

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ОБЗОР РАБОТ, ДОЛОЖЕННЫХ НА ЗАСЕДАНИЯХ СЕКЦИИ
«ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ»*****С. М. Рывкин***

Изучение фотоэлектрических и оптических свойств занимает важное место в общем комплексе исследований свойств полупроводников. Это определило тот интерес к работе фотоэлектрической секции, который проявился в дни работы конференции. Для доклада на секции было представлено более тридцати работ. В связи с перегрузкой программы лишь часть из них могла быть заслушана на заседаниях. Обычно заседания проходили при большом числе участников.

Прежде чем перейти к обзору работ, доложенных или представленных для доклада на секции, мы попытаемся кратко рассмотреть основные тенденции, проявляющиеся в настоящее время в развитии фотоэлектрических исследований полупроводников.

Важным отличием работ послевоенного периода является переход к проведению комплексного экспериментального исследования фотопроводимости, включающего в себя раздельное исследование феноменологических параметров, определяющих фотопроводимость (таких как «квантовый выход», «время жизни» и т. д.). Иными словами, изучение стационарной фотопроводимости, характерное для более ранних работ, всё более заменяется изучением кинетики фотопроводимости.

Именно это обстоятельство позволило в ряде случаев обнаружить и истолковать новые интересные закономерности фотопроводимости.

Другая, не менее важная особенность связана с расширением исследований за круг чисто фотоэлектрических явлений в связи с использованием кроме света других излучений.

Такое расширение оправдывается не только требованиями практики, но и глубокой аналогией между явлениями ионизации, возникающими под действием разных излучений. Можно показать, что с точки зрения поведения в кристаллической решётке носители тока, освобождённые светом и другими излучениями, отличаются незначительно. Это поясняется следующими соображениями.

Процессы, возникающие при ионизации в полупроводниках, могут быть разбиты на две категории: процессы собственно ионизации, т. е. образования свободных носителей тока, и процессы движения и рекомбинации освобождённых носителей. Первые определяются взаимодействием ионизирующего излучения с веществом и характеризуются постоянными типа коэффициента поглощения (или «ослабления») и так называемого «выхода», вторые же зависят от взаимодействия созданных при ионизации «неравновесных» носителей тока с веществом и характеризуются временем релаксации (подвижностью) и временем жизни.

Если характер процессов собственно ионизации специфичен для каждого типа ионизирующего излучения, то дальнейшие процессы движения и рекомбинации носителей в большинстве случаев практически не зависят от того, каким излучением эти носители освобождены. Это объясняется весьма сильным взаимодействием носителей тока с решёткой вещества. В результате этого взаимодействия носители тока, которые возникают в зонах в результате ионизации с энергией, большей, чем средняя энергия теплового движения, и, вообще говоря, разной для различных излучений, за весьма малые (сравнительно с временем жизни) времена в результате столкновений с решёткой, «охлаждаются» и становятся неотличимыми от «равновесных» носителей тока, освобождённых при термической ионизации.

В дальнейшем, т. е. основную долю времени своего свободного существования в зоне, такие носители обладают нормальными значениями подвижности и коэффициента рекомбинации и не проявляют каких-либо специфических особенностей, связанных с характером излучения, вызвавшего ионизацию. Это зачастую позволяет использовать практически одинаковые методы исследования и трактовки результатов при изучении проводимости, наведённой в результате действия излучений с энергией частиц или квантов, отличающейся в миллионы раз. В связи с этим и сравнительно узкая область исследования фотоэлектрических свойств полупроводников всё более превращается в настоящее время в широкую область исследования внутренней ионизации в полупроводниках под действием разнообразных излучений. Однако даже и эта широкая область уже не может охватить в полной мере всю совокупность ведущихся исследований, родственных по методам экспериментирования и трактовки результатов, и, следовательно, образующих, по существу, единую научную область.

Действительно, если до последних лет все методы образования неравновесных носителей в полупроводнике (если исключить случай очень больших электрических полей) сводились к внутренней ионизации, то в последнее время чётко осознана и широко используется возможность образования неравновесных носителей за счёт инъекции «неосновных»*) неравновесных носителей с помощью выпрямляющего

*) «Неосновными» именуется носители, знак которых противоположен знаку проводимости полупроводника (например, дырки в электронном полупроводнике).

контакта (особенно эффективно на контакте двух полупроводников с разным знаком проводимости).

В атомных полупроводниках с большой подвижностью, а следовательно, и длиной диффузионного смещения носителей, это позволяет увеличивать концентрацию носителей в достаточно большом объеме полупроводника около инжектирующего контакта *).

Характер поведения инжектированных носителей тока и носителей, освобождаемых при ионизации, одинаков (здесь применимы те же соображения о сильном взаимодействии с решёткой, о которых говорилось выше). Итак инжекция выступает в качестве новой разновидности метода создания в полупроводнике неравновесных носителей тока.

С учётом этой новой возможности фактически оформляется ещё более широкая область — область исследования нестационарных электронных процессов в полупроводниках или, иначе, исследования поведения неравновесных носителей тока в полупроводниках.

Расширение области фотоэлектрических исследований за счёт использования разнообразных излучений и инжекции и использование методов комплексного изучения наведённой проводимости в чрезвычайно сильной степени обогатило экспериментальные возможности и привело к получению новых результатов, важных как с научной, так и с прикладной точек зрения. В связи с этим необходимо, в первую очередь, упомянуть о широком развитии исследований поведения «неосновных» носителей тока, определяющих работу важнейших полупроводниковых приборов (диодов, триодов, фотодиодов и т. п.).

В противоположность «основным» носителям «неосновные» обладают той особенностью, что их диффузия или дрейф в электрическом поле не приводят к появлению в полупроводнике объёмных зарядов. Это связано с тем, что заряд неосновных носителей, где бы они не появились, быстро компенсируется соответствующим перераспределением заряда основных носителей. В результате диффузия неравновесных неосновных носителей происходит как диффузия нейтральных частиц, т. е. распространяется на весьма большие расстояния, определяемые средней длиной диффузионного смещения **) (в то время как диффузия основных носителей распространяется

*) Использование соответственно направленного электрического поля позволяет ещё в большей степени увеличить объём с повышенной концентрацией носителей за счёт их дрейфа.

**) Отметим, что ещё в 1935 г. в работе, посвящённой фотоэлектродвижущим силам в кристаллах куприта, А. Ф. и А. В. Иоффе подчеркнули необходимость принять при объяснении полученных ими результатов большие значения для длины смещения фотоэлектронов.

В 1948 г. В. Е. Лашкарёв, анализируя результаты исследования фотоэда и продольной фотопроводимости, впервые указал на основные особенности диффузии и дрейфа неосновных носителей. В настоящее время специфические свойства неосновных носителей широко исследуются и используются при объяснении механизма действия полупроводниковых приборов.

в полупроводниках на значительно меньшие расстояния, определяемые длиной экранирования).

Своеобразно и поведение неосновных носителей в электрическом поле. С одной стороны, электрическое поле действует на них как на заряженные частицы, т. е. вызывает их дрейф. С другой стороны, быстро устанавливающееся перераспределение концентрации основных носителей обеспечивает нейтральность в любом месте, где в результате дрейфа появились неосновные носители. Это обстоятельство, а также возможность легко инжектировать и обнаруживать неосновные носители привели к использованию наиболее прямого метода измерения подвижности носителей тока по времени дрейфа между двумя точками образца (наряду с давно известным методом по измерению проводимости и постоянной Холла).

С точки зрения экспериментальной, важное значение имеет простота определения концентрации неосновных носителей с помощью измерения запорного тока через выпрямляющий контакт, установленный в области, где желательнее определить эту концентрацию.

Появление новых возможностей экспериментирования с неравновесными неосновными носителями привело, в частности, к расширению исследования рекомбинационных процессов как в объеме, так и на поверхности полупроводников.

Следует отметить, что существующая теория рекомбинации не позволяет пока предвычислять коэффициенты, характеризующие вероятность единичного рекомбинационного акта, хотя интересные попытки развития теории в этом направлении и делаются (Э. И. Адирович, С. И. Пекар). С другой стороны, феноменологическая теория рекомбинации к настоящему моменту достигла серьезных успехов. Здесь в предположении, что рекомбинация идет через так называемые «центры рекомбинации», удалось установить связь между характером заполнения энергетических состояний электронами и интенсивностью рекомбинации (Шокли и Рид). Это позволяет, если известна энергетическая структура спектра электрона в данном веществе, на основании измерения среднего времени жизни (т. е. экспериментально) определять истинное сечение рекомбинации на центрах различной природы.

Значительный интерес представляет исследование рекомбинации, начатое ещё О. В. Лосевым, с помощью изучения спектров рекомбинационного свечения. Экспериментальные работы этих направлений получили довольно широкое развитие для германия и кремния. Но нет сомнения, что по мере того, как энергетический спектр и основные свойства некоторых других полупроводников будут установлены с той же полнотой, как это сделано для германия, экспериментальное изучение истинных сечений рекомбинации станет возможным и на других веществах.

Особое место в изучении полупроводников занимают исследования, связанные с экситонной гипотезой. Это направление, имеющее

большое принципиальное значение, развивалось в течение последних лет в связи с изучением фотоэлектрических и оптических свойств ряда полупроводников.

Комплексное исследование фотопроводимости закиси меди и сернистого кадмия (В. П. Жузе и С. М. Рывкин, В. Е. Лашкарёв и Г. А. Федорус) привело к заключению о существенной роли примесей в фотоэлектрических процессах в этих полупроводниках. Однако это предположение находилось в противоречии с тем обстоятельством, что исследование фотоэлектрических свойств проводилось при использовании света, который соответствовал собственной полосе поглощения, определяемой не примесями, а основной кристаллической решёткой. Противоречие между «примесным» характером фотоэффекта и «собственным» характером поглощения привело к гипотезе о существенной роли процессов миграции энергии, с помощью которых энергия, поглощаемая кристаллической решёткой, передаётся примесным центрам. Естественно было предположить, что носителями мигрирующей энергии являются возбуждённые состояния решётки — экситоны, понятие о которых было введено Я. И. Френкелем. Так возникли представления об экситонном механизме внутреннего фотоэффекта. Экситонный механизм используется и для объяснения некоторых закономерностей внешнего фотоэффекта (Апкер и Тафт). В дальнейшем поиски экситонного поглощения в закиси меди и других полупроводниках привели Гросса и его сотрудников к обнаружению чрезвычайно интересных особенностей спектров поглощения этих веществ, заключающихся в существовании вблизи края собственной полосы тонких линий поглощения, частоты которых в ряде случаев укладываются в определённые сериальные законы.

Хотя все эти интересные факты и не могут пока служить в качестве однозначного доказательства определяющей роли экситонов в явлениях фотоэффекта и поглощения, однако, несомненно, что привлечение экситонных представлений приводит к их наиболее естественному объяснению. Развитие экспериментальных исследований фотоэлектрических и оптических свойств полупроводников с целью уточнения и развития экситонной гипотезы уже привело к обнаружению многих новых интересных фактов. В этом смысле роль экситонных представлений оказалась весьма плодотворной.

Наряду с углублённым исследованием механизма внутренней ионизации и поведения неравновесных носителей тока последнее десятилетие характеризовалось усиленными поисками новых полупроводниковых веществ, чувствительных к свету и ионизирующим излучениям. Среди довольно большого числа обнаруженных и изучаемых в настоящее время полупроводников, обладающих фотопроводимостью, наибольший интерес как с практической, так и с теоретической точек зрения приобрели следующие три группы веществ:

- 1) так называемые вещества группы PbS (PbS, PbSe, PbTe);
- 2) вещества группы CdS (CdS, CdSe, CdTe);

3) вещества с выраженным ковалентным типом связи, кристаллизующиеся в алмазной или алмазоподобных структурах (Ge, Si, $A^{III}V^*$) и т. д.).

Практическое значение фотопроводников группы PbS определяется их весьма большой чувствительностью в видимой и особенно инфракрасной (и.-к.) областях спектра. Сернисто-свинцовые фотоспротивления в массовом количестве выпускаются промышленностью и используются в автоматике, инфракрасной технике, звуковом кино и т. д.

Механизм фотопроводимости в веществах группы PbS отличается некоторыми особенностями, что привело к появлению нового объяснения их фотоэлектрических свойств на основе так называемых «барьерных» теорий фотопроводимости, в принципе отличных от классической «концентрационной» теории. С этой точки зрения исследование фотопроводников группы PbS представляет и значительный теоретический интерес.

Сернистый кадмий, так же как и сернистый свинец, стал интенсивно исследоваться в послевоенные годы (после разработки эффективного метода получения монокристаллических образцов этого материала). При этом в CdS сразу же была обнаружена целая гамма своеобразных фотоэлектрических и оптических явлений, вызвавших большой интерес. Чувствительность сернистого кадмия к ионизирующему действию излучений весьма велика, причём следует отметить замечательную «универсальность» CdS, меняющего свою проводимость под действием самых различных излучений: видимого света, рентгеновых лучей, γ -лучей и быстрых заряженных частиц. Это уже сейчас привело к возможности практического использования этого вещества в качестве фотоспротивлений (моно- и поликристаллических), датчиков в дозиметрической аппаратуре, кристаллических счётчиков и т. п.

Исследования веществ, кристаллизующихся в алмазной и алмазоподобных структурах, и прежде всего германия и кремния определили основной успех физики полупроводников, достигнутый в последние годы.

Интенсивность исследования этих полупроводников, определявшаяся, главным образом, их практической важностью, привела к получению в короткий срок большого количества новых интересных данных. Достигнутый успех в значительной степени был связан с разработкой эффективных методов очистки и контроля за составом этих материалов. Не меньшую роль сыграло и то обстоятельство, что выводы существующей теории полупроводников и, в частности, «зонной» теории и теории подвижности оказались полностью применимы к германию и кремнию (в то время как для изучавшихся ранее полупроводников с сильно выраженным ионным типом связи теория значительно усложняется и существующие «зонная» теория и теория подвижности, по видимому, непригодны). Всё это определило получение

) $A^{III}V^$ — общее условное обозначение соединений элементов третьей и пятой группы таблицы Менделеева.

ние на германии и кремнии повторяющихся и сравнительно легко интерпретируемых результатов.

Закономерности, характеризующие фотоэлектрические и оптические свойства германия и кремния, также отличаются относительной простотой. Так, например, нужно отметить совпадение для германия значений для ширины запретной зоны и энергии ионизации примесных центров, определённых из фотоэлектрических, оптических и электрических измерений, равенство квантового выхода единице и т. п.

Важные результаты были получены при исследовании оптических свойств германия и кремния. Здесь надо отметить экспериментальное доказательство существования наряду с «прямыми» фотопереходами между зонами (без изменения волнового вектора k) и так называемых «непрямых» переходов, совершаемых с одновременным испусканием или поглощением фонона. Широко исследуется поглощение «свободными» носителями тока, при котором совершаются фотопереходы внутри одной зоны. Выполнение законов сохранения обеспечивается при таких фотопереходах взаимодействием с кристаллической решёткой. Поглощение носителями тока имеет значительную величину и легко наблюдаемо в области относительной прозрачности германия, вне собственной полосы поглощения. Поскольку концентрацию носителей тока в германии можно легко менять в значительных пределах с помощью инъекции неосновных носителей, появляется возможность практического использования «инъектированного» поглощения для модуляции интенсивности световых пучков с помощью электрических сигналов.

Необходимо особенно подчеркнуть возможность использования германия, кремния и некоторых других веществ для построения фотоэлементов. Этот вопрос имеет большое практическое значение, и мы остановимся на нём подробнее.

Полупроводниковые вентильные фотоэлементы известны давно, и некоторые их типы (селеновый, сернисто-серебряный и др.) находят практическое применение.

В вентильном фотоэлементе происходит непосредственное превращение световой энергии в электрическую, и поэтому естественно было бы использовать их в качестве преобразователей энергии. Однако КПД такого преобразования в «старых» типах фотоэлементов слишком низок. Это привело к тому, что они если и используются, то не как преобразователи энергии, а как преобразователи сигналов (световых в электрические). Однако и это использование фотоэлементов затрудняется их значительной инерционностью, относительно небольшой чувствительностью и некоторыми другими недостатками.

Если возникновение вентильной фото-ЭДС требует лишь наличия запирающего слоя, граничащего с фоточувствительным веществом, то для получения совершенного вентильного преобразователя требуется выполнение некоторых дополнительных условий. Эти условия реализуются в новых полупроводниковых фотоэлементах — германиевых и кремниевых, в которых фото-ЭДС возникает при освещении области вблизи

от электронно-дырочного перехода. В результате ионизации, производимой таким освещением, в соответствующих зонах появляются неравновесные неосновные носители, которые контактным полем n - p -перехода выбрасываются в соседний полупроводник.

Возникающая в результате этого разность потенциалов полупроводников, образующих n - p -переход, приводит к появлению тока основных носителей через n - p -переход, компенсирующего ток неравновесных неосновных носителей. Стационарному состоянию соответствует некая разность потенциалов на n - p -переходе — фото-эдс. Анализ показывает, что как величина стационарной фото-эдс, так и кпд тем больше, чем меньше ток насыщения перехода (ток в запиорном направлении), т. е. чем меньше концентрация равновесных неосновных носителей.

При использовании фотоэлементов в качестве преобразователей энергии необходимо также, чтобы сопротивление толщи полупроводников, включённых последовательно с n - p -переходом, было возможно меньшим. Следовательно, концентрация основных носителей в них должна быть большой.

Малой концентрации равновесных неосновных носителей и большой концентрации основных соответствует близкое расположение уровня Ферми к краю «основной» зоны.

Донорные и акцепторные уровни в германии, кремнии и соединениях элементов 3-й и 5-й групп ($A^{III}B^V$) располагаются очень близко к краю зоны, и, следовательно, при достаточно большом их количестве и уровень Ферми будет близок к этому краю. Таким образом, с указанной точки зрения такие вещества, как германий, кремний и т. п., должны быть особенно выгодны для изготовления фотоэлементов.

Эффективность фотоэлементов определяется также той долей неравновесных неосновных носителей, освобождённых светом, которая успевает за время жизни продиффундировать до n - p -перехода. Следовательно, для изготовления фотоэлементов должен использоваться материал с возможно большей длиной диффузионного смещения. И с этой точки зрения полупроводники типа германия, где длина диффузионного смещения достигает миллиметров, оказываются наиболее подходящими. Отметим, наконец, что, поскольку практически речь может идти о преобразовании солнечной энергии, получение значительных кпд возможно лишь при согласовании ширины запретной зоны полупроводника с характеристиками спектрального распределения энергии в солнечном спектре. Анализ показывает, что в случае кремния такое согласование оказывается близким к оптимальному. Таким образом, в кремнии совмещаются, по существу, все основные условия получения больших кпд. Построенные к настоящему времени кремниевые солнечные преобразователи энергии обладают кпд порядка 10%.

С появлением высокоэффективных германиевых и кремниевых фотоэлементов, повидимому, возникает интересная возможность преобразования ядерной энергии радиоактивного распада непосредственно

в электрическую. Действительно, используя в качестве ионизирующего излучения вместо света бета-излучение какого-нибудь долгоживущего изотопа (например, Sr^{90} , период полураспада которого составляет ~ 20 лет), можно было бы получить источник напряжения с большим сроком службы.

При этом для возможно более эффективного преобразования энергии необходимо учитывать своеобразную особенность фотоэлементов, используемых в качестве преобразователей энергии, а именно рост КПД при увеличении интенсивности преобразуемого излучения. Это приводит к необходимости использования радиоактивного изотопа в достаточно концентрированном виде.

В настоящее время показано, что перспективы преобразования энергии распада Sr^{90} , по видимому, незначительны из-за образования под действием β -частиц с большой энергией дефектов в решетке германия*). Однако практическое использование описанного метода преобразования энергии может стать возможным для изотопов с границей β -спектра, не превышающей порога образования дефектов.

Наряду с преобразованием энергии новые фотоэлементы из германия (фотодиоды) могут с успехом использоваться в качестве преобразователей световых сигналов в электрические.

Большая длина диффузионного смещения в германии и некоторые другие положительные особенности обеспечивают получение чувствительности германиевых фотодиодов по току на порядок большей ($30\,000$ *мкА/лм*), чем у лучших вентильных фотоэлементов старых типов. Однако основное преимущество германиевых фотодиодов, используемых в качестве преобразователей сигналов, определяется возможностью их работы в режиме, не свойственном старым типам фотоэлементов, а именно с внешним напряжением, приложенным в запирающем направлении.

В таком «фотодиодном» режиме появляется возможность получать той же величины фототоки, что и при коротком замыкании фотоэлемента, но при наличии в цепи большого нагрузочного сопротивления. При этом неизмеримо возрастает чувствительность «в вольтах на люмен», играющая основную роль в большинстве случаев использования фотоэлементов. Большая чувствительность сопровождается в германиевых фотодиодах малой инерционностью (постоянная времени ~ 10 *мксек*). Всё это определяет возможность широкого использования фотодиодов для преобразования сигналов во многих областях техники (например, в звуковом кино, в счётно-решающих механизмах, автоматике и т. д.).

В настоящее время возникает задача использования для построения фотодиодов новых материалов. Использование полупроводников с малой шириной запретной зоны должно привести к созданию

*) Кроме ионизации, β -частицы с энергией выше $\sim 0,6$ *Мэв* способны выбивать атомы Ge из их положений в узлах, что приводит к порче прибора.

фотодиодов, чувствительных к более длинноволновой части спектра. Разработка фотодиодов с малыми темновыми токами и с максимумом чувствительности в видимой и ультрафиолетовой областях спектра требует перехода от полупроводников к диэлектрикам. В связи с этим приобретает важное значение задача введения примесей в диэлектрики и получения на них *n-p*-переходов.

Из приведённого выше краткого обзора видно, что исследования фотоэлектрических явлений в полупроводниках (или, точнее, исследования нестационарных электронных процессов в них) проводятся весьма интенсивно и отмечены тем общим подъёмом, который характеризует развитие всей физики полупроводников в последние годы.

В некоторой мере это отразилось и на характере работы фотоэлектрической секции конференции, число представленных докладов на которой значительно превзошло «физические» возможности их заслушивания и обсуждения. Содержание многих докладов было посвящено наиболее актуальным и важным задачам.

Ниже мы попытаемся кратко изложить основное содержание большинства работ, доложенных или представленных для доклада на фотоэлектрической секции*), разумеется, не претендуя на полноту и обстоятельность, несовместимую с ограниченным объёмом настоящей статьи.

В основном все представленные доклады по содержанию могут быть отнесены к двум следующим большим разделам:

1. Фотопроводимость и оптические свойства.
2. Фотоэлектродвижущие силы.

Кроме того, ряд докладов был посвящён внешнему фотосъёмному эффекту полупроводников и некоторым методическим вопросам. При изложении содержания докладов мы будем придерживаться порядка, определяемого этой, весьма условной классификацией.

В большом числе заслушанных работ при интерпретации результатов использовались представления, связанные с экситонами. Два доклада (Е. Ф. Гросса — А. Д. Каплянского и В. Е. Лашкарёва — Ю. И. Карханина) были непосредственно посвящены исследованию их свойств.

Е. Ф. Гросс и А. Д. Каплянский сообщили о новых результатах исследования структуры спектров поглощения полупроводников. Известно, что детальное исследование этих спектров привело в последние годы Е. Ф. Гросса и его сотрудников к обнаружению линейчатой структуры в кристаллах Cu_2O , CdS , PbJ_2 , HgJ_2 .

*) К сожалению, интересные сообщения д-ра Тауц и проф. Ромпе не могли быть прореферированы из-за отсутствия в распоряжении автора текста докладов.

CdJ_2 . При этом обнаружилось, что в большом числе других кристаллов такая структура отсутствует.

Авторы доклада поставили своей целью выяснить связь факта наличия или отсутствия линейчатой структуры спектров со структурой кристаллической решётки. Для этого были подробно исследованы спектры поглощения двух модификаций — красной (тетрагональной) и жёлтой (ромбической) иодной ртути. Эти спектры оказались резко отличными: для жёлтой модификации вблизи края основной полосы обнаружено монотонное возрастание поглощения с уменьшением длины волны без какой-либо дискретной структуры, в то время как для красной модификации обнаружен сложный спектр, характеризующийся наличием тонких линий, полос и «ступенек» поглощения. Ряд опытов показал, что наблюдаемая в красной модификации структура не связана со стехиометрическими избытками ртути или иода и, повидимому, не может объясняться дефектами решётки. В связи с этим авторы делают заключение о её связи с возбуждением экситонов.

Разница спектров поглощения жёлтой и красной модификации свидетельствует в этом случае о существенном влиянии структуры решётки на экситонные уровни кристаллов.

Это подтверждается и результатами исследования спектров поглощения бромной ртути HgBr_2 . Ромбическая решётка HgBr_2 изоморфна с решёткой жёлтой HgJ_2 и, как оказалось, спектр поглощения HgBr_2 так же, как спектр жёлтой HgJ_2 , лишён какой-либо структуры. Наличие в красной модификации HgJ_2 , кроме узких линий вблизи края полосы поглощения, также сравнительно широких полос (100—150Å) в её глубине авторы, в соответствии с теорией Дыкмана и Пекара, объясняют возникновением наряду с «неполяризующими» и «поляризующими» экситонов.

Кроме поглощения, авторы исследовали также фотопроводимость красной и жёлтой HgJ_2 . «Экситонный» механизм фотопроводимости неоднократно обсуждался в ряде исследований. Недавно Гросс и Белле показали экспериментально, что среди большой группы веществ отчётливо выраженной фотоэлектрической чувствительностью обладают лишь те, в спектре которых обнаруживаются линии экситонного поглощения. Авторы отмечают, что указанный параллелизм между наличием экситонного спектра поглощения и фотопроводимости имеет место и в двух модификациях иодной ртути: наличие структуры спектра в красной модификации сопровождается большой фотопроводимостью; отсутствие этой структуры в жёлтой модификации — её ничтожной фоточувствительностью.

Экспериментальные исследования, связанные с экситонной гипотезой, проводились в последние годы главным образом как исследования тонкой структуры спектров поглощения. Между тем при привлечении понятия об экситонах для истолкования данных по внутреннему и внешнему фотоэффекту использовалось в основном свойство экситона быть носителем мигрирующей энергии. Отсюда возникает

понятный интерес к вопросам исследования диффузии экситонов и к определению количественных характеристик этой диффузии. В докладе В. Е. Лашкарёва и Ю. И. Карханина были приведены интересные данные, относящиеся к этому вопросу.

Авторы показали, что инфракрасная люминесценция закиси меди не зависит от электрического поля, приложенного к образцу и быстро удаляющего из него все неравновесные неосновные носители (в закиси меди — фотэлектронны). На основании этого можно заключить, что люминесценция должна быть связана с безтоковыми возбуждениями — экситонами. С другой стороны, было обнаружено, что при наличии на поверхности образца плёнки воды, интенсивность люминесценции резко падает с уменьшением длины волны возбуждающего света (т. е. с уменьшением глубины его проникновения в образец). Авторы полагают, что вода на поверхности образца способствует безызлучательной аннигиляции экситонов. В этом случае, зная зависимости от длины волны интенсивности люминесценции и глубины проникновения света, можно вычислить среднюю длину диффузионного смещения экситонов. Она оказалась равной приблизительно одному микрону. Принимая согласно Н. А. Толстому и Н. И. Ткачуку время жизни экситона $\sim 10^{-6}$ сек, авторы получают для коэффициента диффузии $D \approx 10^{-2}$ см²/сек. Это величина много меньше коэффициента диффузии для носителей тока в закиси меди, что авторы объясняют наличием уровней прилипания для экситона.

В работе Ю. И. Гриценко и В. Е. Лашкарёва было показано, что в образцах закиси меди с малой проводимостью, получаемых при отжиге Cu_2O в вакууме в условиях, когда имеет место редукция меди, кроме обычной «коротковременной» составляющей фотопроводимости (с постоянной времени $\sim 10^{-4}$ сек), возникает «длинновременная» составляющая, характеризующаяся временами $\sim 10^{-1}$ — 10^{-3} сек.

Экспериментальное комплексное исследование температурной зависимости постоянной времени и «выхода» коротковременной составляющей подтвердило результаты, полученные ранее другими авторами при исследовании фотопроводимости «нередуцированной» закиси меди. Подробное исследование длинновременной фотопроводимости показало, что она определяется двумя компонентами с временами $\tau_2 \sim 5 \cdot 10^{-3}$ сек и $\tau_3 \sim 5 \cdot 10^{-2}$ сек. При этом времена τ_2 и τ_3 оказались практически не зависящими от температуры.

Для объяснения этого факта предполагается, что фотоэлектроны быстро локализируются на некоторых центрах, после чего их рекомбинация с темновыми дырками происходит в виде двух последовательных переходов: некоего перехода, вероятность которого не зависит от температуры и сравнительно мала (следовательно, постоянная времени для таких переходов велика), и перехода, соответствующего окончательной рекомбинации фотоэлектрона с дыркой, вероятность которого определяется концентрацией дырок и, следо-

вательно, зависит от температуры. Поскольку постоянная времени первого процесса предполагается при всех температурах большей, чем второго, именно она и определяет наблюдаемое время процесса рекомбинации, не зависящее от температуры.

В качестве возможной модели первому переходу сопоставляется туннельный переход электрона от одного локального центра на другой, расположенный достаточно близко. При этом предполагается, что рекомбинация электрона, находящегося на первом центре, с дыркой запрещена, а на втором, напротив, разрешена. Авторы считают, что, поскольку появление длинновременной компоненты обусловлено редукцией меди, «длинновременные» центры локализации фотоэлектронов включают в свою структуру вакансии кислорода в решётке Cu_2O .

П. П. Брюджинас и М. П. Микалькевичус привели в своём сообщении некоторые данные о фотоэлектрических и оптических свойствах поликристаллических и аморфных слоёв трёхсернистой и трёхселенистой сурьмы. Эти материалы, обладая заметной фоточувствительностью при малой темновой проводимости, представляют значительный интерес в связи с возможностью их использования в качестве фотопроводящих экранов передающих телевизионных трубок (см. ниже доклад Я. А. Оксмана).

Авторы отмечают совпадение энергии термической, фотоэлектрической и оптической (по поглощению) активации, а также совпадение энергий термической активации для слоёв и объёмных образцов этих материалов. Последнее обстоятельство не соответствует предположению о существенном влиянии межкристаллических прослоек на свойства исследованных слоёв. На длинноволновом краю собственной полосы поглощения авторы обнаружили дополнительную полосу сильного поглощения, сужающуюся с понижением температуры, которую они связывают с возбуждением экситонов.

Доклад А. В. Айрапетянц и С. М. Рывкина был посвящён теоретическому и экспериментальному рассмотрению некоторых вопросов импульсной ионизации в полупроводниках. Показано, что механизм формирования импульсов в полупроводниковых кристаллических счётчиках существенно отличается от того, что происходит в изоляторах по известной схеме Гуддена и Поля.

Если время жизни неравновесных носителей тока, возникших при ионизации, достаточно велико, то весь процесс формирования импульса может быть разбит на два периода: 1) период «первичного» тока, характеризующийся отсутствием диффузионно-дрейфового равновесия и 2) период «сквозного» тока, протекающего после установления этого равновесия. Если количество заряда, прошедшего в течение второго периода, больше, чем в течение первого, то осуществляется «полупроводниковый» механизм и заряд в импульсе может превзойти общий заряд, высвобождённый при ионизации. В работе установлены условия, при которых осуществляется «полупроводниковый» механизм и проведена экспериментальная проверка основных положений теории на сер-

нисто-кадмиевых α -счётчиках. В докладе были приведены данные о разработанных полупроводниках α -счётчиках на основе монокристаллов сернистого кадмия и германиевых электронно-дырочных переходов.

Б. Т. Коломиец, А. О. Олеск и С. Г. Пратусевич доложили о своих исследованиях влияния примесей ряда металлов на электрические и фотоэлектрические свойства спрессованных поликристаллических образцов сернистого кадмия. Образцы такого типа обладают весьма большой чувствительностью к свету и в настоящее время широко используются в качестве фотоспротивлений. Введение примесей позволяет улучшать их свойства и служит в связи с этим в качестве технологического приёма при изготовлении этих фотоспротивлений.

Экспериментальная работа, проведённая авторами, показала, что из числа металлов, использованных в качестве примесей (Li, Sn, In, Tl, Bi, Au, Cu, Ag, Sm, Ga) существенное влияние на свойства образцов оказывают лишь медь и серебро. Введение этих примесей сильно уменьшает проводимость. Возможное объяснение этого факта авторы связывают с замещением двухвалентных атомов кадмия в решётке CdS одновалентной медью (или серебром) и образованием при этом акцепторных центров. Тогда, поскольку проводимость обычного CdS — электронная, появление акцепторов ведёт к частичной «компенсации» донорных центров и, следовательно, к уменьшению проводимости. Введение меди и серебра приводит к появлению нового максимума и возрастанию величины фотопроводимости. Появляется новый максимум и в спектральном распределении поглощения. При изменении количества примесей характер зависимости фотопроводимости от интенсивности света может меняться от «сублинейного» до «суперлинейного». Интересен факт гашения фотопроводимости в области примесного «медного» максимума при дополнительном введении примеси Fe, Co и Ni, которые, как известно, гасят и люминесценцию. Все эти особенности фотопроводимости, как отмечают авторы, пока ещё не нашли удовлетворительного истолкования.

Н. А. Толстой в своём докладе подчеркнул важность учёта влияния возбуждающего света на рекомбинационные процессы. Такое влияние следует из экспериментально обнаруживаемой аномалии — отсутствия прямой пропорциональности между интенсивностью возбуждающего света и начальной скоростью релаксации фотопроводимости от её стационарного значения (т. е. скоростью в момент выключения возбуждающего света). Учёт влияния освещения на рекомбинационные процессы в принципе позволяет объяснить и факт сильного отклонения отношения площадей над кривой «разгорания» и под кривой «затухания» фотопроводимости и люминесценции от предсказываемого теорией. Конкретизация общих соображений о влиянии света на рекомбинацию привела автора к рассмотрению определённого варианта двухступенчатого механизма фотопереходов, с помощью которого удаётся объяснить ряд экспериментальных фактов, обнаруженных им при исследовании поликристаллических сернисто-кадмиевых фотосо-

противлений, активированных медью (см. доклад Коломийца, Олеск и Пратусевич), и в частности, две фундаментальные аномалии, о которых речь шла выше. Пытаясь остаться в рамках двухступенчатого механизма и при объяснении «нормальной» фотопроводимости CdS, Н. А. Толстой рассматривает возможность фотопроводимости по локальным уровням. Это предположение позволяет объяснить возрастание с температурой «нормальной» фотопроводимости CdS (Cu, Fe) за счёт увеличения подвижности электронов вдоль локальных уровней. Трудность, которая всегда возникает при попытке использования представлений о «примесной зоне» — необходимость наличия весьма большой концентрации примесей — устраняется особенностями объекта, исследованного автором. Действительно, как отмечает Н. А. Толстой, свойства мелкокристаллических спрессованных образцов CdS могут в значительной степени определяться поведением поверхностей отдельных кристалликов. Примеси также, вероятно, располагаются в приповерхностных слоях. В связи с этим истинная концентрация примесей в тех областях образца, которые определяют основные фотоэлектрические свойства, может быть достаточна для образования «примесных зон», особенно эффективно проявляющихся при повышении температуры.

О весьма большой чувствительности к свету и рентгеновым лучам монокристаллов и поликристаллических слоёв красной (тетрагональной) двуокисистой ртути сообщил Д. В. Чепур. Релаксационные кривые фотопроводимости HgJ_2 характеризуются наличием двух компонент с несколько отличающимися постоянными времени. Эти постоянные зависят от подсветки и температуры. Автор обнаружил в спектре поглощения красной HgJ_2 максимум около 600 $m\mu$, который совпадает с максимумом фотопроводимости, обнаруженным ранее Пуцейко. Наличие или отсутствие максимума определяется условиями технологии, и автор склонен приписывать его сверхстехиометрическому иоду. При понижении температуры максимум сужается и смещается в сторону коротких волн. В связи с этим высказывается предположение о тождественности этого примесного максимума с линией поглощения у 533 $m\mu$, наблюдавшейся Гроссом и Каплянским при 77° К. Однако против этого отождествления, повидимому, свидетельствуют приведённые Гроссом и Каплянским данные о положении линии в спектре при 20° С.

К. К. Демидов рассказал об исследовании кинетики фотопроводимости в хлористом серебре (в области длин волн 450—550 $m\mu$), которое привело к значению постоянной времени процесса порядка 10^{-2} сек. Подсветка неактивным светом (из области от 600 до 900 $m\mu$) приводила к некоторому уменьшению постоянной времени.

Два доклада на одном из заседаний секции были посвящены фотоэлектрическим и оптическим свойствам нового класса полупроводников — органическим соединениям.

В докладе А. Н. Теренина рассматривались некоторые данные о полупроводниковых свойствах этих соединений и, в частности,

красителей. Исследование проводимости и фотопроводимости красителей, в течение ряда лет проводимое Вартаняном, позволило установить их полупроводниковые свойства. Среди красителей встречаются как электронные, так и дырочные полупроводники. Температурная зависимость их проводимости имеет типично полупроводниковый экспоненциальный характер. Докладчик, совместно с Е. К. Пуцейко, обнаружил и подробно исследовал интересный эффект сенсibilизации фото-эдс, наблюдаемой с помощью конденсаторного метода, в неорганических полупроводниках при нанесении на них органических красителей.

В докладе подробно анализируются экспериментальные данные о спектрах поглощения и фотопроводимости красителей. Докладчик подчеркнул, что спектры поглощения микрокристаллических слоёв и изолированных молекул красителя отличаются несущественно, что свидетельствует против предположения об обобществлении электронов в основном и возбуждённом состояниях в кристалле красителя. Следовательно, эти уровни остаются локализованными в пределах молекул. С другой стороны, наличие электронной фотопроводимости в некоторых красителях приводит к выводу о существовании сплошных зон энергетических уровней, обеспечивающих возможность движения электронов сквозь весь кристалл. Противоречие устраняется автором с помощью предположения о том, что зоны возникают в результате расщепления уровней, прямые оптические переходы на которые запрещены. При этом фотопроводимость возникает в результате двухступенчатого перехода, а именно фотоперехода на возбуждённый уровень молекулы красителя и термического перехода (с выделением энергии) с возбуждённого уровня молекулы в зону проводимости. Темновая проводимость появляется за счёт непосредственных термических переходов в зону проводимости. Следовательно, рассматриваемая автором модель наряду с объяснением совпадения спектра фотопроводимости кристалла и поглощения отдельной молекулы позволяет объяснить и наблюдаемое в ряде красителей превышение энергии фотоионизации над энергией термической ионизации.

Е. К. Пуцейко рассказала об опытах, в которых обнаружена и исследована сенсibilизация фото-эдс некоторых неорганических полупроводников органическими красителями, нанесёнными на их поверхность. Сенсibilизация проявляется в появлении в спектре фото-эдс максимумов, соответствующих спектрам поглощения красителей. Особенно сильно проявляется эффект сенсibilизации окиси цинка хлорофиллом и его аналогами. При этом автор подчеркнул, что собственный фотоэффект хлорофила обнаружить не удалось. В докладе были приведены данные подробных исследований влияния термической обработки образцов в воздухе, которые свидетельствуют о поверхностном характере сенсibilизированной фото-эдс. Исследовалось также влияние некоторых паров и газов на собственный фотоэффект ряда окисных полупроводников (ZnO , PbO , HgO). Обнаруженное

сильное влияние на собственную фото-эдс выдерживания или прогревания в парах и газах также свидетельствует о поверхностной природе наблюдаемого явления.

В последнее время важное значение приобретают полупроводники с выраженным ковалентным типом связей, кристаллизующиеся в структуре типа алмаза. Однако число таких полупроводников ограничивается несколькими элементами IV группы таблицы Менделеева (кремний, германий, α -олово). В связи с этим предпринимаются интенсивные попытки отыскания новых полупроводников, обладающих свойствами, сходными со свойствами германия и кремния среди бинарных соединений. Естественно, что в первую очередь при этом обращаются к бинарным соединениям, кристаллизующимся в структуре типа ZnS , наиболее близкой по своему характеру к алмазной структуре.

В работе Н. А. Горюновой, В. С. Григорьевой, Б. М. Коноваленко и С. М. Рывкина представлены результаты исследования спектрального распределения фотопроводимости некоторых соединений с дефектной структурой типа ZnS , в частности халькогенидов галлия и индия, а также некоторых других бинарных соединений Ga и In с элементами VI группы, относящихся к иным кристаллическим структурам. Определены относительные чувствительности исследованных соединений и ширина запрещенной зоны (по длинноволновой границе фотоэффекта). В ряде халькогенидов обнаружено закономерное изменение ширины запрещенной зоны, которое связывается с изменением степени ионности соединений.

Одним из новых и весьма перспективных применений fotocувствительных полупроводников является их использование в качестве фотопроводящих экранов в передающих телевизионных трубках. Простота, малые габариты и некоторые другие достоинства таких трубок, получивших наименование «видикон», позволяют рассчитывать на их широкое внедрение, в частности, в промышленное телевидение и т. п. Особенно интересной представляется возможность, используя разные полупроводники, осуществлять телевидение в разных областях спектра.

В докладе Я. А. Оксмана были сформулированы основные требования, предъявляемые к фотопроводящим полупроводниковым слоям при их использовании в «видиконе». Отмечается, что наряду с высокой fotocувствительностью слои должны обладать большим удельным сопротивлением (не ниже 10^{11} ом·см) для того, чтобы собственное время слоя $\left(\frac{\epsilon\rho}{4\pi} \cdot 10^{-12} \text{ сек}\right)$ превышало время кадра $\left(\frac{1}{25} \text{ сек}\right)$.

Докладчик исследовал вольт-амперные характеристики тонких аморфных слоёв Sb_2S_3 — материала, применяемого в «видиконах», в условиях, близких к условиям их работы в трубках. В использо-

ванном методе слой наносился на жёсткую подложку, покрытую полупрозрачным слоем металла. Другая сторона слоя заряжалась электронным пучком до потенциала, который мог измеряться. Ток сквозь слой измерялся гальванометром. Автор обнаружил, что отклонения от закона Ома в исследуемых слоях начинаются при полях 10^4 в/см, причём зависимость проводимости σ от напряжённости поля E следует формуле Я. И. Френкеля

$$\sigma \sim e \text{const} \cdot \sqrt{E}.$$

При этом показано, что константа в показателе экспоненты одинакова для тёмного и освещённого образца. Это привело автора к выводу о том, что в тонких аморфных слоях Sb_2S_3 поле изменяет не концентрацию носителей, а их подвижность.

Б. Т. Коломиец и С. Г. Пратусевич доложили о разработанном ими новом промышленном типе фотосопротивления на основе спрессованного порошка селенида кадмия. Известно, что в последние годы появились сернисто-кадмиевые фотосопротивления (поликристаллические и монокристаллические), обладающие огромной чувствительностью порядка ампера на люмен. Эта чувствительность приблизительно равна чувствительности фотоумножителей, но, в то время как предельный ток фотоумножителя не превосходит ~ 100 μA , фотосопротивления из сульфида кадмия выдерживают токи до нескольких миллиампер. Это позволяет широко использовать их вместе с обычными реле для автоматизации ряда производственных процессов.

Новые селенисто-кадмиевые фотосопротивления ещё на порядок чувствительнее сернисто-кадмиевых. Спектральная область их чувствительности простирается от 0,5 до 1,2 μ с максимумом у 0,8 μ . Новые фотосопротивления, несомненно, найдут широкое применение в технике.

Н. А. Горюнова и Б. Т. Коломиец рассказали об изучении спектрального распределения фотопроводимости в большом числе сложных полупроводниковых систем.

Как правило, эти системы представляют собой твёрдые растворы образующих их компонент. Однако при определённых соотношениях компонент образуются как химические соединения, так и эвтектические смеси. Среди исследованных веществ встречаются кристаллические и стеклообразные. В работе обнаружена фотопроводимость и изучено её спектральное распределение в системах: $\text{Tl}_2\text{Se} - \text{Sb}_2\text{Se}_3$, $\text{Tl}_2\text{S} - \text{Sb}_2\text{S}_3$, $\text{Bi}_2\text{S}_3 - \text{Sb}_2\text{S}_3$, $\text{Sb}_2\text{Se}_3 - \text{As}_2\text{Se}_3$, $\text{Tl}_2\text{Se} - \text{As}_2\text{Se}_3$, $\text{Tl}_2\text{Se} \cdot \text{As}_2\text{Se}_3 - \text{Tl}_2\text{Se} \cdot \text{As}_2\text{Te}_3$, $\text{Tl}_2\text{Se} \cdot \text{As}_2\text{Se}_3 - \text{Tl}_2\text{Se} \cdot \text{Sb}_2\text{Se}_3$, $\text{CdTe} - \text{ZnTe}$, $\text{CdSe} - \text{In}_2\text{Se}_3$ и др. Изменяя соотношения между компонентами системы, авторы получали изменение спектрального распределения в широких пределах. При этом было продемонстрировано отсутствие какой-либо «аддитивности»: спектральное распределение в веществе, полученном при соединении бинарных компонент, может резко отличаться от распределения в этих компонентах. Авторы считают, что

дальнейшее исследование свойств тройных и других сложных систем может привести к возможности сознательного управления их электрическими и фотоэлектрическими свойствами.

В докладе А. И. Горячева и К. А. Юматова приводятся результаты исследований шумов сернисто-свинцовых фотоспротивлений. Известно, что величина шумов определяет порог чувствительности фотоспротивлений и, следовательно, возможность их использования для детектирования слабых сигналов. Исследование, проведенное в условиях режима согласованной нагрузки, показало, что длительное «вылёживание» фотоспротивлений приводит к уменьшению уровня шумов и приближению зависимости шумового сигнала от напряжения к линейной. При этом уровень шума по существу определяется величиной электрического поля в образце. В исследованных образцах спектральная плотность интенсивности напряжения шумов оказалась обратно пропорциональной частоте. Авторы приходят к выводу, что наблюдаемые в PbS шумы являются следствием флуктуаций темнового сопротивления слоя.

Большое место в работе секции заняло обсуждение докладов, посвящённых изучению фотоэлектродвижущих сил в полупроводниках. Эти вопросы имеют не только теоретическое, но и большое практическое значение в связи с использованием вентильных фотоэлементов, фотодиодов и т. п.

В. Е. Лашкарёв и В. А. Романов сообщили об изучении нового типа фото-эдс. Исследования фотоэлектродвижущих сил, проводившиеся в течение двух последних десятилетий, приводили к выводу о том, что наблюдение стационарной фото-эдс в образце с металлическими электродами возможно лишь при наличии «запорных» или «антизапорных» слоёв у электродов и при условии, когда освещаемая область полупроводника достаточно близка к этим электродам. Известно, что фото-эдс может наблюдаться и при освещении области в глубине полупроводника, но вблизи от электронно-дырочного перехода.

Авторы рассказали о новом типе фотоэлектродвижущей силы, названной ими «объёмной», которая возникает в полупроводнике, лишённом *n-p*-переходов и при освещении области, удалённой от электродов.

Было показано, что возникновение «объёмной» фото-эдс связано с наличием неоднородности образца по проводимости. Распространение общей теории фотоэлектродвижущих сил, развитой ранее Лашкарёвым, на рассматриваемый случай привело авторов к разработке теории «объёмной» фото-эдс. При этом выяснилось, что величина фото-эдс пропорциональна градиенту удельного сопротивления и квадрату длины диффузионного смещения. В работе была проведена экспериментальная проверка основного соотношения для объёмной

фото-эдс. С этой целью снимался ход сопротивления и эдс вдоль неоднородного образца германия. Проверка привела к качественному и количественному согласию экспериментальных результатов с теорией. Авторы отмечают возможность использования эффекта объёмной фото-эдс для контроля однородности образцов по удельному сопротивлению. Такой метод контроля однородности может быть особенно эффективен для германия и других материалов с большой длиной диффузионного смещения (так как величина объёмной фото-эдс пропорциональна квадрату этой длины).

Интересно отметить, что независимо исследование эффекта объёмной фото-эдс проводилось в Пражском институте технической физики д-ром Тауц, который кратко информировал об основных результатах этой работы, выступая в дискуссии по докладу В. Е. Лашкарёва и В. А. Романова. Выступая в той же дискуссии, проф. Л. Сосновский (Варшава) подчеркнул, что обнаруженная им фото-эдс, возникающая при освещении поликристаллических плёнок PbS и PbSe, где длина диффузионного смещения мала, может объясняться лишь наличием весьма больших градиентов концентрации примеси, приводящих, по существу, к возникновению *n-p*-переходов. В этом смысле объёмные фото-эдс в германии и в PbS являются противоположными крайними случаями, между которыми, однако, имеется возможность непрерывного перехода.

В докладе, представленном Ж. И. Алфёровым, Б. М. Коноваленко, С. М. Рывкиным, В. М. Тучкевичем и А. И. Уваровым, сообщаются данные о конструкции и основных характеристиках плоскостных германиевых фотодиодов, разработанных в ЛФТИ АН СССР. Фотодиоды имеют чувствительность $\sim 30\,000$ *мкА/лм* и собственное время, определяемое временем диффузии неосновных носителей от места зарождения до *n-p*-перехода, в используемой конструкции составляло не более $\sim 10^{-5}$ *сек.* В работе рассмотрен механизм образования вентильной фото-эдс на *n-p*-переходе, а также уравнение фотодиода, работающего с приложенным внешним напряжением. Проанализирован вопрос и получено общее выражение для КПД фотодиодов, работающих в режиме вентильного фотоэлемента. Произведена экспериментальная проверка полученных соотношений для «вентильного» и фотодиодного режимов при комнатной температуре и температуре сухого льда, причём получено хорошее согласие с предсказаниями теории. Экспериментально подтверждена предсказываемая теорией зависимость КПД от интенсивности освещения.

Доклад В. С. Вавилова и Л. С. Смирнова был посвящён результатам экспериментального исследования вопроса о КПД преобразования световой энергии в электрическую в германиевых фотоэлементах. Авторы подробно проанализировали вопрос о факторах, влияющих на эффективность преобразования энергии. Экспериментальный учёт всех этих факторов позволил определить коэффициент,

характеризующий долю неосновных носителей, успевающих до рекомбинации пройти через *n-p*-переход. В исследованных фотоэлементах этот коэффициент составлял 0,5—0,7. Для его увеличения авторы предлагают создавать на передней поверхности отражающий барьер, т. е. по существу антизапорный слой, существование которого должно уменьшить рекомбинацию на поверхности. Для создания отражающего барьера на освещаемую поверхность должен наноситься полупрозрачный слой специально подобранного материала. Исследование показало, что предсказываемое теорией возрастание КПД с ростом мощности поглощаемого излучения имеет место лишь до определённого предела. Этот предел определяется наличием конечного сопротивления толщи германия и контактов.

В докладе А. Г. Гольдман приводятся некоторые результаты исследования селеновых фотоэлементов в фотодиодном режиме.

Г. Б. Абдуллаев и М. А. Талиби сообщили о наличии чувствительности *n-p*-переходов, образованных на контакте селена и сернистого кадмия (селеновый выпрямитель с тонким слоем CdS под верхним электродом) к рентгеновым и гамма-лучам.

В. Е. Кожевин и В. Е. Лашкарёв рассказали о проведённом ими исследовании влияния внешнего напряжения, сорта «изолирующей» прокладки и т. п. на величину и знак фото-эдс, измеряемой конденсаторным методом. Возникновение фото-эдс при освещении вполне однородного полупроводника, помещённого в конденсатор, связано с диффузией носителей фототока от передней освещаемой поверхности вглубь полупроводника. При наличии носителей фототока одного знака это приводит к появлению фото-эдс, знак которой связан со знаком носителей и может служить для его определения. Однако, если имеются фотоносители обоих знаков и на поверхности полупроводника существуют запорные или антизапорные слои и соответствующее им искривление зон, то очевидно, что указанный метод определения знака становится непригодным. В последнем случае возникает вентильная или «антивентильная» фото-эдс и её знак будет определяться не столько преимущественным знаком носителей фототока, сколько знаком искривления зон. Теоретически вопрос о влиянии искривления зон и поверхностных состояний на «конденсаторную» фото-эдс в случае «монополярной» и «биполярной» фотопроводимости ранее подробно рассмотрел В. Е. Лашкарёв. В докладе сообщаются результаты экспериментальной проверки соображений, полученных при теоретическом рассмотрении вопроса. Оказалось, что в зависимости от сорта изолирующих прокладок, создающих при плотном контакте с некоторыми полупроводниками то или иное искривление зон, может меняться величина и знак конденсаторной фото-эдс.

Подробные исследования влияния поля на конденсаторную фото-эдс показали, что действие поля наблюдается лишь при прокладках, обладающих заметной проводимостью, и наблюдаемые явления могут

быть в ряде случаев объяснены наложением фото-эдс и фотопроводимости.

В докладе Р. Я. Берлаги, М. А. Румша и Л. П. Стрехова были приведены результаты исследования окисленных слоёв сернистого свинца, способных при освещении генерировать фото-эдс. Впервые распределённая фото-эдс в слоях PbS была обнаружена Сосновским, Старкевичем и Симпсоном на слоях, через которые предварительно пропускался постоянный ток. В доложенной работе такая предварительная обработка не использовалась. Авторы показали, что направленная асимметрия в строении слоёв, необходимая для возникновения распределённой вдоль всего слоя фото-эдс, связана в их случае с текстурированным строением поликристаллических образцов: кристаллики в слое растут при возгонке PbS преимущественно в направлении молекулярного пучка. Наличие направленного вдоль направления молекулярного пучка роста кристалликов доказано авторами электроннографическими и непосредственными электронно-микроскопическими исследованиями. Связь фото-эдс с таким строением слоёв иллюстрируется зависимостью величины и знака фото-эдс от направления светового пучка. При изменении этого направления знак фото-эдс меняется в момент совпадения направлений светового и молекулярного пучка. Возможное объяснение механизма фото-эдс авторы связывают либо с внешним фотоэффектом с освещаемых грани кристалликов, либо с внутренним фотоэффектом и образованием фото-эдс в результате диффузии или на поверхностных *n-p*-переходах. Однако отмечается, что механизм внешнего фотоэффекта вряд ли возможен, так как он противоречит данным по спектральному распределению фото-эдс.

Опыты авторов, повидимому, свидетельствуют о важной роли, которую играют условия на границе между кристалликами в объяснении фотоэлектрических свойств сернисто-свинцовых фотосопротивлений.

В работе А. Л. Рвачёва и А. И. Андриевского исследовано влияние степени восстановления закиси меди на переднестеночную и заднестеночную вентильную фото-эдс меднозакисных фотоэлементов. Показано, что степень восстановления сильно влияет на характер спектрального распределения чувствительности. Существование в спектральном распределении переднестеночной фото-эдс инфракрасной чувствительности авторы связывают с наличием плёнки окиси меди. Это доказывается, в частности, тем, что в поглощении закиси меди, взятой от фотоэлементов с инфракрасной чувствительностью, проявляются особенности, присущие поглощению чистой окиси. Повышение относительной чувствительности в инфракрасной области для заднестеночной фото-эдс объясняется эффектом «фильтрации» света в слое закиси меди. Авторы обнаружили новый максимум спектральной чувствительности заднестеночной фото-эдс у 655 μm .

Два доклада были посвящены внешнему фотоэффекту с полупроводников.

Ю. А. Шуба, исследуя внешний фотоэффект с CdS, обнаружил резкое влияние подсветки в области собственного поглощения на такие величины, как контактный потенциал, квантовый выход и энергию эмиттированных электронов. В опытах автора квантовый выход мог возрастать на порядок, а контактный потенциал уменьшался на 0,2—0,5 эв. Подсветка длинноволновым светом приводила к изменениям обратного характера. Обнаружено, что энергия электронов, эмиттированных из CdS, не зависит от энергии возбуждающих квантов, что автор связывает с экситонным механизмом внешнего фотоэффекта.

П. С. Попов рассказал о результатах исследования внешнего фотоэффекта с сернистого свинца и селенистой меди. В результате измерений были получены данные для расстояния δ между верхом заполненной зоны и уровнем Ферми, а также для фотоэлектронной работы выхода и вычислены термоэлектронные работы выхода. Значения δ менялись от образца к образцу, что, по видимому, связано с изменением содержания примесей. Значения фотоэлектронных работ выхода составили $\sim 4,2$ эв для PbS и $\sim 4,0$ эв для CuSe.

В заключение приведём краткое содержание двух методических докладов.

В докладе А. М. Бонч-Бруевича и Я. И. Имасса был рассмотрен вопрос о возможности эффективного уменьшения инерционности полупроводниковых приёмников излучения (например, болометров) с помощью использования специальной корректирующей электрической цепи. В предлагаемом методе уменьшение инерционности сопровождается увеличением уровня шума и, следовательно, достигается ценой снижения пороговой чувствительности приёмника. Сравнивая метод электрической коррекции с другим известным методом уменьшения инерционности болометров за счёт увеличения теплоотдачи, авторы показывают, что метод электрической коррекции, кроме простоты и гибкости, обладает в некоторых случаях (при спадающем с частотой спектральном распределении флуктуационного напряжения) и большим значением пороговой чувствительности.

В докладе, представленном С. М. Рыбкиным, описан принцип действия и устройство двудискового механического модулятора, позволяющего получать световые импульсы с крутыми фронтами, отделённые длительными промежутками темноты. Модулятор состоит из двух жёстко связанных червячной передачей дисков с секторными вырезами, стоящих на пути светового пучка и вращающихся с разной скоростью. При определённых соотношениях между параметрами дисков фронт световых импульсов определяется быстро вращающимся «формирующим» диском, а время между импульсами медленно вращающимся «запускающим» диском. Приводятся данные

построенного модулятора, дающего световые импульсы длительностью до $\sim 10^{-2}$ сек при фронте $\sim 10^{-5}$ сек и промежутке темноты ~ 2 сек. Модулятор пригоден и для получения одиночных световых импульсов с указанными параметрами.

Работы, проводившиеся в последние годы по исследованию фотоэлектрических и оптических свойств полупроводников и частично отражённые в докладах на «фотоэлектрической» секции, свидетельствуют об определённых успехах, достигнутых в этой области.

Однако необходимо подчеркнуть, что ряд важных вопросов, относящихся к исследованию нестационарных электронных процессов, и, в частности, вопросы внутренней ионизации в полупроводниках под действием радиоактивных излучений, рекомбинации носителей, оптики атомных полупроводников и т. д. разрабатываются ещё недостаточно интенсивно. В решениях конференции подчёркивалась важность значительного усиления исследований в этих направлениях. Очевидна также необходимость серьёзной интенсификации работ в области практического использования полупроводниковых устройств в качестве преобразователей энергии, преобразователей сигналов и детекторов различных излучений.
