\text{K}$ при 80°K);
- постоянная времени $\tau < 1 \text{ сек.}$

Соответствующий этим требованиям измерительный прибор класса точности 0,0025 % и чувствительности $\pm 0,5$ мкВ как правило, недоступен. Решение задачи измерения температуры однако облегчается тем, что высокая чувствительность необходима для измерения разности температур, а диапазон — для измерений абсолютной температуры. Поэтому допустим медленный по сравнению с временем измерения разности температур дрейф показаний прибора. В блок-схеме (рис.3) показан один из вариантов организации канала измерения температуры. ЭДС термопары компенсируется потенциометром, который вырабатывает набор дискретных значений ЭДС с постоянным шагом (например, через каждые 0,5 мВ) от 0 до 20 мВ.

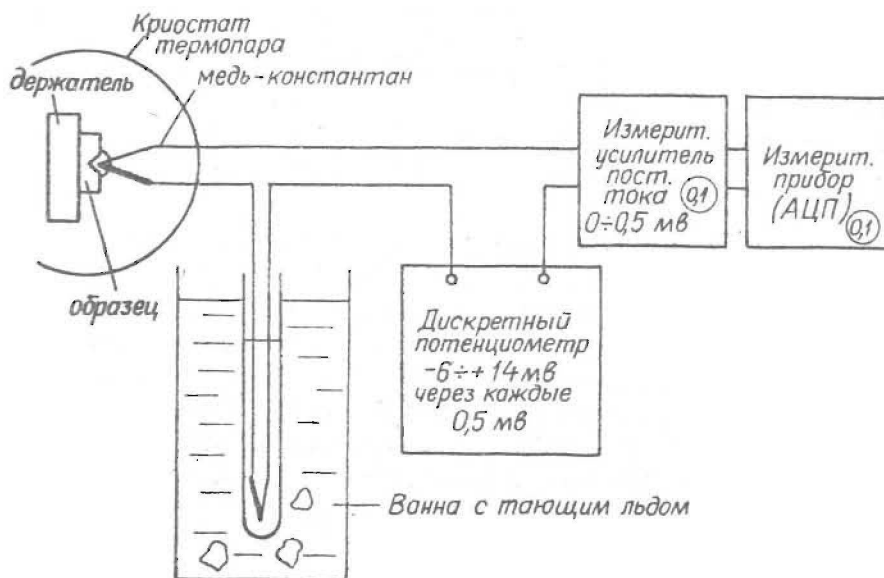


Рис.3.

Повторяемость установки потенциометра должна соответствовать требуемой чувствительности (+ 0,5 мкВ) измерительного канала в течение времени, достаточного для проведения измерений разности температур, по которым проводится расчет феноменологических параметров (в методе ФТВ – один цикл "нагрев-охлаждение" длительностью не более 200 сек). Максимальный дрейф ЭДС потенциометра не должен превышать величину, соответствующую 0,3 % абсолютной температуры (5 мкВ при 0,5 мВ, т.е. ~ 100°K; ~ 70 мкВ при 20 мВ), что вполне достижимо на промышленных элементах. После компенсации дискретным потенциометром на измерительный прибор поступает ЭДС, не превышающий шаг потенциометра (0 – 0,5 мВ при шаге потенциометра в 0,5 мВ). Таким образом удастся уменьшить требования к классу точности измерительного прибора (потенциометру с шагом в 0,5 мВ соответствует измерительный прибор класса точности 0,1 %). Если же чувствительность измерительного прибора недостаточна, в цепь термопары приходится включать усилитель постоянного тока того же класса точности.

Измерительными приборами могут служить ленточные самописцы либо цифровые милливольтметры.

§ 6. Требования к каналу управления температурой

Осуществление кинетических изотермических (КИ) и неизотермических (ТВ, ФТВ, ПС) методов возможно, если канал управления температурой позволяет реализовать следующие термические режимы [1]:

- а) термостатирование образца при заданной температуре,
- б) импульсный нагрев-охлаждение с переходом на термостатирование после достижения заданной температуры (КИ, ФТВ),
- в) нагрев (охлаждение) по заданной функциональной

зависимости $T(\dagger)$ (режим сложения) (ТВ, ФТВ, ПС).

Основные требования к этим режимам следуют как из специфики рассмотренных выше методов исследования, так и особенностей активационных рекомбинационных процессов. Анализ кинетических методов показывает, что основным критерием качества измерительно-возбуждающих каналов НИС является точность измерений температуры, разности температур и интенсивности люминесценции, а также точность осуществления заданного термического режима.

Рассмотрим требования к термическим режимам, налагаемые особенностями активационных процессов..

Режим термостатирования используется во время возбуждения (девозбуждения) образца и при проведении измерений методами КП и ФТВ (в последнем случае термостатирование совмещается с импульсным нагревом-охлаждением [I] : В случае изучения активационных процессов нестабильность температуры образца сказывается на погрешности измерения интенсивности люминесценции. Колебания интенсивности рекомбинационного свечения, вызванные нестабильностью температуры, очевидно, должны быть меньше погрешности измерения. Согласно [7], при повышении температуры образца на σT , имеет место прирост интенсивности свечения σJ :

$$\frac{J + \sigma J}{J} = e^{\frac{E}{kT} \cdot \frac{\sigma T}{T + \sigma T}} \quad /16/$$

При малых колебаниях температуры имеем:

$$\frac{\sigma J}{J} \approx \frac{kT}{E} \cdot \frac{\sigma T}{T} \quad /17/$$

Подставляя характерные для ионных кристаллов параметры эффективно опустошающихся ЦЗ ($E = 0,2$ эв при $100^\circ K$), можно оценить допустимую нестабильность температуры,

если задана погрешность измерения интенсивности свечения:

$$\frac{\sigma_I}{I} (\%) = 4 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\sigma_J}{J} (\%). \quad /18/$$

Таким образом, при желаемой точности измерений интенсивности свечения в 0,3% нестабильность температуры в режиме термостатирования не должна превышать 0,012% (0,012 °К при 100°К).

Воспроизводимость при установлении заданной температуры в принципе должна быть не хуже допустимых колебаний температуры. Однако, как следует из рассмотрения метода ФТВ (который налагает наиболее высокие требования к погрешностям измерений), воспроизводимость может быть несколько хуже и соответствовать точности измерения разности температур. Осцилляции температуры в этом методе порядка $0,1 \cdot T [I]$, поэтому воспроизводимость термического режима при желаемой точности измерения температур (0,3%) должна составить 0,03% (0,03°К при 100°К).

Шаг задания температуры при работе в режиме термостатирования также определяется требованиями метода ФТВ, в частности необходимостью от цикла к циклу незначительно увеличивать максимальную температуру образца. Оценка фракционного режима нагрева показывает [24], что нагрев образца от азотных до комнатных температур (80°К - 270°К) желательно разделить на 400 - 500 циклов. Таким образом, система управления температурой должна обеспечить задание температуры термостатирования по крайней мере через каждые 0,4 °К.

Импульсный режим "нагрев-охлаждение" по существу является режимом перехода от одной температуры термостатирования к другой. Методы КП и ФТВ не налагают требований на функциональную зависимость переходного процесса. Существенно лишь уменьшить время перехода, т.е. увеличить скорость нагрева (охлаждения) и уменьшить время "захвата" терморе-

гулятором. Руководствуясь инерционностью изучаемых кинетических процессов ($\tau \gg 1$ сек), временем измерения интенсивности люминесценции и температуры в методе ФТВ ($3 \div 10$ сек), которая должна быть соизмерима с временем нагрева (охлаждения), можно выдвинуть следующие требования к параметрам режима: скорость нагрева и охлаждения не менее $3 \div 5^\circ\text{K}/\text{сек}$, время перехода от импульсного режима к термостатированию не более 10 сек. Единственное ограничение функциональной зависимости перехода к термостатированию при импульсном нагреве, налагаемое наличием активационных процессов рекомбинации, заключается в том, что недопустим нагрев образца выше температуры термостатирования ("захват" должен быть аperiодичным). Действительно, перегрев образца приводит к резкому увеличению активационных процессов — опустошению ЦЗ, диффузии, поэтому неконтролируемый перегрев может привести к потерям запасенной светосуммы (уменьшение чувствительности измерений), к погрешностям в определении феноменологических параметров и в некоторых случаях даже к неконтролируемым изменениям кинетики изучаемого рекомбинационного процесса.

Режим слежения необходим при проведении измерений методами ТВ и ПС. Кривые ТВ измеряются преимущественно для качественного исследования спектра ЦЗ. Возрастающая с течением времени температура образца является девозбуждающим фактором, при этом измеряется зависимость интенсивности свечения от абсолютной температуры.

Допустимые отклонения температуры образца от заданной функциональной зависимости определяются погрешностью измерения температуры. Если погрешность измерений составляет 0,3 %, отклонения температуры образца при азотной температуре не должны превышать $0,2 \div 0,3^\circ\text{K}$. Скорость нагрева согласно требованиям метода ТВ необходимо варьировать в пределах $0,01 - 0,3^\circ\text{K}/\text{сек}$.

Суть метода ПС — поддержание такой температуры образца,

при которой интенсивность рекомбинационной люминесценции равна заданной. Информация извлекается из замеров температуры образца в заданные моменты времени. Система управления температурой должна обеспечить регулирование по постоянному параметру, который также измеряется. Таким образом, в обратную связь системы терморегуляции включается канал измерения интенсивности свечения. Сигналом ошибки, приводящим в действие систему управления температурой, является отклонение интенсивности свечения от заданной. Следовательно, алгоритм управления температурой по существу должен предусмотреть колебания температуры образца около некоторой средней, при которой интенсивность свечения равна заданной. Измерение этой средней температуры не составляет трудностей, однако колебания температуры образца могут оказывать влияние на ход кинетики опустошения ЦЗ, что косвенно сказывается на измеренную зависимость $T(t)$. Анализ показывает, что в случае синусоидальных колебаний температуры образца допустимы отклонения интенсивности свечения от заданной вплоть до 5 - 8 %. Допустимое отклонение температуры образца от заданной согласно /18/ составляет 0,2 %, что согласуется с требованием метода ТВ для режима слежения.

Основные требования к параметрам канала терморегуляции приведены на таблице рис.4.

Создание канала управления температурой, удовлетворяющей вышеизложенным требованиям (см.рис.4), сводится к разработке малоинерционного криостата для оптических измерений и соответствующего терморегулятора. Проблемы и пути создания малоинерционных криостатов, которые позволяют осуществить как термостатирование, так скачкообразные переходы от одной температуры к другой, рассмотрены в [25], а идеология создания канала управления температурой в [26].


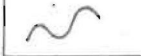
Параметр	Режим	Термоста- тирование	Импульсный	Слежение	Примечание
					
Максимальное отклонение от средней (заданной) температуры колебания температуры		<u>0,02%</u>	0,02%	0,2%	
Повторяемость установления температуры		<u>0,03%</u>	0,03%	—	
Квант задания температуры		0,4°K	0,4°K	<u>0,2°K</u>	¹ Для обеспечения квазинепрерывности слежения
Скорость нагрева/охлаждения		—	³ <u>> 3°K/сек</u>	<u>0,01 ÷ 0,3°K/сек</u>	³ Не допустим нагрев образца выше заданной температуры при импульсном нагреве
Диапазон температур		80 ÷ 550°K	80 ÷ 550°K	80 ÷ 550°K	² ² Хладагент – жидкий азот
Время перехода к термостатированию		—	<u>≤ 10 сек</u>	—	

Рис.4

§ 7. Целесообразность автоматизации комплекса спектрально-кинетических люминесцентных методов

При оценке целесообразности автоматизации исследований путем привлечения управляющих вычислительных машин (УВМ) для управления экспериментом, сбора и обработки информации учитывается [27]:

- 1) перспективность осуществления массовых измерений при помощи автоматизированных НИС;
- 2) возможность осуществления принципиально новых методов исследования;
- 3) возможность проведения традиционных методов исследования в режимах, практически невыполнимых без применения средств автоматизации;
- 4) увеличение информативности эксперимента за счет более высокой точности и чувствительности измерительной аппаратуры, быстродействия и воспроизводимости эксперимента.

Необходимо также учитывать трудоемкость создания и эксплуатации автоматизированной НИС и наличие материальной базы (УВМ, цифровые приборы).

Рассмотрим целесообразность привлечения УВМ для автоматизации исследований спектрально-кинетическими люминесцентными методами (КП, ТВ, ФТВ, ПС). Эти методы в настоящее время весьма распространены при изучении электронных неравновесных процессов в материалах с широкой запрещенной зоной. Анализ возможностей методов показывает, что рассмотренный выше комплекс с успехом может быть использован как для качественных, так и количественных исследований. Эти методы, таким образом, входят в число основных при изучении электронных явлений в твердом теле, т.е. рассматриваемая методика перспективна для проведения массовых измерений при изучении новых материалов [1]. Кроме того, как показывает анализ специ-

фики рассматриваемых методов, представляется возможным заранее формализовать алгоритмы управления эксперимента, т.е. создать программы, в которых предусмотрена возможность провести измерения в любых режимах данного спектрально - кинетического метода.

При проведении исследований спектрально-кинетическими люминесцентными методами (особенно ФТВ и ПС) традиционными приемами возникает ряд методических трудностей, обусловленных высокими требованиями к точности термического режима нагрева образца и необходимостью измерения, хранения и обработки больших массивов экспериментальной информации (Если при измерении спектра ФТВ в среднем проводится 200 - 400 циклов "нагрев-охлаждение" по 15 ± 20 измерений в цикле, общая информация - температура, интенсивность свечения, время - составляет 10 ± 25 тысяч четырехзначных чисел).

В методе ПС необходимо задать температуру образца, при которой интенсивность рекомбинационного свечения постоянна. Опыт показывает [28], что ручное управление из-за инерционности температуры, как правило, приводит к недопустимо большому колебанию интенсивности свечения и нарушению режима опустошения исследуемых ЦЗ. Для УЗМ же можно создать программу, которая учитывает инерционность системы терморегуляции.

Методически сложным оказалось также измерение спектров ФТВ [29]. Отклонения от заданного режима - немонотонное повышение средней температуры образца, перегрев (даже кратковременный), вариации времени "нагрев-охлаждение", приводит к немонотонному опустошению ЦЗ от цикла к циклу, вариациям средней температуры цикла и в конечном счете к понижению точности, чувствительности и разрешающей способности метода. Регистрация и ручная обработка экспериментальной информации чрезвычайно громоздки. Вероятность промаха экспериментатора, как показывает опыт измерения

спектров ФТВ на традиционной НИС (ручное управление, запись результатов на диаграммную ленту), при длительности измерений в $15 \div 20$ часов оказалась высокой. Измерение каждого спектра, даже допуская высокие отклонения от требуемого режима нагрева, в среднем пришлось проводить 2-3 раза.

Таким образом методы ПС и ФТВ требуют осуществления режимов нагрева, которые практически невыполнимы вручную. Привлечение УВМ для управления экспериментом приводит также к увеличению точности измерений и воспроизводимости условий эксперимента. При помощи УВМ легко осуществить первичную обработку результатов во время эксперимента, изменить постоянную времени измерительного прибора путем усреднения по переменному числу измерений, провести учет дрейфа чувствительности ФЭУ. Высокая воспроизводимость условий и режимов эксперимента приводит к принципиально важному преимуществу автоматизированного эксперимента – возможности количественно и с высокой надежностью сопоставить результаты измерений, проведенных в разное время при помощи единого алгоритма. Ручной эксперимент не всегда гарантирует повторение условий опыта, особенно, если основной задачей во время проведения опыта были количественные исследования.

При измерении спектров ФТВ оптимальными являются различные режимы нагрева в зависимости от механизма рекомбинационного процесса, который определяется по результатам измерения $J(T)$. В исследовательской системе с УВМ в контуре появляется возможность оптимизации эксперимента при измерении спектров ФТВ. Программой легко предусмотреть изменение режима нагрева в зависимости от промежуточных результатов расчета E и интенсивности туннельной люминесценции, а также предусмотреть пропуск районов температуры, в которых опустошение ЦЗ слабо, и этим сократить общее время измерения спектра.

Автоматизация НИС для спектрально-кинетических исследований приводит к увеличению производительности эксперимента, которая достигается в результате оптимизации режимов измерения, исключения промахов экспериментатора в управлении экспериментом и увеличения производительности обработки результатов. Последний фактор особенно существен при расчете спектров ФТВ, который при ручной обработке результатов занимает до 150 часов работы.

Автоматизация эксперимента принципиально необходима для создания методики измерения спектров фракционного термовысвечивания и кривых постоянного сигнала. Методы ТВ и КП осуществимы и проводятся, как правило, традиционными способами, однако автоматизированный эксперимент обладает всеми вышерассмотренными преимуществами, поэтому автоматизация этих методов желательна, но не обязательна.

Оценка дополнительных затрат инженерного труда на создание автоматизированной НИС представлена на рис.5. При оценке учитывались дополнительные затраты труда на создание измерительных и воздействующих каналов, канала связи "исследовательская система - УВМ" и программ управления экспериментом и обработки результатов.

Трудоемкость создания специализированного автомата для измерения спектров ФТВ оказывается выше, чем освоение УВМ. Кроме того, управляющий автомат работает по жесткому алгоритму и возможности модифицировать или изменить программу управления экспериментом представляются ограниченными. Автомат выполняет лишь функции управления экспериментом и сбора информации; для обработки результатов требуется УВМ. Предпочтительна поэтому автоматизация эксперимента при помощи УВМ, хотя освоение и эксплуатация машины требует дополнительного инженерно-технического персонала.

Затраты труда на измерение спектра ФТВ на автоматизированной НИС уменьшаются за счет увеличения производительности исследовательской системы и уменьшения

Способ управления экспериментом	Способ обработки результатов	Дополнительные затраты труда на автоматизацию (чел.ч.)	Затраты труда на проведение эксперимента (чел.ч.)	Затраты труда на обработку результатов (чел.ч.)	Минимальное число спектров, окупающих автоматизацию	Качество результатов измерений
Ручной	Ручной	—	30	200	—	<u>Плохое</u> Погрешности в режиме нагрева Сбай эксперимента
	ЭВМ	—	30	40	—	
Спец. автомат	ЭВМ	~9000	10	1	$\frac{40}{150}$	<u>Хорошее</u> Жесткий алгоритм эксперимента
УВМ	ЭВМ	~7000	10	—	$\frac{32}{115}$	<u>Хорошее</u> Возможность варьировать режим эксперимента

Рис. 5.

трудоемкости обработки результатов. УВМ может провести обработку результатов измерений во время эксперимента. Экономически выгодной представляется также возможность использовать для проведения исследований на автоматизированной НИС малоквалифицированного персонала - операторов, что экономит время научных работников. Увеличение производительности автоматизированного эксперимента очевидно, приводит к тому, что при длительной эксплуатации НИС затраты труда на автоматизацию окупаются. Соответствующая оценка показывает, что создание НИС с УВМ в контуре экономически оправдано, если впоследствии измерятся не менее 32 спектров ФТВ (115 спектров, если обработка неавтоматизированных измерений проводится на УВМ).

Автоматизация методики измерения спектров ФТВ таким образом представляется целесообразной по существу и реально выполнимой по экономическим и техническим соображениям.

§ 8. Организация НИС для работы в контуре с УВМ

Автоматизация эксперимента при помощи УВМ требует создания канала двухсторонней связи установки с УВМ, что, очевидно, также налагает специфические требования на конструкции узлов исследовательской системы. В настоящее время связь УВМ с внешними устройствами организуется либо при помощи централизованного устройства связи с объектом (УСО), либо путем создания локальных устройств обмена для каждого функционального узла исследовательской системы [30, 31].

Каждый из этих способов связи УВМ с внешними устройствами обладает своими преимуществами и недостатками - избыточностью аппаратуры, сложностью конструкции, помехоустойчивостью, надежностью, универсальностью и др. и перспективен при создании автоматизированных научно-исследо-

вательских систем. Можно, однако, выдвинуть общие требования к структуре и параметрам узлов исследовательской системы для обеспечения работы последних в контуре с УВМ независимо от способа осуществления связи.

Все функциональные узлы должны управляться стандартизированными сигналами — как в случае двухпозиционного, так и аналогового регулирования. Команды, определяющие состояние узла (типа "Включен", "Выключен"), осуществляются подачей на вход сигнала в течение всего времени действия команды. Команды, приводящие в действие локальные автоматы (типа "Пуск", "Останов", "Начальный останов"), осуществляются подачей сигнала либо в течение заданного времени, либо до поступления ответа, что команда автоматом воспринята. Числовая информация подается параллельным кодом в виде комбинации сигналов на входные шины функциональных узлов подобно командам, определяющим состояние узла.

Функциональные узлы должны выработать признак или набор признаков, однозначно характеризующих состояние узла, правильный прием и выполнение команд и наличие аварийных ситуаций. Подобно командам, признаки должны быть выставлены в виде потенциалов $U_{\text{мин}}$ либо $U_{\text{макс}}$ на время пребывания функционального узла в соответствующем состоянии. Организация системы выработки признаков представляется обязательной при создании НИС для работы в контуре с УВМ. Опрос признаков позволяет осуществить контроль за ходом эксперимента, за выдерживанием заданного режима воздействий на объект исследования, предотвратить промахи при измерении явлений и выявить сбои и аварии в работе узлов НИС. Таким образом система признаков обеспечивает высокую надежность результатов эксперимента. Исполнением признаков состояния узлов также значительно облегчается организация программы управления экспериментом, которая работает в реальном масштабе времени. Следова-

тельно, автоматизация эксперимента приводит к необходимости создания системных приборов, которые рассмотрены в [32]. Промышленные приборы, как правило, необходимо дополнить либо устройствами согласования входных и выходных параметров, либо микроавтоматами – преобразователями команд управления.

З а к л ю ч е н и е

Наиболее жесткие требования к измерительным каналам и каналу управления температурой налагаются методом ФТВ, поэтому при помощи НИС, предназначенной для измерения спектров ФТВ, можно проводить исследования также и остальными спектрально-кинетическими методами.

Автоматизация эксперимента – привлечение УВМ для управления НИС, сбора, обработки и хранения информации приводит к существенным преимуществам в научных исследованиях, в том числе к возможности осуществления измерений, практически невыполнимых вручную. Оптимизация режимов измерений и хода эксперимента, увеличение точности результатов и повторяемости условий эксперимента, высокая производительность автоматизированных систем измерения во многих случаях делает автоматизацию исследований целесообразной.

Автоматизация НИС при помощи УВМ налагает дополнительные требования на функциональные узлы и приборы, входящие в систему. Промышленность в настоящее время выпускает недостаточно приборов, предназначенных для работы в контуре с УВМ, поэтому промышленные приборы, как правило, необходимо дополнять устройствами согласования, а в ряде случаев создавать принципиально новые узлы для комплектации НИС, которые организованы по принципу системных приборов. Часть этих узлов, конечно, представляют уникальные конструкции, необходимые лишь для данной системы.

Создание автоматизированной НИС для спектрально-кине-

тических люминесцентных измерений сводится к решению следующих задач:

1. Разработка НИС, предназначенной для работы в конфигурации с УВМ.
2. Разработка согласующих устройств и системы связи с УВМ.
3. Составление математического обеспечения эксперимента.

При разработке стенда исследований необходимо создать:

а) малоинерционный криостат и соответствующий терморегулятор;

б) набор оптико-механических приборов для комплектации оптических каналов возбуждения и измерения (либо создать узлы возбуждения и измерения);

в) стенд для сбора вакуумной, криогенной и оптико-механической аппаратуры;

г) автомат развертки спектральных приборов;

д) систему измерения слабых потоков света (интегрирующий АЩ, счетчик фотонов, цифровой синхродетектор);

е) методику измерения температуры (конструктивное размещение термопар, термостатирование холодных спаев, градуировка по месту, измерение ЭДС термопар).

Для осуществления связи НИС - УВМ необходимо разработать:

а) индивидуальные согласующие устройства к промышленным приборам (АЩ, монохроматоры и др.) для обмена информацией с УВМ;

б) исполнительные преобразователи к оптико-механическим приборам и другим нестандартным приборам;

в) инженерные пульты управления;

г) линии связи НИС - УСО "Днепр-1";

д) систему контроля за ходом эксперимента, в том числе;

- осциллоскопический вывод графической информации,

- набор признаков о режиме работы системы.

Математическое обеспечение, обязательное для эксплу-

атации НИС, должно включать:

а) программы управления экспериментом, вывода контрольной информации и первичной обработки результатов измерений;

б) программы конечной обработки результатов измерений;

в) тест - программы для контроля работы, градуировки и настройки узлов НИС.

Решением этих научно-исследовательских задач представляется возможным осуществить новый подход к организации и осуществлению научных исследований в области физики твердого тела.

Л и т е р а т у р а

1. См. настоящий сборник, стр.66.
2. Гайлитис А.А., Яясон Я.Л., Витол И.К.- Изв.АН СССР, сер.физ., 1969, 33, 977.
3. Gobrecht H., Hofmann D.-J.Phys.Chem.Sol.,1966,27,509.
4. Соболева Н.А., Берковский А.Г., Чечик Н.О., Елисеев Р.Е. Фотоэлектронные приборы. М., "Наука", 1965.
5. Гартманн В., Бернгард Ф. Фотоэлектронные умножители. М., Госэнергоиздат, 1961.
6. Брачин Б.К., Тетрева Р.Н. - Измерит.техника, 1964, №6, 30.
7. Сирота А.М., Мальцев Б.К.- Заводская лаборат., 1960, №1, 120.
8. Брачин Б.К., Пупышева Н.Г. Исследование сплавов для термомпар, - Труды НИИ сплавов и обработки цветных металлов, 1967, вып.25, 127.
9. Макаров Б.И., Корнилов В.В.- Измерит.техника, 1966, №9, 46.
10. Танака М., Окада К.- В сб.: Методы измерения температур. ИЛ, 1954, стр.195.
11. Эргардт Н.Н. Исследования в области температурных измерений. - Труды Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР, 1961, вып.51(III), 89.

12. Гордов А.Н. Исследования в области температурных измерений.— Труды Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР, 1961, вып.51(III),172.
13. Зинченко В.М.— Измерит.техника, 1970, №7, 40.
14. Павлов Б.М.— Измерит.техника, 1970, №9, 56.
15. Hust J.G.—Rev.Sci.Instr., 1970, 41, 622.
16. Rev.Sci.Instr., 1968, 39, 1397.
17. Bauerl A.H.—Rev.Sci.Intr., 1961, 32, 386.
18. Пилипчук Б.И. Исследования в области термометрии. — Труды ВНИИМ, 1964, вып.4, 50.
19. Кэй. — Электроника (Русский перевод), 1966, №7, 3.
20. Прянишников В.А. — Приборы и системы управления, 1970, №11, 35.
21. См. настоящий сборник, стр.216.
22. Joung P.H.—Electron.Design, 1971, Nr.12, 64.
23. Morris E.D. Jr., Johnston H.S.—Rev.Sci.Instr., 1968, 39, 620.
24. Gobrecht H., Nelkowski H., Hofmann D., Müller B.—In: International Conference on Luminescence Budapest 1966.
6, 2, 188.
25. См. настоящий сборник, стр.95.
26. См. настоящий сборник, стр.138.
27. Тале И.А. — Ученые записки ЛГУ, т.160. Кибернетизация научного эксперимента, вып.3. Рига, 1972, II.
28. Тале И.А., Гайлитис А.А.— В сб.: Материалы XIX совещания по люминесценции (кристаллофосфоры), ч.1. Рига, 1970, 176.
29. Тале И.А., Гайлитис А.А.— Изв.АН СССР, сер.физ., 1969, 33, 1081.
30. Ищенко Е.Л., Малиновский Б.Н., Полищук Г.А. Управляющая машина широкого назначения "Днипро". Киев, "Наукова думка", 1964.
31. Бернуп А.А.— Автоматика и вычислительная техника (в печати).
32. Плаудис А.Э.— Ученые записки ЛГУ, т.160. Кибернетизация научного эксперимента, вып.3. Рига, 1972, 66.

32
А.Э.Плаудис, И.А.Тале

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КОМПЛЕКСОМ ЛУМИНЕСЦЕНТНЫХ МЕТОДОВ

В Латвийском государственном университете им.П.Стучки разработана автоматизированная научно-исследовательская система (НИС), предназначенная для изучения электронно-ионных неравновесных процессов в кристаллических и неупорядоченных структурах, обладающих рекомбинационным свечением. По комплектации и техническим характеристикам (спектральный район, диапазон температур и др.) НИС можно использовать для изучения материалов с широкой запрещенной зоной (ионные кристаллы, соединения типа A_nB_m , кварц, окислы и др.). Система позволяет провести исследования путем измерения инерционных стадий кинетики релаксации и стационарных значений люминесценции.

Основными (базовыми) спектрально-кинетическими методами исследования при помощи НИС являются:

- 1) кинетика послесвечения (КП);
- 2) термовысвечивание (ТВ);
- 3) фракционное термовысвечивание (ФТВ);
- 4) метод постоянного сигнала (постоянной интенсивности рекомбинационного свечения - ПС).

Информационные возможности этих методов рассмотрены в [1].

Система позволяет также осуществить измерения другими люминесцентными методами, которые являются либо модификацией перечисленных выше - базовых, либо измерениями стационарных характеристик, в том числе определение:

- 1) спектров люминесценции при фото- или рентгеновском возбуждении;
- 2) спектров возбуждения и стимуляции люминесценции;
- 3) зависимости стационарного свечения от интенсивности возбуждения;

- 4) спектров излучения в пиках термовысвечивания;
- 5) кривых фототермовысвечивания;
- 6) температурной зависимости квантового выхода люминесценции.

При автоматизированном эксперименте функции программного управления, а также сбор и обработку измерительной информации выполняет ЭВМ. Целесообразность автоматизации НИС для спектрально-кинетических люминесцентных исследований рассмотрена в [2].

Предусмотрена также возможность автономного использования НИС.

В настоящей статье рассматриваются функциональная схема, блок-схемы и конструкция НИС, а также функциональные и конструктивные особенности НИС, обусловленные автоматизацией исследований с привлечением ЭВМ.

§ I. Функциональная схема НИС

Согласно сущности базовых спектрально-кинетических методов [1, 3] НИС имеет два обязательных измерительных и один воздействующий каналы (рис.1):

- а) канал измерения монохроматических и интегральных слабых потоков света;
- б) канал измерения температуры образца;
- в) канал управления температурой образца по заданной зависимости от времени.

Кроме того, для проведения исследований НИС имеет следующие каналы возбуждающих и девозбуждающих воздействий:

- а) канал воздействия рентгеновскими лучами;
- б) канал воздействия монохроматическим светом;
- в) светосильный канал воздействия светом (спектральные районы выделяются селективными светофильтрами).

Программное управление экспериментом и сбор измери-

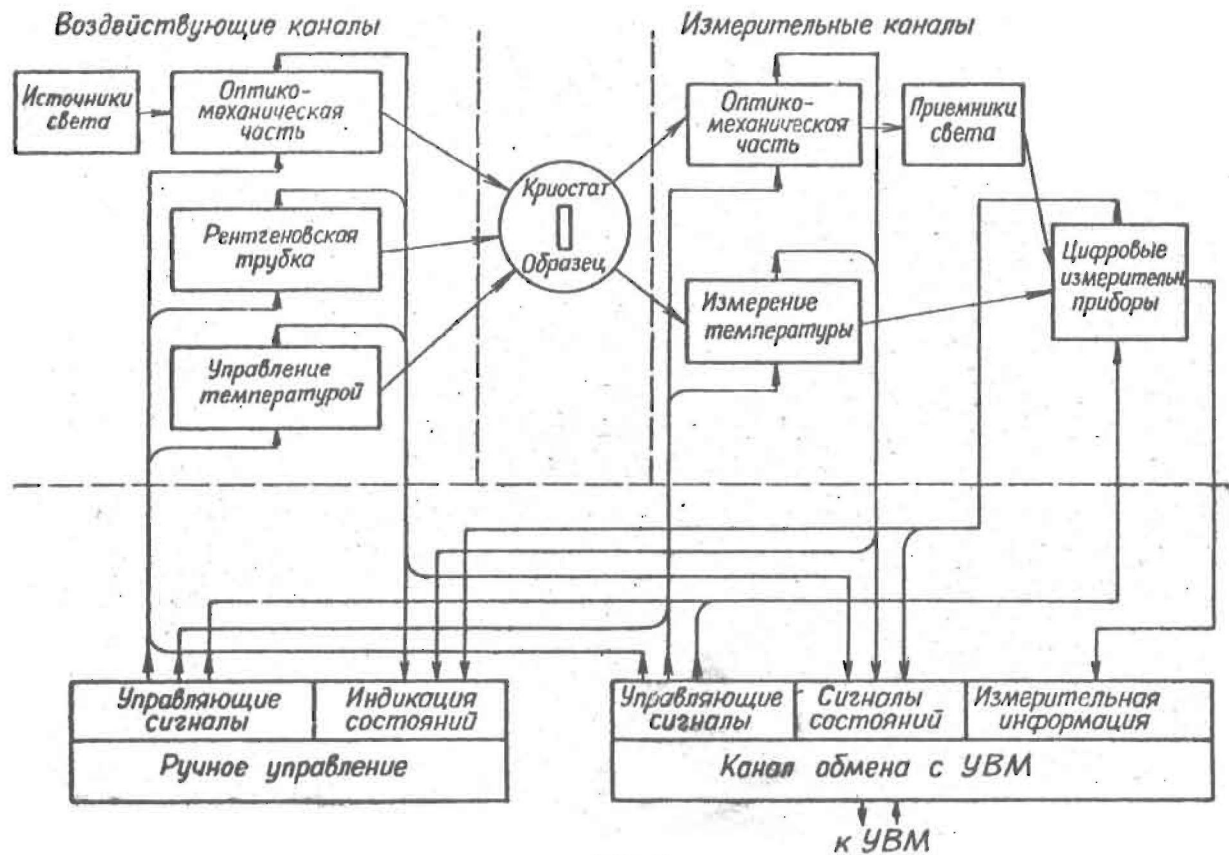


Рис. 1

тельной информации при помощи ЭВМ требует особого конструктивного решения воздействующих и измерительных каналов, органов ручного управления и визуального контроля состояния каналов, а также введения канала для сопряжения НИС с ЭВМ.

Рассмотрим функции каналов НИС в автоматизированном эксперименте. От ЭВМ на соответствующий воздействующий или измерительный канал поступают команды в виде дискретных сигналов. Каждая команда переводит приборы канала от заданного ранее в новое состояние. Выполнение команд сопровождается выработкой каналом контрольной информации, которая поступает на органы визуального контроля и через канал связи на ЭВМ. Измерительная информация от цифровых измерительных приборов через канал связи поступает непосредственно в ЭВМ, а также может быть визуально считана с цифровых индикаторов этих преобразователей. Весь эксперимент таким образом состоит из ряда команд управления воздействующими и измерительными каналами, выполнения этих команд и из операций контроля состояния каналов и сбора измерительной информации. Последовательность этих операций в реальном масштабе времени определяется алгоритмом эксперимента.

В случае автономных, неавтоматизированных исследований действие НИС регулируется органами ручного управления которые дублируют работу ЭВМ. Результаты измерений считываются визуально с цифровых индикаторов либо записываются цифропечатающим устройством, перфоратором и т.п. Состояние каждого канала контролируется визуальными индикаторами.

§ 2. Структура НИС

Структура рассматриваемой НИС выбрана с целью обеспечения:

- 1) соблюдения требований к функциональным каналам,

налагаемых комплексом спектрально-кинетических люминесцентных методов [3];

2) оперативной смены методики эксперимента, что особенно необходимо в случае поисковых исследований;

3) возможностей дальнейшего развития НИС (дополнение новой аппаратурой, методикой, алгоритмами, улучшение параметров каналов);

4) программного управления экспериментом при помощи УВМ.

Воздействующие и измерительные каналы сконфигурованы из унифицированных приборов — элементов НИС (блочный принцип построения НИС).

Для обеспечения работы НИС с УВМ в контуре элементы воздействующих и измерительных каналов являются системными приборами, для которых характерны единые технические параметры сигналов управляющей и контрольной информации. Обмен информацией через внешние связи должен проводиться между рассматриваемым прибором и другими элементами структуры НИС, поэтому конструктивное и техническое выполнение внешних связей должно обеспечивать возможность взаимного сопряжения. Промышленные приборы при использовании в НИС дополнены согласующими устройствами. Идеология построения системных приборов рассмотрена в [4]. Всем признакам системного прибора соответствуют также функциональные каналы НИС в целом.

Те элементы воздействующих и измерительных каналов, которые программно управляются во время эксперимента, вырабатывают контрольную информацию, однозначно характеризующую их состояние или динамику работы.

Управление функциональными каналами и сбор контрольной и измерительной информации в автоматизированной НИС централизованные. Между системными приборами, образующими функциональные каналы, и УВМ организована связь без промежуточных, иерархических структур управления и переработки информации.

§ 3. Элементная база НИС

Для комплектации воздействующих и измерительных каналов НИС помимо промышленных приборов разработаны унифицированные электронные, криогенные и оптико-механические элементы:

1) интегрирующий цифровой вольтметр (аналого-цифровой преобразователь);

2) набор цифро-аналоговых преобразователей;

3) преобразователь код-угол поворота для установления длины волны монохроматора [5];

4) канал управления температурой скоростного азотного криостата [6, 7];

5) счетчик фотонов [8];

6) согласующие устройства для управления и контроля состояния электромеханических приборов типа "включен-выключен";

7) набор стабилизированных источников питания для ламп накаливания и спектральных водородных (дейтериевых) ламп;

8) скоростной азотный криостат [9, 10];

9) элементы оптико-механической части каналов: затвор света, коммутатор пучков света, прибор для смены светофильтров, рентгеновская лампа с затвором, источник эталонного света, а также прерыватель (модулятор) света, держатели линз, набор коробок для ФЭУ, набор держателей источников света и монтажные принадлежности оптико-механической части [11, 12]. Элементы, указанные в пунктах 1-5, являются системными приборами; элементы пункта 9 в комплексе с согласующими устройствами пункта 6 образуют системные приборы.

§ 4. Канал измерения слабых потоков света

Интенсивность люминесценции в НИС определяется: а) методом счета однофотонных импульсов ФЭУ [8], б) измерением

среднего значения анодного тока ФЭУ в заданном интервале времени. Метод счета фотонов обладает более высокой пороговой чувствительностью, однако счетчик фотонов, разработанный в настоящее время на базе ФЭУ-64 отечественного производства, имеет ограниченный спектральный район чувствительности (300 - 600 нм). Расширение района спектральной чувствительности (200 - 1200 нм) в НИС достигается применением ФЭУ с фотоатодами из разного материала, однако в этом случае канал комплектуется приборами для измерения среднего анодного тока фотоэлектронного умножителя.

НИС имеет два канала для измерения интенсивности люминесценции: а) светосильный канал для измерения интегральных слабых потоков света (рис.2); б) канал для спектральных измерений (рис.3). Каналы состоят из оптико-механической части, ФЭУ и измерительных приборов. ФЭУ и измерительные приборы, определяющие метод измерения и спектральные характеристики, в каналах взаимозаменяемы.

Оптико-механическая часть каналов обеспечивает подачу на фотоатод двух потоков света: измеряемого и эталонного. Периодическое измерение эталонного света проводится для контроля и учета дрейфа чувствительности ФЭУ [3].

Рассмотрим блок-схему канала для измерения интегральных слабых потоков света (рис.2). Измеряемый поток света от образца 1, который находится в кристате 2, системой линз 3, 4 из плавленого кварца собирается на фотоатод ФЭУ 5. Одна из линз с коротким фокусным расстоянием (образец находится между фокусом и двойным фокусом линзы) помещается непосредственно в окно кристата и определяет апертуру канала. На пути измеряемого света между кристатом и коробкой с ФЭУ находится затвор 6 света, позволяющий перекрыть канал, и прибор 7 для смены светофильтров, при помощи которых можно выделить необходимый спектральный район измеряемого света, а также диффузный отражатель 8 эталонного света.

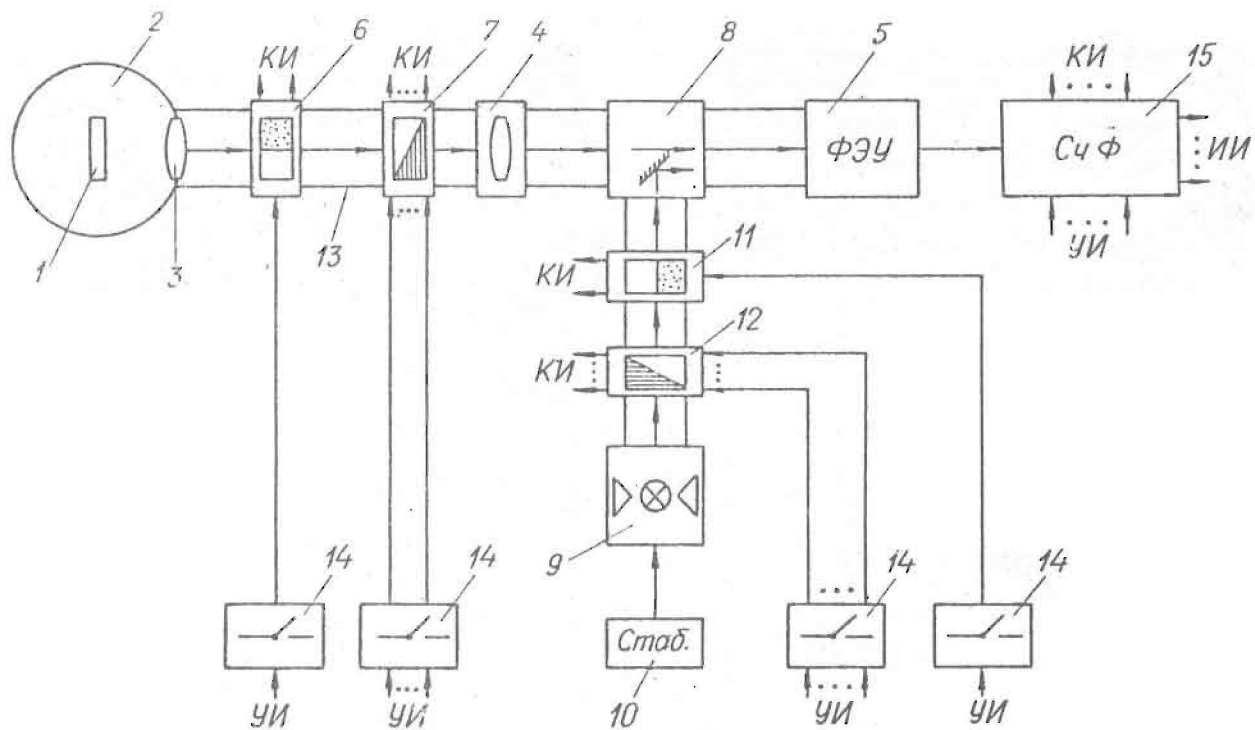


Рис.2.

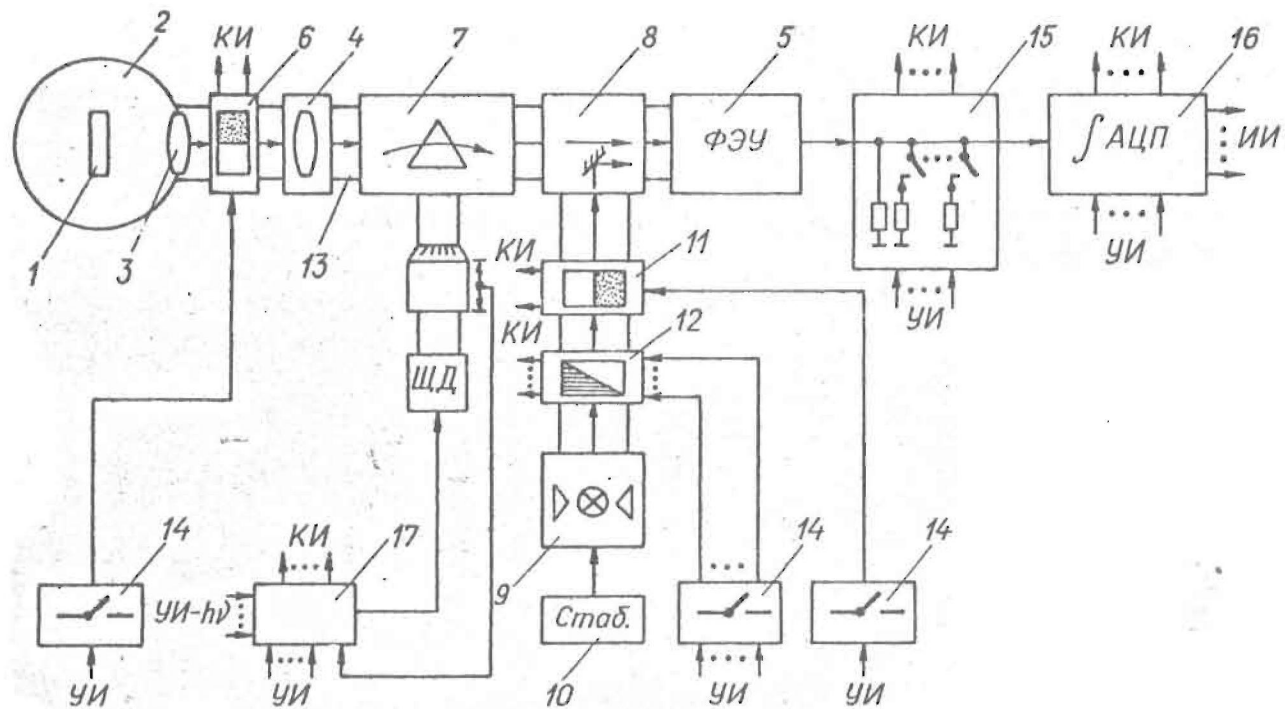


Рис. 3

Источником эталонного света служит лампа 9 накаливания, питаемая от стабилизатора 10 напряжением, которое на $10 \pm 20\%$ ниже номинального напряжения питания лампы. Эталонный свет проходит селективные и нейтральные светофильтры 12, при помощи которых устанавливается спектральный состав и интенсивность эталонного света, затвор 11, попадает на диффузный отражатель 8 в канале измеряемого света и на ФЭУ. Элементы оптико-механической части закреплены между собой монтажными кольцами 13 и образуют защищенный от постороннего света канал.

Анодный ток ФЭУ определяется либо по числу однофотонных импульсов в заданном интервале времени (счетчик фотонов 15, рис.2), либо по падению напряжения на нагрузочном сопротивлении 15 ФЭУ (рис.3). Измерения в этом случае проводятся интегрирующим цифровым вольтметром 16 (рис.3), который определяет среднее значение напряжения во время интегрирования (усреднение по шумам ФЭУ, подавление фона переменного тока) [13]. Изменение диапазона в этом случае проводится коммутатором нагрузочных сопротивлений - ФЭУ.

Канал для спектральных измерений (рис.3) отличается комплектацией оптико-механической части. Прибор для смешивания светофильтров заменяется монохроматором 7, который для автоматического управления укомплектован преобразователем 17 код-угол поворота, построенным на базе шагового двигателя (ШД) [5] (поток света от образца в этом случае фокусируется на входную щель монохроматора). Комплектация канала для спектральных измерений остальными элементами такая же, как в случае измерения интегральных потоков света, а алгоритм измерений дополнительно содержит сведения о длине волны измеряемого света ($U_i - h\nu$) и проводит контроль состояния монохроматора по признаку "Готовность". Соответствие положения лимба монохроматора заданной $U_i - h\nu$ контролируется независимой обратной связью в нескольких фиксированных точках диапазона.

Для определения интенсивности люминесценции (см.рис.2) производится поочередное измерение темнового тока ФЭУ (j_T), фототока при освещении фотокатода эталонным светом ($j_{ЭТ}$) и фототока при освещении фотокатода, измеряемым потоком света ($j_{СБ}$). Интенсивность люминесценции тогда равна:

$$J = J_0 \frac{j_{СБ} - j_T}{j_{ЭТ} - j_T}$$

При измерении этих величин необходимо управлять затворами измеряемого и эталонного световых потоков, а также измерительным прибором (счетчиком фотонов). На затворы через согласующие устройства И4 подается управляющая информация(УИ)-сигналы "Включить - Выключить", а в результате выполнения команды на взаимно независимых выходах затворами вырабатывается контрольная информация(КИ) - признаки "Включен - Не включен", "Выключен - Не выключен". Счетчик фотонов управляется сигналом "Пуск", вырабатывает сигнал "Счет - Разрешено считывание". После получения последнего признака производится считывание измерительной информации(ИИ), которая выставляется на кодовых шинах счетчика.

Рассмотрим вариант алгоритма измерений одного цикла, временная диаграмма управляющих и контрольных сигналов которого представлена на рис.4. Для определения интенсивности люминесценции измерения выполняются в следующей последовательности: $n/2 \times j_{ЭТ}$, $n/2 \times j_T$, $n \times j_{СБ}$, $n/2 \times j_T$, $n/2 \times j_{ЭТ}$ (изменяя количество измерений в цикле (n), можно менять постоянную времени канала [3]). Допустим, что в начальном состоянии на ФЭУ попадает эталонный свет, т.е. затвор в канале измеряемого света (ЭТ-и) выключен (закрыт), а затвор в канале эталонного света (ЭТ-э) включен (открыт). После контроля состояния затворов (сигналы "Выключен", "Не включен" от ЭТ-и; сигналы "Не выключен", "Включен" от ЭТ-э) на счетчик фотонов(СчФ) подается сигнал "Пуск". Одновременно с началом счета СчФ вырабатывает признак "Счет", по которому снимается управляющий сигнал "Пуск". По окон-

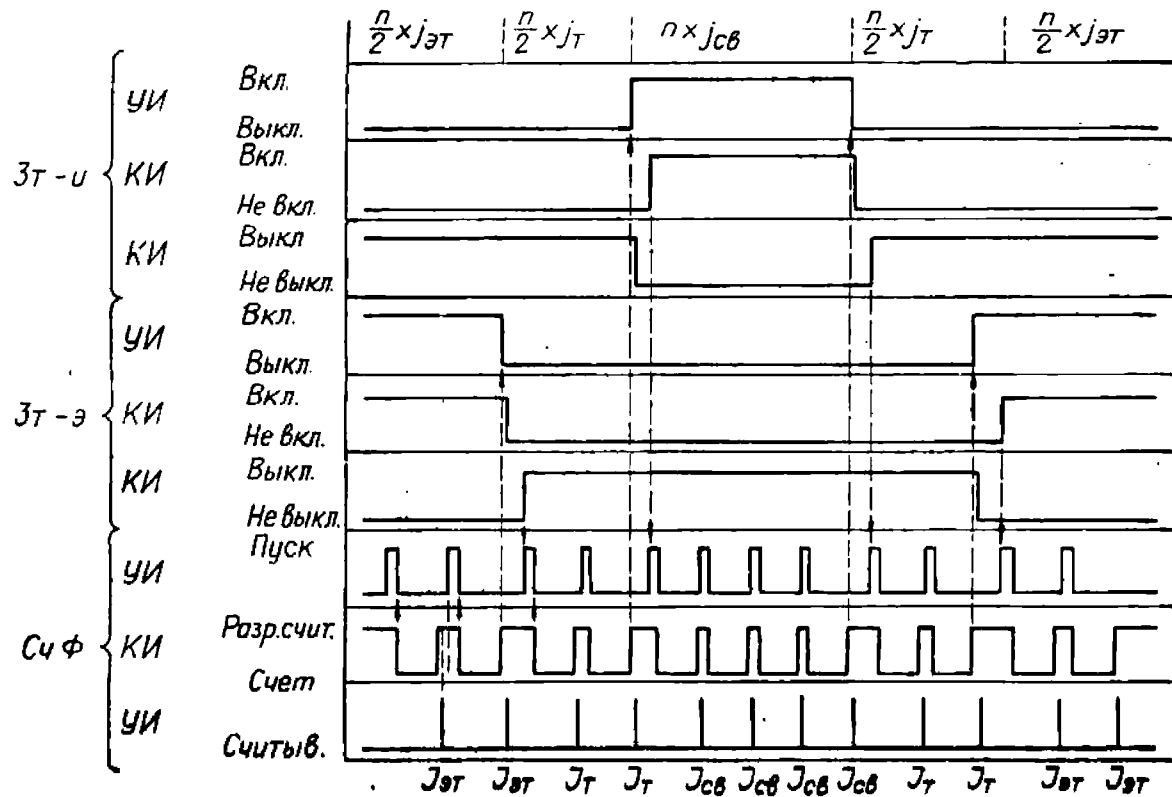


Рис. 4.

чании времени счета, заданного соответствующим управляющим сигналом, появляется признак "Разрешено считывание", после чего опрашивается выходной регистр СчФ. Измерения $j_{Эт}$ согласно заданному алгоритму повторяются $n/2$ раза. Для измерения j_T на вход ЭТ-э подается сигнал "Выключить". После появления от ЭТ-э признаков "Не включен", "Выключен", а также от ЭТ-и - "Не включен", "Выключен" запускается СчФ и, подобно измерению $j_{Эт}$, проводятся $n/2$ измерения j_T . Затем на ЭТ-и подается сигнал "Включить"; после контроля признаков состояния ЭТ-и, ЭТ-э n раз измеряется j_{ct} и т.п., пока не выполнены все измерения в данном цикле. После окончания цикла измерений ЭТ-э, ЭТ-и, СчФ возвращаются в исходное состояние, т.е. фотокатод ФЭУ освещается эталонным светом. Таким образом канал подготовлен для следующего цикла измерений.

§ 5. Канал измерения температуры образца

Для проведения исследований комплексом базовых спектрально-кинетических методов канал измерения температуры должен удовлетворять следующим требованиям [3]: а) диапазон температур $80^{\circ}\text{K} + 500^{\circ}\text{K}$; б) максимальная погрешность измерения абсолютной температуры $\pm 0,25^{\circ}\text{K}$; в) воспроизводимость (чувствительность) измерения температуры $\pm 0,05^{\circ}\text{K}$ (последнее требование вытекает из необходимости определения небольших разностей температуры). Схема канала измерения температуры приведена на рис.5. Датчиком температуры служит термопара медь - константан. Эта термопара обладает относительно высоким чувствительностью в диапазоне измеряемых температур (минимальная чувствительность $16 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{K}$ при 80°K), разность э.д.с. термопары ($80^{\circ}\text{K} + 500^{\circ}\text{K}$) составляет $16,3 \text{ мВ}$ [14].

Схема измерения э.д.с. термопары создана с учетом следующих требований: диапазон измерений не менее $0 + 20 \text{ мВ}$, чувствительность не менее $\pm 1 \text{ мкВ}$ ($\pm 0,062^{\circ}\text{K}$ при 80°K ;

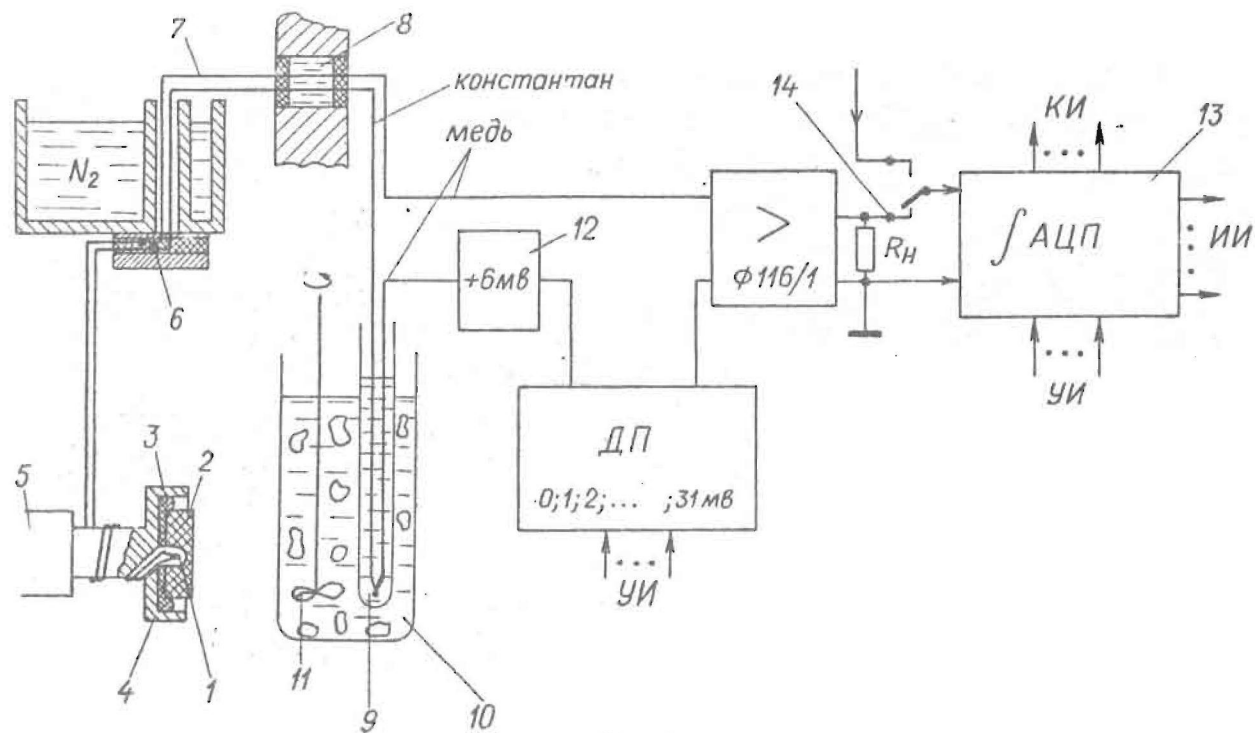


Рис. 5.

$\pm 0,05^{\circ}\text{K}$ при 105°K), постоянная времени не более 1 сек.

Измерительная термопара стационарно смонтирована в криостат. Измерительный спай I термопары размещается в заранее подготовленное углубление образца 2, который при помощи теплопроводящей замазки 3 прикрепляется к держателю 4. Изолированная от корпуса высокотемпературным лаком термопара из тонких проводов (для уменьшения теплопроводности проводов и теплоемкости участка спаев) диаметром $0,05 + 0,08$ мм, проведенная через отверстие в днище держателя образца, обматывается вокруг шейки 5 держателя, которая имеет температуру, близкую к температуре образца (длина обмотки около 15 см), и проводится по вакууму к спаю 6 со стационарной линией 7 термопары из проволок того же материала диаметром 0,2 мм. Относительно большой диаметр линии необходим для уменьшения электрического сопротивления и влияния неоднородности материала на характеристики термопары, а также для увеличения механической прочности. Кроме того, такая конструкция позволяет произвести оперативную замену измерительного спаев термопары. Спаи с линией зажаты в фторопласте, прикреплены к сосуду с жидким хладагентом и находятся при фиксированной температуре. Линия термопар через специальный вакуумный ввод 8 [10] выводится из криостата.

Стационарная конструкция термопары позволяет стабилизировать возникающие вследствие неоднородности материала паразитные э.д.с. в линиях и провести индивидуальную градуировку по месту вторичным термометром. Индивидуальная градуировка термопары необходима также из-за разброса ее чувствительности вследствие непостоянства состава сплава. В целях проведения градуировки термопар в криостате предусмотрено приспособление для прикрепления к держателю термометра сопротивления.

Свободный спай измерительной термопары запаян в ампуле 9 с глицерином, которая помещается в ванну 10 с таким

льдом. Нестабильность температуры в ванне, снабженной мешалкой II, не превышает $0,01^{\circ}\text{K}$.

Термостатирование свободного спая в ванне с таким льдом приводит к тому, что э.д.с. термопары в диапазоне измеряемых температур меняет знак. Это неудобно для проведения измерений, поэтому последовательно с термопарой включен стабилизатор I2 э.д.с. смещения ($U_0 = 6$ мв; $b < 0,5$ мкв; максимальная отрицательная э.д.с. термопары в диапазоне измерений составляет 5,5 мв). Измерение э.д.с. термопары проводится методом частичной компенсации. Последовательно с термопарой включен потенциометр дискретных значений компенсационной э.д.с. (ДП) с постоянным шагом через каждые 1 мв в диапазоне $0 + 31$ мв. Потенциометр имеет постоянное внутреннее сопротивление (~ 10 ом), воспроизводимость и дрейф э.д.с. не более $\pm 0,5$ мкв. После компенсации ДП разностная э.д.с., не превышающая шаг потенциометра ($0 + 1$ мв), поступает на фотогальванический усилитель ФП16/1 (соответствующая проверка параметров усилителя показала, что воспроизводимость, шумы и линейность прибора при коэффициенте усиления 10 не хуже $\pm 0,5$ мкв). С нагрузочного высокостабильного сопротивления (R_n) усиленный в ~ 10 раз сигнал измеряется интегрирующим цифровым вольтметром I3, который имеет следующие параметры: диапазон $00,00 + 23,00$ мв, квант измерений ± 10 мкв, время измерений 45 мсек (интегрирующий цифровой вольтметр используется также для измерения анодного тока ФЭУ, поэтому на входе вольтметра находится переключатель (коммутатор) I4). Чувствительность, отнесенная ко входу фотогальванического усилителя, тогда составляет ± 1 мкв, диапазон $0 + 2,300$ мв.

Фотогальванический усилитель имеет конечное входное сопротивление (~ 10 ком), которое при требуемой точности измерений (0,1%) сравнимо с внутренним сопротивлением внешней цепи, определяемой преимущественно сопротивлени-

ем проводов термопары (100 ом). В случае неполной компенсации в цепи термопары течет ток, который приводит к соответствующему падению напряжения. Градуировка измерительного прибора в значениях э.д.с. термопары поэтому осуществляется регулировкой величины нагрузочного сопротивления фотогальванического усилителя после сбора внешней цепи. Изменение э.д.с. термопары в этом случае моделируется либо низкоомным потенциометром (Р306), либо ДП, который находится в канале измерения температуры образца.

Для измерения температуры образца проводится управление ДП и цифровым вольтметром. Алгоритм измерения температуры при помощи УВМ сводится к следующему. Допустим, что в результате предыдущего измерения подачи соответствующих сигналов на входы ДП установлена некоторая э.д.с. (U_k) Подобно алгоритму измерения анодного тока ФЭУ (команды "Пуск", контроль признаков, считывание) интегрирующим цифровым вольтметром проводится измерение разности э.д.с. термопары и напряжения ДП. Если результат измерения находится в заданных пределах (например, $0,500 \leq U_k \leq 1,750$ мв) считаются признаки включенных ступеней ДП и рассчитывается э.д.с. термопары, равная $U_k + U_n + U_0$. Затем по градуировочной таблице канала измерения температуры может быть определена температура образца. Если же результат измерения больше или меньше заданных пределов, подачей соответствующего кода на входы ДП компенсационная э.д.с. увеличивается или уменьшается на 1 мв. После выжидания времени, необходимого для успокоения фотогальванического усилителя ($\sim 0,4$ сек); проводится повторное измерение U_k и т.д.

§ 6. Канал управления температурой образца

Соответственно требованиям базовых спектрально-кинетических методов [3] канал управления температурой позволяет осуществить:

- а) термостатирование образца в районе температур

$80^{\circ}\text{K} + 450^{\circ}\text{K}$;

б) импульсный нагрев-охлаждение образца со скоростью до $3^{\circ}\text{K}/\text{сек}$ и последующим термостатированием;

в) слежение по заданной зависимости температуры от времени с максимальной скоростью не менее $0,2^{\circ}\text{K}/\text{сек}$.

Канал управления температурой образца состоит из малоинерционного азотного криостата, терморегулятора и системы подачи хладагента. Принципы организации, блок-схема и конструкция канала управления температурой детально рассмотрены в [6, 7] настоящего сборника.

§ 7. Каналы возбуждающих и деэксцирующих воздействий

Каналы для воздействия светом научно-исследовательской системы укомплектованы унифицированными оптико-механическими элементами.

На рис.6 показана блок-схема канала для облучения образца монохроматическим светом. Источниками света служат лампа накаливания 1 (К-12/90), дейтериевая спектральная лампа 2 (ДДС-250), ртутная газоразрядная лампа высокого давления (СВДШ-120) или ксеноновая газоразрядная лампа высокого давления 3 (ДКСШ-1000). Поток света от одной из ламп, фокусируемой линзой 4 из плавленого кварца, коммутатором 5 пучков света подается на входную щель монохроматора 6. Затем свет проходит затвор 7 и линзой 8 фокусируется на образец 9.

При необходимости облучения образца интенсивным потоком света монохроматор 6 заменяется прибором для смены светофильтров. В этом случае поток света на образец фокусирует система линз.

Рентгеновская трубка (BCB2-W) помещается в прикрепленный к криостату специальный чехол 10, который имеет управляемый механический затвор 11. Окно 12 криостата

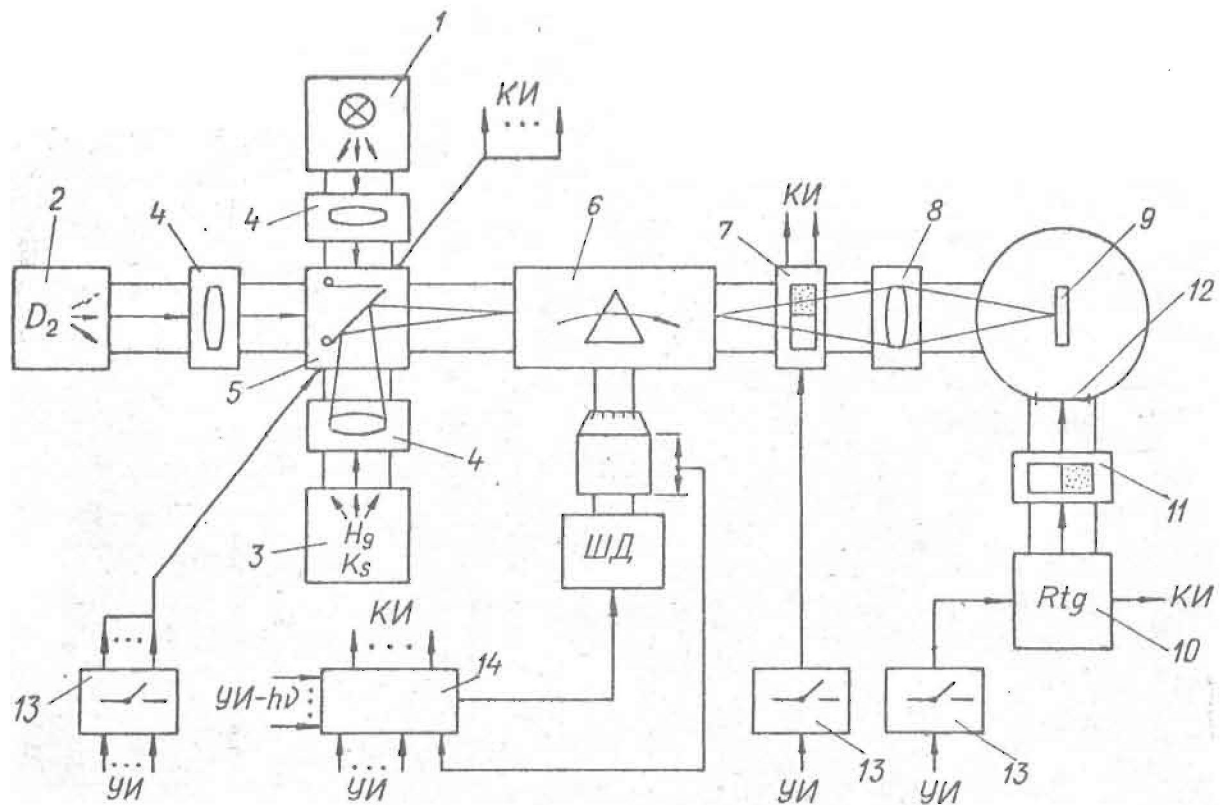


Рис. 6

изготовлено из алюминия. Расстояние между анодом рентгеновской трубки и образцом 8 см. Выбор вида возбуждения производится поворотом головки криостата.

Управление воздействующими каналами осуществляется подачей сигналов через согласующие устройства I3 на затвор 7 и затвор II рентгеновских лучей, коммутатор 5 пучков света и преобразователь I4 код-угол поворота монохроматора (НИС в настоящее время укомплектована одним автоматизированным монохроматором, который используется либо в канале воздействия, либо в канале измерения). Принципы построения алгоритма управления воздействующими каналами такие же, как для измерительных каналов.

§ 8. Организация управления и контроля экспериментом

Системные приборы воздействующих и измерительных каналов НИС управляются стандартизованными сигналами. По управляющей информации приборы НИС разделяются на две группы: а) приборы без внутренней памяти (например, опико-механические элементы); б) приборы с местным регистром или с "функциональной" памятью (например, преобразователь код-угол поворота [5]). Можно заметить, что системные приборы с внутренней памятью представляются более перспективными для комплектации автоматизированных НИС с УВМ в конфигурациях, так как могут быть использованы в децентрализованных системах связи УВМ - НИС.

Управляющие входы приборов без местной памяти в разомкнутом состоянии находятся в положении "логический 0". Перевод входа в состояние "логическая 1" осуществляется подачей нулевого потенциала (чаще всего замыканием управляющего входа на нулевой провод). Сигналом "логический 0" служит разомкнутый управляющий вход или напряжение от -12 в до -30 в. Управляющие сигналы на эти приборы должны быть поданы в течение всего времени пребывания приборов

в заданном состоянии. Управляющие сигналы на приборы с местным регистром памяти или с "функциональной" памятью имеют другие временные параметры. Например, управляющая информация, определяющая положение вала монохроматора, подается на соответствующие входы местного регистра преобразователя код-угол поворота параллельным кодом и выдерживается только на время записи этой информации в местный регистр. Время выдержки сигналов "Запись" определяется скоростью приема информации на этот регистр. Особенности подачи управляющих сигналов для приборов с "функциональной" памятью видны на примере сигнала "Пуск" преобразователя код-угол поворота. Этот сигнал не должен выдерживаться на время перехода вала монохроматора с предыдущего состояния на заданное. Сигнал "Пуск" снимается с управляющего входа после изменения контрольной информации с положения "Готовность" на "Нет готовности".

Сигналы контрольной информации вырабатываются в виде потенциалов в течение всего времени пребывания прибора в соответствующее состояние.

Числовая информация на выходных регистрах измерительных приборов выставляется параллельным кодом в виде потенциалов. Считывание этой информации после каждого запуска прибора может производиться только после получения контрольного сигнала "Разрешено считывание". В остальное время информация на кодовых выходах измерительного прибора может быть неправильной.

Уровни потенциалов контрольной и измерительной информации в НИС следующие: -20 в (логический 0), 0 в (логическая 1).

Для организации канала обмена с УВМ управляющие входы контрольные выходы, входные и выходные регистры системных приборов по кабелю подведены к централизованному кросс-шкафу. Кросс-шкаф имеет две группы контактных полей. К группе контактных полей I (рис.7) подведены входы, выхо-

ды и нулевые провода приборов НИС, к группе контактных полей 2 - входы, выходы и нулевые провода от УВМ, что сделано для удобной распайки кабелей. Кроме контактных полей, в кросс-шкафе имеются группы размыкаемых контактов 3 и предохранителей 4, количество которых равно числу входов и выходов УВМ. Предохранители включены в цепи сигнального провода. Контакты в контактных полях, а также размыкаемые контакты и предохранители в кросс-шкафе распаяны группами, имеющими общий функциональный признак (например, входы управляющих сигналов затворов света, выходы контрольной информации затворов света, релейные выходы УВМ, дискретные выходы УВМ). Замыкание канала связи между УВМ и НИС производится соединением контактных полей I НИС с полем размыкаемых контактов 3 и предохранителей 4, причем в этом случае порядок распайки определяется требованиями конкретной схемы связи.

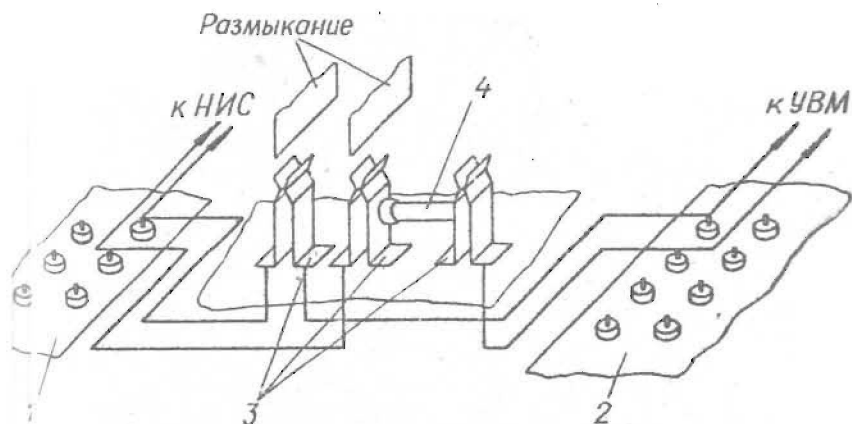


Рис. 7

Размыкаемые контакты позволяют в случае необходимости реализовать оперативный разрыв канала связи, проверить прохождение сигналов в обе стороны от точки разрыва, а также без перепайки изменить существующую в кросс-шкафе схему связи.

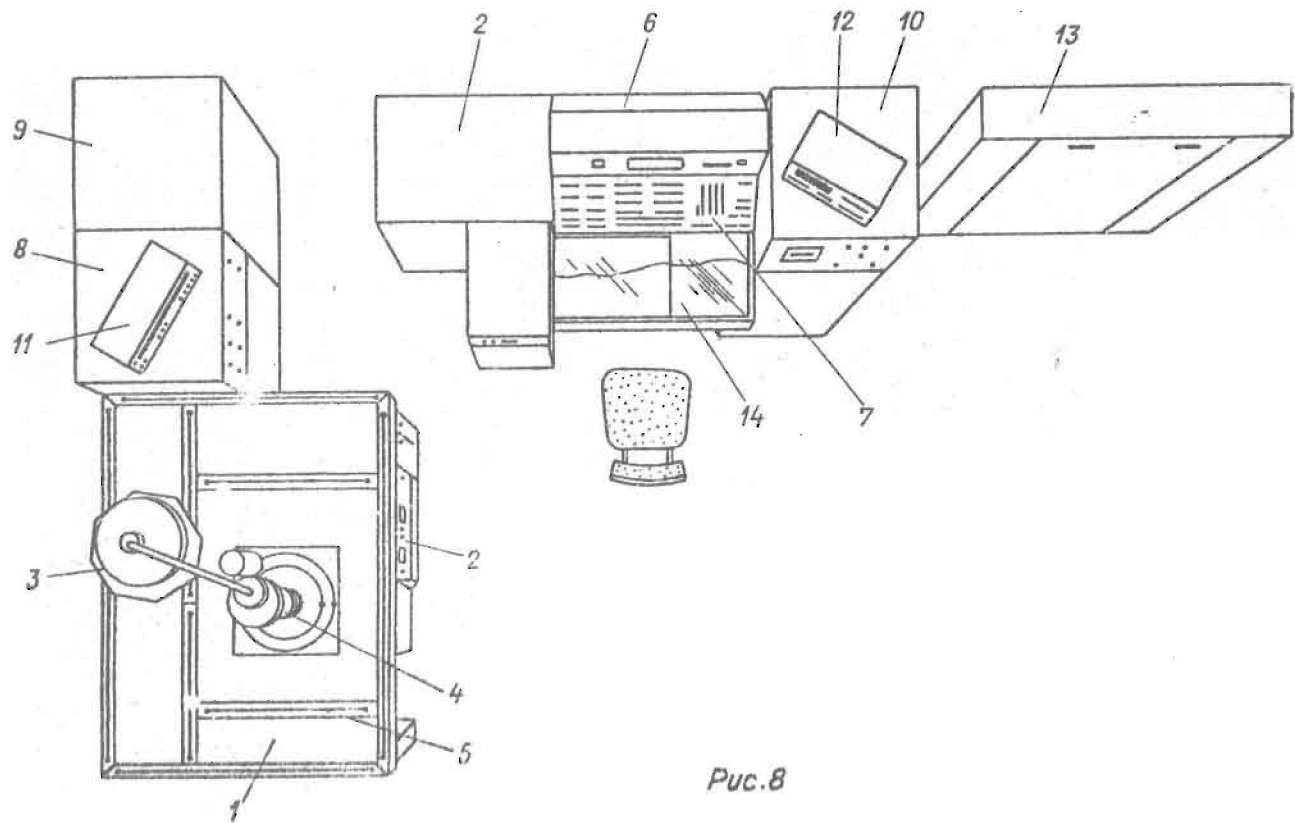
Органы ручного управления и визуальной индикации (т.н. инженерные пульта), как правило, находятся на передних панелях приборов, однако в НИС имеется возможность организовать специальный сосредоточенный пульт ручного управления и визуальной индикации. Органы управления и визуального контроля в этом случае подключаются к кросс-шкафу и дублируют работу УВМ.

§ 9. Конструкция НИС

Конструктивно НИС представляет собой набор блоков, в которых объединены отдельные, родственные по назначению приборы и элементы.

Рассмотрим компоновку НИС (рис.8). Центральным блоком НИС является стенд I эксперимента с вакуумным постом 2, подъемником криостата и площадкой 3 для сосуда Дьюара [15]. В центральной части стенда эксперимента стационарно установлен криостат 4. Стенд имеет лазы 5 для крепления оптических рельсов, на которых монтируется оптико-механическая часть воздействующих и измерительных каналов. Согласующие устройства для управления и контроля состояния оптико-механических элементов размещены в отдельной стойке 6. На передней панели 7 стойки размещены органы ручного управления оптико-механическими приборами и сигнальные лампочки визуального контроля - инженерный пульт.

Источники питания ФЭУ, а также источники питания ламп накалкивания и водородной лампы, питание оптико-механических приборов и преобразователь код-угол поворота, представляющие самостоятельные щитовые приборы, размещены в



Puc.8

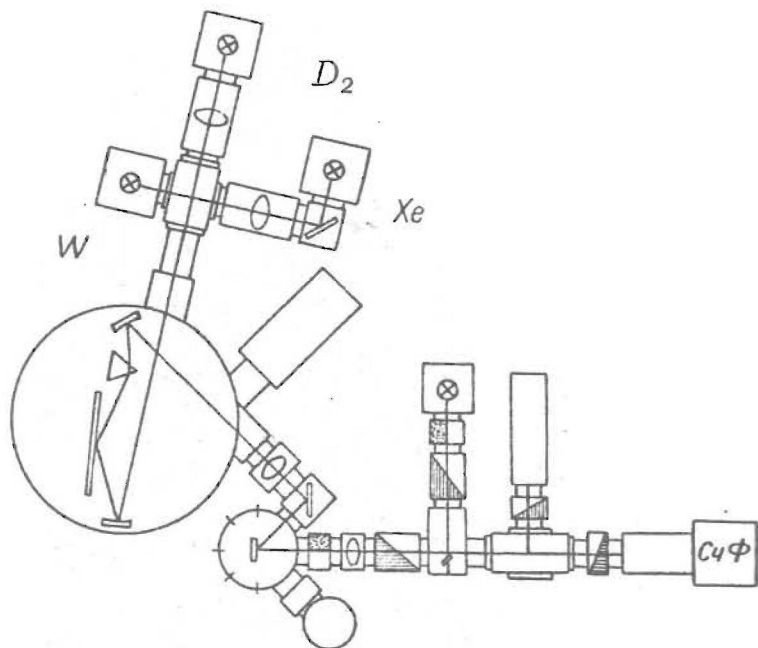
двух стойках 8, 9.

В отдельной стойке 10 находятся электронные узлы канала управления температурой образца. Органы ручного управления и визуального контроля каналом выведены на переднюю панель стойки.

НИС укомплектована двумя измерительными приборами - счетчиком фотонов И и интегрирующим цифровым вольтметром I2 типа LM I429 фирмы „Solartron", а также кросс-шкафом I3 и самопишущим прибором I4 на базе ЭПШ-09 с горизонтальной протяжкой ленты (самопишущий прибор имеет цифро-аналоговый преобразователь и предназначен для экспресс-контроля режимов эксперимента и результатов измерений).

Коммуникации между приборами и элементами как в пределах одной стойки, так и между стойками осуществляются при помощи кабелей, которые непосредственно, без промежуточных распределительных щитов, соединяют соответствующие приборы. В случае сопряжения отдельного прибора с несколькими другими приборами в конструкции его предусмотрено соответствующее количество разъемов (например, преобразователь код-угол поворота, сопряженный с монохроматором, блоком питания преобразователя, кросс-шкафом, панелью индикаторов и кнопок ручного управления, имеет отдельные разъемы для подключения каждого из перечисленных узлов).

Оптико-механические элементы воздействующих и измерительных каналов при помощи рейтеров фиксируются на оптических рельсах, а между собой закрепляются светонепроницаемыми соединительными кольцами [И1, И2.] Это позволяет оперативно менять геометрию эксперимента. На рис.9 в качестве примера показана компоновка оптико-механической части каналов в случае возбуждения (подсветки) образца монохроматическим светом и измерения интегральной люминесценции (обозначения элементов приведены на рисунке).



-  — источник света
-  — отражатель эталонного света
-  — прибор для смены светофильтров
-  — отражатель света
-  — кристалл с образцом
-  — держатель линзы
-  — счетчик фотонов
-  — переключатель светового пучка
-  — рентгеновская лампа с затвором
-  — держатель ФЭУ
-  — монохроматор
-  — затвор света

Рис.9

§ 10. Основные технические характеристики НИС

Максимальные размеры образца - диаметр 9 мм, толщина 1 мм.

Вакуум - не хуже $2 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.

Способ управления - программный эксперимент при помощи УВМ "Днепр-1" (основной вариант) или ручное управление при помощи инженерных пультов.

Способ представления результатов:

а) при программном эксперименте - двухкоординатный самописец ДФП-2, буково-цифровая печать УВМ, перфолента; возможность просмотра результатов на электронно-лучевой трубке во время проведения эксперимента;

б) при ручном управлении - визуальные цифровые индикаторы измерительных приборов и пультов управления, диаграммная лента.

Потребляемая мощность - не более 6 квт.

Занимаемая площадь (без УВМ) - 20 м^2 .

Возбуждение:

а) монохроматический или неразложенный свет в спектральной области от 200 до 3000 нм;

б) рентгеновские лучи (трубка БСВ2-1W, чапряжение до 55 кв, мощность 0,8 квт).

Канал управления температурой образца:

а) хладагент - жидкий азот; средний расход 1,5 л/час;

б) диапазон температур - основной от 80°K до 450°K , в случае применения высокотемпературных лаков и соответствующих припоев в криостате до 650°K ;

в) режим термостатирования:

- нестабильность температуры не более $\pm 0,2^\circ\text{K}$ при 80°K , не более $\pm 0,1^\circ\text{K}$ при 150°K и выше;

- воспроизводимость установки температуры не более $\pm 0,2^\circ\text{K}$ при 60°K в течение 1 часа;

- минимальный шаг сканирования температуры не более $0,2^\circ\text{K}$;

г) режим импульсного нагрева-охлаждения:

- максимальная скорость нагрева-охлаждения не более $5^{\circ}\text{K}/\text{сек}$;

- время перехода к термостатированию не более 10 сек;

- максимальная амплитуда перегрева, переохлаждения при переходе к термостатированию не более 2% абсолютной температуры термостатирования;

д) режим слежения:

- максимальная скорость слежения при нагреве или охлаждении $0,2^{\circ}\text{K}/\text{сек}$;

- отклонение от заданной зависимости температуры от времени $\pm 0,2^{\circ}\text{K}$.

Канал измерения температуры образца:

а) погрешность измерения абсолютной температуры при хорошем тепловом контакте образца с термопарой и градуировки канала вторичным термометром не хуже $\pm 0,5^{\circ}\text{K}$;

б) воспроизводимость измерения температуры не хуже $\pm 0,06^{\circ}\text{K}$.

Канал измерения слабых потоков света:

а) методы измерений - счет фотонов, измерение среднего значения анодного тока ФЭУ;

б) спектральный район измерений от 200 до 1200 нм;

в) прибор для выделения спектрального района - монохроматор или селективные светофильтры 40×40 мм;

г) погрешность измерения темнового тока $\pm 10\%$ (при охлаждении ФЭУ);

д) светосила оптико-механической части интегрального канала не менее 1 : 2;

е) динамический диапазон 6 порядков, считая от уровня темнового тока;

ж) минимальная погрешность канала $\pm 0,1\%$;

з) время одного замера измерительным прибором от 0,03 до 3 сек (счет фотонов), 105 мсек (интегрирующий АИИ).

Л и т е р а т у р а

1. См. наст. сборник, стр. 3.
2. Сб. "Кибернетизация научного эксперимента", вып.3. Рига, Редакц.- изд. отдел ЛГУ им.П.Стучки, 1971, стр.11.
3. См. наст. сборник, стр.33.
4. Сб. "Кибернетизация научного эксперимента", вып.3. Рига, Редакц.- изд. отдел ЛГУ им.П.Стучки, 1971, стр.66.
5. См. наст. сборник, стр. 201.
6. См. наст. сборник, стр. 138.
7. См. наст. сборник, стр.156.
8. См. наст. сборник, стр.216.
9. См. наст. сборник, стр.95.
10. См. наст. сборник, стр. 116.
11. См. наст. сборник, стр. III.
12. См. наст. сборник, стр. 178.
13. Сб. "Кибернетизация научного эксперимента", вып.1.Рига, Редакц.- изд. отдел ЛГУ им.П.Стучки, 1968, стр.134.
14. Кэй Д., Леби Т. Таблицы физических и химических постоянных. М., Изд-во физ.-мат.лит., 1962, стр.54.
15. См. наст. сборник, стр. 243.

3к

Я.Я.Страумен, О.Э.Аболиньш

НЕКОТОРЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПО СОЗДАНИЮ КРИОГЕННОЙ АППАРАТУРЫ

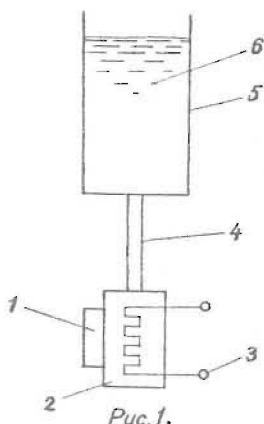
В Проблемной лаборатории физики полупроводников Латвийского госуниверситета им. П.Стучки проведена значительная работа по созданию современных измерительных систем с соответствующей криогенной аппаратурой. Созданы и испытаны измерительные системы, в которых вычислительная техника непосредственно управляет температурными режимами.

§ I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Исследования свойств образцов твердого тела оптически-ми и электрическими методами обычно проводятся в широком интервале температур, т.е. от температуры испарения хладагента до максимальной температуры, обусловленной методикой эксперимента. В этом интервале требуется поддерживать определенный температурный режим образца. Обычно требуется:

- длительная стабилизация любых промежуточных температур;
- линейное наращивание температуры во времени с разной скоростью;
- быстрое изменение температуры.

Рассмотрим принципиальную схему криостата (рис. I), в котором можно менять температуру образца. Образец I укреплен на держателе 2, в который вмонтирован нагревательный элемент 3. Теплопроводящее звено 4, имеющее определенное сопротивление теплопередаче, соединяет держатель 2 с сосудом 5 хладагента 6. Температура держателя и самого образца зависит от мощности, выделяемой нагревательным элементом



и от сопротивления теплопровода. От выбора теплопроводящего звена, т.е. от сопротивления его зависит, с каким расходом хладагента будет осуществлен заданный температурный режим на образце, а от выбранного вида сопротивления зависят сложность конструкции и управление температурным режимом образца.

Отвод тепла от держателя к хладагенту может осуществляться теплопроводностью,

конвекцией или излучением. В каждом криостате действуют все три вида теплопередачи, но, в зависимости от конструкции криостата, меняется их соотношение.

Известно, что легче управлять и при этом расходуется меньше хладагента, если управляемая система имеет меньшую теплоемкость.

Поэтому размеры держателя образца выбираются минимальные — насколько позволяют размеры самого образца и нагревательного элемента. Теплоемкость теплоотводящего звена выбирается малой — в 10–50 раз меньше теплоемкости держателя образца. В этом случае в расчетах теплоемкость теплопровода можно пренебречь.

Составив и решив дифференциальное уравнение теплового баланса держателя образца, получим зависимость:

$$\frac{T - (T_0 + RW)}{T_1 - (T_0 + RW)} = \exp\left(-\frac{t}{C}\right), \quad (1)$$

где: $C = R c G$; (2)

- T - температура держателя⁺⁾ образца во время t , °К;
 T_I - начальная температура держателя, °К;
 T_0 - температура испарения хладагента, °К;
 w - мощность, выделяемая нагревательным элементом, Вт;
 t - время, сек;
 \mathcal{C} - постоянная времени систем, сек;
 R - сопротивление теплопередачи, °К/Вт;
 c - удельная теплоемкость материала держателя образца,
 $\text{дж}/\text{кг} \text{ } ^\circ\text{К}$;
 G - масса держателя образца, кг;

Из (I) следует, что характер функции $T = f(t)$ можно менять с помощью R и w . Практически реализуемы два вида систем для отвода тепла от держателя:

- с постоянным R ;
- с изменяемым R .

Если зависимость (I) изобразить графически (рис.2) при $R = \text{const} \neq 0$, $T_0 = \text{const}$ и $0 \leq w \leq w_{\text{max}}$, то видно, что:

- поддерживать на образце постоянную заданную температуру длительное время можно, подводя нагревателю стабилизированную мощность w ;
- быстрое повышение T можно получить при наличии w_{max} ;
- быстрое понижение T держателя невозможно, так как $\frac{dT}{dt}$ держателя при охлаждении зависит от \mathcal{C} и T_0 системы (принимая, что T_0 постоянна). Для увеличения $\frac{dT}{dt}$ при охлаждении нужно уменьшить \mathcal{C} , т.е. согласно зависимости (2) уменьшить c и G ;
- линейное наращивание T держателя образца при постоянных R и \mathcal{C} возможно только с помощью программного управления w .

⁺⁾ Передача тепла от держателя к образцу здесь не рассматривается.

Расчет общего сопротивления теплопроводящего звена производится по зависимости:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_n + R_k} + \frac{1}{R_u}} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda F} + \frac{1}{\alpha_k F_k} + \alpha_u F_u}, \quad (3)$$

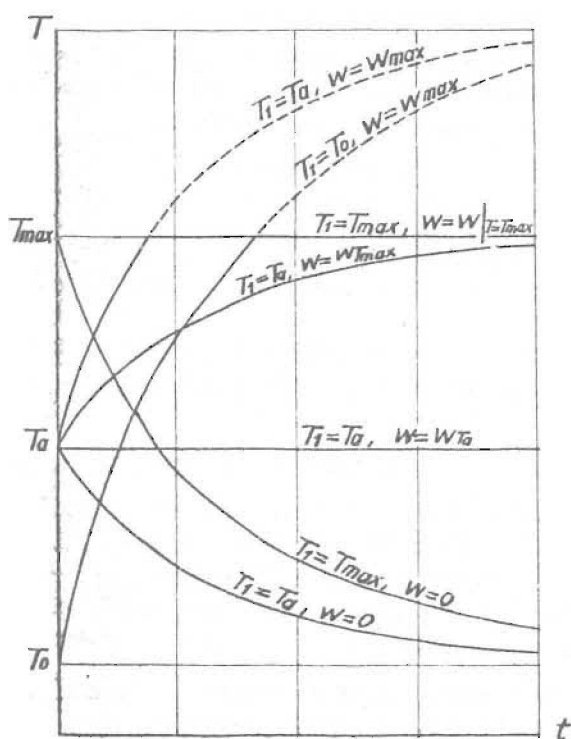


Рис. 2.

где: R_n - сопротивление теплопроводности теплопроводящего звена, $^{\circ}\text{K}/\text{bт}$;

R_k - сопротивление конвекционной тепловой передачи от теплопровода в хладагент, $^{\circ}\text{K}/\text{bт}$;

$R_{\text{ш}}$ - сопротивление теплопередачи излучением от держателя образца к сосуду хладагента, $^{\circ}\text{K}/\text{бм}$;

l - длина теплопровода, м ;

λ - коэффициент теплопроводности теплопровода, $\text{бм}/\text{м}^{\circ}\text{K}$;

F - сечение теплопровода, м^2 ;

$F_{\text{к}}, F_{\text{ш}}$ - соответствующие площади теплопередачи конвекцией и излучением, м^2 ;

$\alpha_{\text{к}}, \alpha_{\text{ш}}$ - соответствующие коэффициенты теплопередачи конвекцией и излучением, $\text{бм}/\text{м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{K}$.

На характер охлаждения держателя образца существенно влияет выбранное R . Если принимаем, что $F_{\text{к}}$ в выражении (3) большое и держатель образца окружен экраном, который имеет температуру хладагента, то в случае охлаждения держателя можно принять $R_{\text{к}} = R_{\text{ш}} = 0$ и общее сопротивление теплопроводу будет:

$$R = \frac{l}{\lambda F}, \text{ } ^{\circ}\text{K}/\text{бм}. \quad (4)$$

Обычно для расчета задается временем t , за которое образец должен охлаждаться от T_{I} до T , близкой к T_0 . При $t = 4 \tau_{\text{ш}} W = 0$ из (1) следует: $T = T_{\text{I}} - 0,9819 (T_{\text{I}} - T_0)$; это практически низшая температура держателя образца.

Из (2) следует: $R = \frac{\tau_{\text{ш}}}{cG}$, а так как $\tau_{\text{ш}} = \frac{t}{4}$, то

$$R = \frac{t}{4cG}. \quad (5)$$

Зная величину R , по (4) выбирают параметры теплопроводящего звена; но необходимо отметить, что держатель образца в этом случае крепится только на теплопроводе и размеры теплопровода должны обеспечить механическую жесткость крепления.

Подсчет мощности нагревательного элемента производится по (1), поставив $t = \infty$ и $T = T_{\text{ш, макс}}$. Учитывая и тепловое излучение, получим:

$$W = \frac{T_{\max} - T_0}{R_n} + \frac{T_{\max} - T_0}{R_u} =$$

$$= \frac{\lambda I (T_{\max} - T_0)}{\left[1 + 5,67 \varepsilon_1 R_u \left[\left(\frac{T_{\max}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \right]}, \quad (6)$$

где: ε_1 — степень черноты наружной поверхности держателя образца;

R_u — площадь наружной поверхности держателя образца, м^2 .

В большинстве случаев при измерениях не допускается вибрация держателя образца от кипения хладагента, поэтому F_k (поверхность, через которую тепло передается в хладагент) выбирается соответствующей величины, исключающей появление вибрации. Для азотных криостатов F_k следует брать такой, чтобы обеспечить удельную теплопередачу от стенки к хладагенту не выше $5 \text{ Вт/см}^2 \text{ /I; } 2/$.

Рассмотрим графическое изображение зависимости (I) при экстремальных значениях $R=0$ и $R=\infty$ и выделенной на нагревательном элементе мощности $0 \leq W \leq \infty$

Из рис. 3 видно, что достижимы все необходимые температурные режимы: длительная стабилизация, линейное наращивание и скачкообразное изменение температуры. Если $R = \infty$, то

$$T = T_1 + \frac{W t}{C G} \quad (7)$$

Реализовать в криостатах $R = \infty$ трудно, поэтому качество линейного наращивания и стабилизации температуры в ряде случаев будет недостаточным без использования системы дополнительного регулирования температуры.

Реализовать $R=0$ трудно даже в случае прямого погружения охлажденного тела в хладагент, так как α_k (выражение (3)) зависит от свойств хладагента и поверхности тела и не может быть бесконечно большим.

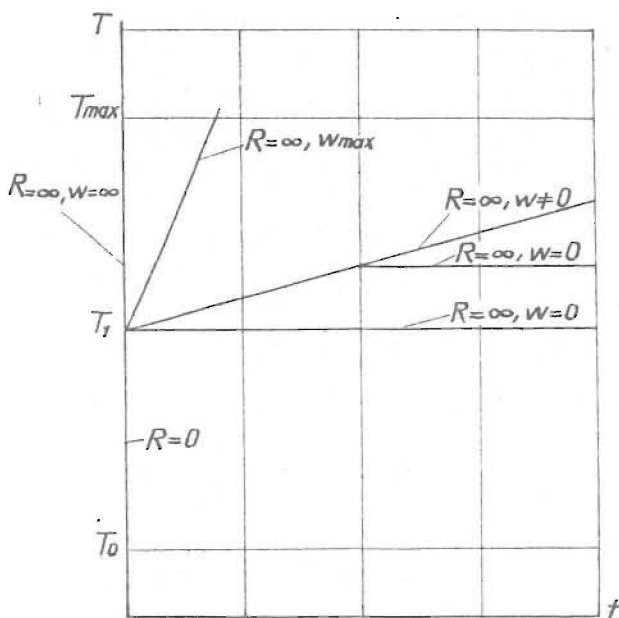


Рис.3.

Из (3) видно, что R можно менять следующими способами:

- изменяя l , λ и F теплопровода;
- изменяя α_k и F_k ;
- изменяя α_u .

Нетрудно построить систему с изменяемым l , например, с помощью регулирования уровня хладагента /3/. Систему с изменяемым α можно осуществить, регулируя давление газообразного гелия в теплопроводе /4/. Менять F можно в системах с механическим разъединением теплопровода /5/. Известны системы с изменяемым α_k , F_k и α_u /3, 7/.

На рис.4 показана принципиальная схема криостата с изменяемой длиной l теплопровода. Принцип устройства заимствован из /3/, улучшения описаны в /6/. В таком криостате можно выдерживать постоянные температуры, получить нагрев

с разной скоростью близкий к линейному, а также скоростной неуправляемый нагрев-охлаждение держателя образца до 10 град/сек.

Устройство криостата следующее. Образец I крепится на держателе 2 с теплопроводом I4 и встроенным нагревательным элементом 3. Держатель 2 с теплопроводом 2I встроен в камеру 4, стенки которой имеют низкую теплопроводность. Камера 4 с хладагентом 7 соединяется с одной стороны трубкой 5, с другой - трубками 8 и 9. Между трубками 8 и 9 установлен клапан 10 и игольчатый вентиль 11, а параллельно им - клапан 13.

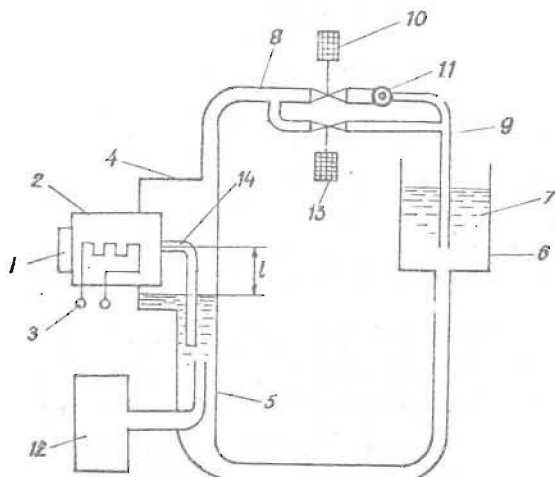


Рис. 4.

В трубку 5 встроен генератор пара или нагнетатель газа 12. При включенном нагревателе 3 испаряющийся хладагент по трубкам 8 и 9 через сосуд 6 выходит в атмосферу. Если клапаны 10 и 13 закрыты, выделяющийся пар хладагента выжимает жидкую фазу вниз и размыкает контакт жидкого хладагента с теплопроводом I4; при этом тепловое сопротивление уве-

личится до максимума. В таком случае большая часть выделяемого нагревательным элементом 3 тепла будет накапливаться в держателе 2 и температура его будет увеличиваться на используемых участках времени по закону, близкому к линейному (экспонента с большой постоянной времени). При открытом клапане 10, в зависимости от положения игольчатого вентиля 11, пары с определенной скоростью будут по трубке 9 выходить в атмосферу, и уровень хладагента 7 в трубке 5 повысится, уменьшая тем самым длину l теплопровода; следовательно температура держателя понизится. Сохраняя величину выделяемой нагревателем 3 мощности, но, увеличивая проходное сечение вентиля 11, температуру держателя 2 можно перевести на другой, низший уровень стабилизации. Тоже достижимо при фиксированном положении вентиля 11, и пониженной выделяемой нагревателем 3 мощности /3/. Для нагрева с большой скоростью держателя 2 служит генератор пара 12, который, выделяя пар хладагента, выводит жидкую фазу его из контакта с теплопроводом 14, тем самым способствуя быстрому нагреву держателя без форсировки нагревателя 3.

Для медленного нагрева держателя 2 полезно до начала цикла вывести жидкий хладагент из контакта с теплопроводом 14, предотвращая возможный скачек температуры в момент размыкания контакта во время нагрева.

Для быстрого охлаждения необходимо открыть клапан 13, при этом пары хладагента без сопротивления выйдут в атмосферу и хладагент в камере 4 поднимется вверх до уровня, соответствующего положению нижнего торца трубки 9.

Такие криостаты в Проблемной лаборатории физики полупроводников ЛГУ им. П. Стучки не нашли применения, хотя они могут управляться вручную и от управляющей машины. Причиной этому является создание более совершенной разновидности этого криостата (малоинерционного азотного криостата) с соответствующей системой терморегулирования.

§ 2. ВЫБОР ПРИНЦИПОВ КОНСТРУИРОВАНИЯ МАЛОИНЕРЦИОННОГО КРИОСТАТА

Рассмотрим принципы конструирования быстродействующего азотного криостата для температурного интервала

$$T_1' \leq T \leq T_1''$$

На рис. 5 показана схема криостата, состоящего из держателя образца 1, нагревателя 2 и сосуда с хладагентом 3, которые связаны между собой теплопередающими звеньями 4, 5, имеющими тепловые сопротивления R_1 и R_2 .

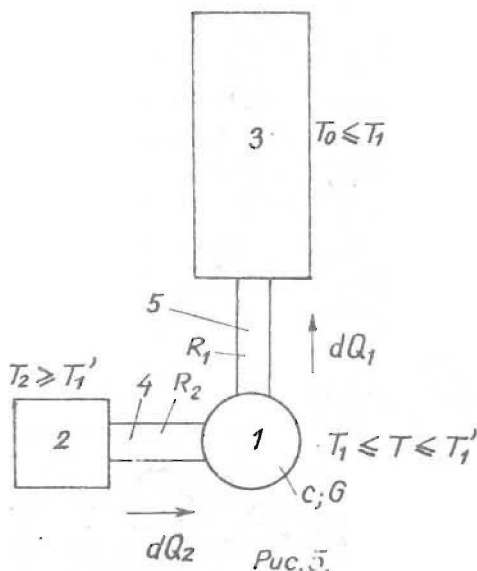


Рис. 5.

Для выяснения путей повышения быстродействия криостата (увеличение скорости теплообмена держателя с нагревателем и хладагентом) исследуем дифференциальное управление теплового баланса держателя

$$c G dT = dQ_1 + dQ_2 = \frac{T - T_0}{R_1} dt + \frac{T_2 - T}{R_2} dt \quad (1)$$

Решая это уравнение, получим:

$$T(t) = \left[T_1(0) - \frac{b}{a} \right] \exp(-at) + \frac{b}{a}, \quad (2)$$

где:

$$a = \frac{1}{cG} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right); \quad (3)$$

$$b = \frac{1}{cG} \left(\frac{T_0}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} \right); \quad (4)$$

- c - удельная теплоемкость материала держателя;
 G - вес держателя образца;
 T - температура держателя;
 T_0 - температура кипения хладагента;
 T_2 - температура нагревателя;
 R_1 - тепловое сопротивление держатель-хладагент;
 R_2 - тепловое сопротивление держатель-нагреватель.

Обобщенным параметром, характеризующим тепловую инерционность держателя образца, является постоянная времени

$$\tau = \frac{1}{a}, \quad (5)$$

учитывая (3)

$$\tau = \frac{cG}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}. \quad (6)$$

Из (2) видно, что процесс экспоненциальный, но это справедливо, если теплоемкости сопротивлений R_1 и R_2 незначительны по сравнению с держателем образца, что в принципе достижимо.

Чтобы криостат был малоинерционным, необходимо уменьшить постоянную времени (6). Это достигается уменьшением

параметров c , G , R_1 и R_2 . Отсюда вытекает, что образец следует брать настолько возможным малым, тогда и держатель образца получится наименьшим и произведение cG будет минимальным.

Рассмотрим влияние сопротивлений R_1 и R_2 на постоянную времени τ .

Наилучшим управляемым нагревателем является электрический нагреватель. Поскольку передача тепла от нагревателя 2 (рис. 5) к держателю 1 происходит в вакуумной камере криостата, то эта передача осуществима теплопроводностью или излучением.

Ясно, что теплопередача излучением в этом случае имеет преимущества, так как нагревательный элемент можно встроить в держатель образца без промежуточного теплопередающего звена и температурный "напор" между нагревателем и держателем возможен очень большой, порядка 3000°K , что позволяет передать держателю образца большое количество тепла за единицу времени, т.е. позволяет быстро увеличить температуру держателя образца.

На рис. 6 показано изменение температуры T держателя образца во времени при двух разных температурах нагревателя T_2' и T_2'' .

Видно, что температурный скачок держателя образца ΔT от начальной температуры T_1 осуществим за время t'' , если нагреватель имеет температуру T_2'' и, соответственно, время t' при T_2' .

Следует отметить, что с увеличением температуры нагревателя T_2 уменьшается тепловое сопротивление теплопередаче от нагревателя к держателю.

$$R_2 = \frac{T_2 - T_1}{\epsilon \sigma \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] F}, \quad (7)$$

где ε — приведенная степень черноты,
 σ — константа излучения абсолютно черного тела
 ($5,67 \text{ Вт/м}^2 \text{ град}^4$);
 F — измеряющая поверхность нити накала
 нагревателя.

Далее рассмотрим принципы управления процессом охлаждения держателя.

Управление температурой хладагента T_0 в широких пределах и с высокой скоростью не представляется возможным;

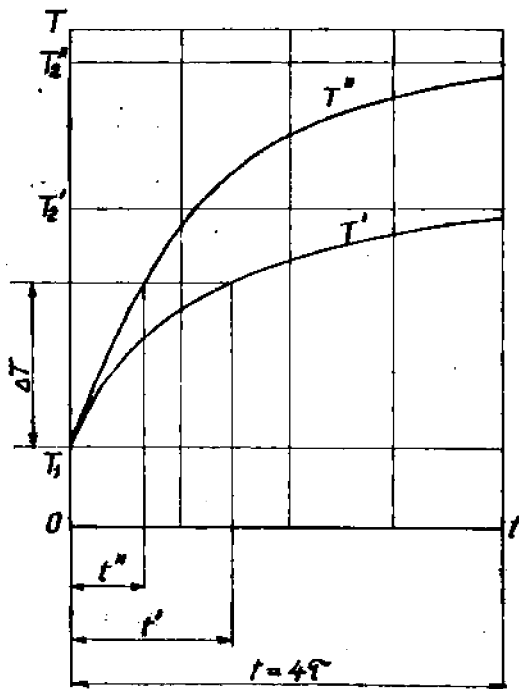


Рис. 6.

как правило, приходится считаться с одной фиксированной температурой-точкой кипения хладагента. Решающим фактором в этом случае является возможность регулирования теплового сопротивления R_1 , так как для получения малоинерционного режима охлаждения (т.е. низкие ζ) при зафиксированном малом R_1 понадобится очень большой расход хладагента.

Сопротивление R_1 характеризуется выражением

$$R_1 = \frac{1}{\frac{\lambda F_n}{l} + \alpha_k F_k + \alpha_u F_u}, \quad (8)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала теплопровода;
 F_n — сечение теплопровода;
 l — длина теплопроводника;
 α_k — коэффициент теплопередачи конвекцией;
 F_k — поверхность, участвующая в конвективном теплообмене;
 α_u — коэффициент теплопередачи излучением;
 F_u — приведенная поверхность теплообмена излучением.

Выражение (8) справедливо для случая параллельного⁺⁾ теплообмена с держателем посредством проводности, конвекции и излучения.

Известны конструкции криостатов, в которых для управления сопротивлением R_1 используются λ , F_n , l , α_k , F_k /3,4,5/. Использование для этой цели α_u и F_u при низких температурах держателя образца представляется малоэффективным.

Сравнительно просто управлять величинами α_k , F_k и l . Если для управления R_1 используются величины λ , F_n и l , то увеличивается масса охлаждаемых деталей, что отрицательно влияет на быстродействие криостата.

⁺⁾ В зависимости от конструкции.

Анализируя вышезложенное, можно сделать следующие выводы:

1. Теплоемкость держателя образца должна быть минимальной.
2. Охлаждение держателя образца должно быть импульсное, конвективное, т.е. хладагент должен импульсно омывать держатель образца без промежуточного теплопередающего звена.
3. Нагревание держателя образца должно осуществляться встроенным радиационным нагревателем.

На основании этих выводов был построен ряд криостатов, для которых соотношения размеров элементов системы охлаждения и нагрева были определены по вышеприведенным расчетным формулам и проверены в эксперименте.

Поскольку в подобных криостатах осуществлен импульсный режим "нагрев-охлаждение", то при соответствующей системе регулирования можно реализовать режимы стабилизации и слежения.

Описание конструкции быстродействующего криостата дано в статье "Азотные криостаты" настоящего сборника.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Фастовский В.Г., Петровский Ю.В., Ровинский А.Е., Криогенная техника, изд. "Энергия", М., 1967.
2. Новые направления криогенной техники под ред. проф. М.П.Малкова, Изд. "Мир", М., 1966.
3. Робинсон, Конструкция криостата, допускающая регулировку температуры образца от 20° до 870°K , Журнал "Приборы для научных исследований", 1964, № 8.

4. Мак-Суини и Леви, Криостат с программным управлением температурой, журнал "Приборы для научных исследований", 1965, № 9.
5. Бигелейзен, Брукс, Исида и Рибникер. Криостат для тепловых измерений при температурах от 2° до 300°K , журнал "Приборы для научных исследований", 1968, № 3.
6. Описание к авторскому свидетельству № 263938.
7. Mätzch G.Ch., Neues und Bewährtes aus der Hochvakuumtechnik Berlin, 1961.

Цк.

Е.А.Пранч, А.А.Портнов, Я.Я.Страумен

ПУТИ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ

В современном физическом эксперименте встречаются ситуации, когда необходимо одновременно получить информацию, содержащую несколько характеристик. Например,

при исследовании оптических свойств твердого тела, экспериментатору одновременно надо следить за поглощением, люминесценцией, проводимостью, сигналом ЭПР и другими процессами.

Подобные исследования зачастую настолько трудоемки, что практически выполнимы только в условиях автоматизированного эксперимента. Для этой цели необходимы весьма сложные научно-исследовательские системы (ИС). При этом чем больше параметров необходимо одновременно исследовать, тем сложнее используется система. Экспериментатор, в зависимости от задачи, выбирает оптимальное число каналов.

Для проведения измерений люминесцентных, абсорбционных, а также электрических свойств образца при различных воздействиях (оптическое, радиационное, термическое и др.) требуются разные оптические каналы.

Основные принципы конструирования оптических каналов, в зависимости от того, с помощью каких функциональных узлов решается задача эксперимента, следующие:

- типа "конструктор физика",
- агрегатные,
- комбинированные,
- специализированные.

Рассмотрим преимущества и недостатки каждого из этих принципов образования оптического канала.

Оптический канал, собранный по принципу "конструктор физика", представляет собой комбинацию отдельных, необходимых для данного эксперимента вспомогательных и оптико-механических элементов, соединенных при помощи универсальных соединительных элементов в определенной последовательности. Каждый из этих элементов выполняет одну определенную функцию в решении задачи эксперимента. Такой принцип построения оптического канала удобен для отработки методов.

При выходе из строя любой из оптико-механических элементов может быть легко заменен запасным элементом. При переходе к другому эксперименту или к другой методике эксперимента, требующей иных оптических каналов, предыдущие каналы могут быть разобраны, а в новых каналах использованы те же самые вспомогательные и оптико-механические элементы. При полном наборе различных оптико-механических элементов ИИС получается универсальной.

К недостаткам этого принципа создания оптических каналов можно отнести низкую механическую жесткость и увеличенную длину оптических измерительных каналов, что влияет на точность измерений и уменьшает светосилу системы.

Во многих экспериментах некоторые части оптических каналов идентичны, например, канал возбуждения светом. В таком случае целесообразно подобные части каналов изготавливать в виде агрегатов, включающих в себя несколько элементов, смонтированных вместе и используемых как одно целое. Каждый из таких агрегатов выполняет две или более двух функций в решении задачи эксперимента, но не в состоянии решить задачу эксперимента в целом.

В данном случае оптический канал для определенного эксперимента может быть собран из отдельных агрегатов. В каналах, собранных из агрегатов, частично устраняются недостатки, присущие каналам, собранным из элементов типа "конструктор физика", однако они являются менее универсальными.

Комбинированные оптические каналы собраны из агрегатов и оптико-механических элементов типа "конструктор физика". Комбинированный принцип построения оптического канала удобен при конечной отработке методики эксперимента.

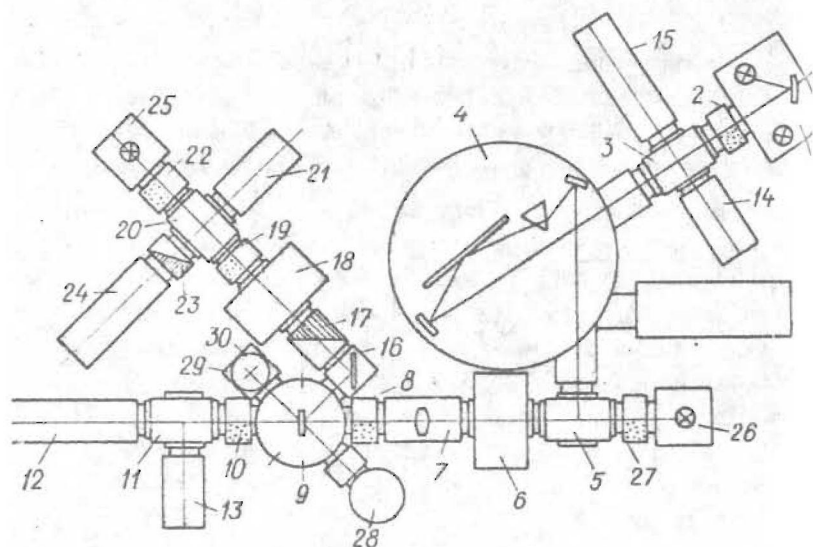
Для проведения эксперимента с особо точными измерениями, а также для работы по установившейся методике должна быть спроектирована установка с включенными в нее необходимыми вспомогательными и оптико-механическими элементами в оптимальном варианте. Такая установка способна выполнить задачу эксперимента в целом. Преимущества этих установок заключаются в том, что достигается наименьшая длина оптических каналов и максимальная жесткость всей установки. При необходимости последняя может быть предусмотрена вакуумируемой или термостатируемой.

В Проблемной лаборатории физики полупроводников в основном используются ИИС, оптические каналы которых собраны из элементов типа "конструктор физика". К каждому из этих оптико-механических элементов, который должен работать в условиях автоматизированного эксперимента, могут быть предъявлены следующие требования:

- возможность подключения к УВМ,
- высокая надежность и долговечность,
- высокая скорость срабатывания,
- высокая точность повторения,
- малые габариты при максимальной светосиле,
- малые электрические шумы.

На рис. 1 показан оптический узел типовой ИИС, состоящий из оптических каналов, собранных из элементов типа "конструктор физика". В качестве примера рассмотрим некоторые из оптических каналов.

1. Канал измерения поглощения, состоящий из источника света 1, затвора света 2, переключателя светового пучка 3, монохроматора 4, переключателя светового пучка 5, модулятора 6, держателя линзы 7, затвора света 8, криостата с образ-




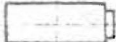



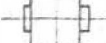





-  — источник света
-  — держатель ФЭУ
-  — отражатель света
-  — кристалл с образцом
-  — держатель линзы
-  — модулятор
-  — рентгеновская лампа с затвором
-  — переключатель светового пучка
-  — прибор для смены светофильтров
-  — монохроматор
-  — затвор света

Рис. 1.

цом 9, затвора света 10, переключателя светового пучка II и держателя ФЭУ 12 или держателя ФЭУ 13.

II. Канал измерения спектра люминесценции, состоящий из криостата с образцом 9, затвора света 8, держателя линзы 7, модулятора 6, переключателя светового пучка 5, монохроматора 4, переключателя светового пучка 3 и держателя ФЭУ 15 или держателя ФЭУ 14.

III. Канал измерений спектра суммарной люминесценции, состоящий из криостата с образцом 9, отражателя света 16, прибора для смены светофильтров 17, модулятора 18, затвора света 19, переключателя светового пучка 20 и держателя ФЭУ 21 или прибора для смены светофильтров 23 и держателя ФЭУ 24.

IV. Канал оптического возбуждения, состоящий из источника света 26; затвора света 27, переключателя светового пучка 5, модулятора 6, держателя линзы 7, затвора света 8 и криостата с образцом 9.

V. Канал возбуждения монохроматичным светом, состоящий из источника света I, затвора света 2, переключателя светового пучка 3, монохроматора 4, переключателя светового пучка 5, модулятора 6, держателя линзы 7, затвора света 8 и криостата с образцом 9.

Конструкция ряда вспомогательных и оптико-механических элементов типа "конструктор физика" рассмотрена в статье "Элементы оптико-механических каналов" настоящего сборника.

О.Э.Аболиньш, Я.Я.Страумен, Д.К.Миллер, А.Э.Плаудис,
И.А.Тале, И.К.Витол, П.Я.Гурдзиелс

АЗОТНЫЕ КРИСТАТЫ

При конструировании любого криостата, независимо от его назначения, возникает необходимость проектировать такие общие узлы криостатов как держатель образца, нагревательный элемент, электрический вакуумный ввод и т.д. Ниже рассмотрены проверенные на практике узлы азотных криостатов.

§ I. НЕКОТОРЫЕ УЗЛЫ КРИОСТАТОВ

Для исследований в области температур $77^{\circ}\text{K} - 400^{\circ}\text{K}$ с успехом применяется держатель образца, показанный на рис. I.

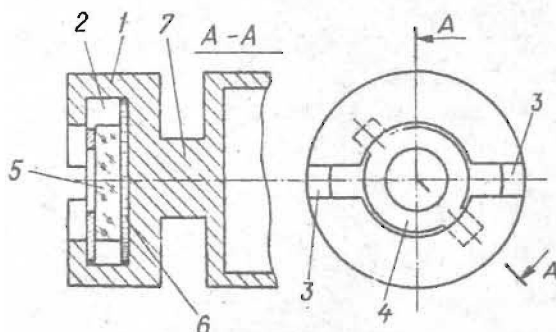


Рис. 1.

Держатель I имеет выточку 2, прорези 3 и пружинный прижим 4. Для создания хорошего теплового контакта между образцом 5 и держателем I введен слой 6 силиконового каучука. Обычно это делается так: одна сторона образца покрывается тонким слоем силиконового каучука, и образец при помощи прижима прижимается к держателю. Такой прижим значительно улучшает тепловой контакт в данном интервале температур, поскольку силиконовый каучук сохраняет удовлетворительную пластичность до температур, близких к кипению жидкого азота, и поглощает разности термических деформаций образца держателя. Для устранения температурного градиента по прилегающей к держателю I поверхности образца 5 держатель изготавливается из материала с хорошей теплопроводностью (обычно из чистой меди). По возможности держатель придается форма, способствующая сглаживанию температуры на прилегающей к образцу поверхности. Для этой цели предусмотрен цилиндрический участок 7, по которому происходит теплообмен образца с основной массой держателя. Поперечная площадь этого участка должна приближаться к размерам прилегающего к нему образца, а длина должна быть по возможности большей; но необходимо учитывать, что общий вес держателя образца существенно влияет на тепловую "инерционность" криостата. Следовательно, полный ответ может дать лишь экспериментальная проверка.

Следует обратить внимание и на то, чтобы элементы держателя, "питающиеся" радиально с торца прилегания образца цилиндрического участка 7, были небольшой массы.

При исследовании температур в более широком диапазоне — до 850°K , для улучшения теплового контакта между образцом и держателем, применялась замазка, изготовленная из окиси магния и жидкого стекла. В большинстве случаев коэффициенты линейного расширения материалов образца и держателя не совпадают, поэтому применять затвердевающие клеи и замазки можно на ограниченных участках поверхности соприкосновения

для предотвращения растрескивания образца.

Желательно, чтобы образец, по возможности, был окружен держателем для уменьшения теплообмена излучением между образцом и другими деталями криостата, что особенно важно при высоких температурах образца. Такой держатель показан на рис.2. Образец 1 прижат пружиной 2 к поверхностям 3, которые прижимают образец к поверхности 4.

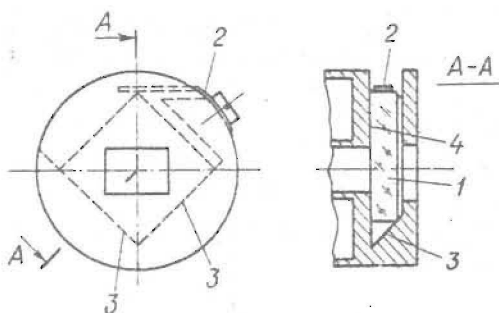


Рис. 2.

Держатель испытан до 850°K , при этом образец имел температуру на 20° ниже держателя и наибольшая неоднородность нагрева образца была 6-8 градусов. Держатель предусмотрен для образцов $10 \times 10 \times 1,5$ мм, вес держателя вместе с нагревательным элементом составлял 12 г. Аналогичный держатель, без теплового экранирования образца, давал разность температур за счет излучения держателя образца и самого образца до 150°K .

Для исследования образцов в переменном магнитном поле, в интервале температур от 80 до 470°K , успешно применяется держатель, показанный на рис.3.

Держатель 1 изготовлен из немагнитного материала ($\mu \leq 1,5$) - стали марки X18H9T, имеющей высокое электро-

сопротивление. Сталь марки X18H9T имеет низкую теплопроводность и поэтому хладагент подводится по отверстиям 2, находящимся вблизи от образца, который удерживает плоская пружина 4 и соответствующие выступы в корпусе I. Хладагент 5 от сосуда 6 подается к держателю по трубе 7, а пары выходят по трубе 8; в отверстиях 9 вмонтированы радиационные нагреватели 10. Теплопередача от хладагента к держателю меняется в зависимости от характера кипения /1,2/ хладагента в отверстиях 2 и определяется выделяемой мощностью нагревательных элементов 10; так при уровне хладагента в сосуде 6

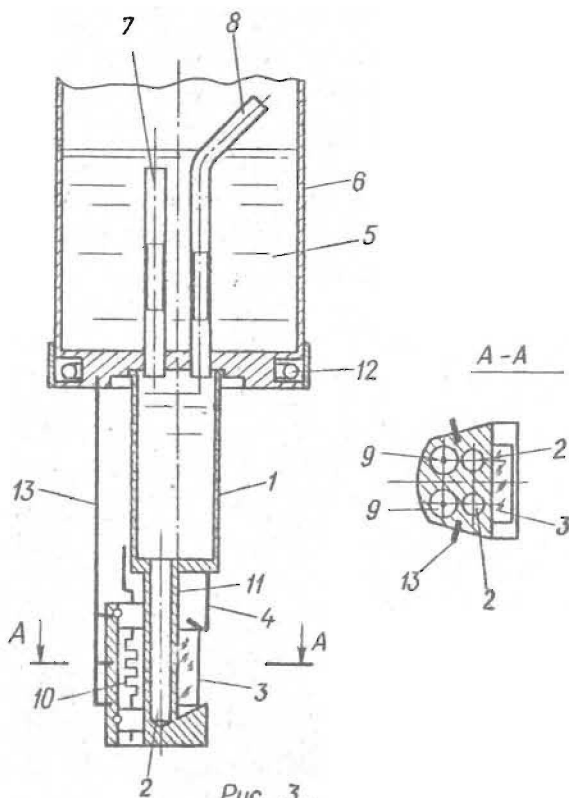


Рис. 3.

выше торца трубки 7 достигается температура образца от 80 до 160°K. Для перехода к более высоким температурам не испарить часть хладагента в сосуде 6, для чего включается нагреватель 12. В таком положении теплопередача от держателя к хладагенту происходит по медным проволокам 13, которые по всей длине электроизолированы друг от друга и от корпуса.

Для устранения температурного градиента по высоте держателя теплопередача от хладагента и нагревателя к держателю осуществлена в поперечном направлении последнего. Этому способствует также утончение держателя на участке II.

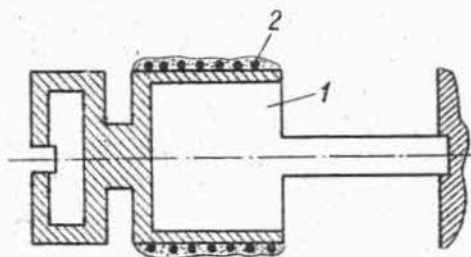
Нагревательные элементы держателей образцов должны обладать небольшой тепловой инерционностью. Для этой цели необходимо довести до минимума теплоэкранирующее действие электроизоляционных деталей нагревателя, увеличить площади теплообмена, улучшить контактную теплопередачу путем сжимания, склеивания или сплаивания теплопередающих тел и снижение веса нагревателя.

Применялись плоские нагревательные элементы, навитые на пластинке слюды, а также нагреватели, в которых спирали сопротивления плотно запрессовывались в отверстиях нагреваемой детали порошком окиси магния.

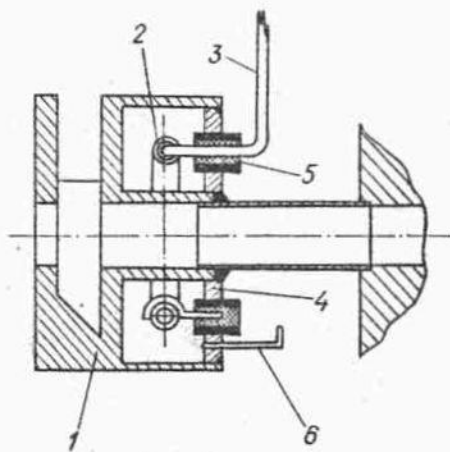
Самыми выгодными оказались два вида нагревателей: плотнонавитый, изолированный провод сопротивления, приклеенный клеем БФ-2 к корпусу держателя (рис.4), и излучательный нагреватель, встроенный в корпус держателя образца (рис.5).

Держатель образца (рис.4) с навитым и приклеенным электросопротивлением 2 очень прост в изготовлении, легко заменим и имеет небольшой вес, но обладает существенными недостатками:

низкая температура нагрева образца - 370°K (зависит от клея);



Puc. 4.



Puc. 5.

небольшой срок службы.

На рис.5 показан излучательный (радиационный) нагревательный элемент, встроенный в корпус держателя I. Нагреватель 2 изготавливается из вольфрамовой спирали, её концы точечной сваркой привариваются к никелевым проволокам 3, которые в изоляторы 5 выведены через крышку 4. Корпуса изоляторов изготовлены из стальных трубок, заполненных керамической массой. Лучшей оказалась следующая технология изготовления изоляторов:

В специальном приспособлении в стальной трубке устанавливается никелевая проволока и пространство между проволокой и трубкой плотно набивается тальком; после этого проводится обжиг в инертной атмосфере. Такой ввод впаивается в крышку 4. Там же запаяна трубка 6, сообщающая корпус нагревателя с вакуумным пространством криостата.

В зависимости от максимальной температуры нагрева держателя образца определяется способ пайки крышки 4 с корпусом держателя I. При низких температурах используется олово:

Оловом можно паять держатели, работающие при более высоких температурах, только при этом требуется соблюдение особой технологии пайки. Спаянный чистым оловом корпус нагревателя вставляется в вакуумный сосуд, а нагревательный элемент подключается источнику тока и выдерживается при температуре 900°K в течение получаса. При этом происходит частичное растворение соприкасающихся с жидким оловом деталей корпуса нагревателя, которые изготавливаются из меди. Температура плавления такого шва выше 900°K .

В настоящее время в Проблемной лаборатории физики полупроводников почти все электрические и термометрические вводы, кроме высокоомных и высокочастотных, применяются в исполнении: (рис.6) /3/.

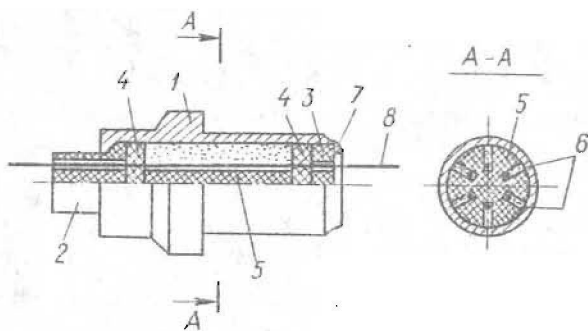


Рис. 6.

Ввод состоит из металлического корпуса I, в который смонтированы крышки 2 и 3 из фторопласта. Между ними вставлены прокладки 4 из вакуумной резины и направляющая 5. Пазы 6 направляющей 5 заполнены эпоксидной смолой без затвердителя. После сборки корпус I завальцовывается в месте 7. Провод 8 протягивается через ввод при помощи тонкостенной трубки с закрепленной в ней иглой. Это происходит так: трубка с иглой проталкивается через прокладки 4, отверстия в крышках 2, 3 и паз направляющей 5, затем игла вытягивается, и через трубку продевается провод 8. Затем, при поддержке провода рукой, трубка вытягивается из ввода.

Корпус I ввода уплотняется в стенке криостата резиновой или фторопластовой прокладкой. Количество проводов зависит от размеров ввода. Если ввод имеет диаметр 8 мм, то через него можно пропустить 4 + 6 проводов. Такая конструкция ввода обеспечивает надежное уплотнение проводов от 0,05 до 1 мм и позволяет быстро заменить их, не снимая ввода с места установки его.

§ 2. КОНСТРУКЦИИ АЗОТНЫХ КРИСТАТОВ

В Проблемной лаборатории физики полупроводников введена единая система конструирования азотных кристатов. Это позволило унифицировать некоторые узлы кристатов и в лабораторных условиях создать универсальные измерительные системы с легко заменяемыми узлами и деталями кристатов.

Конструктивные элементы кристатов показаны на рис. 7.

Каждый кристат можно разделить на две основные части — основание и головку кристата.

Основание кристата создано из полностью унифицированных деталей.

Нижняя часть основания кристата I крепится непосредственно на стенде эксперимента и к нему снизу присоединяется высоковакуумная система с программным вентилем и высоковакуумным насосом.

К верхней части детали I крепится корпус 2 с оптическими окнами 3 и со специальным окном 4 для рентгеновских лучей. В зависимости от необходимого количества каналов возбуждения и измерения определяется количество оптических окон. Максимальное количество этих окон — семь, оптические стекла в корпусе 2 уплотняются с помощью резиновых прокладок 6 и в корпусе 2 крепятся резьбовыми втулками 7 и пластмассовыми прокладками 8. Обычно между этой втулкой и оптическим стеклом ставится фторопластовая прокладка. Специальное окно 4 для рентгеновских лучей также уплотняется при помощи резиновой прокладки и резьбовой втулки; в качестве окна служит тонкий диск из алюминия или из другого материала для фильтрации излучения.

К основанию кристата относится и промежуточная деталь 9. Все остальные детали на рис. 7, относятся к головке кристата, в которой тоже имеется ряд унифицированных деталей.

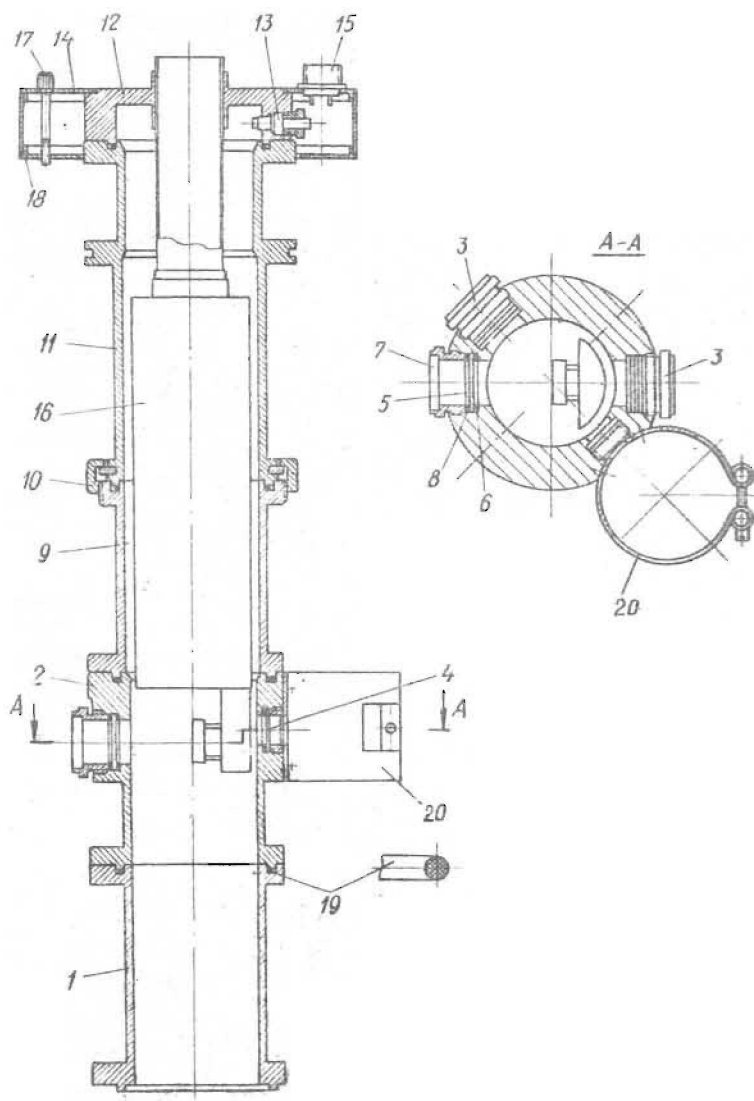


Рис. 7.

Гайка 10 позволяет быстро отсоединить головку криостата от основания и заменить ее на другую головку или произвести монтаж снятой головки. Промежуточный цилиндр II специальный для каждого криостата. Длина его зависит от конструкции криостата. Иногда в ходе эксперимента необходимо держатель образца установить напротив определенного окна, не нарушая вакуум. Для этого вместо жесткого цилиндра II ставится специальное промежуточное звено, допускающее вращение головки криостата в ходе эксперимента.

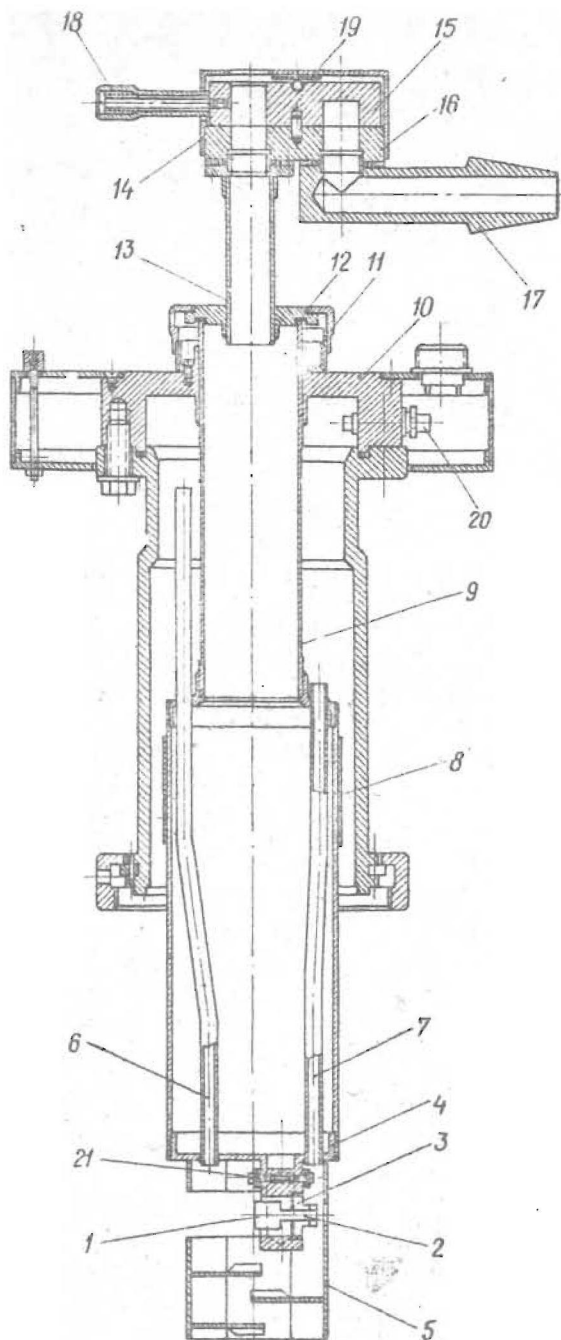
Унифицирована также деталь 12 головки криостата. В этой части помещены все вакуумные вводы 13, на ней же крепится кольцо 14 со штепсельными разъемами 15 типа ШР или 2РМ. В деталь 12 впаивается горловина сосуда хладагента 16. Доступ к вакуумным вводам и штепсельным разъемам получим, освободив винты 17 и опуская вниз защитную обойму 18.

Все вакуумные уплотнения между составными частями корпуса криостата унифицированы и представляют торoidalные резиновые кольца 19. Для крепления рентгеновской лампы служит хомут 20.

§ 3. АЗОТНЫЙ КРИОСТАТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

На рис. 8 показана конструкция криостата для измерения люминесценции в интервале температур от 60 до 470°K, имеющего устройство для откачки паров хладагента.

В нижней части криостата находится держатель 1 образца с нагревательным элементом. Последний своим удлиненным хвостовиком 2 припаян к переходнику 3, который впаивается в нижнюю часть сосуда с хладагентом. Переходник 3 конструктивно сделан небольшой массы, чтобы при смене держателя 1 легко производить монтажную пайку.



Puc. 8.

Держатель I окружен ловушкой 5, которая крайне необходима при использовании для вакуумирования криостата масляных высоковакуумных насосов без азотных ловушек.

Через сосуд хладагента пропущены трубы 6 и 7 для подвода к образцу проводов термопар и проводов для нагревательного элемента.

На поверхности сосуда хладагента намотан нихромовый нагревательный элемент 8 для удаления хладагента из сосуда при открывании криостата.

Сосуд хладагента припаян к заливной горловине 9, которая для уменьшения теплового притока к хладагенту выполнена в виде тонкостенной трубы из нержавеющей стали X18H9.

Заливная горловина в свою очередь впаяна в крышку IO криостата. При помощи накидной гайки II и резиновой прокладки I2 к верхнему торцу горловины крепится патрубок I3 с краном I4 со шлифами I5 и I6. К шлифу I6 присоединен штуцер I7 для подсоединения к вакуумному насосу типа РВН-20. Показанное на рис.8 положение соответствует открытому крану I4 для заливки в сосуде хладагента. Дросселируя краном I4, можно грубо регулировать скорость откачки паров хладагента; степень дросселирования зависит от положения шлифа I5 относительно шлифа I6. В шлифе I5 * предусмотрено отверстие (на рис.8 не показано) для впуска атмосферного давления в вакуумный насос после выключения его. Для управления краном служит рукоятка I8. Кран смазывается вакуумным маслом, а шлифы предварительно сжаты плоской пружиной I9.

В крышке IO смонтированы четыре ввода 20 (см. § I, рис.6). Проволоки термопар вставляются в фторопластовые трубки и пропускаются через трубку 6, которая имеет удлиненный верхний конец для поддержания постоянного температурного градиента проводов термопар, что очень важно для точных температурных измерений.

Оставляя 2-3 мм концы свободными, терморпарные линии на участке 10-15 мм приклеиваются или на силиконовом каучуке сжимаются прижимом 2I к сосуду хладоагента. К этим свободным концам точечной сваркой присоединяются терморпары сменного держателя I образца.

Для крепления сменного держателя образца и тепловой ловушки использован оловянный припой, остальные пайки криостата произведены серебрянными припоями.

Описанный криостат сравнительно прост и обеспечивает проведение несложных экспериментов, требующих длительного выдерживания постоянных температур образца или медленного наращивания температуры образца.

§ 4. МАЛОИНЕРЦИОННЫЙ АЗОТНЫЙ КРИОСТАТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДЫХ ОБРАЗЦОВ

Малоинерционный криостат предусмотрен для измерения люминесценции и проводимости образцов в температурном интервале от 80 до 470°K и допускает быстрое изменение температуры образца до 10 град/сек.

Устройство этого криостата показано на схеме рис.9. Криостат состоит из сосуда I, подвешенного на горловине 2 с низкой теплопроводностью к крышке 3 вакуумной рубашки криостата. Сосуд I сообщается трубой 4 с сосудом 5, имеющим встроенный радиационный нагревательный элемент 6, отделитель паров 7 и отверстие, в которое впаяна трубка 8 низкой теплопроводности. В трубке 8 встроен корпус держателя 9 образца 10 с радиационным нагревательным элементом II. Трубка 8 спаяна компенсатором 12 (сильфоном), сообщаемым с трубкой 13, в которой встроены дроссели 14 и 15. Дроссель 14 включен последовательно с электромагнитным вентилем 16, а дроссель 15-параллельно. Выход из вентилем 16 соединен сильфоном 17 с трубкой 18, которая имеет регулировочный винт 19.

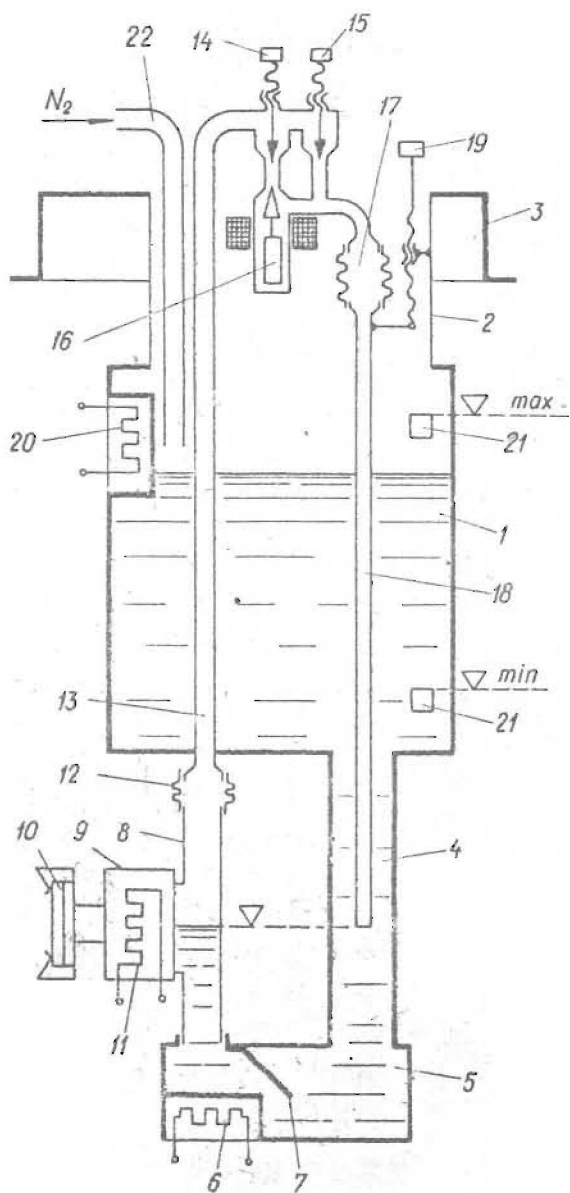


Рис. 9.

В сосуде I азота находится нагревательный элемент 20 для выпаривания азота, датчики 2I уровня и заливная трубка 22.

Рассмотрим работу криостата при закрытом дросселе 15. Если при этом электромагнитный вентиль 16 и дроссель 14 открыты, уровень азота в трубке 8 установится соответственно положению нижнего конца трубки 18 при наличии азота, но независимо от его уровня в сосуде I. В этом случае температура держателя 9 равна азотной.

Быстрый нагрев держателя 9 осуществляется закрытием электромагнитного вентиля 16, включением нагревательного элемента II на максимальную мощность и включением элемента 6 генератора паров. При этом образующиеся пары азота в трубке 8 выдают криз жидкий азот, и теплопередача от держателя 9 к азоту снизится до минимума, определенного теплопроводностью паров и трубки 8. Почти вся энергия, выделенная элементом II, будет накапливаться в держателе 9, и скорость изменения температуры его будет зависеть от мощности элемента II и теплоемкости держателя 9.

Быстрое охлаждение осуществляется выключением нагревателя II и открытием вентиля 16. Скорость понижения температуры определяется напором азотного столба, т.е. положением нижнего конца трубки 18, проходным сечением дросселя 14, теплоемкостью и величиной поверхности держателя 9, омываемой жидким азотом.

Для устранения влияния посторонних тепловых потоков к держателю 9 при стабилизации его в районе низких температур служит дроссель 15, при помощи которого увеличивают теплообмен между держателем 9 и азотом.

Пополнение азотом сосуда I осуществляется автоматически и управляется датчиками 2I.

Конструктивное исполнение описанного криостата показано на рис.10.

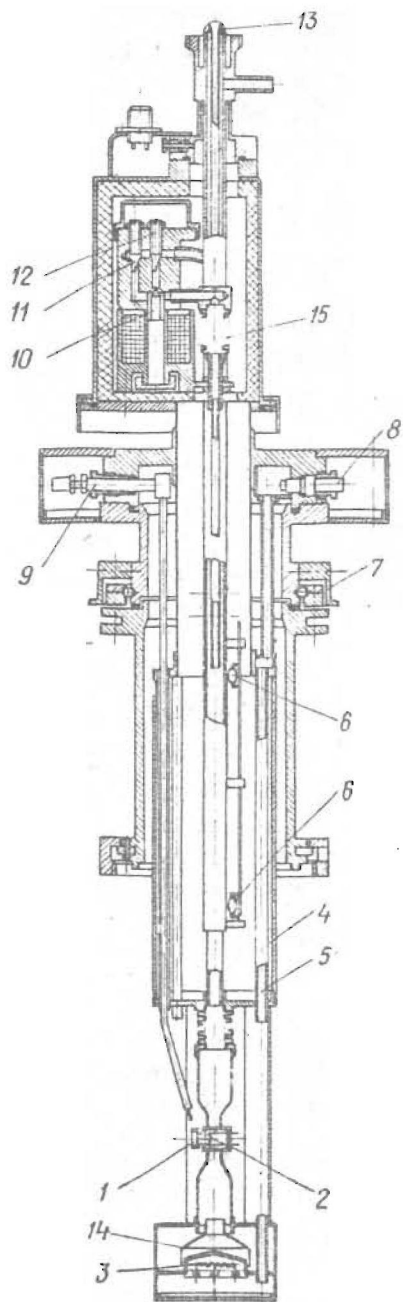


Рис. 10.

I - держатель образца, 2 - нагревательный элемент, 3 - нагревательный элемент генератора паров, 4 - сосуд хладоагента, 5 - трубки для проводов, 6 - датчики уровня хладоагента, 7 - соединение для поворота головки криостата без нарушения вакуума, 8 - вакуумный ввод, 9 - высокоомный ввод, 10 - электромагнитный вентиль, II и I2 - регулируемые дроссели, I3 - заливная горловина для хладоагента, I4 - отделитель паров, I5 - сильфон регулировки уровня в трубке держателя образцов.

Описанный криостат можно использовать как в полуавтоматических системах с температурным регулятором /4/, так и в автоматизированных системах с применением температурного регулятора в виде локального автомата и электронной управляющей вычислительной машины.

Последний вариант используется в нашей лаборатории и позволяет применять совершенно новые методы исследования образцов со сложными температурными режимами.

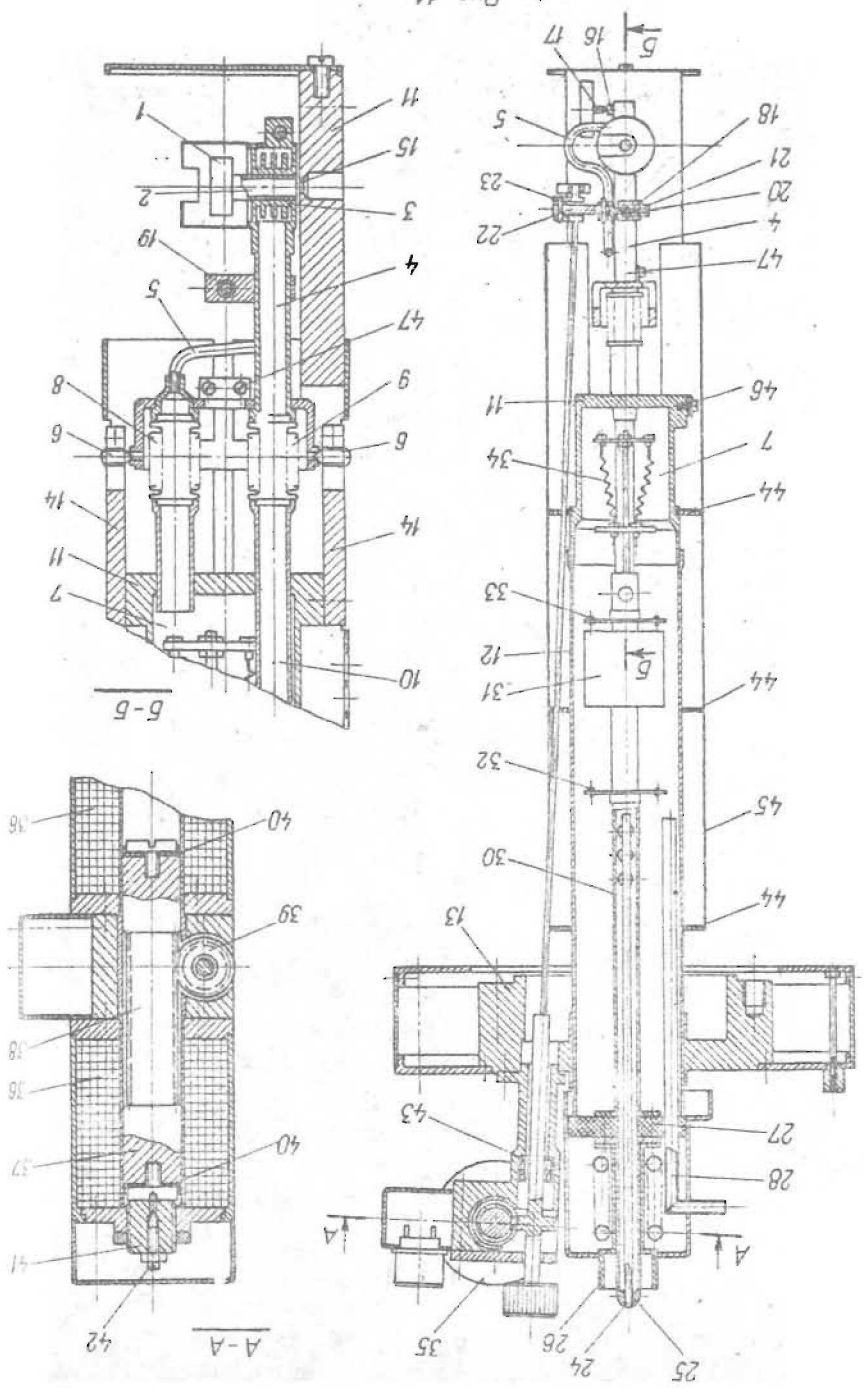
§ 5. АЗОТНЫЙ КРИСТАТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ

Конструкция криостата для исследования поглощения образцов однолучевым методом в интервале температур от 80 до 850°K показана на рис. II.

Держатель образца (см. § I, рис. 2 и 5)⁺) и теплопровод 2 легкоплавким припоем впаяны в теплообменнике 3, с ребристой поверхностью, которая соответствует максимальной мощности ⁺⁺) нагревательного элемента держателя I.

⁺) см. также /5/.

⁺⁺) см. статью "Некоторые теоретические и практические вопросы по созданию криогенной аппаратуры" настоящего сборника.



Теплообменник держателя с трубками 4 и 5 может поворачиваться в виде маятника на центрах 6. Трубка 5 соединена с сосудом 7 хладагента, через эту трубку и сильфон 8 хладагент поступает в теплообменник 3. Пары хладагента по трубке 4, сильфону 9 и трубке 10 поступают в сосуд 7 выше уровня хладагента. Сосуд хладагента изготовлен из отдельных спаянных частей: медной части (головки) II, тонкостенной трубы 12 из стали X18H9T, которая впаяна в крышку 13. К медной части II сосуда 7 на винтах и мягком припое крепятся опоры 14 для центров 6. В медной части II находится эталонное отверстие 15. В корпусе теплообменника 3 закреплена одна часть концевой опоры 16, а вторая часть опоры 17 - на головке II.

В концевом положении (как на рис. II) теплообменник 3 с держателем I образца удерживает пружина 18, смонтированная в кронштейн 19 трубы 4. Пружина 18 постоянным усилием сжимает опоры 16 и 17 и тем самым обеспечивает хорошее повторение положения. Передвижение держателя I образца осуществляется пространственным кривошипно-шатунным механизмом, состоящим из кривошипа 23, шатуна 22, тяги 20 и гайки 21.

Конструктивное исполнение описанного узла криостата гарантирует высокую точность измерений. При наличии хладагента в сосуде 7, независимо от температуры держателя образца, все узлы криостата, определяющие точность (эталонное отверстие, опоры для центров и концевые опоры), будут иметь стабильную температуру, что исключает ошибки от теплового расширения отдельных деталей криостата.

Заполнение сосуда 7 хладагентом производится через трубку 24, впаянную в штуцер 25. Заправочный азотопровод присоединяется накидной гайкой к втулке 26. Штуцер и втулка крепится к крышке 27 из текстолита. К этой же крышке монтируется трубка 28 для вывода паров из сосуда 7 хладагента. Трубка 28 дополнительно устраняет возможность переполнения сосуда азотом, если в аварийном случае не

срабатывает автоматика выключения подачи азота. На втулке 26 монтируется нагревательный элемент 29, служащий для предотвращения запотевания верхней части криостата.

Изнутри к крышке 27 крепится труба 30 из стали X18H9T, по которой передвигается поплавок 31, замыкающий контакты на тарелках 32 и 33. Размещению тарелок соответствует минимальный и максимальный уровень хладагента в сосуде 7. К нижней части трубы 30 крепится нагревательный элемент 34 для подогрева сосуда 7 при вскрывании криостата. Крышка 27 на прокладке прижата к верхнему торцу трубы 12.

В настоящее время поплавковые регуляторы уровня хладагента в криостатах в нашей лаборатории больше не применяются ввиду пониженной надежности.

Перемещение держателя образца совместно с теплообменником 3 осуществляется электромагнитным приводом 35, состоящим из двух катушек 36, якоря 37 с цилиндрической рейкой 38 и валиком-шестерней 39. На торцах якоря 37 поставлены манжеты 40. Концевые положения якоря 37 регулируются упорами 41, в которых помещены игольчатые клапаны 42 для регулирования скорости выхода воздуха из буферных полостей. Такая конструкция позволяет отрегулировать систему так, чтобы до минимума уменьшились жесткие удары якоря и вместе с тем уменьшились вибрации криостата. Валик шестерни 39 уплотняется двумя резиновыми сальниками 43.

Провода в криостат вводятся при помощи вакуумных вводов (см. § I, рис. 6) и внутри криостата крепятся на фторопластовых дисках 44 и защищаются кожухом 45 из стали X18H9T. Провода, идущие к держателю образца, прижимаются винтом 47 к подвижной части криостата. Для контроля положения держателя образца имеется контактная индикация (контакты на рис. не показаны).

Описанный криостат успешно использовался как в системах с ручным управлением эксперимента, так и в автоматизированных системах, где управление экспериментом осуществ-

лялось с помощью УВМ "Днепр-1".

Л и т е р а т у р а

1. Фастовский В.Г., Петровский Ю.В., Ровинский А.Е.,
Криогенная техника, изд. "Энергия", М., 1967.
2. Новые направления криогенной техники, под редакцией
проф. М.П.Малкова, изд. "Мир", М., 1966.
3. Описание к авторскому свидетельству № 263960.
4. См. наст. сборник, стр. 216.
5. Описание к авторскому свидетельству № 261738.

2к

А. Э. Плаудис

ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ТРАКТА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ СИСТЕМЫ

При изучении электронных свойств твердых тел существенное значение имеют как неизотермические методы, так и методы определения различных изотермических характеристик (спектры поглощения и излучения, фотопроводимость и др.). Применение этих методов вышло из стадии поискового эксперимента. Увеличивающийся удельный вес исследований количественных характеристик требует проведения больших серий однотипных экспериментов с последующей обработкой огромных массивов измерительной информации. Исследования количественных характеристик и необходимость сопоставления результатов различных экспериментальных серий существенно повышают требования к точности и воспроизводимости режимов эксперимента.

Для решения рассматриваемого круга задач наиболее эффективными являются автоматизированные системы экспериментирования [1, 2]. На основе накопленного опыта в автоматизации физического эксперимента и учитывая особенности упомянутых методов в Проблемной лаборатории физики полупроводников Латвийского государственного университета построена автоматизированная научно-исследовательская система (НИС), имеющая прямую связь с УВМ "Днепр". Такая система характеризуется легким и быстрым переходом с одного эксперимента на другой, сохраняя при этом высокую воспроизводимость условий однотипных экспериментов. Повышенная точность каждого из экспериментов достигается реализацией он-

тимальных условий возбуждения и измерения и применением математических методов обработки измерительной информации.

Методические возможности этой системы в изотермических и неизотермических режимах зависят от успехов создания температурного тракта, который служит для реализации заданного температурного воздействия (канал управления) и для получения информации о точных параметрах реализованного воздействия (канал измерения).

В статье рассмотрены возможности выбора структурной схемы и алгоритма функционирования канала управления температурой для автоматизированного комплекса спектрально-кинетических методов исследования.

В ы яс н е н о :

- 1) качественные и количественные характеристики реализуемых температурных воздействий, определенных для выбранного круга экспериментальных методов;
- 2) определяющие характеристики при выборе конструкций криостата и терморегулятора, пригодных для выполнения требований п.1;
- 3) оптимальный метод регулирования для определенной в п.2 конструкции криостата;
- 4) структурная схема выбранного метода регулирования и пути ее реализации.

**Качественные и количественные параметры
канала управления**

При определении совокупности методов, реализуемых на НИС, нами выбраны такие, в которых измеряемыми параметрами являются температура, интенсивность свечения, пропускная

способность и электропроводность образца. В зависимости от закономерностей управления температурой объекта выбранная совокупность методов разделяется на три большие группы.

Первая группа - изотермические методы (температура является параметром). Здесь возможны измерения:

- 1) спектров люминесценции,
- 2) спектров возбуждения люминесценции,
- 3) спектров фотостимуляции люминесценции,
- 4) выхода люминесценции и его зависимости от интенсивности разнообразных возбуждающих и деэвозбуждающих факторов,
- 5) спектров поглощения,
- 6) спектров добавочного поглощения,
- 7) спектров возбуждения фотопроводимости,
- 8) спектров стимуляции фотопроводимости.

Вторая группа - методы, требующие медленного повышения или понижения температуры образца по заданной функции $dT/dt(t)$. Здесь возможны измерения:

- 1) термовисвечивания,
- 2) фото- и термостимулированной люминесценции,
- 3) постоянной термостимулированной люминесценции,
- 4) термообесвечивания,
- 5) фото- и термообесвечивания,
- 6) термостимулированного тока,
- 7) фото- и термостимулированного тока.

Третья группа - методы, требующие импульсного нагрева-охлаждения или ступенчатого перепада температуры. К таким методам относятся

- 1) фракционное термовисвечивание;
- 2) фракционный термостимулированный ток,
- 3) выделение температурно независимых компонентов в рекомбинационном свечении.

Количественные характеристики перечисленных трех групп температурных воздействий заданы по следующим соображениям:

1. Существенная зависимость кинетики электронно-дырочных и ионных процессов от температуры приводит к необходимости высокоточного выдерживания заданного изотермического или динамического закона температурного воздействия (см. [3,4,5,6]).

2. Предполагаемая точность измерений, проводимых рассмотренными методами, не ниже 0,5%. Погрешность, которая вносится несоответствием установленной регулятором температуры заданной, должна быть меньше этой величины.

3. Для количественного сопоставления результатов различных серий экспериментов воспроизводимость температурного воздействия не должна быть меньше достигаемой точности этого воздействия.

Проведенный на основе сказанного детальный анализ спектрально-кинетических люминесцентных методов [5,6] дает основание определить следующие параметры температурных воздействий:

1) для режима термостатирования:

нестабильность температуры образца и воспроизводимость установки температуры в течение одного часа

при температуре от 80 до 300°K не более $\pm 0,1^\circ\text{K}$,

при температуре от 300 до 450°K не более $\pm 0,2^\circ\text{K}$;

средний дрейф температуры образца не более $0,1^\circ\text{K}$ в час;

минимальный шаг сканирования температуры не менее $0,2^\circ\text{K}$;

2) для импульсного нагрева-охлаждения или ступенчатого перепада температуры (режим импульсной температуры):

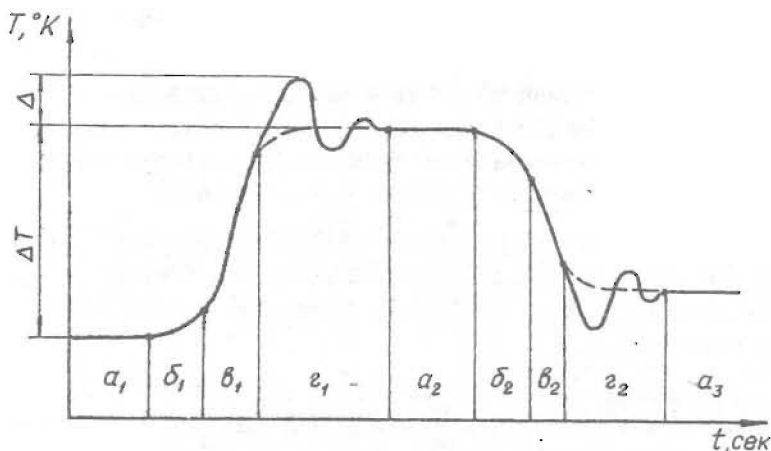


Рис.1 Режим импульсной температуры.

- области a_i — соответствует требованиям режима термостатирования;
- области b_i — время перехода не более 3 сек;
- области v_i — максимальная скорость нагрева-охлаждения. Выбирается в зависимости от метода измерений. Верхний предел $5^{\circ}\text{K}/\text{сек}$;
- области Γ_i — время переходного процесса для держателя образцов не более 10 сек;
- Δ — максимальная амплитуда переходного процесса (перерегулирования) в режиме нагрева не более 2% от абсолютной температуры образца в режиме стабилизации;

ΔT - минимальный шаг 3°K ,
 максимальный шаг 370°K ,
 минимальная температура 80°K ,
 максимальная температура 450°K ;

3) для медленно и непрерывно (относительно импульсного режима) меняющейся температуры (режим слежения):

максимальная скорость нагрева-охлаждения $0,2^{\circ}\text{K/сек}$,
 отклонение от заданной функции изменения температуры
 во времени не более $\pm 0,2^{\circ}\text{K}$,
 минимальная температура 80°K ,
 максимальная температура 450°K .

Успех создания канала управления температурой с заданными параметрами в одинаковой степени определяется как конструкцией криостата, так и конструкцией блока электронного терморегулятора.

К р и о с т а т

Самые строгие условия на канал управления накладывает режим импульсной температуры. Режим термостатирования является одним из его элементов, а любая функция изменения температуры во времени в режиме слежения осуществима ступенчатой аппроксимацией, где элемент аппроксимации вырабатывается в режиме импульсной температуры с параметрами, учитывающими требования режима слежения. Главным из этих условий является необходимая большая скорость перехода между двумя уровнями термостатирования, для осуществления которой разработан малоинерционный криостат и в схеме терморегулятора введены специфические управляющие связи.

Основные принципы конструирования малоинерционного криостата, его описание и технические характеристики рассмотрены в статьях [7, 8], в которых отмечается, что

в конструкции малоинерционного криостата учитывается следующее:

теплоемкость держателя образца должна быть минимальной;

нагрев держателя должен осуществляться радиационным нагревателем, встроенным в держатель образца;

охлаждение держателя должно быть импульсное конвективное, а система "держатель-хладоагент" не должна содержать промежуточных звеньев.

На основании этих выводов построен ряд криостатов и экспериментально доказана правильность принципов, примененных при их конструировании. По полученным техническим характеристиками эти криостаты пригодны для реализации всех трех рассмотренных видов температурных воздействий /8/.

Для достижения больших скоростей перехода между уровнями термостатирования в криостате применен принцип максимальных тепловых потоков [7]. Если на нагреватель криостата подана мощность, во много раз превышающая необходимую для поддержания заданной температуры термостатирования, то переход на эту температуру произойдет с большой скоростью, так как при выбранной мощности температура термостатирования находится на начальном прямом участке функции изменения температуры во времени. Величина скорости перехода, определяемая наклоном начального участка этой функции, зависит от абсолютной величины мощности нагрева. Большая скорость перехода между уровнями термостатирования при охлаждении осуществляется таким же образом, как при нагреве, только вместо большой мощности нагрева схема терморегулятора включает тепловой ключ (электромагнитный клапан [8]). При получении большой скорости перехода между уровнями рассмотренным методом в созданной конструкции криостата возможно возникновение перегревания. Это должно учитываться при разработке схемы терморегулятора.

Выбор метода регулирования

Понятно, что для каждого из реализуемых температурных режимов в отдельности оптимальными могут оказаться разные методы регулирования. Требование оперативной взаимозаменяемости и легкого программирования этих режимов в автоматизированных НИС осложняет задачу выбора.

Режим импульсного нагрева-охлаждения отличается от режима термостатирования в конструируемом канале управления тем, что переходный процесс между стабилизированными температурами определен только для импульсного режима; требования к стабилизированной температуре обоих режимов одинаковы. Для режима постоянной температуры задан минимальный шаг - $0,2^{\circ}\text{K}$, а для импульсного режима - 3°K . Следовательно, регулятор, отвечающий требованиям режима импульсного нагрева-охлаждения, пригоден также для реализации режима постоянной температуры, если дополнительно учесть необходимость минимального шага $0,2^{\circ}\text{K}$ для этого режима. Такой регулятор позволяет осуществить и по заданной функции медленно меняющуюся температуру, если учтены дополнительные требования к переходному процессу для величины шага от $0,2$ до 3°K . При этом регулятор должен работать в режиме слежения, в котором форма переходной характеристики не задается регулятором, а зависит только от теплофизических характеристик криостата. По остальным параметрам регулятор импульсного режима работает с резервом относительно требований генерирования медленно меняющихся температур. Максимальная скорость изменения температуры для импульсного режима $5^{\circ}\text{K}/\text{сек}$, а для медленно меняющейся температуры - $0,2^{\circ}\text{K}/\text{сек}$. Нестабильность температуры образца в области стабилизации импульсного режима $\pm 0,1^{\circ}\text{K}$, а допустимое отклонение температуры от заданной функции для медленно меняющейся температуры $\pm 0,2^{\circ}\text{K}$. Для генерирования заданной функции температуры с необходи-

мой точностью минимальный шаг задатчика температуры импульсного регулятора должен быть не больше $0,2^{\circ}\text{K}$.

Общее заключение из сказанного: три рассмотренных режима температуры реализуемы регулятором импульсного нагрева-охлаждения, если для величин шага до 3°K возможен следящий режим и разрешающая способность задатчика не менее $0,2^{\circ}\text{K}$.

Для объяснения выбора метода регулирования рассмотрим отдельно переходный процесс и область стабилизации импульсного режима.

Крутизна и временные параметры переходного процесса определяются только для импульсного нагрева-охлаждения. Так как точность кривой этого процесса специально не оговорена, он легче всего реализуем двухпозиционным методом регулирования [9]. Метод привлекает простотой конструкции электронной части регулятора и управляемых органов криостата (клапан и дроссели теплового ключа), надежностью, простотой настройки и обслуживания. Применяемый в регуляторе датчик температуры определен импульсным режимом и заданной нестабильностью не более $\pm 0,1^{\circ}\text{K}$ на образце в режиме стабилизации.

В дальнейшем будет обосновано применение в качестве температурного датчика термопары медь-константан. В области требуемой наибольшей абсолютной стабильности, т.е. в области азотных температур, такая термопара имеет чувствительность 16 мкВ/градус.

Даже без специального анализа можно утверждать, что метод статического регулирования обеспечивает требуемую точность даже с запасом, чего нельзя сказать о методе двухпозиционного регулирования. Однако целый ряд явных преимуществ последнего метода (простота конструкции, настройки и обслуживания, надежность работы, удобная совместимость с методом реализации переходного процесса) требует конкретной оценки применения двухпозиционного регулирования. Известным недостатком последнего является колебательный режим как

нормальный режим работы [9] .

Основные ограничения на применение метода двухпозиционного регулирования в разработанной системе накладывает реально достижимая минимальная амплитуда колебаний. Она зависит, в первую очередь, от времени запаздывания и от диапазона нечувствительности регулятора. При использовании термопары имеющей хороший тепловой контакт с держателем образца, время запаздывания в цепи датчика для заданных режимов температуры ничтожно. Реализация электронной схемы регулятора, не вносящей временных искажений, не представляет трудности. Поэтому при оценке возможностей метода для конкретного случая временам запаздывания цепей датчика и управляющей электроники можно пренебречь.

В реальных нагревателях время запаздывания может появиться вследствие конечного времени их "разгона". Величина этой компоненты в описанной конструкции криостата сведена к минимуму выбором нагревателя радиационного типа. Время "разгона" оценивается несколькими десятками миллисекунд. При известном времени запаздывания амплитуда колебаний зависит от величин притока и оттока тепла регулируемого объекта [9]. Применением теплового ключа эти величины в описанном криостате сведены к минимальным. Влияние времени запаздывания на амплитуду колебаний уменьшается при использовании симметричного регулирования. Произвести количественную оценку вклада времени запаздывания в амплитуду колебаний трудно, поскольку точно неизвестна величина этого времени и величина притока тепла. По грубым оценкам можно ожидать, что этот вклад для разработанного криостата и регулятора будет меньше $0,1^{\circ}\text{K}$ (в дальнейшем это предположение подтвердилось экспериментально).

В основном амплитуда колебаний определяется диапазоном нечувствительности регулятора. При необходимой стабильности $\pm 0,1^{\circ}\text{K}$ и чувствительности термопары 16 мкВ/градус зона не-

чувствительности регулятора должна быть не более 1,6 мкв. Электронные схемы с подобной чувствительностью и величиной дрейфа, удовлетворяющей остальным требованиям заданных температурных функций, осуществимы.

Произведенный анализ показывает возможность применения метода двухпозиционного регулирования для реализации заданных температурных режимов.

Следует отметить, что стабильность температуры образца должна улучшаться демпфирующим эффектом сопротивления теплопередачи от держателя к образцу и теплоемкостью образца.

Структурная схема терморегулятора

Параметры осуществляемых температурных воздействий таковы, что для их реализации немисливо применение систем регулирования, в контуре которых активно участвует оператор. Обязательным становится применение систем автоматического регулирования температуры (САРТ). Известно много схем автоматического регулирования [10-25]. Они отличаются как примененными методами регулирования, так и схемными решениями некоторых узлов для регуляторов с одинаковым методом регулирования. Существуют схемы регуляторов, обеспечивающие в отдельных режимах параметры, которые лучше параметров, требующихся для САРТ. Однако ни один из описанных регуляторов не может реализовать все требуемые для САРТ режимы и, что еще важнее, ни один из них без существенных переделок не может быть использован как элемент автоматизированной ИИС. Поэтому при технической реализации САРТ из описанных конструкций можно позаимствовать методы регулирования и лишь некоторые конкретные схемные решения отдельных узлов схемы регулятора.

Принципы построения приведенной на рис. 2 структурной схемы и назначение каждого из элементов рассмотрены в статьях [26 и 27].

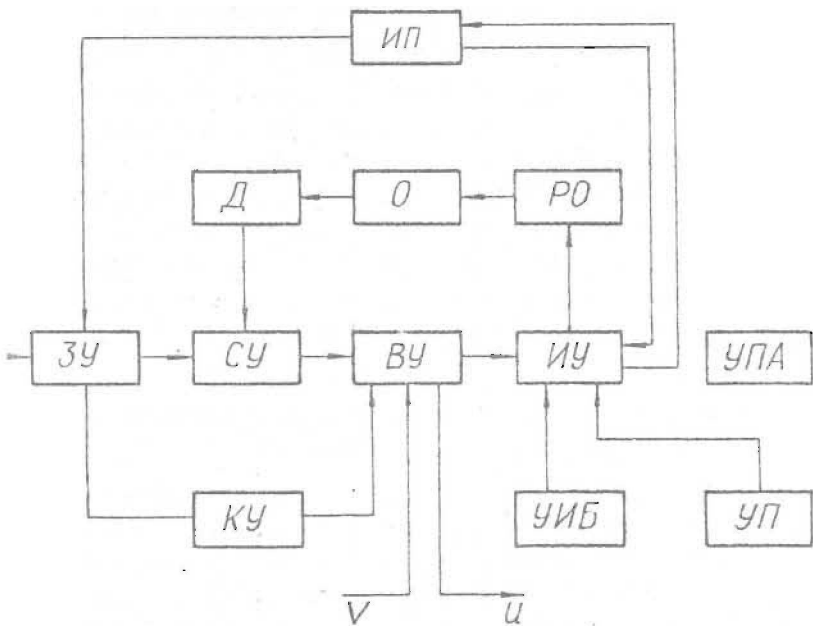


Рис. 2 Структурная схема САРТ.

О - объект регулирования; Д - датчик температуры объекта; ЗУ - задающее устройство; СУ - сравнивающее устройство; ВУ - вычислительное устройство; ИУ - исполнительное устройство; РО - регулирующие органы; КУ - корректирующее устройство; УПА - устройство подачи азота; УП - устройство прогрева; УИБ - устройство индикации и блокировок; ИП - инженерный пульт; X - вход задания регулирования; V - вход управляющей информации; u - выход признака состояния САРТ.

УП предназначено для выпаривания азота и прогрева криостата до комнатной температуры. Это необходимо для предотвращения образования конденсатов на образце после выключения вакуумных насосов. Немаловажной является возможность оперативной замены образцов.

При выборе структурной схемы и, главное, алгоритма ее функционирования определяющими являются несколько факторов:

- 1) выбран двухпозиционный метод регулирования;
- 2) САРТ является одним из приборов подключенной к УВМ автоматизированной НИС;
- 3) должна обеспечиваться оперативная взаимозаменяемость и легкое программирование реализуемых температурных воздействий, соблюдая при этом их количественные характеристики.

Алгоритм работы САРТ с выбранной структурной схемой рассмотрим на примере режима импульсной температуры (см. рис. 2 и 3).

На диаграммах не изображена зона нечувствительности СУ и время запаздывания всей системы.

Через вход X (см. рис. 3) полученная информация о требуемом переходе с температуры термостатирования T_0 на T_1 ($T_1 \gg T_0$) перерабатывается в ЗУ и поступает на один из входов СУ. Появляющийся на выходе СУ сигнал рассогласования преобразовывается в ВУ и в момент времени t_0 посредством ИУ включает РО (радиационный нагреватель криостата) на максимальную мощность. После определенного времени "разгона" температура θ , контролируемая Д, начинает стремительно расти и в момент t_1 достигает уровня, при котором ВУ переключает РО на "регулирующую" мощность, выбранную по критериям, рассмотренным в [7]. Для достижения симметричного регулирования [9] в любой точке температурного диапазона необходимо поправку вводит КУ. РО на регу-

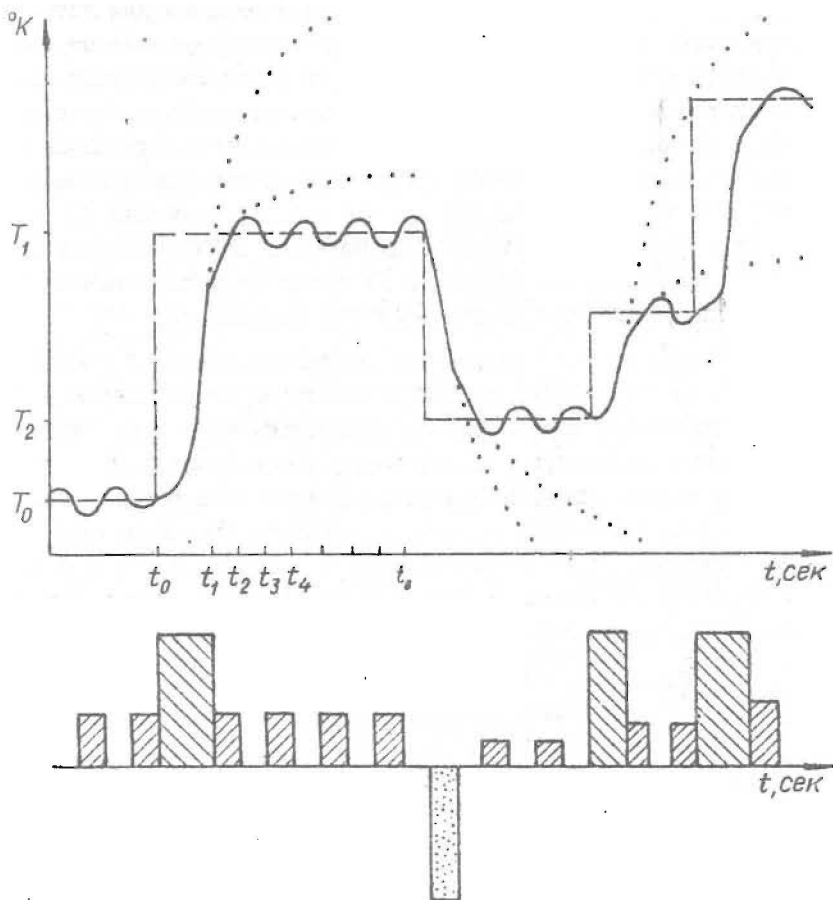
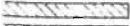
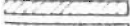






Рис.3 Работа САРТ в импульсном режиме.

Обозначения:

-  - включена максимальная мощность нагрева;
-  - включена регулирующая мощность нагрева;
-  - тепловой ключ открыт;
-  - происходит произвольное охлаждение;
-  - требуемое изменение температуры во времени;
-  - ход температурной кривой в случае разомкнутой обратной связи регулятора.

лирующую мощность переключается с опережением для устранения перерегулирования, амплитуда которого зависит от инерционных характеристик криостата, от расстояния между уровнями термостатирования ($\Delta T = T_2 - T_1$) и от места этого перехода в температурном диапазоне. Для полного устранения перерегулирования величина опережения (порог срабатывания ВУ) рассчитывается на УЭМ для конкретной величины ΔT в каждой точке температурного диапазона. Если некоторое перерегулирование допустимо, в ВУ вводится фиксированная во всем диапазоне температур величина опережения.

В момент t_2 температура достигает заданный уровень T_1 , сигнал рассогласования на выходе СУ равняется нулю, и регулирующая мощность с РО снимается. Из-за инерционности криостата температура O переходит через уровень T_1 , но при правильно выбранном рабочем режиме этот переход незначителен по амплитуде и непродолжителен по времени [9]. Если рабочий режим выбран правильно, приток тепла к O при включенных РО всегда больше оттока (произвольное охлаждение), существующего независимо от состояния РО.

В интервале времени $t_2 + t_3$ из-за произвольного охлаждения рост температуры прекращается, и в момент t_3 температура O опять достигает уровня T_1 . ВУ подает на РО регулируемую мощность. Опять из-за инерционности температура O переходит через уровень T_1 . Регулирующая мощность остается включенной до момента t_4 , когда температура O достигает заданный уровень T_1 и регулирующая мощность с РО снимается. Таким образом температура O колеблется около заданного уровня T_1 с амплитудой, которую определяет зона нечувствительности СУ и инерционные свойства (время задержки) системы [9].

После определенного числа колебаний в ВУ вырабатывается признак "Температура установилась" и через выход Ц подается на УЭМ.

В момент времени t_2 через вход X полученная информация о требуемом переходе с T_1 на T_2 ($T_2 \ll T_1$) перерабатывается рассмотренным выше образом, только вместо радиационного нагревателя ВУ посредством ИУ включает другой РО - тепловой ключ (электромагнитный вентиль) криостата [8] .

Из сказанного следует, что исследования спектрально-кинетическими методами требуют реализации трех режимов температурных воздействий: термостатирование, импульсный режим и режим слежения.

Самым сложным является импульсный режим, реализация которого требует разработки малоинерционного криостата.

Достаточно жесткие требования к импульсному режиму включают в себя возможность реализации также и режима термостатирования и слежения.

Оптимальным для созданной САРТ является двухпозиционный метод регулирования.

Расширение основной структуры системы автоматического регулирования дополнительными блоками обуславливается разработкой САРТ как системного прибора [27], а также применением в нем двухпозиционного метода регулирования.

Конструктивное решение отдельных устройств САРТ рассматривается в отдельной статье [28] .

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Сб. Кибернетизация научного эксперимента, вып. I, изд. ЛГУ им. П.Стучки, Рига, 1968.
2. Ученые записки ЛГУ, т. 160. Кибернетизация научного эксперимента, вып. 3, Рига, 1972, с.3 и II.

3. Gobrecht H., Hoffmann D., Phys.kond. Materie, 5, 35, 1966.
4. Gobrecht H., Hoffmann D., J.Phys.Chem.Sol., 22, 509, 1966.
5. См. наст. сборник, стр. 3.
6. То же, стр. 33.
7. То же, стр. 95.
8. То же, стр. 116.
9. Кампе-Немм А.А., "Автоматическое двухпозиционное регулирование", "Наука", М., 1967.
10. Ветчинкин А.Н., ПТЭ, № 1, 192, 1961.
11. Линдсей, "Приборы для научных исследований", № 9, 83, 1966.
12. Пономарев Я.Г., ПТЭ, № 6, 218, 1966.
13. Джин А.Т., Павлов Е.П., "Измерительная техника", № 2, 84, 1966.
14. Мамыцкий В.Н., ПТЭ, № 2, 193, 1967.
15. Данильченко В.Е., Куртенок Л.Ф., Лубанов В.Н., ПТЭ, № 1, 208, 1967.
16. Головский Е.А., Циморный В.А., Яковлев Г.Д., ПТЭ, № 5, 249, 1967.
17. Трейси, "Приборы для научных исследований", № 9, 55, 1968.
18. Ларсен, "Приборы для научных исследований", № 1, 3, 1968.
19. Де Паз, "Приборы для научных исследований", № 9, 143, 1968.
20. Арси Д., Стерн, "Приборы для научных исследований", № 12, 87, 1968.
21. Падо Г.С., Астров Д.Н., Байбаков В.И., Драгунов В.С., ПТЭ, № 1, 207, 1968.
22. Логвиненко С.П., Бровка Ю.Н., ПТЭ, № 1, 212, 1968.
23. Захаров А.И., ПТЭ, № 2, 212, 1969.

24. Васильев Я. В., Неермолов А. Ф., Герасимов В. А.,
Кононова Г. В., ПТЭ, № 5, 187, 1969.
25. Еременко В. И., Шорохов Н. Х., ПТЭ, № 4, 124, 1969.
26. Круг Е. К., Александрини Т. М., Диличенский С. Н.,
Цифровые регуляторы, изд. "Энергия, М., 1966.
27. Ученые записки ЛГУ, т. 160. Кибернетизация научного
эксперимента, вып. 3, Рига, 1972, с. 66.
28. См. настоящий сборник, стр. 156.

57
М.Я.Зариньш, А.Э.Плаудис

ТЕРМОРЕГУЛЯТОР МАЛОИНЕРЦИОННОГО АЗОТНОГО КРИОСТАТА

Работа и устройство основных узлов терморегулятора, разработанного в Проблемной лаборатории физики полупроводников Латвийского государственного университета им. П.Стучки, рассматривается на основе упрощенной функциональной схемы (см. рис. 1).

Системы регулирования температуры имеют различные конструктивные решения, однако их функционирование основано на одном принципе - приток тепла к управляемому объекту меняется при отклонении его температуры от заданного значения [1].

Температура объекта регулирования воспринимается датчиком (Д). В задающем устройстве (ЗУ) вырабатывается сигнал, соответствующий необходимому значению температуры объекта.

Сравнивающее устройство (СУ) сравнивает показания датчика с сигналом ЗУ и вырабатывает выходной сигнал, знак и величина которого зависят от величины рассогласования между этими двумя входными сигналами. Выходной сигнал СУ подается на вычислительное устройство (ВУ), где преобразовывается по закону регулирования, т.е. ВУ определяет включение притока или оттока тепла от объекта.

ВУ управляет исполнительными устройствами (ИУ) - фактически усилителями-выключателями, которые при помощи регулирующих органов (РО) реализуют необходимый подбод или отвод тепла от объекта. Корректирующее устройство (КУ) вводит поправку на непостоянство условий теплопроводности в разных температурных областях. Устройство индикации и

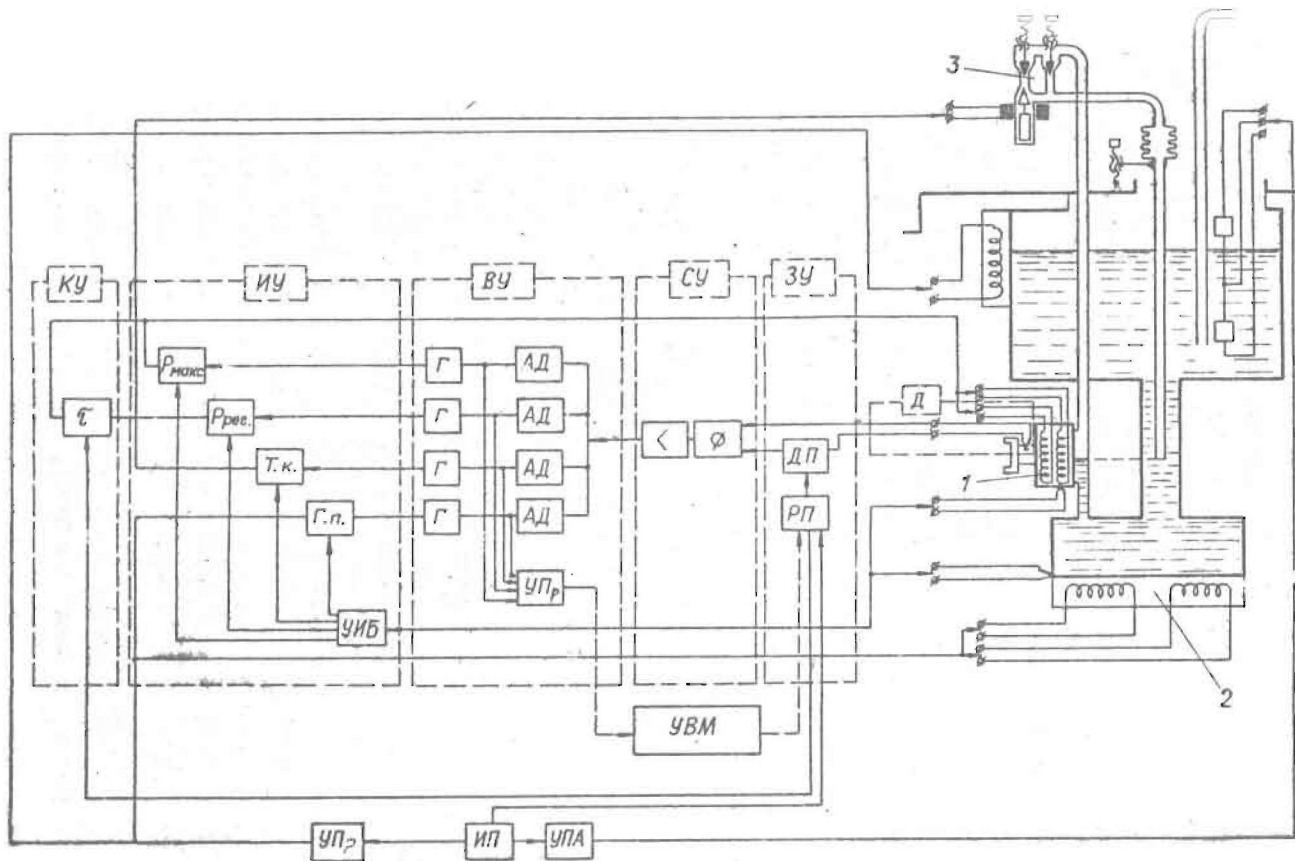


Рис.1.

блокировок (УИБ), устройство прогрева (УП), устройство подачи азота (УПА) и инженерный пульт (ИП) являются вспомогательными узлами регулятора.

Д а т ч и к т е м п е р а т у р ы преобразовывает в электрический сигнал температуру объекта. Принципы действия и конструкция датчиков, применяемых в системах терморегулирования, весьма разнообразны, однако все они должны отвечать следующим требованиям:

датчик должен быть конструктивно простым, надежным, малоинерционным, с большим динамическим диапазоном, независимым от других неэлектрических величин. Частично выбор определен конструкцией криостата [1, 2].

Из множества возможных преобразователей нами выбрана термопара, наиболее отвечающая указанным требованиям. К сожалению, термопара имеет и существенные недостатки [3] — сравнительно низкий уровень термо-э.д.с., нелинейность характеристики. Кроме того, таблицы значений термо-э.д.с. не дают точных данных для всех термопар, имеющих номинально тот же состав. Однако эти недостатки устраняются за счет повышения чувствительности СУ, введения линеаризатора или усложнения программы УВМ и проведения коррекции стандартных таблиц.

Таким образом, датчиком выбрана медь-константановая термопара. Таблицы градуировки взяты из книги М.М.Попова "Термометрия и калориметрия", изданной Московским университетом в 1954 году.

Для обеспечения хорошего теплового контакта термопара припаяна к держателю образца. Для предотвращения отвода тепла через провода термопары использован "тепловой шунт" — чувствительный конец термопары длиной 10 см, обмотанный вокруг держателя образца.

З а д а ю щ е е у с т р о й с т в о моделирует необходимое изменение во времени э.д.с. термопары. В соответствии с заданным температурным диапазоном регулятора от

77 до 450°K и с минимальным шагом температуры ($0,1^{\circ}\text{K}$) ЗУ должно генерировать выходное напряжение от 5,3 до 9,0 мВ с минимальным шагом 2 мВ.

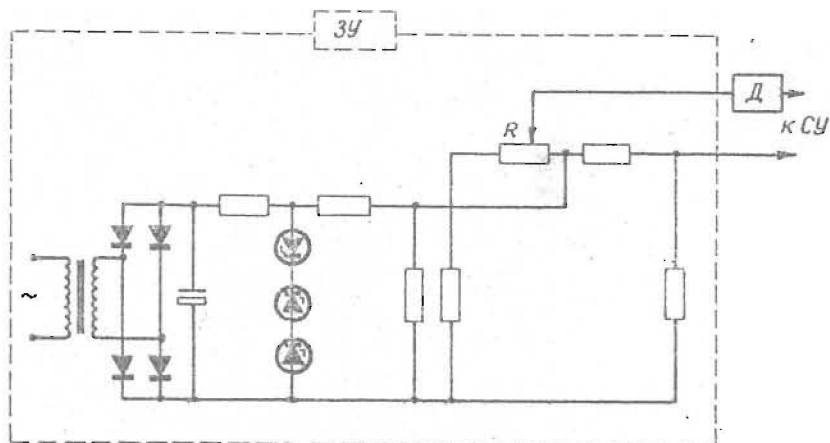


Рис. 2.

Нами разработано несколько вариантов ЗУ. Один из самых простых вариантов изображен на рис.2. ЗУ состоит из источника эталонного напряжения [4] и реохорда-делителя. Один и тот же материал реохорда и делителя обеспечивает стабильность выходного напряжения в широком диапазоне температур окружающей среды. Использование многообмоточного реохорда или разделение на поддиапазоны без затруднений обеспечивает минимальный шаг выходного напряжения. Однако трудно осуществимая связь с УВМ ограничивает применение такого вида ЗУ.

Более универсальным является ЗУ на базе звездобразного дискретного потенциометра. На рис.3 изображено ЗУ-цифро-аналоговый преобразователь, который преобразовывает заданный цифровой код (с ИП или УВМ) в определенный уровень напряжения на выходе [5, 6]. Преобразователь состоит из

источника эталонного напряжения, декодирующей сетки и ключей. Декодирующая сетка представляет собой дискретный делитель напряжения на резисторах, величина которых и способ связи между собой определяются зависимостью

$$U_{\text{вых}} = f(P), \text{ где } P \text{ — двоичное число.}$$

Резисторы, используемые в преобразователе, должны удовлетворять ряду требований. К ним относятся малая величина допускаемых отклонений от номинального сопротивления, стабильность параметров во времени и при изменении температуры и влажности окружающей среды. Жесткие требования предъявляются к ключам для коммутации эталонных уровней напряжения. Сопротивление ключа в закрытом состоянии должно стремиться к бесконечности, в открытом состоянии оно должно быть мало и постоянно. При низком быстродействии этим требованиям вполне отвечают высококачественные электромагнитные реле или МУК. Однако применение последних не рекомендуется, так как возможно возникновение паразитных термо-э.д.с. в местах спайки. Нами использованы электромагнитные реле типа РЭС-6 и РЭС-10. Ключами управляет регистр памяти (РП). Принципиальная схема ячейки ключа дана на рис.3а.

Количество разрядов преобразователя (см.рис.3) равно 13, шаг дискретизации 2 мВ, что позволяет реализовать минимальный шаг изменения температуры (0,1°К). Дополнительный делитель R_1, R_2 образует источник постоянного напряжения смещения, который позволяет не менять знак выходного сигнала ЗУ во всем диапазоне температуры.

Разработан также ЗУ-линеаризатор обеспечивающий линейность характеристики терморпары в пределах 1%. Такой ЗУ-линеаризатор, использующий метод "переменного квадрата", изображен на структурной схеме рис. 4. Дешифратор позволяет установить необходимую температуру с ИП в двоично-десятичном коде [7, 8].

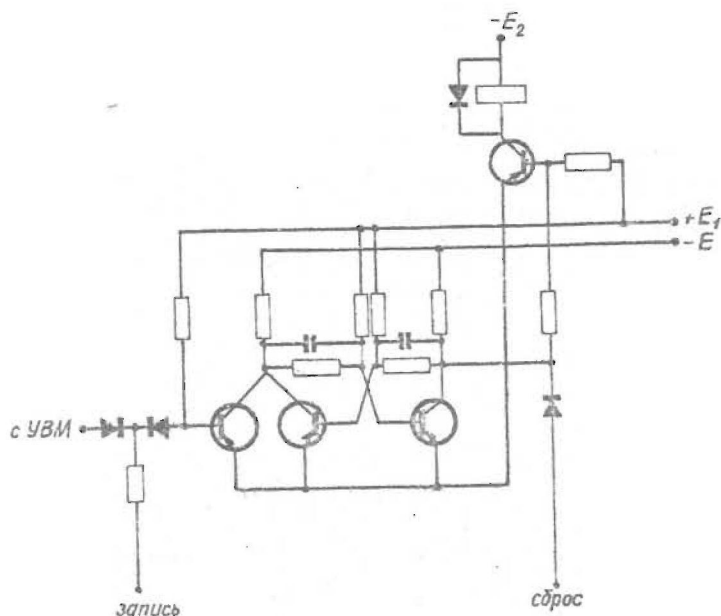


Рис. 3а.

С р а в н и в а ю щ е е у с т р о й с т в о с р а в н и в а е т д е й с т в и т е л ь н у ю т е м п е р а т у р у с з а д а н н о й (с ЗУ) и у с и л и в а е т с и г н а л р а з н о с т и д о у р о в н я с р а б а т ы в а н и я ВУ.

Т р е б о в а н и я , п р е д ь я в л я е м ы е к С У н е з а в и с и м о о т е г о к о н с т р у к ц и и , т е с н о с в я з а н ы с п а р а м е т р а м и д а т ч и к а . Т а к к а к н а м и д а т ч и к о м в ы б о р а н а т е р м о п а р а м е д ь - к о н с т а н т а н , х а р а к т е р и с т и к и С У д о л ж н ы о т в е ч а т ь с л е д у ю щ е м у :

- 1) ч у в с т в и т е л ь н о с т ь н е м е н е е 1 м м в (т.к. минимальный шаг температуры задан $0,1^{\circ}\text{K}$);
- 2) к о э ф ф и ц и е н т у с и л е н и я р а в е н $\sim 5 \cdot 10^4$;
- 3) п о с т о я н н а я в р е м е н и С У н е б о ь ш е 10^{-1} с е к ;

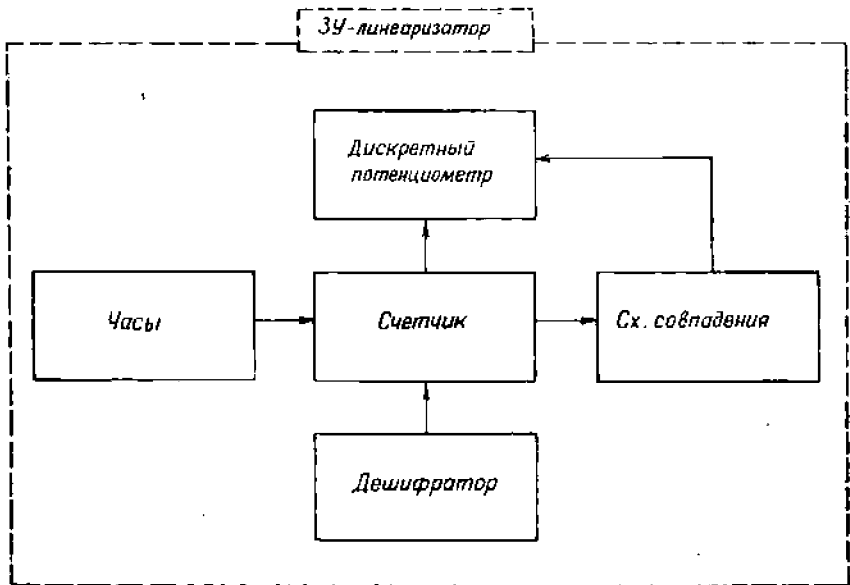


Рис. 4.

В различных стадиях разработки нами опробованы следующие конструкции СУ:

- а) серийный электронный потенциометр типа ЭПВ [9];
- б) серийный гальванометрический компенсатор типа Ф116;
- в) усилитель постоянного тока типа МДМ;
- г) усилитель постоянного тока с автоматической стабилизацией нулевого уровня [10].

СУ на базе серийного электронного потенциометра типа ЭПВ требует незначительных переделок: улучшения блока питания усилителя, перестройки моста с увеличением чувствительности и перемещением "нуль" прибора на середину шкалы. Однако в потенциометре типа ЭПВ имеются некоторые недолговечные узлы; притом его габариты не позволяют сделать терморегулятор настольного типа.

Простым и дешевым получается СУ, в котором используется ФПБ с последующим усилителем постоянного тока с чувствительностью около 1 мВ (см.рис.5). Отрицательной чертой

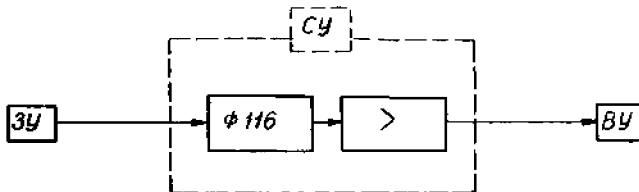


Рис.5.

ФПБ является неустойчивость в вибрационных обстоятельствах и чувствительность к перегрузкам.

Усилитель типа МДМ (см.рис.6) как по техническим данным, так и по габаритам вполне отвечает всем требованиям.

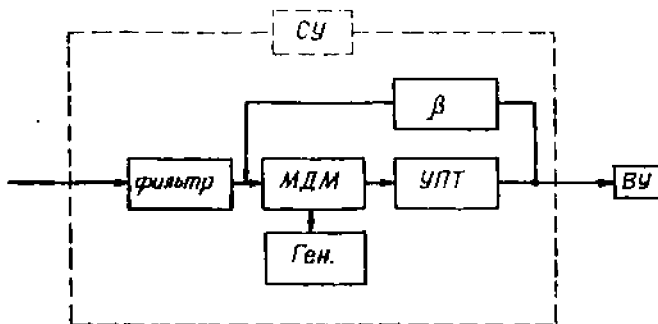


Рис.6.

Принципиальная схема дана на рис.6а [10].

Последней разработкой является СУ, изображенное на рис.7. В СУ применен усилитель постоянного тока с автоматической стабилизацией дрейфа нулевого уровня.

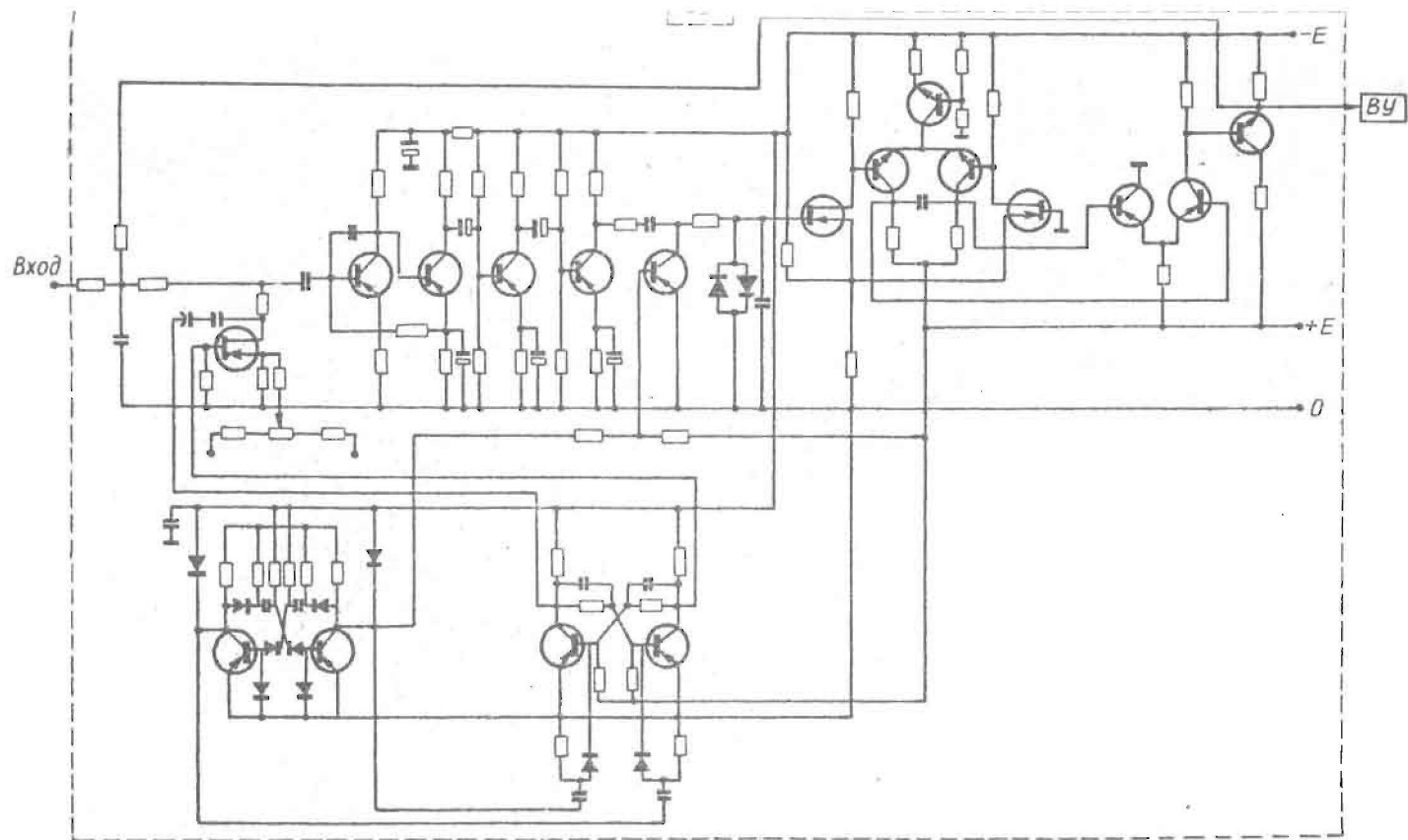


Рис. 6а.

Усилитель состоит из двух параллельных каналов: канала низких частот и канала высоких частот. В канале усиления низких частот использовано преобразование сигнала. В его состав входят входной фильтр - 3; модулятор - 4; усилитель несущей частоты - 5; демодулятор - 6; выходной фильтр - 7; генератор высокой частоты - 8; генератор прямоугольных импульсов - 9. Генератор 9 управляет демодулятором и модулирует сигнал генератора высокой частоты, с помощью которого управляет модулятором. В высокочастотном канале 2 применен дифференциальный усилитель постоянного тока. На входе усилителя включен фильтр I для ослабления помех с частотой сети.

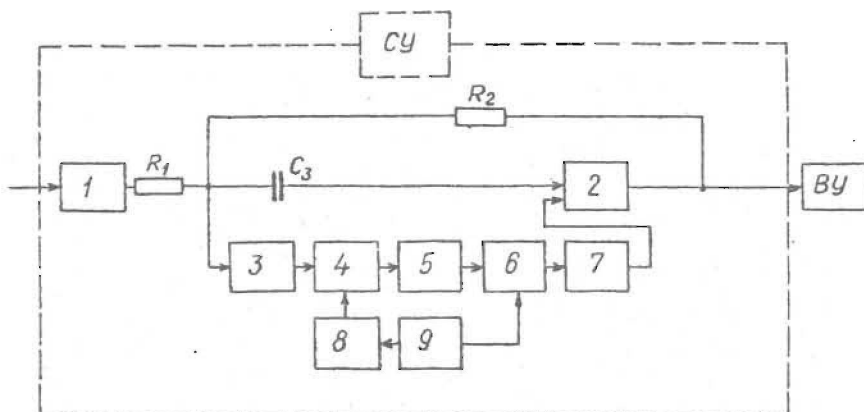


Рис. 7.

Вычислительное устройство по сигналу с СУ определяет включение того или другого ИУ, т.е. определяет приток или отток тепла от объекта [11]. Кроме этого, в ВУ осуществляется гальваническая развязка между блоками ИУ и РУ, так как точка заземления выбрана в месте припайки датчика к держателю образца.

Как видно из функциональной схемы на рис. 1, управление температурным режимом в криостате происходит при помощи

следующих регулирующих органов:

нагревателя I, обеспечивающего подвод тепла для поддержания температуры на должном уровне в процессе регулировки;

генератора паров 2, обеспечивающего отвод тепла в процессе регулировки;

теплового ключа 3, обеспечивающего быстрое охлаждение объекта (3-5 град/сек) [12] .

Включением нагревателя I на полную мощность обеспечивается быстрый (3-5 град/сек) нагрев объекта. Оба последних режима используются для быстрого перехода с одного температурного уровня на другой.

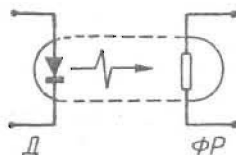


Рис.9.



Рис.8.

Имея СУ на базе ЭПВ, для преобразования выходного сигнала удобно использовать зависимость между величиной и знаком угла поворота вращающейся цилиндрической шкалы и сигналом рассогласования на входе СУ. При помощи четырех дисков с регулирующими секторами и индуктивных датчиков реализуется преобразование выходного сигнала СУ (по закону регулирования) и гальваническая развязка (см.рис.8).

Другое решение ВУ - использование амплитудных дискриминаторов, срабатывающих от разных уровней на выходе СУ.

Этот метод наиболее подходящий для СУ типа УПТ. Развязка осуществляется при помощи оптико-электронной ячейки [13], состоящей из светодиода и фоторезистора (см.рис.9) или трансформатора. В последнем случае амплитудный дискриминатор управляет работой генератора на туннельном диоде, как показано на рис.10. ВУ содержит четыре триггера Шмитта, один из которых срабатывает от малого положительного уровня на входе и включает нагреватель в режиме регулировки; другой срабатывает от большого положительного уровня и включает нагреватель на полную мощность; третий срабатывает от малого отрицательного уровня и включает генератор паров, а четвертый - от большого отрицательного уровня и

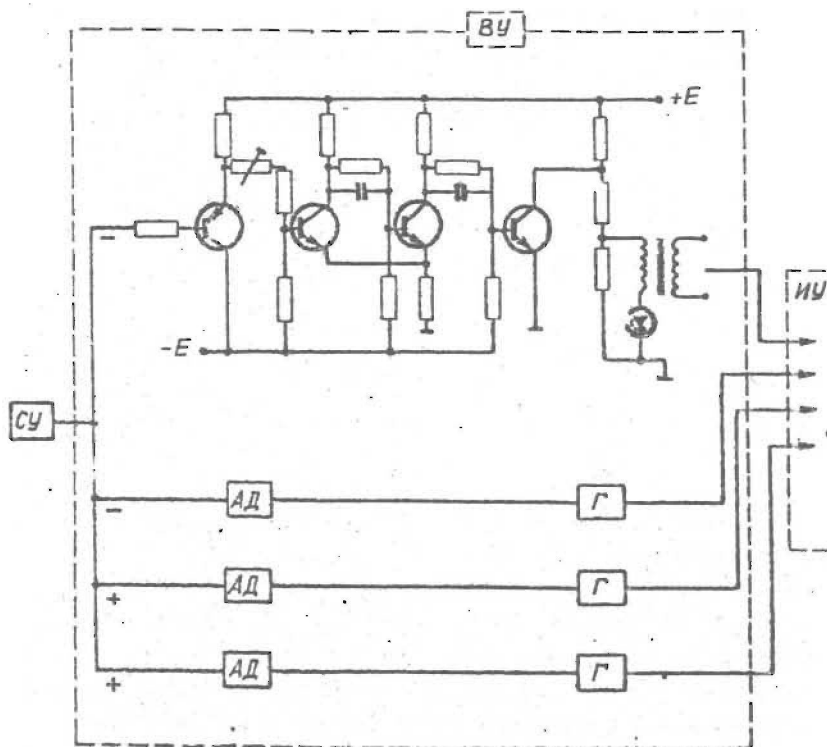


Рис.10.

включает тепловой ключ. Выходной транзистор включает либо выключает питание генератора, прерывая или возобновляя генерацию.

В последних разработках использован именно этот метод развязки. Оптроны не применялись из-за температурной неустойчивости изготовленных нами ячеек. Однако, при наличии тиристоров, управляемых светом, преимущество должно отдаваться оптическому методу развязки, обеспечивающему наименьшие паразитные емкостные связи между ВУ и ИУ.

УВМ или оператору необходим признак, что температура установилась. Для этого введено устройство признака (УПр) — в простейшем случае логическая схема "И", контролирующая равенство сигналов ЗУ и Д.

Исполнительным устройством является усилительное звено, усиливающее маломощный сигнал с ВУ до уровня, необходимого для введения в действие РО. В терморегуляторе ИУ это усилитель с ключом на выходе. Используются многие виды ключей, однако требованиями к долговечности и быстрдействию определяется выбор именно полупроводниковых ключей-транзисторов и тиристоров. Тиристоры по сравнению с транзисторами имеют более широкий диапазон допустимых напряжений и токов, а также больший коэффициент преобразования мощности. Кроме того, для питания РО целесообразно использовать выпрямленное пульсирующее напряжение, при этом использование тиристоров становится очень удобным, так как включение тиристора будет происходить автоматически в конце каждого периода [14].

На рис. II изображена схема, обеспечивающая: включение тиристора, световую сигнализацию о состоянии ключа, блокировку и ручное включение. При работающем генераторе (Г), сигнал через трансформатор усиливается транзистором Т₇, детектируется диодом и насыщает транзистор Т₆. Следовательно, закрывается Т₁, насыщается Т₂ и Т₃, что означает

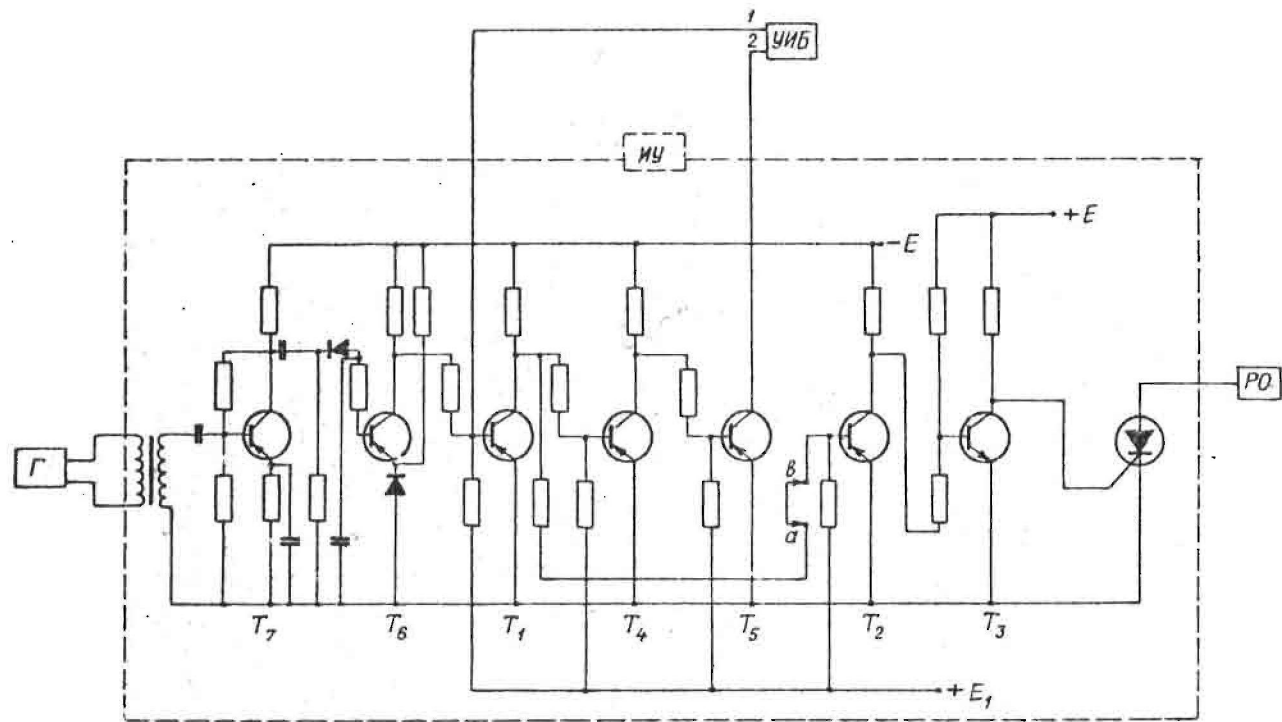


Рис. 11.

закрытое состояние тиристорного ключа. Когда генерация отсутствует, ключ открыт. Транзистор T_5 через УИБ включает световое табло. Блокировка ключа происходит независимо от сигнала с ВУ, через УИБ, закорачивая вход транзистора T_1 .

Так как оптимальное количество тепла, генерируемое нагревателем, различно в разных областях температуры, введено **к о р р е к т и р у ю щ е е у с т р о й с т в о**, которое в данном регуляторе позволяет в широких пределах менять величину среднего тока через нагреватель в режиме регулировки. Это можно реализовать:

- а) при помощи балластных сопротивлений;
- б) методом последовательной выборки периодов тока питания;
- в) меняя угол включения тиристорного ключа.

Первый метод прост, но неудобен из-за габаритов балластных сопротивлений.

Второй метод иногда неприемлем из-за возможного периодического искажения температурного поля. Нами применен метод управления угла включения тиристорного ключа при помощи управляющих импульсов, синхронизированных с частотой питающего напряжения (см. рис. 12).

Транзистор T_1 закрыт почти весь период и открывается только в момент прохождения синхронизирующего напряжения через нуль, формируя короткий импульс. Этот импульс затем дифференцируется и отрицательный "хвост" его на мгновение открывает T_2 , таким образом разряжая С. Как только U_c станет ниже напряжения срабатывания стабилитрона, закрывается T_3 и начинается формирование выходного импульса. После окончания отрицательного импульса T_2 закрывается и начинается зарядка С через R. R - набор сопротивлений, коммутируемый П1, тем самым осуществляется связь между температурой и генерируемым оптимальным количеством тепла. Допускается не менять регулируемую мощность в интервалах температур, определенных экспериментально. Как

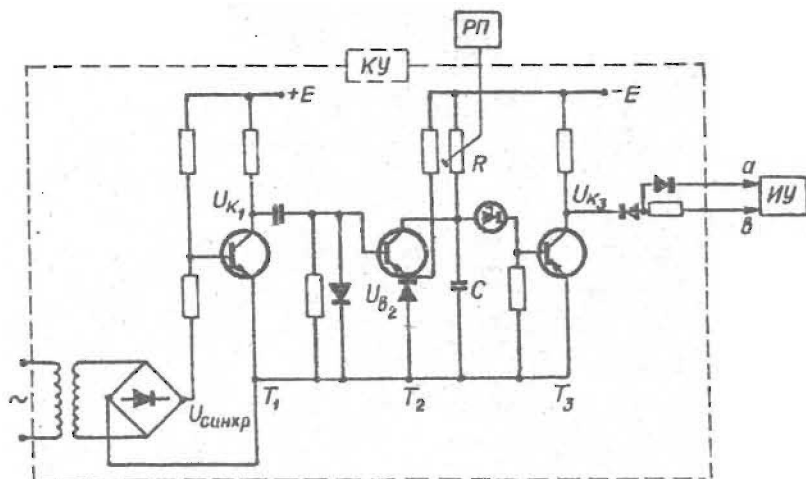


Рис. 12.

только напряжение на C превышает напряжение срабатывания стабилитрона, T_3 открывается, заканчивая формирование выходного импульса.

Полученный импульс спустя τ от начала периода питающего напряжения через ИУ включает ток через нагреватель.

При изменении τ меняется и величина среднего тока через нагреватель. Следовательно, изменяется количество тепла, выделяемое нагревателем. Осциллограммы напряжений в основных узлах схемы показаны на рис. 13.

Техническое решение регулирующих органов определено конструкцией криостата. В данном случае это нагреватель радиационного типа, генератор паров и так называемый тепловой ключ. Конструкция криостата подробнее рассмотрена в статье "Азотные криостаты" (см. настоящий сборник).

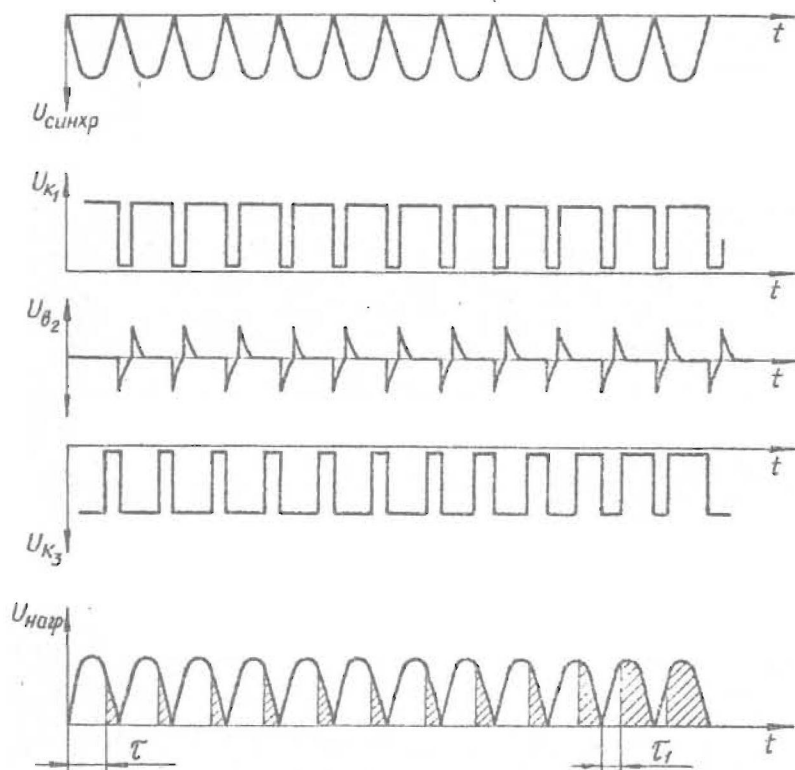


Рис. 13.

Устройство индикации и блокировок принадлежит к вспомогательным узлам регулятора и позволяет оператору визуально следить за действиями регулятора, а также осуществляет отключение всех нагревателей в следующих ситуациях:

- а) регулятор выключен с ИП;
- б) выключен вакуумный насос;
- в) температура в критических точках криостата достигла установленного предела.

Индикация производится звуковой сигнализацией и световым табло, которое управляется транзисторными ключами с ИУ. Блокировка осуществляется логической схемой "ИЛИ" со входами с ИП, с магнитного пускателя вакуумного насоса и с выхода усилителя контрольных температурных датчиков.

Контроль температуры осуществляется при помощи отдельных термопар, припаянных к корпусу криостата.

Устройство подачи азота выполняет следующие операции:

- а) при необходимости подает азот из сосуда Дьюара в криостат;
- б) автоматически поддерживает азот в криостате между заданными минимальными и максимальными уровнями;
- в) сигнализирует оператору о недостатке азота в сосуде Дьюара (функциональна схема УПА на рис. 14).

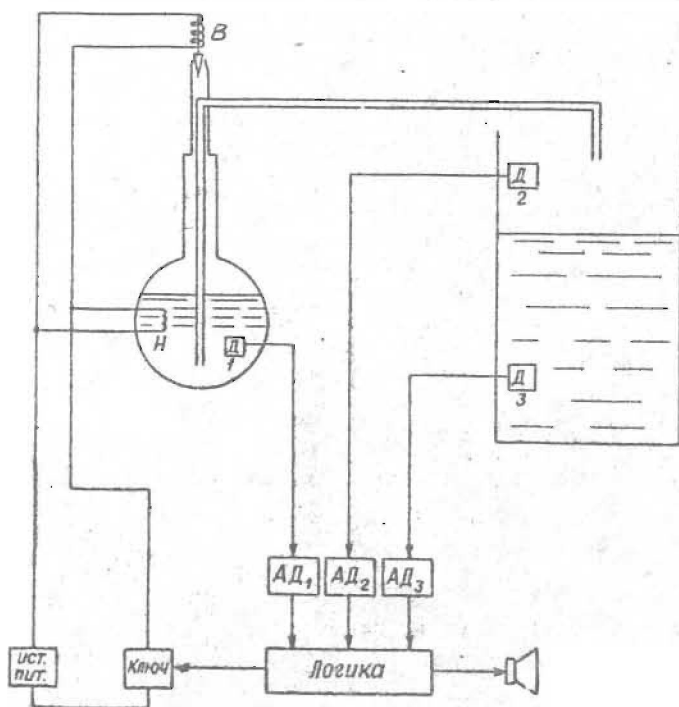


Рис. 14.

В сосуд Дьюара помещен "питатель", состоящий из труб, нагревателя (Н), датчика (D_1). "Питатель" герметически закрывает сосуд Дьюара. Газовый канал открывается или закрывается электромагнитным вентиляем В. В криостате размещены датчики максимального и минимального уровней (D_2 и D_3) - диоды ДЮ6. Если диод находится вне жидкого азота, то его сопротивление меньше, чем в случае нахождения его в жидком азоте.

В начальный момент D_2 и D_3 находятся вне азота и падение напряжений на них определяет исходное состояние триггеров Шмитта ($АД_2$ и $АД_3$). D_1 в сосуде Дьюара находится в жидком азоте и напряжение на нем определяет выходное состояние АД, соответственно которому через логическую схему замыкается ключ. Протекающий ток закрывает вентиль В, включает нагреватель Н - азот испаряется и давление паров загоняет жидкий азот в криостат. Когда азот в криостате достигает минимальный уровень, переключается $АД_3$, логическая схема переходит в состояние готовности выключения. Когда уровень достигает D_2 , переключается $АД_2$ и логическая схема закрывает ключ. Выключается Н, открывается В, и остатки паров выходят наружу - подача азота прекращается. Со временем уровень азота падает ниже максимального. $АД_2$ переключает логическую схему в состояние готовности включения. При достижении азота уровня, который ниже D_3 , ключ размыкается и снова начинается подача азота. Таким образом в криостате поддерживается необходимый уровень азота. Когда в сосуде Дьюара кончается азот, $АД_1$ блокирует логическую схему, ключ размыкается, срабатывает звуковая сигнализация.

Устройство прогрева предназначено для быстрого прогрева криостата до комнатной температуры. УП блокирует нагреватель держателя образца, открывает тепловой ключ, включает генератор паров и специальный нагреватель (см. статью "Азотные криостаты" в настоящем сборнике).

Инженерный пульт позволяет следить по световому табло за работой регулятора, проверять его работоспособность, имитируя программу УВМ, проводить несложные поисковые эксперименты без УВМ.

В заключение приведем данные по разработанному в лаборатории и опробованному в эксперименте регулятору температуры. Схемные решения основных его узлов следующие (см. рис. 1): Д — термопара медь—константан; ЗУ — дискретный потенциометр с регистром памяти (рис. 3); СУ — усилитель типа МДМ (рис. 6а); ВУ — триггера Шмитта с оптико—электронной ячейкой; ИУ — тиристорный ключ; КУ — электронная схема для изменения угла включения тиристорного ключа.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ РАЗРАБОТАННОГО ТЕМПОРЕГУЛЯТОРА

1. Диапазон температур от 77 до 450°K.
2. Минимальный шаг задания температуры 0,1°K.
3. Воспроизводимость температуры от 0,1 до 0,2°K.
4. Точность регулировки $\pm 0,1 \pm 0,2^\circ\text{K}$.
5. Максимальная скорость нагрева и охлаждения 3—5 град/сек (определяет дроссель криостата).
6. Максимальная скорость в режиме слежения 0,2 град/сек.
7. При соответствующей комплектровке линейность в режиме линейной развертки не менее 1%.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Кейн В.М. Конструирование терморегуляторов. Изд-во "Сов.радио", 1971.
2. Скотт Р.Б. Техника низких температур. Изд-во "Иностр. лит.", 1962.

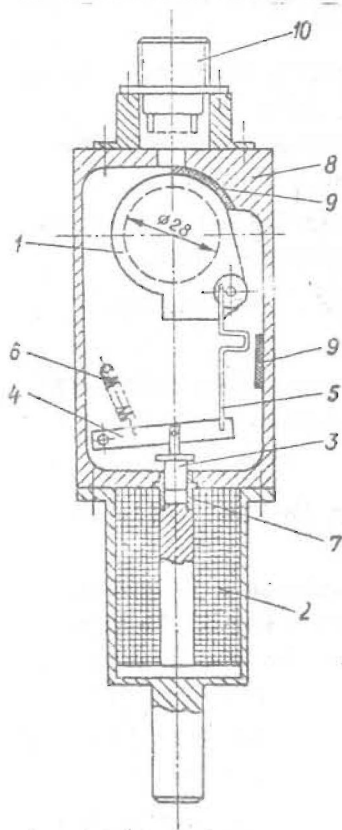
3. Серезнов А.Н. Методы уменьшения влияния помех в термометрических цепях . Изд-во "Энергия", 1968.
4. Додик С.Д. Полупроводниковые стабилизаторы постоянного напряжения и тока . Изд-во "Сов.Радио", 1962.
5. Смоллов В.Б., Смирнов Н.А. Полупроводниковые кодирующие и декодирующие преобразователи напряжения . Изд-во "Энергия", 1967.
6. Нетребенко К.А. Цифровые автоматические компенсаторы . Госэнергоиздат , 1961.
7. Martiovaage I. Thermocouple linearizing circuit. - Instr. and control systems, Nr. 9, 1970.
8. Колпатай, Харконен. Цифровая линеаризация результатов измерения . Электроника, № 5, 1968.
9. Полонников Д.Е. Электронные усилители автоматических компенсаторов . Физматгиз , 1960.
10. Чесноков А.А. Решающие усилители . Изд."Энергия", 1969.
11. Кампе-Немм А.А. Автоматическое двухпозиционное регулирование . Изд-во "Наука", 1967.
12. См. настоящий сборник, стр. 116
13. Полянин О.В. Оптико-электронные приборы . Изд."Энергия", 1969.
14. Тищенко Н.М., Машлыкин В.Г. Динисторы и тиристоры и их применение в автоматике . Изд-во "Энергия", 1966.

БК

Я.Я.Страумен, Е.А.Пранч, А.Я.Аберс,
Г.М.Лица, А.Л.Тройцис

ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ КАНАЛОВ

Любой оптический канал, составленный по принципу "конструктор физика", включает в себя целый ряд оптико-механических элементов. Конструкции часто употребляемых элементов рассмотрены в настоящей статье.



Затвор света является наиболее распространенным оптико-механическим прибором научно-исследовательских систем (НИС), служащим для перекрытия оптического канала. На рис. 1 изображен затвор, разработанный и применяемый в Проблемной лаборатории физики полупроводников. Затвор при помощи заслонки I перекрывает оптический канал диаметром 28 мм. Заслонка I приводится в движение (открывает канал) при помощи электромагнитной катушки 2, втягивающей якорь 3, рычага 4 и тяги 5.

При включении тока в электромагнитной катушке 2 заслонка I возвращается в исходное положение (перекрывает оптический канал) под воздейст-

Рис. 1. Затвор света.

вием пружины 6. Для предотвращения залипания якорь 3 движется по латунной направляющей 7. Для гашения удара вилочки I о корпус 8 последний в местах соприкосновения покрыт мягким материалом 9. Сигнализация конечных положений вилочки контактная.

Время срабатывания затвора около 50 миллисекунд. Затвор подключается к системе посредством кабеля со штепсельным разъемом 10.

В ходе эксперимента часто требуется посередадное подключение к основному оптическому каналу нескольких других каналов, например, к каналу возбуждения нужно подключить тот или иной источник излучения, к измерительному каналу — тот или иной датчик и др. Для этой цели служит переключатель светового пучка (рис. 2), позволяющий подключить к основному оптическому каналу любое из четырех ответвлений /I/.

Элемент состоит из корпуса I, в котором размещены зеркала 2, 3, 4, укрепленные в держателях 5, 6, 7, вращающихся вокруг осей 8. Держатели с зеркалами откидываются при помощи пружин 9. В корпусе I размещены окна 10, 11, 12, а в боковых крышках 13, 14 — окна 15 и 16. Зеркала в закрытом положении удерживаются защелками 17 и 18, приводимыми в действие электромагнитами 19, состоящими из корпуса 20 и обмоток 21. Защелки 17 в верхнем положении удерживаются пружинами 22. Защелка 18 вращается вокруг оси 23, возвращается в исходное положение пружиной сжатия 24. Защелка поворачивается, освобождая зеркало, нажатием на нее толкателя 25, жестко связанного с якорем 26 электромагнита 27 с обмоткой 28. Для фиксации зеркал в открытом положении служат упоры 29 и 30. Для возврата откинутого зеркала в исходное положение служит электромагнит возврата 31, состоящий из корпуса 32, обмотки 33 и якоря 34, жестко связанного с толкателем 35 посредством стержня 36.

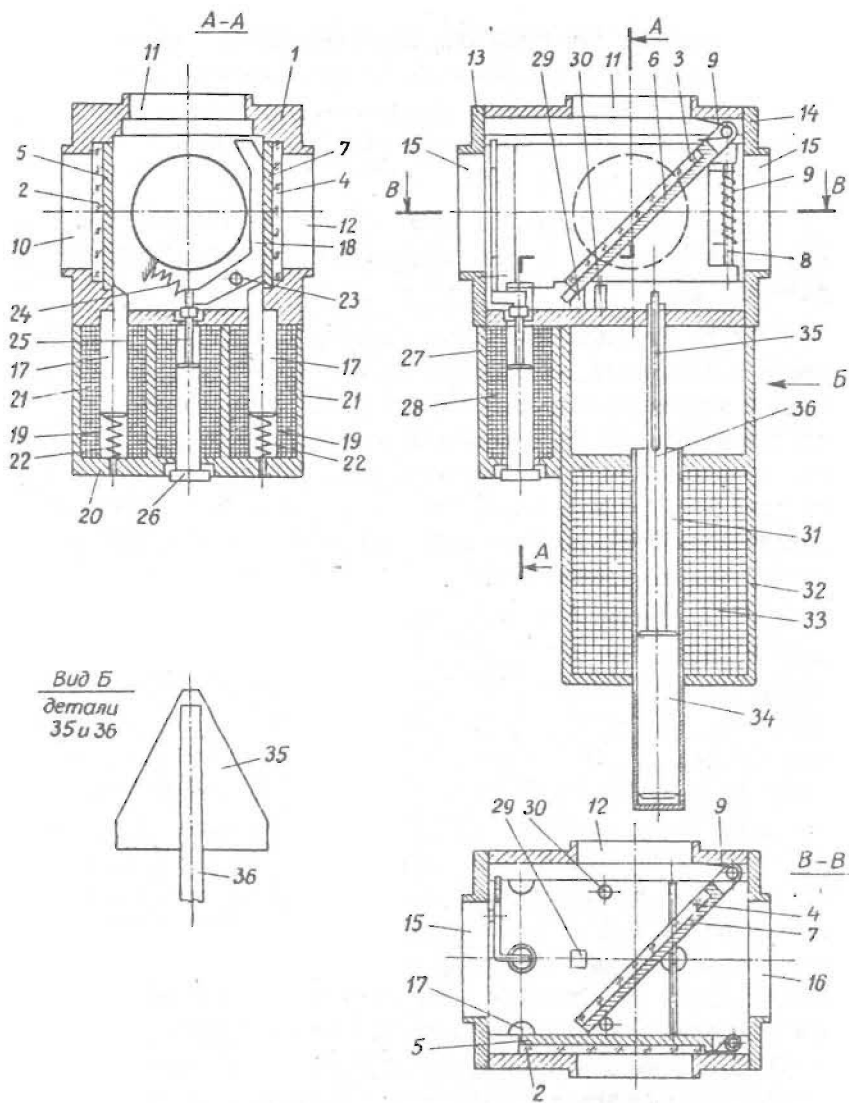


Рис. 2. Переключатель светового пучка.

Индикация положения зеркал и толкателя контактная.

Элемент подключается к установке при помощи соединительного кабеля и штепсельного разъема.

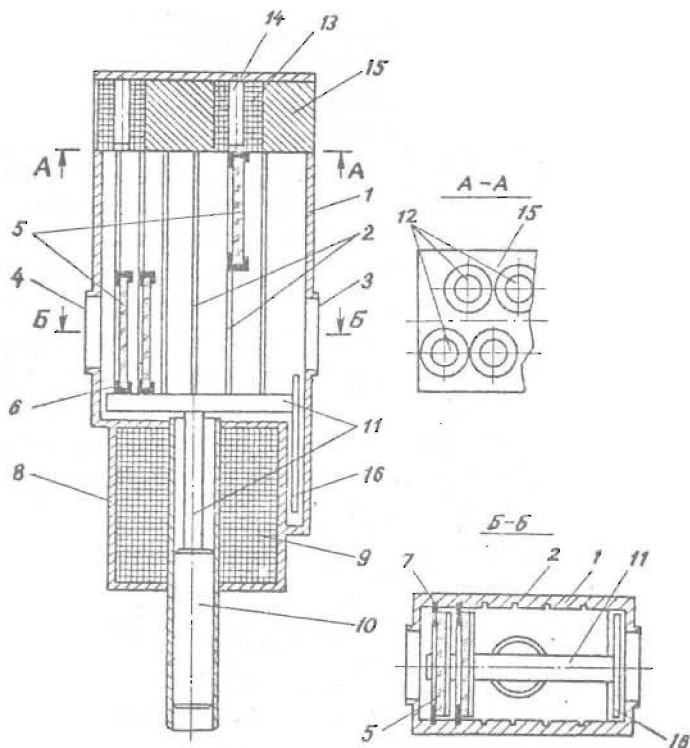


Рис. 3. Прибор для смены светофильтров.

Прибор для смены светофильтров служит для введения в оптический канал определенной комбинации фильтров, необходимой в данный момент, не нарушая оптический канал /2/. На рис. 3 изображен такой

прибор с шестью сменными фильтрами. В корпусе I с направляющими 2 и окнами 3 и 4 размещены фильтры 5, закрепленные в кассетах 6, изготовленных из магнито-мягкого материала. Кассеты 6 своими кромками 7 скользят по направляющим 2. Фильтры выдвигаются из оптического канала при помощи электромагнита 8, состоящего из обмотки 9, якоря 10 и толкателя II, жестко соединенного с якорем. В верхнем положении кассеты удерживаются электромагнитами 12 с обмотками 13 и сердечниками 14, смонтированными в корпусе 15. Количество удерживающих магнитов соответствует количеству светофильтров. К толкателю II крепится заслонка 16, перекрывающая оптический канал во время подъема фильтров. Смена фильтров 5, находящихся напротив окон 3 и 4 в оптическом канале, осуществляется подъемом фильтров толкателем II по направляющим 2 в верхнюю часть прибора, где, в зависимости от того, какие удерживающие электромагниты включены, соответствующие фильтры удерживаются, а остальные возвращаются под воздействием силы тяжести совместно с толкателем II в оптический канал. Прибор позволяет получить любую комбинацию из установленных в нем фильтров, а также выдвинуть все фильтры из оптического канала.

Прибор снабжен контактной индикацией, сигнализирующей о том, какие фильтры находятся в оптическом канале.

Прибор подключается к установке при помощи соединительного кабеля и штепсельного разъема.

М о д у л я т о р с в е т а является оптико-механическим элементом ИКС и служит для периодического перекрытия оптического канала.

На рис. 4 изображен модулятор, перекрывающий оптический канал посредством вращающейся крыльчатки I, посаженной на вал электромотора 2. Крыльчатка имеет концентрические выступы 3 и 4, входящие в пазы корпуса 5, образующие лабиринт, препятствующий проникновению постороннего света в оптический канал. Симметрично оптическому каналу 6 на противополо-

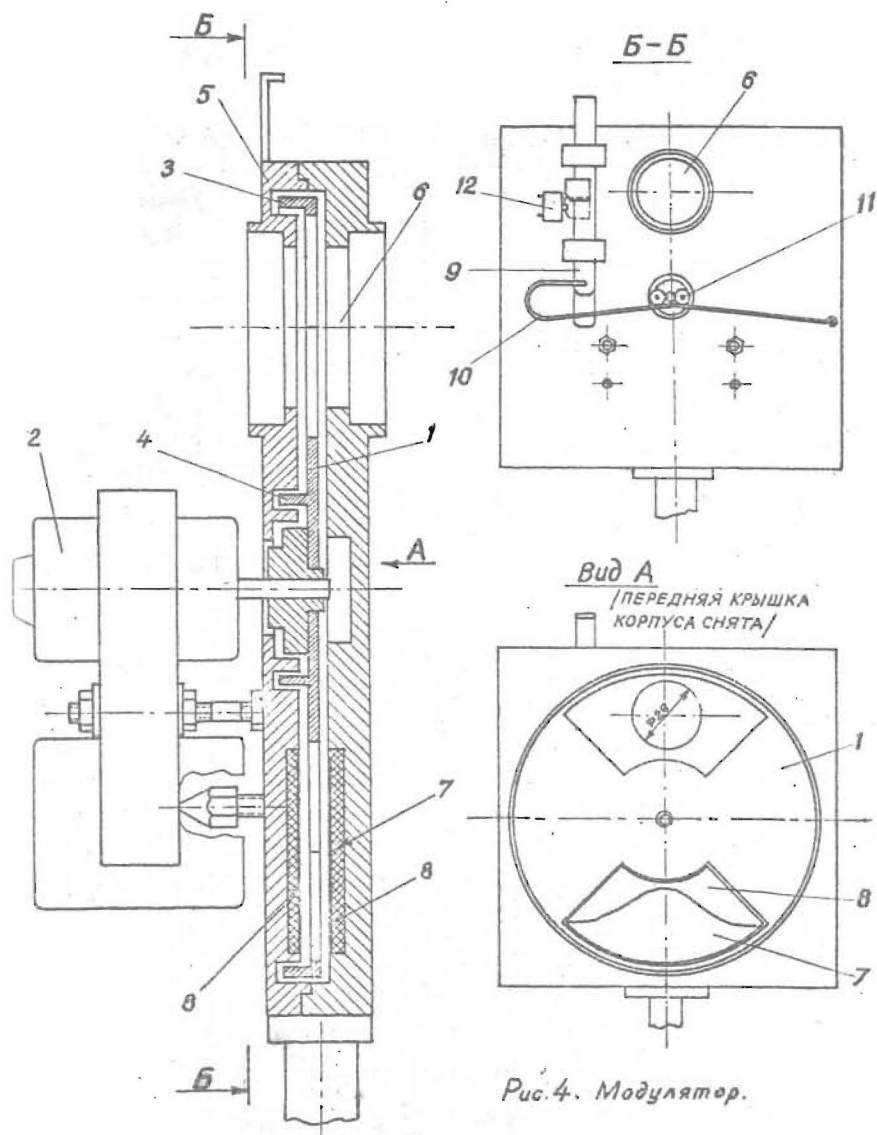


Рис. 4. Модулятор.

ложной стороне размещен емкостный датчик, состоящий из двух секторов фольги 7, фольгированного гетинакса 8, емкость которого синусоидально меняется при вращении крыль-

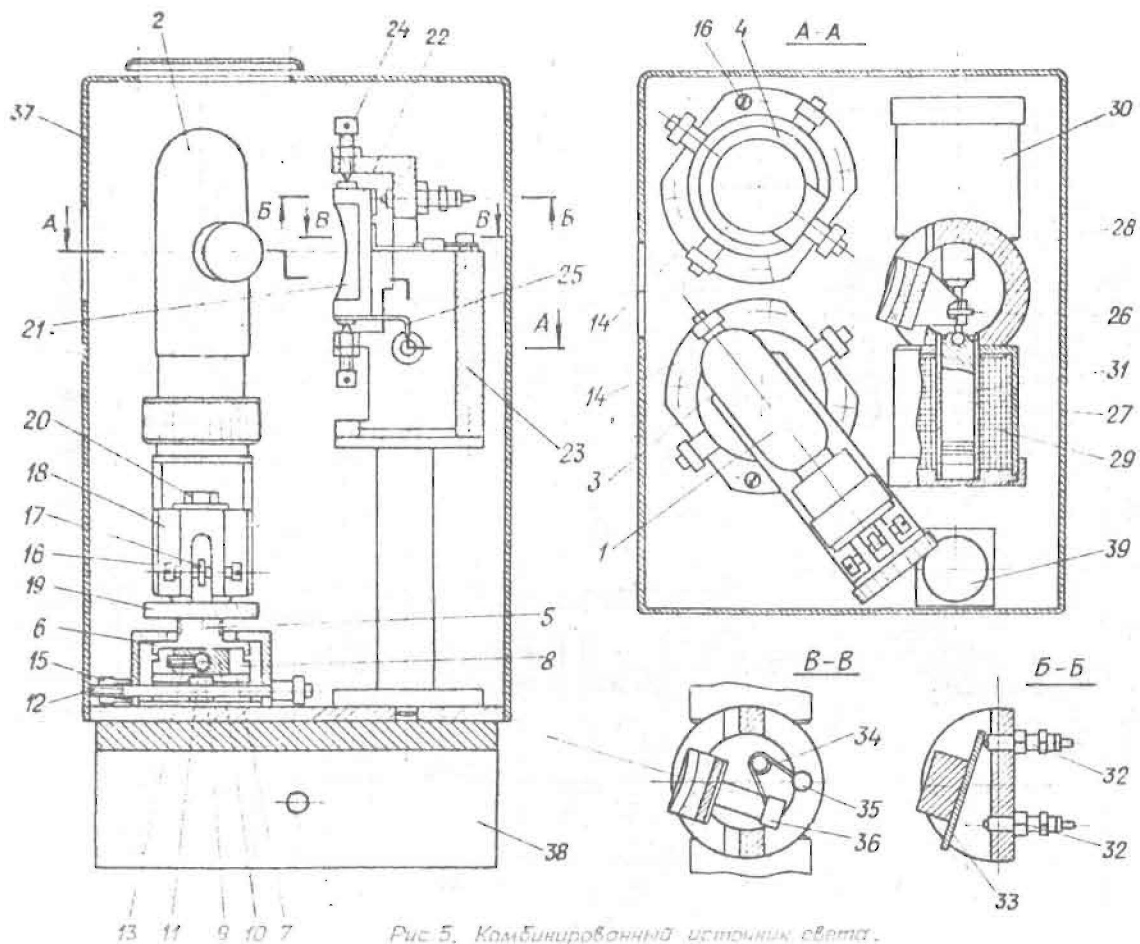


Рис. 5. Комбинированный источник света.

чатки. Синусоидальный сигнал, синхронный перекрытию оптического канала, служит для управления синхродетектором.

При юстировке и калибровке оптических каналов, когда модуляция проходящего света нежелательна, крыльчатку I модулятора необходимо остановить так, чтобы она не преграждала оптический канал. Для этой цели служит тяга 9, выдвигая которую вверх, пружина 10 нажимает на ролики II, укрепленные на ступице крыльчатки I, и разворачивает крыльчатку так, чтобы оптический канал остался открытым. Для блокировки электромотора при выдвинутой тяге 9 служит путевой выключатель 12, срабатывающий от положения тяги.

Модулятор подключается к установке посредством кабеля и штепсельного разъема, установленного на приборе.

Для исследования образцов в ультрафиолетовой и в близкой инфракрасной части спектра требуется источник света с водородной лампой и лампой накаливания. Для этой цели служит комбинированный источник света, показанный на рис.5.

Лампа накаливания 1 и водородная лампа 2 укреплены в держателях 3 и 4, которые позволяют юстировать лампы по горизонтальной плоскости, по высоте и поворачивать вокруг их вертикальной оси. Кроме того, лампу накаливания 1 можно поворачивать вокруг ее продольной оси. Хвостовик 5 имеет чашкообразный наконечник 6, в котором вставлен вкладыш 7. Вкладыш имеет два взаимно перпендикулярных паза 8 и 9; в этих пазах вставлены ползуны 10 и 11, которые к стержням 12 крепятся винтами 13. Стержни 12 направлены в отверстия стакана 14 и передвигаются гайками 15. Для возможности перемещения вкладыша 7 в нем имеется два паза для размещения стержней 12. Для юстировки ламп по горизонтальной плоскости освобождаются винты и при помощи гаек 15 осуществляется перемещение ламп, при этом можно грубо регулировать положение ламп, поворачивая их вокруг вертикальной оси; для точной юстировки имеются 2 винта 16 и лопатки 17, закрепленные в хвостовике 5. Для юстировки ламп по вертикали втулки 18

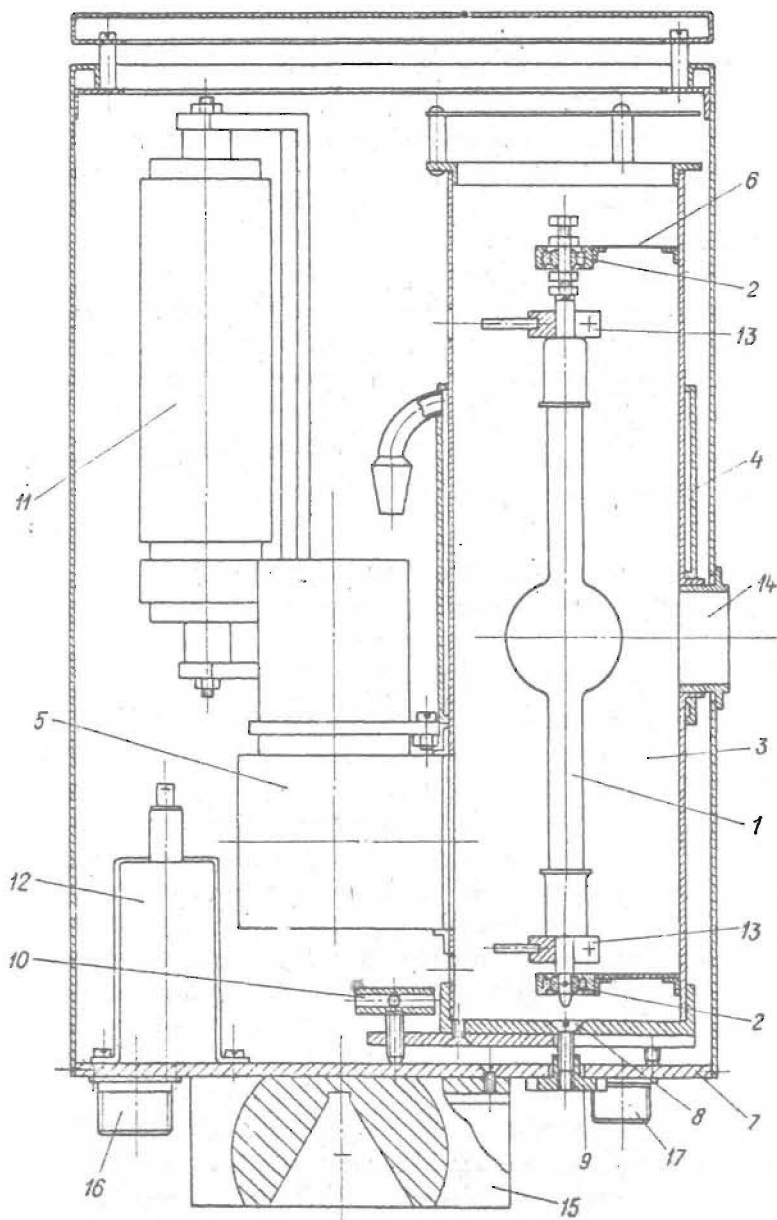


Рис.6. Ксеноновая лампа.

передвигаются гайками 19 и фиксируются болтами 20.

Торoidalное зеркало 21, фиксирующее световой пучок на щели монохроматора, крепится в обойме 22, которую в держателе 23 можно поворачивать в конических упорах 24. К обойме 22 прикреплен рычаг 25, которым соединительное звено 26 якорей 27 и 28 поворачивает обойму зеркала. Электромагниты 29 и 30 состоят из катушек 31, намотанных на латунные трубки, внутренний диаметр которых подогнан по якорям 27 и 28 с целью образования пневматических гасителей ударов. Концевые положения зеркала 21 фиксируются упорами 32, одновременно являющимися электрическими контактами, служащими для индикации положения зеркала. Упоры 32 и планка 33 электроизолированы от массы прибора. Для удержания зеркала в концевых положениях служит пружина изгиба 34, прикрепленная шарнирно штифтом 35 к корпусу 23, а другим концом - к рычагу 36, соединенному с обоймой 22 зеркала. Прибор имеет кожух 37 и призму 38 для крепления на трехгранном рельсе. Для присоединения кабелей имеются тепловые разъемы 39. Такие приборы длительное время эксплуатировались в НИС и показали хорошие эксплуатационные качества.

К с е н о н о в а я л а м п а типа ДК_СШ-1000 используется для возбуждения образцов в криостате в ультрафиолетовом диапазоне спектра. Держатель ксеноновой лампы показан на рис. 6.

Для предотвращения поломки лампы I вследствие неточного монтажа или термических напряжений концы лампы установлены в шарнирных подшипниках 2. Лампа помещена в трубе 3, имеющей водоохлаждаемую рубашку 4. Для охлаждения лампы вентилятор 5 создает в трубе поток воздуха снизу вверх. Для компенсации термического расширения и неточности изготовления лампы по длине верхний конец лампы крепится к трубе посредством металлических пружин 6. Нижний конец лампы изолирован от трубы. Труба крепится к основанию 7 посредством винта 8 и гайки 9, допускающих истировку по вертикали. Истировка в горизонтальной плоскости осуществ-

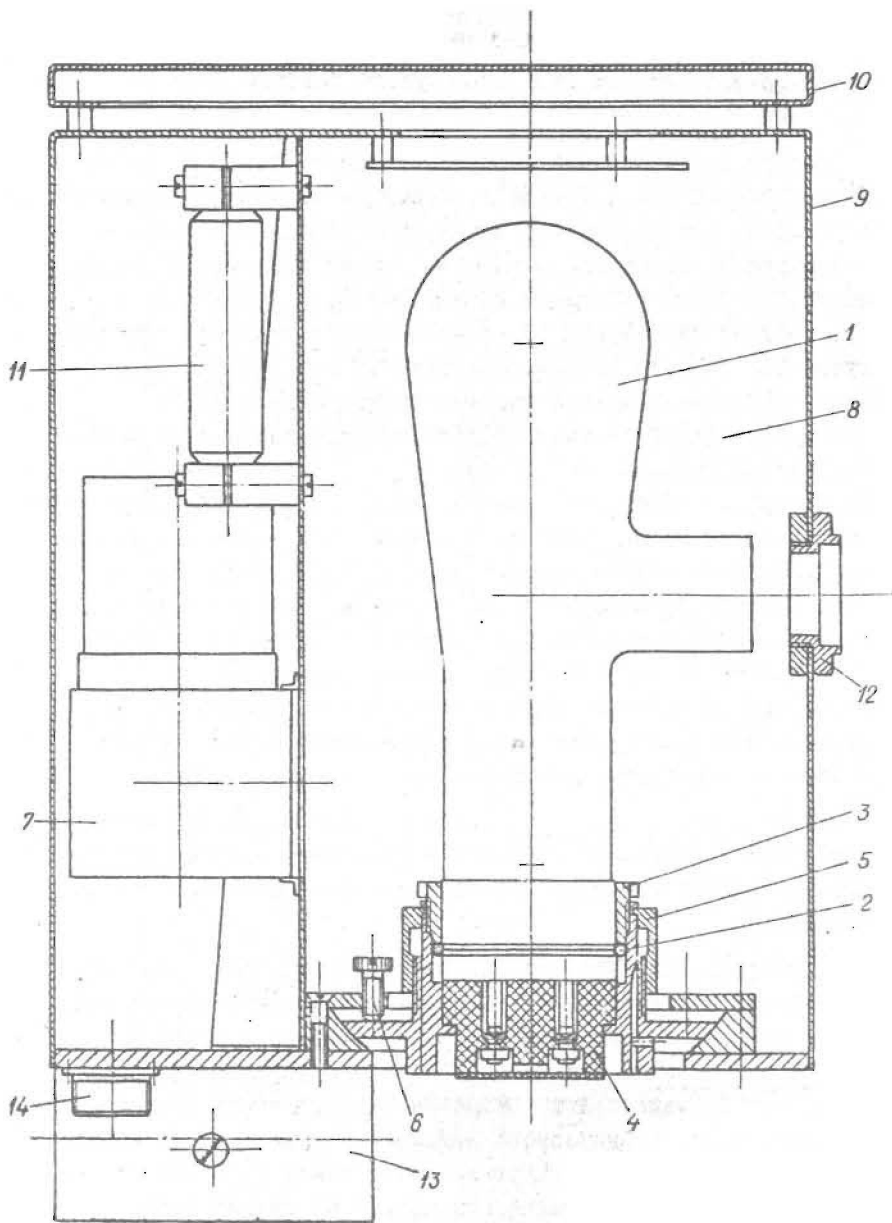


Рис. 7. Дейтериевая лампа.

лется винтами 10.

От внешнего источника через наружное балластное сопротивление осуществляется питание зажигающего устройства, состоящего из импульсного трансформатора II (рассчитанного на напряжение 50 кв и ток 50 а), искрового разрядника и конденсатора 12.

Питание от зажигающего устройства на лампу подается через гибкие провода и токопроводящие кольца 13.

Для присоединения источника света к оптическому каналу служит втулка 14. Прибор имеет призму 15 для крепления на трехгранной шине и штетсельные разъемы 16 и 17 для присоединения кабелей.

Дейтериевая лампа типа ДДС-250 применяется для возбуждения образцов в ультрафиолетовом диапазоне спектра. Держатель лампы показан на рис. 7. Дейтериевая лампа I посредством кольца 2 и гайки 3 установлена в контактную панель 4. Истировка по вертикали производится при помощи гайки 5. Истировка в горизонтальной плоскости осуществляется винтами 6. Охлаждает лампу вентилятор 7, создающий в шахте 8 поток воздуха снизу вверх. В кожухе 9, имеющем крышку 10, установлен трансформатор II дожигаания.

Подсоединение источника света к оптическому каналу осуществляется с помощью втулки 12. Прибор имеет призму 13 для крепления на трехгранной шине и штетсельный разъем 14 для присоединения кабелей.

Для исследования образцов в видимой и в близкой инфракрасной части спектра применяется лампа накаливания мощностью 90 вт, напряжением 12 в (рис. 8).

Лампа накаливания I крепится в цанговом патроне 2, который затягивается гайкой 3. Цанговый патрон 2 изолирован от держателя 4 изоляционными чашками 5 и 6. Цанговый патрон 2 и изоляционные чашки 5 и 6 крепятся в держателе 4 гайкой 7. Шток держателя 4 закреплен в цанговом захвате 8, что позволяет регулировать лампу I по высоте. Цанговый

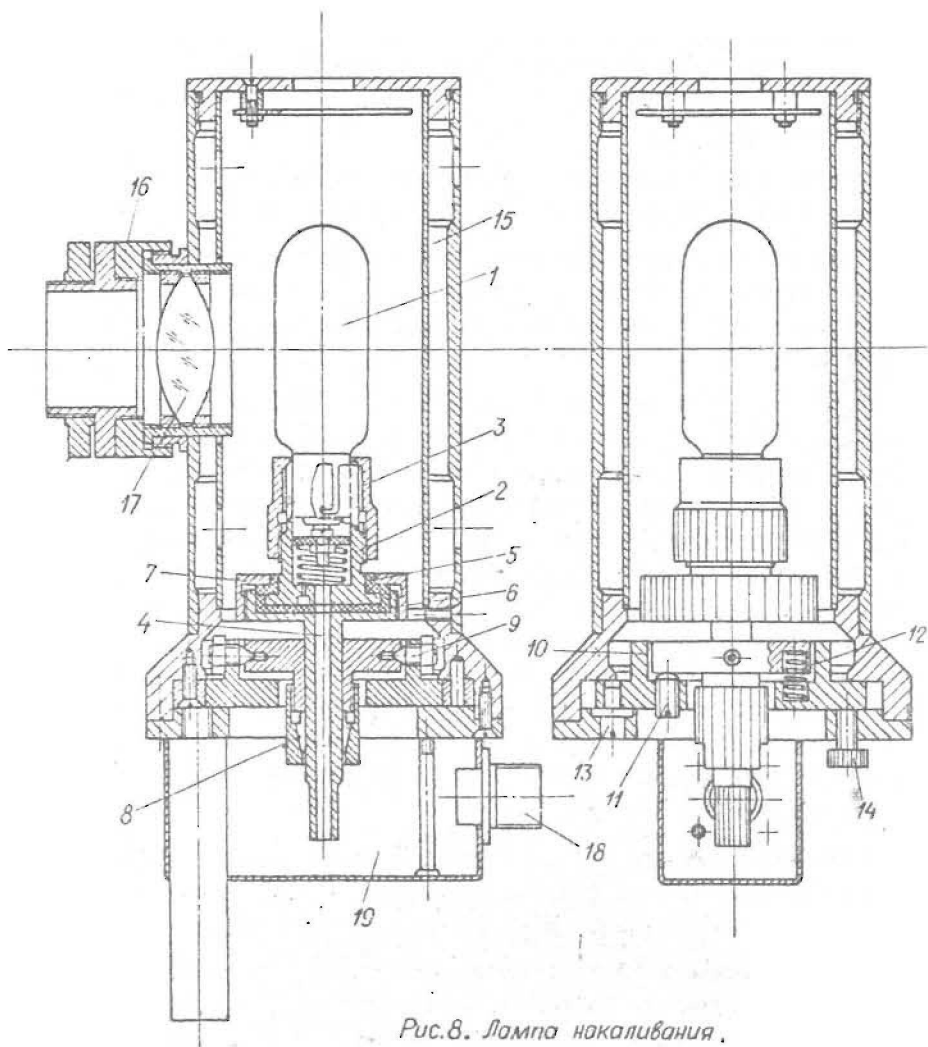


Рис. 8. Лампа накаливания.

зажим 8 может поворачиваться вокруг винтов 9, ввинченных в ползун 10. Положение цапгового зажима 8 регулируется винтом 11, к которому первый прижат пружиной 12. Ползун 10 при повороте эксцентрика 13 перемещается поперек оптического канала и фиксируется винтом 14. Лампа закрыта кожухом 15, в котором закреплены втулки 16 для присоединения лампы к оптическому каналу. Имеется возможность вставить и отрегулировать линзу 17. Для присоединения лампы к блоку управления имеется штепсельный разъем 18, прикрепленный к кожуху 19.

Для рентгеновской лампы типа БСВ2, применяемой для возбуждения образцов в криостате и точной дозировки облучения, применяется кожух с затвором, показанный на рис.9. Кожух состоит из стальной оболочки 1 и свинцового защитного слоя 2, в которых оставлено отверстие 3 для прохода пучка от рентгеновской лампы 4 к криостату. Вода для охлаждения лампы подводится по трубам 5. Кабельный наконечник крепится к кожуху зажимом 6 и заливается кабельной массой 7. Кольцо затвора 8 перемещается на шарнирах 9 и имеет два отверстия 10 и 11. Отверстие 11 закрыто свинцовой пластинкой. Кольцо затвора 8 может находиться в двух положениях (лампа открыта либо закрыта), которые определяют упоры 12. В положении "лампа открыта" якорь 13 электромагнита 14 перемещает кронштейн 15, который поворачивается вокруг оси 16. В паз кронштейна 15 входит винт 17, завинченный в кронштейн 18, который прикреплен к кольцу затвора 8. В положении "лампа закрыта" пружина 19 перемещает кронштейн 15 до упора 12. Электромагнит 14 закрыт кожухом 20. Для определения положения затвора имеется электрическая сигнализация (на рисунке не показана).

Для подключения лампы к блоку управления имеется штепсельный разъем 21, который крепится к кожуху 20. Эксплуатация показала, что такая конструкция кожуха рентгеновской лампы с затвором в сочетании с соответствующей конструкцией криостата полностью защищает рабочий персонал от излучения.

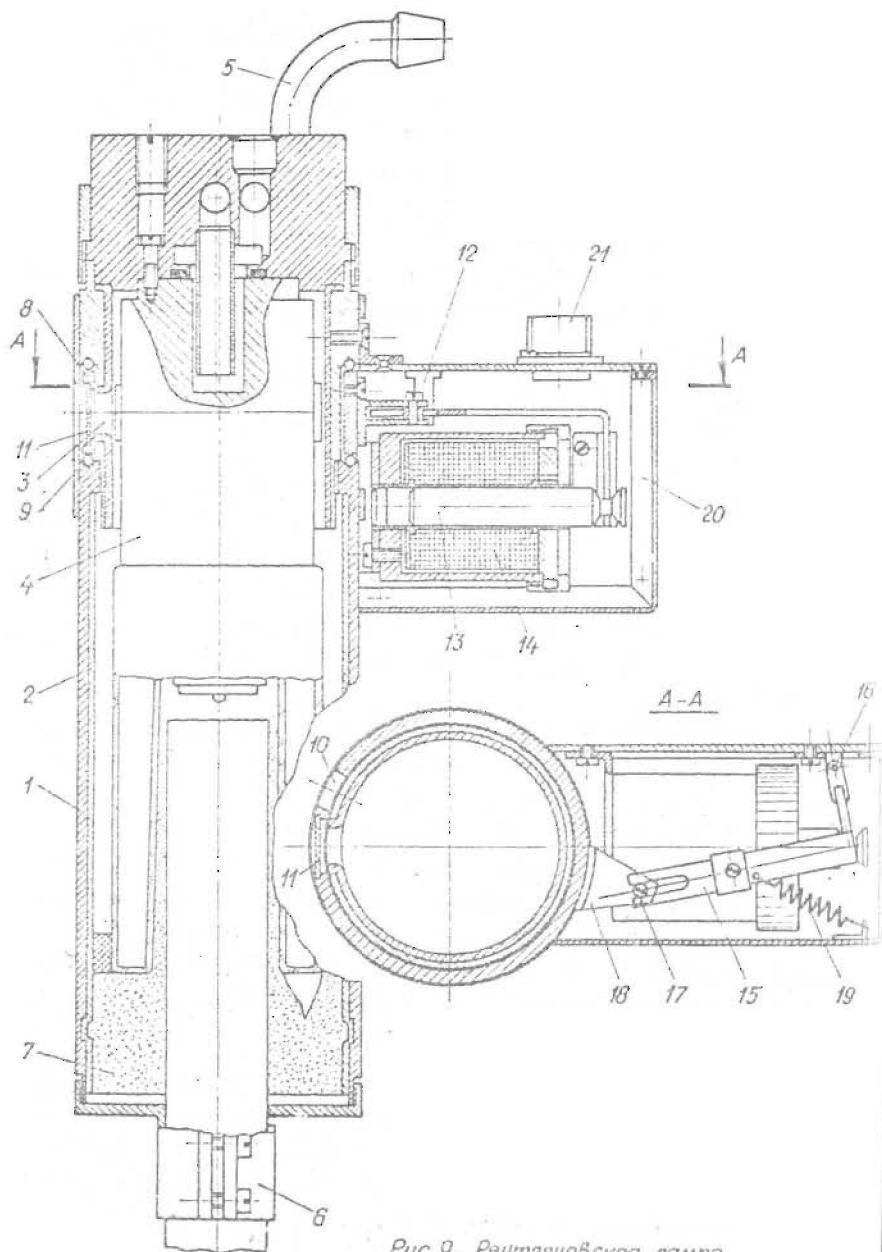
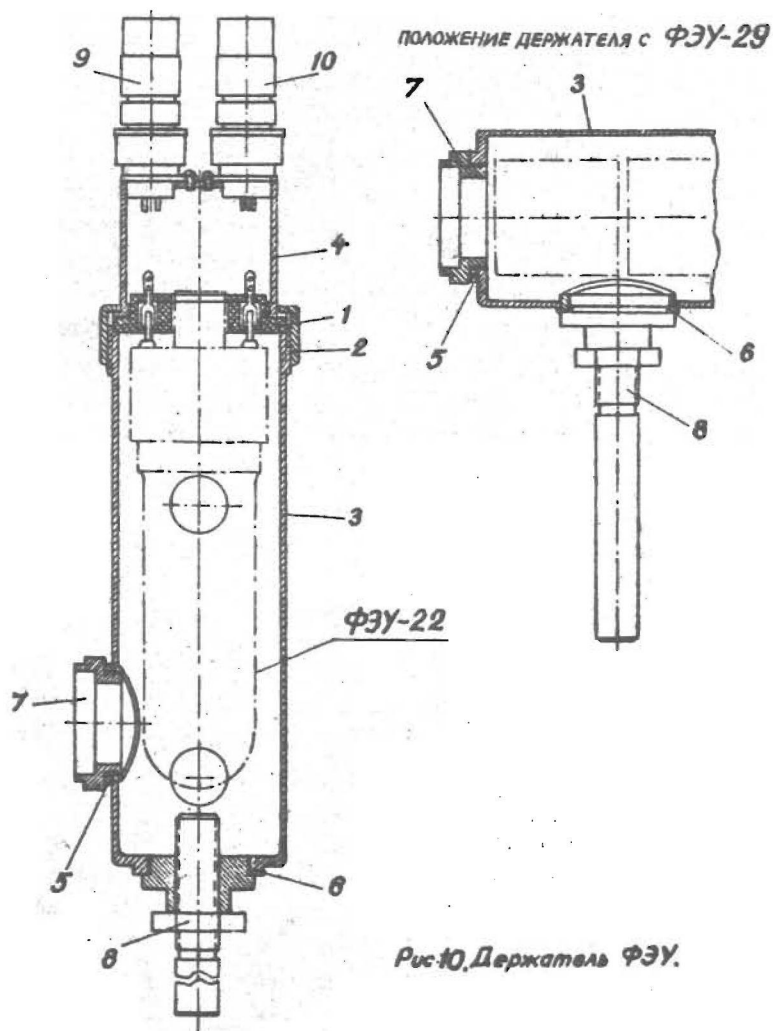


Рис. 9. Рентгеновская лампа.



Для измерения светового потока наиболее часто используются фотоэлектронные умножители (ФЭУ).

Во избежание попадания постороннего света на катод ФЭУ приборы размещаются в специальных светонепроницаемых корпусах, служащих также для крепления прибора на криостатном столе и подсоединения к оптическому каналу.

На рис. 10 изображен держатель ФЭУ, служащий для крепления приборов отечественного производства (ФЭУ-22, ФЭУ-29 и др.) с торцевым или боковым катодом. ФЭУ устанавливается в панели 1, зажатой посредством накидной гайки 2 между корпусом 3 и стаканом 4. Корпус имеет два резьбовых отверстия 5 и 6, в которые, в зависимости от типа ФЭУ, крепится переходная втулка 7 для подсоединения к оптическому каналу и стойка 8, служащая для фиксации держателя на столе; к стакану 4 крепятся штепсельные разъемы 9 и 10, служащие для подсоединения кабелей к прибору.

На рис. 11 показана коробка для охлаждения фотоэлектронного умножителя (ФЭУ).

Коробка предназначена для охлаждения ФЭУ до -70°C , что значительно улучшает отношение сигнал/шум.

Коробка состоит из корпуса 1, в который вставлена тонкостенная труба 2 из стали X18H9T, с охладителем 3, соединенным посредством медного теплопровода 4 с сосудом 5 для жидкого азота 6. Труба 2 одним концом впаяна в диск 7, на котором гайкой 8 крепится контактная панель 9 ФЭУ и коробка 10 с релейным блоком 11 и штепсельными разъемами 12. Другим концом труба 2 упирается на втулку 13 из текстолита, в которой плотно закреплены кварцевые окна 14, а между окнами в канавке 15 под сеткой 16 помещен осушитель (силикагель). Труба 2 герметична, ее передний конец уплотняется вакуумной смазкой на конической части втулки 13, другой

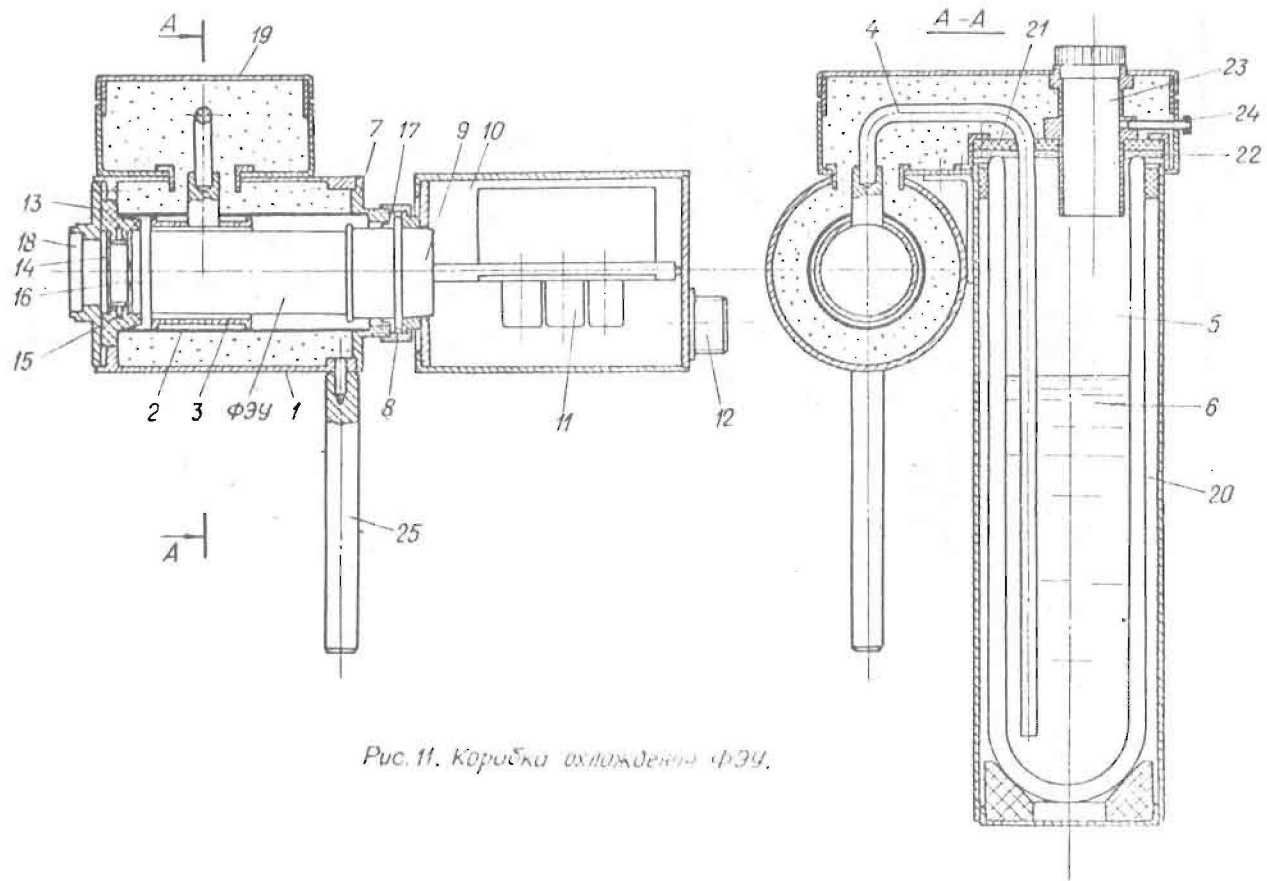


Рис. 11. Коробка охлаждения ФЭУ.

конец — резиновой манжетой 17. Это необходимо для предотвращения запотевания ФЭУ. Для подсоединения коробки ФЭУ к оптическому каналу служит муфта 18.

Теплопровод 4 помещается в коробку 19, к низу которой прикреплен сосуд 5 с чехлом 20. Верх сосуда 5 уплотнен крышкой 21 с прокладкой 22. В крышке 21 укреплена заливная горловина 23 с сапуном 24. Низкий торец горловины 23 опущен в сосуд 5, что необходимо для предотвращения переполнения сосуда 5 и связанного с этим расплескивания азота. Внутренняя полость корпуса I и коробки 19 наполнена размельченной мипорой.

Для крепления прибора на криостатном столе служит ножка 25.

Для фокусировки светового пучка в оптических каналах НИС часто применяются линзы, позволяющие уменьшить потери света.

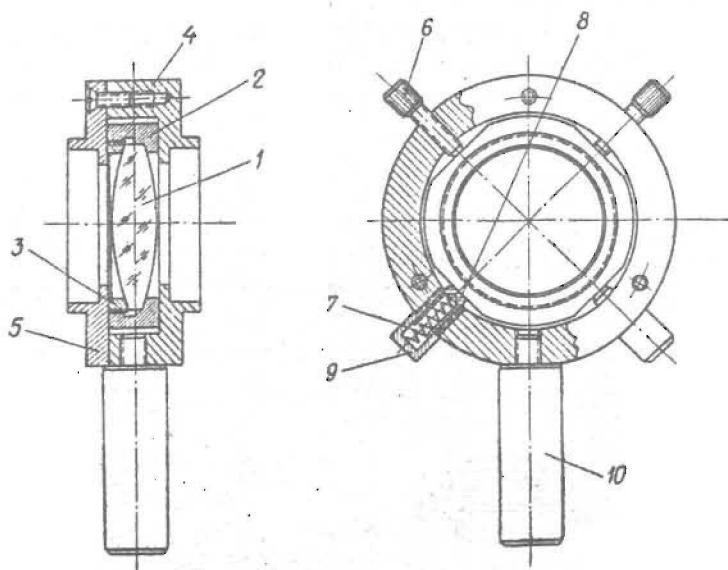


Рис. 12. Держатель линзы.

На рис. 12 изображен держатель линзы, позволяющий передвигать линзу перпендикулярно оси оптического канала.

Линза 1 укреплена в кольце 2 посредством резьбового кольца 3. Кольцо 2 размещено в корпусе держателя, состоящего из чашки 4 и крышки 5. Для юстировки линзы служат регулировочные винты 6 и пружины 7 с прижимами 8 и направляющими 9. Вращая винты 6, можно сместить оптическую ось линзы. Держатель линзы крепится на криостатном столе посредством ножки 10.

На рис. 13 изображен держатель линзы, позволяющий передвигать линзу вдоль оси оптического канала. Линза 1 закреплена в резьбовой втулке 2 кольцами 3. При вращении гайки 4 резьбовая втулка 2 передвигается вдоль оси. Шпонки 5 не позволяют вращаться втулке 2. Держатель линзы подсоединяется к оптическому каналу посредством присоеди-

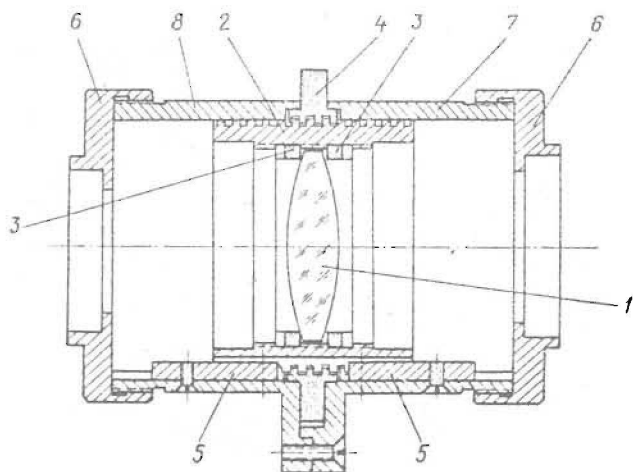


Рис. 13. Держатель линзы.

нительных втулок 6, навинченных на корпус держателя,

состоящего из половинок 7 и 8.

В некоторых случаях необходимо линзу выдвигать и вдвигать в оптический канал, не разбирая его. Для этой цели служит держатель линзы, изображенный на рис. 14. Линзу 1, укрепленную во втулке 2 посредством резьбового кольца 3, можно передвигать в корпусе между плоскими боковинами 4 и 5 посредством кронштейна 6 и кнопки 7. Для обеспечения светонепроницаемости корпуса в щели между внутренним и внешним кожухами 8 и 9 размещена замкнутая лента 10, изготовленная из тонкой фольги и перемещающаяся совместно с кнопкой 7. Юстировка линзы в оптическом канале производится поворотом эксцентриковых упоров 11. Прижатие втулки 2 к упорам обеспечивается пружиной 12.

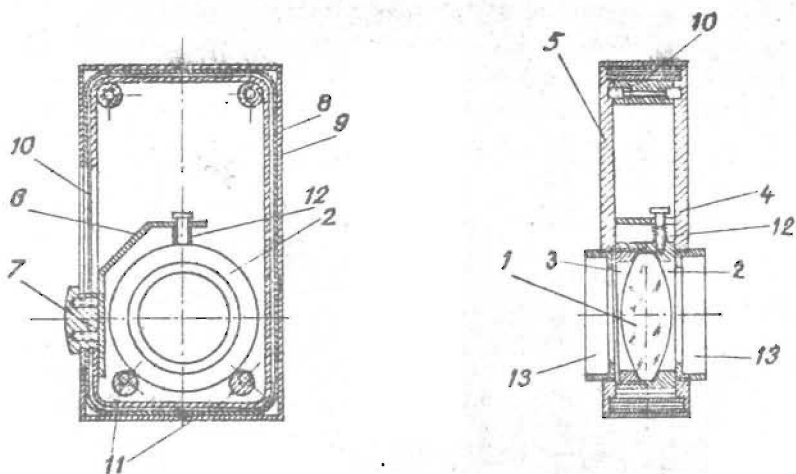


Рис. 14. Держатель линзы.

Держатель линзы в оптическом канале монтируется посредством соединительных муфт 13.

Для объединения оптических элементов и оптико-механических приборов в оптические каналы, а также для присоединения оптических каналов к криостату служат соединитель-

ные муфты (рис. 15).

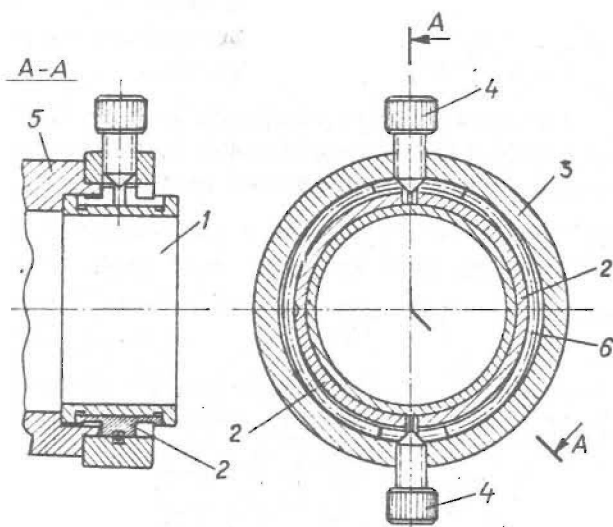


Рис. 15. Соединительная муфта.

В выточке кольца I размещены полукольца 2, свободно охваченные кольцом 3.

При завинчивании винты 4 своими коническими концами раздвигают полукольца 2, нажимая на их скошенные концы, тем самым зажимая присоединительную втулку 5 опто-механических приборов.

Полукольца 2 удерживаются в кольце 3 посредством пружин 6, размещенных в канавках кольца 3 и полуколец 2. Соединение двух опто-механических приборов посредством соединительной муфты получается достаточно жестким и герметичным для света.

Кроме вышерассмотренных элементов опто-механических каналов, применяется целый ряд простых приборов, таких как

- держатель отечественных малогабаритных ФЭУ,
- кассета с постоянными фильтрами (одним или несколькими), используемая в тех местах оптического канала, где в ходе эксперимента их не требуется менять;
- заглушка оптического канала, обыкновенная и заглушка со свинцовой вставкой для предотвращения проникновения рентгеновского излучения через окна криостата;
- телескопическая муфта, необходимая для изменения длины оптического канала при фокусировке оптических устройств;
- зеркальный отражатель для изменения направления пучка света;
- коробка спаренных зеркал для параллельного смещения пучка света плоскими или вогнутыми зеркалами.

Л и т е р а т у р а

1. Описание к авторскому свидетельству № 243210.
2. Описание к авторскому свидетельству № 227087.

НК

Я.Л.Янсон, Я.Я.Страумен, Э.Э.Тардевах

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ КОД-УГОЛ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МОНОХРОМАТОРОМ

Типовая научно-исследовательская система (НИС) для спектрально-кинетических исследований должна иметь монохроматор, управляемый от УВМ.

Удовлетворительное разрешение оптических спектров можно получить, используя универсальный монохроматор, укомплектованный сменными призмами или дифракционными решетками. Изменение и установка длины волны λ осуществляется поворотом микрометрического винта - лимба. Связь между углом поворота φ и λ для разных призм различна и к тому же зависит от кинематических особенностей конструкции монохроматора. Функция $\lambda = f(\varphi)$ в общем случае нелинейная и неэлементарная.

Для того, чтобы в процессе эксперимента можно было устанавливать различные необходимые λ от УВМ, надо снабдить лимб монохроматора электромеханическим преобразователем, реализующим обратную функцию $\varphi = F(\lambda)$ (для каждой призмы различную).

Рассмотрим путь решения этой задачи.

Применение механически нелинейных преобразователей невыгодно: их конструкция сложна. Поэтому целесообразно процесс преобразования разделить на два этапа:

1) нелинейное $N = k \cdot F(\lambda)$ (преобразование электрических сигналов);

2) линейное $\varphi = \frac{1}{K} \cdot N$ (электрический сигнал преобразуется в механический поворот).

Часто для обработки результатов эксперимента удобно задавать не λ , а энергию фотонов ε . Следовательно, нелинейные преобразования в каждом случае (различные призмы, дифракционные решетки; λ или ε) существенно отличаются. Для частного случая создан преобразователь - дискретный линеаризатор /I/, совершающий преобразования $N = k \cdot F_1(\varepsilon)$ для монохроматора СРМ-1. Однако разработка универсального преобразователя, охватывающего всевозможные законы преобразования - задача сложная и требует больших затрат. Поэтому в первом приближении, по-видимому, целесообразно эти преобразования осуществлять в самой УВМ в виде отдельных подпрограмм линеаризации.

Пропорциональный механический поворот осуществляют следующие приводы. В них органом механического поворота является синхронный или асинхронный реверсивный двигатель. Приводы с асинхронным двигателем имеют более сложную конструкцию. В них слежение достигается жесткими обратными связями от вала двигателя и точность работы сильно зависит от линейности датчика и цепи обратной связи.

В классе синхронных двигателей в приводе выгодно отличается шаговый двигатель (ШД), который имеет дискретную отработку поворота и обеспечивает точную и надежную фиксацию конечных координат перемещения. Такой следящий привод с ШД(2) описывается логическими функциями, и благодаря этому максимально приспособлен к совместной работе с УВМ. Все узлы электронной схемы привода могут быть собраны из стандартных логических элементов и позволяют использовать модульный принцип построения с применением современных достижений микроминиатюрной техники.

Функциональная схема наиболее распространенного следящего привода с шаговым двигателем изображена на рис. I /4/. Такой привод состоит из электронного блока управления (БУ) и ШД.

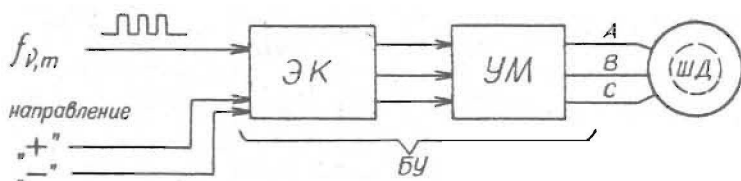


Рис. 1.

Последовательные шаговые перемещения и реверс ротора ШД достигается коммутацией тока в фазовых обмотках. Порядок коммутации токов зависит от принципа построения и числа обмоток ШД. Широкое распространение получили трехфазные реактивные ШД, имеющие реверс с минимальным числом фаз и небольшую цену (δ) одного шага. Для типа ШД-4 при шеститактной коммутации $\delta = 1,5$ градуса. Порядок коммутации показан в циклограмме на рис.2.

В каждом такте система токов (i_A, i_B, i_C) строго определенная и периодически повторяется через 6 тактов. Такую последовательность вырабатывает электронный коммутатор (ЭК), а токи до необходимой величины усиливаются усилителем мощности (УМ).

Скорость вращения и суммарный угол поворота вала двигателя пропорциональны соответственно частоте (ν) и числу (m) тактов коммутации, которые задают входной сигнал $f_{v,m}$ в виде унитарного кода. Направление выбирается сигналами разрешения правого ("+") или левого ("-") вращения.

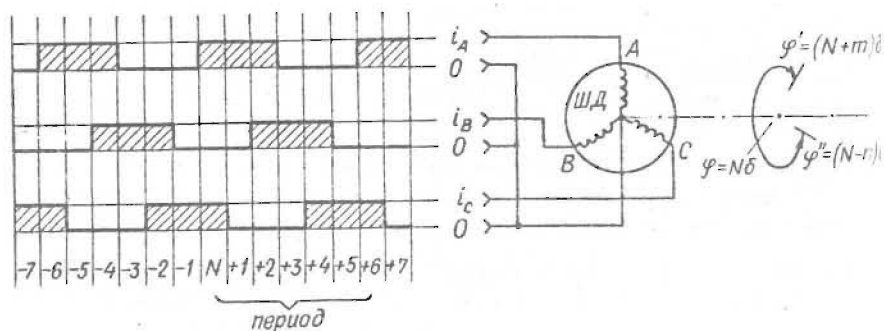


Рис. 2.

Использование такого привода требует дополнительных операций. Во-первых, необходимо установить вал ШД в начальное положение φ_0 согласно λ_0 , что делается вручную перед включением привода или специальным методом (см. дальше); во-вторых, необходимо обеспечить формирование входных сигналов $f_{\nu, m}$ и "+" или "-".

Сигнал $f_{\nu, m}$ представляет собой последовательность m импульсов с частотой повторения ν . Так как установка λ имеет позиционный характер, то линеаризованную величину $N(\lambda)$ можно выбрать равной соответствующему числу шагов ШД от λ_0 до λ . Тогда количество импульсов m равно приращению $\Delta N_k = N_k - N_i$, где N_i - число шагов относительно начального положения для имеющейся позиции, а N_k - число шагов для следующей позиции. Знак ΔN_k соответствует сигналам разрешения "+" или "-". В целях экономии времени перехода от одной позиции λ_i на другую λ_k частота коммутации тактов ν (отработки шагов) выбирается близкой к частоте приемистости ШД с данной нагрузкой.

Формирование сигналов $f_{y, m}$ и "+" или "-" также можно осуществить при помощи УВМ, дополнительно усложняя подпрограммы линеаризации. Это же достигается и дополнением электронной схемой к БУ шагового привода.

На рис. 3 дана функциональная схема позиционного следящего шагового привода для управления λ монохроматора, способного осуществлять указанные дополнительные операции. Прерывистыми линиями отделены три основные части: сам шаговый привод (ШП), узел установки начального положения (УНП) и формирователь входных сигналов шагового привода (ФВС).

В основе работы схемы лежит сравнение действительного положения лимба монохроматора (N_i) и требуемой от УВМ позиции (N_k) по числу шагов ШД. Сигнал рассогласования приводит ШД во вращение до тех пор, пока не наступит совпадение.

Требуемая от УВМ позиция заносится в "ПАМЯТЬ" (триггерный регистр) в виде параллельного двоичного кода. Действительное положение отображается в реверсивном "СЧЕТЧИКЕ", который подсчитывает импульсы, заданные на ЭК с учетом направления вращения (направления коммутации).

Рассмотрим примененный метод установки начального положения. Чтобы число в "СЧЕТЧИКЕ" соответствовало числу шагов от начального положения лимба φ_0 , при включении питания моновибратор (МП) переключает триггер (Т) в положение, запрещающее попадание сигналов от схемы "СРАВНЕНИЕ" на "сх. КОМАНД" (триггер с тремя устойчивыми состояниями), переключая последний в состояние "-". При этом генератор тактовых импульсов (ГТИ) запускается и начинает вырабатывать импульсы, которые подаются на вход ШП и приводят ШД в левое ("-") вращение. Двигатель через редуктор вращает лимб λ монохроматора и диски фотосигнализаторов (ФС). Левое вращение ШД соответствует возвращению лимба к начальному положению φ_0 . Передача в отверстия в дисках сделаны так, чтобы в небольшой окрестности (опре-

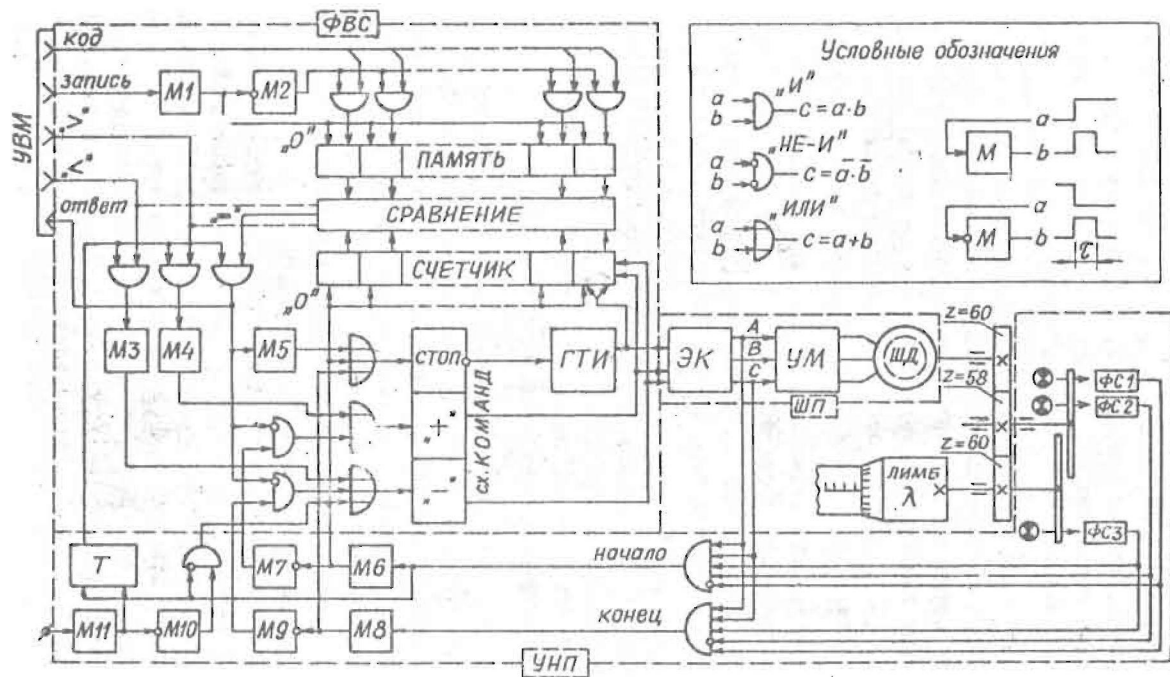


Рис. 3.

деляемой одним периодом коммутации ШД) начального положения φ_0 . Фотосигнализаторы ФС1 и ФС2 освещались источниками света. Выделить сигнал в момент достижения φ_0 одними фотосигнализаторами невозможно вследствие динамической ошибки ШД, которая при номинальной скорости вращения больше одного шага. Поэтому с ФС выбирается только определенный (соответствующий φ_0) период коммутации, а точный такт берется с выходов ЭК.

В момент достижения φ_0 на выходе логической схемы "И" появляется сигнал "начало" (не учитывающий динамическую ошибку), который переключает триггер Т в противоположное положение и запускает моновибратор М6. Импульс последнего производит запись начального положения в "СЧЕТЧИКЕ" и переключением "сх.КОМАНД" в положение "СТОП" останавливает ЭК. В дальнейшем число в "СЧЕТЧИКЕ" будет соответствовать действительному положению лимба по числу шагов от φ_0 . Затем происходит установка лимба в положение, которое определяется кодом, имеющимся в "ПАМЯТИ".

Задним фронтом импульса от М6 запускается моновибратор М7. Если не запрошено начальное положение от УВМ, то содержимое

"ПАМЯТИ" и "СЧЕТЧИКЕ" не совпадают и импульс М7 переводит "сх.КОМАНД" в состояние "+". При достижении запрошенного положения схема "СРАВНЕНИЕ" вырабатывает сигнал совпадения ("="), который при помощи М5 переводит "сх.КОМАНД" в состояние "СТОП". Поступление тактовых импульсов на ШД прекращается, и двигатель останавливается. Статический момент ШД фиксирует положение лимба до записи в "ПАМЯТИ" следующей позиции N_x и появления признака неравенства больше (" $>$ ") или меньше (" $<$ ").

Признаки " $>$ " или " $<$ " определяют направление вращения к позиции N_x . Они могут быть заданы для каждой позиции от УВМ или выработаны схемой "СРАВНЕНИЕ". В последнем случае схема "СРАВНЕНИЕ" усложняется, так как помимо нахождения функции равнозначности необходимо производить сравнение чисел в "ПАМЯТИ" и "СЧЕТЧИКЕ", начиная со старшего

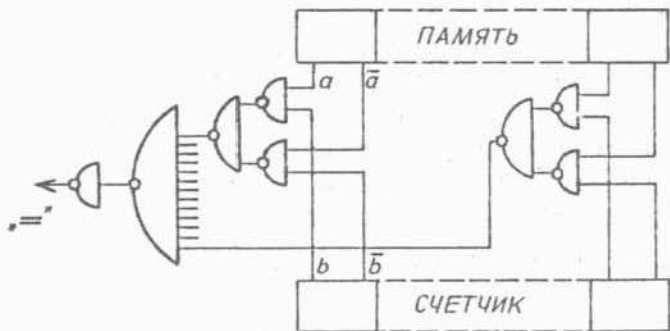


Рис. 4.

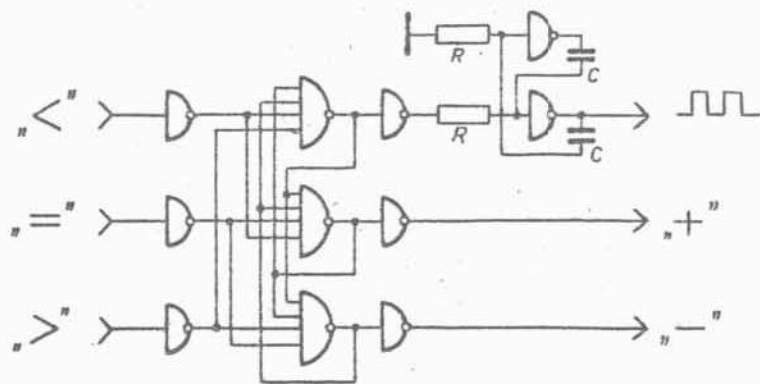


Рис. 5.

разряда, чтобы обнаружить признак неравенства " $>$ " или " $<$ ".

Кроме этого, в устройстве предусмотрена возможность получения сигнала от конечного положения лимба подобно получению сигнала "начало" (в этом случае через отверстия в дисках освещаются ФС2 и ФС3). Сигнал "конец" используется для ограничения интервала вращения лимба при неправильном задании кода или признака направления, а также может быть применен для контроля правильности работы устройства.

По такой функциональной схеме был построен следящий шаговый привод для управления монохроматором SPM-I фирмы "Карл Цейсс" ГДР. Его техническая характеристика следующая:

- 1) двигатель типа ШД-4, шаг поворота 1,5 градуса;
- 2) общее количество возможных позиций 4800;
- 3) погрешность установки лимба не превышает $\pm 0,5$ шага ШД;
- 4) скорость вращения лимба 1 об/сек;
- 5) потребляемая мощность 200 ватт.

Дальше приводятся краткое описание и принципиальные схемы некоторых узлов привода.

Электронная схема привода в основном может быть собрана на логических интегральных схемах, например, серии I55K. Триггерный регистр "ПАМЯТИ" содержит 13 триггеров с отдельными входами, а "СЧЕТЧИК" собран по асинхронной схеме из 13 типовых реверсивных триггеров /5/.

Схема "СРАВНЕНИЕ" показана на рис.4. Для каждого разряда три логических элемента "2И-НЕ" выполняют функцию равнозначности $x = \overline{a\bar{b}} + \overline{\bar{a}b}$, а тринадцативходовой схемой "И-НЕ" выделяется случай совпадения всех разрядов.

На рис.5 приводится "сх.КОМАНД", объединенная с ГТИ. "сх.КОМАНД" представляет собой триггер с тремя устойчивыми состояниями. В качестве ГТИ использован симметричный мульти-вibrator, частоту генерации которого определяют $R_{\text{нс}}$.

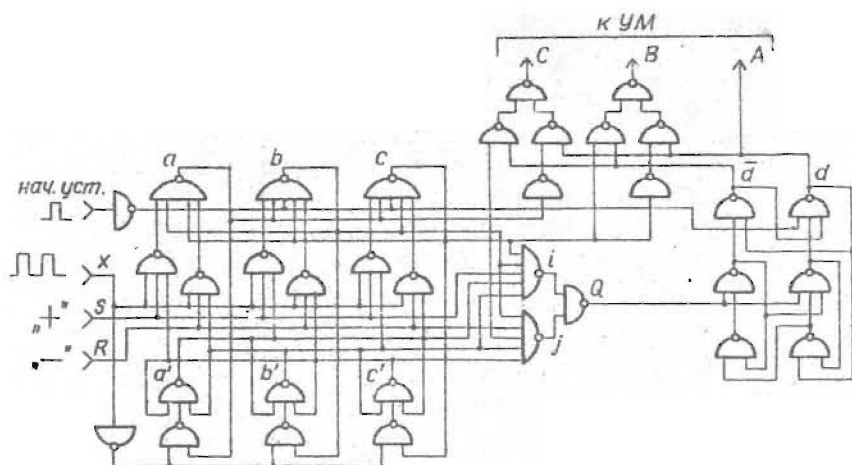


Рис. 6.

		<i>m</i>	<i>x</i>	<i>SR</i>	<i>a b c</i>	<i>a' b' c'</i>	<i>i j q</i>	<i>d</i>	<i>A B C</i>
		КОМАНДЫ							
" + "	стоп	0	○	○○	○	○	○		○
	1	○		○	○	○	○		○ ○
		○		○	○	○	○		○ ○
		○		○	○	○	○		○ ○
		○		○	○	○	○		○ ○
		○		○	○	○	○		○ ○
5	○		○	○	○	○		○ ○	
" - "	стоп	(5)	○	○○	○	○	○	○	○ ○
	(5)-1		○		○	○	○	○	○
		○		○	○	○	○	○	○
		○		○	○	○	○	○	○
(5)-2		○		○	○	○	○	○ ○	
(5)-3	○		○	○	○	○		○	
	○		○	○	○	○		○	

Рис. 7.

Мультивибратор запускается и генерация продолжается, пока соответствующий выход трехстабильного триггера находится под низким потенциалом ("0").

В качестве электронного коммутатора используется шести-стабильная схема со счетным входом (рис.6), состоящая из реверсивного трехстабильного триггера типа ведущий - ведомый и типового двухстабильного триггера. К выходам обоих триггеров подключены логические цепочки формирования выходных сигналов. Выходные сигналы ЭК коммутируют ток в фазовых обмотках ШД в соответствии с последовательностью, указанной на циклограмме (рис.2). Алгоритм работы ЭК поясняется приведенной на рис. 7 таблицей истинности.

Усилитель мощности состоит из трех отдельных (для каждой фазовой обмотки ШД) и одинаковых транзисторных усилителей, работающих в режимах переключения (рис.8). Транзисторы T_1 и T_2 служат для согласования выходных напряжений положительной полярности интегральных схем ЭК с отрицательным напряжением питания ШД. Сам усилитель выполнен по схеме составного транзистора (T_3, T_4, T_5) и в открытом состоянии обеспечивает ток фазы ШД до 3А. Резисторы R включены в каждой цепи нагрузки для снижения постоянной времени фазовых обмоток. Это способствует улучшению динамических характеристик ШД /6/. Диод D гасит перенапряжения, возникающие на коллекторах T_4 и T_5 при запираании вследствие индуктивности нагрузки.

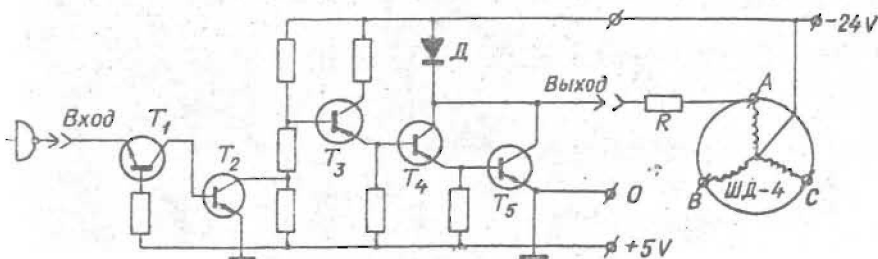


Рис.8.

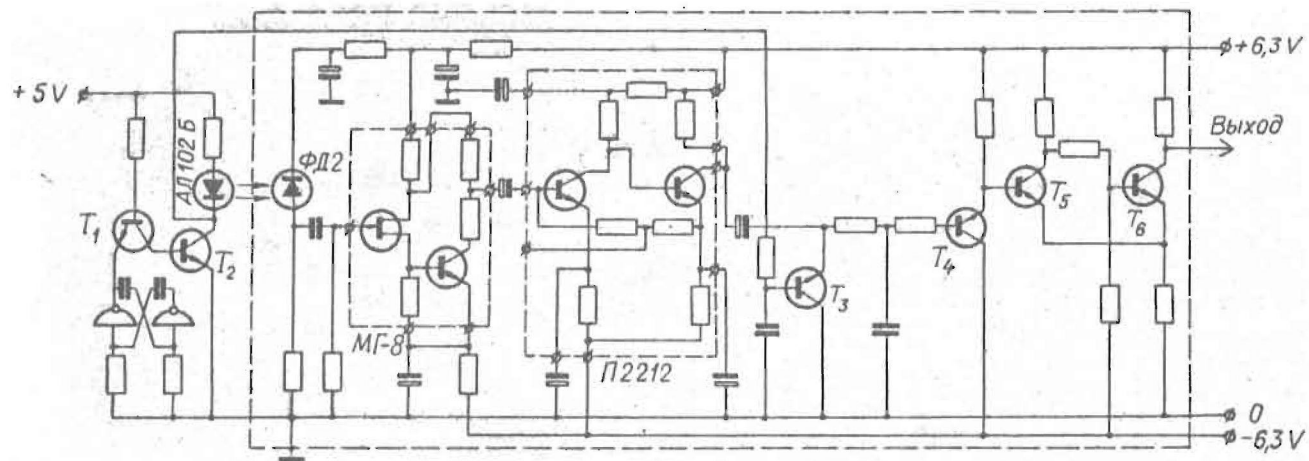


Рис.9.

Все три фотосигнализатора (ФС) выполнены по идентичной схеме (рис.9). В качестве фотодатчиков применены фотодиоды, а источниками излучения служат светодиоды. Снижение шумов фотодиода и посторонних помех в усилителе фототока достигается методом модуляция-усиление-демодуляция (МДМ) /7/. Модуляцию осуществляет мультивибратор, частота которого выбирается порядка 10 кгц. Усилитель переменного тока собран из стандартных микросхем: истокового повторителя ИГ-8 и двухкаскадного усилителя И2212. Демодуляцию осуществляет транзисторный ключ T_3 . Определение порога срабатывания фотосигнализатора достигается триггером Шмита (T_4, T_5, T_6).

Механизм привода изображен на рис.10. Корпус I механизма закреплен на обточенной части цилиндра 2 неподвижной шкалы монохроматора. К корпусу I крепится плита 3, на которой укреплен винтами 4 шаговый двигатель 5 с шестерней 6 посредством стакана с крышкой 8 и регулировочным винтом 9. Движение от шестерни 6, имеющей 60 зубьев, передается валу 10 с шестернями II и I2; эти шестерни имеют соответственно 58 и 60 зубцов и на них закреплены кулачки 13 и 14 ограничителя вращения на 21 оборот валика 10. Шестерня II опирается в шарикоподшипниках 15 в корпусе 16, прикрепленном винтами 17 к плите 3. На шестернях II и I2 при помощи винтов 18 и колец 19 и 20 крепятся диски фотосигнализаторов 21 и 22, которые имеют отверстия для прохода света и охватываются датчиками 23 и 24, состоящими из светодиодов 25 (АЛ102Б) и фотодиодов 26 (ФД-2). Валик 10 имеет головку с прорезью для установки и продольного фиксирования валика 27 шаровой шарнирной муфты. Другой конец валика 27 входит в шлицы муфты 28, которая жестко крепится к диску 29 микрометрического винта 30 установки длины волны монохроматора.

Для устранения мертвого хода в шестеренчатой передаче перемещают корпус 16, освобождая винты 17, и при освобожденных зажимных винтах 4 винтом 9 перемещают шаговый двигатель 5 вместе с шестерней 6. Суммарный мертвый ход отрегулированной передачи не превышает 30'.

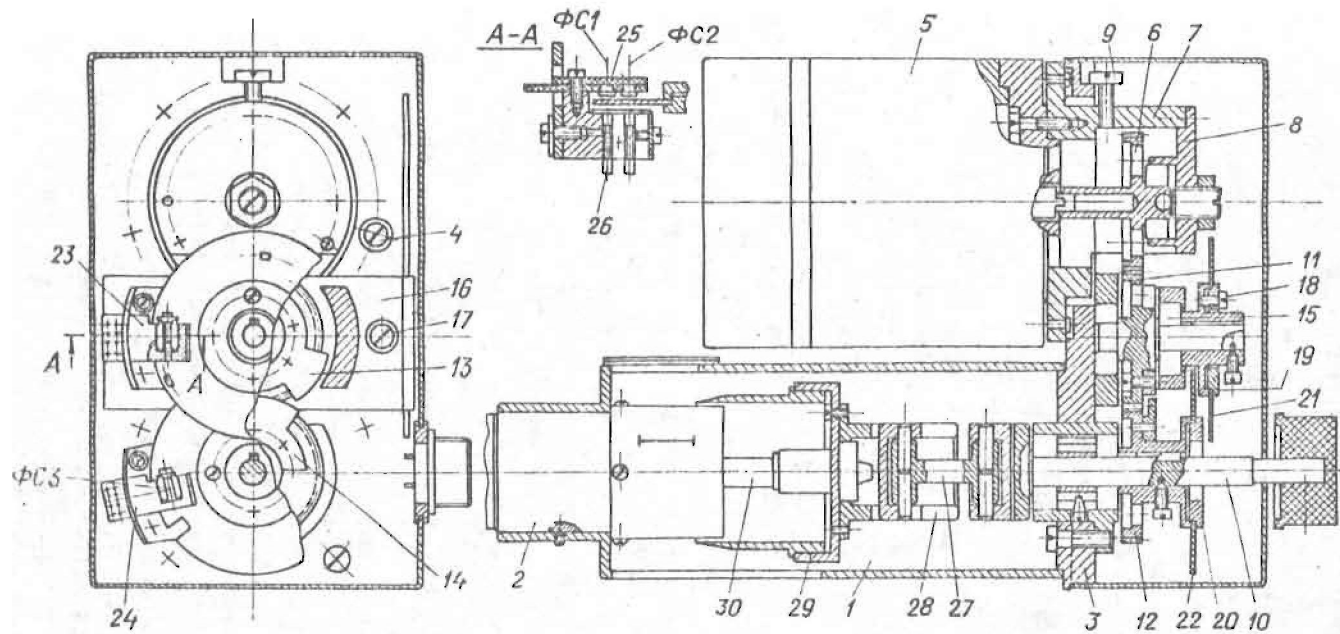


Рис. 10.

В диске 21 имеются 2 отверстия, расположенные на двух окружностях, соответствующих положению каналов ФС1 и ФС2 датчика фотосигнализации 23. В диске 22 имеется одно отверстие для канала ФС3 датчика 24. В начальном положении лимба монохроматора диски 21 и 22 устанавливаются так, чтобы были открыты каналы ФС1 и ФС2, а при достижении конечного положения лимба монохроматора одновременно открывались каналы ФС2 и ФС3, что обеспечивается шестеренчатой передачей. Отверстия в дисках 21 и 22 имеют длину по окружности, соответствующую приблизительно 5 шагам ШД ($\approx 8^\circ$).

Описанное устройство в общем случае является преобразователем код-угол поворота. Такой преобразователь может быть использован и для решений других задач, связанных с механическими перемещениями, управляемыми от УВМ.

Л и т е р а т у р а

1. Паспарне А.К. Дискретный линеаризатор характеристики нелинейного датчика. Дипломный проект, Рига, РПИ, 1971.
2. Рагмиров В.А., Ивоботенко Б.А., Цаценкин В.К., Содовский Л.А. Системы с шаговыми двигателями, "Энергия", 1964.
3. Исмаилов Ш.Ю. Автоматические системы и приборы с шаговым двигателем. "Энергия", 1968.
4. Дискретный электропривод с шаговым двигателем. Под общей ред. М.Г.Циликика, "Энергия", 1971.
5. РТМ по применению интегральных схем типа "Логика-1".
6. ЭИ. Приборы и элементы автоматки. ВИНТИ, 1971, № 35, стр.6 (Beling Thomas E. Drive system for small or large angle FM stepping motors.-"Comput.Des." 1971, 10, No 3, 77-82).
7. Белевский Б.И., Минц М.Б. Высокочувствительные усилители постоянного тока с преобразователями. "Энергия", 1970.

22

Г.К. Л и м е ж

СЧЕТЧИК ФОТОНОВ

В физических исследованиях часто появляется необходимость определить интенсивность слабых световых потоков. Во многих случаях, особенно при создании исследовательских систем с ЭВМ в контуре, требуются результаты измерения в дискретной форме.

В статье рассмотрены свойства фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и основные источники погрешности при измерении световых потоков, особенности работы ФЭУ в режиме счета фотонов, влияние различных факторов на чувствительность и точность измерений и отмечены основные преимущества метода счета фотонов. Дается также краткое описание схемы построенного счетчика фотонов и рассматривается принцип действия этого прибора.

ФЭУ в режиме измерения слабых световых потоков

Из датчиков для измерения слабых световых потоков наибольшее распространение получили ФЭУ, обладающие высокой чувствительностью (до 10^{-17} Вт [1, 2]), большим коэффициентом усиления (10^8 и более) и хорошим временным разрешением, достигающим 10^{-11} сек. Поэтому ФЭУ в настоящее время почти незаменимы при измерении слабых световых потоков.

Одним из основных факторов, ограничивающих пределы измерения слабых световых потоков, является темновой ток ФЭУ и, в первую очередь, величина флуктуаций темнового тока. Постоянную составляющую темнового тока можно учесть путем измерения величины темнового тока I_T и последующего ее вычитания при измерении светового потока.

Темновой ток I_T анода ФЭУ условно можно разделить на компоненты [3] соответственно его основным источникам:

$$I_T = e \left(N_T + N_q \cdot \bar{n} + \frac{N_{g_1}}{g_1} + \frac{N_{g_2}}{g_1 \cdot g_2} + \frac{N_{g_3}}{g_1 \cdot g_2 \cdot g_3} \right) G + I_y, \quad (1)$$

где e - заряд электрона; N_T - количество термоэлектронов катода, собранных на первый диод в единицу времени; N_q - количество черенковских свечений, вызванных космическими частицами и радиацией в единицу времени; \bar{n} - количество электронов, эмиттированных катодом, вследствие одной вспышки черенковского свечения; N_{g_i} - количество термоэлектронов, эмиттированных i -тым диодом в единицу времени; g_i - коэффициент умножения i -того диода; G - коэффициент умножения диодной системы; I_y - сумма тока утечки между электродами и тока обусловленного ионами остаточного газа в баллоне ФЭУ.

В выражении (1) учтено влияние автоэлектронной эмиссии трех первых диодов на величину темнового тока. Влиянием остальных диодов в первом приближении можно пренебречь. Тогда флуктуации темнового тока ΔI_T выразятся

$$\Delta I_T = e \left(\Delta N_T + \Delta n \cdot \Delta N_q + \Delta \frac{N_{g_1}}{g_1} + \Delta \frac{N_{g_2}}{g_1 \cdot g_2} + \Delta \frac{N_{g_3}}{g_1 \cdot g_2 \cdot g_3} \right) G a + \Delta I_y, \quad (2)$$

где $a > 1$ - коэффициент, учитывающий статистическую флуктуацию эмиссии вторичных электронов диодной системой. Коэффициент a приближенно можно определить [1]

$$a = \left[1 + \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_1 \cdot (g-1)} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Величины N_T , N_q , N_{g_i} и \bar{n} будут меняться случайным образом от измерения к измерению. Принимая, что распределение их во времени подчиняется статистике Больцмана [4, 5], выражение (2) примет вид:

$$\Delta I_T = e \left[(\bar{N}_T)^{\frac{1}{2}} + (\bar{n} \cdot \bar{N}_2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{g_1} (N_{g_1})^{\frac{1}{2}} + \right. \quad (4)$$

$$\left. + \frac{1}{g_1 \cdot g_2} (\bar{N}_{g_2})^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{g_1 \cdot g_2 \cdot g_3} (\bar{N}_{g_3})^{\frac{1}{2}} \right] a \cdot G + \Delta I_y.$$

Из выражений (3) и (4) следует, что при измерении слабых световых потоков необходимо применять ФЭУ с высокоэффективным первым диодом, позволяющим значительно уменьшить темновой ток, обусловленный диодной системой. Имеются данные о ФЭУ с первым диодом, коэффициент вторичной эмиссии которого порядка 30-50 [6]. Выражения (3) и (4) подтверждают также целесообразность подбора оптимального распределения напряжения на экранирующем электроде и первых диодах [1, 3, 7], обеспечивающих наилучшие условия сбора фотоэлектронов с катода и максимальную эффективность первых диодов. Существенное уменьшение эмиссии термоэлектронов с фотокатода может быть достигнуто охлаждением фотокатода [1, 4, 8-11], в результате чего количество термоэлектронов уменьшается на 2-3 порядка. Среднее число эмиттированных фотокатодом термоэлектронов в единицу времени пропорционально площади катода [12]. Следовательно, при измерении слабых световых потоков целесообразно применять ФЭУ с малыми площадями фотокатода. Применение ФЭУ с большими площадями фотокатода возможно при условии использования электрической и электромагнитной фокусировки электронов, ограничивающей попадание на первый диод электронов, эмиттированных с периферийных участков катода. Фокусировку светового потока целесообразно производить с помощью конического световода, которым по сравнению с линзовой системой обеспечивается потеря света в меньшем количестве и устраняется опасность конденсации влаги на фокусирующей системе при охлаждении ФЭУ [1].

Измерение слабых световых потоков методом счета импульсов

Измерение выходного сигнала ФЭУ может быть произведена тремя основными методами:

- а) методом измерения среднего анодного тока ФЭУ, т.е. методом постоянного тока (ПТ);
- б) методом синхронного детектирования (СД);
- в) методом счета фотонов, т.е. методом счета одноэлектронных импульсов на выходе ФЭУ (СИ).

Последний метод имеет ряд преимуществ по сравнению с методами ПТ и СД, особенно при измерении слабых интенсивностей света [1, 2, 4-6, 13-19]. Вообще импульсы на выходе ФЭУ могут появляться в результате падения на катод фотонов (световые импульсы) и в результате разных физических явлений, не связанных с падающим световым потоком (темновые импульсы). Световые импульсы могут быть одно- и многоэлектронными. Многоэлектронными импульсами называются такие, которые образуются вследствие наложения двух или более одноэлектронных импульсов друг на друга. Темновые импульсы могут быть многоэлектронными (вследствие черенковского свечения), одноэлектронными (в основном в результате термоэмиссии электронов катодом) и динодными (в результате термоэмиссии электронов динодами ФЭУ). Если бы коэффициент умножения динодной системы был постоянной во времени величиной, то выбором порога дискриминации было бы возможно полное отделение динодных импульсов. Но величина коэффициента умножения динодов (количество вторичных электронов динодов, выбитых одним электроном) подчиняется гауссовому распределению, т.е. существует реальная вероятность, что амплитуды отдельных импульсов динодного происхождения будут больше амплитуд одноэлектронных импульсов. Если выбрать порог дискриминации

$$e \cdot \bar{G} \cdot \frac{1}{I_1} > I_n > e \cdot \bar{G} \cdot \frac{1}{I_1} \cdot \frac{1}{g_1}, \quad (5)$$

где \bar{G} - средний коэффициент умножения диодной системы и t_i - длительность импульса на выходе ФЭУ, тогда количество сосчитанных темновых импульсов

$$N_m = \bar{N}_T + N_2 + N_{g_1} \cdot c, \quad (6)$$

где $c > 1$ - коэффициент, учитывающий вероятность превышения порога дискриминации импульсами, вызванными автоэмиссией первого диода.

Выражение среднеквадратичной флуктуации количества сосчитанных импульсов примет вид:

$$\Delta \bar{N}_m = [(N_T)^{\frac{1}{2}} + (N_2)^{\frac{1}{2}} + (c \cdot N_{g_1})^{\frac{1}{2}}] \cdot a. \quad (7)$$

Из сопоставления выражений (1) и (6) видно, что величина темнового сигнала уменьшается:

- а) исключением влияния токов утечки I_y ;
- б) исключением влияния токов, связанных с автоэмиссией электронов от всех диодов, кроме первого;
- в) уменьшением влияния тока, связанного с автоэмиссией электронов первого диода;
- г) уменьшением в Γ раз влияния космического излучения, так как сильные импульсы, вызываемые черенковским свечением окна ФЭУ, дают такой же вклад, как одновалентные импульсы [1, 19].

Кроме того, преимущества метода СИ выявляются в уменьшении влияния действия послеимпульсов, связанных с диодной системой [14, 20] и появляющихся при освещении окна ФЭУ.

Преимущества метода СИ выявляются также в широком динамическом диапазоне измерений. Применяя быстродействующую пересчетную схему, диапазон измеряемых интенсивностей светового потока может меняться $10^4 - 10^5$ раза без какого-либо переключения диапазонов. При скоростях счета более 10^5 имп/сек у ФЭУ может наблюдаться уменьшение коэффициента умножения [21], но вносимые от этого погрешности не зависят

от метода измерения.

Преимуществом метода СИ является также непосредственное представление результата измерения светового потока в дискретной форме. При измерении выходного сигнала ФЭУ методом ИТ или методом СД последовательность импульсов тока накапливается на интегрирующей емкости, усиливается и далее преобразовывается аналого-цифровым преобразователем в дискретную форму. Естественно, что при преобразовании дискретного сигнала в аналоговый, усилении аналогового сигнала (если это необходимо) и преобразовании полученного аналогового сигнала в дискретный часть информации теряется, т.е. вносятся дополнительные погрешности.

Возможности метода СИ и предельно достижимая точность измерений световых потоков в зависимости от времени измерения и быстродействия измерительного тракта, включая ФЭУ, характеризуются кривыми на рис. I. При расчетах кривых учтены только два основных источника погрешности измерений, появляющиеся вследствие флуктуации количества подсчитанных импульсов N и случайного наложения двух импульсов друг на друга.

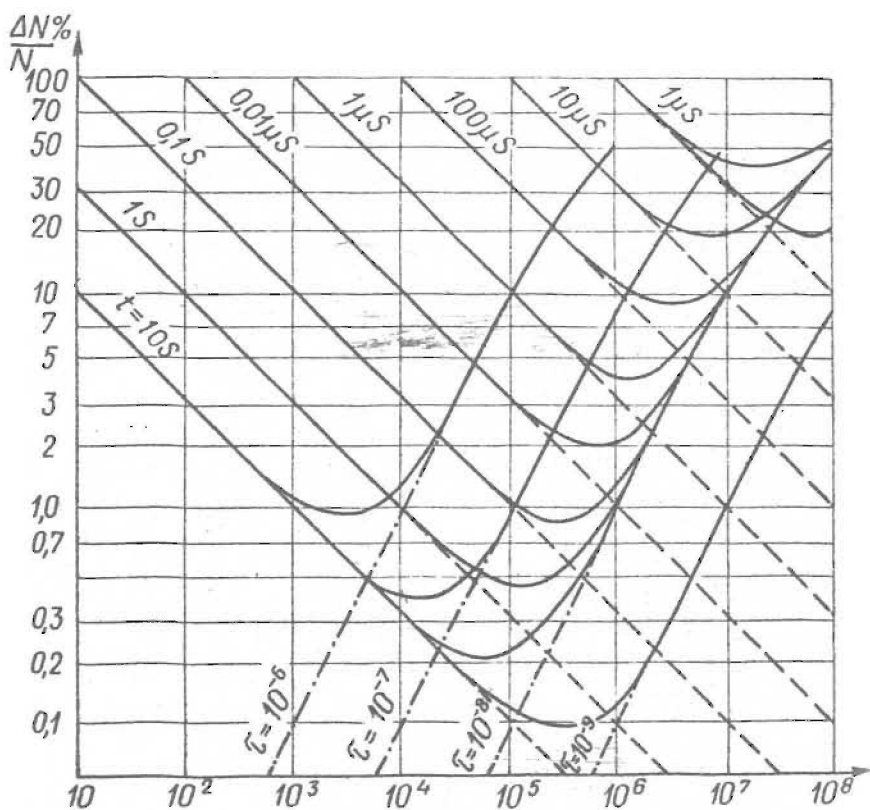
В видимой части спектра для распределения фотонов практически можно принять статистику Больцмана. Тогда среднеквадратичное отклонение $\Delta \bar{N}$ от величины \bar{N} составит [1, 5]

$$\Delta \bar{N} = (\bar{N})^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

Это ограничивает максимально достижимую точность измерений при малых скоростях счета. Среднеквадратичная погрешность измерений в процентах составит

$$\frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}} = (\bar{N})^{-\frac{1}{2}} \cdot 100 \% . \quad (9)$$

При больших скоростях счета наблюдается явление наложения



$$\text{---} \frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot 100\%$$

$$\text{- - -} \frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}} = \left(1 - \frac{1}{1 + tN}\right) \cdot 100\%$$

$$\text{—} \sum \frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}}$$

Рис.1.

импульсов, которое сказывается тем меньше, чем выше быстродействие измерительного тракта. Согласно расчету [22] наблюдаемая скорость счета импульсов N_H/t при статистическом процессе

$$N_H/t = \frac{N/t}{1 + \tau N/t}, \quad (10)$$

где N/t - истинная скорость счета,
 τ - мертвое время счетчика,
 t - время измерения в секундах.

Погрешность, вызванная наложением импульсов, выразится в виде:

$$\frac{\Delta N_H}{N} = \left(1 - \frac{t}{1 + \tau N/t}\right) \cdot 100 \% . \quad (11)$$

На рис. 1 в двойном логарифмическом масштабе прерывистыми линиями показана рассчитанная среднеквадратичная погрешность в зависимости от скорости счета при разных временах измерений. Пунктирно-прерывистыми линиями отражена расчетная погрешность, вызываемая наложением импульсов при больших скоростях счета для разных величин мертвых времен измерительного тракта. Сплошными линиями отражаются суммарные погрешности при разных временах измерений и для разных величин мертвых времен. На практике погрешность может быть больше, так как при расчете кривых не учтен ряд других источников погрешности. Из выражений (9) и (11) следует, что для достижения максимальной точности и расширения динамического диапазона измерений необходимо стремиться к увеличению быстродействия измерительного тракта. Это наглядно иллюстрируется рис. 1.

На основании вышеизложенного можно сформулировать основные требования к ФЭУ и измерительному тракту. Для работы

следует выбирать такой ФЭУ, который имеет:

- а) максимальный квантовый выход в требуемом спектральном диапазоне;
- б) минимальную по возможности площадь фотокатода;
- в) высокоэффективный первый диод;
- г) хорошее временное разрешение, т.е. малый разброс времени пролета электронов;
- д) плато в счетной характеристике.

Из отечественных ФЭУ для этих целей подходят умножители типа ФЭУ-64, имеющие фотокатод диаметром 5 мм, разрешающее время порядка 5-6 нсек [2] и плато на счетной характеристике [9, 23]. К измерительному тракту предъявляются строгие требования по быстродействию, помехоустойчивости и по стабильности работы.

Общезвестны два пути осуществления метода СИ:

- а) счет выходных импульсов ФЭУ за определенное время,
 $t = \text{const}$;
- б) измерение времени прихода определенного количества импульсов, $N = \text{const}$.

Преимущества первого пути выражаются в широком диапазоне измерений и в жесткости цикла работы. Второй путь характеризуется постоянной точностью, так как в широких пределах, до того, пока погрешность в основном определяется выражением (9), все измерения ведутся с постоянной точностью.

Работа счетчика фотонов

В настоящее время разработан и изготовлен экспериментальный образец счетчика фотонов (СчФ) для работы в автоматизированной научно-исследовательской системе. Структурная схема СчФ изображена на рис. 2.

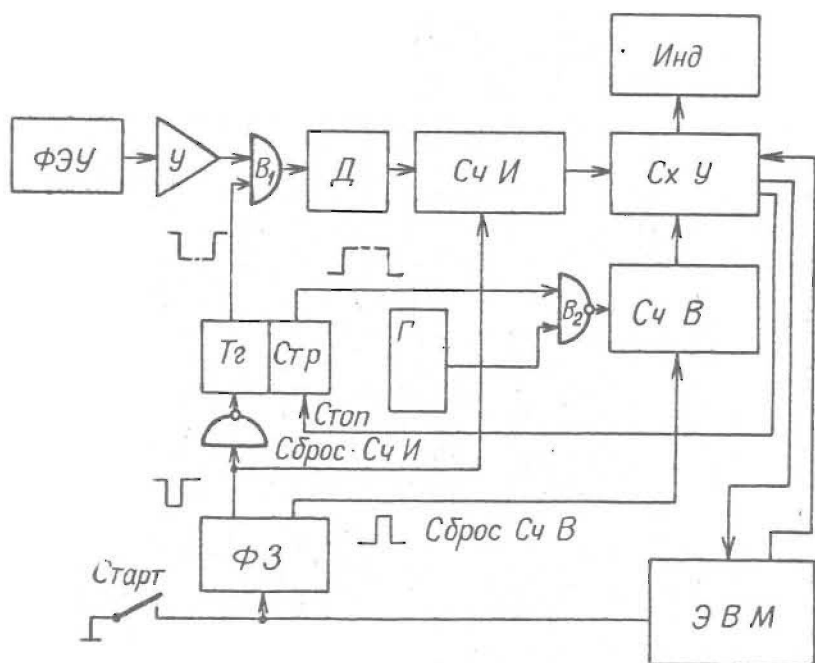


Рис. 2.

Рассмотрим работу прибора. Нажатием клавиша "Старт" либо подачей стартового импульса определенной длительности от ЭВМ срабатывает формирователь запуска (ФЗ) и выдает импульс сброса счетчика времени (СчВ) положительной полярности и импульс сброса счетчика фотоэлектронных импульсов (СчИ) отрицательной полярности, устанавливающие оба счетчика в исходное положение. Одновременно импульс сброса СчИ поступает через инвертор на триггер стробирования (ТрСтр) и перебрасывает его в состояние "I". ТрСтр открывает вентили B_1 и B_2 , и счетчик фотонов начинает цикл измерения.

Импульсы с анода ФЭУ, усиленные широкополосным усилителем (У), через открытый клапан B_1 поступают на дискриминатор (Д). Импульсы, амплитуда которых превышает установленный дискриминатором уровень, нормируются и регистрируются СчИ. Импульсы от кварцевого генератора (Г) частотой 150 кгц через клапан B_2 поступают на СчВ. Выходы триггеров обоих счетчиков подсоединены к схеме управления (СхУ), которая в соответствии с включенным режимом измерения подключает выходы одного счетчика к усилителям индикации и к выходам на ЭВМ, а выходы второго счетчика — к дешифратору. По истечении заданного времени при включенном $t = const$ или после прихода заданного количества импульсов при $N = const$ дешифратор вырабатывает сигнал останова — "стоп". Сигнал останова перебрасывает ТрСтр в исходное положение, и клапаны B_1 и B_2 закрываются. ТрСтр вырабатывает также сигнал "разрешение считать результат измерения для ЭВМ".

Устройство узлов

Формирователь запуска (рис.3) состоит из фильтра на транзисторе T_1 , RC — цепочки (R_4 и C_1) и стабилитрона D_1 . Схема дает сигнал на выходе только в том случае, если длительность входного сигнала больше времени заряда емкости C_1 через резистор R_4 до уровня стабилизации стабилитрона D_1 .

Фильтр высоких частот на входе ФЭ предотвращает многократное срабатывание формирователя запуска от дребезга контактов и запуск от импульсов помехи. Усиленный формирователем фронта (на T_2 и T_3) сигнал запускает мультивибратор T_4 — T_5 , который вырабатывает положительный импульс длительностью

2 мксек, обеспечивающий установку на "0" всех триггеров СчВ (рис.2). Одновременно сигнал поступает на базу транзистора T_6 , с коллектора которого снимается импульс отрицательной полярности, сбрасывающий на "0" триггеры СчИ и обеспечивающий установку ТрСтр в рабочее положение.

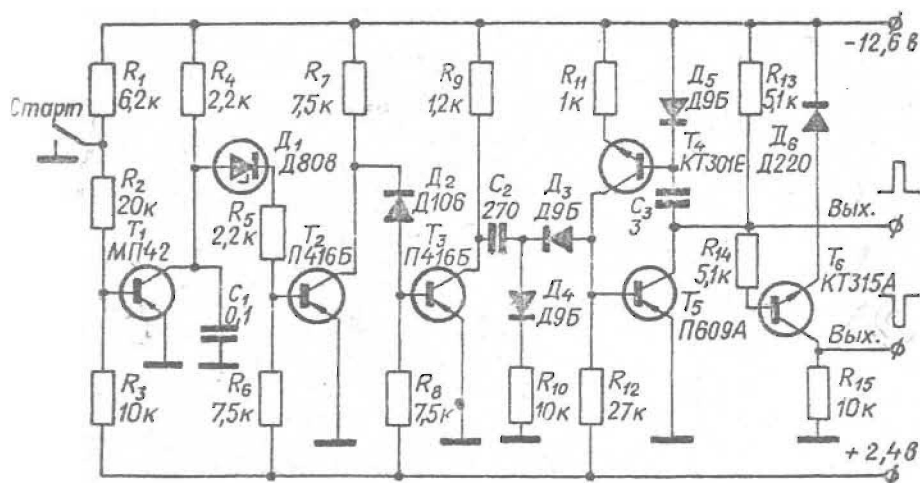


Рис. 3.

В качестве стробирующего использован ненасыщенный триггер на высокочастотных транзисторах типа П416Б. ТрСтр вырабатывает стробирующие импульсы: отрицательной полярности для схемы V_1 и положительной — для схемы V_2 .

Широкополосный усилитель обеспечивает усиление импульсов тока анода ФЭУ до уровня, необходимого для запуска схем на туннельных диодах. Анод ФЭУ через резистор R_2 (рис.4) подсоединен непосредственно к базе эмиттерного повторителя (ЭП). Для уменьшения влияния емкости эмиттерного перехода на входной сигнал применен составной ЭП на транзисторах T_1 и T_2 (рис.4). Резистор R_2 служит для предотвращения самовозождения ЭП [24]. Сигнал с ЭП поступает на двухкаскадный усилитель напряжения на T_3 и T_4 .

Формирователь импульсов счета подсоединен к усилителю через ЭП, обеспечивающий согласование выходного сопротивления усилителя с входным сопротивлением формирователя импуль-

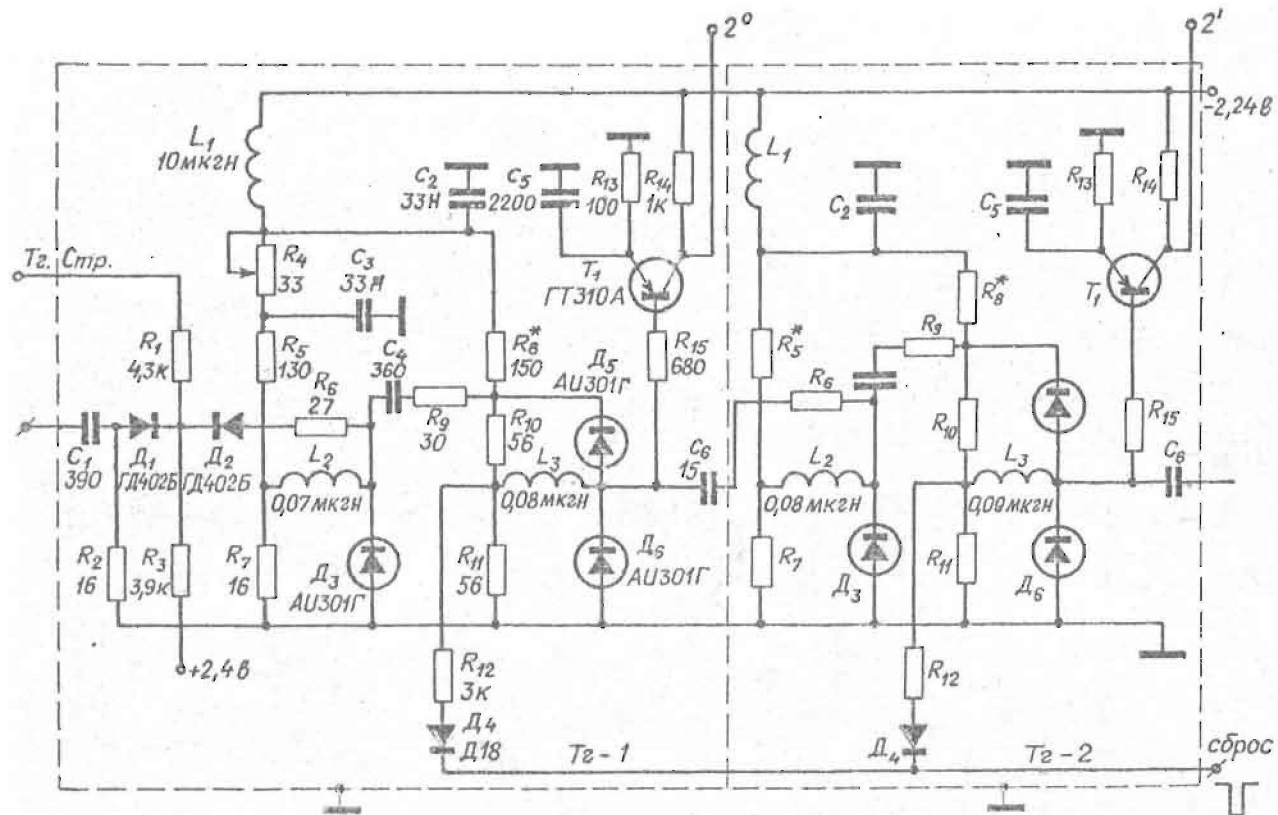


Рис. 5.

сов счета. В целях предотвращения нежелательных обратных связей все каскады усилителя экранированы между собой, а в цепи питания включены LC фильтры.

В качестве высокочастотного вентиля V_I служит диодный ключ на диодах D_1 , D_2 и резисторах R_1 , R_2 и R_3 (рис.5). Когда от ТрСтр подается нулевой потенциал, диоды D_1 и D_2 закрыты положительным потенциалом от источника напряжения смещения $+2,4$ в и импульсы на дискриминатор от усилителя не поступают. В режиме измерения ТрСтр вырабатывает отрицательное напряжение 10 в и D_1 и D_2 открываются током, протекающим через резистор R_1 . величиной тока, протекающего через диод D_1 , ограничивается максимальная амплитуда импульсов тока, поступающих на амплитудный дискриминатор.

Амплитудный дискриминатор построен в виде одновибратора на туннельном диоде (тд) D_3 (рис.5). Одновибратор одновременно является формирователем импульсов запуска первого триггера СЧИ. Изменением тока смещения одновибратора при помощи потенциометра R_4 осуществляется регулировка величины порога дискриминации. Одновибратор вырабатывает импульсы отрицательной полярности амплитудой до 0,5 в и длительностью ~ 2 нсек, необходимые для запуска пересчетного триггера на двух тд.

Счетчик фотоэлектронных импульсов разработан на т.д. За основу принята известная пересчетная схема с двумя последовательно включенными т.д. [25-28] D_5 и D_6 (см.рис.5). Счетные триггеры такого типа имеют хорошее быстродействие, запускаются однополярными импульсами и стабильны в работе. Но они требуют сравнительно мощные импульсы запуска и чувствительны к нагрузке. Поэтому для каскадирования счетчика требуются межкаскадные формирователи-усилители сигнала. В качестве таких нормирующих формирователей сигнала между каскадами счетчика применены одновибраторы на т.д. Таким образом каждый каскад счетчика состоит из одновибратора на т.д. D_3 и собственно счетного триггера на D_5 и D_6 (рис.5).

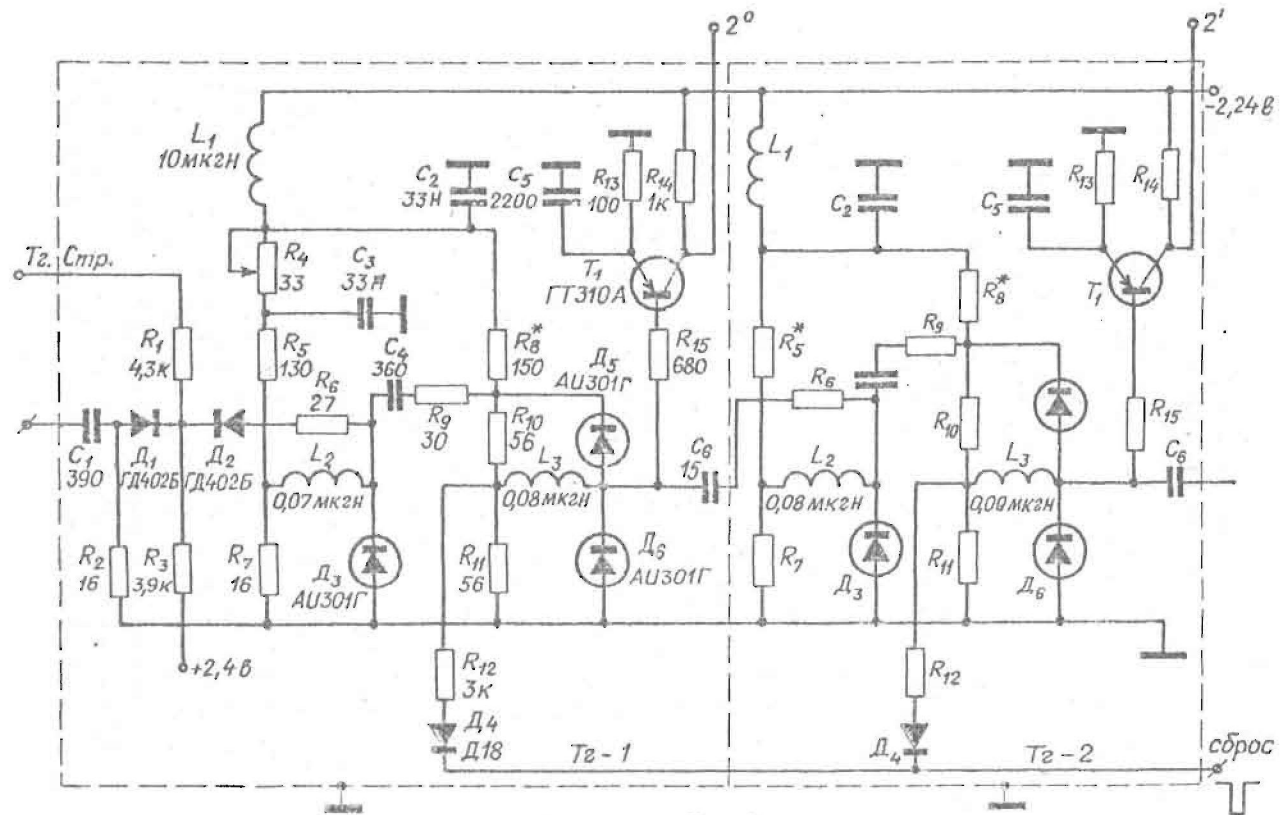


Рис. 5.

Для снятия информации о состоянии счетного триггера к его выходу через резистор R_{15} подключается транзисторный усилитель-инвертор T_1 . Этим достигается развязка счетной схемы от схем индикации и дешифратора. Сбрасывание триггеров счетчика в исходное положение осуществляется подачей импульса тока отрицательной полярности, длительностью

2 мксек на запоминающую индуктивность L_3 через резистивно-диодную цепочку $D_4 R_{12}$. Диод D_4 служит для предотвращения влияния одного триггера на другой через цепи сброса. Паразитные связи каскадов счетчика через цепи питания подавляются LC фильтром на каждом каскаде.

В целях уменьшения влияния паразитных емкостей соединительных проводов и монтажа широкополосный усилитель $У$, высокочастотный вентиль B_T , амплитудный дискриминатор D_T , двоичный счетчик фотоэлектронных импульсов и стробирующий триггер смонтированы непосредственно в коробке ФЭУ. Для этих же целей применена межкаскадная экранизация.

Схема управления обеспечивает проведение цикла измерений, заданного от руки или от ЭВМ, индикацию и вывод на регистрирующий прибор результата измерений, данных о режиме, и диапазоне измерений, получение признака переполнения любого из счетчиков и сигнала об окончании измерения — "разрешение считать". Схема управления построена на транзисторах.

Счетчик времени построен в виде двадцатиодноразрядного двоичного счетчика на насыщенных триггерах. СЧВ при входном сигнале от кварцевого генератора частотой 150 кгц обеспечивает выдачу временных интервалов длительностью 0,03; 0,1; 0,3; 1, 3 или 10 сек и измерение времени прихода выбранного числа фотонов до 13,98 сек.

Технические данные построенного счетчика фотонов

1. Разрешающее время счетчика не менее 10 нсек.
2. Режимы измерений:

- а) счет фотонов в течение определенного времени - 0,03; 0,1; 0,3; 1; 3 или 10 сек;
- б) измерение временных интервалов, в течение которых происходит определенное количество фотоэлектронов, равное 2^5 ; 2^7 ; 2^{10} ; 2^{13} ; 2^{16} или 2^{19} .

3. Максимальное количество регистрируемых импульсов в первом режиме измерения равно $2^{19}-1$, т.е. 524287.

4. Максимальное измеряемое время во втором режиме 13,98 сек.

5. Представление результата измерения в двоичном коде. Информация о включенном диапазоне и режиме работы, а также признаки о переполнении любого счетчика и разрешение считывать показания выдаются на ЭВМ или регистрирующий прибор в положительной логике и индицируются на передней панели блока логики.

6. Выходные уровни: $-0,3$ в и -18 в $\pm 10\%$.

7. Управление прибором : выбор режима работы, диапазона и запуск от руки или от ЭВМ. Предусмотрена блокировка, предотвращающая одновременной подачи команд от руки и от ЭВМ.

8. Питание ФЭУ осуществляется от стабилизированного выпрямителя ВС-22. Питание счетчика от сети 50 гц, 220 в $\pm 10\%$, потребляемая мощность 40 ва.

Конструктивно счетчик фотонов состоит из:

- а) держателя ФЭУ, в расширенной части которого смонтированы широкополосный усилитель(У), высокочастотный вентиль V_1 , дискриминатор(Д), счетчик фотоэлектронных импульсов (СЧИ) и стробирующий триггер(ТрСтр);
- б) блока логики, в котором смонтированы остальные узлы счетчика;
- в) стабилизированного выпрямителя ВС-22.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Topp J.A., Schrötter H.W., Hacker H., Brandmüller J.
Improvement of the signal-to-noise ratio of photomultipliers for very weak signals.-
Rev.Scient.Instrum., 40, N 9, 1164, 1969.
2. Горохов Ю.В., Девятков М.Н., Овчинников Г.И. Модуляционный приемник слабого светового излучения, основанный на дискретном счете фотонов.-ПТЭ, 1968, № 5, 171.
3. Ковалсва Т.А., Меламид А.Е., Перцев А.Н., Писаревский А.Н. Шумы фотоэлектронных умножителей.-ПТЭ, 1966, № 5, 5.
4. Пиетри, Нусли. Конструктивные особенности и характеристики современных фотоэлектронных умножителей. (Сокращенный перевод) -Зарубежная радиоэлектроника, 1969, № 8, 82.
5. Morton G.A. Photon counting.-Appl. Optics, 7, N 1, 1, 1968.
6. Morton G.A., Smith H.M., Jr, Krall H.R.-IEEE Trans. Nucl. Sci., 1969, N 1, 92.
Характеристики фотоумножителей с высокоэффективным первым диодом. (Русский перевод.Э.И.Электроника, 1969, вып. 22, 27).
7. Лимеж Г.К. Отношение сигнал/шум фотоэлектронных умножителей в зависимости от режима питания. (См.настоящий сборник).
8. Hathaway D.E.G., Bull C.S. Conf.Phys.Aspects Noise Electron Devices, Nottingham, 1968, 232.
9. Поляков Г.И., Попов А.И., Фогель Я.М. Характеристики фотоумножителей для измерения слабых световых потоков.-ПТЭ, 1965, № 5, 198.

10. Верховцева Э.Т., Полякова Г.Н., Попов Б.И. Приемно-усилительное устройство вакуумного монохроматора СП-68 для измерения слабых световых потоков. *Опт. М. Пром.*, 1969, № 3, 43.
11. Берембойм Г.М., Доменский А.М., Соломатин В.В. Характеристики охлажденных фотоэлектронных умножителей типа ФЭУ-39 и ФЭУ-46А. *ИТЭ*, 1966, № 2, 129.
12. Соболева Н.А., Берковский А.Г., Чечик Н.Р., Елисеев Р.Е. Фотоэлектронные приборы, "Наука", М., 1965.
13. Nakamura J.K., Schwarz S.E. Synchronous detection vs pulse counting for sensitive photomultiplier detection systems.—*Appl. Optics*, 7, N 6, 1073, 1968.
14. Young A.T. Photometric error analysis. IX Optimum use of photomultipliers.—*Appl. Optics.*, 8, N 12, 2431, 1969.
15. Перцев А.Н., Подольный Э.И., Селянинов Ю.Е. Регистрация сверхслабых световых потоков в диапазоне 200 → 850 нм.—*Ж. прикл. спектроскопии*, 1970, № 3, 523.
16. Яценко В.И., Борисов И.М., Шиян В.Я. Измерение лучистых потоков в режиме счета многоэлектронных импульсов. *Сб. Спектроскопия атомов и молекул. "Наукова думка", Киев, 1969, 211.*
17. Rolfe J., Moov S.E. The efficient use of photomultiplier tubes for recording spectra.—*Appl. Optics*, 9, N 1, 63, 1970.
18. Schneider R.H., Kirk W.P., Steiner J.F. Jr., and Rechen H.J.L. Photon counter for the Measurement of thermoluminescence.—*Rev. Scient. Instrum.*, 39, N 9, 1369, 1968.

19. Tulf Robert G. A comparison of photon counting and current measuring techniques in spectrophotometry of faint sources.-Appl.Optics, Z, N 10, 2023, 1968.
20. Hartwing M. Nachwirkende Dunkelemission in Photovervielfachern.-Monatsher. Dtsch. Akad.Wiss. Berlin, 10, N 1, 33, 1968.
21. Резников И.В., Шушкевич С.С. Исследование фотоумножителей, работающих в одноэлектронном режиме.- ПТЭ, 1968, № 6, 167.
22. Elmore W.C. Statistics of counting. Nucleonics, 6, N 1, 26, 1950.
23. Черцев А.И., Резников И.В., Михалевич И.И. Об одноэлектронных характеристиках ФЭУ-64.- ПТЭ, 1970, № 1, 175.
24. Дубровский И.А., Широкополосные и импульсные транзисторные усилители наносекундного диапазона.- ПТЭ, 1966, № 2, 5.
25. Чжоу В.Ф. Принципы построения схем на туннельных диодах. "Мир", М., 1966.
26. Иванов А.А. Преобразователь "время-цифровой код" наносекундного диапазона.- ПТЭ, 1966, № 1, III.
27. Лачинов В.М. Быстродействующая пересчетная декада со скоростью счета свыше 200 Мгц.- ПТЭ, 1966, № 5, 105.
28. Вовченко В.Г., Мелезняков В.М. Быстродействующая пересчетная схема на ТД и транзисторах.- ПТЭ, 1968, № 4, 93.

ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМА ПИТАНИЯ

При измерении и регистрации слабых световых потоков в качестве светоприемников, как правило, служат фотоэлектронные умножители (ФЭУ), параметры которых определяют возможности светоизмерительных устройств.

Одним из наиболее существенных параметров ФЭУ является величина темнового тока и связанные с ней флуктуации, ограничивающие возможности регистрации слабых световых потоков /1,2/. Величина темнового тока, кроме других факторов, зависит от интенсивности и конфигурации электрических полей между катодом, фокусирующим электродом и первыми динодами /3 - 5/. От тех же полей зависит также эффективность сбора фотоэлектронов. Исходя из вышесказанного, критерием наиболее выгоднейшего распределения потенциалов между катодом, фокусирующим электродом (экраном) и первыми динодами следует принять не величину темнового тока или анодную чувствительность, а максимальное отношение фототок/темновой ток при постоянном падающем световом потоке и напряжении питания ФЭУ, т.е. отношение U_{Φ}/U_T , где U_{Φ} - напряжение, создаваемое фототоком на анодной нагрузке; U_T - напряжение, создаваемое темновым током.

В ходе работ были исследованы ФЭУ типа ФЭУ-64 и ФЭУ производства фирмы "Карл Цейсс", Йена, типов S12FS35 и M12FQS35. На рис. I показано отношение U_{Φ}/U_T в зависимости от величины сопротивления резистора R_1 делителя (см. рис. 2) для ФЭУ-64 № 53 при разных величинах сопротивления резистора R_3 ; напряжение питания U_K равно 1000 В, световой поток постоянный во времени, $R_a = R = 100$ ком и $R_2 = 2R - R_1$. Способ регулировки $R_2 = 2R - R_1$ заимствован из рекомендаций фирмы "Карл Цейсс", Йена, для ФЭУ типов S12FS35 и M12FQS35. Независимая регулировка R_1 ,

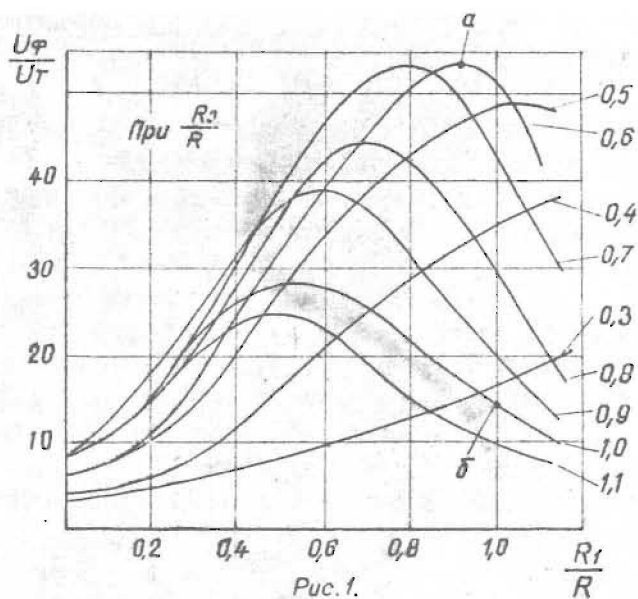


Рис. 1.

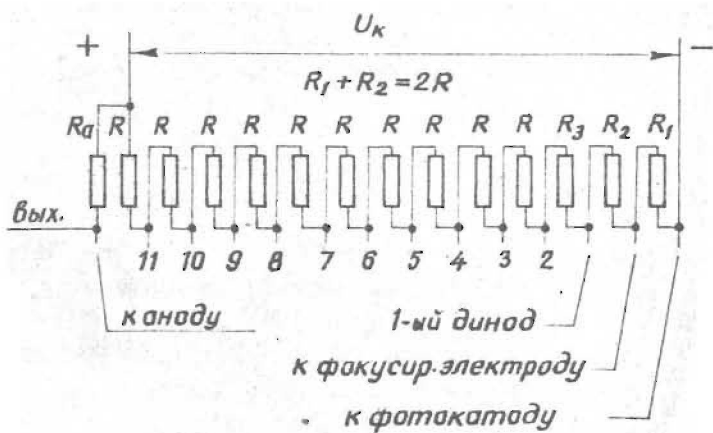


Рис. 2.

и R_2 для ФЭУ-64 позволяет в некоторых случаях увеличить отношение U_{Φ}/U_T на несколько десятков процентов.

Измерительная информация получена методом последовательного измерения U_{Φ} и U_T для каждой величины R_1 , R_2 и R_3 интегрирующим цифровым вольтметром с входным сопротивлением 50 Ом и разрешающей способностью 10 мкВ. Освещение фотокатода регулировалось путем введения нейтральных светофильтров с расчетом, чтобы величина анодного тока освещенного ФЭУ находилась в пределах от 0,1 до 1 мкА. Зависимость U_{Φ}/U_T имеет явно выраженный максимум при

$R_1 = (0,8 - 0,9) R$; $R_2 = (1,1 - 1,2) R$ и $R_3 = (0,6 - 0,7) R$ (см. рис. 1, точка А). Величина U_{Φ}/U_T при тех же условиях с равномерным (рекомендуемым в паспорте ФЭУ-64) делителем почти в четыре раза меньше максимального (рис. 1, точка Б). Подобная картина сохраняется и при других величинах напряжения питания данного ФЭУ. Эта зависимость является более или менее индивидуальной для каждого ФЭУ данного типа. Так, например, для ФЭУ-64 № 773 оптимальным является делитель с $R_1 = 0,6 R$; $R_2 = (1 - 1,1) R$ и $R_3 = 0,8 R$. Увеличение отношения U_{Φ}/U_T для ФЭУ № 773 с вышеуказанным делителем, по сравнению с равномерным, значительно меньше, чем у ФЭУ № 53 и составляет 1,3 - 2 раза.

Если на оси абсцисс отложить напряжение питания ФЭУ - U_K , а на оси ординат - относительные величины сопротивлений резисторов R_1/R (рис. 3, кривая 1), при $R_2 = 2R - R_1$ и R_3/R (рис. 3, кривая 2), при которых достигается максимальное отношение U_{Φ}/U_T , то видно, что каждой величине U_K соответствуют свои оптимальные величины сопротивлений резисторов R_1 , $R_2 = 2R - R_1$ и R_3 . В случае применения независимой регулировки R_1 и R_2 получим другие оптимальные величины сопротивлений резисторов R_1 и R_2 , характеризуемые кривыми 3 (рис. 3) для R_1 и кривыми 4 (рис. 3) для R_2 .

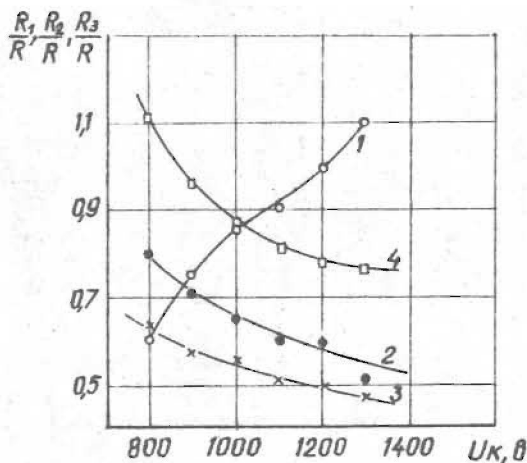


Рис.3.

На рис.4 отражена зависимость приведенного отношения U_{Φ}/U_T фотоумножителя ФЭУ-64 № 53 от напряжения питания. Кривая 1 соответствует стандартному делителю, рекомендуемому в паспорте прибора. Кривая 2 отражает эту же зависимость в случае делителя, являющегося оптимальным при напряжении питания от 1000 до 1100 вольт (рис.3). Кривая 3 (рис.4) отражает зависимость от напряжения питания максимального отношения U_{Φ}/U_T , достигаемого подбором делителя в каждой точке измерений. Из сопоставления кривых на рис.4 видно, что существует возможность выбрать такой делитель, при котором отношение U_{Φ}/U_T в несколько раз

лучше, чем при равномерном делителе во всем диапазоне изменений напряжений питания и только в отдельных районах незначительно (не более 30–40%) ниже оптимального. Кривые на рис. 4 построены с учетом коэффициента ослабления нейтральных светофильтров, введенных при увеличении анодной чувствительности с повышением напряжения питания.

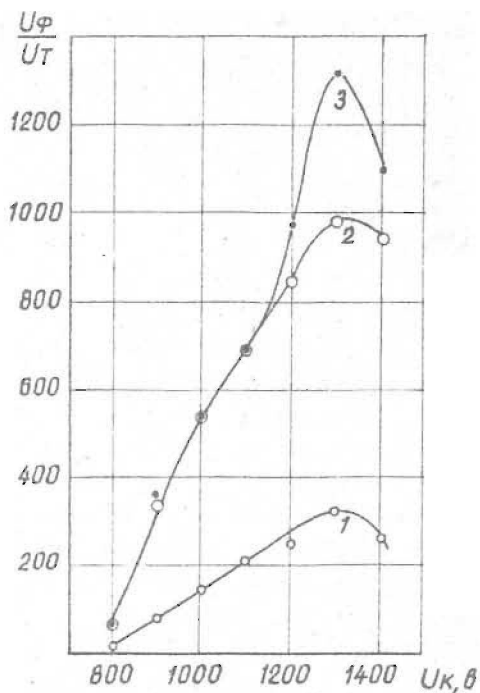


Рис. 4.

Зависимость отклонения U_f/U_t от напряжения питания (рис. 4) показывает, что не всегда целесообразно стремиться к увеличению анодной чувствительности ФЭУ путем повышения напряжения питания. В данном случае для ФЭУ-64 № 53

при напряжениях U_k больше 1300 в величина U_{ϕ}/U_T начинает резко уменьшаться вследствие стремительно возрастающего темнового тока.

У ФЭУ производства фирмы "Карл Цейсс", Иена типа S 12 FS 35 и M12FQS35 зависимость U_{ϕ}/U_T от величины сопротивлений резисторов делителя R_1 , R_2 и R_3 , также имеет ярко выраженный максимум, превышающий данное отношение для равномерного делителя в 3-4 раза, но соответствующие значения $R_1 = (0,3 - 0,4) R$; $R_2 = (1,6 - 1,7) R$ и $R_3 = (0,3 - 0,4) R$ отличаются от оптимальных значений резисторов для ФЭУ-64.

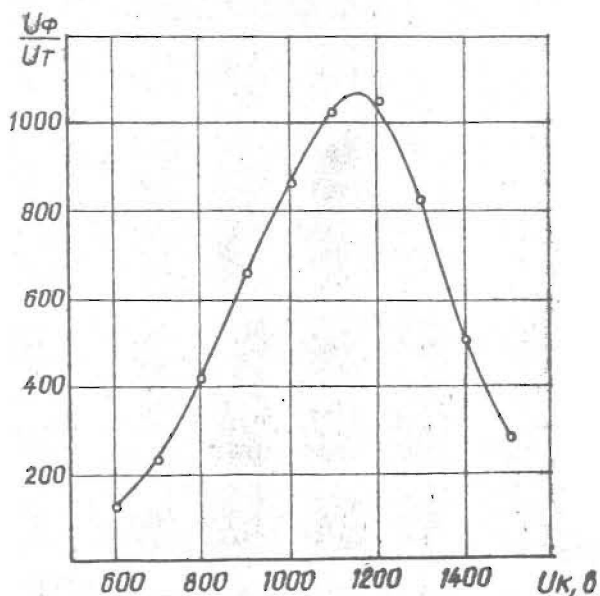


Рис. 5.

Отношение U_{ϕ}/U_T у этих ФЭУ также имеет отчетливо выраженный максимум в зависимости от напряжения питания

(рис.5). Для ФЭУ типа S12FS35 этот максимум имеется при $U_k = 1100 - 1200$ в.

Выводы:

1. Разрешающую способность ФЭУ, т.е. отношение U_{Φ}/U_T можно значительно увеличить путем экспериментального подбора потенциалов (подбора величин сопротивлений резисторов делителя) на фокусирующем электроде и на первых динодах. У ФЭУ фирмы "Карл Цейсс", Иена типа S12FS35 и M12FQS35 такой подбор рекомендуется по паспорту прибора.

2. Каждый ФЭУ является более или менее индивидуальным прибором и, следовательно, для максимального использования возможностей ФЭУ требуется индивидуальный подбор режима работы каждого прибора.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Н.А.Соболева, А.Г.Берковский, Н.О.Чечик, Е.Р.Елисеев. Фотоэлектронные приборы. Изд. "Наука", М., 1965.
2. G.Pietri, J.Nussli. Design and characteristics of present-day photomultipliers. Philips Technical Review, 1968, 29, Nr. 8/9, 267-287.
Сокращенный перевод. Зарубежная радиоэлектроника, № 8, 82-104, 1969.
3. H.Paul. Reduction of Noise in the 6342A Photomultiplier. Rev.Sci.Instr., 33, Nr.8, 881-882, 1962. Перевод. Приборы для научного эксперимента. № 8, 83-84, 1962.
4. Н.В.Дунаевская, Л.Д.Сотин, Г.Ф.Юшкевич. Оптимальный спектрометрический режим ФЭУ с жалюзной динодной системой, ПТЭ, № 1, 198-199, 1966.
5. Louis Lavoie. Photomultiplier Focus Control. Rev. Sci.Instr., 40, 1245-1246, 1969.
Перевод. Приборы для научного эксперимента, № 9, 114-116, 1969.

112

Я.Я.Страумен, О.Э.Аболиньш, А.Я.Аберс

СТЕНД ЭКСПЕРИМЕНТА

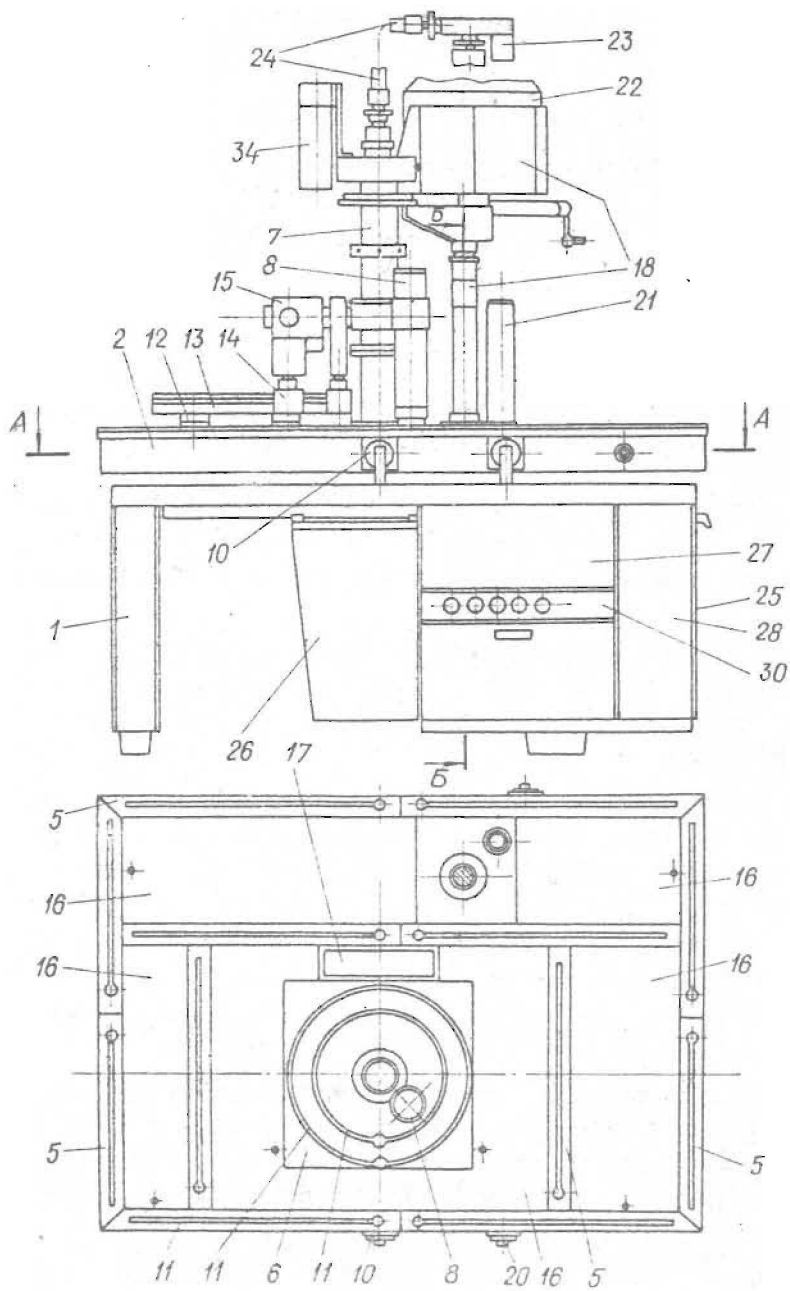
Основу каждого рабочего места для оптических исследований составляет криостатный стол (рис.1) - основной агрегат, на котором монтируются оптико-механические узлы научно-исследовательских систем. Стол имеет станину 1 и верхнюю плиту 2, которые с целью предотвращения передачи вибраций здания на исследовательские приборы соединены между собой четырьмя амортизаторами 3. Каркас 4 верхней плиты сварной и имеет шлифованные накладки 5 и 6, которые образуют опорную поверхность для установки приборов.

Сверху накладки 6 крепится корпус криостата 7 и корпус рентгеновской лампы 8, снизу программный вентиль 9 и диффузионный насос фирмы Карл Цейсс, Иена. Вентиль 9 управляется рукояткой 10.

Накладки 5 и 6 имеют Т-образные пазы 11 для крепления подставок 12 с шинами 13 и рейтерами 14 приборов 15. Такая конструкция крепления позволяет собирать разнообразные комбинации приборов (оптические каналы) на столе и ориентировать их в необходимых направлениях относительно криостата 7.

Промежутки между накладками 5 и 6 закрыты легкоъемными щитами 16, в середине плиты 2 стола оставлен люк 17 для вывода кабелей к приборам, расположенным на столе.

К верхней плите 2 стола крепится подъемник 18 криостата 7, редуктор 19 подъемника, приводные рукоятки 20 и патрубок 21 для кабелей, идущих от криостата. На подъемнике 18 установлен 15-литровый сосуд Дьюара 22 с питателем 23 и азотопроводом 24.



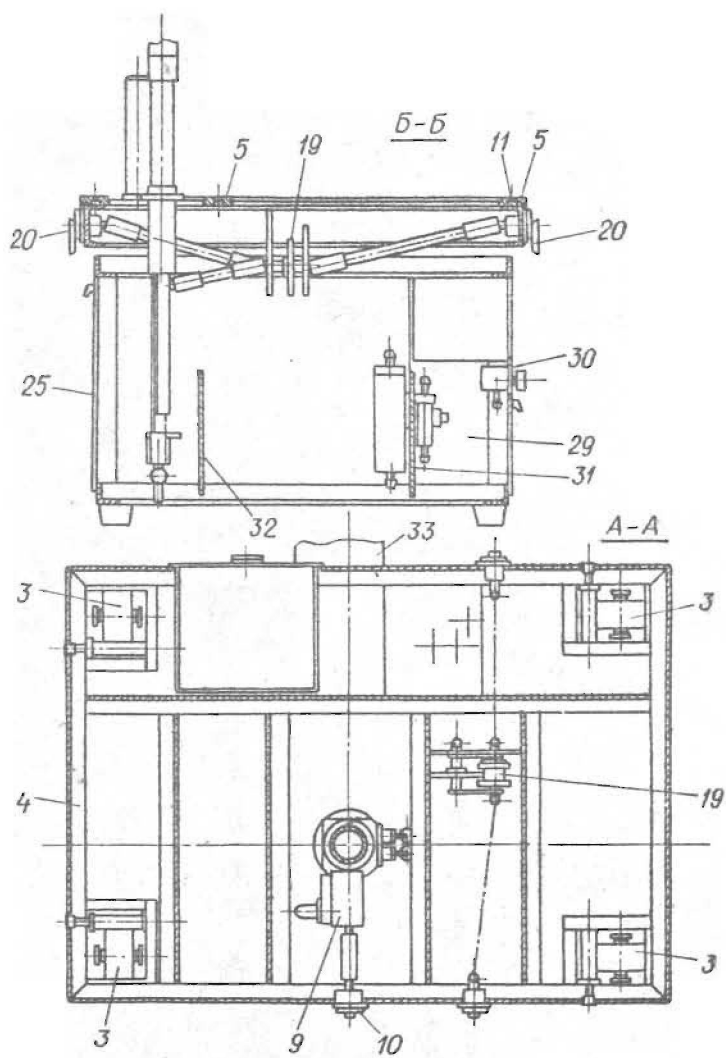


Рис. 1.

Станина I стола сварной конструкции обшита легкоъемными щитами 25 и отодвигаемым кожухом 26 для доступа к диффузионному насосу. В станине вмонтирован вакуумметр 27 (ВИТ-1А-П), панель управления 28 насосами, электрощит 29, панель водяных вентилях 30, щит 31 датчиков потока воды с дросселями, фильтром и сборником воды и щит 32 штепсельных разъемов для присоединения приборов, установленных на столе к измерительной и управляющей аппаратуре.

Станина I стола имеет откидную ступеньку 33 для облегчения доступа к питателю 23 и к азотопроводу 24; к криостату крепится сосуд 34 для опорных концов термонар.

Конструкция крепления приборов на столе криостата показана на рис. 2.

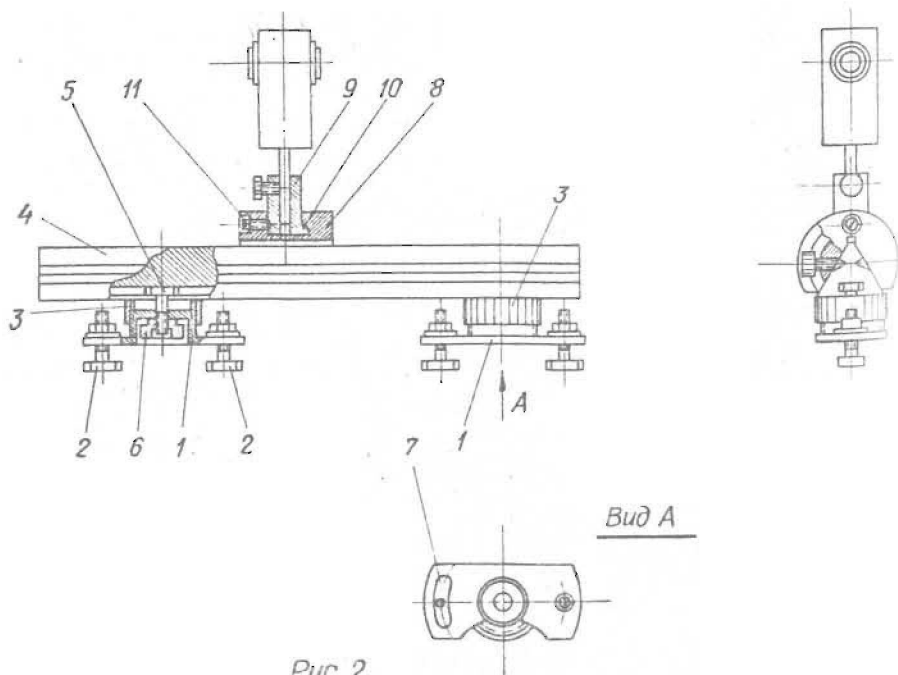


Рис. 2.

Подставка I крепится двумя болтами 2 к накладке стола, на верхнем конце подставки I навинчена гайка 3, на которой лежит шина 4, последняя крепится к подставке болтом 5 и гайкой 6. Для юстировки шины 4 в горизонтальной плоскости одно отверстие 7 в подставке I продолговатое, для юстировки по вертикали используется гайка 3. На шине 4 прибор устанавливается при помощи рейтера 8 (некоторые приборы крепятся корпусом на шину). Перемещая вставку 9 рейтера 8 в кольцевой канавке 10 при освобожденном винте 11, можно юстировать установленный в рейтере 8 прибор в плоскости, перпендикулярной продольной оси шины 4.

Конструкция амортизаторов, соединяющих станину стола с верхней плитой, показана на рис. 3.

Здание чаще всего имеет частоту собственных колебаний $f = 15$ гц; это обусловлено в основном допустимыми прогибами несущих строительных конструкций. Если амортизирующее устройство имеет частоту собственных колебаний f_0 , то амплитуды внешних сотрясений, ослабленные пропорционально отношению f_0^2/f^2 , передаются подвешенному телу. В конкретном случае конструкция амортизатора позволяет получить ослабление колебаний до $1+2\%$ при f_0 , равном $1+2$ гц.

Рама I амортизатора крепится к верхней плите стола. К раме закреплен один конец резиновой ленты 2, которая перекинута через ролик 3, укрепленный на станине стола; другой конец ленты крепится к натяжному ролику 4, огибаая ролик 5 снизу. Храповое колесо 6 свободно сидит на оси 7, имеющей резьбу и прижато торцевой поверхностью к торцу ролика 4.

Собачка 8 с пружиной 9 удерживает храповое колесо 6 от поворота против часовой стрелки. Шаг резьбы оси 7 выбран так, чтобы силы трения не позволяли повернуться натяжному ролику 4 относительно храпового колеса 6. Для натяжения ленты 2 необходимо поворачивать ключом ось 7 по часовой стрелке; собачка 8 перескакивает по зубцам храпового колеса 6 и фиксирует его в выбранном положении. Освобождение натяжения ленты 2 производится поворотом оси 7 в противоположное направление;

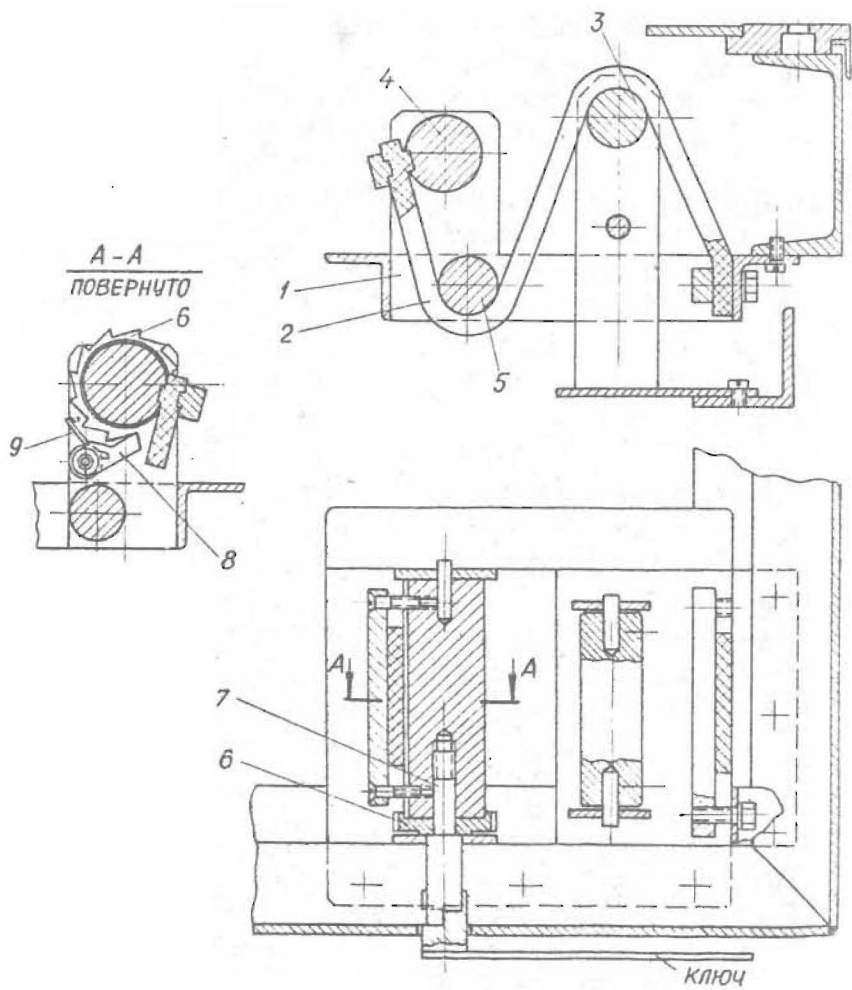


Рис. 3.

при этом ролик 4 проскальзывает относительно зафиксированного храпового колеса 6 и, приставленный к оси, 7 стопорится силами трения, возникающими между торцевыми поверхностями ролика 4 и храпового колеса 6 от стягивания винтовой пары ролик 4 - ось 7.

Подъем криостата, достигающего веса до 10 кг и находящегося в средней части стола, без помощи подъемного механизма весьма неудобен. Подъемный механизм необходим и во время монтажа образцов на криостате, когда последний необходимо жестко удерживать в удобном для работы положении. В данном случае применяется п о д ъ е м н ы й м е х а н и з м, показанный на рис. 4.

Криостат I крепится на держателе 2, связанном с колонкой 3, установленной в направляющих 4 и имеющей две продольные шпоночные канавки 5. Колонку 3 от поворота удерживает шпонка 6. В поднятом положении колонку 3 можно повернуть до входа шпонки 6 в другую канавку. В нижнем конце на цапфе колонки свободно насажена втулка 7, прикрепленная к втулочно-роликовой цепи 8, которая приводится звездочкой 9 от редуктора подъемника и натягивается другой звездочкой 10, закрепленной на держателе II.

На верхнем конце колонки 3 закреплена полка 12 для 15-литрового сосуда Дьюара и опрокидывающий механизм 13 криостата, состоящий из барабана 14 роликовой цепи 15, гайки 16, направляемой гильзой 17 и шпонкой 18, винта 19, подшипниковой втулки 20 и рукоятки 21.

Для фиксации положения опрокидывающего механизма имеется фиксатор 22. Положение криостата по высоте регулируется при помощи гайки 23 и контргайки 24. Имеется также опора 25 для азотопровода.

Колонку 3, поднятую в верхнее положение, поворачивают до захода шпонки 6 в другую канавку 5, после чего колонку можно опустить. При этом криостат окажется за пределами поверхности криостатного стола. Для более удобного обслужи-

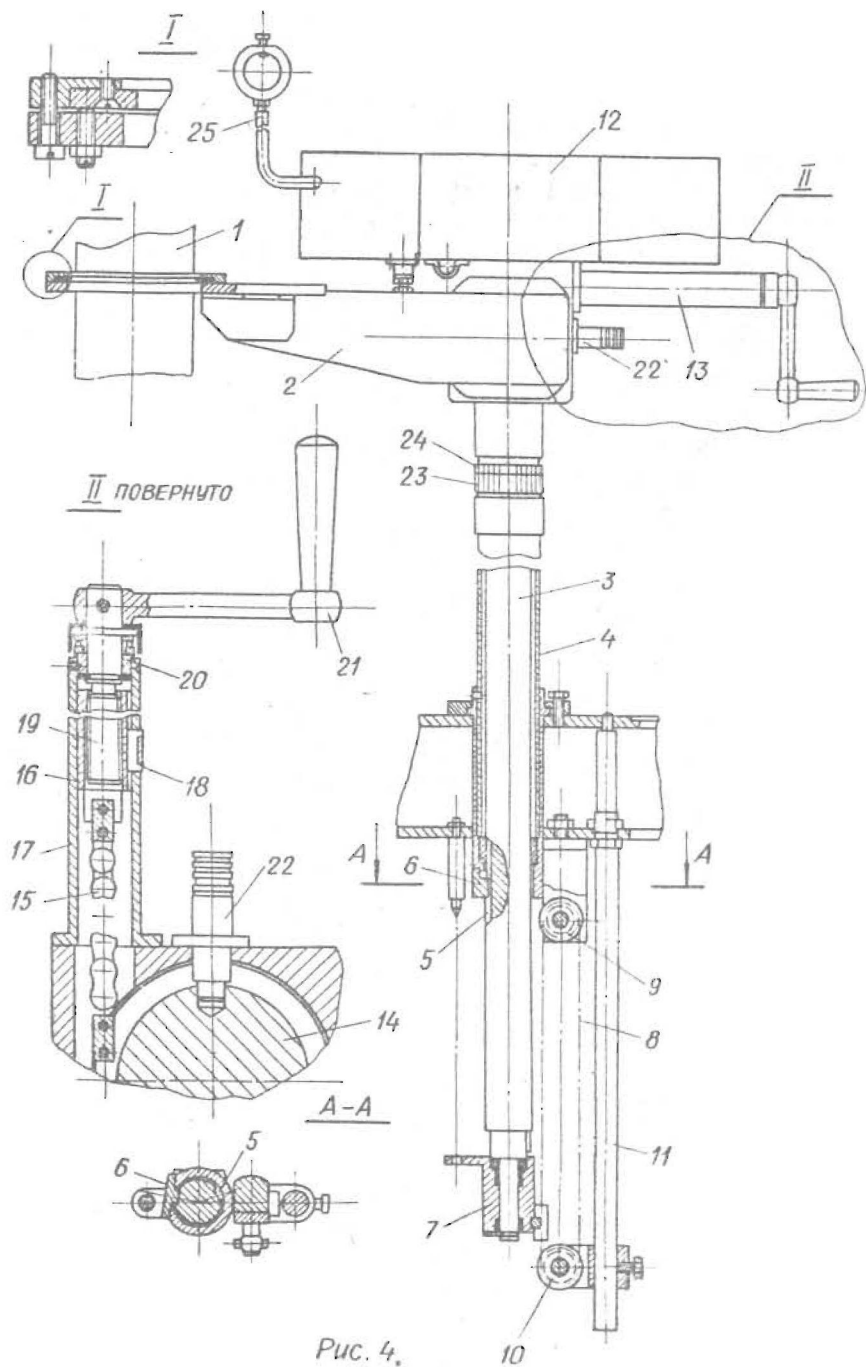


Рис. 4.

вания криостат I можно поворачивать до горизонтального положения его продольной оси. Это достигается вращением рукоятки 2I при освобожденном фиксаторе 22. Криостат I можно также поворачивать относительно держателя 2 вокруг его продольной оси.

С целью уменьшения необходимого для подъема криостата момента на рукоятке подъемника, а также для фиксации положения предусмотрен р е д у к т о р с храповым механизмом и винтовым тормозом, показанный на рис. 5. Редуктор монтируется в корпусе I, состоящем из двух плит 2 и 3 и дистанцеров 4. Ведущий валик 5 имеет участок 6 с резьбой, на которой навинчена шестерня 7 и буртик 8, к которому прикреплен диск трения 9. Между диском 9 и диском 10, прикрепленном к шестерне 7, на валике 5 свободно сидит храповое колесо II.

К другому концу шестерни 7 прикреплен диск 12 с четырьмя продольными пазами 13. Диск 12 находится внутри чашки 14, закрепленной на валике 5 штифтом 15 и винтом 16. Чашка 14 имеет пять радиальных резьбовых отверстий 17, в одно из которых ввинчен резьбовой штифт 18 и укреплен контргайкой 19. На другом конце валика 5, аналогично чашке 14, крепится шарообразная головка 20 карданного шарнира.

На плите 2 крепится собачка и пружина собачки 22. Ведомый вал 23 имеет буртик 24, и к нему крепится зубчатое колесо 25, входящее в зацепление с шестерней 7. На свободном конце вала 23, аналогично как на ведущем, крепится шарообразная головка 26 карданного шарнира. Ведущий валик 5 приводится от любой из двух рукояток, смонтированных с обеих сторон верхней плиты стола. Действие винтового тормоза аналогично описанному выше механизму натяжения ленты амортизатора стола. Отличие винтового тормоза редуктора подъемника состоит в том, что для предотвращения возможного при опускании падения груза, например, в случае заклинивания колонки предусмотрен диск 12 с пазами и чашка 14 с

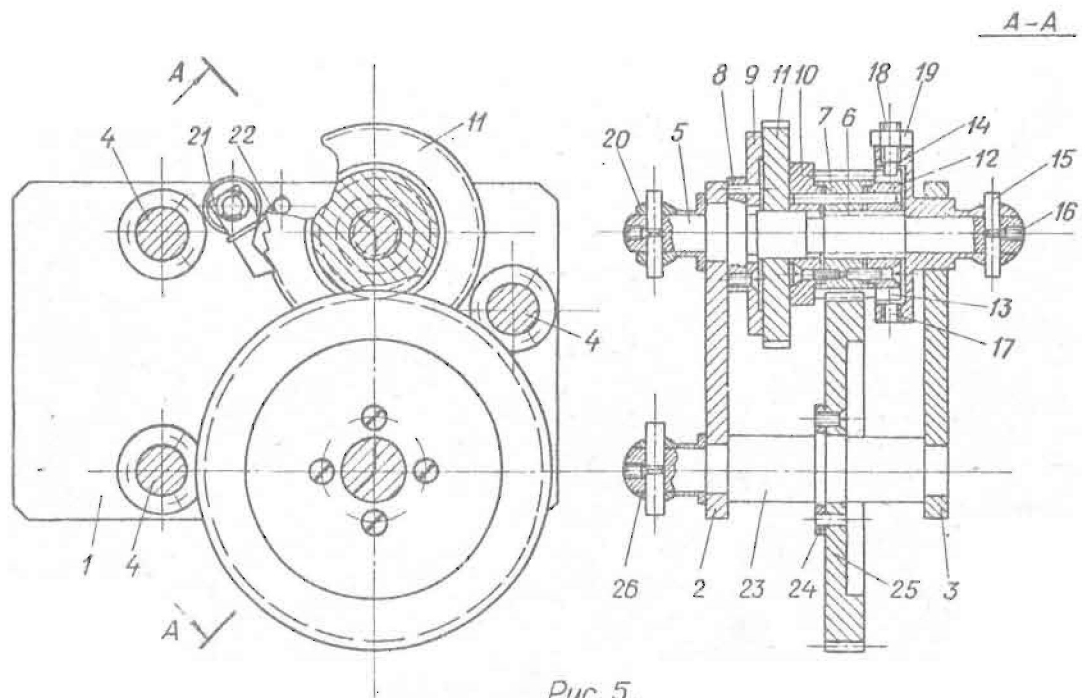


Рис. 5.

резьбовым штифтом 18, который при регулировке в положение подъема ввинчивается в те отверстия 17 чашки 14, которые находятся посередине одного из пазов 13 диска 12. Этим ограничивается свободный ход валика 5 при опускании подъемника.

В системе автоматического наполнения криостата жидким азотом из 15-литрового сосуда Дьюара использован нагнетатель, показанный на рис.6. К плите 1 на прокладке 2 крепится корпус 3, который в нижней части имеет навинченный маховичек 4, насаженную шайбу 5, прокладку 6 и припаянное кольцо 7. К верхней части трубки 8 припаян наконечник 9, в котором завинчен штуцер 10; уплотнением этого соединения служит текстолитовая втулка 11, закрепленная герметически на резьбе в корпусе 3. В корпусе имеются отверстия для вывода проводов, уплотненных резиновыми прокладками 12, металлическими шайбами 13 и резьбовой втулкой 14. Для присоединения к нагнетателю азотопровода служит резьбовая втулка 15, закрепленная на корпусе 3. внутренняя полость корпуса 3 трубкой 16, имеющей посередине предохранительный клапан, соединяется с корпусом 17 игольчатого электромагнитного клапана, состоящего из катушки 18, якоря с иглой 19, кожуха 20 и коллачка 21. Длина трубки 8 выбрана такой, чтобы нижний ее конец находился 10 мм от дна сосуда Дьюара. На трубке 8 монтируется нагревательный элемент 22 и датчик температуры 23, закрытые эластичной цилиндрической гильзой 24. Все провода, идущие от нагнетателя, присоединяются к штепсельному разъему 25.

При поступлении сигнала для подачи азота игольчатый клапан 19 закрывается, включается нагревательный элемент 22 и во внутренней полости сосуда Дьюара и корпуса 3 повышается давление испаряющегося азота, при этом жидкий азот по трубке 8 выдавливается наружу. После выключения нагревателя 22 и вентиля 19 подача азота прекращается. При падении уровня жидкого азота ниже датчика 23 включается световая и

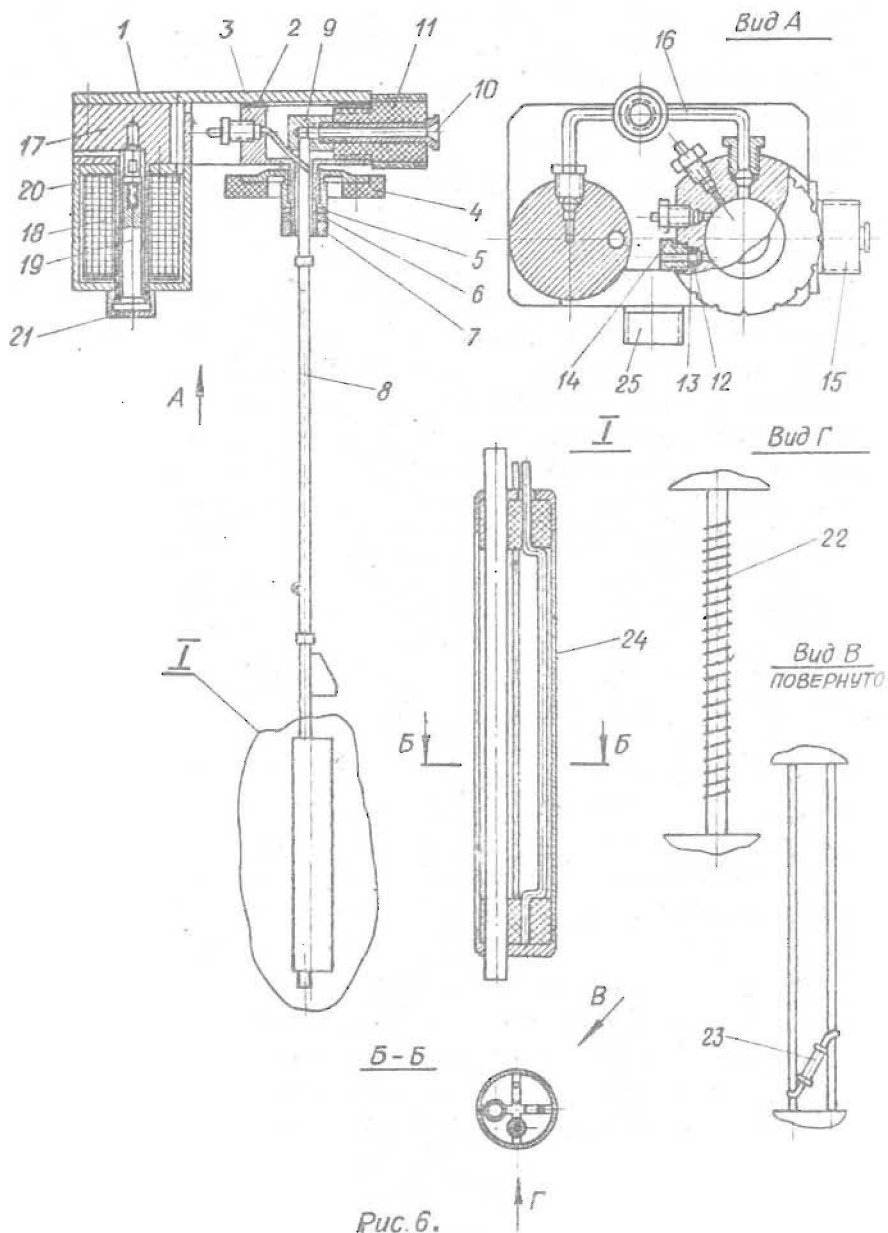


Рис. 6.

звуковая сигнализация на панели управления.

От нагнетателя к криостату жидкий азот подается по гибкому азотопроводу, показанному на рис.7. Для азотопровода используется трубка I из мягкой меди, наружным диаметром 5 мм и толщиной стенки 0,5 мм. Трубка I впаяна в металлический наконечник 2, который в другом конце имеет

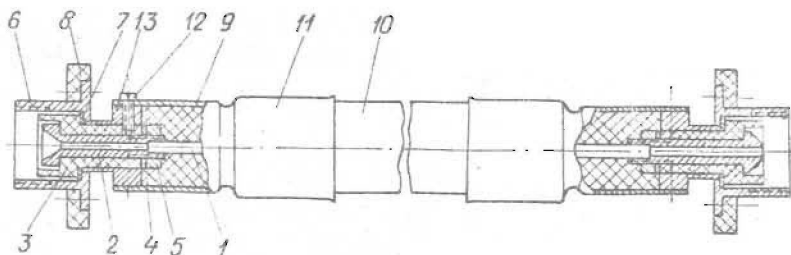


Рис.7.

сферическую головку (или коническое углубление); соответственно конец присоединяемого штуцера выполнен с конусной выточкой под углом 75° . Разумеется, что при необходимости сферическую и коническую головки можно поменять местами. На наконечнике 2 крепится текстолитовая втулка 3 с шайбой 4 и гайкой 5. Резьбовая втулка 6 свободно поворачивается на втулке 3, опираясь на шайбу 7, и имеет пластмассовый венец 8 для предохранения рук от обмораживания. Изоляция 9 азотопровода изготавливается из поролона или пенопласта и покрывается пластмассовым гофрированным шлангом 10 с металлическими наконечниками 11, которые крепятся винтами 12 к насадке 13 и к втулке 3. Азотопроводы проверены на практике в системах подачи азота к криостатам и ловушкам; длина их

достигает 3 м и высота подачи 2,5 м.

Многие приборы, установленные на криостатном столе, требуют водяного охлаждения, например, диффузионный насос, водяная ловушка насоса, рентгеновская лампа, кожух ксеноновой лампы и др. Для нормальной безаварийной работы приборов требуется фильтрация водопроводной воды сетчатыми фильтрами, установка датчиков потока воды и дросселей для регулировки потоков, а также вентилях для включения и отключения воды от приборов.

На рис.8 показан индуктивный датчик потока воды, изготовленный вместе с дросселем.

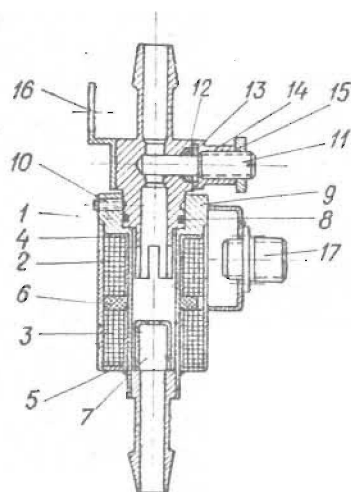
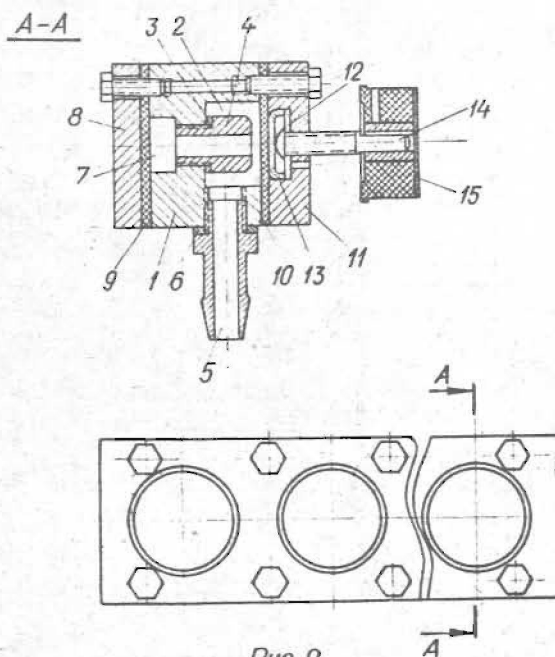


Рис. 8.

На корпусе I из немагнитного материала размещены катушки 2 и 3 с магнитопроводами 4, 5 и перегородкой 6 из пластмассы. В центральном коническом отверстии корпуса I вставлен оцинкованный латунь 7 из мягкой стали, в верхнем конце на резиновой прокладке вставлен корпус дросселя 9 со штуце-

ром и закреплен винтами 10. Дросселирование происходит винтом 11, уплотненным прокладкой 12 и кольцом 13, винт ввинчен во ступку 14 и контрится гайкой 15. На корпусе дросселя крепится кронштейн 16. Провода катушек присоединяются к штепсельному разъему 17, который вместе с кронштейном закреплен на корпусе 1.

Нижняя катушка 2 питается переменным током. В зависимости от положения латуны 7 изменяется ток, индуцированный в катушке 3, что служит для индикации потока и блокирования управляющих устройств.



На рис. 9 показан блок водяных вентиля. Количество проходов может быть от двух и больше.

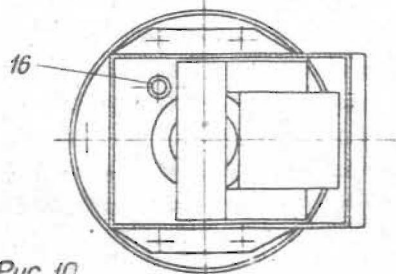
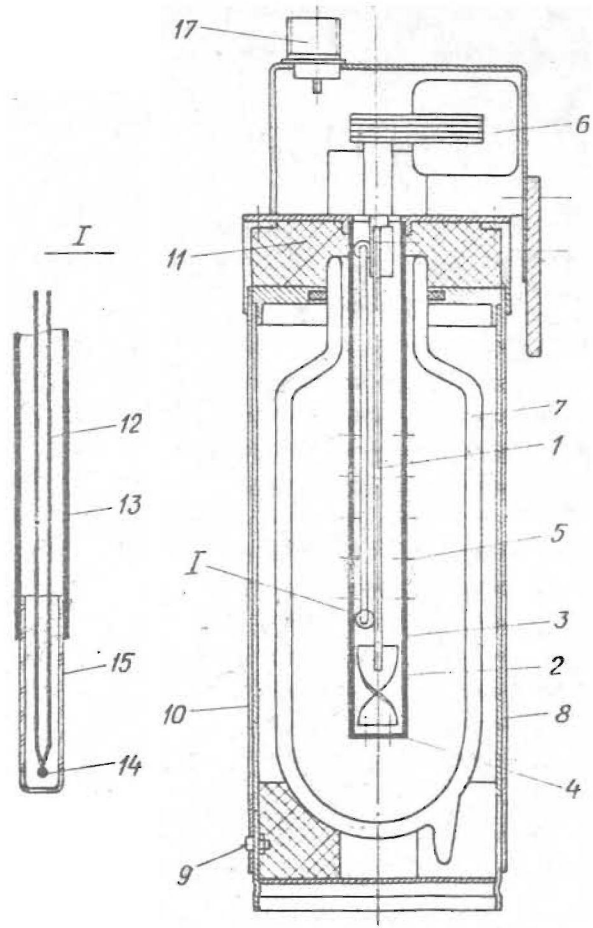


Рис. 10.

Корпус I имеет цилиндрические углубления 2, количество которых зависит от числа проходов. В углублениях ввинчены на прокладках 3 втулки 4. Против каждого углубления 2 в корпусе I имеются отверстия, в которые завинчены штуцера 5 с прокладками 6. С другой стороны корпуса имеется канал 7, сообщающий все отверстия проходов. Канал 7 закрыт крышкой 8 и прокладкой 9. С передней стороны корпус I закрыт эластичной резиновой прокладкой 10 и планкой 11, в цилиндрических углублениях 12 которой помещены нажимные тарелки 13 и в отверстия ввинчены шпиделя 14 с рукоятками 15. К одному из штуцеров 5 присоединяется вентиль подвода воды; после открытия этого вентиля вода подается в канал 7. От других штуцеров 5 можно питать охлаждаемые устройства.

Сосуд для опорных концов термомоляр, показанный на рис. 10, крепится на крышке криостата или на держателе криостата. Так как вода с тающим льдом, находящимся в сосуде, имеет большой температурный градиент, то в сосуде установлен мешатель I. Лопатка 2 мешателя находится в трубе 3, имеющей снизу отверстия 4, а у поверхности уровня воды отверстие 5, это предохраняет мешатель от заклинивания, так как кусочки льда не могут проникнуть во внутреннюю полость трубки 3. Все детали, находящиеся в воде, должны изготовляться из неметаллического материала. Мешатель I приводится в движение электродвигателем 6, вал которого совершает 50 оборотов в минуту. Сосуд дьюара 7 установлен в металлическом корпусе 8 и крепится байонетным замком 9 в держателе 10, горловина сосуда дьюара 7 при этом закрывается пороновою прокладкой 11.

Проволоки термопар 12 находятся в пластмассовых трубочках 13, а спай 14 - в стеклянных запаянных трубочках 15, заполненных глицерином. Стеклянные трубочки 15 плотно вставлены в пластмассовые трубочки 13 и прикреплены к детали 3. Проволоки термопар 12 вводятся сверху по каналам 16. Провода питания электродвигателя присоединяются к тепсельному разъему 17.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Стр.

ТАЛЕ И.А. Информационные возможности неизотермических спектрально-кинетических люминесцентных методов исследования	3
ТАЛЕ И.А. Пути создания и требования к НИС для спектрально-кинетических люминесцентных исследований	33
ПЛАУДИС А.Э., ТАЛЕ И.А. Научно-исследовательская система для проведения исследований комплексом люминесцентных методов	66
✓ СТРАУМЕН Я.Я., АБОЛИНЫШ О.Э. Некоторые теоретические и практические вопросы по созданию криогенной аппаратуры	95
ПРАНЧ Е.А., ПОРТНОВ А.А., СТРАУМЕН Я.Я. Пути создания оптических каналов	III
АБОЛИНЫШ О.Э., СТРАУМЕН Я.Я., МИЛЛЕР Д.К., ПЛАУДИС А.Э., ТАЛЕ И.А., ВИТОЛ И.К., ГУРДЗИЕЛС П.Я. Азотные криостаты	II 6
ПЛАУДИС А.Э. Построение структурной схемы канала управления в температурном тракте научно-исследовательской системы	I 38
ЗАРИНЫШ М.Я., ПЛАУДИС А.Э. Терморегулятор малоинерционного азотного криостата	I 56
СТРАУМЕН Я.Я., ПРАНЧ Е.А., АБЕРС А.Я., ЛИЕПА Г.М., ТРОЙЦИС А.Л. Элементы оптико-механических каналов	I 73
ЯНСОН Я.Л., СТРАУМЕН Я.Я., ТАРДЕНАК Э.Э. Преобразователь код-угол для управления монохроматором ..	201
ЛИМЕЖ Г.К. Счетчик фотонов	216
ЛИМЕЖ Г.К. Отношение сигнал / шум фотозлектронных умножителей в зависимости от режима питания	236
СТРАУМЕН Я.Я., АБОЛИНЫШ О.Э., АБЕРС А.Я. Стенд эксперимента	243

135554

Handwritten scribble

Цена I р. 30 к.

44 / 399

4

LATVIJAS UNIVERSITĀTES BIBLIOTĒKA



0508048467

Учен. зап. (117 эк. II. Стучка), 1972, т. 170, 1 - 260