

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ  
И АСТРОНОМИИ АН СССР СОВМЕСТНО С НАУЧНЫМ СОВЕТОМ  
АН СССР ПО ФИЗИКЕ И ХИМИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ  
И ОТДЕЛЕНИЕМ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ АН СССР  
(24—25 мая 1972 г.)**

24 и 25 мая 1972 г. в конференц-зале Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии АН СССР совместно с Научным советом АН СССР по физике и химии полупроводников и Отделением ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

1. Ж. И. Алфёров, Полупроводниковые приборы с гетеропереходами.
2. В. С. Вавилов, Е. А. Конорова. Полупроводниковые алмазы.
3. Л. Н. Курбатов. Фотоэлектрические полупроводниковые приемники и новые методы приема излучения оптического диапазона.
4. С. М. Рывкин. Полупроводниковые счетчики ядерных излучений.
5. В. Л. Гинзбург. Гамма-астрономия и космические лучи \*).
6. Н. А. Добротин, В. М. Максименко, Ю. А. Смородин, С. А. Славатинский. О состоянии и перспективах изучения взаимодействий частиц при сверхвысоких энергиях.

Ниже публикуется краткое содержание некоторых докладов.

**Ж. И. Алфёров.** Полупроводниковые приборы с гетеропереходами. Последние два десятилетия развитие физических исследований в полупроводниках в значительной степени, а развитие полупроводниковой электро-

---

\*) Расширенный текст доклада В. Л. Гинзбурга опубликован в УФН 108, 273 (1972).

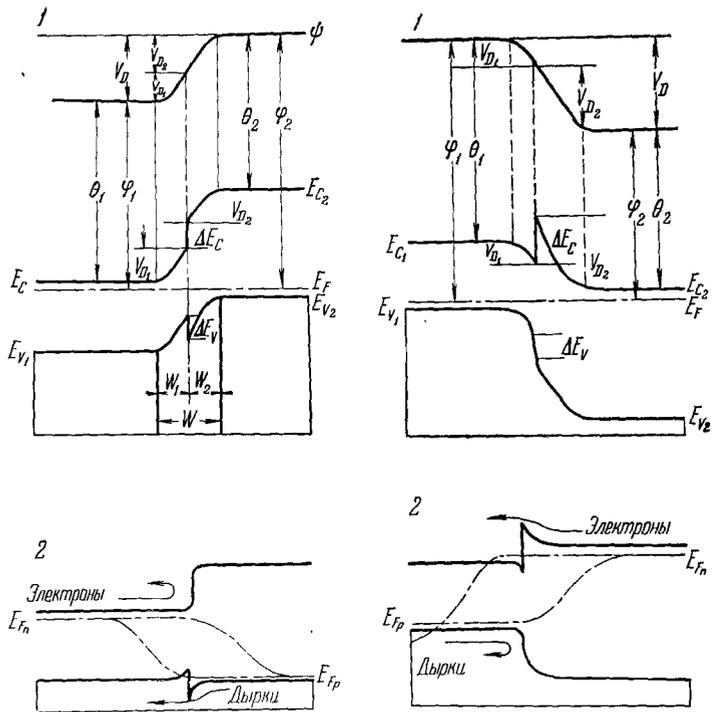


Рис. 1.  $p-n$ -гетеропереход (слева) в тепловом равновесии (1) и с приложенным напряжением в пропускном направлении (2).  $V_D$  — контактный потенциал;  $W$  — ширина области объемного заряда;  $\theta$  — электронное сродство;  $\phi$  — работа выхода;  $\Delta E_C$  и  $\Delta E_V$  — разрывы в зоне проводимости и валентной зоне. Справа  $n-p$ -гетеропереход ( $n$ -часть широкозонная).

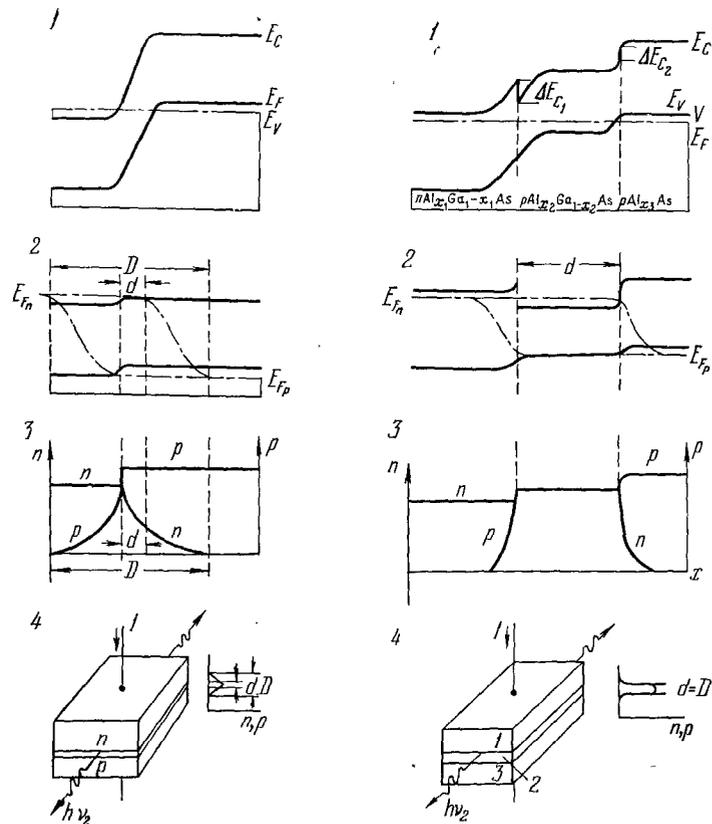


Рис. 2. Инжекционный лазер с  $p-n$ -переходом (слева) и гетеролазер (справа).

1—2 — энергетические диаграммы в тепловом равновесии и с приложенным смещением в пропускном направлении; 3 — распределение плотностей носителей тока;  $d$  — толщина активной области,  $D$  — области рекомбинации.

ники — почти полностью было связано с использованием  $p-n$ -переходов (гомо- $p-n$ -переходов) и основывалось на возможности контролируемого введения в кристалл полупроводника различных примесей. Разработка методов получения и очистки новых материалов и исследование их свойств (после германия, кремния, а затем и соединений  $A^{III}B^V$ ) создавала новые возможности по улучшению параметров уже известных приборов (диоды, транзисторы, фотоэлементы) и реализации новых (тиристоры, лазеры, светодиоды). Однако основным их элементом и важным инструментом исследования свойств оставался традиционный гомо- $p-n$ -переход.

Успехи в технике эпитаксиального выращивания полупроводниковых кристаллов позволили около 10 лет назад перейти к систематическому исследованию монокристаллических гетеропереходов в полупроводниках, т. е. контактов двух различных по химическому составу полупроводников, осуществленных в одном монокристалле. Появилась возможность управления внутри структуры прибора шириной запрещенной зоны и другими фундаментальными свойствами. Применение гетеропереходов позволяет существенно улучшить основные параметры большинства полупроводниковых приборов, а в ряде случаев и создавать совершенно новые. Однако для практического использования гетеропереходов необходимо было создать гетеропереходы, близкие по свойствам к идеальным, граница раздела которых свободна от ничтожных концентраций дефектов, вредных примесей и т. п., и доказать возможность их применения в полупроводниковых приборах. Решению этих задач были посвящены исследования сектора контактных явлений в полупроводниках ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР в течение последнего десятилетия; результаты этих исследований кратко излагаются в настоящем докладе.

В идеальном гетеропереходе благодаря наличию дополнительных потенциальных барьеров для электронов и дырок (рис. 1) можно по-новому управлять инжекцией неравновесных носителей тока — явлением, лежащим в основе работы большинства приборов. Так, в случае, изображенном на рисунке, имеет место односторонняя инжекция носителей заряда из широкозонного полупроводника в узкозонный, а при достаточно больших смещениях в пропускном направлении концентрация инжектированных носителей должна превышать их равновесную концентрацию в широкозонном эмиттере. Эта особенность инжекции в гетеропереходе («эффект суперинжекции») делает его уникальным по эффективности эмиттером, особенно перспективным для лазерных и электролюминесцентных диодов.

Реализация идеального гетероперехода потребовала как удачного подбора пары контактирующих материалов, удовлетворяющих многим условиям взаимной «совместимости» по механическим, кристаллохимическим, тепловым свойствам, кристаллической и электронной структуре, так и разработки метода изготовления гетеропереходов и приборов на их основе. Такими «идеальными партнерами» оказались арсенид галлия — один из важнейших современных полупроводниковых материалов — и арсенид алюминия, а универсальным методом получения — жидкостная эпитаксия.

Среди различных новых приборов одним из удачных примеров реализации преимуществ гетеропереходов является гетеролазер (рис. 2). Инверсная населенность в гетеролазере достигается благодаря «эффекту суперинжекции» чисто инжекционным способом без необходимости использования высокого уровня легирования и вырожденных  $p-n$ -переходов. Благодаря потенциальным барьерам и волноводной симметрии структуры ( $n_2 > n_1$  и  $n_3$ ) рекомбинационные и световые потери практически отсутствуют, вследствие чего резко снижены пороговые токи генерации и повышен к.п.д. (при  $300^\circ\text{K}$   $j_{\text{пор}} \approx 10^3 \text{ а/см}^2$ , дифференциальный квантовый выход  $\eta_d \approx 70\%$ , к.п.д.  $\eta = 25\%$  вместо  $j_{\text{пор}} \approx 50 \cdot 10^3 \text{ а/см}^2$ ,  $\eta_d \approx 10-15\%$  и  $\eta = 1-2\%$  у лазеров с  $p-n$ -переходами). Существенно улучшены рабочие параметры и ряда других приборов (солнечные преобразователи, светодиоды, фототранзисторы, переключающие диоды), созданы и совершенно новые приборы, реализация которых на гомо- $p-n$ -переходе была невозможна: преобразователи инфракрасного излучения в видимое, селективные фотоприемники и др. Спектральный диапазон излучательных и фотоэлектрических приборов может быть значительно расширен как в видимую, так и в инфракрасную область, так как в настоящее время показана возможность создания идеальных гетеропереходов и на основе других соединений  $A^{III}B^V$  (AlSb — GaSb, AlP — GaP и некоторые другие).

#### ЛИТЕРАТУРА

Ж. И. А л ф ё р о в, Инжекционные гетеролазеры, сб. «Полупроводниковые приборы и их применение», вып. 25, М., «Сов. радио», 1971; Zh. A l f e r o v, Proc. of the Intern. Conference on Heterojunctions (Budapest, October 1970), v. 2, Budapest, Académiai Kiadó, 1971; Sov. Sci. Rev. 2, 147 (1971).

В. С. Вавилов, Е. А. Конорова. Полупроводниковые алмазы. Алмаз — один из наиболее простых по структуре и интересных по физическим свойствам неметаллических кристаллов. Высокая теплопроводность, химическая и терми-

ческая стабильность алмаза, как и большая подвижность носителей заряда — электронов и дырок<sup>1</sup>, делают создание, изучение и практическое применение полупроводниковых алмазов актуальной проблемой. Успехи в синтезе изолирующих и полупроводниковых алмазов в лабораторных условиях<sup>2, 3</sup> и развитие добычи природных алмазов позволяют считать, что в ближайшем десятилетии, помимо традиционных технических применений, алмаз станет ценным материалом и в электронике. Исследование возможностей ионного внедрения электрически активных донорных (литий, фосфор, сурьма) и акцепторных (бор) примесей в пластинки природных алмазов, проведенное в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР совместно с Институтом атомной энергии им. И. В. Курчатова<sup>4, 5</sup>, привело к созданию устойчивых, вплоть до температуры 1400 °С, полупроводниковых слоев *n*- и *p*-типа с высокими подвижностями носителей.

В ходе упомянутых исследований было установлено, что при дозах внедренных ионов, не превышающих определенных критических значений, отжиг приводит к восстановлению структуры алмазной решетки. Показано, что методом ионного внедрения удается создавать *p* — *n*-переходы, обладающие диодными вольт-амперными характеристиками и обнаруживающими вентильный фотоэффект в спектральной области, соответствующей междузонным электронным переходам в алмазе ( $h\nu > 5,4 \text{ эВ}$ )<sup>6</sup>. Установлено, что при увеличении концентрации внедренной примеси (в частности, бора и сурьмы) проводимость, осуществляемая в зоне проводимости или валентной зоне, сменяется проводимостью «прыжкового» типа. Методом ионного внедрения удается осуществлять как структуры, состоящие из полупроводниковых слоев *n*- или *p*-типа на поверхности или внутри изолирующей алмазной пластинки, так и гетерогенные структуры, в частности — слои карбида кремния SiC, внедренные в алмаз<sup>7</sup>.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание контактов низкого сопротивления на полупроводниковых алмазах *n*-типа и исследование электронных процессов вблизи поверхности полупроводниковых алмазов, после чего, в принципе, могут быть осуществлены электронные приборы, отличающиеся возможностью работы при высоких температурах и стабильностью. Примером электронного прибора на основе алмаза, уже нашедшего практическое применение, могут быть разработанные в ФИАНе детекторы ядерных частиц и квантов<sup>8</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. The Physical Properties of Diamonds, ed. by R. Berman, Oxford Press, 1965.
2. C. Luggins, P. Cannon, Nature 194, 829 (1962).
3. Л. Ф. Верещагин и др., ДАН СССР 192, 1015 (1970).
4. В. С. Вавилов, М. А. Лукасян, М. И. Гусева, Е. А. Конорова, ФТП 6, 858 (1972).
5. В. С. Вавилов, М. И. Гусева, Е. А. Конорова, В. Ф. Сергиенко *ibid* 4, 17 (1970).
6. В. С. Вавилов, М. А. Лукасян, Е. А. Конорова, В. Ф. Сергиенко ДАН СССР 200, 821 (1971).
7. И. П. Акимченко и др., ФТП 6, 1182 (1972) (краткое сообщение).
8. С. Ф. Козлов, Е. А. Конорова, ФТП 4, 1865 (1970).

**Л. Н. Курбатов.** Фотоэлектрические полупроводниковые приемники и новые методы приема излучения оптического диапазона. Развитие приборостроения и разработок оптико-электронных систем привели за последнее десятилетие к быстрому росту интереса к приему излучения оптического диапазона. Значительный толчок исследованиям и разработкам приемников дала квантовая электроника, достижения которой позволили получать мощные потоки излучения с высокой степенью когерентности. Специфика когерентного излучения дала возможность перенести в оптический диапазон некоторые принципы приема, давно известные в радиотехнике, в частности — гетеродинный прием.

Еще одно обстоятельство, связанное с появлением лазеров, состоит в необходимости расширения полосы частот, т. е. создания приемников с высоким быстродействием.

Приемникам излучения посвящена обширная литература, в том числе обзорная. Однако темпы развития этой области настолько велики, что постановка специального доклада на сессии ООФА АН СССР представляется оправданной. Не имея возможности рассмотреть в докладе все виды приемников, мы ограничимся только кругом вопросов, названных в заглавии.

В 1973 г. исполнится 100 лет со времени открытия фотопроводимости Смитом. Последние 30 лет были особенно продуктивными. За это время основные полупроводниковые фотоэлектрические приборы — фотосопротивления (фоторезисторы) и фотодиоды — прошли путь от фундаментальных исследований до серийного производства и применения в ответственных устройствах.

Большой вклад в развитие исследований и разработок был внесен учеными, работающими в институтах Академии наук (Физико-технический институт, Физический институт, Институт радиотехники и электроники, Институт полупроводников Украинской Академии наук). Исследованиями и разработками был охвачен весь оптический диапазон, включая субмиллиметровую область. Перекрытие оптического и радиодиапазонов в субмиллиметровой области способствовало взаимному проникновению идей и методов, присущих каждому из диапазонов.

К основным тенденциям развития фотоэлектрических полупроводниковых приемников (ФПП) за последние годы можно отнести следующее:

1) Продолжалось освоение широкого ассортимента полупроводниковых материалов, обеспечивающих прием во всем оптическом диапазоне (германий и кремний с различными примесями, соединения  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^VI$ ,  $A^{IV}B^VI$ , тройные системы). Некоторые из этих материалов доведены до высокой степени совершенства. На их основе созданы многочисленные виды ФПП, как неохлаждаемых, так и требующих охлаждения до низких температур, включая гелиевые. Наиболее важным за последние 5 лет было создание ФПП для области около  $10 \text{ мкм}$  на основе тройных систем. Наряду с хорошими фотоэлектрическими свойствами эти ФПП выгодно отличаются от ранее известных отсутствием необходимости в охлаждении до температур ниже жидкого азота.

2) Наличие хороших материалов и успехи технологии позволили в ряде случаев довести минимальную регистрируемую мощность до значений, близких к предельным, определяемым флуктуациями излучения (радиационный порог).

3) С конструктивной точки зрения ФПП становятся комплексными устройствами, включающими, кроме чувствительных элементов, оптические элементы из ряда необычных материалов (окна, линзы, фильтры, растры, световоды), микрохолодильники и микросъемные преусилители. Это, разумеется, не означает, что простейшие ФПП теряют значение. Напротив, они полностью сохраняют его в определенных областях применения.

4) Прогресс в области материалов и методов микроэлектроники позволил разработать многоэлементные ФПП с числом мелких элементов порядка десятков и сотен. Эта тенденция в дальнейшем приведет к переходу от функций ФПП как регистратора и измерителя мощности излучения к функции преобразования изображения из одной спектральной области в другую.

Возникновение многоэлементных структур ФПП дает нам основание говорить о новом направлении полупроводниковой электроники, а именно, о микрофотоэлектронике.

5) Все больший интерес проявляется к быстродействующим ФПП с постоянной времени в области наносекундного и субнаносекундного диапазонов. Наиболее интересными в этом отношении представляются фотодиоды, в частности лавинные.

(Несколько диапозитивов и небольшая выставка дают представление о внешнем виде и конструкции некоторых типов ФПП, микрохолодильников и преусилителей.)

Обычное использование ФПП, когда электрический сигнал снимается с нагрузочного сопротивления в цепи облучаемого чувствительного элемента, в радиотехнических терминах можно назвать прямым детектированием. В наименее благоприятной области около  $10 \text{ мкм}$  прямое детектирование позволяет регистрировать минимальную мощность около  $10^{-11} \text{ вт} \cdot \text{см}^{-2}$  при площади чувствительного элемента  $1 \text{ мм}^2$ . Новые методы, рассматриваемые ниже, позволяют получить значительно лучшие результаты. Это относится в первую очередь к гетеродинному приему и оптическому усилению на основе стимулированного излучения.

1. Г е т е р о д и н н ы й ( г о м о д и н н ы й ) п р и е м. Оптическое смешение на ФПП когерентного излучения сигнала и местного генератора позволяет получить сигнал промежуточной частоты с мощностью, увеличенной по отношению к случаю прямого детектирования пропорционально отношению мощностей от местного генератора и сигнала. Это дает возможность повысить отношение сигнал/шум на несколько порядков и снизить минимальную регистрируемую мощность.

Основной вывод из элементарного анализа работы ФПП в гетеродинном приемном устройстве состоит в принципиальной возможности регистрации 1—2 квантов в единичной полосе частот, если квантовая эффективность равна 1. В отличие от случая прямого детектирования пересчет к произвольной полосе частот производится по линейному закону.

В ряде работ, в том числе и в нашей (Н. Ш. Хайкин, Б. В. Юрист), реально достигнуты пороги около  $10^{-19} \text{ вт} \cdot \text{см}^{-2}$  (энергия кванта около  $10^{-20} \text{ дж}$ ).

С конструктивной точки зрения гетеродинное фотополупроводниковое устройство (ФПУ) представляет собой аналог интерферометра Майкельсона. В ФПУ использован ФПП с чувствительным элементом из системы теллурид кадмия — теллурид ртути. Охлаждение осуществляется малогабаритной газовой холодильной машиной.

2. О п т и ч е с к и й к в а н т о в ы й у с и л и т е л ь (ОКУ). Явление стимулированного излучения дает возможность существенного усиления сигнала на длинах волн 3,39, 3,51 и 5,57  $\text{мкм}$ . Пропуская слабый оптический сигнал через газо-

разрядную трубку с активной средой, можно получить усиление на названных длинах волн в десятки дБ. В реальном усилителе с длиной 50 см, исследованном в работах И. П. Мазанько и Е. П. Кузнецова, можно получить усиление 50 дБ при полосе частот 100 Мгц. Шумы, вносимые усилителем, незначительны. Поэтому ОКУ позволяет существенно снизить минимальную регистрируемую мощность хорошо коллимированного пучка (примерно в такое число раз, каково усиление). При усилении расходящихся пучков положение оказывается менее благоприятным вследствие загрузки приемника спонтанным излучением ОКУ.

3. Приемник с микроантенной. А. Джавап показал, что ИК излучение можно регистрировать с помощью микроантенны и точечного контакта металл — окись — металл. Такой приемник оказывается прямым аналогом СВЧ детектора. Достоинством приемника является отсутствие необходимости в охлаждении и исключительно быстрый ответ (порядка  $10^{-13}$  сек). Вольт-амперная характеристика контакта была вычислена в совместной работе Г. Д. Лобова и американских соавторов. Пороговая мощность была найдена А. А. Друговой расчетным путем. В гетеродинном она режиме составляет  $10^{-14}$  вт·гц<sup>-1</sup> в согласии с экспериментальными результатами Р. Абрамса. Недостатками приемника с микроантенной являются крайняя нестабильность контакта и малая величина чувствительной площади (порядка длины волны). Эти обстоятельства пока позволили применить приемник с микроантенной только в уникальных физических экспериментах.

4. Неконтактный преобразователь модулированного оптического сигнала в сигнал СВЧ («СВЧ смещение»). Идея метода «СВЧ смещения» была предложена и реализована нами в 1957 г. Она состоит в измерении дополнительного поглощения микроволновой мощности при взаимодействии с неравновесными носителями заряда в полупроводнике, возбуждаемыми излучением оптического диапазона или иным способом. Полупроводник при этом рассматривается как диэлектрик с потерями, модулируемыми оптическим излучением. В работах П. В. Зарубина и Ф. И. Бакуи и в большом числе американских работ было применено несколько видов СВЧ устройств. Для наиболее широкополосного приема предпочтительна схема с гребневым волноводом. При наличии пикошумящих усилителей СВЧ (типа охлаждаемых параметрических) схема сможет реализовать время ответа  $5 \cdot 10^{-11}$  сек.

Опыт использования метода СВЧ смещения показал, что его преимущества по сравнению с обычной схемой на постоянном токе проявляются только при очень широких полосах частот (порядка 1 Ггц).

Некоторым достоинством следует признать также возможность применения материалов со сколь угодно большим удельным сопротивлением (например, германия с примесями при гелиевых температурах). Очевидный недостаток связан со сложностью аппаратуры и громоздкостью устройства. Однако использование современной техники микрополосковых линий и диодов Ганна в качестве источника СВЧ позволяет ослабить этот недостаток.

**С. М. Рывкин.** Полупроводниковые счетчики ядерных излучений. Полупроводники, внесшие крупный вклад в развитие ряда важных областей техники, в последнее десятилетие успешно внедряются в новую для себя область экспериментальной ядерной физики, где они выступают в качестве высокоэффективных и прецизионных счетчиков — спектрометров ядерных частиц и фотонов.

В твердых ионизационных камерах на основе полупроводниковых  $n-i-p$  структур удается реализовать основные преимущества твердого тела: высокую эффективность (связанную с большой плотностью вещества), относительно большой заряд, освобождаемый при ионизации (за счет малой энергии образования пары электрон — дырка), очень высокую разрешающую способность по энергии, определяемую лишь неустраняемыми флуктуациями процесса ионизации (за счет практически полного собирания заряда, созданного ионизующей частицей, т. е. исключения структурно-чувствительных процессов рекомбинации).

В докладе на основе рассмотрения основных механизмов действия полупроводниковых детекторов (ППД) подробно анализируются специфические полупроводниковые проблемы реализации твердых ионизационных камер с высокой разрешающей способностью. Объясняются причины недостаточной разрешающей способности диэлектрических и полупроводниковых «гомогенных» кристаллических счетчиков.

Анализ показывает, что для устранения эффектов поляризации счетчика и потерь заряда, связанных с захватом и рекомбинацией носителей тока, необходимо использовать материал очень высокой степени чистоты (не более чем  $10^{11}$ — $10^{12}$  примесных центров в  $1 \text{ см}^3$ ) и однородности. Таким образом, уровень требований к материалам для ППД значительно более высок, чем это имеет место для других применений полупроводников.

В Советском Союзе на основе отечественного сырья получен материал (германий и кремний) необходимого качества и организован серийный выпуск ППД нескольких наиболее важных типов, в том числе ППД больших объемов, на основе германия, леги-

рованного литием, и германиевых ППД, стабильных при комнатной температуре (т. е. не требующих хранения при температуре жидкого азота), полученных методом «холодного легирования» (создание рабочей зоны счетчика за счет компенсации материала радиационными дефектами).

На рис. 1 и 2 представлены примеры спектров, полученных с помощью этих детекторов, демонстрирующие их высокую разрешающую способность.

Использование ППД позволяет уже сейчас решать важные научные и технические задачи, среди которых следует назвать синтез ряда трансурановых элементов, исследование структуры ядер методами их кулоновского возбуждения, изучение на спутниках радиационных поясов Земли и солнечного ветра, нейтронно-активационный

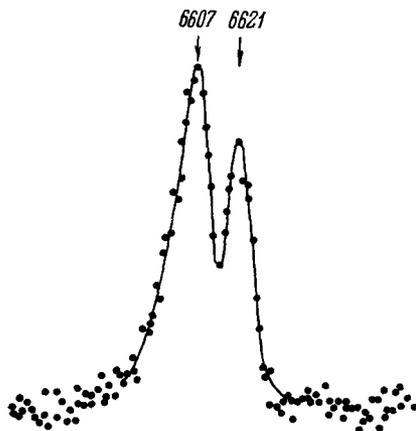


Рис. 1. Спектр  $\gamma$ -излучения уровня 7,640 Мэв изотопа  $Fe^{57}$ , снятый с помощью коаксиального германий-литиевого детектора объемом 25 см<sup>3</sup> (регистрировались пики «двойного убегания»).

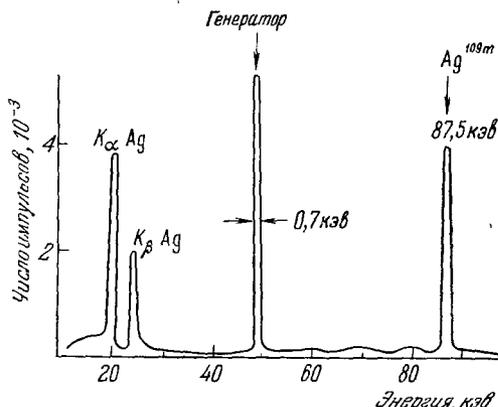


Рис. 2. Спектр рентгеновского излучения серебра, снятый с помощью германиевого детектора радиационного типа (использовался радиоизотопный источник  $Cd^{109}$ ).

анализ руд, использование ППД для создания бескристалльных рентгеновских спектрометров и т. п.

Дальнейшее развитие этого нового класса полупроводниковых приборов должно, наряду с совершенствованием ППД, выпускаемых серийно, предусматривать:

а) разработку отечественной технологии получения сверхчистого германия с концентрацией мелких доноров  $\sim 10^{10}$  см<sup>-3</sup>, что позволит создать на основе метода «холодного легирования» германиевые ППД, стабильные при комнатной температуре и с объемами, не уступающими германий-литиевым детекторам;

б) использование новых материалов (например, теллурида кадмия), что должно позволить создать эффективные спектрометры, не требующие охлаждения и, следовательно, пригодные для еще многих «массовых» областей технического использования.

#### ЛИТЕРАТУРА

- С. М. Рывкин, ДАН СССР 106, 250 (1956). — А. В. Айрапетянц, С. М. Рывкин, ЖТФ 27, 95 (1957). — С. М. Рывкин, О. А. Матвеев, Н. Б. Строкан, А. Х. Хусаинов, ЖТФ 34, 1535 (1964). — С. М. Рывкин, О. А. Матвеев, Н. В. Строкан, Полупроводниковые счетчики ядерных частиц, Л., ЛДНТИ (общ-во «Знание»), 1963. — S. M. Ryvkin, D. A. Gaganov, A. N. Zhukovskiy, N. I. Komyak, R. I. Plotnikov, N. B. Strokan, A. K. Kh. Khysainov, Nucl. Instr. Meth. 95, 177 (1971).