

**Методы и аппаратура  
для  
физических исследований**

Министерство народного образования Латвийской ССР  
Латвийский ордена Трудового Красного Знамени  
государственный университет им. П.Стучки

Научно-исследовательский институт  
физики твердого тела

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сборник научных трудов

Латвийский государственный университет им. П.Стучки  
Рига 1989



Latvijas  
Universitātes  
BIBLIOTĒKA

54  
УДК 535.37

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ:

Сборник науч. трудов. / Отв. ред. Я.Янсонс. - Рига: ЛГУ им. П.Стучки. - 1989. - 206 с.

В сборник включено 16 статей, в которых изложены достижения в таких основных направлениях, как волоконно-оптические устройства микрофотоэлектроники, фотометрия сверхслабых и быстромменяющихся оптических излучений, генерация коротких импульсов когерентного и некогерентного оптического излучения, нелинейно-оптические явления для исследования свойств материалов, спектрометрия электронного парамагнитного резонанса, гелиевая криогенная техника, термометрия и терморегулирование низких температур, подготовка студентов в области компьютеризации физических исследований.

Сборник представляет обобщение передового опыта в области методики экспериментальной и прикладной физики, развитой в подразделениях физических наук ЛГУ им. П.Стучки.

Публикуемые научные труды предназначены для научных, инженерно-технических работников, аспирантов и студентов, занимающихся экспериментальными исследованиями и приборостроением измерительных средств.

Илл. 64, табл. 3.

РЕДКОЛЕГИЯ

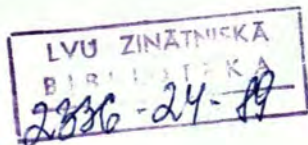
О.Аболинь, Я.Страумен, Э.Тарденак, Я.Янсонс (отв. ред.).

Печатается по решению Издательского совета  
ЛГУ им. П.Стучки

М I704050000-I28y 33.89  
M812(II)-89

©

Латвийский  
государственный  
университет  
им. П.Стучки,  
1989



**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ:  
ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ**

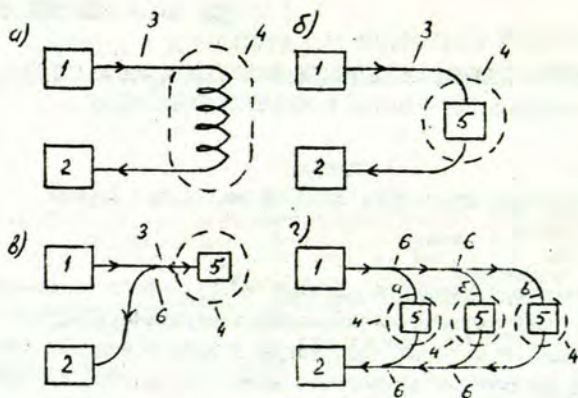
Я. А. Спигулис

Отдел спектроскопии НИЧ ЛГУ им. Петра Стучки

Волоконно-оптические датчики (ВОД), часто называемые сенсорами, представляют новый класс контрольно-измерительных устройств, в которых информация о физических параметрах передается оптическим излучением через волоконные световоды. Основным преимуществом ВОД считают малые их габариты и вес, устойчивость к электромагнитным помехам, коррозионную стойкость, электро- и огнебезопасность, широкий диапазон рабочих температур, высокую чувствительность. В течение последнего десятилетия интенсивно исследуются возможности усовершенствования существующих и создания новых типов ВОД, значительно возросло количество публикаций по этой теме [I-II]. Начиная с 1983 года результаты научных исследований регулярно обсуждаются на международных конференциях по ВОД. С 1986 года в Лондоне издается специализированный международный журнал по оптическим сенсорам. Зарубежные фирмы по выпуску всевозможных ВОД пользуются неплохим коммерческим успехом. В США, например, среднегодовой прирост реализации ВОД ныне превышает 30%, и в ближайшие 15-20 лет ожидается постепенное вытеснение с рынка электронных датчиков оптическими [12].

В настоящей статье рассмотрены основные принципы действия ВОД, применяемых в научных исследованиях, промышленности, медицине и в других отраслях.

Известные по литературе более 60 типов ВОД могут быть классифицированы по различным признакам. Ниже перечислены основные из них.



Р и с. I. Общие схемы построения волоконно-оптических датчиков.

1 - источник излучения, 2 - приемник излучения, 3 - волоконный световод, 4 - зона измерения, 5 - оптосенсор, 6 - волоконный ответвитель (светоделитель).

1. По параметру оптического излучения, который используется в качестве носителя информации. В этом аспекте выделяют датчики интенсивности, фазы, поляризации, спектрального состава и временных характеристик регистрируемого на выходе ВОД излучения.

2. По измеряемому (контролируемому) физическому параметру - датчики температуры, смещения, давления, скорости, тока, напряжения, частоты магнитного поля и др. параметров.

3. По чувствительному элементу - безразрывные или "собственные" ("intrinsic"), в которых в качестве датчика используется участок самого волоконного световода, и разрывные или "наружные" ("extrinsic"), в которых световод служит только для передачи оптического излучения, модулируемого наружным чувствительным элементом - оптосенсором (см. рис. I а, б).

4. По направленности излучения - однонаправленные или "сквозные" и двунаправленные или "г-звратные", в которых излучение от чувствительности области возвращается за счет рассеяния, отражения или люминесценции (см.рис. I, в).

5. По зоне обслуживания - дискретные (точечные) и распределенные, представляющие информацию о распределении параметра (-ов) вдоль определенного участка световода.

6. По количеству измерительных каналов - одноканальные и многоканальные или мультиплексные (см.рис. I, г).

7. По построению измерительного тракта - "чисто" оптические и гибридные, имеющие дополнительные оптико-электронные и электронно-оптические преобразователи.

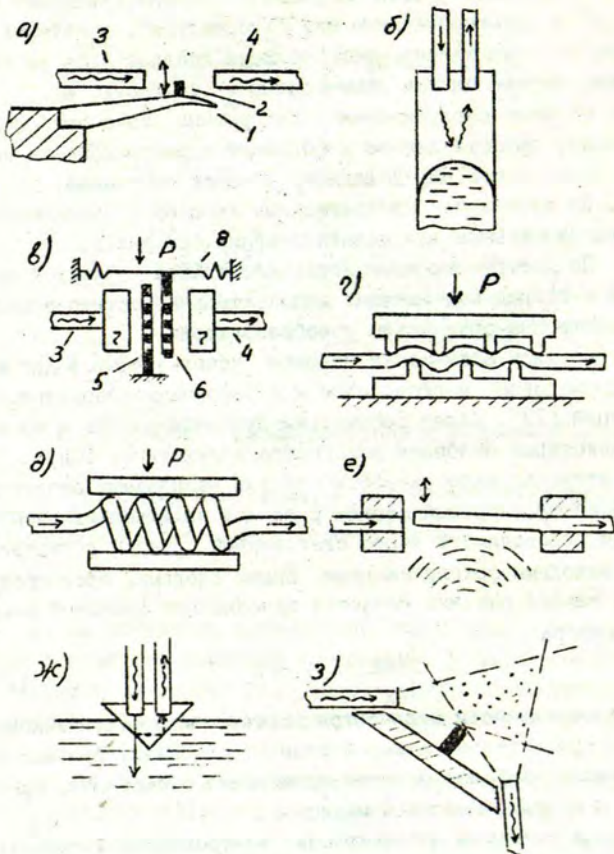
8. По типу оптических волокон, используемых в датчике, - одномодовые, многомодовые и с волокнами специальных конструкций [13]. Далее рассмотрим принципы работы и конструкции некоторых наиболее распространенных типов ВОД.

В датчиках интенсивности (или так называемых амплитудных ВОД) контролируемый параметр влияет на интенсивность излучения, проводимого через световодный тракт и регистрируемого выходным фотоприемником. Иными словами, светопропускаемость такого датчика является однозначной функцией измеряемого параметра  $p$  :

$$T = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = f(p). \quad (I)$$

Датчики интенсивности отличаются достаточно простой конструкцией и сравнительно дешевой элементной базой, в связи с чем они нашли наиболее широкое применение в системах, применяемые в промышленности и медицине.

В ряде датчиков интенсивности контролируемый параметр вызывает механические перемещения элементов, используемых в качестве затворов или отражателей потока оптического излучения. Например, в ВОД температуры, схематически изображен-



Р и с. 2. Схемы амплитудных датчиков температуры и давления.

ном на рис. 2,а, термочувствительным элементом является биметаллическая пластинка 1. К пластинке прикреплен экранирующий затвор 2, который в зависимости от температуры окружающей среды регулирует световой поток, передаваемый от световода 3 в световод 4. В оптическом термодатчике другой несложной конструкции в качестве отражающего оптосенсора используется поверхность ртутного столбика обычного термометра (см.рис.2,б). Падающий на торец приемного световода поток отраженного излучения уменьшается при снижении температуры и увеличивается при ее повышении.

В оптических датчиках давления, в том числе акустических, весьма широкое распространение нашли шторные оптосенсоры (см.рис.2,в). Они представляют систему неподвижной шторы 5 и прикрепленной к диафрагме 8 подвижной шторы 6. Их взаимное перемещение в зависимости от давления вызывает уменьшение или увеличение светового потока, передаваемого с входного волокна 3 на входное волокно 4. Для увеличения сечения светового потока в области действия шторок к торцам волокон прикреплены градиентные линзы 7.

Датчики давления могут быть реализованы также без разрыва волоконного световода. На рис.2,г, например, показана "зубчатая" конструкция для многократного изгибания световода при наличии давления сверху. Известно [14], что чем круче изгиб оптического волокна, тем эффективнее происходит утечка проводимого им излучения через оболочку световода. Следовательно, интенсивность излучения на выходе датчика с повышением давления падает, и по спаду интенсивности сигнала фотоприемника можно судить о величине механического давления. На рис. 2,д показана другая модификация такого датчика, в котором давление осуществляется плоской поверхностью на соленоид, намотанный из оптического волокна.

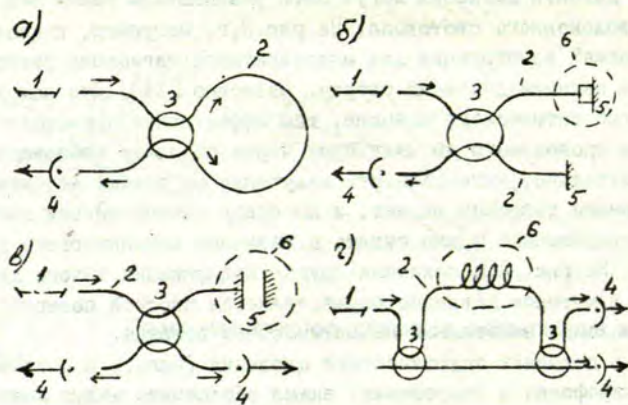
В датчиках акустического давления (напр., в оптических микрофонах и гидрофонах) важно обеспечить малую инерционность. Это удается в датчиках, конструкция которых схематически показана на рис. 2,е. Акустическая волна (прерывистые линии) приводит в движение легкий и эластичный свободный



участок световода, модулируя своими колебаниями интенсивность оптического сигнала на выходе датчика.

Датчиками интенсивности считаются также волоконно-оптические пороговые устройства типа "да - нет", сигнализирующие о механических смещениях и прерываниях, измерениях уровня жидкости, о наличии дыма и т.п. В качестве примера на рис. 2,ж показан волоконный датчик уровня жидкости, действующий по принципу нарушения полного внутреннего отражения; на рис. 2,з показан оптический сигнализатор дыма и пыли, основанный на регистрации сигнала рассеянного ими излучения.

Действие фазовых датчиков - наиболее чувствительного типа ВОД - основано на регистрации сдвига фазы оптической волны вследствие регистрируемого физического возмущения. Величина сдвига фазы чаще всего определяется одномодовым волоконно-оптическим интерферометром из модификаций, отраженных на рис.3. Кольцевой интерферометр Саньяка (см.рис.3,а)



Р и с. 3. Волоконно-оптические интерферометры Саньяка (а), Майксона (б), Фабри - Перо (в) и Маха - Цендера (г).

1 - лазер, 2 - одномодовое волокно, 3 - разветвитель, 4 - фотоприемник, 5 - зеркало, 6 - области взаимодействия.

широко применяется в волоконно-оптических гироскопах [15]. Принцип такого гироскопа базируется на общей теории относительности и сводится к определению угловой скорости вращения  $\Omega$  по сдвигу фаз  $\Delta\varphi$  световых потоков, направляемых по и против часовой стрелки через вращающийся контур одномодового волокна:

$$\Delta\varphi = \frac{8\pi NS}{\lambda c} \cdot \Omega, \quad (2)$$

где  $N$  - число витков контура,  $S$  - площадь одного витка,  $\lambda$  - длина волны излучения,  $c$  - скорость света. Чувствительность современных волоконно-оптических гироскопов позволяет регистрировать скорость вращения до  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  град в час [2,15].

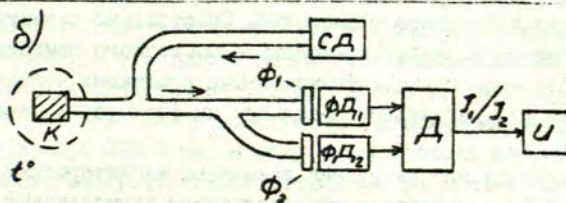
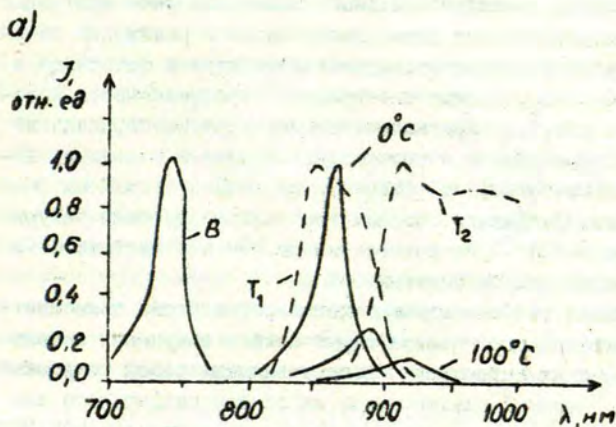
Действие интерферометрических датчиков часто основано на регистрации сдвига фазы излучения за счет увеличения или уменьшения оптической длины под влиянием измеряемого параметра. При этом чувствительный элемент (сенсор) может быть выполнен в виде участка волокна, жестко связанного со стрикционным материалом, меняющим линейные размеры участка вследствие воздействия температуры, электрического или магнитного поля, давления и т.п. Смещение можно реализовать и вне волокна, пользуясь схемой Фабри - Перо (см.рис.3,в). Преимуществом интерференционных датчиков является чрезвычайно высокая чувствительность к микроперемещениям. Предел их разрешения (зазор между соседними максимумами интерференции) соизмерим с длиной волны излучения и составляет доли микрона. Для обеспечения такой чувствительности необходимо выполнение ряда жестких требований по отношению к оптической и к электронной части устройства, что неизбежно ведет к усложнению конструкции и росту стоимости по сравнению с амплитудными ВОД.

В качестве типичного примера фазовых ВОД микроперемещений можно рассмотреть построенный по схеме Майклсона (см.рис.3,б) одномодовый волоконный термометр. Измерительное и опорное волокна интерферометра длиной в 2,5 м спарены вместе, за исключением выступающего на 3 см участка измерительного волокна, жестко связанного со стальным цилиндром-зондом; на торцы обоих волокон нанесен слой зеркального от-

ражения. Вводимое излучение полупроводникового лазера модулируется пилообразными импульсами, а выходные сигналы анализируются при помощи микропроцессора. Чувствительность такого термометра в диапазоне 300-500 К достигает  $7 \cdot 10^{-6}$  К [16-19].

Сдвиг фазы проводимого через световод излучения может быть вызван также другими физическими факторами, например, внешним магнитным полем. В частности, в работе [20] описан датчик магнитного поля на основе интерферометра Саньяка (см. рис.3,а), кольцевая часть которого расположена внутри тороида, намотанного из медного провода. При включении тока через тороидальный провод магнитное поле приводит к повороту плоскости поляризации оптического излучения (эффект Фарадея), что в итоге проявляется в сдвиге фаз выходного излучения. Такая конструкция обеспечивает возможность измерения электрического тока (без температурного дрейфа) с точностью порядка 0,1 А. Волоконно-оптический амперметр на основе эффекта фарадеевского вращения с подобной чувствительностью можно реализовать также путем наматывания одномодового волокна на прямой участок электрического провода. Положение плоскости поляризации выходного излучения при этом фиксируется двумя приемниками через поляризационный светоделитель. Надо отметить, что постоянная Верде, определяющая эффективность вращения плоскости поляризации, у кварцевых световодов невелика - порядка  $10^{-6}$  рад/А. Комбинируя кварцевый световод с оптоэлементами фарадеевского вращения из материалов с более высоким значением постоянной Верде чувствительность к току поляризационных ВОД можно повысить до  $10^{-3}$ - $10^{-6}$  А. Еще более высокой чувствительностью обладают оптические фазовые датчики с элементами из магнитоотрицательных материалов, детектирующие магнитные поля с порядком  $10^{-7}$  А/м [1].

Полезную информацию можно получить также анализом спектрального состава излучения на выходе ВОД. Для примера рассмотрим люминесцентные и пирометрические термодатчики, действие которых основано на фиксации изменений формы спектральной полосы регистрируемого излучения при изменении температуры среды. На рис.4,а показаны кривые температурной зави-



Р и с. 4. Спектральные характеристики люминесценции кристалла (а) и схема люминесцентного термодатчика (б).

В - полоса возбуждения,  $T_1$ ,  $T_2$  - полосы пропускания фильтров  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , К - люминесцирующий кристалл, СД - светодиод, ФД<sub>1</sub>, ФД<sub>2</sub> - фотодиоды, Д - делитель, И - индикатор.

симости люминесценции полупроводникового (AlGaAs) кристалла при возбуждении светодиодом с полосой эмиссии В, а на рис.4,б - схема волоконного термодатчика со спектральным анализом люминесцентного излучения [22]. С повышением температуры полоса люминесценции кристалла смещается в длинновол-

новую область и теряет интенсивность. Эти изменения фиксируются простой двухканальной схемой, люминесцентное излучение регистрируя параллельно двумя приемниками с различной спектральной чувствительностью. Приемниками служат фотодиоды с фильтрами  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , кривые спектральной пропускания которых даны на рис. 4, а. При изменении температуры парциальный вклад длинноволновой и коротковолновой частей в спектр люминесценции меняется, что фиксируется индикатором И на выходе делителя Д. Датчик обеспечивает измерение температуры в диапазоне 0-200 °С на расстоянии до 500 м с погрешностью 0,1 °С; инерционность системы 0,1 с.

Подобная техника двухканальной регистрации применяется для спектрального анализа термического излучения в волоконно-оптических пирометрах, представляющих собой кварцевый световод с "черным" наконечником на основе сапфирового волокна [ 23]. Датчик измеряет температуру в диапазоне 500-2000 °С с погрешностью 0,05%; для диапазона 631-1769 °С он уже принят в качестве эталонного термометра. Спектрально-селективные ВОД, кроме того, могут применяться для точного измерения углов поворота элементов с дифракционными решетками и призмами, а также для регистрации ряда других физических параметров [ 7].

Что касается использования временных характеристик излучения в ВОД, то наиболее распространены термодатчики послесвечения люминофоров. В зависимости от температуры меняются не только спектральные параметры, но и временная константа релаксации излучения люминофоров. При возбуждении люминофора импульсно или синусоидально модулированным излучением регистрируется соотношение интенсивностей при двух или более фиксированных временах задержки относительно сигнала синхронизации. Этим обеспечивается точность дистанционной регистрации температуры до 0,01 °С [ 2]. Один из вариантов термодатчика такого типа подробно рассмотрен в работе [ 25]. Временное стробирование фотоприемников, кроме того, применяется для выделения отдельных каналов мультиплексных датчиков, в которых каждому каналу соответствует своя длина све-

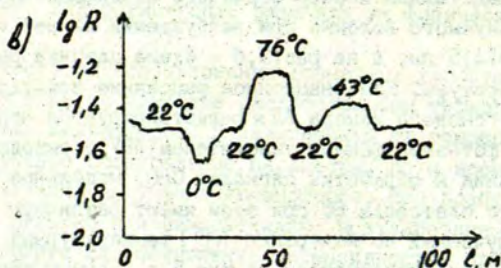
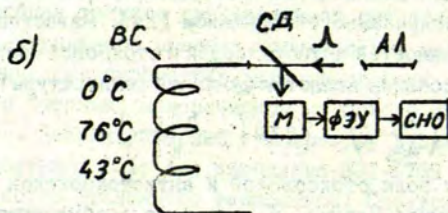
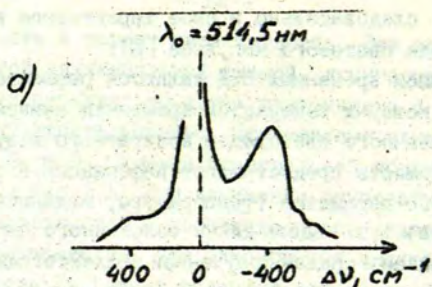
товодного участка, следовательно, и свое характерное время запаздывания прихода светового импульса [8].

Отдельным типом временных ВОД являются рефлектометрические датчики, в которых измеряется временная зависимость интенсивности рассеянного световодом возвратного излучения. Анализ такой зависимости предоставляет информацию о распределении исследуемого параметра (температуры, механических напряжений, изгибов и т.п.) вдоль длины волоконного световода по характерным пикам и спадам полученной рефлектограммы. В качестве примера рассмотрим рефлектометрический спектрально-селективный датчик для определения температурного профиля волоконно-оптической линии по комбинационному рассеянию кварцевого волокна, легированного германием [24]. Известно, что соотношение интенсивностей антистоксовой и стоксовой компонент комбинационного рассеяния является функцией температуры  $T$ :

$$R(T) = \left( \frac{\lambda_c}{\lambda_a} \right)^4 \cdot \exp\left( - \frac{h\nu_c}{kT} \right), \quad (3)$$

где  $\lambda_c$ ,  $\lambda_a$  - длины волн стоксовской и антистоксовской компонент,  $h$  - постоянная Планка,  $\nu$  - частота возбуждающего излучения,  $c$  - скорость света,  $k$  - постоянная Больцмана. На рис.5,а представлен спектр обратного комбинационного рассеяния используемого волокна при возбуждении линией аргонового лазера 514,5 нм, а на рис.5,б - схема датчика распределения температуры. Комбинационное рассеяние возбуждается импульсами аргонового лазера АЛ и регистрируется через монохроматор М фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) с выходом на схему накопления и обработки сигналов СНО. Отдельные участки волоконного световода ВС при этом имеют различную температуру. Полученный по измерению  $R(T)$  температурный профиль по длине световода представлен на рис.5,в. Данным способом можно измерять температурный профиль окружающей световод среды на расстоянии 1 км и больше с разрешением до 1 К при разрешении по длине 1 м; время измерений 20 с. Подобные измерения уже проведены [25].

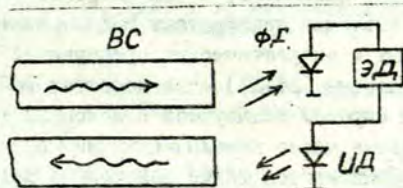
Оптические волокна могут служить и носителем измерительной информации, и средой переноса энергии для питания электронных схем гибридных датчиков. Принцип работы такого датчика пояснен схемой на рис.6. Поток мощного излучения,



Р и с. 5. Регистрация температурного профиля распределенным рефлектометрическим датчиком комбинационного рассеяния.

а - спектр комбинационного рассеяния, б - схема установки, в - распределение температуры по длине световода.

АЛ - аргонный лазер, СД - светоделитель, ВС - волоконный световод, М - монохроматор, ФЭУ - фотоэлектронный умножитель, СНО - система накопления и обработки сигнала.



Р и с. 6. Принцип работы гибридного волоконно-оптического датчика.

BC - волоконный световод, ФД - фотодиод, ЭД - электронный датчик, ИД - излучающий диод.

передаваемого через световод BC на фотодиод ФД, используется для фотовольтаической генерации напряжения питания электронному датчику ЭД, которым проводится требуемое измерение. Современные фотодиоды при этом способны генерировать напряжение до 4-5 вольт, что вполне достаточно для питания измерительных электронных схем. По результатам измерений кодируется ток, возбуждающий свечение излучающего диода ИД. Это свечение передается обратно через световод для дальнейшей обработки измерительной информации в приемном конце линии. Гибридные оптоэлектрооптические и другие датчики могут обладать преимуществами как электронных, так и волоконно-оптических датчиков, поэтому их развитию в последнее время уделяется особое внимание [26].

Рассмотренные выше и еще ряд других типов ВОД находят все более широкое применение не только в лабораторных научных исследованиях, но также в других сферах, особенно в системах контроля промышленных процессов и в медицине [27-32]. В частности, для промышленности перспективными являются датчики смещения, уровня, давления, скорости потоков (по доплеровскому сдвигу), частоты вращения, температуры, электрических и магнитных полей, диагностики состава плазмы. При этом преимущества отдаются датчикам интенсивности как наиболее простым и дешевым [33]. Интенсивное внедрение ВОД благодаря их малому весу и габаритам происходит в области транс-



порта - воздушного, наземного, в том числе автотранспорта [34,35]. Особое значение приобретают ВОД для систем безопасности промышленных и энергетических предприятий, включая ядерные и нефтегазовые [36,37]. Что касается ВОД для медицины, наибольшим спросом пользуются волоконные термометры, в том числе вводимые через каналы эндоскопов при терапии раковых опухолей. Применяются также волоконные магнитометры для изучения магнитных полей мозга (напр., при лечении эпилепсии), датчики скорости течения и химического состава крови, флуоресцентные датчики для биологических анализов и другие типы ВОД [28,30]. Большое количество различных волоконных датчиков применяется также в системах военного назначения [12,38].

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бутусов М.М., Галкин С.Л., Оробинский С.П., Пал Б.П. Волоконная оптика и приборостроение. - Л., 1987. - 328 с.
2. Красюк В.А., Корнеев Г.И. Оптические системы связи и световодные датчики. - М., 1985. - 192 с.
3. Хотяинцев С.Н. Применение оптических волноводов в датчиках физических воздействий // Изв. высших учеб. зав.: Радиоэлектроника. - 1983. - Т.26, № 5. - С.42-53.
4. Бердичевский Б.Е., Королькевич В.А., Лавренцов В.Д., Маджарова Т.Б. Состояние и перспективы развития оптоволоконных измерительных систем // Заруб. электр. техн. - 1987. - № 3. - С.3-68.
5. Jackson D.A., Jones J.D.C. Fibre Optic Sensors // Opt.acta. - 1986. - Vol.33, N 12. - P.1469-1503.
6. Jackson D.A., Jones J.C.D. Extrinsic Fibre-Optic Sensors for Remote Measurements // Opt.Laser.Techn. - 1986. - Vol.18, N 5. - P.243-252.
7. Jones B.E. Optical Fibre Sensors and Systems for Industry // J.Phys.E: Sci.Instrum. - 1985. - Vol.18. - P.770-782.
8. Dakin J.P. Multiplexed and Distributed Optical Fibre Sensor Systems // J.Phys.E: Sci.Instrum. - 1987. - Vol.20. - P.954-967.

9. Medlock R.S. Review of Modulating Techniques for Fibre Optic Sensors // Int.J.Opt.Sens. - 1986. - Vol.1, N 1. - P.43-68.

10. Culshaw B. Optical Systems and Sensors for Measurement and Control // J.Phys.E: Sci.Instrum. - 1983. - Vol.16. - P.978-986.

11. Giallorenzi T.G., Bucaro J.A., Dandridge A. Optical Fiber Sensor Technology // IEEE J.Quant.Electron. - 1982. - Vol.QE-18. - P.626-667.

12. Zilber J. Fiberoptic Sensor Market Development // Proc. 2nd Int.Conf. on Optical Fiber Sensors. - Stuttgart, 1984. - P.177-183.

13. Payne D.N. Fibres for Sensors // Proc. 2nd Int. Conf. on Optical Fiber Sensors. - Stuttgart, 1984. - P.353-360.

14. Мидвинтер Дж.Э. Волоконные световоды для передачи информации. - М., 1983. - 336 с.

15. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. - М., 1987. - 152 с.

16. Jones J.D.C., Jackson D.A. Monomode Fibre Optic Temperature Sensors // Analyt.Proc. - 1985. - Vol.22. - P.207-210.

17. Corne M., Kersey A.D., Jackson D.A. Temperature Sensing with Single-Mode Optical Fibres // J.Phys.E: Sci. Instrum. - 1984. - Vol.17. - P.988-993.

18. Jones J.D.C., Jackson D.A. Research Advances in Fiberoptic Interferometric and Polarimetric Sensors // Laser Focus / Electro-Optics. - 1985. - N 10. - P.142-146.

19. Jones J.D.C., Leilabady P.A., Jackson D.A. Monomode Fibre - Optic Sensors : Optical Processing Schemes for Recovery of Phase and Polarization State Information // J. Opt.Sensors. - 1986. - Vol.1, N 2. - P.123-134.

20. Leilabady P.A., Wayte A.P., Berwiek M., Jones J.D.C., Jackson D.A. A Pseudo-Reciprocal Fibre-Optic Faraday Rotation Sensor : Current Measurements and Data Communication Applications // Opt.Commun. - 1986. - Vol.59, N 3. - P.173-176.

21. Laganos N., Cole J.H., Bucaro J.A. Microbend Fiber-Optic Sensor // Appl.Opt. - 1987. - Vol.26, N 11. - P.2171-2179.



Latvijas  
Universitātes  
BIBLIOTĒKA

LVU ZINĀTĪŠKA  
BIBLIOTĒKA  
2336-24-89

22. Ovren C., Adolfsson M., Håk B. Fibre Optic Systems for Temperature and Vibration Measurements in Industrial Applications // Proc.Int.Conf.Optical Techniques in Process Control. - The Hague, 1983. - P.67-81.
23. Diles R.R. High Temperature Optical Fiber Thermometer // J.Appl.Phys. - 1983. - Vol.54. - P.1198-1201.
24. Dakin J.P., Pratt D.J., Bibby G.W., Ross J.N. Distributed Antistokes Ratio Thermometry // Proc. 3rd Int. Conf.on Optical Fiber Sensors. - San Diego, 1985 (post deadline paper).
25. Stierlin R., Ricks J., Zysset B. Distributed Fiber-Optic Temperature Sensor Using Single Photon Counting Detection // Appl.Opt. - 1987. - Vol.26, N 8. - P.1368-1370.
26. Kist R. Trends bei faseroptischer Sensoren // Laser und Optoelektronik. - 1987. - N 2. - S.146-150.
27. Angousti A.T., Gratten K.T.V., Palmer A.W. A Laser-Pumped Temperature Sensor Using the Fluorescent Decay Time of Alexandrite // J.Lightwave Technol. - 1987. - Vol.5, N 6. - P.759-762.
28. Chaastel M.H. Fiberoptic Sensors Begin Moving from Laboratory to Marketplace // Laser Focus / Electro-Optics. - 1987. - N 5. - P.110-117.
29. Harmer A.L. Optical Fibre Sensors for Industrial Application // Proc. 2nd Int.Conf.on Optical Fiber Sensors. - Stuttgart, 1984. - P. 17-22.
30. Scheggi A.M. Optical Fiber Sensors in Medicine // Proc. 2nd Int.Conf.on Optical Fiber Sensors. - Stuttgart, 1984. - P.93-104.
31. Wickersbeim K.A., Sun M.H. Fiberoptic Thermometry and Its Applications // Microwave Power & Electromagn.Energy. - 1987. - Vol.22, N 2. - P.85-94.
32. Жилин В.Г. Волоконно-оптические измерительные преобразователи скорости и давления. - М., 1987. - 112 с.
33. Krohn D.A. Fiber-Optic Sensors : Intensity Modulation // Photonics Spectra. - 1987. - N 1. - P-60-70.
34. Fiberoptic Systems in Autos Expected to Pick up // Laser Focus / Electro-Optics. - 1985. - N 1. - P.52.
35. Hamelain J.-C. Fibres optiques et capteurs pour l'automobile // Ing.automob. - 1986. - N 4. - P-78-81.

36. Güttinger H., Pfister G. Fiber-Optic Sensors and Technology in Security Systems // 1st Int.Conf.on Optical Fiber Sensors. - London, 1983. - P.62.66.

37. Farahi F., Leilabady P.A., Jones J.D.C., Jackson D.A. Optical-Fibre Flammable Gas Sensor // J.Phys.E: Sci.Instrum. - 1987. - Vol.20, N 4. - P.435-436.

38. Jordan G.R. Sensor Technologies of the Future // GEC Rev. - 1987. - Vol.3, N 1. - P.23-32.

Статья поступила 17 июня 1988 года.

ПРАКТИКА ИЗМЕРЕНИЯ ОДНОЭЛЕКТРОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ

Я.Л.Янсонс

НИИ физики твердого тела ЛГУ им. Петра Стучки

## В в е д е н и е

Методика счета фотонов с использованием фотоэлектронного умножителя (ф.э.у.) в одноэлектронном режиме работы применяется в оптико-физических исследованиях с начала 60-х годов. Известны результаты исследований одноэлектронных свойств многих типов ф.э.у. (см. [1] и ссылки в ней). Но Госстандартом пока еще не даны термины и определения одноэлектронных характеристик ф.э.у. и не установлены методы измерения таких характеристик (см. ГОСТ 20526-82 и ГОСТ 11612.0-81, соответственно). Можно предположить, что такая ситуация сложилась из-за отставания уровня развития измерительной техники в субмилливольтовом диапазоне регистрации стохастических импульсов наносекундной длительности, какими являются одноэлектронные импульсы ф.э.у. Трудности аппаратурного и метрологического обеспечения не позволяют получать точные результаты измерений одноэлектронных свойств ф.э.у. Опубликованные данные фактически являются лишь качественной информацией.

Без стандартизации параметров и методов их измерения неизбежна неоднозначность в определении одноэлектронных характеристик ф.э.у. В таких условиях каждому пользователю ф.э.у. для счета фотонов приходится применять кое-какие свои методы измерения и контроля одноэлектронных характеристик, чтобы обеспечить хотя бы относительную достоверность проводимых измерений.

В настоящей работе рассмотрены вопросы нашей практики определения одноэлектронных свойств ф.э.у. (общие принципы изложены в [ 2 ]). Внимание уделяется проблеме надежности регистрации одноэлектронных импульсов. Рассматриваются проблемы измерения стационарных одноэлектронных характеристик и оптимизации режима работы ф.э.у. Приведен анализ источников импульсов помех. Особое внимание обращено на выявление динамических помех ф.э.у., что важно для достоверного применения методики счета фотонов в кинетических исследованиях оптического излучения.

### I. Требования к измерительной аппаратуре

Свойства одноэлектронного режима работы ф.э.у. зависят не только от экземпляра ф.э.у., но и от способа его включения и условий эксплуатации. Ввиду этого целесообразно измерять и контролировать одноэлектронные характеристики при помощи той же аппаратуры, которая используется для счета фотонов [ 3 ].

Аппаратура любой фотонно-счетной системы состоит из регулируемого источника питания ф.э.у., селектора одноэлектронных импульсов и счетной системы. Устройство селектора включает усилитель и амплитудный дискриминатор импульсов ф.э.у. и формирователь нормированных выходных импульсов селектора. Счетная система в простейшем случае представляет собой частотомер, в течение определенных интервалов времени измеряющий среднюю частоту следования импульсов на выходе селектора. Для осуществления непосредственных измерений одноэлектронных характеристик ф.э.у., кроме того, необходимо дополнительно предусмотреть:

- 1) достаточно широкие пределы регулирования порога дискриминации селектора с градуированной шкалой отсчета,
- 2) возможность подключения широкополосного осциллографа на выходе усилителя перед амплитудным дискриминатором селектора,

3) подачу стабильного потока излучения на фотокатод в интересующей области его диапазона спектральной чувствительности с регулированием интенсивности в пределах динамического диапазона счета фотонов,

4) световой затвор, перекрывающий освещение ф.э.у.,

5) стабилизацию и контроль температуры в камере ф.э.у.

Общие требования при измерениях должны соответствовать ГОСТу ИИ612.0-81 и паспортным данным на ф.э.у.

Перед началом измерений необходимо определить уровень собственных шумов измерительных цепей. Для этого на ф.э.у. в затемненном состоянии подается минимальное напряжение питания, при котором его усиление недостаточно для регистрации выходных импульсов. Осциллографом в режиме внутренней синхронизации измеряется амплитуда шумов на входе дискриминатора и определяется минимальный уровень порога дискриминации  $U_{D0}$ , при котором полностью отсекаются собственные шумы аппаратуры. В случае чрезмерно высокого уровня помех следует выявить и ликвидировать источник шумов (неправильное заземление, большие пульсации в цепях питания, наводки от рядом работающих импульсных устройств и пр.). Необходимо проверить, не нарушена ли с подключением осциллографа нормальная работа селектора. Для исключения такого недостатка в устройстве селектора лучше всего предусмотреть развязанный от дискриминатора контрольный выход усилителя [4].

## 2. Осциллографирование одноэлектронных импульсов

С помощью осциллографа при номинальном напряжении питания затемненного ф.э.у. можно наблюдать его темновые импульсы. Средняя частота их следования измеряется частотомером на выходе селектора. Для наблюдения сигнальных одноэлектронных импульсов нужно на фотокатод подать поток излучения, увеличивающий на порядок величины и более скорость счета выходных импульсов. При внешней синхронизации развертки осциллографа от выходных импульсов селектора на экране высве-

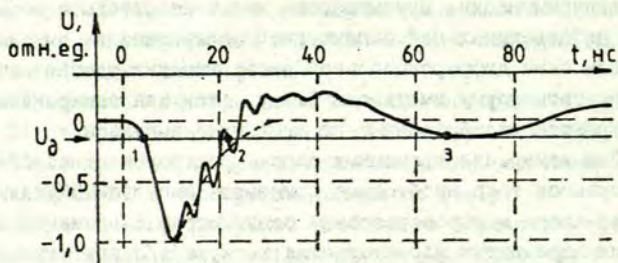
чиваются импульсы, амплитуда которых превышает установленный порог дискриминации. Преимущества имеют селекторы с возможностью дифференциальной амплитудной дискриминации импульсов. При узком окне дифференциальной дискриминации удобно осциллографировать форму импульсов ф.э.у., так как синхронизацией отбираются калиброванные по амплитуде импульсы.

Для измерения временных параметров формы одноэлектронных импульсов тока необходимо применять импульсный усилитель селектора и широкополосный осциллограф с временем нарастания переходных характеристик не хуже  $1/3$  длительности фронта импульсов ф.э.у. На выходе усилителя селектора возможно наблюдать лишь суммарный отклик действия импульса тока выхода ф.э.у. на нагрузку и усилитель селектора. Но эти импульсы отклика фактически являются регистрируемым сигналом. Поэтому все искажения формы одноэлектронных импульсов при их передаче по линии связи от ф.э.у. на селектор, в ходе преобразования в импульсы напряжения, а также при их усилении до амплитудного отбора дискриминатором оказывают непосредственное влияние на общие свойства регистрации фотонных данной аппаратурой.

Наиболее часты искажения в виде звонov - высокочастотных и/или низкочастотных колебаний после начала действия импульса ф.э.у. (см.рис. I). Электрические цепи всегда имеют рассредоточенные реактивные параметры, которые неоднородно распределены на пути распространения сигнала и образуют локальные колебательные контуры. Короткие импульсы тока в этих контурах вызывают резонансные колебания, которые на выходной нагрузке проявляются как высокочастотные затухающие колебания на вершине и спаде импульса. Так как амплитуда импульсов ф.э.у. значительно флуктуирует, то на спаде больших импульсов даже относительно небольшие выбросы звона могут превышать установленный порог дискриминации. Это приводит к появлению ложных импульсов на выходе быстродействующего селектора.

После действия импульса ф.э.у. возможны затухающие низкочастотные колебания "нулевой линии" - опорного нулево-





Р и с. 1. Осциллограмма одноэлектронного импульса, снятая на входе амплитудного дискриминатора при плохом согласовании ф.э.у. с усилителем селектора. Искажения импульса высокочастотным звоном и колебания нулевой линии вызывают ложные срабатывания селектора в точках 2 и 3.

го потенциала аналоговой части селектора. Колебания нулевой линии изменяют вероятность регистрации следующих импульсов, так как на некоторое время произвольно изменяют установленный порог дискриминации. Они могут вызывать регистрацию ложных импульсов в област. малых амплитуд. Такие ложные импульсы возникают от собственных шумов измерительных цепей, которые модулированы по амплитуде колебаниями нулевой линии. В отсутствие импульсов ф.э.у. или при малой их амплитуде, когда понижено напряжение питания, собственные импульсы шумов измерительных цепей отсекаются селектором. Но при воздействии больших импульсов ф.э.у., когда амплитуда колебаний звона соизмерима с величиной порога дискриминации, в максимумах сдвига нулевой линии повышается вероятность срабатывания селектора от шумовых импульсов с малой амплитудой. В результате на выходе селектора могут появляться дополнительные импульсы, скоррелированные с сигналами импульсами и похожие на послеимпульсы ф.э.у.

Такой паразитный эффект в амплитудных распределениях импульсов ф.э.у., снятых тем же селектором, проявляется в

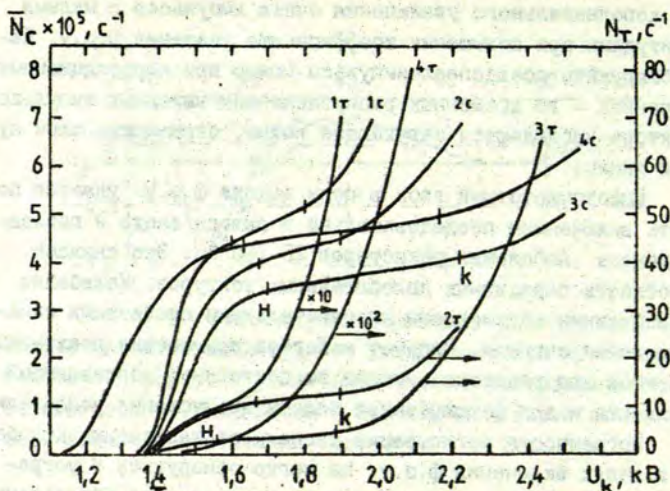
виде дополнительного увеличения счета импульсов с малыми амплитудами при повышении коэффициента усиления ф.э.у. Явно обнаружить псевдопослеимпульсы можно при корреляционных измерениях - во временных распределениях выходных импульсов селектора наблюдаются затухающие волны, отражающие звон нулевой линии.

Высокочастотный звон в цепи выхода ф.э.у. удаётся подавить включением последовательно в выводы анода и последние диоды небольших резисторов 25-100 Ом. Это снижает добротность паразитных колебательных контуров. Колебания нулевой линии обусловлены индивидуальными свойствами канала усиления сигнала. Следует избегать применения реактивных элементов для развязки сигнала от постоянной составляющей напряжения и для формирования полосы пропускания усилителя.

Погрешности регистрации сигнала от паразитных колебаний в цепях включения ф.э.у. не легко обнаружить и устранить ввиду вероятностной природы всего процесса образования и регистрации импульсов ф.э.у. Однако тот важный факт, что такие систематические погрешности могут грубо исказить амплитудные и временные распределения одноэлектронных импульсов, на статистических свойствах которых базируется вся методика счета фотонов [ 2 ], требует тщательной проверки и наладки согласования всего аналогового тракта от выхода ф.э.у. до амплитудного дискриминатора. Только после этого есть смысл проводить измерения одноэлектронных характеристик работы ф.э.у. и определять наилучший режим его эксплуатации.

### 3. Счетные характеристики

Простейшими характеристиками одноэлектронного режима работы ф.э.у. вместе с регистрирующей аппаратурой являются зависимости средней частоты следования выходных импульсов селектора в интегральном режиме дискриминации от напряжения питания ф.э.у.  $U_k$  для темновых импульсов -  $N_c(U_k)$  и при определенной засветке фотокатода -  $N_c(U_k)$ . Это так называе-



Р и с. 2. Счетные характеристики световых (с) и темновых (τ) импульсов приборов типа ФЭУ-79 (кривые 1-3) и типа ФЭУ-118 (кривая 4) при пороге дискриминации 0,5 мВ в температуре 290 К. На кривых выделены интервалы плато.

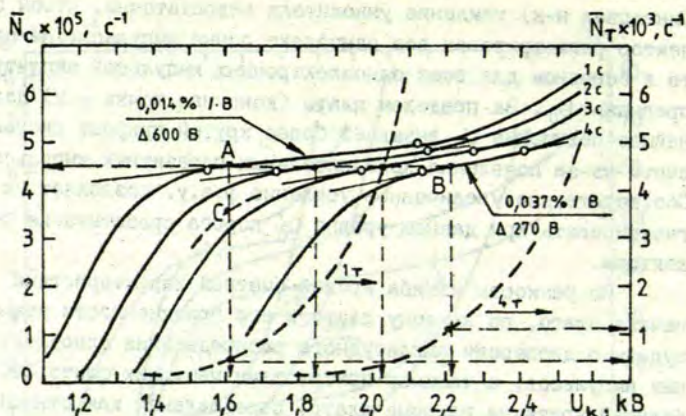
мые счетные характеристики темновых (τ) и световых (с) импульсов (см.рис.2). Под световыми импульсами понимаются все импульсы, регистрируемые при освещенном ф.э.у. и включающие как сигнальные одноэлектронные, так и темновые импульсы, и скоррелированные с сигналом импульсы помех.

Световые счетные характеристики дают информацию о том, какое должно быть напряжение  $U_k$ , обеспечивающее достаточное усиление электронного умножителя для регистрации большинства из сигнальных одноэлектронных импульсов при данном включении ф.э.у. и при установленной величине нижнего порога амплитудной дискриминации  $U_0$  селектора. Например, для кривой 3с (см.рис.2) до начала так называемого участка плато

(интервал  $n-k$ ) усиление умножителя недостаточно, чтобы селектор регистрировал все одноэлектронные импульсы. На плато в основном для всех одноэлектронных импульсов амплитуды превышают  $U_0$ . За пределом плато (конечная точка -  $k$ ) дальнейшее повышение  $U_k$  вызывает более крутой прирост скорости счета из-за появления дополнительных паразитных импульсов. Соответственно увеличенное усиление ф.э.у. позволяет их регистрировать при данном уровне  $U_0$  порога срабатывания селектора.

По резкости изгиба кривой счетной характеристики в начале плато, по наклону плато и его протяженности можно судить о дисперсии амплитудного распределения одноэлектронных импульсов, а также о присутствии мешающих факторов. Небольшая крутизна наклона плато, определяемая как относительное изменение скорости счета на единицу роста напряжения ф.э.у. ( $S = 100 \cdot \Delta N / (N \cdot \Delta U_k)$ , %/В), и значительная протяженность плато ( $\Delta U_k = U_{kk} - U_{kn}$ ) косвенно свидетельствуют о том, что данный прибор в этих условиях эксплуатации имеет хорошее амплитудное разрешение одноэлектронных импульсов. Если счетная характеристика темновых импульсов тоже имеет подобные параметры, притом и небольшую среднюю скорость счета  $N_T$ , зависящую в основном только от температуры фотокатода, то темновые импульсы в пределах плато будут возникать от термоэмиссии электронов фотокатодом. Важно также, чтобы такие свойства сохранились во всем диапазоне допустимых нагрузок ф.э.у. и чтобы корреляция между сигналом и помехами была ничтожна. Тогда можно заключить, что электронный умножитель данного ф.э.у. функционирует нормально.

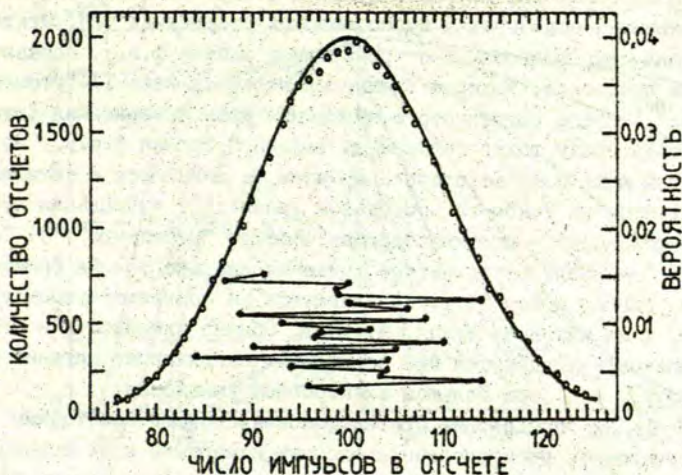
Кроме умножающих и шумовых, важными свойствами ф.э.у. являются также квантовая эффективность в нужной области спектра, величина площади и равномерность чувствительности рабочей части фотокатода, временное разрешение. Поэтому не всегда удается найти ф.э.у., удовлетворяющий по всем необходимым характеристикам. Часто неудовлетворительны бывают именно счетные характеристики, т.е. требуется более высокое отношение сигнал/помеха и стабильность регистрации.



Р и с. 3. Семейства счетных характеристик ФЭУ-IIВ, измеренные при пороге дискриминации 0,2 мВ (кривая 1), 0,6 мВ (2), 1,2 мВ (3) и 6,0 мВ (4). Температура 293 К.

В таких случаях следует попытаться найти лучший режим работы ф.э.у.

Более подробную информацию для анализа режима работы ф.э.у. дает семейство счетных характеристик, измеренных при нескольких фиксированных значениях порога дискриминации  $U_D$ . На рис.3, например, показаны семейства счетных характеристик одного прибора, снятые при  $U_D$  в пределах от 0,2 до 6,0 мВ относительно входа селектора. Величина  $U_D$  изменялась 30-кратно. В данном случае для компенсации снижения амплитудной чувствительности регистрации импульсов при повышении  $U_D$  необходимо увеличить усиление ф.э.у., т.е. напряжение  $U_k$  в пределах 600 В. При этом изменяются параметры счетных характеристик: протяженность плато уменьшается от 600 до 270 В, а крутизна увеличивается от 0,014 до 0,037 %/В. Скорость счета темновых импульсов в рабочих точках А и В имеют значения 400 и 1100 Гц, соответственно. Точка А при низком



Р и ч. 4. Статистическое распределение 50000 отсчетов измерений частоты следования импульсов ЦЭУ-79 (№ 432 72 г.) при среднем значении 100,5 Гц.

Кружками обозначены экспериментальные результаты, сплошной линией - кривая аппроксимации значений распределения Пуассона; точки, соединенные изломленной линией - выборка из 25 отсчетов.

$U_0 = 0,2$  мВ имеет лучшие счетные свойства. Но такой режим требует высокой чувствительности селектора и стабильности его порога дискриминации, повышенной помехозащиты от схемных шумов и внешних наводок. Ввиду того, что выполнение этих требований трудно обеспечить, следует искать компромисс между понижением усиления ф.э.у. и надежно реализуемой чувствительностью и стабильностью селектора.

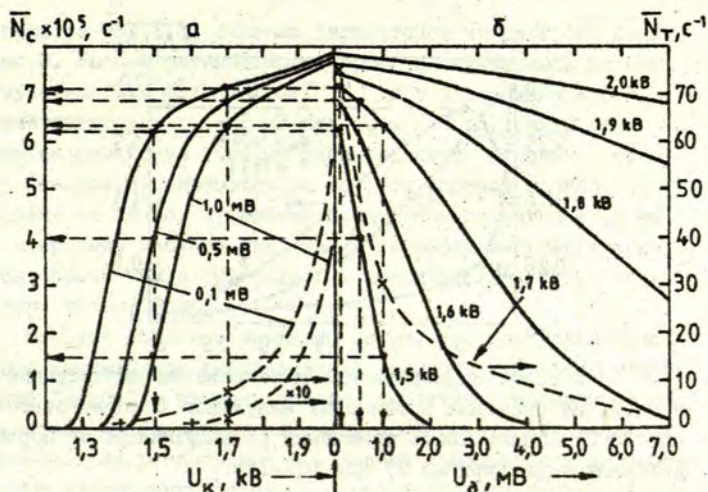
При измерении счетных характеристик и в случае отбора наиболее подходящих ф.э.у. внимание также нужно обращать на возможные дрейфы сигнала и статистику отсчетов. В определенной рабочей точке и в неизменных внешних условиях по-

ток световых и темновых импульсов ф.э.у. должен быть стабильным и подчиняться пуассоновской статистике [2]. Отклонения свидетельствуют о причастии к работе ф.э.у. паразитных процессов, которые внешне проявляются как: 1) "утомление" - после ступенчатого повышения уровня освещения фотокаатода сразу также повышается выходной сигнал ф.э.у., но затем в течение некоторого времени он снижается и устанавливается на каком-то постоянном уровне; 2) аномальная чувствительность - противоположная эффекту "утомление"; 3) "память" - после ступенчатого снижения или прерывания освещения сигнал сразу не устанавливается на соответствующем уровне, а за какое-то время затухает. Обычно линейность и стабильность ухудшаются при повышенных напряжениях питания ф.э.у., т.е. при большом электронном умножении.

Для определения статистических свойств необходимо производить многочисленные отсчеты измерений и их значения математически обрабатывать, что на достоверном уровне без непосредственного применения вычислительной техники практически не осуществимо. Нормальные статистические свойства потока импульсов ф.э.у. показаны на рис.4.

#### 4. Амплитудные распределения импульсов

Интегральные амплитудные распределения световых  $N_c(U_\delta)$  и темновых  $N_T(U_\delta)$  импульсов, измеренные как зависимости средней частоты следования импульсов от порога дискриминации  $U_\delta$  при нескольких значениях  $U_k$  в области плато на счетных характеристиках, по сравнению со счетными характеристиками, информацию о свойствах ф.э.у. содержат в более явном виде. Для наглядности на рис.5 приводится сопоставление счетных характеристик и интегральных амплитудных распределений. В принципе достаточно плотно (относительно  $U_\delta$ ) снятые семейства счетных характеристик содержат эквивалентную информацию, так как параметр  $U_\delta$  и аргумент  $U_k$  для амплитудных распределений лишь поменяны местами. Однако на практике



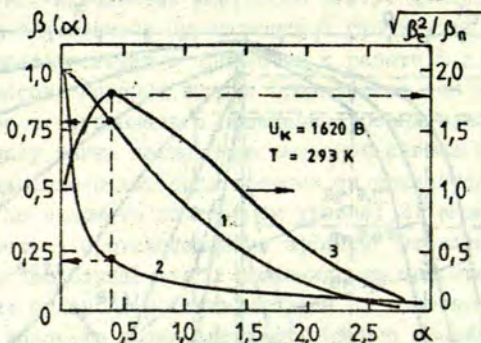
Р и с. 5. Сопоставление счетных характеристик (а) и интегральных амплитудных распределений (б) для ФЭУ-106.

труднее осуществить точную развертку уровня порога  $U_D$  дискриминации импульсов в широком амплитудном диапазоне, нежели изменять напряжение питания  $U_k$  ф.э.у. Амплитудные распределения, однако, количественные характеристики ф.э.у. дают в удобной для анализа его одноэлектронного режима работы форме.

Интегральные амплитудные распределения  $N_c(U_D)$  и  $N_T(U_D)$  можно легко нормировать относительно соответствующих средних частот следования импульсов  $N_{c0}$  и  $N_{T0}$ , измеренных при минимальном пороге дискриминации  $U_{D0}$ . Нетрудно из нормированного распределения  $N(U_D)/N_0$  определить среднее значение амплитуды импульсов как

$$\bar{U} = U_{D0} + \Delta U \cdot \sum_{i=0}^m N_i / N_0,$$





Р и с. 6. Нормированные интегральные амплитудные распределения световых и темновых импульсов (соответственно кривые 1 и 2) и зависимость отношения сигнал/помеха от порога дискриминации (кривая 3) для ФЭУ-118.

где  $N_i$  – последовательность значений средней частоты следования импульсов, измеренная при ступенчатом увеличении порога дискриминации  $U_{\partial i}$  с одинаковым шагом  $\Delta U$  в диапазоне от  $U_{\partial 0}$  до максимального значения  $U_{\partial m}$ , при котором вероятность регистрации импульсов становится пренебрежимо мала [5].

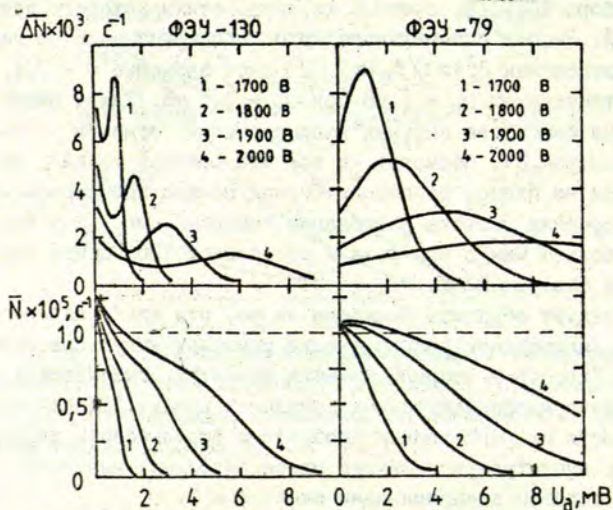
Если измеренное амплитудное распределение световых импульсов  $N_c(U_{\partial})$  содержит незначительную долю импульсов помех, то по приведенной формуле вычисленная величина средней амплитуды световых импульсов равна средней амплитуде одноэлектронных импульсов:  $U_c = U_e$  – реперному параметру одноэлектронного режима ф.э.у. В таком случае выгодно перейти на нормированный порог амплитудной дискриминации  $\alpha = U_{\partial} / U_e$  и тогда  $N_c(\alpha) / N_{c0} = \beta_c(\alpha)$  и  $N_n(\alpha) / N_{n0} = \beta_n(\alpha)$ , где  $\beta_c(\alpha)$  и  $\beta_n(\alpha)$  – нормированные интегральные распределения амплитуд импульсов сигнала и шумовых помех [2]. Далее при определении одноэлектронных характеристик фотоумножителей и для оптимизации их одноэлектронного режима работы таким образом можно использовать принципы, изложенные в работе [2].

В качестве примера на рис.6 приводятся измеренные и соответствующим образом обработанные кривые  $\beta_c(\alpha)$  и  $\beta_n(\alpha)$

для прибора ФЭУ-118, счетные характеристики которого даны на рис.3. Расчет оптимального порога дискриминации по максимуму отношения  $\beta_c^2(\alpha)/\beta_n(\alpha)$  [2] дает значение  $\alpha = 0,4$ , что соответствует  $U_0 = 1$  мВ при  $U_k = 1,6$  кВ. Такой режим работы на семействе счетных характеристик отмечен точкой С (см.рис.3). Несмотря на то, что рабочая точка С не находится на плато, отношение сигнал/помеха повышается на 50%, а средняя частота следования темновых импульсов снижается больше чем в три раза и составляет 120 Гц при температуре ф.э.у. 293 К.

Следует обратить внимание на то, что для указанного прибора амплитудное распределение темновых импульсов имеет длинный "хвост" в сторону больших амплитуд, указывающий на присутствие многоэлектронных импульсов помех. Для понижения вероятности их регистрации необходимо использовать дифференциальную амплитудную селекцию одноэлектронных импульсов с верхним порогом дискриминации около  $\alpha = 2$ .

Часто для характеристики одноэлектронных свойств ф.э.у. используются дифференциальные амплитудные распределения импульсов. Кривые дифференциальных распределений дают наглядную информацию - явный одноэлектронный пик показывает на хорошую эффективность умножения первых каскадов импульсов ф.э.у. Но важной характеристикой также необходимо считать возможное присутствие экспоненциальной ветви в области малых амплитуд, при наличии которой на склоне одноэлектронного пика образуется так называемая "долина". Если экспоненциальная ветвь не появляется из-за регистрации ложных импульсов вследствие звона измерительных цепей (что, разумеется, необходимо устранить, см.п.2), то такой ф.э.у. имеет относительно плохие счетные характеристики, что более наглядно отражается на интегральных амплитудных распределениях. Например, на рис.7 для приборов ФЭУ-130 и ФЭУ-79 сопоставлены дифференциальные и интегральные амплитудные распределения световых импульсов, которые измерены при четырех значениях  $U_k$  и постоянной освещенности фотокатодов. Из дифференциальных распределений трудно определить, насколько



Р и с. 7. Дифференциальные и интегральные амплитудные распределения одноэлектронных импульсов ФЭУ-130 и ФЭУ-79.

изменение  $U_k$  меняет эффективность регистрации импульсов. Для этого необходимо вычислить интегралы. Но с достаточной точностью это возможно лишь тогда, когда измерено все распределение и дифференциальная нелинейность небольшая. Интегральные распределения непосредственно дают нужную информацию, притом для любого порога дискриминации. Как видно, импульсы экспоненциальной ветви значительно ухудшают счетные свойства ФЭУ-130.

Интегральные амплитудные распределения импульсов измерять проще дифференциальных. Измерения можно осуществить с минимальным мертвым временем, что позволяет контролировать амплитудные распределения одноэлектронных импульсов ф.э.у. во всем динамическом диапазоне счета фотонов. Для измерения дифференциальных амплитудных распределений в широком динамическом диапазоне скорости счета импульсов применяются так

называемые одноканальные амплитудные анализаторы - дифференциальные дискриминаторы с узким окном амплитудной селекции. Но они, как правило, имеют значительную нелинейность. Поэтому измерения с помощью дифференциальных дискриминаторов распределения пригодны в основном для качественных оценок. Следует также заметить, что положение максимума одноэлектронного пика в дифференциальных амплитудных распределениях только для симметричных распределений соответствует среднему значению амплитуды. Реальные ф.э.у. обладают явно асимметричными амплитудными распределениями одноэлектронных импульсов. Ввиду этого величину  $U_e$  приходится вычислять, что проще производить по численным значениям интегрального распределения [5].

В исследованиях амплитудных распределений одноэлектронных импульсов ф.э.у. и их шумов обычно применяются многоканальные амплитудные анализаторы. Они фактически рассчитаны для сцинтилляционных радиоспектрометрических измерений, когда в режиме полного сбора заряда на выходной нагрузке ф.э.у. регистрируются многоэлектронные импульсы микросекундной длительности. Многоканальные анализаторы имеют большое мертвое время - десятки микросекунд. Применение их для одноэлектронных измерений связано с рядом серьезных ограничений. Необходимо использовать нагрузку ф.э.у. с большой постоянной времени интегрирования, что не соответствует реальному режиму работы ф.э.у. в счетчиках фотонов. Из-за мертвого времени и наложений, при которых искажается амплитудный спектр импульсов, значительно ограничивается допустимая максимальная частота регистрации импульсов.

Измеренные амплитудные распределения одноэлектронных импульсов с многоканальным анализатором и быстродействующим амплитудным селектором для того же ф.э.у. в одинаковых условиях (кроме параметров нагрузки) обычно не совпадают. В режиме полного сбора заряда дисперсия амплитудного распределения одноэлектронных импульсов имеет меньшую величину. Это связано с тем, что форма одноэлектронных импульсов тока в среднем сохраняет свой вид. При осциллографировании

одиночных импульсов можно наблюдать заметные искажения их формы, особенно вершины, что является следствием различия времени прохождения вторичными электронами начальной части диодной системы ф.э.у. Таким образом, дополнительная дисперсия амплитуды одноэлектронных импульсов тока происходит из-за флуктуаций формы импульсов, но отдельными импульсами перенесенная величина заряда имеет относительно меньшие отклонения от среднего значения.

Рассмотренная неоднозначность измерений одной из основных характеристик одноэлектронных ф.э.у. - амплитудного распределения импульсов, применяя различные средства измерений, подтверждает положение, что в настоящей стадии развития методики счета фотонов, когда имеется еще много нерешенных метрологических проблем, измерения и контроль одноэлектронных характеристик ф.э.у. должны осуществляться при помощи той же аппаратуры, которая используется для основной цели, т.е. для счета фотонов.

### 5. Источники шумовых импульсов фотоумножителей

Все шумовые импульсы ф.э.у. в зависимости от происхождения и влияния на погрешность регистрации фотонов целесообразно разделить на две принципиально различающиеся категории: помехи стационарные и помехи динамические [6]. Различие заключается в следующем.

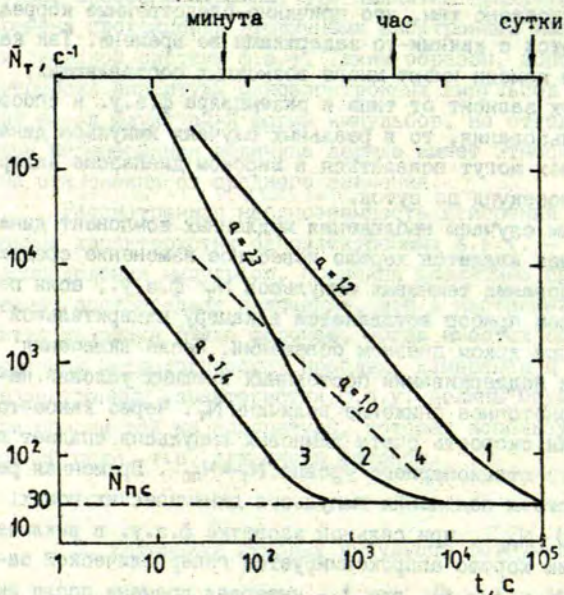
Составляющие стационарных помех не скоррелированы с сигналом. Вероятность их возникновения зависит от типа и экземпляра ф.э.у. и от условий эксплуатации: напряжения на электродах, температуры и т.п. При стабилизации условий работы ф.э.у. влияние импульсов стационарных помех имеет случайный характер. Величина их средней частоты появления  $N_{\text{ш}}$  ухудшает соответственно только порог обнаружения излучения [2].

Динамические помехи возникают под действием излучения на ф.э.у. Они, кроме влияния на обнаружительную способ-

ность и линейность измерения интенсивности излучения, добавляют еще искажения регистрации фотонов во времени. Последнее обусловлено тем, что причинно-следственные корреляции проявляются с какими-то задержками во времени. Так как динамические помехи имеют много возможных составляющих, вклад которых зависит от типа и экземпляра ф.э.у. и способа его использования, то в реальных случаях импульсы динамических помех могут появляться в широком диапазоне задержек - от наносекунд до суток.

Простым случаем наблюдения медленных компонент динамических помех является хорошо известное изменение средней частоты следования темновых импульсов  $N_T$  ф.э.у., если перед измерением прибор вставляется в камеру измерительной аппаратуры при ярком дневном освещении. После включения ф.э.у. и при поддержании постоянных внешних условий наблюдается монотонное снижение величины  $N_T$ . Через какое-то время средняя скорость счета темновых импульсов спадает до определенной стационарного уровня:  $N_T \rightarrow N_{nc}$ . Временная релаксация частоты появления импульсов динамических помех:  $N_{nd}(t) = N_T(t) - N_{nc}$ , при сильной засветке ф.э.у. в выключенном состоянии хорошо аппроксимируется гиперболической зависимостью:  $N_{nd}(t) \sim t^{-\alpha}$ , где  $t$  - интервал времени после окончания засветки,  $\alpha$  - показатель крутизны (см.рис.8, кривую 1). Начальная величина  $N_{nd}$  обусловлена интенсивностью, спектральным составом и дозой засветки, а также свойством конкретного прибора. Особой чувствительностью к фотовозбуждению выделяются приборы со стеклянными входными окнами и с прозрачными баллонами.

Источником динамических помех может быть люминесценция технологических материалов ф.э.у., возбуждаемая регистрируемым излучением [1]. Свет люминесценции с определенной кинетикой затухания вызывает дополнительную фотоэмиссию от фотокатода. Для ФЭУ-79 затухание люминесценции входного окна, измеренное другим ф.э.у., соответствует гиперболической зависимости с  $\alpha = 1,0$  (см.рис.8, кривая 4). Такой закон затухания люминесценции характерен рекомбинационному процессу



Р и с. 8. Затухание частоты появления темновых импульсов ФЭУ-79 до уровня стационарных помех  $N_{nc}$  после засветки дневным светом (кривые 1-3): питание выключено во время засветки длительностью  $10$  с (1); без выключения питания (2 и 3), длительность засветки соответственно  $10$  и  $1$  с, но интенсивность уменьшена до  $10^{10}$  фотонов/с. Затухание люминесценции входного окна ф.э.у., возбужденной солнечным светом (кривая 4).

возбужденных состояний пространственно разделенных дырочно-акцепторных пар в стекле.

Различие показателей крутизны затухания люминесценции ( $\alpha = 1,0$ ) и динамических помех ( $\alpha = 1,2$ ) свидетельствует о том, что, кроме фотолюминесценции входного окна, существуют еще другие паразитные процессы, в том числе происходящие при электронном умножении в диодной системе. Например,

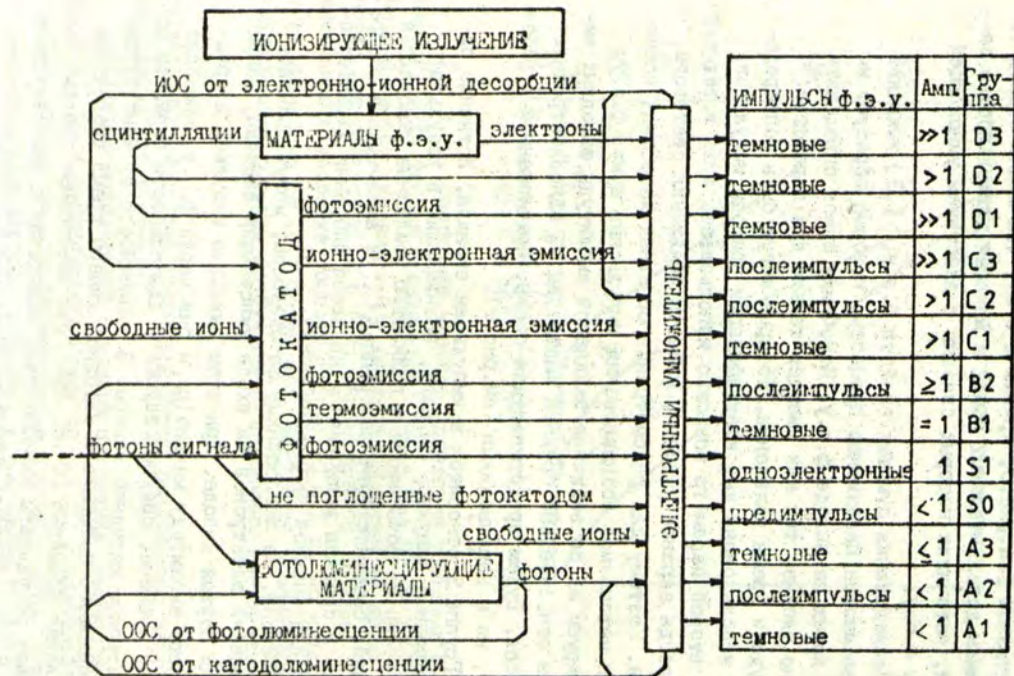
после интенсивной засветки фотокатода в рабочем состоянии ф.э.у. релаксация динамических помех происходит с еще большей крутизной (см. рис. 8, кривые 2 и 3), что можно объяснить появлением дополнительных помех с меньшей длительностью затухания, источники которых связаны с действием умножающей системы ф.э.у.

Исследования шумовых свойств ф.э.у. [1,3] выявляют довольно многие паразитные процессы, которые образуют импульсы помех на выходе ф.э.у. Источники шумов определить довольно сложно, так как имеются только два параметра: амплитуда и время появления, которые могут быть непосредственно использованы для идентификации природы импульсов. Притом второй параметр возможно использовать лишь в тех случаях, когда заранее известны моменты появления светового сигнала. Поэтому для рассмотрения основных известных источников и механизмов возникновения импульсных шумов ф.э.у. сгруппируем их по величине ожидаемой амплитуды выходных импульсов относительно средней амплитуды  $U_e$  одноэлектронных импульсов. Будем придерживаться схемы, предложенной в работе [3], но с дополнениями (см. рис. 9).

Группа S относится к импульсам сигнала. Истинные одноэлектронные импульсы сигнала, возникающие в результате фотоэмиссии на фотокатоде и полностью усиленные умножающей системой, соответствуют подгруппе S1. Их амплитудное распределение и средняя величина  $U_e$  являются опорными характеристиками для анализа импульсов помех.

Фотоны, не поглощенные фотокатодом, могут вызывать фотоэмиссию электронов на входе умножающей системы, например, на первом диоде. При этом выходные импульсы в среднем имеют амплитуду меньше  $U_e$ , и они через ф.э.у. проходят быстрее времени, соответствующего длительности перелета фотоэлектроном катодной камеры. В зависимости от конструкции и ускоряющего потенциала катодной камеры время опережения составляет примерно 10 нс. Эти, так называемые предимпульсы, искажают результаты кинетических измерений с наносекундным разрешением. Поэтому импульсы подгруппы S0 следует отнести к динамическим помехам.





Р и с. 9. Схема основных источников шумовых импульсов ф.э.у.

При выдержке ф.э.у. в темноте под напряжением в неизменных условиях средняя частота появления шумовых импульсов снижается, как это было уже показано, до определенного стационарного уровня  $N_T = N_{nc}$ . Если нормированные амплитудные распределения темновых и световых импульсов совпадают и скорость счета темновых импульсов значительно не увеличивается при повышении напряжения ф.э.у., то основным источником стационарных шумов является термоэмиссия электронов с фотокатода, что соответствует подгруппе В1. Это можно уточнить путем изменения температуры фотокатода - термоэмиссия экспоненциально зависит от температуры.

При охлаждении ф.э.у. скорость следования темновых импульсов может стабилизироваться на определенном минимальном уровне. В таком случае должны наблюдаться импульсы с большой амплитудой - многоэлектронные импульсы группы D. Они возникают от ионизирующего излучения природных радионуклидов и космических лучей. Воздействие ионизирующего излучения на конструктивные материалы ф.э.у. может вызывать прямую эмиссию электронов в поле действия умножающей системы или косвенную - посредством сцинтилляций и излучения Черенкова - Бавилова, когда эти вспышки прямо или через отражения попадают на фотоэмитирующие поверхности ф.э.у. Импульсы помех группы D появляются относительно редко ( $< 1$  Гц).

К категории стационарных помех относятся также подгруппы А1, А3 и С1 (см. рис. 9). Термо- и автоэлектронная эмиссия электронов, возникающая и рассредоточенная в диодной системе, проявляется в амплитудных распределениях темновых импульсов как экспоненциально возрастающая ветвь в сторону меньших амплитуд, так как умножение электронов экспоненциально зависит от числа каскадов умножения. Ионы остаточных газов, образующиеся в электрическом поле ф.э.у., увеличивают дисперсию амплитуд темновых импульсов и флуктуации отсчетов ввиду того, что выход ионно-электронной эмиссии имеет большой разброс. Особенно это заметно при повышенном напряжении, когда возникают лавинообразные газоразрядные явления, что свидетельствует о плохом качестве вакуума в баллоне ф.э.у. Для таких приборов статистика отсчетов значительно отличается от пуассоновской.

Динамические помехи в основном образуются механизмами оптической и ионной обратных связей (ООС и ИОС, соответственно).

Послеимпульсы ООС (подгруппы А2 и В2) могут возникать несколькими путями. Во-первых, как отмечено, при возбуждении непосредственно регистрируемым излучением фотолуминесцирующих конструктивных материалов ф.э.у., послесвечение которых может воздействовать на фотокатод и вызывать дополнительные фотоотсчеты с запаздыванием. Во-вторых, послеимпульсы образуются от катодолуминесценции поверхностей электродов умножающей системы, возбуждаемой ударами электронов в процессе развития лавины выходного импульса ф.э.у. Плотность электронов в лавине возрастает по каскадам умножения. Таким же образом должна возрастать интенсивность катодолуминесценции, достигая максимум в последнем каскаде, после чего суммарная интенсивность монотонно затухает. Оптическое излучение в обратном пути на фотокатод затрачивает пренебрежимо малое время (доли наносекунды) по сравнению с длительностью задержки прохождения электронной лавины через ф.э.у. (30-70 нс). Но в зависимости от конструкции прибора и места возникновения катодолуминесценции эффективность ООС значительно различается. Возможно только предположить, что во временных распределениях послеимпульсов максимумы от ООС катодолуминесцентной природы имеют задержки, не превышающие времени прохождения сигнала в ф.э.у. В-третьих, нельзя исключить и более сложный механизм ООС - возбуждение фотолуминесцирующих конструктивных материалов излучением катодолуминесценции электродов ф.э.у. с последующим попаданием послесвечения на фотокатод.

Послеимпульсы ИОС (подгруппы С2 и С3) образуют сложные временные распределения с выраженными максимумами, в которых амплитуды послеимпульсов различаются и могут быть больше одноэлектронных [6]. Объясняется это тем, что электроны, ускоряющиеся между электродами ф.э.у. до энергии порядка 100 эВ, могут попасть в молекулы остаточных газов (вероятнее всего в адсорбированных на поверхностях электро-

дов) и вызвать их ионизацию и десорбцию. Положительные ионы устремляются в сторону отрицательного электрода и при столкновении с большой вероятностью выбивают несколько вторичных электронов на один ион или упруго отражаются, или порождают другие ионы. Если это происходит на входе умножающей системы, то вторичные электроны образуют на выходе ф.э.у. послеимпульсы с амплитудой, равной или превышающей одноэлектронную.

Задержки послеимпульсов ИОС в основном обусловлены сравнительно длительными временами перелета междуэлектродных расстояний ионами, масса которых на 3-5 порядков превышает массу электрона, и в случае действия самых легких ионов составляет примерно 10<sup>-9</sup> нс. Дискретность структуры умножающей системы (для обычных ф.э.у.), широкий спектр масс различных ионов всевозможных остаточных газов и множество вариантов образования ИОС в итоге создают для каждого типа и экземпляра ф.э.у. более или менее сложную картину временного распределения послеимпульсов.

Послеимпульсы могут с вероятностью, не меньшей, чем одноэлектронные импульсы, вызывать появление с некоторой задержкой новые послеимпульсы. Таким образом, при сильных засветках ф.э.у., имеющих значительную вероятность появления разного рода послеимпульсов, полная релаксация динамических помех происходит в течение длительного времени.

## 6. Выявление динамических помех

Практика использования одноэлектронного режима ф.э.у. в кинетических исследованиях показывает, что после быстрых перепадов интенсивности излучения на два-три и более порядков величины наблюдаемые изменения сигнала у разных типов и экземпляров ф.э.у. значительно отличаются вследствие неодинаковой вероятности появления динамических помех. Это также относится к токовому режиму работы ф.э.у., но при этом динамический диапазон измерения входного тока ф.э.у. в первую очередь ограничивается собственными помехами измерительной аппаратуры.

Для прямого обнаружения искажений сигнала помехами необходимо определить реакцию ф.э.у. на импульсы излучения известными характеристиками. Лучше всего подходил бы источник коротких световых импульсов, генерирующий в интересующей области спектра так называемые дельта-импульсы, т.е. импульсы с конечной энергией излучения, но с бесконечно малой длительностью. Этим целям удовлетворяет реальная длительность дельта-импульсов, которая на порядок короче длительности одноэлектронных импульсов тока ф.э.у., а энергия излучения в импульсе должна обеспечить лишь "одноэлектронную засветку" - вызвать появление не более одного одноэлектронного импульса на выходе ф.э.у. Особенно важно, чтобы вероятность случайной эмиссии фотонов источником в интервалах между импульсами была нулевой и моменты излучения были точно определены.

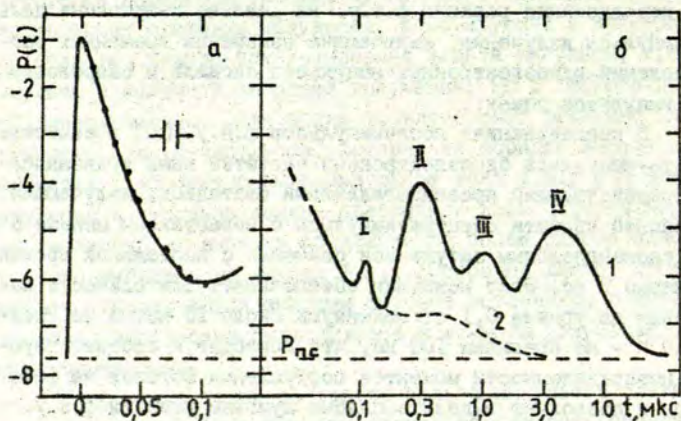
В принципе такой генератор дельта-импульсов света позволил бы простым способом определить вероятность появления помех - измерением среднего отношения скорости счета импульсов помех в интервалах между световыми импульсами к частоте сигнальных импульсов во временных выборках одноэлектронной засветки. Однако на практике обнаруживается ряд трудностей, не позволяющих так просто получить достоверные результаты. Во-первых, мы пока не располагаем идеальным генератором дельта-импульсов. Существующие импульсные излучатели имеют кое-какие "хвосты" затухания излучения, для определения и целенаправленного снижения которых нужен идеальный фотоприемник, т.е. ф.э.у. без динамических помех. Такую взаимосвязь, образующую логически замкнутый круг, преодолеть можно только последовательными приближениями. Во-вторых, вероятные моменты появления импульсов динамических помех сосредоточены во времени неоднородно, но непрерывно, часть которых налагается на импульсы сигнала. Время прохождения сигнала в ф.э.у. флуктуирует, зависит от напряжения питания и места освещения фотокатода. Поэтому с помощью временной выборки, синхронизированной с моментом излучения генератора дельта-импульсов, однозначно выделить сигнал из помех не-

возможно. При таких обстоятельствах требуются более подробные исследования реакции ф.э.у. на реально получаемые дельта-импульсы излучения, включающие измерения временных распределений одноэлектронных импульсов сигнала и сопровождающих импульсов помех.

В исследованиях послеимпульсов ф.э.у. [6] в качестве дельта-импульсов одноэлектронной засветки нами применялся быстродействующий арсенидогаллиевый светодиод, излучающий в красной области спектра импульсы с нарастанием меньше 5 нс и экспоненциальным затуханием свечения с постоянной времени примерно 7 нс. Этот источник обеспечивает длительность излучения на уровне 0,1 от максимума около 15 нс, а на уровне  $10^{-5}$  - не превышая 100 нс, что приводит к соответствующей неопределенности моментов поступления фотонов на фотокатод и позволяет выделить слабые шумовые реакции ф.э.у. лишь после задержки 100 нс относительно момента регистрации максимума световых импульсов.

Одноэлектронная засветка реализуется ослаблением импульсного излучения светодиода до интенсивности, при которой во временной выборке засветки в среднем регистрируется приблизительно один фотон на десять световых импульсов. При этом вероятность регистрации больше одного фотона в цикле излучения, определяемая пуассоновским распределением, достаточно низкая - примерно 0,5%. Период повторения световых импульсов выбирается таким, чтобы в течение до следующей засветки динамические помехи успели релаксировать.

Типичное временное распределение выходных импульсов ФЭУ-79 на уровне дискриминации  $U_d = 0,2U_e$  ( $\alpha = 0,2$ ) при частоте повторения одноэлектронной засветки 10 кГц показано на рис.10. Кривая на графике (а) отображает кинетику высвечивания светодиода с временным разрешением 10 нс, что соответствует ширине временного канала применяемой аппаратуры статистического счета импульсов. Кривая распределения круто нарастает с уровня вероятности регистрации стационарных импульсов помех  $P_{nc}$  до максимума в течение одного временного канала, после чего экспоненциально затухает. Отклонения



Р и с. 10. Временные распределения дифференциальной вероятности  $P(t)$  регистрации выходных импульсов ФЭУ-79, приведенной к интервалу 10 нс, относительно одного светового импульса при одноэлектронной засветке: распределение во времени импульса излучения арсенидогаллиевого светодиода (а); распределение послеимпульсов (б). Кривая 1 - зарегистрированы все импульсы, 2 - исключены скоррелированные послеимпульсы.

от начальной крутизны экспоненты наблюдаются ниже уровня 0,001, что соответствует задержке  $t > 50$  нс от пика регистрации излучения светодиода. При  $t = 100$  нс образуется минимум, а дальше вероятность регистрации импульсов начинает возрастать, что явно указывает на присутствие послеимпульсов. В интервале  $t = 50-100$  нс тоже регистрируются послеимпульсы, так как для других экземпляров ФЭУ-79 крутизна спада распределения и уровень минимума отличаются. Но определить их вклад и природу не позволяет хвост затухания излучения светодиода.

Полное распределение послеимпульсов представлено на рис.10,б (см.кривую I) в логарифмическом масштабе времени. Оно содержит четыре основные полосы с пиками I-IV. Послеимпульсы в этом диапазоне задержек подобным образом распределяются и для других экземпляров ФЭУ-79, а также для ФЭУ-106 и -136, которые имеют схожие конструкции. Но вероятность появления послеимпульсов и их распределения в полосах значительно отличается для разных приборов и зависит от условий их эксплуатации. Для упомянутых ф.э.у. характерно, что

1) вероятность появления послеимпульсов уменьшается ниже уровня стационарных помех  $P_{nc}$  после задержки не более 20 мкс;

2) во всех полосах присутствуют многоэлектронные импульсы;

3) послеимпульсы узкой полосы пика I слабоскоррелированы с выходными импульсами сигнала и исчезают при освещении только центра фотокатода;

4) послеимпульсы полос II и III с импульсами сигнала скоррелированы в большей мере, а послеимпульсы широкой полосы IV - полностью.

Перечисленные свойства позволяют сделать выводы, что послеимпульсы пика I возникают под действием ИОС с поверхности первого электрода катодной камеры, который ограничивает рабочую площадь фотокатода. Фотоэлектроны, вылетающие с периферии фотокатода и не попадающие в умножающую систему, отсекаются ограничивающим электродом и не образуют выходные импульсы сигнала. Удары электронами его поверхности, на которой адсорбированы молекулы остаточных газов, с некоторой вероятностью образуют свободные положительные ионы. Последние в электрическом поле ускоряются в обратном направлении и от фотокатода выбивают вторичные электроны, которые на выходе ф.э.у. образуют послеимпульсы. Расчеты показывают [6], что за образование пика I ответственны ионы атомарного водорода.

Послеимпульсы остальных полос также возникают вследствие ИОС, но с поверхностями электродов умножающей системы,



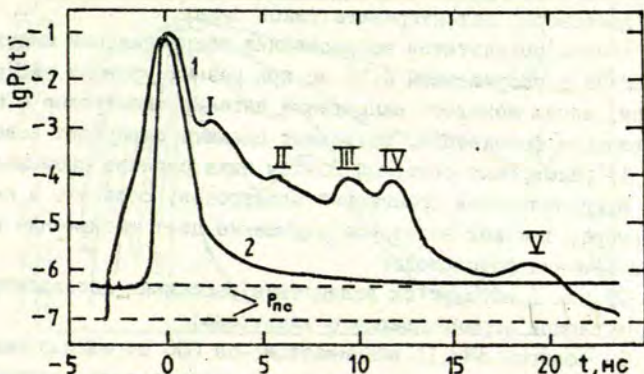
так как первичные фотоэлектроны в основном образуют выходные импульсы, с которыми коррелируют послеимпульсы. Не вникая во все подробности возникновения послеимпульсов, можно заключить, что главным источником импульсов динамических помех в интервале задержек от 0,1 до 20 мкс для данных типов ф.э.у. является ИОС. Это характерно и для других типов ф.э.у. с дискретной структурой умножающей системы.

Скоррелированные послеимпульсы можно обнаружить и исключить, применяя для измерения временных распределений выходных импульсов ф.э.у. многоканальный статистический счет временных интервалов появления импульсов. (Последовательный счет во временных выборках для этого не подходит.) Простейший способ позволяет в каждом цикле измерять время появления только одного первого импульса [7]. До сих пор этот способ с некоторыми модификациями (важнейшая - автоматическая коррекция наложений импульсов [8]) широко применяется у нас в кинетических исследованиях под названием однофотонный статистический метод [9,10]. При синхронизации запуска отсчета времени перед началом импульсного излучения измеряется время появления только для первого выходного импульса ф.э.у. и регистрируется, если в данном цикле больше импульсов не последовало во временном диапазоне измерения распределения. При таких условиях снята кривая 2 на рис.10,б. Если отсчет времени запускается после импульсного излучения, то регистрируются послеимпульсы. Корреляцию импульсов подробнее исследовать позволяет специально разработанный многоканальный регистратор временных распределений импульсов, который в каждом цикле измеряет время прихода до трех импульсов и имеет несколько режимов статистического накопления отсчетов \*.

Для исследования более быстрых компонент динамических помех ф.э.у. мы применяли генератор субнаносекундных свето-

---

\* См. наст. сб. с. 55. Тибергс Я.Э., Вейнберг Ю.К., Янсонс Я.Л., Ванга А.Я., Гарденак Э.Э. Комплект приборов статистического счета фотонов во времени.



Р и с. II. Временные распределения импульсов ФЭУ-79 (кривая I) и ФЭУ-165 (кривая 2) при одноэлектронной засветке субнаносекундными импульсами карбидокремниевое светодиода.

вых импульсов, разработанный на основе предпробойного излучения карбидокремниевое светодиода<sup>\*</sup>. На рис. II показана реакция ФЭУ-79 на субнаносекундные дельта-импульсы одноэлектронной засветки с временным разрешением 0,25 нс в диапазоне до 30 нс. Для сравнения приводится временное распределение фотонов генератора субнаносекундных импульсов, измеренное прибором ФЭУ-165 с электронным умножителем на микроканальных пластинах [ II ], который имеет низкую интегральную вероятность появления импульсов динамических помех ( $< 0,1\%$ ). Несмотря на то, что для примененного ФЭУ-165 уровень стационарных помех  $P_{nc}$  в пять раз выше, чем у ФЭУ-79, кинетику высвечивания импульсов светодиода он детектирует правдо-

<sup>\*</sup> См. наст. сб. с. 70. Плаудис А.Э., Лимеж Г.К., Генкин А.М., Киселев В.С. Генератор субнаносекундных световых импульсов для определения временных характеристик фотоприемников.

подобно в динамическом диапазоне не менее 4 десятичных порядков. Прибор ФЭУ-79 даже в пределах 2-х порядков не способен достоверно детектировать такой сигнал.

Анализ результатов исследования распределений импульсов ФЭУ-79 с разрешением 0,25 нс при разных уровнях дискриминации, когда менялось напряжение питания электродов и место освещения фотокатода, позволяет сделать следующие выводы:

1) расширение основной полосы пика сигнала происходит из-за неидентичности траекторий электронов, особенно в катодной камере, так как некоторое улучшение дает уменьшение площади освещения фотокатода;

2) пик I образуется вследствие рассеяния фотоэлектронов диафрагмой ограничивающего электрода;

3) пологий пик II возникает из-за ООС от катодолюминесценции ограничивающего электрода, возбуждаемой ударами фотоэлектронов: пик значительно возрастает при освещении периферии фотокатода;

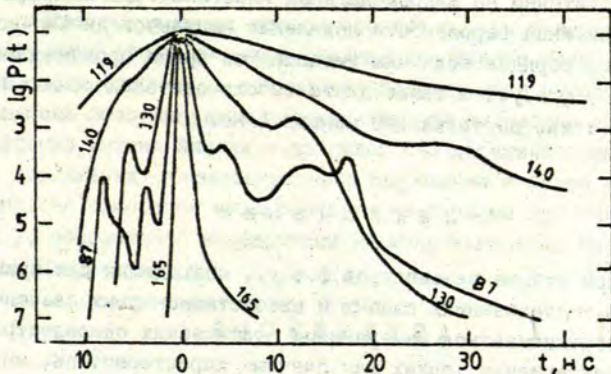
4) пики III и IV вызывают ООС от катодолюминесценции фокусирующего электрода и первого динода;

5) пик V - катодолюминесцентная ООС второго динода;

6) послеимпульсы пиков I-IV не коррелируют с импульсами основного пика, а для пика V заметны корреляции;

7) вероятность появления послеимпульсов в интервале задержек от 25 до 75 небольшая.

На основе полученных результатов можно обобщить, что для ФЭУ-79 основными причинами динамических помех являются плохая фокусировка фотоэлектронов на вход умножающей системы, оптическая обратная связь (в интервале до 25 нс) и ионная обратная связь (в интервале от 75 нс до 20 мкс). То же самое относится и к ФЭУ-106, а ФЭУ-136 имеет фокусировку несколько хуже. Хотя для этих типов ф.э.у. интегральная вероятность появления послеимпульсов относительно одного сигнального одноэлектронного импульса в среднем составляет примерно единицы процентов, она все же является индивидуальной характеристикой каждого экземпляра ф.э.у., его режима и предыстории эксплуатации.



Р и с. 12. Временные распределения импульсов приборов типа ФЭУ-87, -119, -130, -140 и -165 при одноэлектронной засветке субнаносекундными импульсами.

Известно, что одноэлектронные характеристики улучшаются в течение времени непрерывной работы ("тренировки") ф.э.у. [1]. Исследования показали, что при тренировке уменьшается ионная обратная связь. Вследствие электронной бомбардировки рабочие поверхности электродов очищаются от адсорбированных молекул остаточных газов, которые потом адсорбируются на другие поверхности или захватываются геттером.

Другие широко известные типы приборов с дискретными динодами как, например, ФЭУ-87, -130, -140 по сравнению с ФЭУ-79 имеют худшее временное разрешение на одноэлектронном уровне. Характерно, что у этих приборов, кроме послеимпульсов, также наблюдаются и предимпульсы (см. рис. 12). Интегральная вероятность появления импульсов динамических помех несколько выше, а для некоторых экземпляров ФЭУ-87 она достигает даже 25%.

Фотоэлектронные умножители классической конструкции с дискретными динодами по динамическим свойствам значительно

уступают приборам нового поколения типа ФЭУ-165 с электронным умножителем на микроканальных пластинах. Для последних, кроме снижения вероятности появления импульсов динамических помех, на порядок величины уменьшается время прохождения сигнала в ф.э.у., а также длительность одноэлектронных импульсов тока, составляющее меньше 1 нс.

### З а к л ю ч е н и е

При отборе экземпляров ф.э.у., подходящих для применения в исследованиях слабых и квазистационарных свечений, можно ограничиваться измерениями статических одноэлектронных характеристик, таких как счетные характеристики, интегральные амплитудные распределения импульсов, статистические распределения отсчетов.

Счетные характеристики дают предварительную информацию относительно диапазона напряжения питания ф.э.у., при котором усиление достаточно для регистрации одноэлектронных импульсов применяемым селектором. Более подробную информацию содержат интегральные амплитудные распределения выходных импульсов, которые позволяют найти оптимальный одноэлектронный режим работы ф.э.у. для достижения максимального отношения сигнал/помеха. Важной характеристикой является степень соответствия статистики отсчетов относительно пуассоновской.

Для кинетических исследований оптических излучений первостепенную важность имеют динамические характеристики ф.э.у.:

- 1) длительность одноэлектронных импульсов,
- 2) флуктуации времени прохождения сигнала в ф.э.у.,
- 3) временное распределение и интегральная вероятность появления импульсов динамических помех.

Временные параметры формы одноэлектронных импульсов измеряются осциллографированием, а динамические искажения

сигнала - при помощи дельта-импульсов излучения и статистического накопления временных распределений выходных импульсов ф.э.у.

Опыт показывает, что отобранные ф.э.у. традиционной конструкции обеспечивают временное разрешение статистического счета фотонов до единиц наносекунд, но в наносекундном диапазоне послеимпульсы ограничивают динамический диапазон измерения интенсивности в пределах 2-3 десятичных разрядов. Для достижения субнаносекундного разрешения и более широкого диапазона измерения интенсивности необходимо применять ф.э.у. современной конструкции на микроканальных пластинах.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ветохин С.С., Гулаков И.Р., Перцев А.Н., Резников И.В. Одноэлектронные фотоприемники. - М., 1986. - 160 с.
2. Янсонс Я.Л. Применение фотоэлектронных умножителей для счета фотонов // Методы и аппаратура для исследований люминесценции. - Рига, 1985. - С.3-39.
3. Meade M.L. Instrumentation Aspects of Photon Counting Applied to Photometry // J.Phys.E: Sci.Instrum. - 1981. - Vol.14. - P.909-918.
4. Тибергс Я.Э., Янсонс Я.Л. Универсальный селектор одноэлектронных импульсов фотоэлектронных умножителей // Методы и аппаратура для исследований люминесценции. - Рига, 1985. - С.40-57.
5. Янсонс Я.Л. Автоматическое измерение средней амплитуды импульсов фотоэлектронных умножителей // Автоматизация научных исследований. - Рига, 1982. - С.85-99.
6. Янсонс Я.Л., Кристин А.А. Послеимпульсы в фотоэлектронных умножителях, применяемых в сцинтилляционной технике // Распространенность изотопов в окружающей среде и астрофизические явления. - Л., 1984. - С.130-144.
7. Боллинджер и Томас. Измерение времени высвечивания сцинтилляторов методом задержанных совпадений // Приборы для научн.исследований. - 1961. - № 9. - С.39-48.

8. Дэвис и Кинг. Коррекция наложения импульсов при регистрации излучения источников изменяющейся интенсивности методом счета отдельных фотонов // Приборы для научн. исследований. - 1970. - № 3. - С.98-99.

9. Скуя Л.Н., Трухин А.Н. Исследование кинетики затухания люминесценции однофотонным методом с применением ЭВМ для сбора данных // Кибернетизация научного эксперимента. - Рига, 1981. - С.102-108.

10. Тарденак Э.Э. Системы счета фотонов для регистрации слабых и быстроменяющихся потоков // Методы и аппаратура для исследований люминесценции. - Рига, 1985. - С.58-98.

11. Айнбунд М.Р., Вильдгрубе Г.С., Постовалов В.Е., Прохоров А.М., Шелев М.Я. Исследование быстродействия ФЭУ с микроканальными пластинами // Квантовая электроника. - 1986. - Т.13, № 3(165). - С.645-647.

Статья поступила 29 сентября 1988 года.

## КОМПЛЕКТ ПРИБОРОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО СЧЕТА ФОТОНОВ ВО ВРЕМЕНИ

Я.Э.Тибергс, Ю.К.Вейнберг, Я.Л.Янсонс,

А.Я.Банга, Э.Э.Тарденак

НИИ физики твердого тела им. Петра Стучки

## В в е д е н и е

В НИИФТТ создан комплект приборов, который предназначен для построения фотонно-счетных систем исследования временных характеристик быстротекущих и повторяющихся сигналов с максимальным разрешением 0,25 нс при использовании метода статистической регистрации фотонов во времени. Комплект состоит из

- 1) селектора одноэлектронных импульсов фотоумножителя с точной временной привязкой, "VIS-P",
- 2) многоканального регистратора временных распределений импульсов, "KR-256",
- 3) преобразователя интервалов времени, "L-L".

Приборы комплекта представляют собой устройства автономной конструкции с питанием от сети переменного напряжения 220 В, что позволяет их применять для решения частных задач или собирать из них счетные системы определенного состава и конфигурации. Сигнальная связь между приборами обеспечивается передачей импульсов по коаксиальным кабелям, согласованным на 50 Ом. Амплитуда импульсов типовая для эмиттерно-связной логики (ЭСЛ), длительность - 5 нс.



## Технические характеристики и описание приборов

Селектор одноэлектронных импульсов с точной временной привязкой (далее по тексту - селектор или СОИ-Т) является улучшенным вариантом универсального селектора [1]. В СОИ-Т для повышения точности временной привязки выходного импульса к входному импульсу фотоумножителя применен способ дискриминации импульсов со следующим порогом [2]. В схеме селектора параллельно каналу амплитудного отбора импульсов введен канал точной фиксации временного положения импульсов, который определяет момент формирования выходного импульса канала амплитудного отбора. Параметры схемы и точность привязки зависят от длительности фронта входных импульсов. Поэтому СОИ-Т рассчитан для работы с фотоумножителями, у которых длительность фронта одноэлектронных импульсов тока не превышает 5 нс, и тогда при пороге дискриминации 1 мВ и больше обеспечивается временная привязка с погрешностью в пределах  $\pm 0,1$  нс.

Для упрощения конструкции в этом варианте селектора не предусмотрен второй канал амплитудной дискриминации импульсов. Остальные технические характеристики СОИ-Т соответствуют варианту [1].

Многоканальный регистратор временных распределений импульсов (далее по тексту - регистратор или МРВРИ) предназначен для накопления временного распределения импульсов (ВРИ) входного потока относительно внешнего старт-импульса синхронизации начала отсчета времени с многократным повторением циклов измерения до набора требуемой точности статистики распределения. Регистратор обеспечивает ручное или дистанционное управление процессом измерения путем передачи информации в цифровой форме на индикацию или по каналу общего пользования (КОП) системы интерфейса для измерительных устройств (ГОСТ 26.003-80). Предусмотрена возможность вывода измеренного ВРИ в аналоговой форме на двухкоординатный графопостроитель.

Регистратор осуществляет два метода измерения ВРИ:

1) одноимпульсный статистический счет ( $V$ -метод), когда фиксируется время прихода отдельных импульсов в количестве до трех в цикле измерения с временным разрешением до  $T_0 = 10$  нс (применяется в нано- и микросекундном диапазонах измерения);

2) последовательный синхронный счет ( $D$ -метод), когда подсчитываются импульсы, попадающие в последовательные временные каналы с шириной  $T_0 = 1$  мкс и больше, обеспечивая разрешение пары импульсов не хуже  $10$  нс (применяется в микро- и миллисекундном диапазонах).

Измерение ВРИ  $Y$ -методом производится по входу  $I$  (см. рис.1), и отсчеты накапливаются в 248 временных каналах, которым присвоены номера адресов с  $A = 0$  по  $A = 247$  соответственно возрастанию длительности задержки времени прихода импульсов относительно старт-импульса начала цикла измерения. Ширина временных каналов  $T_0$  и соответствующий диапазон измерения  $T_d$  задаваемы из ряда следующих значений:

$T_0 = 10; 20; 40; 160$  нс -  $T_d = 2,48; 4,96; 9,92; 39,68$  мкс.

$V$ -метод имеет восемь режимов измерения ВРИ -  $V = 0-7$ , притом режимы  $V = 3-7$  предназначены для выявления взаимной корреляции импульсов. Режимы отличаются числом и порядком накопления отсчетов времени прихода импульсов. В соответствии с режимом в каждом цикле измерения статистически во времени регистрируется:

- $V = 0$  - только один первый импульс,
- $V = 1$  - один или два первых импульса,
- $V = 2$  - до трех первых импульсов,
- $V = 3$  - только первая пара импульсов,
- $V = 4$  - только первый из первой пары импульсов,
- $V = 5$  - только второй из первой пары импульсов,
- $V = 6$  - только первая тройка импульсов,
- $V = 7$  - второй или второй и третий импульс

при условии, что в течение контрольного интервала времени  $T_k$  больше импульсов не поступало. При невыполнении условий определенного режима работы накопление отсчетов в та-

ком цикле не производится (отсчеты аннулируются). Продолжительность контрольного интервала времени  $T_k = 4I$  мкс для режески наложений установлена несколько больше длительности максимального диапазона измерения ВРИ V-методом ( $T_k = 39,68$  мкс), что дает выравнивание плотности вероятности регистрации им.ульсов стохастических потоков во всех диапазонах измерения и позволяет количественно сопоставлять ВРИ, измеренные в разных диапазонах.

D-метод имеет четыре режима измерения ВРИ -  $D = 0-3$ , которые различаются количеством возможных изменений ширины временных каналов следующим образом:

$D = 0$  - все каналы имеют одинаковую ширину, равную начальной ширине  $T_0$  ;

$D = 1$  - замена  $T_0$  на значение  $T_1$  в одной точке диапазона, начиная с канала  $A_1 > 0$ ;

$D = 2$  - две замены  $T_0$  - в первой точке с  $A_1 > 0$  на  $T_1$  и во второй с  $A_2 > A_1$  на  $T_2$  ;

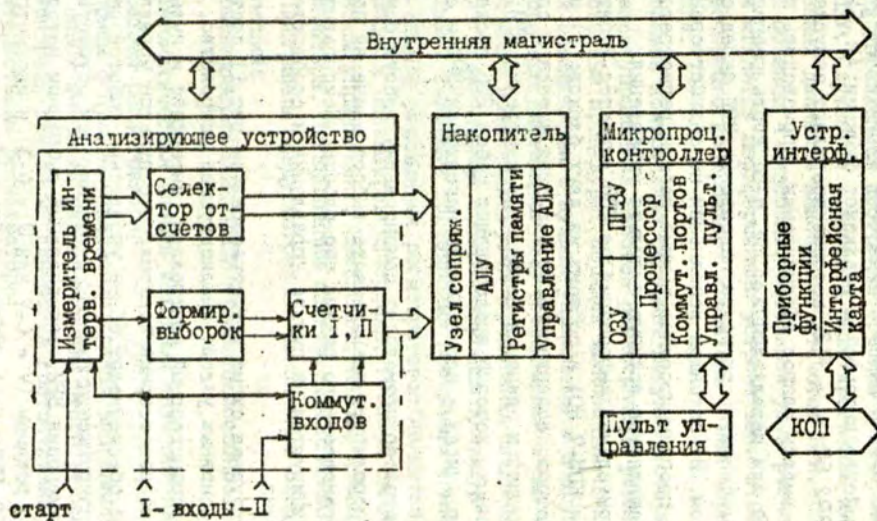
$D = 3$  - три замены  $T_0$  - с  $A_1 > 0$  на  $T_1$ , с  $A_2 > A_1$  на  $T_2$  и с  $A_3 > A_2$  на  $T_3$ .

Количество каналов 256 с  $A = 0$  по  $A = 255$ . Для режима  $D = 0$  ширину каналов возможно задавать от  $T_0 = I$  мкс до  $T_0 = 5$  мс с шагом  $I$  мкс, что соответствует диапазонам измерения от  $T_d = 256$  мкс до  $T_d = 1,28$  с. В режимах  $D = 1-3$  начальная ( $T_0$ ) и замененные ширины каналов ( $T_1 - T_3$ ) имеют минимальное значение 3 мкс.

Для D-метода предусмотрены два вида использования временных каналов:

$D-I$  (или  $D-II$ ) - совмещенный, при котором накопление ВРИ производится по входу  $I$  (или  $II$ ) во всех 256 каналах без пауз;

$D-I, II$  - раздвоенный; накопление производится для двух ВРИ, притом по входу  $I$  в каналах с четными адресами  $A = 0; 2; \dots 254$ , а по входу  $II$  - с нечетными  $A = 1; 3; \dots 255$ ; каждое ВРИ имеет паузы, соответствующие временным каналам смежного ВРИ.



Р и с. 1. Структурная схема регистратора.

Емкость регистров памяти каждого временного канала накопления - 16711680 единиц отсчетов. Число задаваемых циклов измерения  $CO = 1-99999999$ . Накопление ВРИ заканчивается при достижении текущего числа циклов, равного  $CO$ , или в случае переполнения какого-либо из регистров памяти.

Устройство интерфейса реализует функции: АН, ШН, L4, T6, DT, DC, PP2, SR и RL2, которые позволяют запускать регистратор, выдать запрос обслуживания, производить последовательный или параллельный опрос, передавать измерительную информацию, очищать регистры накопления ВРИ перед следующим запуском. В настоящем исполнении не задействовано дистанционное программирование режима работы регистратора, что пока осуществляется вручную с пульта управления.

Измерительная информация по КОП выдается 7-битным кодом (версия КОИ-7 НО) и состоит из двух блоков: 1) из массива параметров, содержащего обозначения метода и соответствующего режима и значения параметров измерения ВРИ; 2) из массива данных, который представляет собой 256 последовательных пар чисел - адрес канала накопления ВРИ и его содержание.

Регистратор производит самопроверку работы основных узлов и контролирует правильность выбора значений параметров для установленного режима его работы. Неисправности и ошибки индицируются на пульте управления и сообщаются байтом состояния.

Структурная схема регистратора (см. рис.1) состоит из следующих основных узлов: анализирующее устройство, накопитель, микропроцессорный контроллер, интерфейс и пульт управления. Микропроцессорный контроллер с пультом управления и интерфейсом обеспечивает общее управление работой регистратора. Анализирующее устройство с накопителем осуществляет алгоритм измерения ВРИ, определяемый выбранным методом (V или D), его режимом ( $V = C-7$  или  $D = 0-3$ ) и параметрами измерения ( $CO, T0$  и др.). Обмен сообщениями (данные режима, параметров, отсчетов измерений и служебные сигналы) между этими частями схемы производится через внутренние магистраль. Внешние сообщения передаются через пульт управления или интерфейс.

Микропроцессорный контроллер построен на базе микропроцессорного комплекта серии К580. Работа контроллера происходит под управлением программы объемом 6 килобайт, хранящейся в ППЗУ. Служебное и рабочее поле программы для хранения переменных данных и накопления отсчетов ВРИ организовано в ОЗУ с объемом 4 килобайт. Остальные узлы регистратора фактически являются периферийными устройствами относительно микропроцессорного контроллера и связаны с ним через порты ввода-вывода.

Программа контроллера содержит модули, которые из общего процесса управления работой регистратора реализуют автоматизированные процедуры. Порядок выполнения процедур определяется сообщениями с пульта управления и с других узлов регистратора или дистанционными сообщениями через интерфейс. Работа программы происходит путем чередования ожидания сообщений (состояния) и выполнения соответствующих процедур управления (функции). Главными состояниями программы контроллера в аспекте общего управления регистратором являются: ОЖИДАНИЕ выбора режима и параметров измерения, ГОТОВ К ЗАПУСКУ (при дистанционном управлении), ИЗМЕРЕНИЕ, ПАУЗА, КОНЕЦ ИЗМЕРЕНИЯ, ОШИБКА оператора, ПЕРЕПОЛНЕНИЕ памяти, НЕИСПРАВНОСТЬ регистратора. Программа предусматривает выполнение следующих основных функций:

- самопроверка ОЗУ, ППЗУ и работоспособности накопителя;
- автоматическая запись исходных значений параметров режимов работы регистратора;
- прием с пульта управления данных выбранного режима работы и новых значений параметров для этого режима;
- контроль введенных данных на соответствие техническим характеристикам регистратора;
- вывод принятых данных на табло индикации;
- передача данных алгоритма локальной работы анализирующего устройства с накопителем и их запуск;
- периодическое накопление порций измерительной информации в ОЗУ, передаваемые с накопителя в течение процесса измерения ВРИ;

- вывод на табло индикации данных накопления измерительной информации;
- контроль процесса измерения, выдача признаков и сообщений при обнаружении сбоев работы или при завершении измерения;
- вывод результатов измерения через интерфейс в определенном формате.

Анализирующее устройство (включающее измеритель интервалов времени, селектор отсчетов, формирователь выборок, два счетчика и коммутатор входов) и накопитель построены согласно раньше изложенным принципам и схемным решениям [ 3 ]. При работе регистратора V-методом (аналог однофотонному статистическому методу [ 3 ]) задействован измеритель интервалов времени, который по входу I измеряет в заданном диапазоне  $T_d$  времени прихода импульсов и фиксирует отсчеты в количестве до трех первых относительно старт-импульса, и, кроме того, регистрирует число приходящих импульсов (до 4) в течение контрольного интервала времени  $T_k$  цикла измерения. По истечении  $T_k$  отсчеты посредством селектора отсчетов, который производит режекцию отсчетов согласно выбранному режиму накопления ( $V = 0-7$ ), передаются на накопитель и статистически накапливаются в регистрах памяти. Измерение и накопление ВРИ происходит порциями циклов ( $\Delta C$ ). Число циклов в одной порции можно задать в пределах  $\Delta C = 1-10000$ . После завершения очередной порции измерений данные передаются от регистров памяти накопителя в ОЗУ микропроцессорного контроллера, после этого память накопителя стирается и запускается следующая порция измерений, т.е. опять начинается период локальной работы анализирующего устройства с накопителем. Накопление ВРИ таким образом продолжается до завершения общего заданного числа циклов измерений  $CO$  или в случае переполнения ОЗУ заканчивается преждевременно.

При использовании D-метода (аналог методу многоканального усреднения [ 3 ]) измеритель интервалов времени после каждого старт-импульса вырабатывает только метки времени частотой 10 МГц, с помощью которых формирователь выборок

вырабатывает временные выборки в виде стробирующих импульсов с длительностью согласно установленной последовательности ширины временных каналов. Счетчики I и II поочередно в течение действия строб-импульсов считывают входные импульсы. В паузах работы счетчиков I и II результаты счета передаются в накопитель, в котором производится присчитывание числа импульсов текущего результата к содержимому определенного регистра памяти, адрес которого соответствует порядковому номеру временной выборки в цикле измерения. Коммутатор входов подключает входы I и II к счетчикам согласно выбранному виду использования временных каналов (совмещенный или раздвоенный). В остальном процесс накопления ВРИ D-методом производится подобно, как и при работе V-методом.

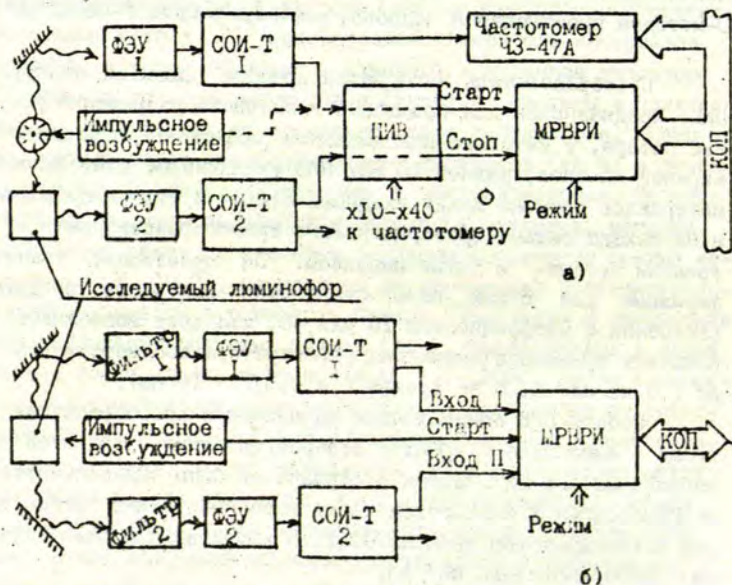
Преобразователь интервалов времени (далее по тексту - ПИВ) предназначен для повышения временного разрешения регистратора, у которого максимальное разрешение ограничено шириной каналов, равной 10 нс. ПИВ увеличивает длительность интервалов времени между входными старт- и стоп-импульсами и на выходе выдает пропорционально трансформированные во времени старт- и стоп-импульсы. Он производит трансформацию для одной пары старт-стоп-импульсов в цикле измерения с коэффициентом 10 или 40, что дает возможность повысить временное разрешение регистратора соответственно до 1,0 нс или 0,25 нс (режим V = 0, T0 = 10 нс).

Работа ПИВ основывается на принципе преобразования время - амплитуда - время с отбором полезных старт-стоп импульсных пар [2]. Схема построена на базе ЭСЛ-элементов с применением в аналоговой части высокочастотных транзисторов и компараторов типа К579СА1. В качестве прототипа служил преобразователь по [4].



Применение приборов комплекта

1. Приборами комплекта можно осуществлять измерения различных процессов изменения интенсивности потока оптического излучения. Собранная из этих приборов измерительная система (см. рис. 2, а) позволяет исследовать кинетику высвечивания люминесценции при импульсном фотовозбуждении. Фотумножитель ФЭУ-1 вместе с СОИ-Т1 фиксирует момент начала светового импульса возбуждения и формирует старт-импульс запус-

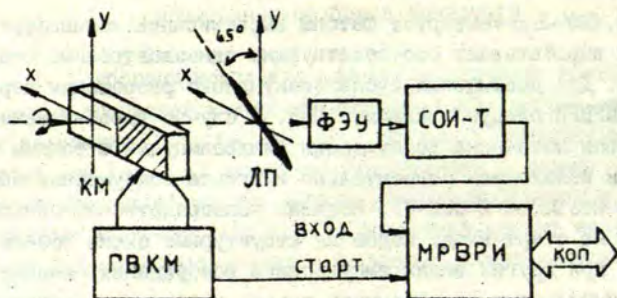


Р и с. 2. Примеры построения систем статистической регистрации временных распределений фотонов для кинетических исследований люминесценции V-методом с наносекундным разрешением (а) и D-методом с микросекундным разрешением и удвоением каналов для одновременного измерения двух кривых затухания люминесценции (б).

ка МРВРИ. ФЭУ-2 детектирует фотоны высвечивания люминофора, и СОИ-Т2 вырабатывает соответствующие одноэлектронные стоп-импульсы. Для достижения субнаносекундного разрешения перед входами МРВРИ следует включить ПИВ. В случае вырабатывания устройством источника возбуждения синхроимпульс с точным временным положением относительно импульса возбуждения можно исключить ФЭУ-1 и СОИ-Т1, подавая непосредственно синхроимпульсы на старт-вход. Подобные структурные схемы используются и при других видах импульсного возбуждения люминесценции (импульсами электронного пучка, импульсным рентгеном, частицами ионизирующего излучения).

2. Новым направлением применения приборов комплекта является создание на их базе системы измерения степени циркулярной поляризации слабого оптического излучения. Для этой цели обычно применяется метод модуляции поляризации при помощи пьезоэлектрического фотоупругого (кварцевого) модулятора с последующим преобразованием линейным поляризатором ее в модуляцию интенсивности излучения, которая измеряется счетом фотонов в двух временных каналах одинаковой ширины, соответствующих по времени положительному и отрицательному полупериодам деформации кварца [5].

Суммарную погрешность этого метода измерения степени циркулярной поляризации определяют: 1) различие ширины временных каналов, 2) неточность выставления положений временных каналов относительно фазы модуляции излучения, 3) погрешность реализации амплитуды сдвига фаз  $A(\lambda)$  для определенной длины волны  $\lambda$  излучения, осуществляемой кварцевым модулятором, 4) статистическая неопределенность счета фотонов. Особые трудности связаны с выставлением положений временных каналов, так как сдвиг фаз между механическими колебаниями и электрическим сигналом периодического возбуждения колебаний кварца нестабилен. Сдвиг фаз определяется добротностью резонатора, которая некоторым образом зависит от внешних непостоянных условий эксплуатации модулятора. Достаточно точную привязку к фазе возможно осуществить лишь относительно колебаний электрического сигнала возбуждения кварце-



Р и с. 3. Система измерения степени циркулярной поляризации слабого оптического излучения.

КМ - кварцевый модулятор, ГВКМ - генератор возбуждения кварцевого модулятора, ЛП - линейный поляризатор.

вого модулятора. Также затруднительна и точная откалибровка зависимости величины  $A(\lambda)$  от напряжения возбуждения модулятора в широком спектральном диапазоне длин волн излучения, и периодическая проверка этой зависимости, что имеет важное значение для достоверного применения этой методики в целом.

Предлагается вместо двухканального счета применять многоканальный счет 0-методом при помощи регистратора (см. рис.3). Обычно применяются кварцевые модуляторы с частотой колебаний около 50 кГц. В таком случае при ширине временных каналов  $T_0 = 1$  мкс (диапазон измерения  $T_d = 250$  мкс) регистрируется ВРИ примерно для 10 периодов модуляции интенсивности поляризованного излучения, что дает определенные преимущества.

Во-первых, в течение реального масштаба времени процесса измерения регистрируются все детектируемые фотоприемником фотоны без пауз, что обеспечивает максимальную статистическую точность счета фотонов. Во-вторых, регистрируется форма колебаний интенсивности излучения, позволяя при использовании эталонного излучения непосредственно откалибро-

вать зависимость  $A(\lambda)$  модулятора и определить величину сдвига фаз и их дрейфы. Кроме того, регистратор через стандартный интерфейс имеет связь с ЭВМ. Поэтому возможно непосредственно применять программную обработку результатов измерений. Так как величина  $A(\lambda)$  фактически является функцией также от степени линейной поляризации излучения, то математический анализ кривой формы колебаний интенсивности излучения (разложение на гармонические составляющие) позволяет определить не только степень циркулярной поляризации, но и степень линейной поляризации. Таким образом возможно получить полную информацию о свойствах поляризации исследуемого излучения.

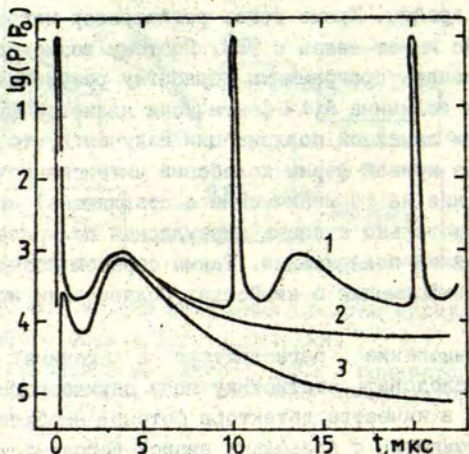
3. Применение регистратора в режимах  $V = 3-7$  позволяет исследовать статистику поля оптического излучения. Но для этого в качестве детектора фотонов необходимо применять фотоумножитель с предельно низкой вероятностью появления импульсов динамических помех, что является серьезной проблемой\*. Данный регистратор с помощью генератора субнаносекундных световых импульсов\*\* также позволяет производить исследования корреляций импульсов помех фотоумножителей (см. рис. 4) и отбирать из них экземпляры, в которых искажения сигнала динамическими помехами минимальны.

### З а к л ю ч е н и е

Созданный комплект приборов является технической основой для решения многих задач экспериментального исследования слабых и быстроменяющихся оптических излучений. В случае применения в качестве детекторов открытых электронных умножителей возможно также изучение кинетических свойств потоков заряженных микрочастиц. Встроенная в регистратор микропроцессорная система позволяет усовершенствовать программу управления и обработку результатов измерений для конкретных нужд в области экспериментального исследования.

\* См. наст. сб., с. 20 Янсонс Я.Л. Практика измерения одноэлектронных характеристик фотоэлектронных умножителей.

\*\* См. наст. сб., с. 70. Плаудис А.Э, Лимеж Г.К., Генкин А.М., Киселев В.С. Генератор субнаносекундных световых импульсов для определения временных характеристик фотоприемников.



Р и с. 4. Временные распределения сигнальных и шумовых импульсов ФЭУ-136 № 9912 при одноэлектронной засветке субнаносекундными импульсами и временном разрешении регистрации 160 нс.

Кривая 1 - период повторения световых импульсов 10 мкс; 2 - период 100 мкс; 3 - период 100 мкс, но регистрируется второй импульс из первой пары импульсов (режим  $V = 5$ ), что позволяет явным образом выделить временное распределение паразитных послепулсов фотомножителя. Распределения нормированы относительно максимума кривой 1.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тибергс Я.Э., Янсонс Я.Л. Универсальный селектор одноэлектронных импульсов фотоэлектронных умножителей // Методы и аппаратура для исследований люминесценции. - Рига, 1985. - С.40-57.

2. Мелешко Е.А. Наносекундная электроника в экспериментальной физике. - М., 1987. - 216 с.

3. Тарденак Э.Э. Системы счета фотонов для регистрации слабых и быстромменяющихся потоков // Методы и аппаратура для исследований люминесценции. - Рига, 1985. - С.58-98.

4. Акимов Ю.К., Мерзляков С.И. Наносекундный преобразователь время-амплитуда // Приборы и техн.эксперимента. - 1980. - № 5. - С.94-97.

5. Куликов В.А., Калевич В.К. Высокочувствительный анализатор циркулярной поляризации света // Приборы и техн.эксперимента. - 1980. - № 5. - С.196-198.

Статья поступила 29 сентября 1988 года.

ГЕНЕРАТОР СУБНАНОСЕКУНДНЫХ СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ  
 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПРИЕМНИКОВ

А.Э.Плаудис, Г.К.Лимеж, А.М.Генкин\*, В.С.Киселев\*

НИИ физики твердого тела ЛГУ им. Петра Стучки

\* Киевский политехнический институт

Условием для достоверного применения фотоэлектронных умножителей (ф.э.у) или других фотоприемников при проведении кинетических исследований быстропротекающих оптических процессов является подробное знание их индивидуальных временных характеристик, таких как:

- 1) параметры импульсной характеристики: время нарастания и спада, длительность на определенном уровне амплитуды выходных импульсов тока;
- 2) разброс времени прохождения сигнала через фотоприемник;
- 3) временное распределение коррелированных с сигналом импульсных помех (пред- и послеимпульсов) и вероятность их возникновения.

Для определения этих характеристик необходим калибровочный генератор коротких световых импульсов, обеспечивающий:

- 1) длительность импульсов не более одной трети от ожидаемой длительности импульсной характеристики (см. ГОСТ II612.13-85);
- 2) спектральный диапазон излучения, перекрывающий область спектральной чувствительности фотоприемника;
- 3) внешнюю синхронизацию запуска и стабильность временного положения световых импульсов.

При проведении измерений временных распределений коррелированных помех фотоприемников параметры формы и амплитуды

вочных световых импульсов должны быть установлены и сохраняться в более широком динамическом диапазоне, чем между уровнями 0,1 и 0,9 амплитуды, предусмотренные стандартной методикой для определения параметров импульсной характеристики. Кроме того, важно, чтобы генератор имел большой рабочий ресурс, был недорогим, простым в эксплуатации.

Известные генераторы коротких световых импульсов по принципу действия излучателя могут быть разделены на четыре основные группы: искровые разрядники, лазеры с синхронизацией мод, полупроводниковые инжекционные лазеры, светоизлучающие диоды (светодиоды). Но лишь генераторы последних двух групп в какой-то мере удовлетворяют предъявленным требованиям.

Полупроводниковые инжекционные лазеры способны формировать импульсы субнаносекундной длительности с точным временным положением [1]. Длительность фронтов лучших быстродействующих инжекционных светодиодов превышает 1 нс [2]. Излучение же этих генераторов имеет узкий спектр, расположенный в ближней инфракрасной области, что плохо согласуется со спектральной чувствительностью большинства типов вакуумных фотоприемников.

Более высоким быстродействием обладают так называемые предпробойные светодиоды (ПС) [3], способные работать в режиме электрического пробоя, наподобие полупроводниковых стабилитронов. Излучение ПС обусловлено в основном излучательными переходами высокоэнергетических носителей, имеющих в сильном электрическом поле ( $10^5$ - $10^6$  В/см) обратнорасположенного р-п-перехода высокие дрейфовые скорости (порядка  $10^7$  см/с) и обладающих малыми значениями времени термализации (порядка  $10^{-10}$  с) [4]. Время пролета такими носителями узкой области сильного поля ( $10^{-5}$ - $10^{-6}$  см) составляет  $10^{-12}$ - $10^{-13}$  с. Ввиду этого физическим ограничением быстродействия ПС является величина не более  $10^{-10}$  с. Теоретический анализ показывает [5], что быстродействие реальных ПС может ограничиваться временем нарастания и спада тока лавины, которое зависит от параметров реактивных элементов, входящих в эквивалентную схему ПС. Экспериментальное исследование факторов, ограничивающих быстродействие ПС, не проводилось.



Наиболее подходящим материалом для ПС является карбид кремния. В отличие от других широкозонных полупроводников образцы карбида кремния могут быть синтезированы как электронного, так и дырочного типа проводимости. Присущее карбиду кремния свойство политипизма позволяет создать целое семейство полупроводниковых материалов единого химического состава, но с широким набором физических свойств. Например, ширина запрещенной зоны  $E_g$  для различных политипов составляет от 2,4 до 3,3 эВ. Теплопроводность карбида кремния при комнатной температуре близка к теплопроводности меди, а это существенно для теплоотвода высокой мощности обратносмещенного р-п-перехода. Высокая энергия связи между кремнием и углеродом обеспечивает данному материалу высокую термическую, радиационную и химическую стойкость и, следовательно, высокую стабильность приборов, разработанных на основе этого материала. Особенно важны такие свойства в условиях сильного электрического поля и локального разогрева р-п-перехода, работающего в режиме электрического пробоя. Кристаллы SiC-6H выпускаются промышленностью.

На основе карбида кремния в проблемной лаборатории полупроводников Киевского политехнического института разработаны экспериментальные образцы ПС [6,7] с широким спектром излучения, перекрывающим видимую и ближнюю ИК-области, с высокой температурной стабильностью (температурный коэффициент излучения не превышает 0,1 %/град). Нестабильность излучения при работе ПС в течение  $10^4$  часов не превышает 10% [8]. Внешний выход мощности излучения ПС в видимой области составляет величину порядка  $10^{-6}$  Вт/А. ПС представляет собой р-п-переход, изготовленный сплавлением силумина (Al+Si) с пластинами SiC-6H п-типа проводимости с концентрацией нескомпенсированных доноров (основной из которых азот) порядка  $10^{18}$  см<sup>3</sup>, помещенный в теплоотводящий корпус. При обратном смещении 15-30 В ток через р-п-переход резко возрастает вследствие электрического пробоя. Протекание обратного тока сопровождается излучением, исходящим из микроплазмы, которые можно наблюдать под микроскопом в виде светящихся ре-

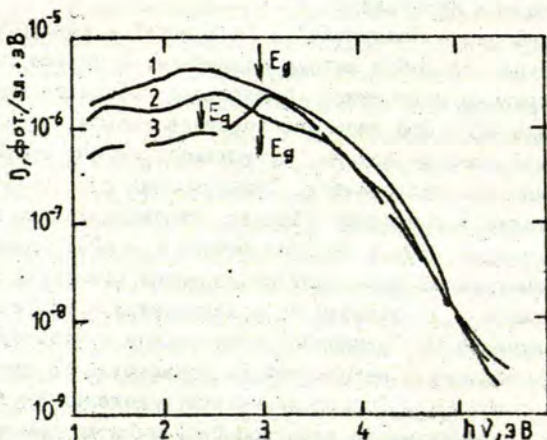
чек диаметром менее 5 мкм, локализованных в области р-п-перехода. Плотность расположения микроплазм и величина пробивного напряжения зависит от концентрации нескомпенсированных доноров в исходных кристаллах [ 9 ] .

Возможны две - "открытая" и "закрытая" - конструкции ПС, различающиеся способом вывода излучения. В случае "закрытой" конструкции излучение р-п-перехода выводится через толщу кристалла SiC . При этом его коротковолновая часть, соответствующая энергии фотона, превышающей ширину запрещенной зоны, полностью поглощается. Существенная доля излучения поглощается также в примесной области (максимум полосы поглощения SiC - 6H соответствует энергии фотона 1,9 эВ). Однако "закрытая" конструкция позволяет предохранять область р-п-перехода и контакта к р-области от механических и других воздействий. Излучение ПС "открытой" конструкции выводится через тонкую р-область и незначительно искажается за счет поглощения в толще SiC . Спектральные распределения внутренней квантовой эффективности предпробойной электролюминесценции для типичных ПС "открытой" конструкции, изготовленных на кристаллах SiC некоторых политипов, приводятся на рис.1.

Исследованию природы предпробойной электролюминесценции посвящено большое количество работ [ 4,10-15 ]. В настоящее время отсутствует единая точка зрения относительно типа электронных излучательных переходов, ответственных за ее основную - широкополосную бесструктурную компоненту. Однако анализ существующих предположений на этот счет выходит за рамки этой статьи.

Временные характеристики генерируемых импульсов света определяются параметрами реального ПС и схемой источника импульсного питания (ИИП). Поэтому были опробованы несколько вариантов ИИП и конструктивного выполнения реальных ПС.

Реальный ПС (РПС), т.е. излучающий р-п-переход в корпусе как схемный узел генератора световых импульсов имеет расщепленные параметры. Для упрощения анализа представим его эквивалентную схему с сосредото-

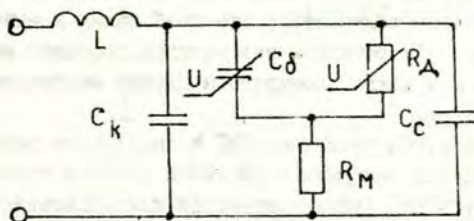


Р и с. 1. Спектральные распределения для внутренней квантовой эффективности предпробной электролюминесценции светодиодов "открытой" конструкции для политипов SiC. Кривая 1 - ISR, 2 - 6H, 3 - 3C.

Спектры измерены с помощью монохроматора ЗМР-3, ФЭУ-62, -100, -142. Градуировка произведена с помощью ламп накаливания ТРШ-3000 и дейтериевых ламп ДДС-30. Переход к абсолютным единицам осуществлен по величине светового потока, испускаемого ПС, измеренной с помощью фотометра ФПЧ-УХЛ4. При расчете предполагалось, что излучение, выходящее из ПС в малом телесном угле перпендикулярно плоскости р-п-перехода, искажено лишь потерями на отражение от границы SiC-воздух. Излучение микроплазм принималось изотропным. Пренебрегалось малой долей свечения, отраженного от задней грани кристалла.

точными параметрами (см. рис.2). Следует учесть, что погрешность такого приближенного представления тем более существенна, чем короче генерируемый импульс питания и чем больше размеры структурных элементов РПС.

Эквивалентная схема РПС содержит колебательный контур, собственная резонансная частота которого определяется ин-



Р и с. 2. Эквивалентная электрическая схема реального светодиода.

$L$  - индуктивность выводов;  $C_k$  - емкость между выводами;  $C_\delta$  - барьерная емкость;  $R_D$  - дифференциальное сопротивление  $p$ - $n$ -перехода;  $R_M$  - сопротивление толщи полупроводника и сопротивление контактов;  $C_c$  - емкость, обусловленная технологическим слоем  $SiO$ .

дуктивностью выводов  $L$  и емкостями  $C_k$ ,  $C_c$  и  $C_\delta$ , а его коэффициент затухания - сопротивлениями  $R_D$  и  $R_M$ . Нелинейная зависимость величин  $C_\delta$  и  $R_D$  от напряжения сильно затрудняет точное определение длительности времени нарастания и спада тока лавины. Но можно сделать качественную оценку, как при повышении собственной резонансной частоты РПС крутизна нарастания и спада лавины увеличивается.

Величина параметров  $L$  и  $C_k$  зависит только от конструктивного решения корпуса РПС. Для различных примененных корпусов  $L = 1-10$  нГ;  $C_k = 0,2-2,0$  пФ. Величины  $C_c$ ,  $C_\delta$ ,  $R_D$  и  $R_M$  являются собственными параметрами  $p$ - $n$ -перехода и зависят от его площади и рабочего режима. Для различных РПС  $C_c = 2,2-3,0$  пФ; при нулевом смещении  $C_\delta = 10-150$  пФ и резко уменьшается в рабочей точке;  $R_D = 10-100$  Ом в рабочей точке;  $R_M < 10$  Ом.

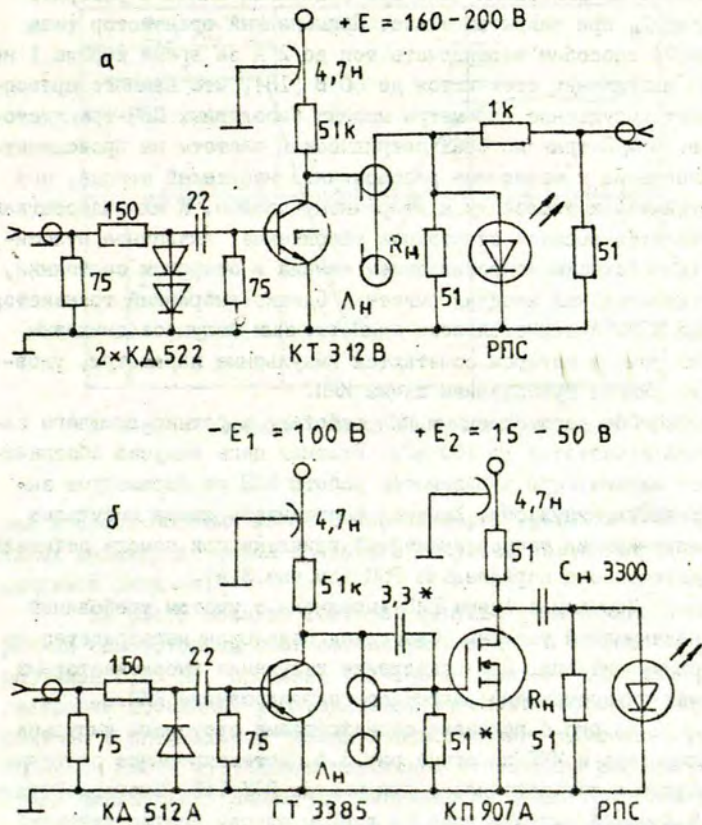
Собственная резонансная частота РПС зависит главным образом от величины  $L$  и  $C_\delta$ . Величину  $L$  можно уменьшить путем усовершенствования конструкции корпуса. Снижение величины  $C_\delta$  требует уменьшения площади излучающего  $p$ - $n$ -перехода,

что вызывает нежелательное понижение интенсивности излучения. Таким образом получается, что требования к выбору РПС с целью получения коротких и интенсивных световых импульсов противоречивы и в каждом конкретном случае необходимо компромиссное решение.

Рабочая точка различных РПС в импульсном режиме находится в пределах напряжения от 15 до 100 В и тока от 0,1 до 10 А. Простой ИИП субнаносекундной длительности может быть реализован на лавинном транзисторе с накопительной линией, способном формировать импульсы с амплитудой несколько десятков вольт [16]. Выяснено, что для этой схемы наиболее стабильным лавинным режимом обладает транзистор типа КТ312В, обеспечивающий генерацию импульсов с фронтами меньше 1 нс и амплитудой около 40 В на нагрузке 50 Ом в широком диапазоне изменения напряжения питания (в пределах от 140 до 190 В). РПС подключается параллельно нагрузке  $R_H$  накопительной линии  $L_H$  (см.рис.3,а). В качестве последней использован коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом и длиной 10 см, обеспечивающий длительность импульса примерно 1 нс.

Но субнаносекундные импульсы света с таким ИИП можно получить только с РПС с малым значением  $C_g$ , т.е. с малыми размерами излучающего р-р-перехода и, следовательно, с малой интенсивностью излучения. Емкостная нагрузка в случае РПС с большим значением  $C_g$  нарушает работу накопительной линии. В этой схеме ИИП затруднена плавная регулировка амплитуды выходных импульсов.

Указанные недостатки можно устранить путем дополнения рассмотренной схемы генератора малоинерционным ключом на мощном ИДП-транзисторе сверхвысокой частоты (см.рис.3,б; прототип в [17]). Такой ключ развязывает нагрузку от формирующего генератора, повышает нагрузочную способность ИИП и обеспечивает плавную регулировку амплитуды импульсов. При формировании субнаносекундных импульсов ключ реализует частичный разряд накопительного конденсатора  $C_H$  через РПС и параллельно включенный резистор  $R_H$ . Этот резистор гасит



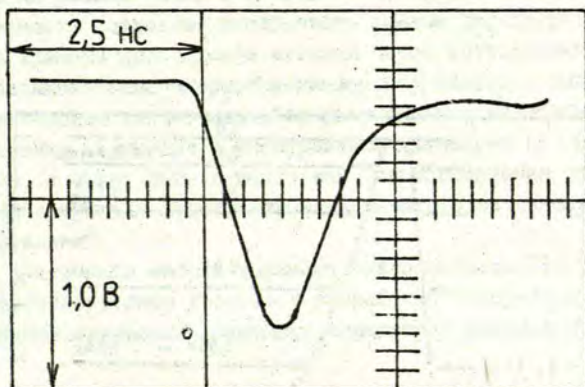
Р и с. 3. Принципиальные схемы источника импульсного питания светодиода.

паразитные колебания тока при заперении ключа и ускоряет заряд  $C_n$  при закрытом ключе. Примененный транзистор типа КП907А способен переключать ток до 2 А за время короче 1 нс при напряжении сток-исток до 60 В [18], что намного превосходит импульсные параметры мощных биполярных СВЧ-транзисторов. В МДП-транзисторах сверхвысокой частоты не происходит накопление и медленное рассасывание носителей заряда, они устойчивы к тепловому и вторичному пробое. К их недостаткам относятся высокое остаточное напряжение, вызванное относительно большим сопротивлением канала в открытом состоянии, и значительная входная емкость. Однако выбранный транзистор типа КП907А является пока единственным полупроводниковым прибором, в котором сочетаются импульсные параметры, удовлетворяющие требованиям схемы ИИП.

Оба рассмотренных ИИП работают в режиме внешнего запуска с частотой до 100 кГц. Входная цепь запуска обеспечивает минимальную зависимость работы ИИП от параметров запускающих импульсов. Имеется возможность съема импульсов синхронизации точной временной привязки при помощи делителя, подключенного параллельно РИС (см.рис.3,а).

Монтажная схема ИИП выполнена с учетом требований наносекундной техники. Светодиод подключен непосредственно к схеме питания. Для подавления излучения высокочастотных помех предусмотрено надлежащее экранирование ИИП.

На рис.4 показана осциллограмма светового импульса генератора с ИИП по схеме рис.3,б. Детектирование световых импульсов осуществлялось при помощи ФЭУ-165. Многоэлектронный анодный импульс тока (в данном случае соответствующий примерно 35 фотозлектронам) зарегистрирован осциллографом С7-19. Длительность импульса на полувысоте не превышает 1,5 нс. Длительность менее 1 нс можно получить уменьшением амплитуды импульса питания, но при этом соответственно снижается пиковая интенсивность световых импульсов. Зависимость длительности световых импульсов от амплитуды импульсов питания обусловлена высоким порогом напряжения начала излуче-



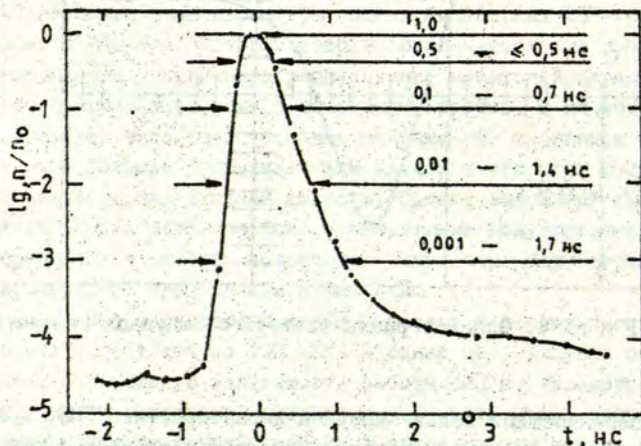
Р и с. 4. Осциллограмма светового импульса генератора.

ния и особенностями вольт-амперной характеристики РПС. При малых амплитудах форма светового импульса повторяет форму импульса питания.

На рис.5 показан световой импульс генератора, измеренный однофотонным статистическим методом с временным разрешением 0,25 нс, применяя ФЭУ-165 и комплекс приборов регистрации временных распределений фотонов\*. Световой импульс получен в оптимальном варианте относительно длительности: применен РПС с излучающим переходом небольшого размера и выбрана минимальная амплитуда импульса питания. При этом длительность светового импульса на полувысоте не превышает 0,5 нс, а на уровне 0,1 амплитуды - 0,7 нс. Спад импульса экспоненциальный с постоянной времени 0,15 нс в пределах не менее 3 десятичных порядков. Динамический диапазон измерения

\* См. наст. сб., с. 55. Тибергс Я.Э., Вейнберг Д.К., Янсонс Я.Л., Банга А.Я., Тарденак Э.Э. Комплект приборов статистического счета фотонов во времени.





Р и с. 5. Нормированное временное распределение фотонов в световом импульсе генератора.

составляет 4 порядка величины и ограничен помехами фотоэлектронного умножителя.

На данном этапе разработки проявились лишь технические ограничения минимальной длительности светового импульса. Физические ограничения, связанные с процессами пробоя и излучения в р-п-переходе, не выявлены. Дальнейшее уменьшение длительности светового импульса возможно за счет усовершенствования конструкции РПС и способа возбуждения свечения.

РПС с излучающей площади малого размера является практически точечным источником света, что позволяет при помощи линзы, эллиптического рефлектора или световода увеличивать освещенность фотоприемника и, кроме того, направлять

излучение на разные точки его входной поверхности. Последняя возможность позволяет исследовать зонные характеристики и разброс времени прохождения сигнала через фотоприемник.

Созданный генератор субнаносекундных световых импульсов удовлетворяет требованиям, предъявленным к калибровочному источнику излучения в спектральном диапазоне от 250 до 1000 нм, и может быть использован для определения временных характеристик фотоэлектронных умножителей наносекундного разрешения\*.

В заключение авторы выражают благодарность Я.Л.Янсону за непосредственное участие в разработке генератора и за проведение измерений временных параметров импульсов света.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Демчук М.И., Дмитриев С.М. Субнаносекундный полупроводниковый излучатель света для исследования временных характеристик ф.э.у. // Приборы и техн.эксперимента. - 1988. - № 1. - С.215-216.
2. Попов Б.Н. Достижения в разработке быстродействующих полупроводниковых источников излучения // Зарубежная радиоэлектроника. - 1986. - Вып.3. - С.51-66.
3. Акимов Ю.С., Павличенко В.И. и др. Некоторые применения полупроводниковых импульсных источников света в экспериментальной ядерной физике // Электронная техника. Сер.2. - 1972. - Вып.6. - С.23.
4. Косяченко Л.Я. Электролюминесценция полупроводникового диода при обратном смещении // Учен.зап.Тарт.ун-та. - 1983. - Вып.655. - С.12-33.
5. Мулюкин Н.В., Пронин Б.В. Динамика электролюминесценции p-n-переходов в режиме лавинного пробоя // Физ.и техн. полупров. - 1975. - Т.9, вып.6. - С.1065-1070.

---

\* См.наст.сб.; с.20. Янсонс Я.Л. Практика измерения одноэлектронных характеристик фотоэлектронных умножителей.

6. Алтайский Ю.М., Генкин А.М. Высокостабильный светодиод на базе карбида кремния // Ж.техн.физики. - 1982. - Т.52, вып.3. - С.543-545.

7. Алтайский Ю.М., Авраменко С.Ф., Генкин А.М., Генкина В.К., Киселев В.С., Корсун Т.М. Широкополосный светодиод с малой площадью излучения // Приборы и техн. эксперимента. - 1986 - № 2. - С.245.

8. Генкин А.М., Генкина В.К., Огнева Л.Л. Измерение нестабильности малых световых потоков с помощью опорных карбид-кремниевых светодиодов // Диэлектрики и полупроводники. - 1987. - Вып.32. - С.81-84.

9. Алтайский Ю.М., Генкин А.М., Генкина В.К., Огнева Л.Г. Пробойная электролюминесценция светодиодов на базе карбида кремния // Электронная техника. Сер.2. - 1987. - Вып.4(190). - С.76-78.

10. Косяченко Л.А., Пивовар А.В., Склярчук В.М. Спектры предпробойной электролюминесценции карбида кремния различных политипов // Ж.прикл.спектроскопии. - 1982. - Т.36, вып.2. - С.236-242.

11. Генкин А.М., Родионов В.Н. Предпробойное фиолетовое излучение в карбиде кремния кубической модификации // Физ.и техн.полупров. - 1979. - Т.13, вып.4. - С.785-791.

12. Константинов А.О. "Горячая" люминесценция при электрическом пробое р-п-переходов на карбиде кремния // Физ.и техн.полупров. - 1987. - Т.21, вып.4. - С.670-675.

13. Бодаков Ю.А., Литвин Д.П., Санкин В.И. и др. Ударная ионизация в политипах  $\beta$ -SiC // Физ.и техн.полупров. 1985. - Т.19, вып.5. - С.815-819.

14. Холуянов Г.Ф. Об излучении при пробое карбид-кремниевых р-п-переходов // Физ.твёрдого тела. - 1961. - Т.3, вып.11. - С.3314-3316.

15. Naescker W. Infrared Radiation from Breakdown Plasmas in Si, GaSb and Ge: Evidence for Direct Free Hole Radiation // Phys.stat. solidi, a. - 1974. - Vol.25, N 2. - P.301-310.

16. Дьяконов В.П. Лавинные транзисторы и их применение в импульсных устройствах. - М., 1973. - 208 с.

17. Дьяконов В.П. Генераторы прямоугольных наносекундных импульсов на лавинных и мощных м.д.п.-транзисторах // Приборы и техн.эксперимента. - 1980. - № 4. - С.101-102.

18. Батурин В.В., Бельков А.К., Дьяконов В.П. Мощные МДП-транзисторы и их применение в радиоэлектронных схемах: Часть II // Обз.по электр.техн. Сер."Полупров.приб.". - 1987. - Вып.7(799). - С.39-45.

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ КИНЕТИКИ ЗАТУХАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ  
НА БАЗЕ МИКРОЭВМ ТИПА БК-0010И.А.Дедзе, Я.Я.Дзенис, А.Я.Пакалин  
НИИ физики твердого тела ЛГУ им. Петра Стучки

## В в е д е н и е

В люминесцентных исследованиях для регистрации светового потока широко применяются фотоэлектронные умножители (ф.э.у.), работающие в режиме счета фотонов, что позволяет повышать уровень полезного сигнала над шумами, а также получать информацию в дискретной форме. В НИИФТТ ЛГУ им. П. Стучки накоплен большой опыт по применению метода счета фотонов [1,2].

Полезную информацию о физических процессах, происходящих в веществе, могут дать кинетические исследования люминесценции. Поэтому представляет интерес наблюдение зависимости интенсивности люминесценции от времени. Для получения информации об этом в наносекундном интервале времени метод счета фотонов имеет преимущество из-за высокого временного разрешения.

Имеются многочисленные разработки систем исследования кинетики люминесценции с использованием ф.э.у., работающих в режиме счета фотонов (см. обзор [3]). Такие системы являются довольно сложными радиэлектронными устройствами. Измерительная система обычно состоит из трех основных частей: измерительного устройства физических величин, устройства, обеспечивающего алгоритм измерения и устройства сбора данных. Как известно [3], все три части системы реализованы аппаратным способом и предложен вариант применения микроЭВМ в ка-

честве устройства сбора данных. ЭВМ также используется для реализации алгоритма измерения [4].

В данной работе рассмотрены вопросы разработки системы на базе микроЭВМ ЕК-0010 для исследования кинетики люминесценции, при этом используя ЭВМ как для сбора данных, так и для осуществления алгоритма измерения. Измерительная система содержит стандартные измерительные узлы.

#### Принципы регистрации процессов в наносекундном-микросекундном диапазонах

Применению метода счета фотонов для кинетических исследований посвящено множество работ. Наиболее популярными является метод многоканального усреднения и метод корреляции одиночных фотонов [5,6]. Подробный анализ этих методов в схемотехническом аспекте дан в работе [3].

Многоканальное усреднение в основном используется в микро- и миллисекундном диапазонах. Принцип метода основан на том, что время после возбуждения разбивается на  $M$  интервалы, временная ширина которых известна, и производится счет числа одноэлектронных импульсов, приходящих в каждый интервал. После акта возбуждения происходит суммирование полученного числа импульсов в каждом интервале с предыдущим числом импульсов в интервале. В результате получается гистограмма  $N = f(t)$ . Характерными для метода параметрами являются ширина интервала, число интервалов и частота повторения измерений.

Для наносекундного диапазона используется метод корреляции одиночных фотонов, подробный анализ которого дан в работе [6]. Однофотонным методом определяется статистическое распределение времени между возбуждением и приходом фотона, излученного образцом исследуемого вещества. Таким образом частота прихода фотона в интервал времени  $\Delta t$  коррелирует с интенсивностью затухания люминесценции. Техническими сложностями обусловлено то, что всего регистрируется время

прихода первого фотона. Это обстоятельство требует дополнительного условия: необходимо, чтобы за исследуемый интервал времени приходил только один фотон. В этом случае получаемое распределение  $N(t)$  будет отражать истинный закон затухания люминесценции (при условии, если длительность возбуждения относительно мала). Такие условия можно реализовать двумя способами.

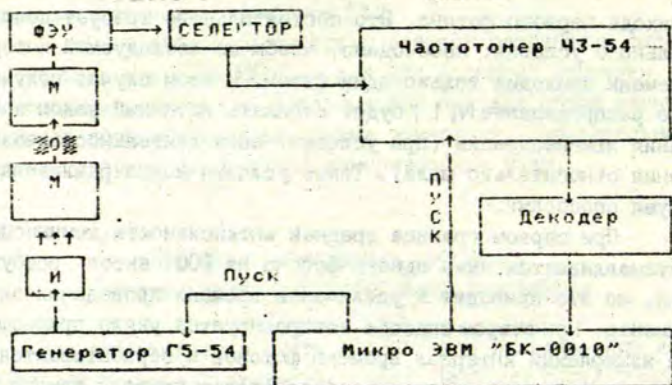
При первом граница средней интенсивности люминесценции устанавливается ниже одного фотона на 100 актов возбуждения, но это приводит к увеличению времени проведения эксперимента. При втором способе контролируется число пришедших за измеряемый интервал времени фотонов и обрабатывается только та информация, которая соответствует приходу одного фотона. По данным работы [4], если число приходящих за один цикл фотонов подчиняется распределению Пуассона, то при средней интенсивности люминесценции 1 фотон/цикл в  $\sim 37\%$  из всех циклов будет приходиться по одному фотону.

Разрешающая способность (ширина интервала) измерительной системы определяется наименьшим квантом временного разрешения блока измерения интервалов времени. Параметрами рассматриваемого метода являются число интервалов и частота повторений измерений.

### Практическая реализация многоканального усреднения

Как отмечено, основным принципом метода счета фотонов является быстрое считывание и запоминание числа одноэлектронных импульсов, приходящих за определенный интервал времени. Структурная схема установки, реализованной с помощью микроЭВМ БК-0010, приведена на рис.1.

Счет фотонов в данной установке реализован путем применения ФЭУ-106, селектора импульсов, описание которого приведено в работе [7], и сумматора импульсов - частотомера ЧЗ-54. Сбор данных реализован на микроЭВМ таким образом: к входу программируемого порта ЭВМ (описание его действий да-



Р и с. 1. Структурная схема устройства многоканально-го усреднения.

И - источник возбуждения, М - монохроматоры, О - образец.

о

но в работе [8]) через 10-разрядный параллельно-последовательный десятично-двоичный декодер, преобразующий десятичный код в двоичный, подключен частотомер ЧЗ-54. Декодер необходим для ускорения сбора данных, так как программное преобразование параллельно-последовательного десятично-двоичного кода в двоичный занимает  $\sim 100$  мкс на каждую цифру, а время преобразования, используя микросхемы К155ПР6, составляет  $\sim 40$  нс. К выходу программируемого порта подключены сигнальные шины дистанционного управления частотомером (сигнал пуск/сброс) и сигнал запуска генератора Г5-54, используемого для запуска источника возбуждения (в конкретном случае лазер ЛГМ-21). Как видно, установка собрана из стандартных блоков.

Второй составной частью системы является программное обеспечение. Информацию о числе импульсов с частотомера ЧЗ-54 необходимо оперативно размещать в ОЗУ ЭВМ. Для этого целесообразно использовать машинную команду `MOV @R1, (R2)+`, где

регистр R1 содержит адрес порта (I777I4<sub>8</sub>), а регистр R2 содержит адрес ОЗУ, с которого начинается размещение полученной с порта информации. Скорость выполнения последовательности этих команд определяет ширину интервала времени данной установки. Скорость выполнения команды (пересылка с одной ячейки оперативной памяти в другую) равна 13,33 мкс и обусловлена тактовой частотой работы микропроцессора.

Программа, обеспечивающая работу установки в режиме многоканального усреднения, состоит из "сервисной" части, написанной на языке программирования высокого уровня FOCAL и "измеряющей" части, написанной в машинных кодах. "Сервисная" программа работает в диалоговом режиме по принципу меню. Программа, написанная в машинных кодах, состоит из двух групп.

Первая из них обеспечивает непосредственное исполнение цикла сбора данных и производит следующие действия:

1) запускает генератор, который через некоторое время  $t$  запускает источник возбуждения,

2) запускает частотомер, который имеет некоторое "мертвое" время, равное временным сдвигам запуска возбуждения  $t$ ,

3) непрерывно выполняет команды MOV @R1, (R2)+, число которых равно числу каналов (в конкретном случае - 1024).

Вторая программа обеспечивает вызов подпрограмм запуска, считывания данных с частотомера, анализ и обработку полученных результатов, исправления ошибок, возникающих при считывании информации, и суммирования результатов по каналам.

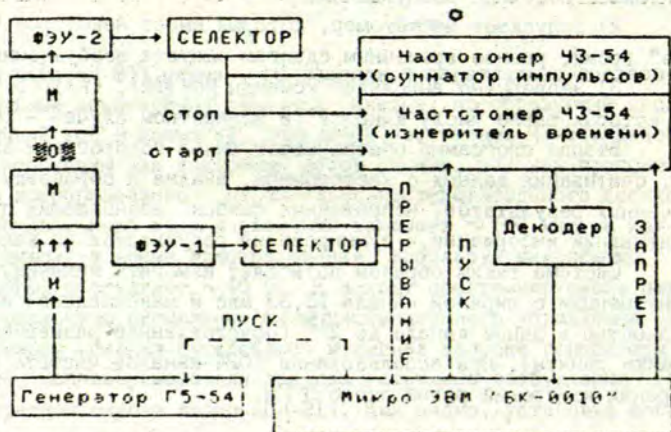
Система таким образом позволяет измерять кинетику люминесценции с шириной канала 13,33 мкс и максимальной интенсивностью в одном канале до  $2^{15}$  (обусловленной размерностью ячейки памяти). При использовании 1024 каналов частота повторения измерений равна около 5 Гц.



Практическая реализация метода корреляции одиночных фотонов

Как и в предыдущем случае, установка (см.рис.2) состоит из трех основных узлов - устройства счета фотонов, устройства управления и устройства сбора данных. Система для реализации режима счета фотонов состоит из ф.э.у., селекторов и частотомеров ЧЗ-54 (измеритель интервалов времени и сумматор числа импульсов).

Информация в ЭВМ вводится через вход программируемого порта с разъема вывода информации частотомеров ЧЗ-54. Для ввода используется декодер с параллельно-последовательного десятирично-двоичного кода в двоичный код, что позволяет считывать число с максимальной размерностью  $2^{10}$ . Со второго частотомера на порт подается сигнал о приходе первого фотона за цикл измерения. Выход программируемого порта используется для подачи на частотомеры сигналов "Пуск/сброс"



Р и с. 2. Структурная схема устройства корреляции одиночных фотонов.

И - источник возбуждения, М - монохроматоры, О - образец.

и "Запрет", а также сигнала запуска возбуждения при синхронном процессе измерений. В системе используется вход микроЭВМ внешнего прерывания с адресом I00, который через преобразователь уровней подключен к селектору ф.э.у., контролирующего начало возбуждения. Система не требует строго периодического цикла возбуждения.

Программа, обслуживающая установку, состоит из двух частей - "сервисной", написанной на языке программирования PASCAL, и части управления экспериментом, написанной в машинных кодах.

Программа в машинных кодах реализует следующие действия:

1) запрещает прерывания и меняет значения вектора прерывания по адресу I00,

2) снимает запрет прерываний и запускает оба частотомера,

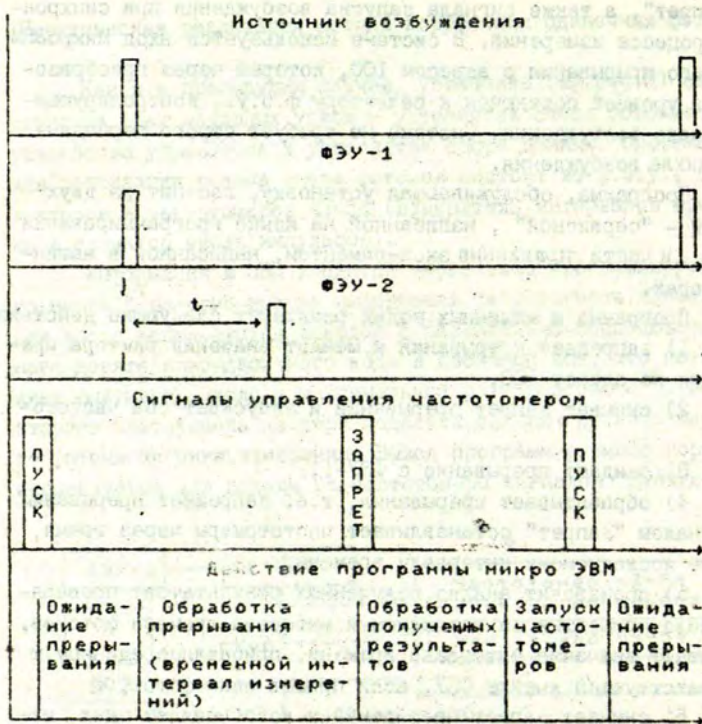
3) ожидает прерывание с ФЭУ-1,

4) обрабатывает прерывания, т.е. запрещает прерывания и сигналом "Запрет" останавливает частотомеры через время, равное исследуемому интервалу времени,

5) производит анализ полученных результатов: проверяет число пришедших за исследуемый интервал времени фотонов, считает значение интервала времени, прибавляет единицу к соответствующей ячейке ОЗУ, если пришел один фотон,

6) снимает запрет прерываний и возобновляет цикл измерений.

Диаграмма реализации данного метода во времени показана на рис.3. Исполнение алгоритма эксперимента позволяет накапливать информацию с максимальной частотой повторения  $\sim 4$  кГц. Ширина интервала обусловлена наименьшим дискретным квантом измерения интервала времени (в данном случае он может быть 10 или 100 нс). Число каналов равно 1024, что позволяет измерять кинетику люминесценции в интервале с 10 нс до 100 мкс. Максимальная размерность канала равна  $2^{16}$  и определяется размерностью ячейки ОЗУ.



Р и с. 3. Диаграмма времени работы устройства при методе корреляции одиночных фотонов.  $t$  - время между приходом фотона возбуждения и фотона люминесценции.

## З а к л ю ч е н и е

Для проведения кинетических исследований люминесценции в наносекундно-миллисекундном диапазонах возможно создать систему, состоящую из стандартных приборов и микроЭВМ БК-0010. Основные узлы этой системы используются и для других люминесцентных исследований (спектральных свойств). Применяя ту или иную программу и интерфейсную систему, экспериментатор может проводить разные люминесцентные исследования. Применение микроЭВМ позволяет создать дополнительные удобства экспериментатору: он может осуществлять визуальный контроль за накоплением данных (в виде графика). "Сервисная" программа обеспечивает также математическую обработку данных, их сохранение на магнитной ленте и определение оптимальных параметров для проведения эксперимента.

Созданная измерительная система имеет некоторые параметры хуже установки, описанной в работе [3]. Это касается частоты повторения сбора данных и временной ширины канала при использовании метода многоканального усреднения. Привлечение более быстрых микроЭВМ (ДЭК-3, ЭЛЕКТРОНИКА-85) позволяет улучшить эти параметры, однако подключение этих ЭВМ к остальной системе осложняется тем, что в этих машинах отсутствует программируемый порт.

Систему можно рассматривать и как дальнейшее развитие устройств, рассмотренных в работе [3]. Это относится к преобразователям "время-время", позволяющим повысить временное разрешение, что требует иных параметров самого метода счета фотонов (применение ф.э.у. и селекторов с улучшенной временной разрешенностью). Алгоритм сбора данных, реализованный на микроЭВМ по методу корреляции одиночных фотонов, в этом случае не требует особых изменений.

Как достоинство применения микроЭВМ в этой системе можно отметить относительно простое подключение ее к системе, реализующей счет фотонов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Янсонс Я.Л. Применение фотоэлектронных умножителей для счета фотонов // Методы и аппаратура для исследований люминесценции. - Рига, 1965. - С.3-39.
2. Тибергс Я.Э., Янсонс Я.Л. Универсальный селектор одноэлектронных импульсов фотоэлектронных умножителей // Методы и аппаратура для исследований люминесценции. - Рига, 1965. - С.40-57.
3. Тарденак Э.Э. Система счета фотонов для регистрации изменения слабых и быстротекающих процессов // Методы и аппаратура для исследований люминесценции. - Рига, 1965. - С.58-98.
4. Скуя Л.Н., Трухин А.Н. Исследования кинетики затухания люминесценции однофотонным методом с применением ЭВМ для сбора данных // Кибернетизация научного эксперимента. - Рига, 1981. - С.102-108.
5. Чернявский А.Ф. и др. Исследование кинетики люминесценции методом многоканального анализа // Ж.прикл.спектроскопии. - 1970. - Т.13, вып.5. - С.840.
6. Davis C.C., King T.A. Single Photon Couling Pile up Correction for Time Light Source // Rev.Sc.Instrum. - 1970. - Vol.41, N 3. - P.407-408.
7. Тибергс Я.Э., Паулаускас В.Н. Селектор одноэлектронных импульсов для системы счета фотонов // Приборы и техн.эксперимента. - 1980, № 5. - С.183-186.
8. Математическое обеспечение микроЭВМ Электроника БК-0010. - 1984. - Т.1, кн.1.

Статья поступила 2 июня 1988 года.

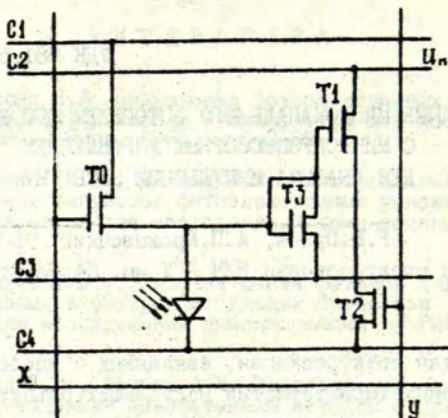
## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОГО ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА С МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ АНАЛИЗА ИМПУЛЬСНОЙ ЗАСВЕТКИ

Р.В. Орлов, А.П. Брюховецкий

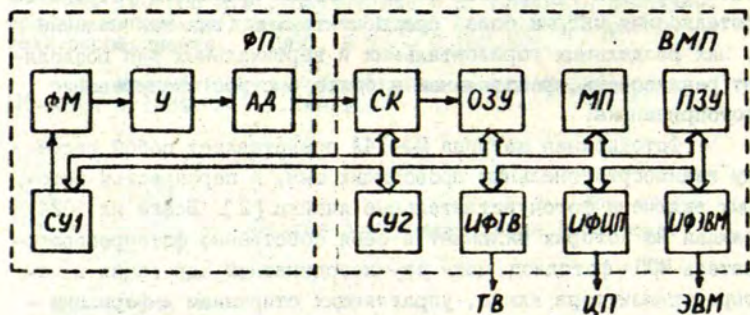
Отдел спектроскопии ИЛЧ ЯГУ им. Петра Стучки

Для задач спектроскопии, связанных с исследованиями пространственных характеристик излучающих объектов, для оптической локации, для автоматизации роботизированных технологических комплексов чрезвычайно актуальна разработка различных систем технического зрения на базе многоканальных фотоприемников. Выбор фотоприемника (вакуумных телевизионных трубок, телевизионных камер на ПЭС-матрицах, фотодиодных матриц) обусловлен каждой конкретной задачей [1]. При необходимости получения в реальном времени быстрого результата засветки использование в качестве приемного устройства фотодиодных матриц более предпочтительно, так как наличие у них отдельных горизонтальных и вертикальных шин позволяет реализовать произвольное и более быстрое сканирование фотоприемника.

Фотодиодная матрица МЭ-14А представляет собой систему взаимосртогональных проводящих шин, в перекрестья которых включены фоточувствительные ячейки [2]. Всего их 1024, каждая из которых включает в себя собственно фотопреобразователь МОП - фотодиод, цепи двухкоординатной адресации и четыре транзистора ключа, управляющих стиранием информации - Т0, считыванием - Т2, усилением - Т1 и подстройкой - Т3 (см. рис.1). Общая шина С4 используется для подачи импульсов стирания, на шину С2 подводится напряжение питания  $U_n$ . При обычном включении матрицы ток, текущий по сигнальной



Р и с. 1. Схема элементарной ячейки фотодиодной матрицы МФ-14А.



Р и с. 2. Функциональная схема фотоприемного устройства с микропроцессорным управлением.

шине X, после подачи на шину адресного входа Y импульса считывания, определяется напряжением на затворе T1, которое тем меньше, чем сильнее освещена ячейка фотодиодной матрицы.

Для быстрого анализа результатов импульсной засветки фотодиодной матрицы было разработано фотоприемное устройство с микропроцессорным управлением (ФЛУМП) (функциональную схему см. на рис.2). Это устройство осуществляет функцию ввода информации с фотодиодной матрицы, предварительной обработки и вывода информации на телевизор, цифropечать и в ОЗУ ЭВМ для дальнейшей обработки. Фотоприемное устройство состоит из двух частей - фотоприемника и блока микропроцессора.

Для исключения разброса уровней дискриминации, а также для упрощения схемы фотоприемник сделан одноканальным. Это возможно при нестандартном включении фотодиодной матрицы ФМ-14А, когда управление осуществляется и по шинам X, и по Y. Одноканальное включение означает последовательный опрос всех ячеек фотодиодной матрицы, поэтому использование команд микропроцессора для коммутаций управляющих сигналов на ее шинах X и Y влечет за собой большие временные затраты. В техническом задании время ввода, вывода информации, а также получения окончательного результата обработки ограничивалось 20 мс. Поэтому для ускорения ввода информации от фотоприемника на блок микропроцессора использованы в основном аппаратные средства. Предварительная обработка и вывод информации реализованы программными средствами.

Фотоприемник, кроме фотодиодной матрицы, содержит схему управления (СУ1), усилитель (У) и амплитудный анализатор (АД). Уровень дискриминации может быть задан программой. Для этого необходимо подключить регистр кода, управляемый микропроцессором, и цифро-аналоговый преобразователь.

Блок микропроцессора, кроме микропроцессора, содержит схему коммутации (СК), схему управления (СУ2), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), интерфейс телевизора (ИТТВ), интерфейс цифropечати (ИЦП), интерфейс ЭВМ (ИФЭВМ).

ФЛУМП может работать в нескольких режимах, в том числе автономно, без управляющей ЭВМ. Каждому режиму работы соответствует своя программа, записанная в ПЗУ. Там же раз-



мечены и тестовые программы. При выборе первого режима осуществляется прием, частичная обработка и пересылка информации из фотодиодной матрицы в ОЗУ ЭВМ. Для организации этого режима работы используются две программы. Одна записана в ПЗУ ФПУМП, а другая, управляющая - в ОЗУ ЭВМ. В начале ФПУМП находится в состоянии ожидания стартового импульса либо с ЭВМ, либо от устройства, работающего синхронно с засветкой. Приход стартового импульса сопровождается переводом ЭВМ в состояние ожидания, а в ФПУМП формируется импульс "стирания" предыдущей информации, и от микропроцессора на СУ1 и СУ2 подается несколько команд. СУ1 коммутирует X- и Y-координаты, одновременно СУ2 меняет адрес ОЗУ. По программе информация о засветке всех ячеек фотодиодной матрицы побитно записывается в ОЗУ ФПУМП. ЭВМ находится в состоянии ожидания до прихода импульса готовности ФПУМП к передаче информации. После предварительной обработки ФПУМП выставляет слово (16 разрядов) по словно на шины вывода и выдает импульс "готовность". Эта информация по программе, записанной в ОЗУ ЭВМ, по словно переписывается в буферную память.

В автономном режиме стартовый импульс формируется самим устройством, снятие информации с фотодиодной матрицы не отличается от основного режима. После записи в ОЗУ ФПУМП и частичной обработки по программе возможен вывод информации на телевизор в виде картинки из 32x32 элементов, имитирующей результаты засветки фотодиодной матрицы.

При тестовых режимах фотоприемник не работает. Вместо информации с фотодиодной матрицы в ОЗУ ФПУМП записывается тестовая информация с ПЗУ. Этим обеспечивается проверка функционирования системы, в которую входит ФПУМП.

Конструктивно ФПУМП выполнено в виде двух блоков, которые соединены кабелем. Блок микропроцессора собран на функционально законченных монтажных платах. Это облегчает модернизацию прибора при появлении новых микросхем, а также требований для решения более сложных задач.

Фотоприемное устройство вместе с ЭВМ ДБК-2 используется для регистрации импульсной засветки и нахождения координат пятна за-

светки. Для этого на языке ассемблер написана программа, обеспечивающая минимизацию времени съема и обработки информации. При построении алгоритма обработки принимались во внимание следующие моменты:

- информация о засветке фотодиодной матрицы записана в буферной памяти в 64 последовательных словах (в каждом слове 16 разрядов - битов, одна ячейка фотодиодной матрицы - один бит в памяти ЭВМ). Строка этой матрицы таким образом в памяти ЭВМ отражена в двух последовательных словах;
- для незасвеченных ячеек фотодиодной матрицы содержащее соответствующего бита равно "0";
- ячейка предполагается засвеченной, если содержимое соответствующего бита равно "1" и при наличии хотя бы еще одной единицы по соседству с ней по X- и Y-координатам, появление одиночной "1" рассматривается как шум.

Обозначим каждый элемент матрицы -  $a_{ij}$ ,  $a_{ij} = 0; 1$ ,  $1 \leq j \leq 32$ ;  $1 \leq i \leq 32$ . Для определения координат центра матрицы из  $32 \times 32$  элемента необходимо рассчитать четыре значения:  $N_1$  - количество парных единиц по координате X для всей матрицы,  $Sum_1$  - произведение каждого элемента на вес соответствующего столбца, суммирование по всем элементам матрицы

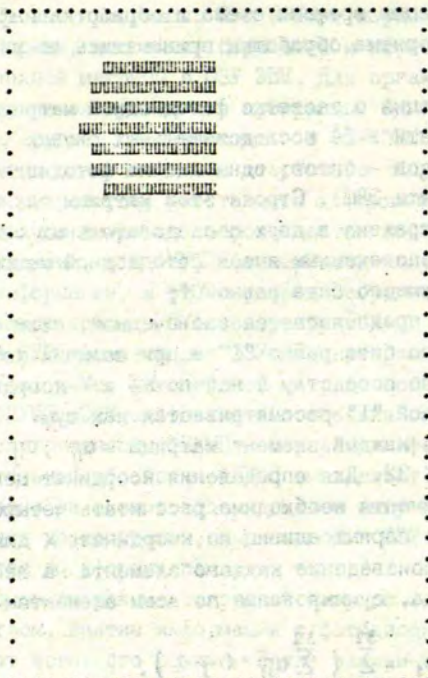
$$Sum_1 = \sum_{j=1}^{32} \left( \sum_{i=1}^{32} a_{ij} \cdot \langle j \rangle \right),$$

$N_2$  - количество парных единиц по координате Y для всей матрицы,  $Sum_2$  - произведение значения каждого элемента матрицы на вес соответствующей строки, суммирование также по всем элементам матрицы

$$Sum_2 = \sum_{i=1}^{32} \left( \sum_{j=1}^{32} a_{ij} \cdot \langle i \rangle \right).$$

Координаты центра матрицы в этом случае определяются следующим образом:

$$X = \frac{Sum_1}{N_1}; \quad Y = \frac{Sum_2}{N_2}.$$



Р и с. 3. Распечатка результатов засветки фотодиодной матрицы. Начало координат находится в центре матрицы, символом  $\pi$  - обозначены засвеченные ячейки.  $X = -0,449$ .

$Y = +10,865$ .

По программе нахождение этих сумм осуществлялось при последовательном переборе слов буферной памяти и для  $X$ -, и для  $Y$ -координат, при этом одновременно анализировались четыре слова. Такой подход позволил значительно сократить время на обработку. Полное время от момента засветки фотодиодной матрицы до выдачи координат центра тяжести пятна засветки - при засветке всей площадки матрицы составило 32 мс. В этом

случае в массиве обработки все биты равны "1". В реальной ситуации, когда засвечено менее половины ячеек фотодиодной матрицы, конечный результат импульсной засветки удастся получить на нашем устройстве с использованием описанной программы менее чем за 20 мс.

На рис.3 приведена распечатка результатов засветки фотодиодной матрицы и полученные при обработке координаты центра тяжести пятна засветки.

Разработанное устройство, помимо решения задачи по отысканию центра тяжести пятна засветки, может с успехом быть использовано для задач оконтуривания пятна засветки, а также для задач распознавания несложных объектов при соответствующем изменении программы обработки. По отработанным на ЭВМ алгоритмам можно составить программы и запрограммировать ПЗУ ФПУМП для автономного решения конкретных задач без использования ЭВМ.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Дворовкин В.Е., Панков В.А. Система технического зрения для идентификации технологического оборудования // Приборы и системы управления. - 1988. - № 1. - С.20-22.

2. Алексеенко М.Д., Бараночников М.Л. Приемники оптического излучения. - М., 1987. - С.71-75.

Статья поступила 7 июня 1988 года.

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ВЫСОКОАПЕРТУРНОГО СПЕКТРОФЛУОРИМЕТРА  
И СПЕКТРОФОСФОРИМЕТРА

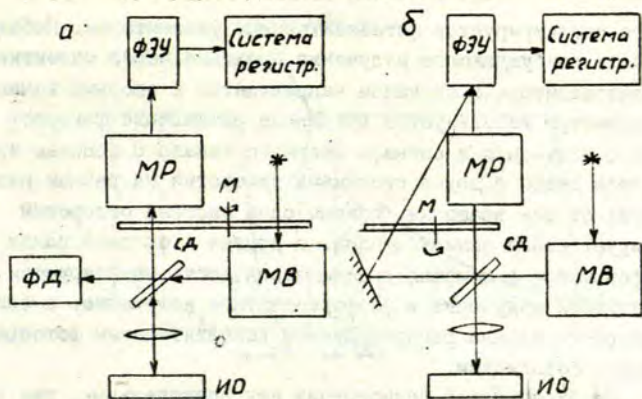
А.П.Круминьш\*, У.В.Янсон\*, Я.С.Поляков\*\*, Л.А.Шифферс\*\*

\* Отдел спектроскопии НИЧ ЛГУ им. Петра Стучки

\*\* ВНИИ научного приборостроения ЛНПО "Буревестник"

Методы анализа характеристик фотолюминесценции находят все более широкое применение и в научных, и в прикладных исследованиях. Изучение спектральных и временных характеристик флуоресценции и фосфоресценции позволяет получить важную информацию о природе и строении люминесцирующих центров и о тонких физических процессах, происходящих в объекте. В разных странах мира для проведения таких исследований выпускаются люминесцентные спектрофотометры различных моделей. Улучшение технических и эксплуатационных характеристик этих приборов является чрезвычайно актуальной задачей, от этого во многом зависят пути развития люминесцентных методов исследования.

Одним из основных факторов, определяющих возможности люминесцентного исследования, является величина потока люминесценции, достигающего до фотоприемника от люминесцирующего объекта. В результате анализа закономерностей преобразований потоков возбуждения и излучения люминесценции в люминесцентном фотометре было показано [1,2], что для получения наибольших световых потоков, достигающих до фотоприемника, необходимо использование оптических систем с наибольшими возможными величинами апертур возбуждения и регистрации в пространстве люминесцирующего объекта. Эта закономерность послужила основой для возникновения и развития высокоапертурной люминесцентной спектрофотометрии.



Р и с. 1. Оптическая схема фосфориметра (а) и флуориметра (б).

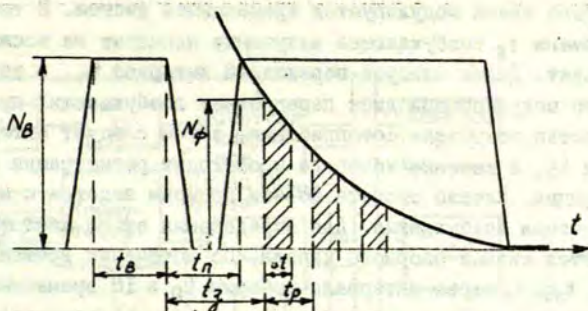
ИО - исследуемый объект, МВ - монохроматор возбуждения, МР - монохроматор регистрации, СД - интерференционный селективный светоделитель, М - модулятор, ФД - фотодиод, ФЭУ - фотоэлектронный умножитель.

Оптические системы (см.рис.1) высокоапертурного спектрофлуориметра [3] и спектрофосфориметра [4,5] имеют много общего. В обоих приборах источником возбуждающего излучения служит малогабаритная лампа (ртутная ДРШ-100 или ксеноновая ДКСШ-120). Спектральная область возбуждающего излучения выделяется с помощью монохроматора ветви возбуждения. По выходу из выходной щели монохроматора возбуждающее излучение отражается селективным интерференционным светоделителем, имеющим высокий коэффициент отражения для коротковолновых лучей и высокий коэффициент пропускания для более длинноволнового излучения, как это было предложено в [6]. Отразившись от светоделителя, возбуждающее излучение собирается на исследуемом объекте высокоапертурным объективом. Люминесцентное излучение собирается тем же высокоапертурным объективом, практически без потерь проходит через селективный светоделитель и попадает в монохроматор регистрации, а после выхода

из него регистрируется фотоэлектронным умножителем. Небольшая часть возбуждающего излучения проходит через селективный светоделитель и зеркалом направляется в опорный канал. В флуориметре используется временное разделение флуоресцентного излучения и сигнала опорного канала с помощью вращающегося диска с двумя системами отверстий на разных расстояниях от оси вращения, причем одна система отверстий модулирует канал люминесценции, а другая - опорный канал. В фосфориметре с помощью вращающегося диска модулируется возбуждающее излучение и фосфоресцентное излучение, а сигнал опорного канала регистрируется дополнительным фотоприемником - фотодиодом.

Необходимостью регистрации как спектральных, так и временных характеристик излучения весьма малой интенсивности обуславливаются высокие требования к системе регистрации. При этом за время регистрации кривой затухания интенсивность излучения уменьшается на несколько порядков. Поэтому система регистрации должна обеспечить возможность регистрации слабых сигналов, сравнимых с шумами фотоэлектронного умножителя с высокой линейностью. Этим требованиям отвечает метод счета фотонов, позволяющий регистрацию сигналов на уровне сотен или даже десятков фотонов в секунду и имеющий линейность в пределах более четырех порядков. Числовая форма представления результата, характерная для метода счета фотонов, упрощает накопление сигналов и их дальнейшую обработку.

При спектральных измерениях одновременно с излучением объекта регистрируется разного рода фоновое излучение, обусловленное люминесценцией основы, посторонними засветками и т.п. Такое излучение по спектру неравномерно. Поэтому в каждой точке спектра величина фонового излучения должна вычитаться из регистрируемого сигнала. Кроме того, спектры оказываются искаженными вследствие спектральной селективности оптических элементов, а также неравномерности излучения по спектру источника возбуждения и спектральной селективности фотоприемника. В связи с этим необходимо ввести поправочные коэффициенты, применение которых позволяет получать исправленные спектры флуоресценции исследуемых объектов.



Р и с. 2. Временная диаграмма регистрации фосфоресценции.

$N_B$  - интенсивность возбуждения,  $N_Ф$  - интенсивность фосфоресценции,  $t_B$  - время возбуждения,  $t_n$  - переходный интервал,  $t_z$  - время задержки между концом возбуждения и началом регистрации,  $t_p$  - интервал выборки,  $\Delta t$  - время выборки.

Система регистрации должна также обеспечить учет флуктуаций интенсивности источника возбуждения. Для этого предусмотрена возможность измерения интенсивности возбуждения и деления измеренной интенсивности флуоресценции или фосфоресценции на интенсивность возбуждающего излучения, измеренной в опорном канале.

Регистрация исправленных спектров флуоресценции и фосфоресценции осуществляется разверткой по спектру монохроматора ветви регистрации, определением интенсивности излучения по приходу реперных меток длины волны от монохроматора, вычитанием фона, делением интенсивности люминесценции на сигнал от опорного канала и умножением на поправочный коэффициент.

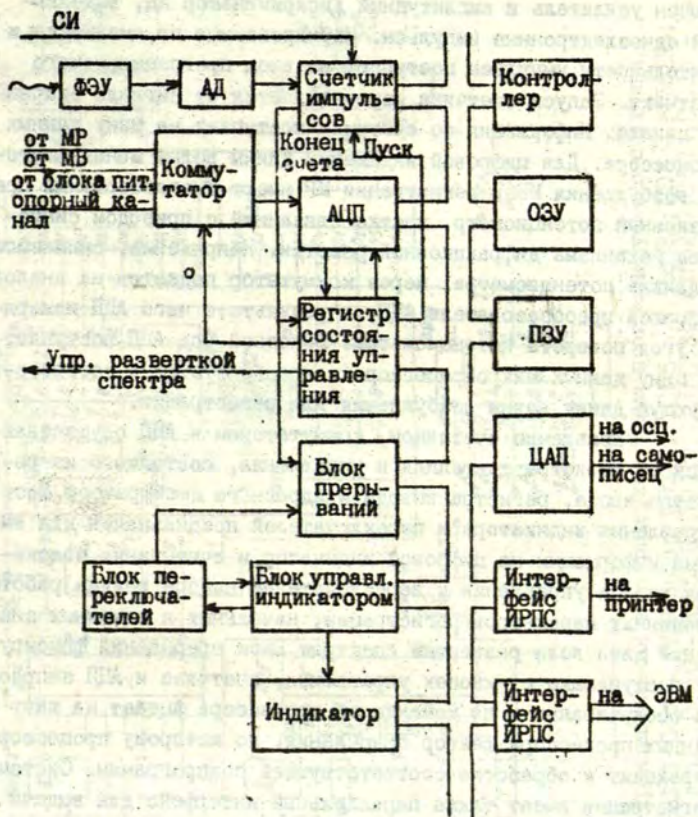
Основной временной характеристикой фосфоресценции является кривая затухания. Кривая затухания фосфоресценции представляет собой временную зависимость уменьшения интенсивности фосфоресценции после прекращения возбуждения объекта. Временная диаграмма, поясняющая работу системы регистрации фосфориметра, приведена на рис.2. Излучение источника воз-



будущего света модулируется вращающимся диском. В течение времени  $t_b$  возбуждающее излучение попадает на исследуемый объект. Далее следует переходный интервал  $t_n$ , в течение которого модулирующий диск перекрывает возбуждающий пучок и полностью открывает фотоприемник, затем следует интервал времени  $t_f$ , в течение которого происходит регистрация фосфоресценции. Начало отсчета по оси времени ведется с момента окончания возбуждения. Для определения этого момента используется сигнал опорного канала. По истечении времени задержки  $t_d \gg t_n$  через интервалы выборки  $t_p$  в 16 временных точках, точнее в пределах промежутков времени  $\Delta t$ , определяется интенсивность фосфоресценции с учетом фоновой засветки, темновых импульсов фотоэлектронного умножителя, уровня интенсивности и флуктуаций источника возбуждения. Кроме того, система регистрации обеспечивает возможность накопления сигналов в каждой временной точке до достижения необходимого отношения сигнал/шум.

Поскольку система регистрации должна обеспечивать хранение, обработку и последующую выдачу больших массивов информации, было решено использовать встроенный микропроцессор. Выбор микропроцессорного комплекта серии КР580 был обусловлен его доступностью, достаточным быстродействием, наличием программного обеспечения [7], широкой номенклатуры портов ввода - вывода информации. Главным при разработке системы регистрации является составление формализованного алгоритма работы системы регистрации и оптимальное распределение ее функций управления, сбора и обработки информации между аппаратными и программными средствами микропроцессорной системы. По мнению разработчика, особый интерес представляет схемное решение программируемого счетчика импульсов, в котором удачно сочетаются использование аппаратных и программных средств для управления, сбора и предварительной обработки информации, чем достигается максимальное быстродействие, и широкие функциональные возможности.

Функциональная схема системы регистрации представлена на рис.3. Регистрируемый световой поток попадает на фо-



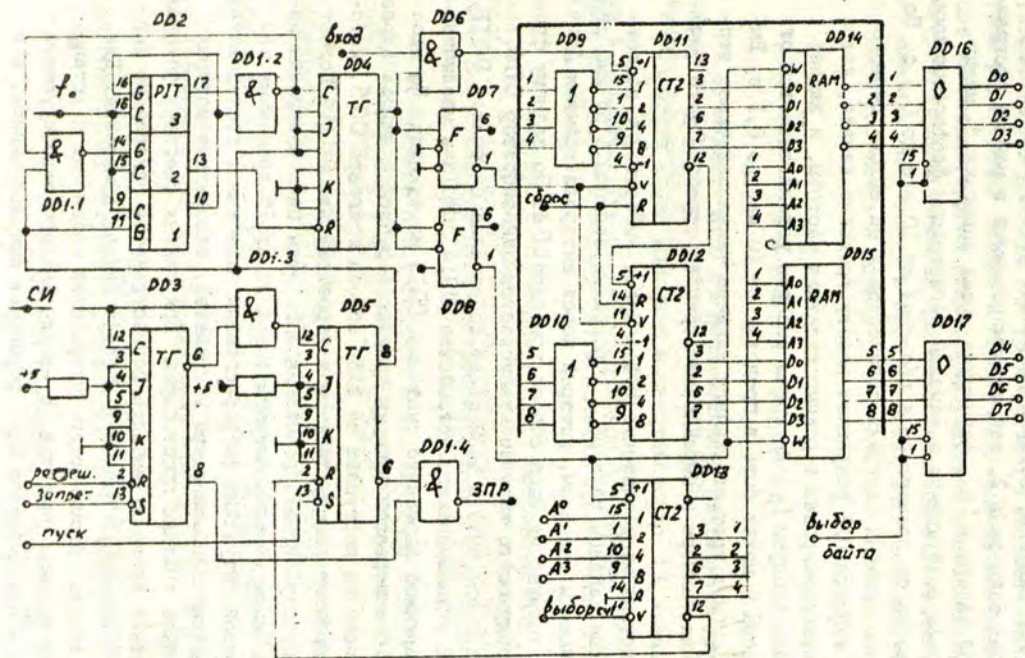
Р и с. 3. Функциональная схема системы регистрации.

АД - амплитудный дискриминатор, АЦП - аналого-цифровой преобразователь, ОЗУ - оперативное запоминающее устройство, ЦАП - цифроаналоговый преобразователь.

токатод фотоэлектронного умножителя, к аноду которого подключен усилитель и амплитудный дискриминатор АД, выделяющий одноэлектронные импульсы. Нормированные по амплитуде и длительности импульсы поступают на вход программируемого счетчика. Запуск счетчика осуществляется от сигнала опорного канала. Информация со счетчика поступает на шину данных процессора. Для цифровой индикации длины волны монохроматора возбуждения МВ и регистрации МР имеют многооборотный прецизионный потенциометр, жестко связанный с приводом синусного механизма дифракционной решетки. Напряжение, снимаемое с движка потенциометра, через коммутатор подается на аналоговый цифровой преобразователь АЦП, в результате чего АЦП измеряет угол поворота потенциометра. Выходной код АЦП поступает на шину данных микропроцессора и преобразуется в соответствующую длину волны возбуждения или регистрации.

Управление счетчиком, коммутатором и АЦП осуществляется от регистра состояния и управления, состоящего из регистра ввода, регистра вывода и адресного дешифратора. Блок управления индикатора и переключателей предназначен для вывода информации на цифровой индикатор и считывания положения кнопок управления и переключателей набора режима работы, временных параметров регистрации, начальных и конечных значений длин волн развертки спектра. Блок прерываний фиксирует поступающие от кнопок управления, счетчика и АЦП запросы на обслуживание и по команде от процессора выдает на шину данных процессора вектор прерывания, по которому процессор переходит к обработке соответствующей подпрограммы. Система регистрации имеет также параллельный интерфейс для выдачи данных на печатающее устройство и последовательный интерфейс для связи с ЭВМ.

Принципиальная схема программируемого счетчика показана на рис. 4. Одноэлектронные импульсы с выхода дискриминатора поступают на вход вентиля DD6. Стробирование счета осуществляется программируемым таймером DD2 и триггером стопа DD4. Синхроимпульс от опорного канала через вентиль DD1.3 поступает на вход триггера запуска DD6. По заднему



Р и с. 4. Принципиальная электрическая схема программируемого счетчика.

DD1 - К 155ЛА3; DD2 - КФ580ВМ53; DD3, ..., DD5 - К 155ТВ1; DD6 - К155ТЛ3;  
 DD7, DD8 - К155АГ1; DD9, DD10 - К155ЛН1; DD11, ..., DD13 - К155Е7; DD14, DD15 - К155РУ2;  
 DD16, DD17 - К155ЛП1.

фронту синхроимпульса переключается триггер DD3, который запрещает запуск следующего синхроимпульса, пока не поступит команда разрешения от регистра управления. Переключается триггер запуска, который разрешает работу таймера. Первый канал таймера DD2, запрограммированный в режиме программируемой задержки [2], формирует время задержки  $t_3$  между окончанием возбуждения и началом регистрации фосфоресценции.  $t_3$  задается от процессора в пределах от 10 мкс до 0,1 с. По истечении времени задержки логической 1 на выходе первого канала таймера DD2 разрешает работу третьего канала, который запрограммирован в режиме делителя частоты, и задает интервалы выборки  $t_p$ . Интервал выборки устанавливается от процессора и может быть в пределах от 10 мкс до 0,1 с. Выходной сигнал третьего канала таймера также запускает второй канал таймера и переключает триггер строба DD4. В течение времени  $\Delta t$  одноэлектронные импульсы через вентиль DD6 поступают на вход счетчика DD11. Время выборки  $\Delta t$  задается вторым каналом таймера, запрограммированным в режиме строба с внешним запуском, который через интервал времени  $\Delta t$  выдает импульс на вход сброса триггера DD4. По заднему фронту стробирующего импульса запускается одновibrator DD8. Импульс с его выхода записывает содержание счетчиков DD11 и DD12 в запоминающее устройство DD14, DD15 и увеличивает содержимое адресного счетчика DD13 на единицу. По окончании 16 интервалов выборки импульс переноса с выхода адресного счетчика поступает на вход сброса триггера DD5, который запрещает работу таймера и через вентиль DD1.4 подает на процессор сигнал прерывания ЗПР. Этим цикл измерения завершен. Таким образом отсчеты в каждой из 16 временных точек кривой затухания фосфоресценции записаны в последовательных ячейках запоминающего устройства, содержание которых может быть считано процессором. При слабых световых потоках и коротких временах выборки осуществляется накопление сигнала за несколько десятков и сотен циклов измерения. Для этого выходы запоминающего устройства соединены с установочными входами счетчика. В начале каждого стробирующего импульса одновibrator DD7 формирует импульс записи, а в

счетчике записывается отсчет, полученный в предыдущем цикле измерения. Количество циклов измерения задается по программе от процессора. Емкость приведенного на рис.4 счетчика - один байт. При необходимости разрядность счетчика увеличивается до двух или трех байтов. Разработанная система регистрации входит в состав создаваемых опытных образцов высокоапертурных спектрофлуориметров и спектрофосфориметров, предназначенных для качественного и количественного анализа химических и биологических объектов любого агрегатного состояния и формы.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Поляков Я.С. Об использовании микроскопа для люминесцентных исследований // Докл. АН СССР. - 1971. - Т.196, вып.6. - С.1310-1312.
2. Шифферс Л.А., Поляков Я.С. Способы освещения объекта в высокоапертурной люминесцентной фотометрии // Люминесцентный анализ в медико-биологических исследованиях. - Рига, 1980. - С.33-41.
3. Шифферс Л.А., Поляков Я.С., Соловьева И.И., Кузьмик С.Н. Спектрофлуориметр с малым объемом анализируемой пробы // Тез.докл. Всесоюзного научно-технического совещания "Аналитическое приборостроение. Методы и приборы для анализа жидких сред". - Тбилиси, 1980. - С.145-146.
4. Поляков Я.С., Розанов Ю.М., Брумберг Е.М. Установка для исследования фосфоресценции микрообъектов // Цитология. - 1966. - Т.8, № 5. - С.677-681.
5. Поляков Я.С. Фосфоресцентный микроскоп // Ж.прикл. спектроскопии. - 1967. - Т.7, вып.4. - С.633-637.
6. Брумберг Е.М. О флуоресцентных микроскопах // Ж. общей биологии. - 1955. - Т.16, № 3. - С.222-237.
7. Левенталь Л., Сейвилл У. Программирование на языке ассемблера для микропроцессоров 8080 и 8050. - М., 1987. - 448 с.
8. Каган Б.М., Сташин В.В. Основы проектирования микропроцессорных устройств автоматики. М., 1987. - С.192.

Статья поступила 30 мая 1988 года.

## ЭКСИМЕРНЫЙ ЛАЗЕР ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ФОТОЛИЗА В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

У.А.Гросс, Ю.А.Сидиных

Отдел спектроскопии при НИЧ ЛГУ им. Петра Стучки

Исследования атомов и молекул в газообразной фазе методом импульсного фотолиза требуют применения мощного импульсного источника возбуждающего излучения в ультрафиолетовой области спектра. Наряду с импульсными газоразрядными лампами в качестве источника возбуждения эффективно применяются эксимерные лазеры, работающие на смесях галогенидов инертных газов [1,2]. В экспериментах по импульсному фотолизу такие лазеры обладают следующими существенными преимуществами.

1. Ширина линии генерации  $\sim 1$  нм делает возбуждение селективным и значительно более интенсивным в соответствующей области спектра.

2. Меняя состав активной среды, можно получать генерацию на нескольких длинах волн.

3. Длительность импульса генерации порядка десятка наносекунд позволяет по времени примерно на три порядка раньше начать регистрацию продуктов фотолиза.

4. Излучение от лазера узконаправлено.

Эксимерные лазеры работают на связанно-свободных переходах молекул. Образование эксимерных молекул галогенидов инертных газов происходит непосредственно в процессе возбуждения от исходных компонент - инертного газа  $Xe$ ,  $Kr$ ,  $Ar$  и молекулы галогеноносителя  $HCl$ ,  $NF_3$ ,  $F_2$  в присутствии буферного газа  $He$ . Характерное соотношение компонент соответственно 1:0,1:10-100, суммарное давление  $\approx 2-5$  атм.

Для достижения пороговых значений инверсии и для получения генерации на эксимерных смесях необходимо создать концентрацию возбужденных молекул  $\sim 10^{14}-10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Подобная концентрация может быть достигнута при весьма высокой плотности накачки  $\sim 10^{-2}$  Дж/см<sup>3</sup> за  $10^{-7}-10^{-8}$  с [3,4]. Практическая реализация накачки составляла основные сложности создания первых эксимерных лазеров. В нашей лазерной установке применен наиболее доступный и соответствующий технологическим возможностям электроразрядный способ возбуждения.

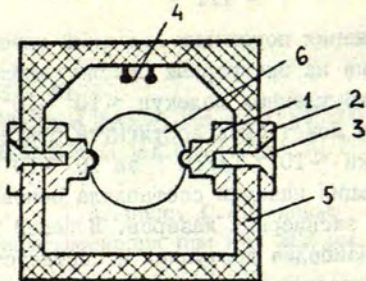
Для облегчения условий пробоя и обеспечения однородного разряда в газе высокого давления рабочая смесь предварительно ионизируется ультрафиолетовым излучением и достигается концентрация электронов  $\sim 10^9-10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Это позволяет параметры возбуждающего разряда выбрать оптимальными для возбуждения лазера ( $10^3-10^4$  В/см). Разряд с такими параметрами можно реализовать лишь на небольших расстояниях, т.е. поперек лазерной ячейки.

Созданная в лаборатории эксимерная лазерная установка состоит из трех основных частей - это лазерная ячейка и две системы питания, электрическая и газовая. Их конструкция и особенности описаны ниже.

Л а з е р н а я   я ч е й к а представляет собой герметический сосуд для содержания активной среды и включает в себя электроды предварительной ионизации, электроды основного возбуждающего разряда и юстировочные узлы резонатора (см.рис.1). Электроды поперечного возбуждающего разряда размещены на боковых стенках ячейки и имеют электрический контакт с наружной контактной пластиной по всей длине. Расстояние между ними 16 мм, длина 560 мм.

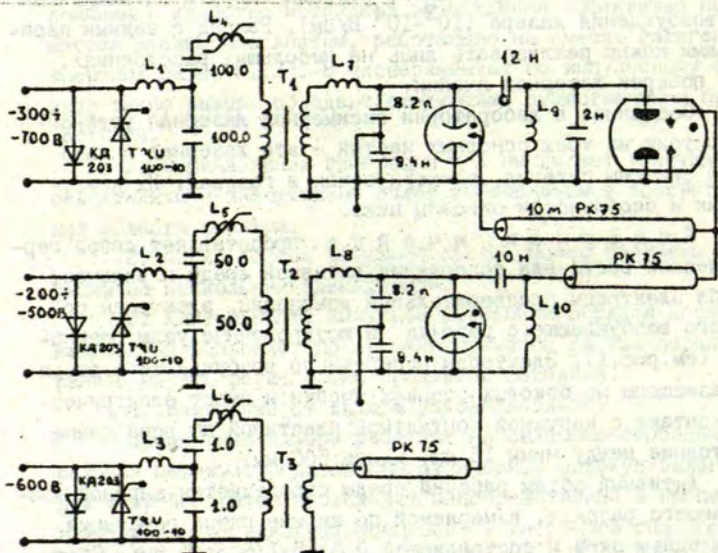
Активный объем рабочей среды определяется шириной возбуждающего разряда, измеряемой по ширине пятна генерации на выходном окне и составляющей  $0,5 \times 5,6 \times 1,6 \approx 45$  см<sup>3</sup>. Сбоку по всей длине разрядного промежутка расположены искровые промежутки - источники ультрафиолетового излучения предварительной ионизации. На торцах ячейки на сильфонных узлах закреплены плотное алюминиевое зеркало и кварцевая пластина,





Р и с. 1. Поперечное сечение лазерной ячейки.

1 - электрод возбуждающего разряда, 2 - наружная контактная пластина, 3 - контактирующий болт, 4 - искровой промежуток предварительной ионизации, 5 - корпус, 6 - окно.



Р и с. 2. Принципиальная схема электрического питания лазера.

которые одновременно герметизируют лазерную ячейку и образуют плоскопараллельный резонатор. Корпус ячейки склеен из стеклотекстолита и покрыт слоем эпоксидной смолы. Сильфонные узлы и электроды в целях защиты покрыты Ni. Газовая смесь по отверстиям у торцов попадает в ячейку и выходит в центре. Такое направление прокачки смеси уменьшает налет продуктов разряда на зеркало и выходное окно.

Электрическая схема питания лазера имеет три синхронизированных во времени канала: каналы предварительной ионизации и основного возбуждающего разряда и вспомогательный канал - запуска разрядника (рис.2). Управление каналами осуществляется импульсами от блока синхронизации открыванием тиристорov в низковольтной части каналов.

Высоковольтные конденсаторы заряжаются до 30-50 кВ от импульсного источника, работающего по принципу перезарядки конденсаторов через импульсный высоковольтный трансформатор. Этот трансформатор, намотанный на лепточном тороидальном сердечнике и залитый эпоксидной смолой, рассчитан на передачу за 10-15 мкс энергии примерно в 10 Дж. Высоковольтная часть каналов коммутируется разрядником, наполненным газом. В канале предварительной ионизации разрядник запускается импульсом от вспомогательного канала в момент достижения максимума напряжения на высоковольтном конденсаторе (рис.3).

Импульс разряда этого канала используется для предварительной ионизации рабочей смеси в лазерной ячейке и для запуска через линию задержки (10 м кабеля РК 75) разрядника в канале основного возбуждающего разряда.

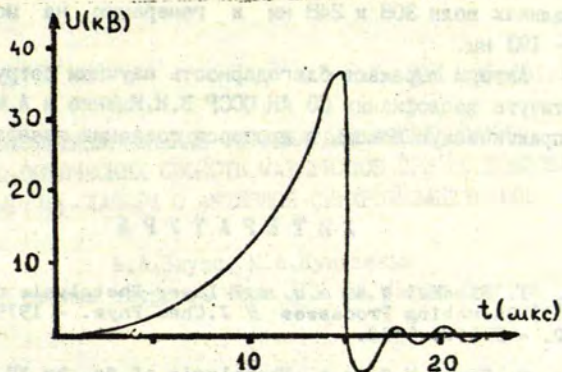
Высоковольтная цепь возбуждающего контура состоит из конденсатора, разрядника и полосковой линии. Эта цепь соединяет накопитель энергии - конденсатор с электродами поперечного разряда ячейки. Коммутация этого контура с помощью разрядника, конструкция полосковой линии и самой лазерной ячейки с минимальной собственной индуктивностью дают возможность добиться длительности импульса разряда  $\sim 10$  нс и с высокой скоростью нарастания разрядного тока. Длительность импульса генерации соответственно  $\sim 5$  нс [5].

Применение импульсного питания высоковольтных контуров позволяет уменьшать неустойчивость срабатывания разрядников по напряжению и по времени. Давление в разрядниках поддерживается отдельной азотной газовой системой вблизи порога самопробоя. Напряжение на высоковольтных конденсаторах и синхронность их зарядки с запускающими импульсами контролируется по сигналу от емкостных делителей на осциллографе (рис.3).

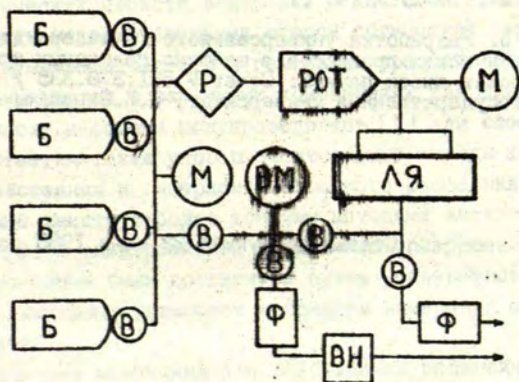
Газовая система обеспечивает приготовление запаса эксимерной смеси и ее прокачку через лазерную ячейку (рис.4). Газы хранятся в металлических баллонах под давлением до 150 атм и смешиваются в порядке нарастания давления. Готовая смесь хранится в баллоне под давлением до 40 атм, откуда через редуктор подается в ячейку. В процессе работы лазера контролируется давление в ячейке и скорость прокачки газа ( $\sim 0,1-1,0$  л. атм/мин). Необходимость прокачки обусловлена агрессивностью рабочей смеси, вследствие чего происходит ее загрязнение продуктами реакции галогеносителей со стенками газовой системы и лазерной ячейки. Величина прокачки зависит от состава смеси, чистоты газов, качества материалов газовой системы и подбирается минимальной для конкретной энергии генерации. В процессе создания и эксплуатации газовой системы и ячейки необходимо проводить пассивацию внутренних поверхностей. Это усложняет переход от фторсодержащих смесей к хлорсодержащим и обратно.

Необходимая чистота в газовой системе при приготовлении рабочей смеси обеспечивается откачиванием всех ее частей масляно-ротационным насосом. Перед насосом и перед выбросом в атмосферу отработанная смесь проходит через галогенопоглощающий фильтр.

На созданной в лаборатории лазерной установке получена генерация на молекулах  $\text{XeCl}$  - 308 нм,  $\text{KrF}$  - 248 нм с энергией импульса  $\approx 10$  мДж и  $\text{KrCl}$  222 нм -  $\approx 1$  мДж, частотой следования 1 Гц. После доработки лазерной ячейки и схемы возбуждения планируется получить импульсы с энергией 30-40 мДж



Р и с. 3. Осциллограмма напряжения на высоковольтном конденсаторе в момент срабатывания разрядника.



Р и с. 4. Схема газовой системы лазера.

Принятые сокращения: Б - баллон, В - вентиль, Р - редуктор, РОТ - ротаметр, М - манометр, ВМ - вакуумметр, ЛЯ - лазерная ячейка, Ф - фильтр, ВН - вакуумный насос.

на длинах волн 308 и 248 нм и генерацию на молекуле ArF- 193 нм.

Авторы выражают благодарность научным сотрудникам Института теплофизики СО АН СССР В.Н.Ищенко и А.М.Ражеву за практическую помощь в процессе создания лазера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bischel W.K. a.o. ArF Laser Photolysis of CCl<sub>4</sub>. I. Se<sup>(1S)</sup> Quenching Processes // J.Chem.Phys. - 1979. - Vol.70, N 12. - P.5589-5592.
2. Gower M.C. a.o. Photolysis of Se<sub>2</sub> by VU Lasers: Application to Kinetics of Group-VI Laser<sup>2</sup> Systems // J.Appl. Phys. - 1979. - Vol.50, N 9. - P.5988-5993.
3. Злецкий А.В. Экимерные лазеры // Успехи физических наук. - 1978. - Т.125, № 2. - С.279-313.
4. Роулз Ч. Экимерные лазеры / Перевод с английского. - М., 1981. - 245 с.
5. Разработка универсального УФ-лазера для исследования физических процессов в щелочно-галогидных кристаллах для оптических ячеек памяти: Отчет № 621.378.335 / Новосибирский государственный университет; Э.И.Синайко. - Новосибирск, 1980.

Статья поступила 22 июня 1988 года.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ  
АМГ: Nd -ЛАЗЕРА С АКТИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

Б.А.Заулс, М.А.Кундзинш  
НИИ физики твердого тела ЛГУ им. Петра Стучки

В в е д е н и е

В познании нелинейно-оптических явлений пройден путь от факта констатации их существования до разработки сегодня уже общепризнанных нелинейно-оптических методов исследования опико-физических свойств вещества. В качестве примера следует отметить методы генерации второй оптической гармоники, генерации суммарной частоты и генерации третьей гармоники, которые применяются в различных комбинациях для диагностики поверхности и объема полупроводников [1] или слоев молекул [2]. Отметим также усовершенствованные методы комбинационного рассеяния и гиперкомбинационного рассеяния света, используемые вместе с более тонкими методами активной спектроскопии [3] и спектроскопии с временным разрешением [4]. Успехи в основном были достигнуты путем усовершенствования параметров лазерных установок и средств измерения оптических сигналов.

В качестве излучения для возбуждения нелинейно-оптических процессов в среде необходимо применять мощные короткие импульсы лазеров. В таких экспериментах традиционно используются мощный импульсный лазер и измерение импульсов фототока фотоумножителя аналоговым стробируемым интегратором или аналого-цифровым преобразователем с последующим усреднением отсчетов измерений при помощи ЭВМ. Время накоп-

ления необходимого количества данных такими установками значительно увеличивается из-за низкой частоты следования (доли и единицы герца) и плохой воспроизводимости лазерных импульсов.

Проведение прецизионных измерений величины нелинейно-оптического сигнала стало возможным лишь с развитием лазеров с высокой частотой следования достаточно мощных, хорошо воспроизводимых световых импульсов и предельно чувствительных средств измерения интенсивности оптического сигнала, т.е. счетчиков фотонов.

В нашей автоматизированной системе, предназначенной в основном для исследования структуры сегнетоэлектрических материалов методами нелинейной оптики, использован непрерывно накачиваемый твердотельный лазер на алюмо-итриевом гранате с неодимом (АИГ:Nd), работающий в режиме двойной модуляции, и двухканальная система стробоскопического счета фотонов, разработанная в НИИ физики твердого тела. Рутинные операции процесса измерения, а также сбор данных и предварительная обработка результатов автоматизированы при помощи микроЭВМ БК-0010. Передача данных с приборов системы на микроЭВМ осуществляется по стандартному интерфейсу, так называемому каналу общего пользования.

Автоматизированная система используется для исследования температурных фазовых переходов сегнетоэлектрических материалов методом генерации второй оптической гармоники [5]. Гибкость системы как результат стандартизации интерфейса, универсальности аппаратуры и программного обеспечения дает возможности в широком температурном диапазоне проводить также электрооптические, диэлектрические и электрометрические измерения образцов. Далее более подробно обсудим технические решения и характеристики основных частей рассматриваемой системы.

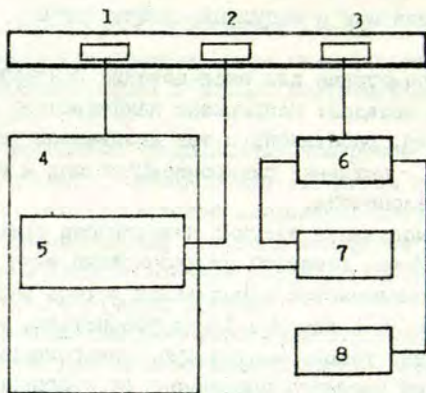
## Работа и конструкция лазера на АИГ: Nd в режиме активной синхронизации мод и модуляции добротности

Подходящими параметрами для исследования нелинейно-оптических процессов обладает непрерывно накачиваемый твердотельный АИГ: Nd-лазер, работающий в так называемом режиме с двойной модуляцией - активной синхронизацией мод и модуляцией добротности резонатора.

Метод двойной модуляции получил известность сравнительно недавно [6]. Метод активной синхронизации мод [7] непрерывного лазера заключается в модуляции потерь резонатора на частоте  $f = 2L/c$ , где  $L$  - длина резонатора,  $c$  - скорость света. Питание такого модулятора (синхронизатора мод) осуществляется от внешнего прецизионного кварцевого генератора, что требует точной подстройки в резонанс длины резонатора. Значительное увеличение пиковой мощности генерируемых импульсов можно достичь в том же резонаторе, дополнительно применяя модуляцию добротности. Когда модулятор добротности находится в закрытом состоянии, в активной среде происходит накопление инверсии. При выключении потерь, вносимых модулятором, вся запасенная в лазерной среде энергия высвобождается в виде цуга пикосекундных импульсов.

Динамика развития короткого лазерного импульса в режиме двойной модуляции подробно исследована как теоретически [8], так и экспериментально [9,10]. Показано [9], что для развития предельно короткого импульса ( $\tau_{имп} \leq 100$  пс) необходимо значительное (до 500 нс) время предварительной слабой непрерывной генерации перед каждым излучением цуга. Такой процесс наиболее эффективно можно воспроизводить в интервале частот от 100 Гц до 25-30 кГц. Исследованы также изменения параметров импульсов при расстройке длины резонатора [11] и снижение их флуктуаций после включения синхронизации мод [12]. Показано воздействие [10] плоскопараллельных внутрирезонаторных эталонов различной толщины на предельную длительность генерируемых импульсов и стабильность работы лазера.





Р и с. 1. Структурная схема АИГ:Nd-лазера с активной синхронизацией мод.

1 - квантрон К-301А, 2 - акустооптический модулятор добротности МЗ-301, 3 - акустооптический синхронизатор мод МЛ-202, 4 - блок питания БП 5,0-40, 5 - источник питания акустооптического затвора, 6 - усилитель мощности высокой частоты диапазона 40-60 МГц, 7 - импульсный генератор Г5-56, 8 - синтезатор частоты Ч6-31.

Конструктивно лазер нашей измерительной системы реализован (рис.1) на базе серийного лазера ЛТИ-501 [13], в котором использован квантрон К301А с лампой непрерывной накачки ДНП-6/30А и кристаллом АИГ:Nd диаметром 4 мм и длиной 65 мм. Акустооптическая модуляция добротности осуществляется модулятором МЗ-301 и стандартным блоком источника питания акустооптического затвора, входящими в комплект блока питания лазера БП-5,0-40.

Чтобы обеспечить режим активной синхронизации мод, при помощи серийного модулятора МЛ-202 лазер был усовершенствован. Для работы на одной из резонансных частот модулятора вблизи 50 МГц необходимо было резонатор лазера удлинить до 150 см, при сохранении его механической и термической устойчивости. Проведенные по стандартной методике [14] расчеты

стабильности лазерного резонатора показали, что оптимальная стабильность моды обеспечивается при силе термической линзы, наводимой в активном элементе АИГ:Nd, когда ток лампы накачки находится в диапазоне от 28 до 30 А.

Механическую устойчивость удлиненного резонатора обеспечивает оптическая скамья ОСК-2ЦД, на которой размещены направляющие, удерживающие два инваровых стержня диаметром 22 мм и длиной 180 см. На них закреплены все основные элементы резонатора: стандартный корпус от лазера ЛТИ-501 с квантроном, модулятором добротности и выпуклым глухим зеркалом с радиусом кривизны 40 см, а также вынесенное на расстоянии около 55 см от корпуса плоское выходное зеркало (пропускание 16%) в юстировке на микрометрическом столике. Последний позволяет подстроить длину резонатора до точности порядка 10 мкм для установки точного режима синхронизации мод. На этом же столике в юстируемой оправе расположен акустооптический синхронизатор мод - стандартный модулятор МЛ-202. Питание модулятора осуществляется от нестандартного усилителя высокой частоты мощностью до 2 Вт на частоте около 49,72 МГц, которую задает синтезатор частоты Ч6-31. Взаимную временную синхронизацию работы акустооптического модулятора добротности и синхронизатора мод обеспечивает импульсный генератор Г5-56, управляющий источником питания акустооптического затвора в режиме внешнего запуска и модулирующий выходную мощность усилителя высокой частоты. Такой импульсный режим питания значительно снижает среднюю мощность, подводимую к модулятору МЛ-202, и стабилизирует его тепловой баланс. Применение выходного зеркала на плоской подложке ограничивает предельное сокращение лазерного импульса, но при этом значительно облегчаются требования к точной установке длины резонатора, что важно при проведении длительных экспериментов. Параметры лазера приведены в таблице. Во время эксперимента параметры контролируются с по-

## Т а б л и ц а

## Основные параметры лазера

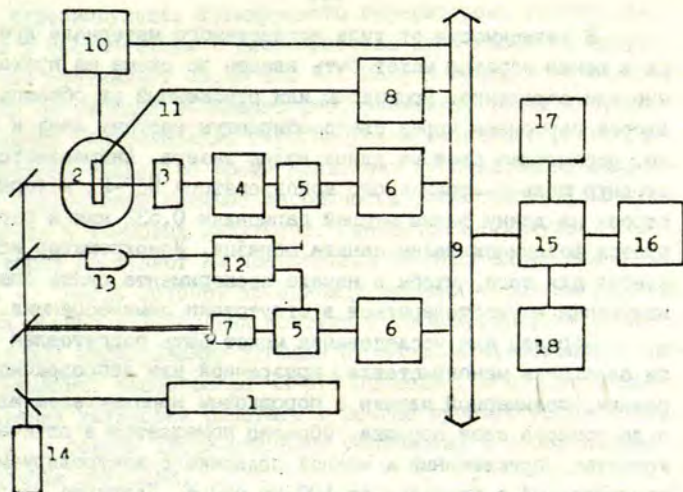
Тип лазера	Твердотельный на ИАГ:Nd с непрерывной накачкой, активной синхронизацией мод и модуляцией добротности
Длина волны	1,064 мкм
Средняя мощность	3 Вт (при 5 кГц)
Частота следования пиков пи-косекундных импульсов	1-10 кГц
Длительность на полувывсоте, сгибающей пуга	350 нс
Частота следования импульсов в пуге	100 МГц
Пиковая мощность	100-300 кВт

мощью встроенного измерителя средней мощности и по величине сигнала эталонного канала. В процессе подюстировки лазера во время его прогрева перед проведением измерений параметры пуга лазерных импульсов контролируются при помощи лавинного фотодиода ЛФД-2 с осциллографом С1-75.

## Оптическая схема установки

Для возбуждения в образце сигнала второй оптической гармоники излучение твердотельного непрерывно накачиваемого лазера с активной синхронизацией мод и модуляцией добротности проходит через два светоделителя и направляется в криостат, где помещен держатель образца (см. схему на рис.2).

От первого светоделителя небольшая часть излучения лазера направляется на быстродействующий лавинный фотоприемник, сигнал которого используется для запуска стробирования системы счета фотонов, а также для визуального контроля параметров пуга световых импульсов на экране осциллографа.



Р и с. 2. Структурная схема автоматизированной установки для нелинейно-оптических исследований.

1 - АИГ:Nd лазер с активной синхронизацией мод, 2 - образец в кристате, 3 - светособирающая оптика, 4 - монохроматор МДР-2, 5 - стробируемый фотонный счетчик, 6 - частотомер ЧЗ-47А, 7 - кварцевый эталонный канал с набором фильтров, 8 - вольтметр В7-34, 9 - магистраль канала общего пользования, 10 - программно-управляемый терморегулятор, 11 - термопара, 12 - импульсный генератор Г5-56, 13 - лавинный фотоприемник, 14 - He-Ne-лазер ЛГН-207, 15 - микроЭВМ БК-0010, 16 - дисплей, 17 - магнитофон Маяк-233, 18 - мозаичная печать Д-100.

От второго светоделителя луч попадает в опорный канал. В качестве эталона используется пластинка кристаллического кварца, сигнал второй гармоники которой пропорционален квадрату мощности лазера. За эталоном установлены диэлектрическое зеркало с селективным отражением на длине волны  $1,06 \text{ мкм}$ , отсекающее лазерный луч, но пропускающее свет второй гармоники, интерференционный фильтр на  $0,532 \text{ мкм}$  с полосой пропускания  $12 \text{ нм}$  и фотоумножитель эталонного канала.

В зависимости от типа исследуемого материала луч лазера в канал образца может быть введен по схеме на прохождение или отражение. Прошедший или отраженный от образца свет второй гармоники через светособирающую систему линз и зеркало, отражающее свет на длине волны лазера, направляется на входную щель светосильного монохроматора МДР-2, который настроен на длину волны второй гармоники 0,532 мкм и регистрируется фотоумножителем канала образца. Монохроматор используется для того, чтобы в начале эксперимента снять спектр излучения и удостовериться в отсутствии люминесценции.

Образец для исследования может быть подготовлен в виде пластинки монокристалла, прозрачной или непрозрачной керамики, полимерной пленки с порошковым наполнителем или в виде тонкого слоя порошка. Образец помещается в оптический криостат, приклеенный к медной подложке с контролируемой температурой в пределах от 100 до 450 К. Давление воздуха в криостате можно менять от атмосферного до 1 Па. Температурой образца в криостате управляет терморегулятор [15], позволяющий линейно разворачивать температуру как в полуавтоматическом режиме, так и в режиме управления от микроЭВМ. Скорость развертки температуры, определяемая инерционностью криостата, колеблется в пределах от 0,05 до 0,2 К/с. Криостат оснащен также изолированными вводами для воздействия на образец электрическим полем и проведения диэлектрических или гальванических измерений.

### Система регистрации и обработки данных

Для регистрации интенсивности сигнала в каналах эталона и образца применяются фотоумножители ФЭУ-79 с близкими одноэлектронными характеристиками. Режим счета фотонов обеспечивают селекторы одноэлектронных импульсов (см. [16]). Такие селекторы допускают счет фотонов с частотой вплоть до 80 МГц с временным разрешением, достигающим 10 нс. Выходы селекторов дополнены схемами стробирования, которые управ-

ляются импульсами от генератора Г5-56 (см.рис.2). Длительность стробимпульса, формируемого генератором, устанавливается в соответствии с длительностью цуга лазерных импульсов, что составляет около 400 нс. Запуск генератора осуществляется от сигнала лавинного фотоприемника. Такая жесткая оптическая синхронизация стробимпульса разрешает регистрацию фотонов только во время появления цуга лазерных импульсов и существенно снижает вероятность регистрации фонового излучения и темновых импульсов. Однофотонные импульсы от селекторов поступают на частотомеры ЧЗ-47А. Единичные отсчеты - число фотонов за единицу времени через магистраль канала общего пользования поступают на микроЭВМ, которая производит нормирование сигнала от образца относительно сигнала эталона. Частотомеры ЧЗ-47А позволяют в процессе настраивания установки работать в режиме ручного управления, а также в режиме дистанционного управления и сбора данных при помощи микроЭВМ.

Температурой образца управляет программируемый терморегулятор. Терморегулятор [15] обеспечивает также автоматическую регулировку уровня жидкого азота в криостате, а в режиме дистанционного управления от микроЭВМ сигнализирует о стабилизации температуры держателя образца ответом в режиме параллельного опроса. Измерение температуры непосредственно на образце производится термопарой, которая подключена к вольтметру В7-34. Результат измерения считывается микроЭВМ, где производится интерполяция температуры по таблице термопары.

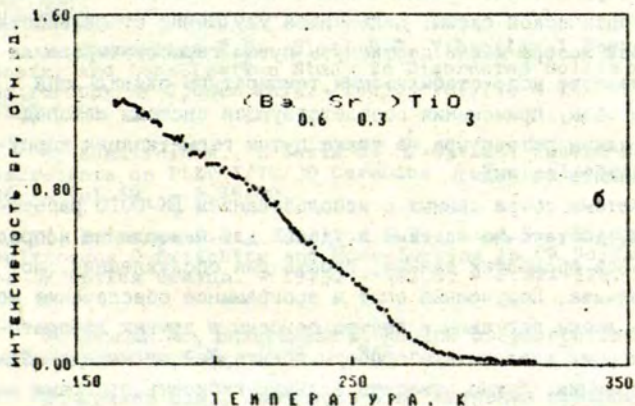
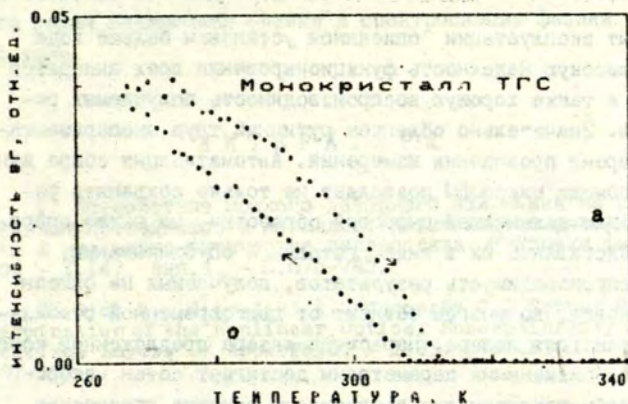
Для накопления и обработки экспериментальных данных используется бытовая микроЭВМ БК-0010. Связь между приборами и ЭВМ происходит по стандартизированному (ГОСТ 26.003-80) интерфейсному каналу общего пользования, позволяющему программировать действия приборов и считывать данные. Для электрического сопряжения программируемого порта БК-0010 и магистрали интерфейса использована несложная схема, дополняющая порт микроЭВМ.

Программа управления экспериментом, сбора и предварительной обработки данных на языке ФОКАЛ работает в системе ИНТЕРФОКОД, которая разработана в НИИ физики твердого тела.

Система позволяет из языка ФОКАЛ обращаться к подпрограммам в машинных кодах, реализующим функции интерфейса. ИНТЕРФОКОД дополнен подпрограммами для печати текста, данных и копирования экрана в графическом режиме. Результаты измерения интенсивности и температуры сохраняются в массивах данных и отображаются на графическом дисплее в виде экспериментальной кривой. В памяти БК-0010, кроме программы, могут храниться около 500 пар результатов измерений температура - интенсивность. После окончания или в перерыве эксперимента данные можно сохранить на магнитофонной кассете. Программа позволяет реконструировать график или его сегменты с изменением масштаба, а также использовать простой графический редактор и режим копирования экрана на мозаичное печатающее устройство СМ 6325/СХ 7189 для оформления результатов в виде, готовом к публикации.

В качестве примера на рис.3 приведены некоторые типичные результаты генерации второй оптической гармоники, полученные при исследовании температурных фазовых переходов в сегнетоэлектрических образцах с различной степенью упорядочения структуры.

Если, кроме интенсивности второй оптической гармоники, необходимо исследовать и диэлектрические свойства образцов, к системе присоединяется мост переменного тока Р5010, измеряющий емкость и тангенс угла диэлектрических потерь, и вольтметр-электрометр В7-30 для снятия петель переполаризации. Эти приборы не имеют выхода на стандартный интерфейс. Для их подключения к магистрали используются специальные у нас разработанные интерфейсные модули.



Р и с. 3. Зависимость интенсивности сигнала второй оптической гармоники от температуры.

а - гистерезис фазового перехода, наблюдаемый при термическом цикловании прозрачного монокристалла триглицинсульфата (ТГС), модифицированного железом и фосфором;

б - размытый фазовый переход в пористой непрозрачной керамике титаната бария - стронция, исследованный методом отражения.



### З а к л ю ч е н и е

Опыт эксплуатации описанной установки больше года показал высокую надежность функционирования всех аппаратов системы, а также хорошую воспроизводимость получаемых результатов. Значительно облегчен рутинный труд экспериментатора во время проведения измерений. Автоматизация сбора данных при помощи микроЭВМ позволяет не только сохранять результаты для дальнейшей цифровой обработки, но также оперативно представлять их в виде, готовом к опубликованию.

Воспроизводимость результатов, получаемых на описанной установке, во многом зависит от долговременной стабильности параметров лазера. Нароботка лазера предложенной конструкции с неизменными параметрами достигает сотен часов. Важно, чтобы периодически проводилась очистка оптических элементов установки, замена лампы накачки лазера и юстировка всей оптической схемы. Дальнейшее улучшение стабильности параметров лазера можно достигнуть путем термостатирования синхронизатора мсд, стабилизации температуры охлаждающей квантрон воды, применения соответствующей системы автоподстройки длины резонатора, а также путем герметизации корпуса для защиты от пыли.

Система сбора данных с использованием БК-0010 работоспособна, достаточно надежна и удобна для накопления и предварительной обработки данных, проста для обслуживания, помехоустойчива. Полученный опыт и программное обеспечение могут быть легко переданы и быстро освоены в других лабораториях, имеющих аналогичные приборы с интерфейсом канала общего пользования. Нужно отметить большую гибкость программ на ИНТЕРФОКОДе, возможность в любой момент активно вмешаться и изменить ход эксперимента.

Таким образом представленная автоматизированная система для нелинейно-оптических исследований, которая оснащена лазером с хорошими параметрами, устройствами регистрации слабых световых потоков и средствами сбора и предварительной

обработки данных на базе микроЭВМ, может быть рекомендована в качестве базовой конфигурации для решения широкого круга задач нелинейной оптики и спектроскопии физики твердого тела.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Воздействие мощного лазерного излучения на поверхность полупроводников и металлов: нелинейно-оптические эффекты и нелинейно-оптическая диагностика // Успехи физ.наук. - 1980. - Т.147, вып.4. - С.675-745.
2. Dick B., Gierulski A., Marowsky G., Reider G.A. Determination of the Nonlinear Optical Susceptibility  $\chi^{(2)}$  of Surface Layers // Appl.Phys. - 1985. - Vol.B38. - P.107-112.
3. Фогт Г. Методы когерентной активной спектроскопии КР и ГКР // Рассеяние света в твердых телах. - М., 1984. - С.277-327.
4. Chronister E.L., Dlott D.D. Vibrational Energy Transfer and Localisation Study in Disordered Solids by CARS Spectroscopy // J.Chem.Phys. - 1983. - Vol.79, N 11. - P.5286-5291.
5. Kundzish M., Liberts G. // Optical Second Harmonic Measurements on PLZT X/70/30 Ceramics // Ferroelectrics. - 1986. - Vol.69. - P.75-80.
6. Kuizenga D.J., Phillion D.W., Lund T., Siegman A.E. Simultaneous Q-Switching and Mode-Locking in CW Nd:YAG Lasers // Optics Commun. - 1973. - Vol.9. - P.221-226.
7. Херман И., Бильгельми Б. Лазеры сверхкоротких световых импульсов. - М., 1986. - 368 с.
8. Голяев М.Д., Лантратов С.В. Активная синхронизация мод непрерывных лазеров на гранате с неодимом // Квантовая электроника. - 1983. - Вып.10, № 5. - С.925-931.
9. Roscheger E.W., Schwarzenbach A.P., Balmer J.E., Weber H.P. An Actively Mode-Locked/Q-Switched Nd:Phosphate Glass Laser Oscillator // IEEE J.Quant.Electron. - 1985. - Vol.QE-21, N 5. - P.465-469.

10. Dawson M.D., Gomes A.S.L., Sibbett W., Taylor J.R. Characterization of the Output from a Q-Switched/Mode-Locked CW Nd:YAG Laser // Optics Commun. - 1984. - Vol.52, N 4. - P.295-300.

11. Eichler H.J., Krauser J. Pulse Energy Modulation of the CW-Mode-Locked 1.32  $\mu$ m Nd-YAG-Laser by Drive Frequency Detuning // Optics Commun. - 1984. - Vol.52, N 4. - P.129-130.

12. Безаева Л.Г., Евдокимова О.Н., Капцов Л.Н. Влияние синхронизации мод на стабильность пиковой мощности гигантских импульсов в лазере на АИГ:Nd // Квантовая электроника. - 1987. - Т.14, вып.5. - С.901-904.

13. Зверев Г.М., Голяев Ю.Д., Шалаев Е.А., Шокин А.А. Лазеры на алмазтитриевом гранате с неодимом. - М., 1985. - 144 с.

14. De Silvestri S., Laporta P., Magni V. The Role of the Rod Position in Single-Mode Solid State Laser Resonator: Optimization of a CW Mode-Locked Nd:YAG Laser // Optics Commun. - 1986. - Vol.57, N 5. - P.339-344.

15. Зариньш М.Я. Управление температурой в кристатах // Методы и аппаратура для исследований люминесценции. - Рига, 1985. - С.99-126.

16. Тиббергс Я.Э., Янсонс Я.Л. Универсальный селектор одноэлектронных импульсов фотоэлектронных умножителей // Методы и аппаратура для исследований люминесценции. - Рига. - 1985. - С.40-57.

Статья поступила 22 июля 1988 года.

ТРАКТЫ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ СПЕКТРОМЕТРА ЭЛЕКТРОННОГО  
ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Л.А.Чугунов, А.О.Меднис

Физико-математический факультет ЛГУ им. Петра Стучки

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) давно стал одним из основных методов исследования в физике твердого тела. Спектрометры ЭПР уже более двадцати лет серийно выпускаются промышленностью. Однако почти каждый новый класс исследуемых объектов имеет свои особенности, которые требуют, если не существенной переделки спектрометра, то, по крайней мере, определенной его модификации. ЭПР-спектроскопия неупорядоченных твердых тел в этом отношении не является исключением и предъявляет к экспериментальной аппаратуре свои специфические требования. Одно из них обсуждается в настоящей работе.

Как известно [1], сканирование спектра в ЭПР-спектрометре, как правило, осуществляется путем развертки внешнего магнитного поля при фиксированной частоте источника излучения. Такой метод регистрации связан с тем, что в ЭПР-спектрометре исследуемый образец обычно помещают в резонатор, частотные характеристики которого строго фиксированы.

В принципе резонансные условия можно обеспечить соответствующим выбором величины магнитного поля при любой частоте колебаний источника излучения, но практически выбор частоты измерения ограничен рядом факторов.

Современные серийные спектрометры ориентированы на достижение максимальной чувствительности. Поэтому частота измерения  $f$  выбирается по возможности большей (чувствительность спектрометра ЭПР  $\propto$  условию постоянства подводимой

мощности и коэффициента заполнения резонатора увеличивается пропорционально  $f^{3/2}$  [1]). Сверху частоту измерения ограничивают такие факторы, как размер образца, диэлектрические потери в нем, необходимость создания на образце сильного и однородного поля [2]. Оптимальными с этой точки зрения для большинства образцов оказались частоты порядка 9-10 ГГц, на которых и работает большая часть серийных спектрометров. Кроме того, часть спектрометров имеет рабочую частоту  $\sim 35$  ГГц, удобную для исследований небольших по размерам образцов с низкими диэлектрическими потерями.

Хотя высокая чувствительность является одним из главных достоинств любого ЭПР-спектрометра, при известных обстоятельствах решающее значение имеет частота, на которой проводятся измерения. Так удачный выбор частоты измерения при изучении монокристаллических образцов позволяет легче выявлять угловые зависимости в спектре и существенно упрощать его параметризацию.

Если для параметризации спектров в монокристаллах достаточно провести измерение на одной частоте, то в случае неупорядоченных систем этого совершенно недостаточно. Параметризация спектров ЭПР в неупорядоченных твердых телах обычно проводится с помощью моделирования на ЭВМ [3], что выдвигает дополнительные требования к экспериментальным спектрам. Информативность наблюдаемых спектров (наличие характерных особенностей: пиков, точек перегиба, плеч и т.п.) должна быть достаточной для выбора по возможности ограниченного набора исходных - пробных параметров спин-гамильтониана и однозначного сопоставления теоретически рассчитанного и экспериментального спектров. Выполнить это требование, проводя измерение на одной заранее заданной частоте, за редким исключением невозможно. Более того, для однозначной параметризации требуется апробирование значений параметров спин-гамильтониана при различных соотношениях между членами гамильтониана и величиной кванта электромагнитного поля. В связи с вышеизложенным возникает принципиальная необходимость проводить измерения ЭПР, по крайней мере, на

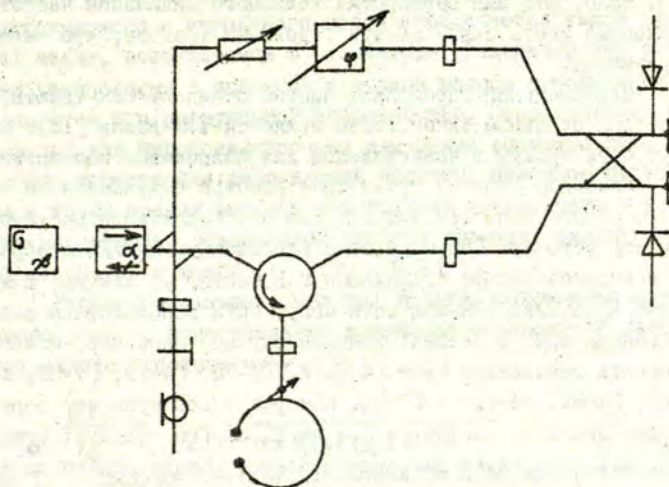
нескольких достаточно отличающихся частотах, для чего необходим спектрометр с широким диапазоном рабочих частот.

Анализ работ, посвященных ЭПР в неупорядоченных системах [4-10], показывает, что диапазон рабочих частот спектрометра желательно иметь в пределах от 1 до 20 ГГц.

Рассмотрим возможности построения такого спектрометра.

Любой ЭПР-спектрометр, независимо от конструкции и задач, решаемых с его помощью, имеет две основные подсистемы, одна из которых создает на образце магнитное поле, а другая вырабатывает сигнал, несущий информацию о резонансном поглощении. Именно эта последняя подсистема и составит предмет дальнейшего обсуждения, поскольку проблема получения магнитных полей, необходимых для работы спектрометра в вышеуказанном диапазоне частот, решается традиционными методами [1].

В серийных спектрометрах ЭПР наиболее распространена регистрирующая система с волноводным трактом, представленным на рис.1. В нем мощность СВЧ-колебаний от источника излуче-



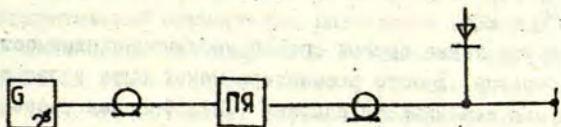
Р и с. 1. Волноводный тракт серийного спектрометра ЭПР.

ния подается в одно из плеч трехплечевого ферритового циркулятора, откуда она полностью передается в следующее плечо, к которому подключен отражательный резонатор с исследуемым образцом. Мощность, отраженная от резонатора, через третье плечо циркулятора поступает на детектор. Связь резонатора с вол. эвцом настраивают таким образом, чтобы в отсутствие парамагнитного поглощения мощность СВЧ-колебаний от резонатора на детектор не поступала (реально достижимый уровень подавления мощности 30-40 дБ). Поглощение СВЧ-мощности исследуемым образцом проявляется как изменение детектируемой мощности. Для увеличения чувствительности спектрометра используется волноводный шунт, состоящий из переменного аттенюатора и фазовращателя, и схема балансного детектора [11,12].

На фиксированной частоте описанная система регистрации обладает наибольшей возможной чувствительностью. Однако элементы тракта - циркулятор, ответвитель и волноводный мост балансного детектора имеют удовлетворительные параметры в полосе частот  $\pm 20-30\%$  от расчетной, да и относительная полоса частот одномодового режима волновода равна  $\Delta f/f_0 = 46\%$  [13]. Ясно, что для перекрытия желаемого диапазона частот необходимо иметь свыше десяти отдельных трактов, что явно неприемлемо.

Максимальной широкополосностью обладают СВЧ-тракты, в которых основным типом волны является ТЕМ-волна [13]. Это могут быть тракты в коаксиальном или полосковом исполнении.

Наиболее простой тракт спектрометра получается по схеме проходного типа (см. рис.2). Для его реализации достаточно иметь источник СВЧ-мощности, поглощающую ячейку с образцом и широкополосную коаксиальную детекторную секцию. В качестве источника СВЧ-мощности могут быть использованы серийные генераторы. В рассматриваемом случае, например, можно применить генераторы типа Г4-76 А, Г4-78, Г4-79, Г4-80, Г4-81, Г4-82, Г4-III и Г4-90, которые в совокупности покрывают диапазон частот от 0,4 до 25,85 ГГц. Следует отметить, что существуют экспериментальные модели генераторов



Р и с. 2. СВЧ-тракт спектрометра, выполненный по проходной схеме. ПЯ - поглощающая ячейка.

с диапазоном перестройки частоты от 2 до 20 ГГц [14], но рассчитывать на широкое внедрение таких генераторов в лабораторную практику пока, по-видимому, не приходится.

Основным элементом СВЧ-тракта спектрометра является поглощающая ячейка, в которую помещают исследуемый образец с целью концентрации на нем энергии СВЧ-излучения. В серийных спектрометрах это обычно объемный резонатор. В резонаторе плотность энергии увеличивается за счет образования стоячих волн. Поэтому образец должен располагаться в пучности магнитного СВЧ-поля. Пространственное распределение электрического и магнитного полей определяется типом (модой) волны, возбуждаемой в резонаторе. Резонатор как устройство узкополосен в принципе и ширина полосы пропускания определяется его нагруженной добротностью. Использование резонатора для широкодиапазонных измерений возможно лишь при условии перестройки резонансной частоты. Наиболее подходящим с точки зрения высокой собственной добротности и удобства перестройки резонансной частоты является цилиндрический резонатор с модой  $TE_{011} (H_{011})$  [1].

Расчет показывает, что при условии сохранения одномодового режима, относительное изменение резонансной частоты определяется соотношением

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{1 + 1,48 (L_0 / R)^2}, \quad (1)$$

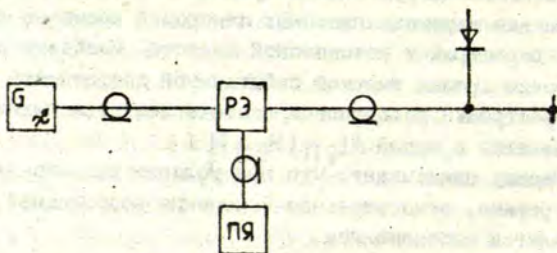
где  $f_0$  - средняя частота диапазона,  $R$  - радиус резонатора,  $L_0$  - высота резонатора на средней частоте. Полагая, что на средней частоте диапазона размеры резонатора оптимальны,



т.е.  $L_0 = 2R$  [1], получаем допустимый диапазон перестройки частоты  $\Delta f / f_0 = 22\%$ .

Существует также другой способ увеличения плотности энергии на образце. Вместо резонатора может быть использована спиральная замедляющая система [15]. Фазовая скорость распространения волны в ней существенно меньше, чем скорость света в свободном пространстве. Это приводит к уменьшению длины волны и возрастанию плотности энергии. Основным преимуществом спирали перед резонатором считается ее широкополосность. Однако указанное свойство спирали реализуется лишь при условии идеального согласования с трактом. Идеальное согласование в данном случае означает, что в тракте нет отражений при переходе волны от генератора к спирали и от спирали к детектору (режим бегущей волны). Реально удовлетворительного согласования для спирали с помещенным в нее образцом можно добиться в полосе частот  $\Delta f \approx 1-1,5$  ГГц [15].

Независимо от типа поглощающей ячейки в проходной схеме величина смещения на детекторе может быть установлена лишь путем изменения мощности, поступающей от источника. Поэтому работа детектора в оптимальном режиме возможна при одном определенном значении мощности, подводимой к нему через поглощающую ячейку. Устранить этот недостаток позволяет тракт, собранный по отражательной схеме (см.рис.3). Кроме



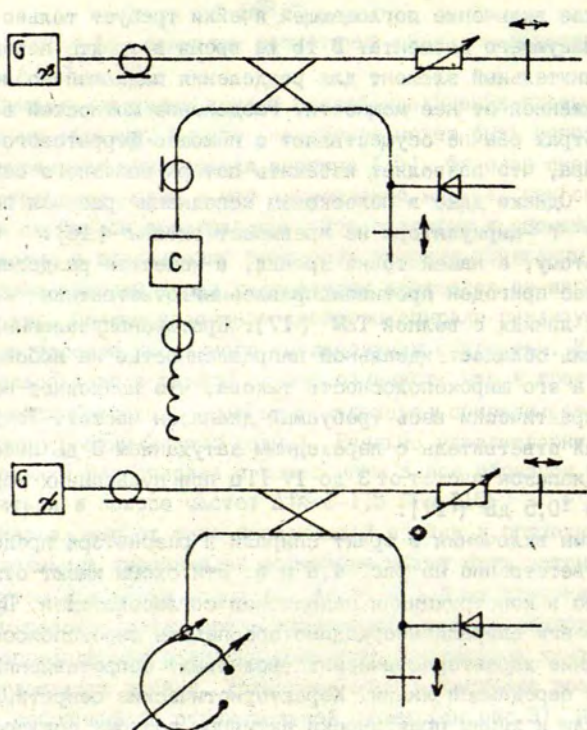
Р и с. 3. СВЧ-тракт спектрометра, выполненный по отражательной схеме, ПЯ - поглощающая ячейки, РЗ - разделительный элемент.

того, такое включение поглощающей ячейки требует только одного согласующего элемента. В то же время в тракте необходим дополнительный элемент для разделения падающей на ячейку и отраженной от нее мощности. Разделение мощностей в спектрометрах обычно осуществляют с помощью ферритового  $Y$ -циркулятора, что позволяет избежать потерь полезного сигнала [11]. Однако даже в полосковом исполнении рабочая полоса частот  $Y$ -циркулятора не превышает октавы [16].

Поэтому, с нашей точки зрения, в качестве разделителя наиболее пригоден противонаправленный ответвитель на связанных линиях с волной ТМ [17]. Противонаправленный ответвитель обладает идеальной направленностью на любой частоте, а его широкополосность такова, что позволяет перекрыть практически весь требуемый диапазон частот. Так, трехсекционный ответвитель с переходным затуханием 3 дБ имеет рабочий диапазон частот от 3 до 17 ГГц при пульсациях характеристики  $\pm 0,5$  дБ [17].

Схемы включения в тракт спирали и резонатора представлены соответственно на рис. 4, а и б. Эти схемы имеют отличия только в конструкции и назначении согласователей. При использовании спирали необходимо обеспечить широкополосное согласование характеристических (волновых) сопротивлений спирали и передающей линии. Характеристические сопротивления спирали и линии практически активны, поэтому согласователь представляет собой трансформатор активных сопротивлений, выполненный в виде широкополосного ступенчатого или плавного перехода [13, 15, 17]. Смена образца требует проведения настройки согласователя заново.

Если в тракте используется резонатор, то согласователь служит для создания режима критической связи резонатора с линией [18]. В этом режиме вся подводимая на резонансной частоте мощность рассеивается в резонаторе и мы имеем дело с узкополосным (на одной частоте) согласованием, достичь которого можно достаточно простыми средствами [1, 12, 13]. В рассматриваемом случае в качестве согласователя удобно использовать петлю связи с изменяемой относительно магнитной составля-



Р и с. 4. СВЧ-тракты многочастотного спектрометра.  
 а - со спиралью бегущей волны, б - с отражательным резонатором.

дей поля волны в резонаторе ориентацией. При критической связи собственная добротность резонатора  $Q_0$  равна его внешней добротности  $Q_M$ . Учитывая зависимость собственной добротности резонатора от частоты [13]

$$Q_0 \sim \frac{1}{\sqrt{f}}, \quad (2)$$

можно оценить степень рассогласования резонатора с линией, при перестройке его частоты в пределах одномодового режима, если считать, что на средней частоте диапазона связь критическая. По определению коэффициент связи равен

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_{вн}} \quad (3)$$

Следовательно,

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} = \frac{\Delta Q_0}{Q_0} = \left| \frac{\Delta f}{2f_0} \right| \quad (4)$$

Исходя из величины относительного диапазона перестройки частоты  $\Delta f/f_0 \approx 20\%$ , получаем  $\Delta\beta/\beta_0 \approx 10\%$ . Если резонатор идеально согласован на средней частоте, то  $\beta_0 = K_{св} = 1$  [1]. Рассогласование при перестройке частоты приведет к  $K_{св} \approx 1,1$ , что практически не скажется на режиме измерения. Поэтому согласование резонатора, как и в случае спирали, можно проводить лишь при смене образца.

Установка оптимального уровня смещения на детекторе осуществляется с помощью аттенюатора и подвижного короткозамыкающего поршня, включенных в противоположное плечо ответвителя (см. рис. 4).

При идеальном согласовании спирали с трактом волна, поступающая в спираль, отражается от короткозамкнутого конца спирали и половина мощности волны (переходное затухание ответвителя полагаем равным 3 дБ) попадает на детектор. Одновременно на детектор поступает волна, амплитуда и фаза которой определяются соответственно ослаблением аттенюатора и положением поршня. В зависимости от соотношения фаз колебаний этих волн происходит их суммирование или вычитание. Так как со спирали на детектор поступает четвертая часть выходной мощности генератора величиной 2-3 мВт, то для достижения оптимального уровня  $P_0 \approx 1,0$  мВт [19] необходимо осуществить частичную компенсацию мощности.

В отличие от спирали при идеальном согласовании резонатора с трактом мощность от него на детектор поступать не будет, и, следовательно, оптимальный режим работы детектора устанавливается подачей мощности от плеча с аттенюатором и поршнем.

Устанавливая оптимальный рабочий режим детектора, нельзя забывать о том, что сигнал парамагнитного резонанса состоит из двух компонент - сигнала поглощения и сигнала дисперсии [20,21], фазовый сдвиг между которыми равен  $\pi/2$ . Одновременное воздействие на детектор двух колебаний приводит к фазочувствительному детектированию [22]. Именно такой режим и осуществляется при суперпозиции волны, отраженной от поглощающей ячейки, с волной, сформированной в плече с аттенуатором и короткозамыкающим поршнем. Поэтому в зависимости от положения поршня детектор может быть настроен либо на сигнал поглощения, либо дисперсии. Не исключен и промежуточный случай, когда будет регистрироваться смесь обоих сигналов.

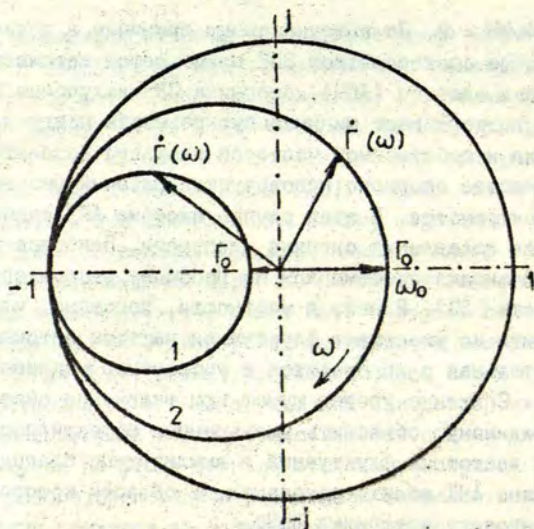
Настройка на сигнал поглощения или дисперсии в схеме со спиралью бегущей волны осуществляется обычно экспериментальным путем по форме сигнала эталонного образца [15]. В схеме с резонатором задача разделения сигналов поглощения и дисперсии решается во взаимосвязи с другой проблемой, к рассмотрению которой мы переходим. ◊

До сих пор мы не касались вопроса о стабильности частоты колебаний источника СВЧ-излучения, которая в ЭПР-спектрометре с резонансной поглощающей ячейкой является одним из главных факторов, влияющих на чувствительность измерений [1]. В спектрометре с резонатором необходима по возможности точная взаимная настройка частот источника СВЧ-излучения и резонатора. Следует различать два возможных типа нарушений взаимной настройки: расхождение средних значений частот источника и резонатора, с одной стороны, и взаимные флуктуации частоты - с другой. Оба типа отличаются механизмом воздействия на чувствительность регистрации. В первом случае чувствительность падает из-за ухудшения условий формирования сигнала, а во втором - вследствие дополнительных шумов, возникающих на выходе резонатора из-за преобразования частотных флуктуаций в амплитудные [1]. Эффективность этого преобразования зависит от крутизны амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) резонатора. Отметим, что это преобразование минимально при точном совпадении частот, поскольку в точке

резонанса  $dA/df = 0$ . По вышеуказанным причинам в подавляющем большинстве спектрометров ЭПР применяется автоматическая подстройка частоты (АПЧ) источника СВЧ-излучения [1]. Система АПЧ поддерживает минимальную разность между частотой источника и собственной частотой опорного резонатора. Обычно в качестве опорного используется рабочий резонатор (датчик) спектрометра. В этом случае система АПЧ одновременно служит для подавления сигнала дисперсии. Наиболее подробный и полный анализ системы АПЧ по рабочему резонатору приведен в работе [23]. В ней, в частности, показано, что система АПЧ почти не уменьшает флуктуации частоты источника СВЧ и ее положительная роль сводится к устранению медленных уходов частоты. Снижение уровня шумов при включении системы АПЧ можно, по-видимому, объяснить уменьшением эффективности преобразования частотных флуктуаций в амплитудные благодаря малой крутизне АЧХ вблизи резонанса, в области которого АПЧ удерживает частоту источника СВЧ.

Однако система АПЧ, помимо достаточно сложных электронных схем, требует включения источника СВЧ-излучения в контур обратной связи этой системы, что приводит к известной переделке схемы серийных генераторов, используемых в качестве источника, например, подключения к цепям, влияющим на частоту генерации. При использовании нескольких серийных генераторов различного типа и конструкции, как это имеет место в нашем случае, такое вмешательство нежелательно. Оно, в частности, повышает уровень наводок и вызывает еще целый ряд проблем технического характера. Кроме того, при замене генератора каждый раз необходима настройка системы АПЧ: установка правильных фазовых соотношений, выбор амплитуды модулирующего генератора, регулировка коэффициента усиления системы. Поэтому желательно применить другой достаточно чувствительный метод регистрации, позволяющий обходиться без системы АПЧ.

С этой целью рассмотрим частотную зависимость амплитудных и фазовых характеристик отражательного резонатора, который чаще всего применяется в спектрометрах ЭПР. Амплитудные и фазовые соотношения отражательного резонатора в



Р и с. 5. Годографы вектора комплексного коэффициента отражения резонатора при различных типах связи с входной линией. 1 - слабая связь, 2 - сильная связь.

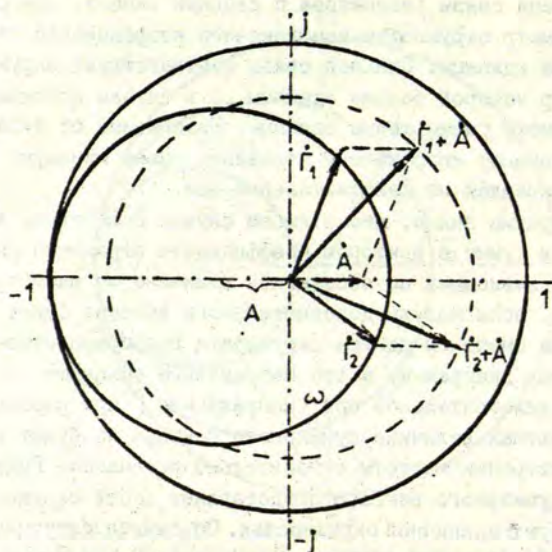
стационарном режиме могут быть описаны в терминах комплексного коэффициента отражения  $\dot{\Gamma}(\omega)$  [24]. Зависимость коэффициента отражения от частоты и степени связи с входной линией удобнее всего представить геометрически на круговой диаграмме ( $\dot{\Gamma}$  - плоскость) [18]. На рис.5 изображена зависимость вектора комплексного коэффициента отражения от расстройки частоты относительно резонанса. Годограф вектора коэффициента отражения представляет собой окружности, смещенные относительно центра диаграммы и касающиеся единичной окружности в точке  $-1$  (точка касания  $-1$  или  $+1$  зависит от выбора входной плоскости отсчета и в данном случае принципиального значения не имеет). При увеличении частоты конец вектора  $\dot{\Gamma}(\omega)$  пробегает эти окружности по часовой стрелке. Диаметр окружности за-

висит от степени связи резонатора с входной линией. При слабой связи диаметр окружности комплексного коэффициента отражения меньше единицы. Сильной связи соответствует окружность, диаметр которой больше единицы, а в случае критической связи диаметр равен точно единице. Независимо от типа связи при резонансе коэффициент отражения имеет минимум ( $\Gamma = \Gamma_0$ ) и направлен по действительной оси.

Из диаграммы видно, что в любом случае существует вектор, который в сумме с вектором коэффициента отражения дает вектор, не зависящий по абсолютной величине от частоты. Действительно, если модуль дополнительного вектора будет равен величине смещения центра окружности годографа относительно центра диаграммы, а его направление совпадет с направлением действительной оси (направление  $\Gamma$  при резонансе), то абсолютная величина суммарного вектора не будет зависеть от расстройки частоты относительно резонанса. Годограф такого суммарного вектора представляет собой окружность, концентрическую с единичной окружностью. Описанная ситуация для случая сильной связи изображена на рис. 6. В остальных случаях построения аналогичны и соответствуют по сути дела параллельному сдвигу годографа вектора коэффициента отражения относительно центра диаграммы. Таким образом, одновременный учет амплитудной и фазовой характеристик отражательного резонатора позволяет сделать вывод о возможности получения колебаний, амплитуда которых не зависит от взаимной расстройки частот источника колебаний и резонатора, что при рассмотрении только амплитудной характеристики кажется невозможным.

Вышеизложенные соображения указывают на метод, позволяющий избежать влияния частотных флуктуаций на чувствительность спектрометра. Для этого необходимо подать на детектор спектрометра дополнительные СВЧ-колебания от того же источника и имеющие определенную амплитуду и фазу. Естественно, это не избавляет от необходимости настраивать источник СВЧ на резонансную частоту резонатора для того, чтобы выполнялись оптимальные условия формирования сигнала. Нестабильность частоты серийных генераторов, по паспортным данным, не пре-





Р и с. 6. Диаграмма, иллюстрирующая независимость от частоты модуля вектора, получаемого суммированием вектора коэффициента отражения  $\dot{\Gamma}(\omega)$  с постоянным вектором  $A$ .

вышает  $\pm 1$  МГц, что при нагруженной добротности резонатора порядка  $1 \cdot 10^3$  не выходит за пределы полосы пропускания, поэтому достаточно однократной настройки частот генератора и резонатора для обеспечения указанных условий. В крайнем случае возникшая расстройка может вызвать уменьшение сигнала приблизительно в два раза. Кроме того, практика показывает, что обычно стабильность генераторов СВЧ выше, чем указывается в паспорте прибора, и после самопрогрева прибора составляет  $\pm 100$  кГц.

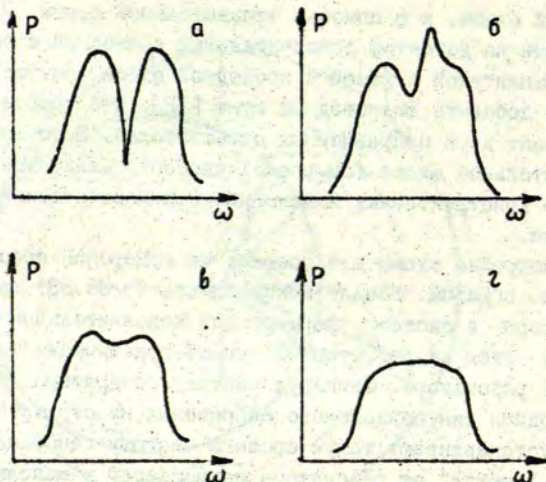
Подавление сигнала дисперсии в рассмотренном способе регистрации обеспечивается тем, что детектор работает в фазочувствительном режиме, а настройка на сигнал поглощения в описанном методе выполняется автоматически (см. рис.6), поскольку  $\dot{\Gamma}_0 \parallel A$ .

Описанный способ может быть реализован и с помощью проходной схемы, и с помощью отражательной схемы. Однако для подачи на детектор дополнительных колебаний с определенной амплитудой и фазой к проходной схеме (см.рис.2) необходимо добавить волноводный шунт [12]. Это требует введения в тракт двух направленных ответвителей. В то время как в отражательной схеме (см.рис.3) способ реализуется без каких-либо конструктивных изменений. Отличается только настройка тракта.

Настройка схемы для проведения измерений происходит следующим образом. Вводят максимальное ( $\sim 35$  дБ) затухание attenuатора в системе, формирующей дополнительные колебания. При этом на детектор поступает практически только мощность от резонатора. Свипируя частоту генератора, например, путем подачи синусоидального напряжения на отражатель клистрона, устанавливают такую среднюю частоту генерации, при которой "провал" от резонатора совмещается с максимумом зоны генерации клистрона и средняя частота генерации совпадает с собственной частотой резонатора (рис.7,а). Затем постепенно выводят затухание attenuатора (установка необходимой амплитуды) и, меняя положение короткозамыкающего поршня (установка фазы), добиваются максимальной компенсации "провала" от резонатора. В результате на выходе детектора наблюдается зона генерации клистрона (рис.7,г). Свипирование частоты прекращают, и таким образом тракт оказывается подготовленным для проведения измерений.

Заметим, что аналогичным образом можно настроить практически любой спектрометр, имеющий независимый канал регулировки уровня СВЧ-смещения на детекторе. Это, например, может быть серийный спектрометр РЭ 1306. Следует однако учесть, что из-за фазовых соотношений, реализующихся в мостовой схеме балансного детектора [22], компенсация "провала" осуществима только на одном (любом) из диодов. Поэтому второй диод надо отключить.

Изложенный здесь способ регистрации сигналов поглощения ЭПР [25] был использован нами при конструировании СВЧ-



Р и с. 7. Зависимость мощности суммарных колебаний СВЧ на детекторе от частоты на различных этапах настройки тракта спектрометра.

а - затухание в цепи, формирующей дополнительное колебание, максимально; б - амплитуда и фаза дополнительного колебания не соответствует условию компенсации; в - амплитуда дополнительного колебания не соответствует условию компенсации; г - амплитуда и фаза дополнительного колебания оптимальны.

тракта многочастотного ШП-спектрометра. Такой подход позволяет в рамках единой конструкции использовать в качестве поглощающей ячейки либо отражательный резонатор, либо спираль. Что касается выбора между этими двумя типами поглощающих ячеек, то мы руководствовались следующими соображениями. Возможности использования резонатора с модой  $TE_{011}$  в области частот  $f < 5$  ГГц ограничены его большими геометрическими размерами. Так, диаметр резонатора на частоте 5 ГГц должен быть не менее 80 мм.

Эта величина соответствует зазору между полюсами имеющегося в нашем распоряжении электр. магнита (зазоры электромагнитов серийных спектрометров несколько меньше - 53 мм). Поэтому для частот  $f < 5$  ГГц предпочтение следует отдать замедляющим системам, в частности, спиральям. Практическая реализация поглощающих ячеек на спиральных замедляющих системах достаточно подробно описана в работах [26,27].

На частотах  $f \geq 5$  ГГц, по нашему мнению, целесообразнее применять резонаторы, так как по абсолютной величине диапазон одномодового режима работы (см. формулу (I)) резонатора становится сравнимым с рабочей полосой частот спирали, а более высокая плотность энергии излучения на образце может быть обеспечена при менее жестких, чем в случае спирали, требованиях к его геометрической форме.

Спектрометр с вышеописанным СВЧ-трактом не обладает максимальной чувствительностью. Это обусловлено следующими причинами. Во-первых, на образец поступает только половина мощности от источника СВЧ-колебаний, во-вторых, половина мощности сигнала, сформировавшегося в резонаторе не подается на детектор. При линейном режиме работы детектора оба эти обстоятельства приводят к уменьшению чувствительности в 2 раза [II]. Третья причина - это отсутствие в тракте балансного детектора. Согласно литературным данным [19,22], балансное детектирование позволяет ослабить амплитудные шумы в 10-20 раз. Следовательно, теоретически ожидаемая чувствительность данного спектрометра должна быть в 20-40 раз ниже максимально возможной, оцениваемой величиной  $10^{11}$  спин/Гс.

Экспериментальное опробование тракта в диапазоне частот 3-18 ГГц с отражательными резонаторами показало, что в трехсантиметровом диапазоне чувствительность равна  $\sim 10^{12}$  спин/Гс, а в шести- и полуторасантиметровом диапазонах -  $\sim 5 \cdot 10^{13}$  спин/Гс.

Таким образом, спектрометр имеет вполне приемлемую чувствительность и в то же время позволяет проводить измерения в широкой полосе частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пул Ч. Техника ЭПР-спектроскопии. - М., 1970. - 557 с.
2. Вертц Дж., Болтон Дж. Теория и практические приложения метода ЭПР. - М., 1975. - 548 с.
3. Kliava J. EPR of Impurity Ions in Disordered Solids // *Phys. status solidi, b.* - 1986. - Vol.134. - P.411-455.
4. Гарифьянов Н.С., Зарипов М.М. Изучение стекол методом ЭПР на низких частотах // *Физ. твердого тела.* - 1964. - № 5. - С.1545-1546.
5. Nicklin R.C., Johnstone I.K., Barnes R.C., Wilder D.R. Electron Spin Resonance of  $Gd^{3+}$  in Glasses of the Soda-Silica-Yttria System // *J.Chem.Phys.* - 1973. - Vol.59, N 4. - P.1652-1668.
6. Abdрахманов R.S., Ivanova T.A. The EPR Study of Glasses and Frozen Solutions in the L and S Bands // *J.Molec.Struct.* - 1973. - Vol.19. - P.683-692.
7. Абдрахманов Р.С., Гарифьянов Н.С., Игнатьев Б.Г., Усманов З.И. Исследование стекол методом ЭПР в дециметровом диапазоне длин волн // *Оптические и спектральные свойства стекол в связи с их строением: Труды II-го Всесоюзного симпозиума.* - М., 1973. - С.267-273.
8. Чугунов Л.А. ЭПР ионов  $Eu^{2+}$  и  $Gd^{3+}$  в неупорядоченных кислородсодержащих твердых телах: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. - Тарту, 1984. - 16 с.
9. Çugunov L., Kliava J. "Simulation" of Randomness in the Environment of Rare - Earth S - Ions in Glasses: EPR  $Gd^{3+}$  in YAG: Sc // *J.Phys.C: Solid State Phys.* - 1984. - Vol.17. - P.5795-5797.
10. Brodbeck C.M., Iton L.E. The EPR Spectra of  $Gd^{3+}$  and  $Eu^{2+}$  in Glassy Systems // *J.Chem.Phys.* - 1985. - Vol.83. - P.4285-4299.
11. Марон Р.С., Поздняк А.П., Кушкевич С.С. Аппаратура для исследования электронного парамагнитного резонанса. - Л., 1968. - 140 с.
12. Голубь Л.К. Методы и аппаратура для исследования электронного парамагнитного резонанса // *Электронная техника. Сер. Контрольно-измерительная аппаратура.* - 1968. - Вып.1. - С.5-24.

13. Семенов Н.А. Техническая электродинамика. - М., 1973. - 479 с.
14. Parkinson G. Broad Tuning Range VCOs for Microwave Systems // Electr.Engin. - 1987. - N 10. - P.85-94.
15. Webb R.H. Use of Travelling Wave Helices in ESR and Double Resonance Spectrometers // Rev.Sc.Instrum. - 1962. - Vol.33, N 7. - P.732-737.
16. Сазонов А.М. Антенны и устройства СВЧ. - М., 1988. - 431 с.
17. Матвей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. - М., 1971. - 495 с.
18. Альтман Дж. Устройства СВЧ. - М., 1968. - 487 с.
19. Клич С.М. Проектирование СВЧ-устройств радиолокационных приемников. - М., 1973. - 317 с.
20. Сликтер Ч. Основы теории магнитного резонанса. - М., 1981. - 448 с.
21. Крауфорд Ф. Волны. Берклевский курс физики. - М., 1974. - Т.3. - 527 с.
22. Смогилев К.А., Вознесенский И.В., Филиппов Л.А. Радиоприемники СВЧ. - М., 1967. - 556 с.
23. Семенов А.Г. Теория и расчет спектрометров ЭПР: Дис. ... канд.физ.-мат.наук.-Новосибирск, 1963.
24. Тилер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах. - М., 1963. - 367 с.
25. А.С. 864081 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 N24/10. Способ регистрации сигналов поглощения электронного парамагнитного резонанса / Л.А.Чугунов, И.К.Аманис, Я.Э.Карисс (СССР). - № 2824907/18-25; Заяв. 01.10.79; опубл. 15.09.81, бюл. № 34. - 2С.: ил.
26. Яцук К.П. Замедляющие системы. - Харьков, 1969. - 108 с.
27. Newman D.I., Urban W. Interpretation of S-State Ion E.P.R. Spectra // Adv.Phys. - 1975. - Vol.24. - P.793-844.

Статья поступила 1 июня 1988 года.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОГО  
ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА НА БАЗЕ РАДИОСПЕКТРОМЕТРА РЭ-1306  
И МИКРОЭВМ БК-0010

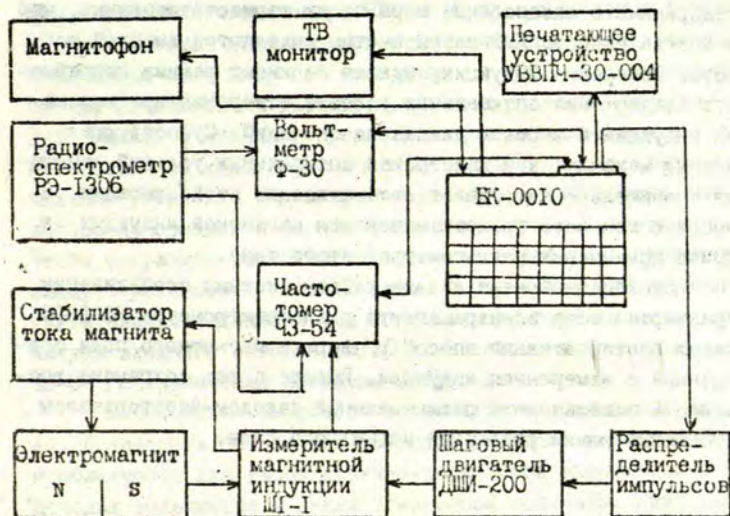
Я.С.Трош<sup>ж</sup>, Г.А.Эрнестсонс<sup>жж</sup>

<sup>ж</sup> Институт неорганической химии АН Латвийской ССР  
<sup>жж</sup> НИИ физики твердого тела ЛГУ им. Петра Стучки

В в е д е н и е

ЭПР-спектроскопия относится к числу структурно-чувствительных методов исследования твердых тел. Особое место ЭПР-измерения занимают в изучении структурных особенностей ближнего окружения парамагнитных центров в стеклообразных системах, потому что получаемая таким образом информация другим структурно-чувствительным методам недоступна. Надо отметить, что в данном случае необходимо детальное машинное моделирование формы получаемых экспериментальных спектров, что налагает повышенные требования к точности их регистрации. Кроме того, для дальнейшей машинной обработки спектр должен быть представлен в цифровом виде. Однако производившиеся в течение ряда лет отечественные серийные ЭПР-спектрометры РЭ-1301, РЭ-1306 и РЭ-1307 для решения вышеуказанных задач не приспособлены, так как у них отсутствует соответствующее метрологическое обеспечение, а информация об измеренных величинах представляется только в аналоговой форме.

Поэтому нами создана автоматизированная система ЭПР-измерений, состоящая из укомплектованного цифровым вольтметром Ф-30, частотомером ЧЗ-54 и измерителем магнитной индукции ШИ-1 спектрометра РЭ-1306 (см.рис.1). Система управляется от микроЭВМ "Электроника БК-0010". Кроме обычных периферийных устройств, комплект ЭВМ дополнен печатающим устройством УВВПЧ-30-004, позволяющим выводить информацию как в алфавитно-цифровом виде, так и в графическом виде. Управ-



Р и с. 1. Структурная схема автоматизированной системы.

ляющая программа, написанная в машинных кодах, обеспечивает не только сервис управления ходом эксперимента, но и предварительную обработку экспериментальных данных.

#### Контроль значения магнитной индукции

Наибольшую популярность в экспериментах по магнитному резонансу получили два метода измерения магнитной индукции. Один из них пользуется явлением ядерного магнитного резонанса (ЯМР-магнитометры), второй - эффектом Холла. С точки зрения автоматизации измерения предпочтительнее использовать датчики Холла, но с точки зрения достижения удовлетворительной для ЭПР-эксперимент точности в данном случае требуется



предпринимать специальные меры по их термостатированию, что не всегда удобно. ЯМР-магнитометры выделяются высокой точностью измерения индукции, однако не имеют режима непрерывного поддержания оптимальных условий измерения при изменении индукции в широком диапазоне значений. Существующая система механической подстройки оптимальных условий измерения значительно затрудняет автоматизацию этой операции и вместе с тем весь процесс измерения магнитной индукции в случае применения магнитометров этого типа.

Проведенный нами анализ работы системы стабилизации и развертки тока электромагнита радиоспектрометра РЭ-1306 выявил альтернативный способ развертки магнитного поля совмещенный с измерением индукции. Вместе с тем сохранена возможность использовать реализованный заводом-изготовителем автономный режим развертки магнитного поля.

#### Сопряжение радиоспектрометра РЭ-1306 с микроЭВМ БК-0010

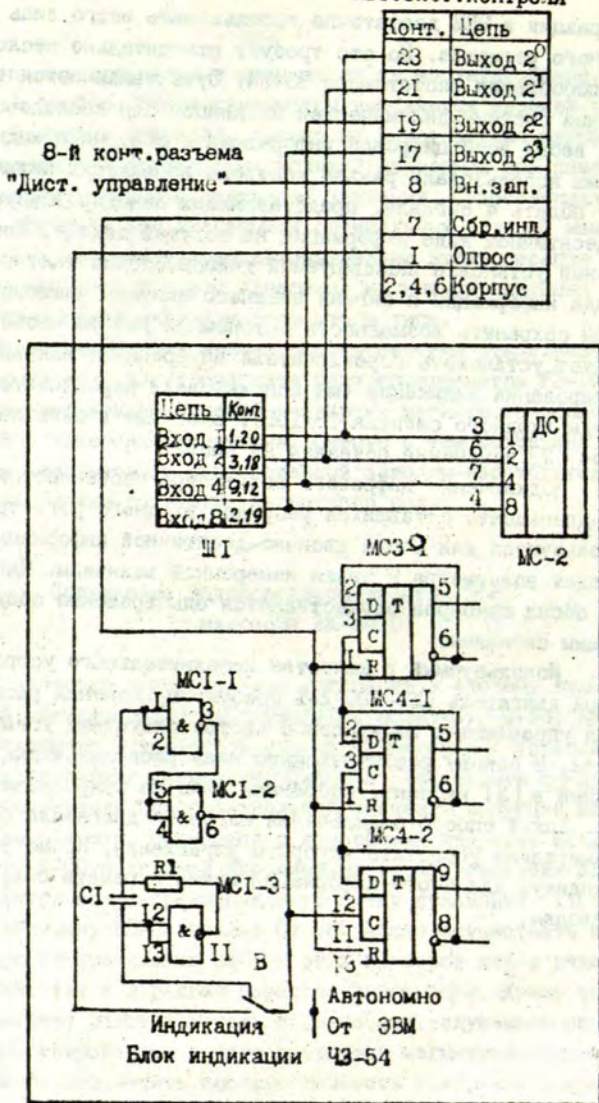
В качестве измерительных устройств в систему включены цифровой частотомер ЧЗ-54 и цифровой вольтметр Ф-30, не имеющие встроенных интерфейсов для их сопряжения с управляющими вычислительными системами. Цифровой частотомер предусмотрен для измерения пропорционального значению индукции магнитного поля частоты, снимаемой с измерителя индукции ШИ-1. Вольтметр Ф-30 подключен параллельно входу усилителя У2 (см. электрическую принципиальную схему приемника (1)) и измеряет величину ЭПР-сигнала. От ЭВМ можно осуществить необходимую синхронизацию работы этих приборов как в режиме измерения, так и в режиме передачи информации. Кроме того, ЭВМ управляет работой шагового двигателя, служащего исполнительным устройством в узле развертки магнитной индукции.

Чтобы обеспечить высокую точность измерения значений магнитной индукции, необходимо передать в ЭВМ значение частоты магнитометра в объеме 8 десятичных цифр. Для ввода этой

информации в ЭВМ достаточно использовать всего лишь 4 бита входного регистра. Но это требует относительно несложного приспособления частотомера ЧЗ-54. Суть заключается в использовании системы динамической индикации для последовательного ввода всей цифровой информации в ЭВМ: на выходной разъем (мы использовали разъем контроля напряжения питания) следует подать 4 сигнала, представляющих закодированную в двоично-десятичном коде информацию на текущей декаде, сигнал начальной установки индицируемой декады, сигнал тактирования вывода информации и сигнал внешнего запуска частотомера. Чтобы сохранить возможность автономной работы частотомера, следует установить переключатель внутреннего или внешнего тактирования индикации (мы использовали переключатель амплитуды входного сигнала IB/IOB). Вносимые в блок индикации ЧЗ-54 [2] изменения показаны на рис.2.

Подключение цифрового вольтметра особенностей не имеет. Двенадцать оставшихся разрядов входного регистра ЭВМ используются для ввода двоично-десятичной информации о трех декадах вольтметра и знака измеренной величины. Цикл измерения обоих приборов осуществляется одновременно общим запускающим сигналом.

Используемый в качестве исполнительного устройства шаговый двигатель ДШИ-200-2-1 требует применения распределителя управляющих импульсов с соответствующими усилиями мощности. В основу реализованного нами распределителя взят описанный в [3] вариант, собранный лишь на микросхемах 155 серии. Такой способ подключения шагового двигателя позволяет значительно упростить алгоритмы управления. Кроме того, необходимую для этого информацию можно передать только по двум проводам.



Р и С.2. Измененная схема блока индикации частотомера 43-54.

### Управляющая программа

Программа управления экспериментом реализована на БК-0010 в виде диалога с оператором системы и написана в кодах ЭВМ.

Пользователю управляющей программой предоставляются следующие возможности:

- индикация состояния системы и значений некоторых величин (режим измерений, режим графики, рабочий интервал спектра, текущие значения магнитного поля и амплитуды сигнала);
- выход на автоматическое управление ЭПР-экспериментом;
- распечатка и редактирование спектра в цифровом виде;
- вывод на экран и редактирование спектра в графическом виде;
- вывод спектра на печатающее устройство;
- первичная математическая обработка данных;
- запись и чтение спектра с магнитной ленты;
- распечатка и редактирование параметров, характеризующих режимы работы программы.

Для управления регистрацией спектра создан набор специализированных программных модулей. В модулях опроса частотомера и вольтметра запуск цикла измерения обоих приборов производится одновременно. Но так как цикл измерения вольтметра  $\Phi-30$  намного продолжительнее рабочего цикла частотомера  $\Phi 3-54$ , то считывание результата с частотомера производится во время еще продолжающегося цикла измерения вольтметра. Временное согласование готовности выдачи информации обоим приборам реализовано с помощью констант ожидания. Максимальная скорость измерений ограничена быстродействием  $\Phi-30$  и составляет примерно 22 измерения в секунду.

Модуль управления шаговым двигателем ДШИ-200 использует только два разряда выходного регистра ЭВМ: один для задания направления повс. эта вала двигателя, другой - для управления скоростью вращения вала. При регистрации спект-

ра управление шаговым двигателем выполняется соответствующей программой, для других ситуаций предусмотрен также режим ручного управления, когда используются соответствующие клавиши на клавиатуре ЭВМ.

Перед началом регистрации спектра ЭПР пользователь должен в режиме выключенной автономной развертки установить необходимое среднее значение индукции поля и настроить измеритель ШИ-1 для измерения индукции в данной точке. После этого спектрометр можно переключить в режим машинного управления и дальше работать только посредством компьютера.

Для записи спектра ЭПР оператору системы необходимо ввести ожидаемое число точек в спектре (1-512), скорость развертки магнитного поля в относительных единицах, число измерений при каждом фиксированном значении поля (режим накопления слабого сигнала ЭПР), значение шага развертки магнитного поля.

С целью визуального контроля за уходом эксперимента каждая измеренная точка в относительных единицах оперативно отображается на экран монитора ЭВМ в графическом виде. Оператор может в любой момент времени приостановить регистрацию спектра. В этой ситуации ему предоставляются следующие возможности: выйти из режима регистрации, окончить регистрацию с уже записанной частью спектра, продолжить регистрацию. После записи указанного числа точек или по завершении записи оператором производится перекодирование результатов измерений из целочисленного в вещественное представление, необходимое при математической обработке данных. Затем выполняется пересчет значений ЯМР частоты измерителя ШИ-1 в значениях индукции магнитного поля.

Записанный в память ЭВМ спектр может быть 1) подвергнут при необходимости предварительной математической обработке; 2) сразу записан в архив на магнитную ленту; 3) выведен в графическом виде на экран с целью визуального контроля или графического редактирования. В блоке математической обработки спектра, например, предусмотрены такие возможности, как пересчет: резонансные поля  $\langle - - \rangle$   $g$ -фактора,

определение площадей под линиями; нормировка спектра; коррекция нулевой линии; определение отношения амплитуд или площадей сигналов одновременно измеренных исследуемых и эталонных спектров ЭПР.

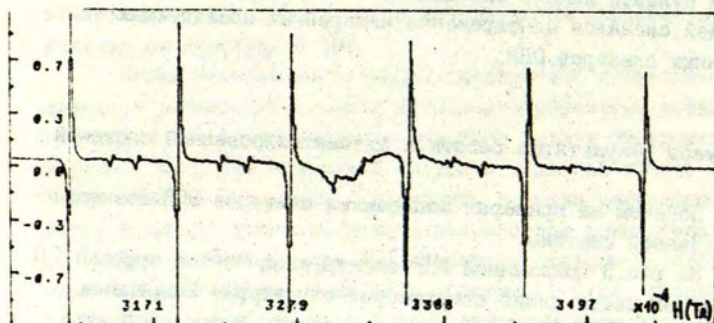
### Примеры результатов работы с автоматизированной системой

Покажем на примерах записанных спектров ЭПР возможности созданной системы.

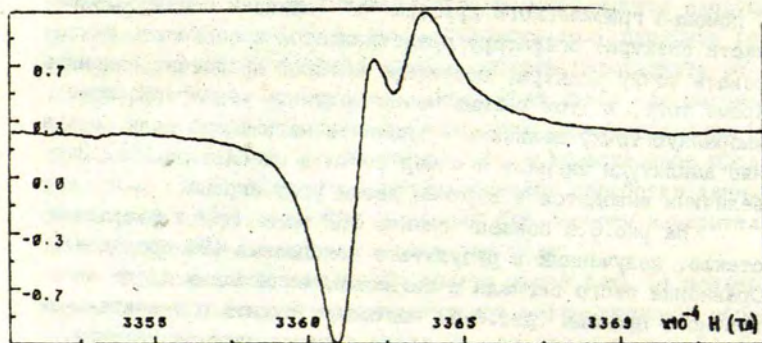
На рис.3 показанный ЭПР-спектр иона  $Mn^{2+}$  в порошке  $MgO$  состоит из шести линий сверхтонкой структуры. Разрешение линий примерно  $1,3 \cdot 10^{-4}$  Тл на одну точку. Всего в спектре 512 точек. Отдельно записана пятая линия из этого секстета (см.рис.4). Хорошо выделяется сложная форма этой линии. Здесь разрешение спектра близко к максимальной величине, которую обеспечивает автоматизированная система, т.е.  $(1/12 \cdot 10^{-4})$  Тл на одну точку.

В случае спектра иона  $^{97}Mg^{5+}$  в фосфатном стекле (см. рис.5) демонстрируется режим графического редактирования. С помощью графического курсора "+" (показан в центральной части спектра) оператору представляется возможность фиксировать точку спектра, положение которой предстоит изменить. Кроме того, в этом режиме можно получить характеризующие выбранную точку величины - значение магнитного поля, значение амплитуды сигнала и номер точки в массиве данных. Эти величины выводятся в верхнем левом углу экрана.

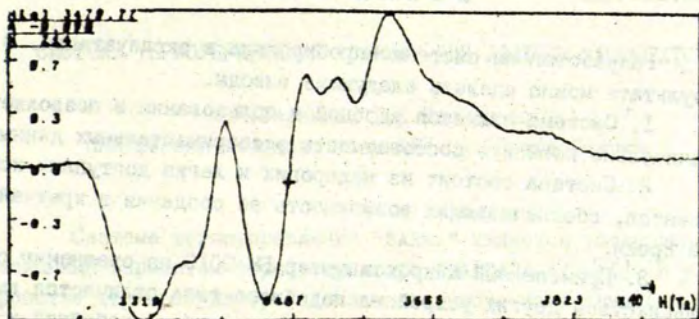
На рис.6,а показан спектр ЭПР иона  $Fe^{3+}$  в фосфатном стекле, полученный в результате накопления (36 проходов). Сравнение этого сигнала с сигналом, записанным после однократного прохода (рис.6,б) позволяет судить о значительном увеличении отношения сигнал/шум в результате накопления.



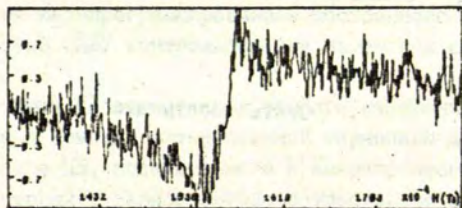
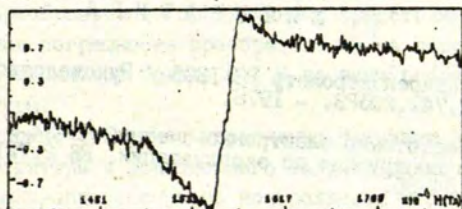
Р и с. 3. ЭПР-спектр  $Mn^{2+}$  в порошке  $MgO$ .



Р и с. 4. Пятая компонента показанного на рис.3 секстета.



Р и с. 5. ЭПР-спектр  $^{97}\text{Mo}^{5+}$  в фосфатном стекле.



Р и с. 6. ЭПР-спектр  $\text{Fe}^{3+}$  в фосфатном стекле.  
а - результат накопления после 36 проходов; б - сигнал после однократного прохода.



### З а к л ю ч е н и е

Разработанная система апробирована в эксплуатации. В результате можно сделать следующие выводы.

1. Система является удобной в пользовании и позволяет значительно повысить достоверность экспериментальных данных.

2. Система состоит из недорогих и легко доступных компонентов, обеспечивающих возможность ее создания в кратчайшие сроки.

3. Примененный микрокомпьютер БК-0010 по сравнению с большинством других устройств подобного типа отличается высокой надежностью, что особенно важно для бесперебойной и производительной работы физика.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Радиоспектрометр РЗ-1306 / Руководство по эксплуатации. ИГ2.747.205РЗ. - 1978.

2. Частотомер электронно-счетный ЧЗ-54 / Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЕЯ 2.721.039 ТО. - 1982. - С.84-86.

3. Ледерер В.В. Простая схема для управления четырехфазовым шаговым двигателем // Приборы и техн.эксперимента. - 1987. № 3. - С.202-203.

Статья поступила 15 июня 1988 года.

## СИСТЕМА ТЕРМОУПРАВЛЕНИЯ "SARMA" ДЛЯ АЗОТНЫХ КРИСТАТОВ

М.Я.Зариньш, Д.Л.Карклиньш

НИИ физики твердого тела ЛГУ им. Петра Стучки

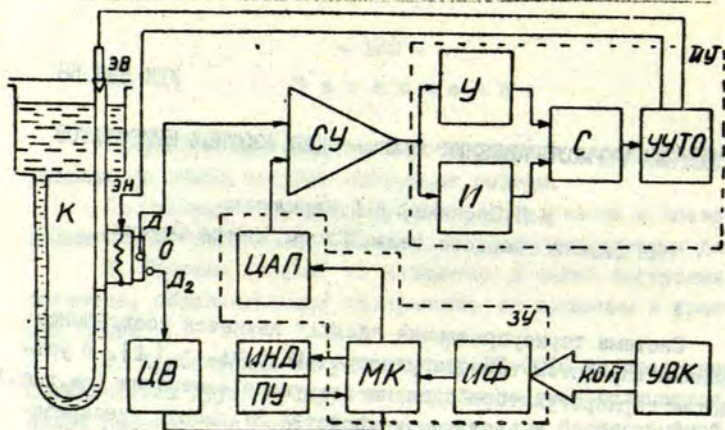
Система термоуправления "SARMA" является усовершенствованным вариантом терморегулятора "VAIDAVA-4" [1]. В устройстве терморегулятора сделаны следующие изменения (см.рис.).

Во-первых, в задающем устройстве ЗУ вместо линеаризатора, осуществляющего обратное преобразование передаточной характеристики термодатчика  $D_1$ , с помощью аппаратурных средств встроено микропроцессорный контроллер МК, который реализует преобразование программными средствами. Таким путем снижается погрешность преобразования на порядок величины, что составляет не больше 0,1 К во всем рабочем диапазоне температуры.

Во-вторых, локальное управление режимами линейной развертки температуры и фракционного нагрева также реализуется программой микропроцессорного контроллера, что позволяет расширить набор параметров, определяющих характеристики режимов, и дает возможность заменить или добавить новые режимы управления перепрограммированием постоянного запоминающего устройства ПЗУ контроллера без изменения схемы регулятора.

В-третьих, добавлен канал точного измерения температуры образца с помощью аттестованной термопары  $D_2$  и цифрового вольтметра ЦВ, подключенного к микропроцессорному контроллеру, который в данном случае осуществляет прямое преобразование передаточной характеристики термопары и выдает результаты измерений с дискретностью 0,1 К.

В остальном "SARMA" существенно не отличается от модели "VAIDAVA-4". Технические средства и программа регулятора



Р и с. Структурная схема системы термоуправления "SARMA".

К - малоинерционный криостат,  $D_1$  и  $D_2$  - датчики температуры соответственно держателя и образца, ЗУ - задающее устройство, ЦАП - цифро-аналоговый преобразователь, ПУ - пульт управления с индикаторным табло ИНД, МК - микропроцессорный контроллер, ИФ - интерфейс, КОП - канал общего пользования, СУ - сравнивающее устройство, У - исполнительное устройство, У - усилитель, И - интегратор, С - сумматор, УУТО - узел управления терморегулирующими органами, ЭВ и ЭН - электроуправляемый вентиль и электрический нагреватель, О - образец, прикрепленный к держателю, ЦВ - цифровой вольтметр, УВК - управляющий вычислительный комплекс.

рассчитаны на управление температурой в интервале от 77 до 800 К. Предусмотрено три режима управления:

- 1) термостатирование с дискретностью установки 0,1 К;
- 2) линейно-ступенчатая развертка температуры в обе стороны со скоростью  $T'(t) = 0,05-0,2$  К/с;
- 3) фракционный нагрев с шагом нагрева  $S = 0-10$  К, глубиной осцилляции  $\Delta T = 40-60$  К и временем выжидания  $\Delta t = 0-120$  с.

Реально получаемые параметры и точность управления главным образом зависят от теплофизических свойств применяемого криостата, поэтому не могут быть заранее определены. Дистанционное управление по каналу общего пользования КОП интерфейса от управляющего вычислительного комплекса УВК

позволяет в пределах технических возможностей комплекта регулятор-криостат-образец реализовать другие режимы термоуправления. Слежение температуры образца  $T_0(t)$  во времени практически обеспечивается только для таких режимов управления  $T(t)=F(t)$ , для которых максимальная скорость изменения температуры  $T'(t)$  в каждой рабочей точке диапазона намного меньше максимально достигаемой скорости изменения температуры образца  $T'_0(t)$  в соответствующих точках, притом в обе стороны - при нагреве и при охлаждении.

В малоинерционных азотных криостатах [2,3] в качестве терморегулирующих органов применяются электрический нагреватель ЭН и электроуправляемый вентиль ЭВ. Последний регулирует уровень жидкого азота (или другого криоагента), что изменяет скорость отвода тепла с держателя образца и нагревателя (см.рис.). Криостаты такого типа при хорошем тепловом контакте образца с держателем обеспечивают  $T'_0(t) = 10 \text{ K/c}$  [3]. Поэтому достижимая скорость изменения температуры, при которой возможно осуществить слежение  $T_0(t)$  по какому-то плавному закону управления  $T(t) = F(t)$ , не превышает  $T'(t) = 1 \text{ K/c}$ .

Рассматривая работу системы термоуправления "SARMA", выделим три основные части: 1) управляемый термостабилизатор, 2) устройство управления термостабилизатором, 3) цифровой термометр.

Термостабилизатор непосредственно управляет органами регулирования температуры в криостате. Его действие сводится к достижению минимальной разницы между заданным значением температуры  $T_3(t)$  и реальным значением температуры держателя образца  $T_d(t)$  в момент времени  $t$ . Температура держателя образца стабилизируется ввиду того, что температура образца  $T_0(t)$  в каждом конкретном случае сложным образом зависит от теплофизических свойств и массы образца и от способа осуществления теплоконтакта с держателем, а заранее такую зависимость однозначно определить невозможно [1]. Поэтому термодатчик обратной связи  $D_T$  устанавливается на держателе в области протекания основного потока тепла между образцом, нагревателем и сосудом криоагента. Сигнал обратной связи подается на один вход сравнивающего устройства СУ, на

второй вход подается управляющее напряжение, которое формирует устройство управления термостабилизатором.

Сравнивающее устройство вырабатывает сигнал ошибки, соответствующий разнице  $Dtc(t) = T_z(t) - T_d(t)$  в текущий момент времени  $t$ . Для достижения максимальной чувствительности с минимальным запаздыванием в СУ и в остальных узлах термостабилизатора применяется обработка аналоговых сигналов аппаратурными средствами [1]. Разработанная аппаратура обеспечивает чувствительность не хуже 1 мкВ с постоянной времени интегрирования около 1 мс, что пока невозможно реализовать доступными микропроцессорными средствами дискретной логики. В качестве малоинерционного термодатчика  $D_T$ , перекрывающего весь диапазон от 77 до 800 К, применяется медь-константановая термопара. Ее чувствительность в этом диапазоне изменяется от 15 до 50 мкВ/К в зависимости от повышения температуры. Следовательно, температурная чувствительность СУ с медь-константановой термопарой лучше 0,1 К.

Для достижения максимального быстродействия термостабилизации применяется комбинированный алгоритм управления терморегулирующими органами ЭВ и ЭН: двухпозиционный и пропорционально-интегральный, что осуществляется исполнительным устройством ИУ. Двухпозиционное регулирование действует в течение времени, пока сигнал ошибки превышает величину, установленную при налаживании работы термостабилизатора с конкретным криостатом, иными словами, при охлаждении выключается нагреватель ЭН и отпирается вентиль ЭВ, а при нагреве - наоборот, притом на ЭН подается максимальная мощность нагрева. При сигнале ошибки, меньшем установленной величины, начинает действовать пропорционально-интегральное регулирование мощности нагревателя ЭН, что реализуется путем управления фазой включения силового тиристора при питании его пульсирующим током [1].

Устройство управления термостабилизатором состоит из цифро-аналогового преобразователя ЦАП, микропроцессорного контроллера, интерфейса ИФ и пульта управления ПУ с индикаторным табло ИИД. Контроллер и интерфейс построены на

элементах микропроцессорного комплекта серии К580. Программа управления размещается в ППЗУ объемом 4 килобайтов. Признаком выбранного режима работы, его параметры и сигнал запуска регулятора вводятся вручную с пульта управления или дистанционно по КОП интерфейса, как это предусмотрено ГОСТом 26.003-80. В процессе ввода параметров программа микропроцессорного контроллера проверяет их соответствие пределам допустимых значений. В случае обнаружения несоответствия ошибка индицируется на ПУ и вырабатывается соответствующий признак в байте состояния. При правильном вводе параметра его значение индицируется на ПУ и разрешается ввод следующего параметра.

После запуска программы локального управления термостабилизатора в любом из трех предусмотренных режимов микропроцессорный контроллер вычисляет значение текущей температуры  $T_3(t) = F(t)$  с периодом 0,1 с. Код этого значения передается на ЦАП, формирующий соответствующее напряжение управления термостабилизатором. ЦАП построен на дискретных элементах (прецизионных резисторах и электромагнитных реле), так как пока не существуют аналоги в интегральном исполнении, обеспечивающие диапазон преобразования в пределах 15 двоичных порядков с абсолютной погрешностью не более 1 мкВ. Значение  $T_3(t)$  также периодически индицируется на ПУ. При достижении температуры  $T_{\Delta}$  заданного значения  $T_3$  с погрешностью не больше  $\Delta T_s = \pm 0,1$  К в байте состояния вырабатывается соответствующий признак.

Параллельно термостабилизатору работает цифровой термометр температуры образца  $T_0$ , показания которого посредством микропроцессорного контроллера индицируются на ПУ и их возможно считывать дистанционно по КОП. Измерение температуры  $T_0$  производится с периодом 0,25 с, что обусловлено быстродействием вольтметра В7-34А.

Таким образом, совмещение быстродействующего термостабилизатора с прецизионным термометром в единую измерительную систему с микропроцессорным управлением позволяет: 1) значительно ускорить настройку термостабилизатора для работы с конкретным кристаллом и образцом, 2) получить точность

стабилизации  $\pm 0,1$  К во всем рабочем диапазоне температур и  
3) в дальнейшем разработать самоадаптирующие программы управления для достижения максимальной точности и быстродействия процессов терморегулирования в криостатах для любых образцов исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зариньш М.Я. Управление температурой в криостатах // Методы и аппаратура для исследований люминесценции. - Рига, 1965. - С.99-126.

2. Страумен Я.Я. Некоторые теоретические и практические вопросы по созданию криогенной аппаратуры // Кибернетизация научного эксперимента. - Рига, 1972. - С.95-110.

3. Аболиньш О.Э., Страумен Я.Я., Миллер Д.К., Плаудис А.Э., Тале И.А., Витол И.К., Гурдзисяс П.Я. Азотные криостаты // Кибернетизация научного эксперимента. - Рига, 1972. - С.116-137.

Статья поступила 23 августа 1988 года.

## МЕТОДИКА И УСТАНОВКА ГРАДУИРОВКИ И ПОВЕРКИ КРИОГЕННЫХ ТЕРМОМЕТРОВ ДЛЯ ИНТЕРВАЛА ТЕМПЕРАТУРЫ 2-300 К

Я.Я.Аболиньш, Я.Я.Страумен, М.А.Зариньш, Б.А.Куле  
НИИ физики твердого тела ЛГУ им. Петра Стучки

### В в е д е н и е

В НИИФТТ к настоящему времени имеется материальная база для проведения криогенных исследований твердотельных образцов в интервале температуры от 3 до 273 К: налажено производство сжиженного гелия и в стадиях эксплуатации или разработки находятся около десяти криогенных исследовательских стэндов. Однако не в полной мере решены вопросы, связанные с метрологическим обеспечением измерения температуры, особенно в интервале 3-70 К. Это вызвано тем, что в СССР пока проблематично приобретение новых криогенных термометров, а имеющиеся не всегда пригодны для эксперимента (полупроводниковые термометры не подходят для измерения радиационного излучения). Не обеспечивается официальная периодическая поверка рабочих криогенных термометров.

В связи с этим в НИИФТТ разработана и создана низкотемпературная лабораторная установка градуировки и поверки рабочих термометров (НЛУГТ) для интервала температуры 2-300 К. Нами разработаны также ведомственные методические указания градуировки и поверки криогенных рабочих термопреобразователей сопротивления (ТПС) и термоэлектрических термометров (ТЭТ).



## Рабочие термометры для измерения криогенных температур

В измерениях криогенной температуры нами применяются целый ряд термометров.

Легированные германиевые термопреобразователи сопротивления типов КГ, КГТ, КВ [1] работают в интервале температуры от 3 до 273 К. Особенность этих термометров - это чрезвычайно высокая чувствительность в узком интервале температуры (до 100 000 Ом/К), максимальная точность  $\pm 0,01$  К. Недостатком термометров следует считать то, что под воздействием ионизирующего излучения меняются их характеристики, при температуре около 4,2 К наблюдаются паразитные явления пьезоэффекта и эффекта Зеебека, термометры поддаются существенному влиянию магнитного поля. Градуировка термометров индивидуальная.

Угольные термопреобразователи сопротивления на основе резисторов типа ТВО-0,125 (ГОСТ 11324-76) и ТСКУ-21 (ТУ 359.342) официально не градуированы, но успешно применяются для измерения температуры от 2,5 до 80 К [2,3]. Эти термометры обладают достаточно высокой чувствительностью (при 4,2 К точность  $\pm 0,015$  К, при 80 К -  $\pm 0,7$  К), малогабаритны, нечувствительны к ионизирующему излучению и к сильным (до 40 кЭ) магнитным полям. Недостатком термометров можно считать требование герметизации угольного элемента, старение ТПС, необходимость введения так называемого фактора охлаждения в зависимости от того, находится ТПС в криогенной жидкости или в вакууме. Градуировка термометров индивидуальная.

Термоэлектрический термометр медь-копаль допускается в качестве термометра для интервала температуры 73-373 К с точностью  $\pm 0,3$  К. Методика и градуировка их - согласно ГОСТу 22666-77.

Термоэлектрический термометр медь-константан - один из наиболее широко распространенных термометров - применяется для интервала температуры от 70-300 К, хотя он не имеет нормативной документации (возможно, из-за отсутствия в стране термоэлектродной константановой проволоки). Методика градуировки и проверки этого термометра аналогична методике на термометр медь-копаль.

Термоэлектрический термометр медь-медь+железо+литий в стране разработан недавно [ 4 ] согласно ТУ 48-21-793-85 для интервала температуры 2-80 К. Точность измерения температуры этим термометром составляет  $\pm 0,5$  К; методика градуировки и поверки термометра разработана в ВНИИЭТРИ.

Нормативные документы \* предусматривают, что градуировка и поверка криогенных рабочих термометров должна производиться методом сравнения их с образцовыми термометрами сопротивления I или II разряда при ряде постоянных температур на рабочий температурный интервал, определяют точность поверки рабочих термометров, устанавливают порядок разработки локальной поверочной схемы. В случае отсутствия нормативных документов предусматривается разработка ведомственных методических указаний, которые согласовываются с головной организацией отрасли. Такие указания нами разработаны по методике и средствам поверки низкотемпературных полупроводниковых термометров сопротивления.

Показания угольных и полупроводниковых термометров сравниваются с показаниями образцовых термометров сопротивления в 32 реперных температурных точках в интервале температуры от 2 до 273 К.

Интерполяция осуществляется полиномом вида:

$$\ln R(T) = \sum_{i=0}^K A_i (\ln T)^i = \sum_{i=0}^K a_i \varphi_i (\ln T),$$

где  $R(T)$  - сопротивление термометров при температуре  $T$  ;  
 $a_i$  - постоянные коэффициенты;  $\varphi_i$  - ортогональные полиномы Чебышева;  $K$  - степень полинома, равная 8 для рабочих термометров. Число реперных точек должно вчетверо превышать степень аппроксимирующего полинома и д.б. распределены равномерно по логарифмической шкале всего температурного интервала.

---

\* ГОСТ 8.078-79; ГОСТ 8.079-79; ГОСТ 8.084-79; ГОСТ 8.461-83; ГОСТ 8.326-78; ГОСТ 8.383-80; ГОСТ 8.042-72.

Набор температурных точек вводится в ЭЕМ, где согласно программе строится график зависимости  $R = f(T)$  (проверка правильности снятых реперных точек) и печатается таблица: температура, сопротивление, чувствительность для каждого отградуированного термометра в диапазоне рабочих температур.

Проверка угольных и полупроводниковых термометров сопротивления производится один раз в 2 года в 6-10 реперных точках в рабочем диапазоне температур.

Для градуировки и проверки термометров сопротивления должны применяться следующие средства. Во-первых, это образцовые термометры сопротивления ТСПН-3 для интервала температуры 14-273 К с точностью  $\pm 0,01$  К, ТСГ-1 для интервала температуры 2-30 К с точностью  $\pm 0,01$  К и ТСУ-1 для интервала температуры 2-273 К с погрешностью измерения температуры 1%; во-вторых, потенциометр постоянного тока Р-345 класса точности 0,001; в-третьих, криостат сравнения для создания и поддержания в блоке сравнения любой температуры в интервале от 2 до 300 К с точностью  $\pm 0,01$  в течение 30 минут.

Более подробно будем рассматривать вопросы, связанные с конструкцией и особенностями эксплуатации криостата сравнения, а также систем, обеспечивающих его эксплуатацию, в частности терморегулятора и системы регулирования давления паров криоагента над его поверхностью.

### Криостат сравнения

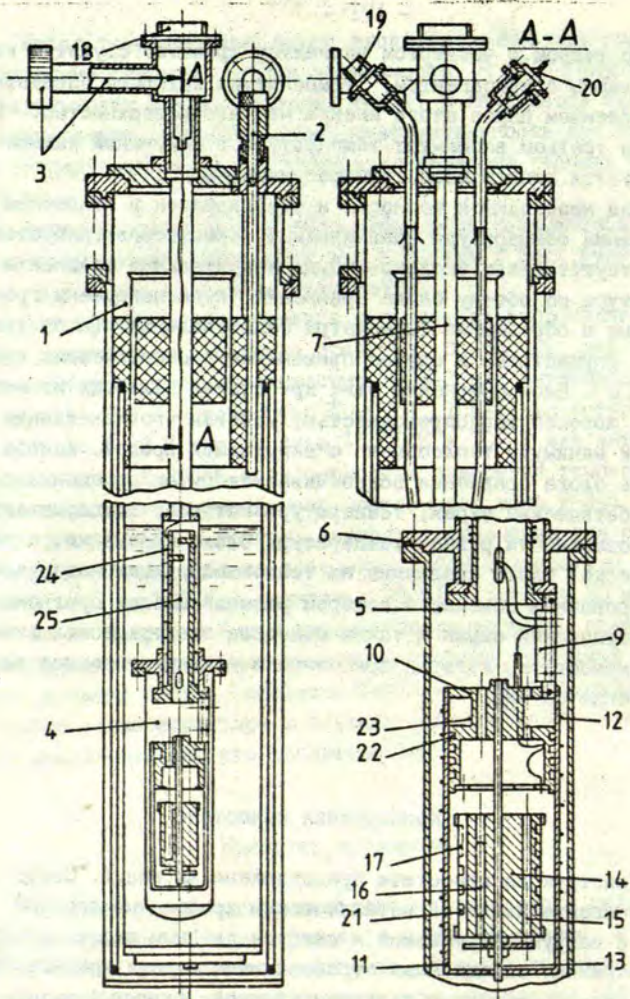
В целях экономного использования сжиженного гелия криостат приспособлен для работы и с жидким гелием, и с жидким азотом в качестве криоагента. В целях достижения по возможности низкой рабочей температуры необходимо работать при пониженном давлении паров криоагента, поэтому предусмотрено четыре варианта использования криостата: 1) от 78 до 300 К как азотного с терморегулятором; 2) от 50 до 78 К как азотного с откачкой паров; 3) от 4,2 до 50 К как гелиевого с терморегулятором; 4) ниже 4,2 К как гелиевого с откачкой паров.

Во втором и четвертом вариантах криостат служит в качестве ванны с криоагентом, температура которого определяется давлением паров этого агента над его поверхностью. В первом и третьем вариантах температура в вакуумной камере регулируется электронным терморегулятором.

Для необходимой точности и стабильности в отношении поддержания температуры сравниваемых термометров требуется, чтобы отсутствовали сколько-нибудь значительные градиенты температуры по объему блока сравнения, куда погружены градуируемые и образцовые термометры сопротивления. Такое требование осуществимо в случае применения адиабатических криостатов [5]. Блок сравнения этих криостатов делается из материала с хорошей теплопроводностью, условия его нахождения сводят к минимуму теплообмен с окружающей средой. Адиабатичность блока сравнения обеспечивается путем помещения его в адиабатический экран, температура которого поддерживается по возможности равной температуре блока сравнения, а также подвеской блока сравнения на теплоизолирующих материалах, вакуумированием объема, в котором размещены блок сравнения и адиабатический экран и таким монтажом электрических линий внутри криостата, который практически исключает подвод или отвод тепла по ним.

### Конструкция криостата

Конструкция криостата представлена на рис. I. Сосуд I для криоагента является металлическим криогенным сосудом Дьюара с вакуумной рубашкой и снабжен двойным пассивным тепловым экраном, охлаждаемым отработанными парами криоагента. Сверху сосуд герметично заглушен крышкой, в которой смонтированы заливная горловина (заглушенная пробкой 2), патрубок 3 для откачки и/или сбора паров криоагента, датчик уровня криоагента (не показан) и сменная вакуумная камера 4.



Р и с. I. Конструкция адиабатического криостата.  
Расшифровка позиций приводится в тексте.

Сменная вакуумная камера является центральным узлом криостата, именно в ней реализуется режим адиабатичности блока сравнения. Имеются камеры двух исполнений - для работы с термообразователями сопротивления и для работы с термоэлектрическими термометрами; их отличия заключаются лишь в способах крепления термометров и вывода измерительных линий. Камера представляет собой медный стакан 5, герметично уплотненный на фланце 6 и опущенный в криоагент на длинной тонкостенной трубе 7 из нержавеющей стали. Объем стакана через патрубок 3 можно либо вакуумировать, либо заполнять теплообменным газообразным гелием. Внутри стакана 5 на трех стеклотекстолитовых планках 9 подвешена головка 10 с находящимся с ней в тепловом контакте адиабатическим экраном 11. Равномерно по поверхности экрана намотана манганиновая проволока 12, являющаяся нагревателем экрана. Внутри экрана на тонкостенной нержавеющей трубке 13 подвешен блок сравнения 14, в продольных сверлениях 16 которого монтируются два образцовых термометра, а в сверлениях 15 - поверяемые термометры, т.е. 7 шт. ТПС или 10 шт. ТЭТ по периметру. Для регулировки температуры на цилиндрической поверхности блока сравнения выполнена канавка, в которую бифилярно намотан и уложен нагреватель 17 из манганиновой проволоки.

Для удобства монтажа и предотвращения теплопритока извне при сборке электрических линий от термометров и нагревателей к наружным герморазъемам 18, 19 и выводу термопар 20 предусмотрено по 3 тепловых развязки для каждого провода. Две из них выполнены в виде бифилярных петель в пазах 21 блока 14 и пазах 22 и вокруг цилиндрической поверхности 23 головки 10, а одна - в виде спиральной намотки линий 24 на радиационном экране 25. Общее количество электрических выводов для камеры ТПС 50 штук, а для камеры ТЭТ - 30 штук.

## Терморегулятор

Двухканальный терморегулятор применяется для управления температурой адиабатического экрана и блока сравнения в случаях использования криостата в качестве адиабатического. Объекты регулирования - адиабатический экран и блок сравнения имеют взаимную тепловую связь, зависящую как от разницы их температуры, так и от значения температуры. В таких условиях представлялось целесообразным температурой каждого объекта управлять с помощью независимого регулятора. Это означает, что параметры регулирования, т.е. заданная температура и максимальная мощность подбираются отдельно для каждого канала.

Каждый канал терморегулятора построен на основе разработанного в НИИМТ универсального криогенного терморегулятора [6]. Но часть стандартных его узлов переработана, учитывая высокие требования к точности и стабильности регулирования температуры, а также специфику температурного диапазона, в котором время установления теплового равновесия объектов регулирования меняется в широком интервале. Главным образом это относится к выбору датчиков температуры, к задающему устройству и сравнивающему устройству.

В качестве датчика температуры используется смещенный в прямом направлении постоянным током р-п-переход германиевого транзистора. Термометрическим параметром является зависимость падения напряжения на переходе от температуры, исследованная в ряде работ [6-11]. Датчик характеризуется высокой чувствительностью ( $\sim 2,2$  мВ/К в интервале от 10 до 300 К и  $\sim 23$  мВ/К в интервале от 4,2 до 10 К) и малоинерционностью.

Задающее устройство каждого канала терморегулятора переработано применительно к используемым датчикам. Оба задающих устройства управляются с пульта оператора независимо; шаг задания температуры около 0,05 К.

Для обеспечения выполнения требований к стабильности и точности поддержания температуры объектов регулирования

разработано сравнивающее устройство на базе инструментального усилителя с коэффициентом усиления  $\sim 2000$  и температурным дрейфом не более  $1 \text{ мкВ/К}$ .

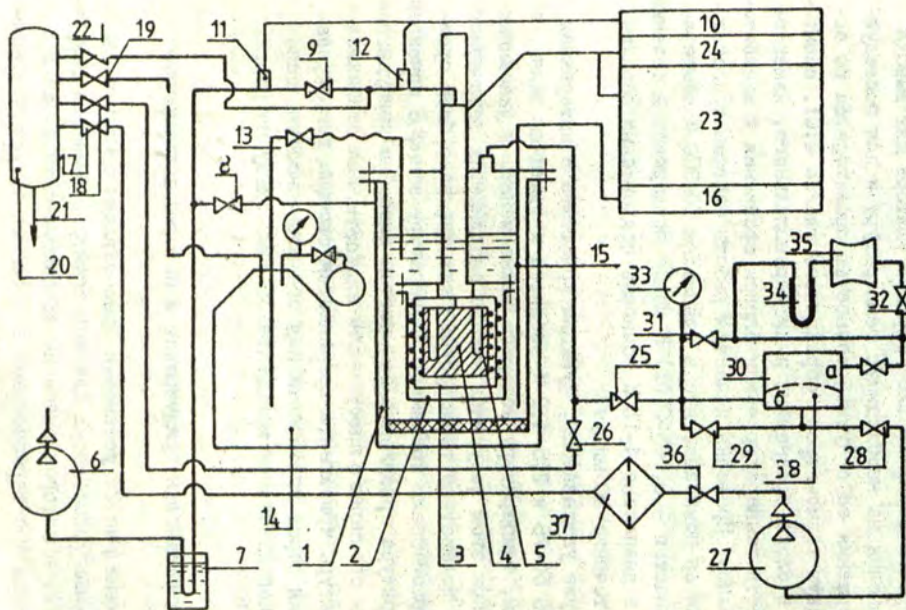
Настройка обоих каналов терморегулятора для вывода блока сравнения на необходимую температуру и для последующего поддержания ее с нужной точностью производится по показаниям двух термометров: образцового класса  $0,01$ , смонтированного в блоке сравнения, и дифференциального, измеряющего разность температур между блоком сравнения и адиабатическим экраном. Проверка качества работы системы криостат-терморегулятор показала, что в диапазоне  $10\text{--}300 \text{ К}$  температуру с точностью  $\pm(0,003\text{--}0,01) \text{ К}$  можно поддерживать в течение 30 минут; в диапазоне  $4\text{--}10 \text{ К}$  точность поддержания порядка  $\pm 0,01 \text{ К}$  в течение 30 минут.

Как уже указывалось, функции криостата в интервалах температуры  $50\text{--}78$  и  $2,5\text{--}4,2 \text{ К}$  сводятся к функциям ванны с криоагентом, температуру которого можно менять в указанных пределах. При этом вакуумная камера заполняется теплообменным газом, вследствие теплопроводности которого блок сравнения с термометрами принимает температуру ванны с криоагентом. Температура криоагента понижается способом принудительной откачки его паров с поверхности жидкости. Для стабилизации температуры криоагента применяется система регулирования давления паров криоагента над его поверхностью, основанная на использовании маностата 30 (см. схему на рис.2).

#### Работа установки градуировки и поверки термометров

На схеме (рис.2) установки представлены основные ее функциональные узлы: сосуд для криоагента 1, сменная вакуумная камера 2, в которой выделены адиабатический экран 3 и блок сравнения 4 с термометрами 5. Откачка вакуумной рубашки криогенного сосуда производится механическим ротационным насосом 6 через азотную ловушку 7 и вентиль 8; этим же насосом через вентиль 9 при необходимости вакуумируется по-





Р и с. 2. Функциональная схема установки. Расшифровка позиций приводится в тексте.

лость вакуумной камеры 2. Разрежение контролируется вакуумметром 10 посредством манометрических преобразователей 11 и 12. Заполнение криогенного сосуда 1 криоагентом производится при помощи переливного устройства 13 из транспортного сосуда 14; контроль уровня жидкости в криостате производится емкостным датчиком уровня 15 и прибором 16. При работе с жидким гелием через вентили 17, 18 и 19 в ресивер 20 и далее в линию сбора 21 собираются отработанные пары. При необходимости из ресивера через натекатель 22 гелием заполняется полость вакуумной камеры 2. Температура измеряется блоком измерения температуры 23, установка и поддержание температуры производится совместной работой криостата с терморегулятором 24 (вариант адиабатического криостата) или системой регулирования давления (вариант ванны), изображенной в левой части рисунка.

Система регулирования давления подключается к криогенному сосуду 1 путем открытия вентиля 25 и перекрытия вентилем 26 газосбросной линии криостата. Откачку паров криоагента из сосуда криостата производит насос 27 либо через дроссельный вентиль 28 по байпасной линии (вентиль 29), либо через маностат 30. В первом случае происходит плавное и непрерывное понижение давления, следовательно, температуры паров криоагента в криогенном сосуде до предела, определяемого возможностями насоса. Во втором случае процесс понижения длится до тех пор, пока достигнуто давление, предварительно намеренно созданное в верхней камере маностата "а". Впоследствии оно автоматически поддерживается следующим образом. Маностат представляет собой замкнутый объем, разделенный упругой мембраной (пунктирная линия) на две камеры - задающую "а" и регулирующую "б". Из-за разности давления в камерах мембрана либо открывает, либо закрывает вход отсасывающего патрубка 38. Таким образом поддерживается равным давление в обеих камерах маностата, следовательно, и в криогенном сосуде 1. Для создания и удержания необходимого давления в камере "а" маностата используются вентили 31 и 32. Пружинным манометром 33 измеряется давление в криогенном сосуде, а дифференциальным манометром 34 (с балластной емкостью 35) контролируется качество работы маностата.

При работе с жидким азотом выхлоп насоса 27 через электромагнитный газовый коммутатор 36 производится в атмосферу. При работе с гелием отработанные пары коммутатором через масляный фильтр 37 направляются в ресивер 20 для сбора.

Практика совместного использования криостата и системы регулирования давления показала, что при условии хорошего сопряжения мембраны с отсасывающим патрубком, а также управления (дросселем 28) скоростью откачки паров, система обеспечивает точность поддержания температуры до 1 мК в течение 30 минут. При работе с жидким азотом была достигнута температура 49 К, а с жидким гелием - 2,2 К.

Захлаживание криостата от комнатной до азотных температур производилось в течение 2 часов с использованием 4 литров жидкого азота. Одноразовая заливка 7 литров жидкого азота обеспечивает непрерывную работу с получением промежуточных температур от 80 до 300 К в течение 10 часов.

Захлаживание криостата от 65 до 4,2 К производилось в течение 1 часа с использованием 2 литров жидкого гелия. Одноразовая заливка 5,5 литров жидкого гелия обеспечивает непрерывную работу с получением промежуточных температур от 2,3 до 46 К в течение 12 часов.

Время выхода объектов регулирования на установленную температуру с помощью автоматического терморегулятора составляет 15 мин, а с помощью системы регулирования давления - 10 мин.

Время естественного отогрева от азотных до комнатной температур - 24 часа, от гелиевых до комнатных температур - 36 часов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Зиновьева К.Н. и др. Полупроводниковые термометры сопротивления для интервала 0,3-300 К // Приборы и техн. эксперимента. - 1979, № 3. - С.214-216.

2. Дацков В.И. и др. Криогенные термометры на основе резисторов ТВО и их применение: Сообщения ОИЯИ. - Дубна, 1987. - 12 с.

3. Тянь Л.С. и др. Сравнительные характеристики технических термометров для низких температур // Приборы и техн.эксперимента. - 1986, № 1. - С.222-224.

4. Медведева Л.А. и др. Термопара для измерения низких температур с электродом из сплава медь с железом и литием // Исследования в области низкотемпературной термометрии и теплофизики. - М., 1977. - С.49-55.

5. Рывкин Н.П. и др. Установка для теплофизических исследований в интервале температур 2-300 К // Исследования в области термометрических и теплофизических измерений при низких температурах. - М., 1973. - С.197-209.

6. Задиныш М.Я. Управление температурой в кристатах // Методы и аппаратура для исследований люминесценции. - Рига, 1985. - С.99-126.

7. Орлова М.П. Низкотемпературная термометрия. - М., 1975. - 160 с.

8. Фогельсон И.Б. Транзисторные термодатчики. - М., 1972. - 128 с.

9. Игнатъев В.К. Термометрические свойства кремниевого транзистора КТ629А и электронная стабилизация температуры в диапазоне 1-300 К // Приборы и техн.эксперимента. - 1983, № 1. - С.187-190.

10. Безверхняя Н.С. Термометрические характеристики кремниевых полупроводниковых диодов // Приборы и техн.эксперимента. - 1976, № 5. - С.278-279.

11. Иванов Л.П. Арсенидо-галлиевые диодные датчики температуры // Приборы и техн.эксперимента. - 1979, № 1. - С.256.

ГЕЛИЕВЫЙ КРИСТАТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВЯ.Я.Страумен, Я.Я.Аболиньш  
НИИ физики твердого тела ЛГУ им. Петра Стучки

Как было предусмотрено планом научно-исследовательских работ на 1986-1987 годы, в НИИ физики твердого тела создано и сдано в эксплуатацию рабочее место для криогенных испытаний электрических свойств полупроводниковых приборов. Основное оборудование рабочего места - это гелиевый криостат, терморегулятор, система прокачки паров гелия, установка для проверки и градуировки рабочих термометров\*.

В статье будут обсуждаться вопросы, связанные с конструкцией и эксплуатацией гелиевого криостата для электрических испытаний полупроводниковых приборов.

Выбор криостата производился из двух наиболее распространенных типов - проточных и вакуумных. Учитывая то, что условия испытаний образцов допускают их нахождение в жидком или газообразном гелии, был выбран вариант проточного криостата, так как его конструкция относительно проста. Таким образом удалось более легко, по сравнению с вакуумными криостатами, решить те задачи, которые предопределялись следующими особенностями условий испытаний приборов.

I. При электрических испытаниях на приборах допускается тепловыделение вплоть до нескольких сотен милливатт. Для более экономного расхода криоагента в таких случаях целесо-

---

\* См. наст. сб., с. 167. Аболиньш Я.Я., Страумен Я.Я., Зариньш М.А., Куле Б.А. Методика и установка градуировки и проверки криогенных термометров для интервала температуры 2-300 К.

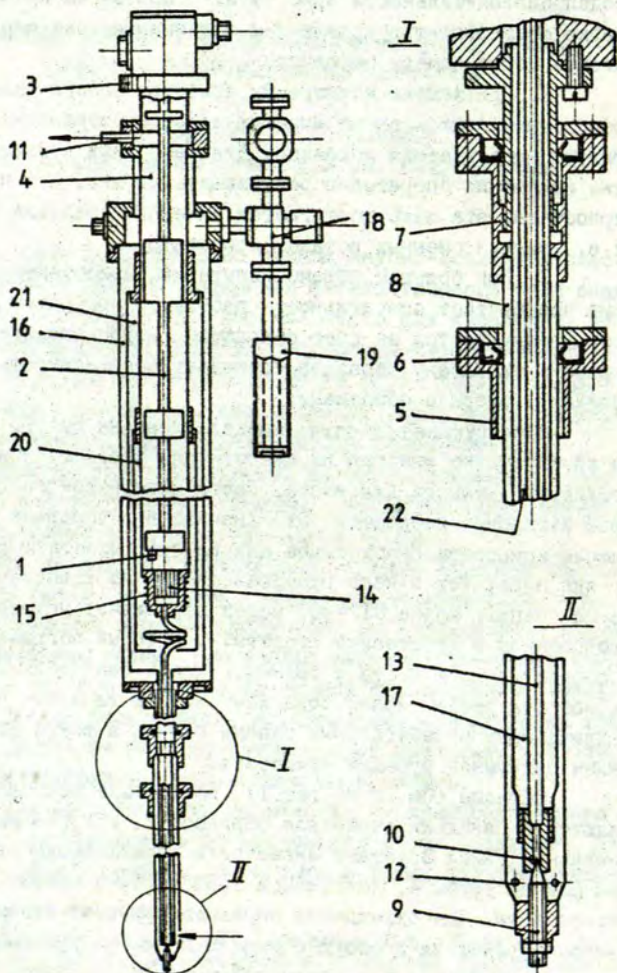
образно предусмотреть возможность гибкого регулирования холодопроизводительности криостата. В проточном криостате это легко осуществлять управлением величины потока паров криоагента через камеру образцов.

2. При замене испытуемых приборов одного типа другим необходимо менять электрическую и/или пространственную конфигурацию держателя образцов. Для вакуумных криостатов такие изменения оперативно реализовать сложно, а в проточных криостатах эта цель достигается заменой держателя образцов, т.е. заменой сменных вставок криостата.

3. При большом объеме испытаний первостепенное значение приобретает оперативность работы. В проточном криостате она увеличивается за счет сокращения непроизводительного времени на замену образцов (отпадает необходимость вакуумирования камеры с образцами).

Конструкция криостата представлена на рис. I. Как видно, в криостате не имеется ни емкости для рабочего криоагента гелия, ни емкости для азота, часто используемого для тепловой изоляции криостатов. Это значительно упрощает изготовление криостата. Необходимое для работы криостата количество гелия поступает в него непосредственно из транспортного сосуда (напр., марки СТП-40) через переливное устройство, встроенное в хвостовике криостата, который погружается непосредственно в сосуд с гелием. Задачи тепловой изоляции криостата решены использованием системы тепловых экранов, охлаждаемых отработанными парами гелия, а также использованием вакуумной рубашки криостата.

Образцы (см. I на рис. I), подлежащие испытаниям, вставляются в панельки держателя образцов 2, который при помощи накидной гайки 3 устанавливается и герметически закрепляется на фланце трубы 4, являющейся транспортным каналом для паров криоагента. Для охлаждения образцов криостат своим хвостовиком опускается в сосуд с жидким гелием и уплотняется в нем при помощи пробки 5 с резиновой манжетой 6. Затем при помощи резьбового привода 7, который посредством трубки 8 воздействует на иглу 9, открывается вентиль, образованный иглой 9 и



Р и с. I. Конструкция проточного гелиевого криостата.  
Расшифровка позиций приведена в тексте.

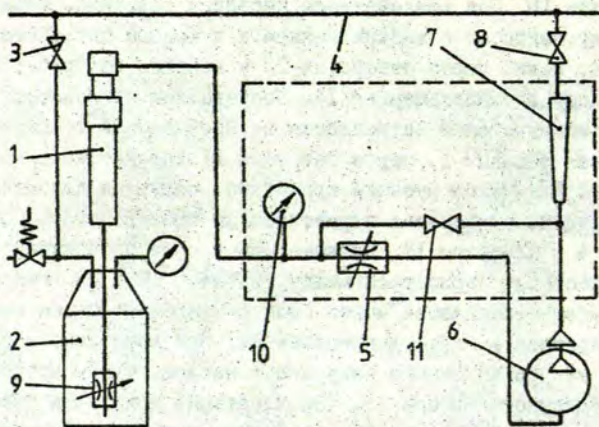
седлом 10. Под воздействием перепада давления, образуемого между емкостью с жидким гелием и входным патрубком II трубы 4, гелий через отверстия 12 и вентиль по трубке 13 поступает в теплообменник 14. Посредством нагревателя 15 гелий испаряется и нагревается до необходимой температуры и, омывая образцы 1, через патрубок II удаляется из криостата.

Вакуумная рубашка криостата, служащая для тепловой изоляции, образована герметическим пространством между трубой 4 и корпусом 16. Рубашка имеет свое продолжение также в хвостовике криостата между трубками 17 и 13. Разрежение в рубашке создается через блок вентиля 18 перед погружением криостата в сосуд с криоагентом. Предусмотрено использование как ротационного вакуумного насоса, так и встроенного сорбционного насоса 19. (Эксплуатация криостата показала, что при условии герметичности криостата достаточное для работы разрежение в рубашке ( $\sim 10^{-4}$  Па) достигается при помощи эффекта криооткачки остаточных газов при погружении криостата в жидкий гелий.)

Для отвода радиационных тепловых потоков, проникающих в криостат от боковых поверхностей, использованы два медных тепловых экрана 20 и 21, причем последний из них имеет свое продолжение в виде медной трубки 22 в хвостовике криостата. Эффективное охлаждение экранов осуществляется отработанными парами гелия в капиллярных щелях, образованных трубой 4 и специальными колодками на держателе образцов. В этих же щелях происходит отбор тепла, поступающего извне по электрическим выводам приборов (количество линий может достигать 50 штук).

Далее рассмотрим систему прокачки паров гелия (см. рис. 2). Как уже отмечалось, для работы криостата необходимо создать перепад давления между его входом и выходом. В принципе это можно осуществить двумя способами: либо понижением давления в сосуде с жидким гелием, либо принудительной откачкой паров отработанного гелия из криостата. Предпочтение отдано второму способу, так как он предполагает работу при пониженном давлении паров гелия над жидкостью,





Р и с. 2. Гидравлическая схема системы прокачки паров гелия через криостат.

Расшифровка позиций дана в тексте.

а следовательно, создается возможность достичь более низких температур.

Криостат (см. 1 на рис.2) герметично установлен в сосуд 2 с жидким гелием, емкость которого через открытый вентиль 3 трубопроводом соединена с линией сбора паров гелия 4. Давление в емкости близко к атмосферному и во время работы практически остается неизменным. Откачка паров гелия из криостата осуществляется через регулируемый дроссель 5 электро-механическим мембранным насосом 6, выхлоп которого через газовый ротаметр 7 и открытый вентиль 8 производится в линию сбора паров гелия. Величина потока паров гелия через криостат управляется как степенью раскрытия игольчатого вентиля 9 на хвостовике криостата, так и степенью раскрытия дросселя 5; в свою очередь, соотношением их проходных сечений определяется давление паров в камере с образцами. Величина потока паров контролируется ротаметром 7, а давление паров в камере криостата - пружинным манометром 10. Вентиль 11 является байпасным и используется при больших расходах газа. Все трубопроводы выполнены из поливиниловых трубок марки ПМ.

Чтобы воспользоваться возможностями криостата, предусмотрена его совместная работа с терморегулятором гелиевых температур. Устройство терморегулятора аналогично описанному в [1]. В качестве датчика температуры для терморегулятора применен смещенный в прямом направлении постоянным током р-п-переход германиевого транзистора ГТ-109. Следует отметить, что во всем диапазоне рабочей температуры регулятор совместно с криостатом удовлетворительно работает при неизменных значениях констант регулирования, несмотря на существенное ( $\sim 10^5$  раз) изменение теплоемкости объекта регулирования.

Температуру образцов контролируют два термометра, размещенные в непосредственной их близости. Для интервала температуры от 73 К до комнатной используется термоэлектрический термометр медь - копель (согласно ГОСТу 22666-77), а для интервала от 4 до 80 К - германиевый термопреобразователь сопротивления марки КГ [2]. Измерение и цифровая индикация значений температуры с точностью до 0,1 К во всем интервале осуществляется термометром разработки НИИ физики твердого тела.

Эксплуатационные характеристики криостата:

область рабочей температуры	(3,5-300) К
точность термостатирования образцов	$\pm 0,1$ К
количество электрических линий от образцов	до 50 шт.
минимальное время охлаждения образцов	
от 300 до 4 К	10 мин
время нагрева образцов от 4 до 300 К	40 мин
средний расход жидкого гелия	0,5 л./час

В настоящее время ведутся работы по модернизации описанного криостата. Предполагается решить задачи уменьшения времени нагрева образцов за счет улучшения конструкции теплообменника, увеличения допустимого предела тепловыделения на образцах путем введения контура автоматического регулирования холодопроизводительности криостата и автоматизации процесса управления температурой образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зариньш М.Я. Управление температурой в криостатах // Методы и аппаратура для исследований люминесценции. - Рига, 1985. - С.99-126.

2. Зиновьева К.Н. и др. Полупроводниковые термометры сопротивления для интервала 300-0,3 К // Приборы и техн. эксперимента. - 1979. - № 3. - С.214-215.

Статья поступила 31 мая 1988 года.

**МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОНКИХ ПЛЕНОК: КОЛИЧЕСТВЕННОЕ  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ПРИМЕСЕЙ**

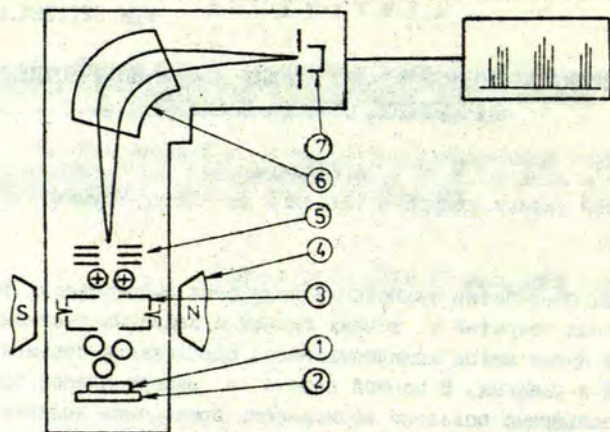
А.Я. Азенс

НИИ физики твердого тела ЛГУ им. Петра Стучки

Для разработки технологии получения высокочистых тонкопленочных покрытий и тонких пленок с заданным уровнем примесей нужен метод количественного определения состава примесей в пленках. В данной работе на примере пленок триоксида вольфрама показана возможность проведения количественного анализа примесей в тонких пленках при использовании масс-спектрометрической детекции продуктов термического испарения.

В зависимости от преследуемой цели в масс-спектрометрии используются разные способы ионизации атомов и молекул вещества [1]. Выдвигая задачу количественного определения состава примесей, целесообразно проводить ионизацию электронным ударом, преимуществами которого по сравнению с другими способами ионизации является возможность математического описания процесса ионизации без привлечения трудно интерпретируемых эмпирических параметров [2] и относительно простое техническое обеспечение. Поэтому вместо стандартно используемого в масс-спектрометре МИ-1201 ионного источника с поверхностной ионизацией нами был собран ионный источник, в котором продукты термического испарения ионизируются электронным ударом (см. рис.).

Для количественного определения состава примесей требуется калибровка масс-спектрометра, в частности необходимо установить численное соотношение между экспериментально измеряемой величиной - ионным током конкретного химического



Р и с. Схематическое изображение масс-спектрометра МИ-1201 с ионным источником, осуществляющим ионизацию электронным ударом.

Исследуемый образец (1), нанесенный на вольфрамовую ленту (2), нагревается пропусканием тока. Испаренные атомы ионизируются в камере ионизации (3). для увеличения длины пробега электронов через объем ионизации накладывается магнитное поле (электромагнит 4). Ионный луч формируется ионной оптикой (5) и проходит через магнитный масс-анализатор (6). Ионный ток, соответствующий выбранному элементу (изотопу), регистрируется детектором (7).

элемента - и количеством атомов этого элемента в испаряемой пленке. Придерживаясь терминологии из [1], назовем это соотношение коэффициентом использования вещества  $k$ , который

$$k = n_j / n_a, \quad (I)$$

где  $n_j$  - число ионов, поступивших на детектор масс-спектрометра и  $n_a$  - число атомов, имевшихся в пленке до испарения. Мы определили коэффициент использования вещества для масс-спектрометра с нами собранным ионным источником для меди и получили  $k = 10^{-7}$ . Эксперименты проводили с тонкими плен-

ками меди, приготовленными в одном технологическом процессе. Число атомов  $n_d$  определяли двумя способами: взвешиванием пленки (весами АВГ-5г) и измерением линейных размеров (толщину пленки измеряли интерференционным микроскопом МИИ-4). Число атомов

$$n_d = m_n / m_a$$

где  $m_n$  - масса пленки,  $m_a$  - масса атома.

Число ионов при полном испарении пленки определили по формуле

$$n_j = \frac{1}{q_e} \int_0^{\infty} I_j(t) dt \quad (2)$$

где  $I_j(t)$  - ионный ток,  $q_e$  - заряд электрона.

Экспериментально найденное значение  $k$  в дальнейшем можно использовать для определения количества атомов меди, содержащихся в виде примеси в тонкой пленке из другого материала. Для этого необходимо, чтобы осуществилось полное испарение исследуемой пленки и было определено число ионов меди по формуле (2), а количество атомов меди - по формуле (1).

Аналогично коэффициент использования вещества определяется и для других химических элементов. Однако определение значения  $k$  для каждого интересующего элемента является трудоемким процессом, для ряда элементов практически нереализуемой задачей. (Это не делается, если оказывается возможным использовать медь или какой-либо другой элемент в качестве эталона и экспериментальное определение значений для других элементов заменить математическими расчетами.) Рассмотрим различия между разными химическими элементами с точки зрения масс-спектрометрического анализа при избранном способе ионизации.

Прохождение атомов от образца до детектора в масс-спектрометре можно разделить на три этапа (см.рис.):

- 1) прохождение атомов от испарителя в области ионизации,
- 2) ионизация части атомов,
- 3) собирание ионов ионно-оптической системой и прохождение их к детектору.

Характеризуя потери на каждом из этапов соответствующим коэффициентом, получаем

$$n_j = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot n_a, \quad (3)$$

где  $C_1$  - отношение числа атомов, попавших в область ионизации, к общему числу испаренных атомов,  $C_2$  - коэффициент ионизации,  $C_3$  - отношение числа ионов, зарегистрированных детектором, к числу ионов, образовавшихся в области ионизации.

Предположим одинаковую угловую зависимость интенсивности испарения для образцов разных материалов, тогда  $C_1$  будет зависеть только от геометрии ионного источника. Считая также эффективность сбора, переноса и детекции независимой от вида ионов (по крайней мере для атомарных ионов),  $C_3$  тоже является характерным для конкретного масс-спектрометра. В таком случае формула (3) применительно к разным химическим элементам будет отличаться только коэффициентом  $C_2$ . Пользуясь для сечения ионизации выражением (2), коэффициент ионизации

$$C_2 = \frac{\tau(E) \cdot I_e(E) \cdot F \cdot (V_e^2 + V_a^2)^{1/2}}{V_e \cdot V_a}, \quad (4)$$

где  $\tau$  - сечение ионизации,  $I_e$  - ток ионизирующих электронов,  $V_e, V_a$  - скорости электронов и нейтральных атомов, соответственно,  $F$  - геометрический фактор и характеризует степень перекрытия электронного и атомного лучей:

$$F = \frac{\int j_a(z) \cdot j_e(z) dz}{\int j_a(z) dz \int j_e(z) dz},$$

где  $j_e$  и  $j_a$  - пространственное распределение соответственно электронного и атомного лучей.

При равных экспериментальных условиях из формулы (4) следует, что

$$\frac{C_{2x}}{C_{20}} = \frac{\sigma_x}{\sigma_0}$$

(индекс  $x$  относится к элементу  $x$ ,  $0$  - к эталону).

Далее

$$\frac{k_x}{k_0} = \frac{C_{2x}}{C_{20}} = \frac{\sigma_x}{\sigma_0}$$

и искомое число атомов элемента :

$$n = n_{jx} \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_0} \cdot \frac{1}{k_0} \quad (5)$$

Таким образом, определение количества атомов какого-либо химического элемента  $x$  в тонкой пленке рассматриваемым методом сводится к экспериментальному измерению  $n_{jx}$ , т.е. ионного тока  $I_{jx}$  и расчету  $n_{ax}$  по формуле (5). Для перехода от числа атомов к их концентрации необходимо измерять линейные размеры пленки.

В настоящее время абсолютные значения  $\sigma$  экспериментально установлены для приблизительно сорока элементов [1-3].

Завершая рассмотрение метода количественного определения состава примесей, оценим область его применения. Физический смысл пределов интегрирования в формуле (2) - это требование испарения всего образца, практически ограничивающее круг исследуемых объектов на тонкопленочные покрытия. Другое ограничение вытекает из необходимости испарения интересующей примеси в виде отдельных атомов, поскольку точные сечения ионизации в настоящее время установлены лишь для некоторых молекул. Кроме того, в случае молекулярного состава паров в расчетах прибавляется еще один параметр - сечение диссоциации в результате электронного удара (в большинстве случаев также не известен).

В качестве примера применения метода количественного определения состава примесей в тонких пленках мы определили концентрацию атомов натрия в термически напыленных пленках триоксида вольфрама (исходный материал - порошок  $WO_3$ , ос.ч. II-2, Ленинградский завод "Красный химик") и получили значение  $(1-3) \cdot 10^{-19}$  см<sup>-3</sup>. В качестве эталона использовали медь, при расчетах сечения ионизации  $\sigma_{Cu}$  и  $\sigma_{Na}$  брали из [1].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сысов А.А. Физика и техника масс-спектрометрических приборов и электромагнитных установок. - М., 1983. - 256 с.
2. Wetzel R.C. et.al. Absolute Cross Sections for Electron-Impact Ionization of the Rare-Gas Atoms by the Fast-Neutral-Beam Method // Phys.Rev.A. - 1987. - Vol.35, N 2. - P.559-577.
3. McFarland R.H., Kinney J.D. Absolute Cross Sections of Lithium and Other Alkali Metal Atoms for Ionization by Electrons // Phys.Rev. - 1965. - Vol.137, N 4A. - P.1058-1061.

Статья поступила 27 мая 1988 года.



## ЦЕЛИ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ В ОБЛАСТИ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Я.Я.Боканс

Физико-математический факультет ЛГУ им.Петра Стучки

В начале 80-х годов отечественная промышленность приступила к массовому выпуску относительно дешевых микроЭВМ, что позволило начать их внедрение во многих исследовательских и учебных учреждениях. Широко используются микроЭВМ "Электроника ДЗ-28", ДВК-1, ДВК-2, в последние годы - микроЭВМ "Электроника БК-0010", "Агат", ожидается выпуск других моделей [1]. На базе этой недорогой, хотя и маломощной (по объему оперативной памяти и быстродействию) вычислительной техники (ВТ) главным образом силами самих же исследователей создаются компьютеризованные системы сбора и обработки экспериментальных данных. Например, в 1986 году в НИИ физики твердого тела ЛГУ им. П.Стучки было введено в эксплуатацию несколько десятков микроЭВМ БК-0010, были созданы необходимые блоки сопряжения и началось широкое использование микроЭВМ для построения систем сбора и обработки данных.\*

Компьютеризация научного труда является необходимым условием для интенсификации научных исследований [2]. Кроме того, как показывает психологические исследования [2], меняется характер труда и качество результатов работы исследователей. Но сам процесс компьютеризации научных исследований и его влияние на конечный результат научных исследований зависит от многих факторов. Во-первых, это наличие удобной, надежной и приемлемой по цене ВТ, во-вторых - уровень соответствующих знаний, умений и навыков пользователей этих сис-

\* См. Программы 2-й, 3-й и 4-й научных конференций НИИФТ ЛГУ им. П.Стучки. - Рига, 1986, 1987 и 1988 гг.

тем [3]. Ряд факторов связан с психологией потенциального пользователя, а также с уровнем осн. ценности компьютера системными и прикладными программными средствами. Если фактор наличия ВТ является определяющим, то фактор обученности пользователя можно считать решающим. Поэтому важную роль играет разработка целей, содержания и организации (технологии) обучения.

Объектом нашего исследования является проблема обучения студентов естественно-научных специальностей университета в области компьютеризированных систем научных исследований, а задачей - определение и конкретизация целей обучения.

В качестве методологической основы рассмотрения проблемы будем использовать общедидактический принцип целостности учебно-воспитательного процесса, содержательной и процессуальной стороны обучения [4,5]. Принцип предусматривает комплексный подход к обоснованию всех компонентов обучения: целей, содержания, методов, средств и организационных форм. Реализация этого принципа означает построение модели специалиста, в которой отражаются конечные, социально-обусловленные целевые установки изучения соответствующих курсов [6].

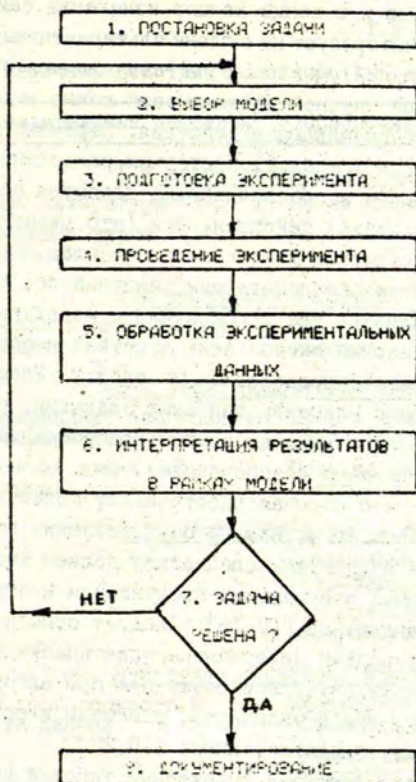
В качестве инструментария разработки модели специалиста будем использовать подход "типовых задач" [7], обеспечивающий единый язык описания всех компонентов обучения. Суть подхода "типовых задач" состоит в том, что языком описания целей подготовки специалиста является описание умений или (что равноценно) типовых задач, которые должен будет решать будущий специалист в своей профессиональной деятельности.

В качестве метода разработки модели специалиста выбран анализ реальной практики использования специалистов данного профиля и прогноза о возможностях массового применения компьютерной техники в естественных науках.

Проведем анализ исследовательской деятельности специалистов. Как известно, конечной целью и продуктом научной деятельности являются новые знания в той или иной области объективного мира [7,8]. Путь получения новых знаний не однозначен и имеет сложную структуру [9]. Однако исследовате-

ли разграничивают в научной деятельности собственно познавательные (исследовательские) действия и действия, роль которых - обеспечение познавательных действий [2]. Здесь можно провести аналогию с терминами "автоматизация" и "механизация" производственной деятельности человека. Если ограничиться рассмотрением компьютерных систем ниже уровня "искусственного интеллекта", то очевидно эти системы в научной деятельности специалистов играют роль инструмента осуществления обеспечивающих действий. Следовательно, главная цель обучения в области ВТ - это умение использовать ее для обеспечения исследовательской работы. Результатом должна быть более высокая эффективность исследовательской деятельности.

Далее более детально проанализируем этапы процесса научной деятельности. Этапность, как правило, строится по принципу алгоритмической модели процесса, и разные исследователи представляют разные структурные схемы [10,11,12]. Структура научной деятельности зависит от характера выполняемой специалистом работы (производственная, экспериментальная, теоретическая). В качестве примера рассмотрим обучение специалистов-физиков в университете, при этом будем учитывать характер реальной работы по специальности после окончания университета на примере Латвийского государственного университета. Анализ характера работы выпускников по специальности "физика", занятых в научно-исследовательских или опытно-конструкторских учреждениях, показал, что большинство из них занято экспериментальными исследованиями и технологическо-конструкторской работой. Очень мало выпускников занимается чисто теоретической работой. Поэтому для дальнейшей конкретизации целей обучения в качестве типовой для данных условий можно выбрать схему этапов научной деятельности (см.рис.1), состоящую из восьми этапов. Цикл научного исследования начинается с постановки задачи, после чего следует выбор адекватной модели изучаемого явления или объекта. неотъемлемой частью цикла является подготовка и проведение эксперимента, который играет роль источника эмпирических данных. Как правило, полученные в эксперименте данные требуют математической обработки (коррекции, преобразования, решения уравнений



Р и с. Структурная схема этапов научной деятельности.

и др.). После интерпретации результатов в рамках выбранной модели следует этап обсуждения, в котором выявляется соответствие результатов поставленной задаче. Заключаящим этапом является документирование результатов цикла.

Представленная структурная схема упрощена с точки зрения множества альтернативных вариантов исхода эксперимента, интер-

претации результатов и в конце концов изменения самой задачи [11]. Схема нас интересует не в плане альтернативных чередований этапов (ветвлений), а в плане состава основных этапов.

В каждом этапе научной деятельности можно выделить познавательные и обеспечивающие действия. Перечень действий по этапам представлен в табл.1. Критерием разделения действий на познавательные и обеспечивающие является однозначность исхода (результата) действия, или (что равноценно) присутствие или отсутствие творческого момента.

Выделим из всех обеспечивающих действий те, компьютеризация которых возможна уже сегодня или в недалеком будущем [3,12-16]. Примерный список этих действий и соответствующих программных средств представлен в табл.2. Упомянутые в табл.2 действия можно называть типовыми задачами, решение которых целесообразно с помощью компьютерной техники (с соответствующим программным обеспечением).

Учитывая то, что научная работа имеет поисковый характер и требования к средствам ее осуществления стандартизации полностью не поддаются, специалист должен уметь сам создавать необходимый программный продукт или настраивать (адаптировать) стандартный [17,18]. Следует отметить, что выделенные типовые задачи инвариантны практически для всех областей естественных наук, поскольку как сам алгоритм научной деятельности, так и упомянутые действия имеют много общих черт в физике, биологии, химии [19,25].

Таким образом, учитывая выделенные типовые действия (типовые задачи), проведем окончательную детализацию целей обучения в области ВТ. Молодой специалист после окончания университета по естественно-научной специальности должен уметь:

- 1) использовать базы данных для поиска фактографической информации,
- 2) использовать моделирующие программы для исследования математической модели явления или процесса,
- 3) использовать пакеты программ математической обработки экспериментальных данных,

Т а б л и ц а I

Перечень действий по этапам

Познавательные действия	Обеспечивающие действия
-------------------------	-------------------------

1-й этап: постановка задачи

Изучение литературы	Поиск литературы
Формулировка плана исследований	

2-й этап: выбор модели

Логический и интуитивный выбор модели	Проверка модели на граничные условия
---------------------------------------	--------------------------------------

3-й этап: подготовка эксперимента

Конструирование экспериментальной установки	Сборка экспериментальной установки
Составление плана эксперимента	Наладка экспериментальной установки

4-й этап: проведение эксперимента

Считывание данных с измерительных приборов и их регистрация  
Управление работой экспериментальной установки

5-й этап: обработка экспериментальных данных

Оценка достоверности и точности данных	Предварительная математическая обработка данных
	Сложная математическая обработка данных

6-й этап: интерпретация результатов в рамках модели

Определение вариантов интерпретации	Поиск литературы
Выбор наиболее точного варианта интерпретации	

7-й этап: обсуждение результатов (задача решена?)

Подготовка логических заключений	Оформление стендов, слайдов, рисунков
Дискуссия, обсуждение	
Принятие решения о результате	

8-й этап: документирование

Написание текста отчета, статьи	Оформление (печатание) текста, подготовка рисунков
---------------------------------	--

Т а б л и ц а 2

Примерная компьютеризация на будущее

Действие	Программа или пакет программ
Поиск литературы	База данных
Проверка модели на граничные условия	Моделирующая программа
Предварительная математическая обработка данных	Программа математической обработки массивов
Сложная математическая обработка данных	Программа математической обработки данных по сложным алгоритмам (приближения, итерации и т.д.)
Сбор данных с измерительных приборов и их регистрация	Программа обслуживания связи между измерительными приборами и компьютером и накопления данных
Управление работой экспериментальной установки	Программа обслуживания связи между компьютером и исполнительными устройствами (с логическими блоками)
Оформление текста, рисунков	Редактор текста, графический редактор

4) использовать программные системы сбора данных с измерительных приборов и управления экспериментом,

5) использовать программы-редакторы для работы с текстами, графическими изображениями,

6) составлять техническое задание на программу, составлять программы на языках высокого уровня и на уровне ассемблера.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Мячев А.Л. Технические и эксплуатационные характеристики персональных ЭВМ // Компьютерный всеобуч и повышение квалификации специалистов в свете решений январского (1987 г.) пленума ЦК КПСС: Материалы Всесоюзной научно-практической конференции, г. Брежнев. - М., 1987. - С.98-110.
2. Познавательные действия в современной науке / Под ред. Ю.А.Хорина и др. - Минск, 1987. - 200 с.
3. Психологические проблемы автоматизации научно-исследовательских работ. - М., 1987. - 240 с.
4. Лернер И.Я. Процесс обучения и его закономерности. - М., 1980. - 96 с.
5. Скоткин М.Н. Проблемы современной дидактики. - М., 1984. - 96 с.
6. Гердунский Б.С. Компьютеризация в сфере обучения: Проблемы и перспективы. - М., 1987. - 264 с.
7. Талызина Н.Ф., Печенюк Н.Г., Хихловский Л.Б. Пути разработки профиля специалиста. - Саратов, 1987, - 176 с.
8. Рахитов А.И. Философские проблемы науки. - М., 1977.
9. Герасимов И.Г. Структура научного исследования. Философский анализ познавательной деятельности в науке. - М., 1985.
10. Выставкин А.Н. Процесс научного исследования как объект автоматизации // Автоматизация экспериментальных исследований. - Горький, 1985. - С.4-47.
11. Верхотуров В.Н., Рубин А.Б. Автоматизация биофизических исследований. - М., 1988. - 200 с.
12. Заикин П.Н. Некоторые математические задачи автоматизированной обработки данных спектрометрических исследований // Материалы 2-й международной школы по автоматизации научн. исследований. Пущино, 1985 г. - Пущино, 1987. - С.56-67.
13. Бутдай Л.К., Филинов Е.Н. Основные направления развития прикладного программного обеспечения ПК // ЭВМ массового применения. - М., 1987. - С.8-19.
14. Перчук В.Л. Машинная графика и автоматизация научных исследований // Природа. - 1987, № 2. - С.50-61.



15. Бабанин Л.Н. Введение в вычислительные средства и программирование. - М., 1987. - 83 с.

16. Бонич М. Научное исследование и научная информация. - М., 1987. - 156 с.

17. Стригин А.Б. Об организации интеллектуального интерфейса между конечным пользователем и системой программирования измерительно-управляющей аппаратуры в АСНИ / X Всесоюзное совещание по проблемам управления. Алма-Ата, 1986: Тез. докладов, часть 2. - М., 1986. - С.439-440.

18. Малиновский Б.Н., Египко В.М., Горбунов С.К. Состояние и перспективы разработки и организации серийного выпуска автоматизированных проблемно-ориентированных лабораторий // Материалы 2-й международной школы по автоматизации научн. исследований. Пущино, 1985. - Пущино, 1987. - С.41-46.

19. Практическое руководство по физико-химическим методам анализа / Под ред. Алимарина И.П. - М., 1987. - 208 с.

20. Макаренко С.П., Саляев Р.К., Кобычева С.М., Труфанова З.А. Исследование влияния гидратации на структуру фосфатидилхолина методом ИК-спектроскопии с использованием математических методов обработки спектров // Спектроскопические методы исследования в физиологии и биохимии. - Л., 1987. - С.131-135.

21. Кочубей С.М., Федоренко Ю.П. Автоматизированный лазерный спектрофлуориметр // Спектроскопические методы исследования в физиологии и биохимии. - Л., 1987. - С.49-52.

22. Jung P.C. Computers Software Applications in Chemistry, - New York, 1986. - 253 p.

23. Хазов М.Ю. Диалоговая система анализа экспериментальных данных. Алгоритмы и программы // Инф.бюллетень. - 1987. - № 10. - С.14.

24. Рязанова А.В., Урбанцева Г.А., Яблонский О.П. Физико-химические методы анализа в биологии. - Ярославль, 1987. - 84 с.

25. Эберт К., Эдерер Х. Компьютеры. Применение в химии / Пер. с нем. - М., 1988. - 416 с.

Статья поступила 30 мая 1988 года.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

СПИГУЛИС Я.А. Волоконно-оптические датчики физических параметров: принципы построения и области применения.....	3
ЯНСОНС Я.Л. Практика измерения одноэлектронных характеристик фотоэлектронных умножителей.....	20
ТИБЕРГС Я.Э., ВЕЙНБЕРГ Ю.К., ЯНСОНС Я.Л., БАНГА А.Я., ТАРДЕНАК Э.Э. Комплект приборов статистического счета фотонов во времени.....	55
ПЛАУДИС А.Э., ЛИМЕЖ Г.К., ГЕНКИН А.М., КИСЕЛЕВ В.С. Генератор субнаносекундных световых импульсов для определения временных характеристик фотоприемников.....	70
ДЕДЗЕ И.А., ДЗЕНИС Я.Я., ПАКАЛИН А.Я. Система измерения кинетики затухания люминесценции на базе микроЭВМ типа БК-0010.....	83
ОРЛОВ Р.В., БРЮХОВЕЦКИЙ А.П. Использование многоканального фотоприемного устройства с микропроцессорным управлением для анализа импульсной засветки.....	93
КРУМИНЫШ А.П., ЯНСОН У.В., ПОЛЯКОВ Я.С., ШИФФЕРС Л.А. Система регистрации высокоапертурного спектрофлуориметра и спектрофосфориметра.....	100
ГРОСС У.А., СИЛИНЫШ Ю.А. Эксимерный лазер для импульсного фотолиза в ультрафиолетовой области спектра.....	110
ЗАУЛС В.А., КУНДЗИНЫШ М.А. Автоматизированная система для исследования нелинейно-оптических свойств материалов при использовании АИГ:Nd-лазера с активной синхронизацией мод	117
ЧТУНОВ Л.А., МЕШНИС А.О. Тракты сверхвысоких частот спектрометра электронного парамагнитного резонанса.....	131
ТРОКШ Я.С., ЭРНЕСТСОНС Г.А. Автоматизированная система измерений электронного парамагнитного резонанса на базе радиоспектрометра РЭ-1306 и микроЭВМ БК-0010.....	150
ЗАРИНЫШ М.Я., КАРКЛИНЫШ Д.Л. Система термуправления "SARKA" для азотных криостатов.....	161
АБОЛИНЫШ Я.Я., СТРАУМЕН Я.Я., ЗАРИНЫШ М.А., КУЛЕ Б.А. Методика и установка градуировки и поверки криогенных термометров для интервала температуры 2-300 К.....	167
СТРАУМЕН Я.Я., АБОЛИНЫШ Я.Я. Гелиевый криостат для исследования электрических свойств полупроводниковых приборов.....	180
АЗЕНС А.Я. Масс-спектрометрический анализ тонких пленок: количественное определение состава примесей.....	187
БОКАНС Я.Я. Цели подготовки студентов в области компьютеризированных систем физических исследований.....	192

РЕФЕРАТЫ

УДК 681.7.068.001.89

Спигулис Я.А. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ: ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ.

Дается обзор работ последних лет в области оптоэлектронных измерений физических параметров с применением волоконно-оптических датчиков. Анализируются схемы построения таких датчиков, температуры, давления, тока и других физических величин. Обсуждаются возможности применения волоконно-оптических датчиков в физических экспериментах и в контрольно-измерительной аппаратуре для нужд промышленности и медицины.

УДК 621.383.29

Янсонс Я.Л. ПРАКТИКА ИЗМЕРЕНИЯ ОДНОЭЛЕКТРОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ.

Рассматриваются практические приемы измерения статических и динамических одноэлектронных характеристик фотоумножителей. Показан способ оптимизации одноэлектронного режима работы для достижения максимального отношения сигнал/помеха. Анализируются источники импульсов помех и проявления динамических искажений сигнала фотоумножителей.

УДК 535.247.4

Тибергс Я.Э., Вейнберг Ю.К., Янсонс Я.Л., Банга А.Я., Гарденак Э.Э. КОМПЛЕКТ ПРИБОРОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО СЧЕТА ФОТОНОВ ВО ВРЕМЕНИ.

Рассматриваются принципы построения, технические характеристики и вопросы применения комплекта приборов для создания фотонно-счетных систем кинетических измерений, включающего селектор одноэлектронных импульсов с точной временной привязкой ( $\pm 0,1$  нс), многоканальный регистратор временных распределений импульсов (256 каналов с минимальной шириной 10 нс) и преобразователь интервалов времени (коэффициент трансформации 10 и 40). Встроенная в регистратор микропроцессорная система позволяет адаптировать программу управления для конкретных измерений.

УДК 621.32:621.382.2:621.373.54

Плаудис А.Э., Лимеж Г.К., Гейкин А.М., Киселев В.С.  
ГЕНЕРАТОР СУБНАНОСЕКУНДНЫХ СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПРИЕМНИКОВ.

Описан простой генератор коротких световых импульсов, разработанный на основе карбид-кремниевый светодиода и обеспечивающий в спектральном диапазоне от 250 до 1000 нм генерацию импульсов длительностью на уровне 0,5 меньше 1 нс, а на уровне 0,001 не более 2 нс, с управляемым запуском частотой до 100 кГц. Даны электрофизические и конструктивные характеристики применяемых светодиодов и схемотехническое построение источника импульсного питания для них.

УДК 681.3.08:001.891:535.24

Дедаев И.А., Дзенис Я.Я., Пакалин А.Я. СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ КИНЕТИКИ ЗАТУХАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НА БАЗЕ МИКРОЭВМ ТИПА БК-0010.

Рассматриваются вопросы по созданию на базе микроЭВМ "Электроника" БК-0010 и стандартных приборов систем измерения кинетики люминесценции. Программное обеспечение позволяет такую системную установку использовать для осуществления измерений в тодом многоканального усреднения или методом корреляции одиночного фотона.

УДК 681.596:621.38

Орлов Р.В., Бреховецкий А.П. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОГО ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА С МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ АНАЛИЗА ИМПУЛЬСНОЙ ЗАСВЕТКИ.

Описывается применение фотодиодной матрицы МФ-14А, встроенной в фотоприемное устройство с микропроцессорным управлением для анализа результатов импульсной засветки. Разработанные алгоритмы и программы позволяют быстро определять координаты центра тяжести пятна засветки, тем самым частота смены кадра может быть доведена до 50 Гц.

УДК 535.247.4:621.383

Круминьш А.П., Янсон У.В., Поляков Я.С., Шифферс Л.А. СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ВЫСОКОАПЕРТУРНОГО СПЕКТРОФЛУОРИМЕТРА И СПЕКТРОФОСФОРИМЕТРА.

Рассматривается принцип работы и построение системы регистрации высокоапертурного спектрофлуориметра и спектрофосфориметра, позволяющей регистрировать исправленные спектры флуоресценции и фосфоресценции, а также кинетики затухания фосфоресценции методом одноэлектронного счета фотонов. Приведена структурная схема системы регистрации и принципиальная электрическая схема программируемого счетчика импульсов.

УДК 621.373.8

Гросс У.А., Силиньш Ю.А. ЭКСИМЕРНЫЙ ЛАЗЕР ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ФОТОЛИЗА В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА.

Рассматривается работа, а также устройство электроразрядного эксимерного лазера. Обсуждаются преимущества лазера для исследований по импульсному фотолизу молекул. Конструкция лазера позволяет получить мощные световые импульсы генерации на молекулах галогенидов инертных газов: XeF 352 нм, XeCl - 308 нм, XeBr - 282 нм, KrF - 248 нм, KrCl - 222 нм, ArF - 193 нм и на молекулах N<sub>2</sub> - 337 нм.

УДК 535.681.142

Зауле В.А., Кундзиньш М.А. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АИГ:Nd -ЛАЗЕРА С АКТИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД.

Рассматривается автоматизированная установка, созданная на базе непрерывно накачиваемого лазера с активной синхронизацией мод и применяемая для нелинейно-оптических исследований. В установке используются серийно выпускаемые приборы. Аппаратура характеризуется доступностью и воспроизводимостью, поэтому может быть рекомендована для решения широкого круга задач нелинейной спектроскопии конденсированных сред.

УДК 539.263:621.317.7

Чугунов Л.А., Меднис А.О. ТРАКТЫ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ СПЕКТРОМЕТРА ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА.

Обсуждаются специфические требования к экспериментальной аппаратуре для ЭИР-спектроскопии неупорядоченных твердых тел, в частности возможность проведения измерений на нескольких достаточно отличающихся частотах. Рассматриваются возможности построения ЭИР-спектрометра для интервала от 1 до 20 ГГц. Анализируются достижимые параметры чувствительности и широкополосности для поглощающих ячеек в виде резонатора и спирали в зависимости от структурной схемы спектрометра. Отмечаются недостатки, возникающие с применением автоматической подстройки частоты, предлагается структурная схема и методика настройки спектрометра без такой подстройки частоты, что было использовано при конструировании СВЧ-тракта многочастотного ЭИР-спектрометра. Для частот ниже 5 ГГц рекомендуется применять замедляющие системы, такие как спирали, на более высоких частотах - резонаторы. Экспериментальное опробование СВЧ-тракта показало, что в трехсантиметровом диапазоне чувствительность равна  $\sim 10^{12}$  спин/Гс, а в шести- и полторасантиметровом диапазонах  $\sim 5 \cdot 10^{13}$  спин/Гс.

УДК 638.955:581.3

Трохш Я.С., Эрнестсонс Г.А. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА НА БАЗЕ РАДИСПЕКТРОМЕТРА РЭ-1306 И МИКРОЭВМ БК-0010.

Описывается автоматизированная система ЭПР-измерений на базе серийного спектрометра РЭ-1306 и персональной микроЭВМ "Электроника" БК-0010. В системе использованы цифровые измерительные приборы, не имеющие встроенных интерфейсов. Решена задача автоматического контроля магнитной индукции посредством измерителя ШИ-1. Обсуждается принцип работы управляющей программы и рассматриваются примеры полученных с помощью системы данных.

УДК 536.58

Зариньш М.Я., Карклиньш Д.Л. СИСТЕМА ТЕРМОУПРАВЛЕНИЯ "SARMA" ДЛЯ АЗОТНЫХ КРИСТАТОВ.

Дается описание нового варианта терморегулятора и цифрового термометра, объединенных в систему для локального и дистанционного управления температурой образца в азотном кристате. Приводятся технические характеристики. Локальное управление реализуется встроенным микропроцессорным контроллером, что повышает точность терморегулирования.

УДК 536.531:536.6

Аболиньш Я.Я., Страумен Я.Я., Зариньш М.А., Куле Б.А. МЕТОДИКА И УСТАНОВКА ГРАДУИРОВКИ И ПОВЕРКИ КРИОГЕННЫХ ТЕРМОМЕТРОВ ДЛЯ ИНТЕРВАЛА ТЕМПЕРАТУРЫ 2-300 К.

Описана низкотемпературная лабораторная установка градуировки и поверки криогенных термопреобразователей сопротивления и термоэлектрических термометров, которая воспроизводит любую температуру в интервале 2-300 К с точностью  $\pm 0,01$  К в течение 30 минут. Главное звено установки - адиабатический криостат, имеющий вакуумные камеры двух исполнений. Для нормального функционирования криостата предусмотрены система регулирования давления и автоматический терморегулятор. Для обеспечения температурного интервала 2-300 К необходимы два криоагента: жидкий гелий и жидкий азот. Градуировка и поверка криогенных термометров осуществляется методом сравнения показаний рабочих термометров с показаниями образцового термометра сопротивления. Чтобы обеспечить непрерывную работу 10 часов одноразовой заливкой с получением промежуточных температур от 80 до 300 К, необходимо затратить 7 литров жидкого азота. Для непрерывной работы 12 часов одноразовой заливкой с получением промежуточных температур от 2,3 до 46 К необходимо затратить 5,5 литров жидкого гелия. Время заохлаживания от комнатной до азотной температуры 2 часа. Время заохлаживания от азотной до гелиевой температуры 1 час.

УДК 536.531

**Страумен Я.Я., Аболиньш Я.Я. ГЕЛИЕВЫЙ КРИСТАТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ.**

Рассматриваются принципы построения и конструкция проточного гелиевого кристата для интервала температуры от 3,5 до 300 К. Кристат предназначен для электрических испытаний полупроводниковых приборов. Показаны преимущества проточной схемы кристата по отношению к вакуумной для испытаний тепловыделяющих образцов. В совокупности с терморегулятором и системой прокачки паров гелия кристат обеспечивает точность поддержания температуры не хуже  $\pm 0,1$  К во всем интервале рабочей температуры. Средний расход - не более 0,5 литров жидкого гелия в час.

УДК 621.384.8

**Азенс А.Я. МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОНКИХ ПЛЕНОК: КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ПРИМЕСЕЙ.**

Описывается метод количественного определения состава примесей в тонких пленках при термическом испарении исследуемого образца с последующей ионизацией продуктов испарения электронным ударом. Калибровка масс-спектрометра осуществляется с помощью эталона.

УДК 378.14.001.85:681.3:001.891

**Боканс Я.Я. ЦЕЛИ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ В ОБЛАСТИ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ.**

Массовое применение микроЭВМ в системах физических исследований требует массового обучения будущих пользователей этих систем. Обсуждаются вопросы обучения в области вычислительной техники студентов естественно-научных специальностей университета на примере подготовки физиков-экспериментаторов. Применяя в качестве инструментария метод "типовых задач", выделено шесть основных целей обучения студентов в области вычислительной техники.

## МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сборник научных трудов

Рецензенты: У.Крауя, ст.науч.сотр. ИМП АН ЛатвССР  
канд.техн.наук;

Я.Клява, зав.кафедрой физической  
электроники ЛатвГУ, д-р  
физ.-мат.наук;

Я.Озолс, ст.преподаватель каф.фи-  
зической электроники ЛатвГУ;

А.Убельс, зав.лабораторией НИЧ ЛатвГУ,  
канд.физ.-мат.наук.

Редакторы Я.Янсонс, В.Полмане

Техн.редактор М.Дреймане

Корректор Т.Гадеева

---

Подписано к печати 16.10.1989. ЛТ 07470 Ф/б 60x84/16.  
Бумага М1.13,3 физ.печ.л. 12,4 усл.печ.л. 10,3 уч.изд.л.  
Тираж 500 экз. Зак. № 49/ Цена 2 р.10 к.

---

Латвийский государственный университет им. П.Стучки  
226038 Рига, б. Райниса, 19

Отпечатано на ротационной машине, 226050 Рига, ул.Вейденбаума,5  
Латвийский государственный университет им. П.Стучки



LU bibliotēka



958026299

533

90

90

2 p. 10 k.

A-89

1154