

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКСОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ДЕФЕКТАМ КРИСТАЛЛОВ
(Киото, 7—12 сентября 1962 г.)**

I. ВВЕДЕНИЕ

Созыв Международной конференции по дефектам кристаллических решеток, организованной Союзом чистой и прикладной физики при ЮНЕСКО совместно с Японским физическим обществом, отразил то обстоятельство, что принципиальные вопросы физики твердого тела (включая сюда физику металлов, физику полупроводников и физику диэлектриков), а также проблемы практического применения кристаллов (например, осуществление квантовых генераторов или полупроводниковая электроника) неразрывно связаны с изучением природы нарушений структуры кристаллов (дефектов), оказывающих решающее влияние на их электрические, оптические и иные свойства.

Оргкомитет конференции разделил обсуждавшиеся доклады на три группы:

1. Фундаментальные свойства дефектов кристаллических решеток. В эту группу докладов (сессия 1) были вынесены разделы: магнитный резонанс и оптические методы исследования дефектов; электроны и фононы в несовершенных (реальных) решетках; вопросы равновесного состояния кристаллов с дефектами; примесная электропроводность и уровни энергии дефектов в полупроводниках; возникновение и миграции простейших (точечных) дефектов; центры окраски и люминесценция, связанная с этими центрами; непосредственное обнаружение дефектов решетки.

2. Взаимодействие между дефектами кристаллических решеток: а) металлы; б) неметаллические кристаллы.

3. Образование и отжиг дефектов решетки кристаллов. Эта сессия конференции была в значительной мере связана с одним из актуальных вопросов современной физики твердого тела — действием жесткой радиации (т. е. частиц высокой энергии и гамма-излучения) на кристаллы, выяснением природы радиационных нарушений и устойчивости этих нарушений относительно отжига.

Число участников конференции превышало 400 человек, из которых около 200 представляли научно-исследовательские центры Японии. Активное участие в работе конференции приняли СССР, США, Франция, Великобритания, ФРГ, Польша, Чехословакия, Австралия, Индия, Бельгия.

Члены делегации СССР доложили на конференции следующие работы: 1. В. С. Вавилов, А. Ф. Плотников «О дефектах, возникающих в кремнии, подвергнутом облучению быстрыми электронами и нейтронами»; 2. В. С. Вавилов, Н. В. Смирнова, В. А. Чапнин «О дефектах в кремнии, легированном литием и облученном быстрыми электронами»; 3. Е. Г. Швидковский «Влияние ультразвуковых колебаний на дислокационную структуру и внутреннее трение в щелочно-галлоидных кристаллах» и «Дислокационная структура и размножение дислокаций в кадмии»; 4. В. И. Старцев «Образование дефектов кристаллической решетки при двойниковании в кристаллах кальцита».

Кроме того, по просьбе Японского физического общества В. С. Вавилов сделал на заседании секции физики полупроводников этого общества доклад на тему «Радиационные эффекты в германии и кремнии».

Сообщения советских ученых были заслушаны с большим интересом и обсуждались как на конференции, так и в частных беседах после заседаний. В течение всего пребывания в Японии членам советской делегации неизменно оказывался радушный прием и содействие организаторами конференции, в том числе проф. Т. Фудзивара

(Военная академия Иокосука), проф. Р. Хасигути (Токийский университет), проф. А. Кобаяши (Лаборатория связи фирмы «Ниппон»), доктором Е. Мацуура (Токийский университет) и другими. Советская делегация ознакомилась с лабораториями Университета Киото, Института твердого тела в Токио, лабораторией полупроводников фирмы «Ниппон», руководимой проф. А. Кобаяши, а также с лабораторией электронной оптики (JEO), разрабатывающей интересные современные конструкции электронных микроскопов и других приборов, используемых в экспериментальной физике твердого тела.

II. НАУЧНЫЕ ИТОГИ КОНФЕРЕНЦИИ

Исследование физических процессов, связанных с несовершенством (дефектами) структуры кристаллов, является очень молодой областью физики. Бурное развитие работ в этом направлении (если не считать изучение щелочно-галлоидных кристаллов) началось в послевоенные годы и в значительной степени связано с решительными успехами в получении сверхчистых исходных материалов и монокристаллов для нужд полупроводниковой электроники и ядерной энергетики.

В последнее время особенное внимание уделяется вопросу о детальной структуре наиболее простых дефектов (вакансий и междоузельных атомов в окружающей их области искажения кристалла), а также о дислокациях в кристаллах.

Особенно глубокого понимания природы простых точечных дефектов и влияния этих дефектов на электронные процессы удалось достигнуть для монокристаллов такого полупроводника, как кремний. В связи с этим мы рассмотрим далее некоторые из результатов, относящихся именно к кремнию.

В работе Дж. Уоткинса (Дженерал Электрик, США) сведения о вакансиях в монокристаллах кремния были получены методом наблюдения спинового электронного резонанса в образцах, подвергнутых облучению быстрыми электронами при температуре около 40°K . Исследуя ориентационную зависимость сигнала спинового резонанса, Уоткинс пришел к выводу о том, что четыре ближайших соседних атома кремния (решетка типа алмаза) настолько сильно смещаются в сторону вакансии, что разорванные валентные связи перераспределяются и атомы как бы соединяются парно. Сигнал спинового резонанса наблюдается в том случае, когда на «разорванных валентных связях» атомов, окружающих вакансию, находится нечетное число электронов. Оказалось, что при очень низких температурах (ниже 14°K) вакансия представляет собой анизотропный центр, однако при повышении температуры направление (ось) анизотропии не сохраняется и «перескакивает», совпадая то с одной кристаллической осью, например (100), то с другими. Анизотропия при низких температурах, по данным Уоткинса, есть «собственное» свойство вакансии, не требующее присутствия вблизи нее другого дефекта, например междоузельного атома примеси. Характер исчезновения спектра спинового резонанса, связанного с вакансиями при низкотемпературном отжиге в области $140 - 180^\circ \text{K}$, по мнению Уоткинса, указывает на то, что исчезновению вакансий предшествует их диффузионное смещение на большие расстояния. На значительный пробег вакансий указывает то обстоятельство, что присутствие атомов кислорода в кристалле существенно влияет на характер отжига. При больших концентрациях кислорода ($> 10^{18} \text{ см}^{-3}$) отжиг вакансий происходит значительно быстрее, чем при концентрациях кислорода менее 10^{18} см^{-3} . Энергия активации, характеризующая отжиг, в обоих случаях составляет $(0,33 \pm 0,03) \text{ эв}$. В кремнии с высоким удельным сопротивлением и малым содержанием кислорода по мере исчезновения вакансий замечено возрастание концентрации дивакансий.

Новым результатом наблюдений является зависимость подвижности вакансий от их зарядового состояния: оказалось, что подвижность вакансий в кристаллах *N*-типа значительно выше, чем в кристаллах *P*-типа. Согласно данным Уоткинса, в кремнии *N*-типа энергия активации перемещения вакансий составляет всего $0,1 - 0,2 \text{ эв}$.

Следует заметить, что метод спинового резонанса был использован и в такой практически важной области, как раздельное определение концентраций доноров и акцепторов в кремнии (работа Т. Иго, Лаборатория электросвязи корпорации «Ниппон»). Вторым важным направлением, также дающим возможность детального понимания процессов в полупроводниковых кристаллах с дефектами, является исследование оптического (инфракрасного) поглощения и фотоэлектрических явлений. К исследованиям в этой области относятся работы известных ученых: американского ученого проф. Фэна и индийского ученого проф. Рамдаса, выполненные в Университете Пардью (США), работа М. Балканского (Эколь Нормаль, Франция) и работа В. С. Вавилова и А. Ф. Плотникова (ФИАН, СССР).

Новые результаты в работе Фэна и Рамдаса относятся к тонкой структуре вибрационных полос поглощения в кремнии в области $9 - 14 \mu$. Как известно, возникновение *A*-центров в кремнии обусловлено связью сравнительно легкоподвижных вакансий с атомами кислорода. В последнее время было выяснено, что с *A*-центрами связана новая полоса поглощения с максимумом при $11,98 \mu$. В работе Фэна и Рамдаса показано, что интенсивность этой полосы с возрастанием потока нейтронов или быст-

рых электронов стремится к насыщению, т. е. возрастает лишь до определенного значения. Особенно интересно то обстоятельство, что это насыщение не обусловлено истощением атомов кислорода: полоса при 9 μ в момент насыщения убывала лишь до половины первоначальной интенсивности. Поэтому авторы предполагают, что насыщение 11,98 μ полосы — результат отжига радиационных нарушений, имеющего место и в процессе бомбардировки частицами.

Изучение характера появления 11,98 μ -полосы (*A*-центры) привело Фэна и Рамдаса к выводу о том, что уже при 80° К вакансии весьма подвижны в кристалле и за время порядка часов перемещаются на несколько десятков постоянных решетки. Этот вывод вполне согласуется с результатами исследований изменения спектров фотопроводимости после низкотемпературного облучения электронами, проведенного в ФИАН (СССР).

Новые данные о спектре энергетических уровней дефектов в монокристаллах кремния были получены в работе В. С. Вавилова и А. Ф. Плотникова. Измерения спектров фотопроводимости, соответствующих глубоким уровням энергетических дефектов в кремнии, облученном быстрыми электронами и нейтронами, показали, что уже при температуре 100° К за несколько часов после низкотемпературного облучения происходит миграция дефектов, приводящая к возникновению устойчивых ассоциаций, примером которых в первую очередь являются ассоциации вакансий и атомов кислорода (*A*-центры). Было показано, что системы глубоких уровней радиационных нарушений в кремнии, облученном быстрыми электронами и нейтронами, почти совпадают. При больших потоках частиц структура в спектрах фотопроводимости исчезает, однако при концентрациях центров порядка 10^{11} — 10^{13} $см^{-3}$ удается разрешить структуру, соответствующую не только *A*-центрам, но и другим центрам (по-видимому, также ассоциациям точечных дефектов с примесями), которые не удается обнаружить по поглощению или методом электрических измерений (например, эффекта Холла).

В работе М. Балканского (Эколь Нормаль, Франция) и В. Назаревича (Ин-т ядерных исследований, Польша) получены новые данные о спектре инфракрасного поглощения в кремнии, облученном нейтронами. Особенно интересной является интерпретация авторами их результатов вместе с ранее полученными результатами Фэна и Рамдаса.

Известно, что колебания решетки типа алмаза гомеоплярного кристалла (например, германий, кремний) оптически не активны в первом приближении, и искажения периодической структуры, вызванные возникновением дефектов, должны сопровождаться резким возрастанием интенсивности колебательных полос поглощения. Анализ спектров поглощения, проведенный Балканским и Назаревичем, привел их к выводу о том, что три наблюдавшиеся экспериментально полосы соответствуют однофононным процессам; данные об энергиях фононов хорошо согласуются с результатами исследования рассеяния холодных нейтронов (см. табл.).

Положение полосы пог- лощения, $см^{-1}$	Тип колеба- ний решетки	Характеристическая температура фононов °К			
		Балканский, Назаревич	Джонсон (Proc. Phys. Soc. 73, 265 (1959))	Рассеяние холловских ней- тронов	
				Направление <100>	Направление <111>
488	<i>TO</i>	700	695	680±15	700±25
417	<i>LO</i>	600	595	570±25	617±25
332	<i>LA</i>	480	480	570±25	537±25
140	<i>TA</i>		200	209±9	163±8

Поток нейтронов, использованный в работе Балканского и Назаревича, составлял около 10^{19} $см^{-2}$, а относительная концентрация дефектов (вычисленное значение) около 10^{-3} .

Весьма интересные принципиальные возможности исследования взаимодействия дефектов кристалла и примесей дают измерения эффекта Мёссбауэра. Этот эффект обусловлен отсутствием «отдачи» при испускании гамма-кванта атомом, связанным с кристаллом. Благодаря отсутствию «отдачи» в неподвижном или движущемся с малой относительной скоростью поглотителе, содержащем тот же изотоп, может наблюдаться резонансное поглощение гамма-квантов. Изменение скорости движения излучателя и поглотителя позволяет экспериментально изучать необычайно узкие линии (около 10^{-9} эв для изотопа Fe ⁵⁷). Спектр гамма-излучения, которое удается изучать, наблюдая эффект Мёссбауэра, должен зависеть от таких параметров, как

- а) электронная конфигурация вблизи излучателя или поглотителя.
- б) температура, давление и гравитационные поля (релятивистские эффекты).

Линии гамма-спектра могут расщепляться вследствие влияния внутренних магнитных полей или наличия градиентов электрического поля вблизи ядра (квадрупольное взаимодействие).

Ассоциации дефектов и атомов с «мёссбауэровскими» ядрами должны иметь несколько отличные физические параметры гамма-спектра, чем «несвязанные мёссбауэровские ядра» в периодическом кристалле. Американский физик У. Г о н з е р (Атомикс Интернейшенл), доклад которого был посвящен возможности использования эффекта Мёссбауэра для исследования дефектов кристаллов, считает наиболее перспективными следующие направления:

а) Распад ядер «мёссбауэровских изотопов» (β^+ , β^- , -внутренняя конверсия, α -распад, испускание гамма-квантов) с переходом в возбужденное состояние с последующим гамма-переходом в устойчивое состояние. В этом случае можно пытаться проследить за перестройкой электронных оболочек за время существования возбужденного состояния ($10^{-12} \div 10^{-7}$ сек), за эффектами «точечного разогрева» (thermal spikes) или явлениями отдачи атомов при первой ступени процесса.

б) Добиваясь создания комплексов мёссбауэровских ядер и иных дефектов в излучателе или поглотителе, можно получить сведения об этих дефектах. Надо заметить, однако, что до настоящего времени экспериментальные работы в этой области крайне затруднены малым «набором» подходящих изотопов.

Ряд теоретических работ, обсуждавшихся на конференции, был посвящен анализу влияния дефектов кристаллической решетки на спектр ее колебаний. Сюда следует отнести работу Дж. К р у м х а н з л а (Корнелльский университет, США), анализирующего «локализованный» спектр колебаний, связанный с «массовым» дефектом без учета изменений кривых потенциальной энергии вблизи узла, занятого атомом с аномальной массой. Этому же вопросу были посвящены работы Дж. М а х а н т и (Технологический институт Канпур, Индия) и Р. Р у б и н а (Нац. Бюро стандартов, США). Первые две из упоминавшихся работ содержат математический анализ для некоторых моделей; в работе Рубина, помимо этого, проведены количественные расчеты изотопического эффекта для одномерной решетки (цепочки) из 200 атомов, имеющих две различные массы.

Ряд теоретических работ, включенных в эту же секцию, был посвящен вопросам рассеяния электронов и фононов дефектами в металлах, а также в неметаллических кристаллах.

В последнем случае осложняющие эффекты рассеяния фононов электронами иногда исключаются. Экспериментальный метод изучения рассеяния фононов дефектами кристалла заключается в измерении теплопроводности в широком интервале температур (например, 1—1000° К). Вопросу о влиянии дефектов на теплопроводность неметаллических кристаллов был посвящен доклад проф. Р. С и р о у л а и Р. П о л я (Корнелльский университет, США). Особенное внимание в работах, о которых сообщал Спроул, было обращено на чистоту и совершенство исследуемых кристаллов.

Упомянем о некоторых из интересных экспериментов, поставленных в Корнелльском университете:

а) Проверка теории рассеяния фононов с использованием изотопического эффекта (изотопы с «необычной» массой представляют собою дефект периодической решетки).

б) Исследование рассеяния фононов дислокациями в кристаллах CaF_2 и LiF . Обнаружено, что в CaF_2 рассеяние имеет совершенно различный характер в случаях, когда направление теплового потока параллельно или, с другой стороны, перпендикулярно к направлению (оси) краевых дислокаций.

в) Измерение теплопроводности при низких температурах как средство при изучении процессов отжига пластически деформированных кристаллов NaCl и KCl .

г) Работа по исследованию рассеяния фононов коллоидальными дефектами (серебро и щелочные металлы в щелочно-галогидных кристаллах). В этом случае измерения теплопроводности удается непосредственно связать с независимыми данными измерений оптического поглощения и рассеяния, а также электронно-микроскопическими данными.

В работе японских ученых С. И ш и о к а и Х. С у з у к и (Японский Ин-т атомной энергии) также содержатся результаты исследования рассеяния фононов дислокациями. Обнаружено, что в кристаллах NaCl сечение рассеяния фононов примерно в 10^3 раз больше, чем теоретическое значение, вычисленное Клемесом. Японские ученые объяснили свои результаты, учитывая колебания дислокации, которые приводят к конечной вероятности поглощения и испускания фононов.

Особый интерес представляют исследования гальваномагнитных эффектов в граничном слое раздела в специально выращенном бикристалле германия (И. Хамакава и Дж. Ямагучи, Инженерный ф-т университета Осака, Япония). Весьма вероятно, что идя по этому направлению, удастся проверить теорию «свободных связей» атомов, граничащих с дислокацией, а также представление об «одномерных зонах» дислокаций.

Решению этого же вопроса была посвящена работа Х. К в е й с с е р а (Шокли-транзистор, США), исследовавшего фотоэлектрические явления в бикристаллах крем-

ния с различным содержанием кислорода. Корреляция знака фото-э. д. с., возникающей между областями бикристалла и содержанием кислорода в кремнии (а также термообработкой кристаллов перед измерениями фото-э. д. с.), показывает, что, в отличие от кристаллов германия, где у границы зерен всегда имеет место p -проводимость, в кремнии характер энергетических уровней, доминирующих вблизи дислокаций, определяется в первую очередь «примесной атмосферой» кислорода. Таким образом, в монокристаллах кремния, содержащих кислород, простая модель «свободных связей» (dangling bonds) вблизи дислокации, по-видимому, неприменима.

Отдельные сессии конференции были посвящены вопросам равновесия и энергетических уровней дефектов в соединениях. В работе О. К и ф е, И. Э б и с у з а к и и К. М у р а (университет Индиана, США) проведены новые тщательные исследования простых дефектов (катионных вакансий) в монокристаллах закисы меди. По-видимому, авторам удалось учесть поверхностные эффекты и получить надежные данные об энергетических уровнях вакансий, а также о процессе диффузии кислорода в Cu_2O . Опыты с монокристаллами, обогащенными изотопом O^{18} , позволили установить вибрационную природу полос поглощения в инфракрасной области; ранее эти полосы связывали с дефектами.

Работа Дж. Б е к к е р а и У. Х о с л е р а (Нац. Бюро стандартов, США) посвящена вопросу об энергетических уровнях дефектов и электропроводности рутила (TiO_2), обусловленной миграцией электронов с дефекта на дефект.

Значительный интерес вызвало сообщение японских ученых А. К о б а я ш и, К. С у г и я м а и Т. И н а м у р а (Лаборатория связи «Ниппон», Токио), исследовавших влияние деформации монокристаллов германия на примесную электропроводность, обусловленную мелкими донорными уровнями (Sb и As). Волновые функции ls -мультиплетных состояний мелких доноров в германии сильно видоизменяются при растяжении кристалла, например, вдоль оси $\langle 111 \rangle$. Примесная электропроводность, соответствующая перекрытию волновых функций, сильно зависит от растяжения или сжатия кристалла. А. Кобаяши и др. изучали анизотропию пьезоэффекта, коэффициента Холла и магнеторезистивного эффекта и обнаружили ориентационные зависимости, во многих чертах соответствующие предсказаниям теории.

Около одной четверти докладов, обсуждавшихся на конференции, было связано с теорией и экспериментальными исследованиями радиационных нарушений в кристаллах, возникающих под действием нейтронов, гамма-излучения и заряженных частиц высокой энергии. Некоторые из работ, посвященных этому вопросу, уже упоминались выше. Следует заметить, что в особенности в США проблеме радиационных дефектов в металлах и полупроводниках уделяется все большее внимание.

Обращают на себя внимание сложные расчеты для трехмерных моделей, проводимые в Центре ядерных исследований (Брукхэйвен) под руководством Дж. Динеса и Дж. Винъярда, широко использующих вычислительную технику. Несомненный интерес представляет теоретическая работа Дж. Б р и н к м е н а (США), в которой для объяснения расхождений между более ранними «каскадными» теориями и данными эксперимента вводится учет взаимодействия возникающих при развитии каскада соударений пар Френкеля (вакансий — междоузельных атомов). Значительное внимание уделяется роли так называемых фокусированных соударений вдоль определенных кристаллографических направлений, которые могут существенно влиять на пространственное распределение радиационных дефектов.

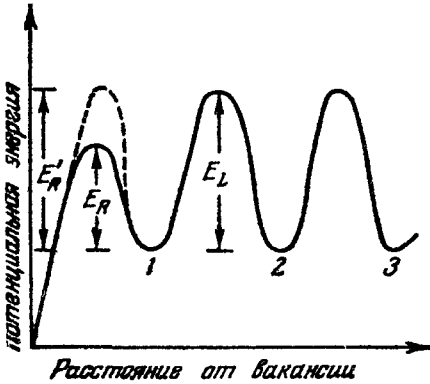
Среди экспериментальных исследований радиационных нарушений выделяется определение размеров «тепловых клиньев», возникающих в некоторых упорядоченных сплавах (например Pt_3Fe) при облучении быстрыми нейтронами (Дж. Пирси, Компанья атомной энергии, Канада).

Значительное число работ, как и в предыдущие годы, посвящено вопросу о механизме возникновения, природе и энергетических уровнях радиационных дефектов в монокристаллах полупроводников, в первую очередь, германия и кремния. Остановимся несколько подробнее на новых результатах Э. К л о н т ц а и Дж. М а к-К е я (университет Пардью, США), исследовавших возникновение радиационных дефектов в германии, облучаемых электронами при низких температурах (от $10^\circ K$).

В случае малых доз облучения $1,1 Mev$ электронами, почти все возникающие дефекты отжигаются при нагреве до $65^\circ K$. Авторы работы условно назвали эти дефекты первичными. При возрастании дозы (интегрального потока) электронов относительное число первичных дефектов убывает, но одновременно с этим появляются иные, более устойчивые дефекты, не исчезающие при нагреве до $120^\circ K$. При еще больших дозах возникает новый тип дефектов, вновь имеющих малую температурную устойчивость и исчезающих при нагреве до $35^\circ K$. Метод, позволивший разделить типы радиационных нарушений, состоял в измерениях электропроводности и эффекта Холла при изохронном отжиге.

По мнению Клонтца и Мак-Кея, первичные дефекты представляют собою метастабильную пару вакансии — междоузельный атом. Гипотеза о существовании таких пар выдвигалась Вертгеймом и авторами доклада для объяснения аномального, на первый взгляд, возрастания вероятности возникновения дефектов с температурой, при

которой проводится облучение. Качественная схема предлагаемой модели метастабильной пары приводится на рисунке, где изображена зависимость потенциальной энергии смещенного атома от расстояния до пустого узла (вакансии) после релаксации решетки. До того как пара Френкеля захватила электрон, барьер E_R , препятствующий исчезновению дефекта, низок. Барьер после захвата электрона изображен пунктиром. Минимум 1 соответствует метастабильному состоянию дефекта, минимумы 2, 3 и т. д. — устойчивым состояниям. Освобождение захваченного электрона в результате освещения, бомбардировки электронами малой энергии или термического возбуждения снижает барьер вновь и ускоряет (облегчает) исчезновение дефекта. Таким образом, энергия активации, характеризующая восстановление дефектов, соответствует энергии, необходимой для освобождения захваченного электрона.



При облучении электронами с энергией около 1 Mev некоторые из смещенных атомов получают достаточную энергию для перевода во 2 и т. д. максимумы. Эти дефекты более устойчивы.

Эффективность возникновения «устойчивых» дефектов должна убывать с концентрацией свободных электронов, которые могут быть захвачены. В германии P -типа, облучаемом при низкой температуре, таких электронов очень мало. Опыт показывает, что эффективность введения дефектов в этом случае действительно мала и составляет менее 1% эффективности для N -германия.

Ионизирующее действие быстрых электронов создает большую концентрацию свободных электронов; вероятность их захвата метастабильным дефектом растет, и эффективность введения устойчивых дефектов увеличивается. Этот эффект особенно заметен при сравнении результатов бомбардировки пучком постоянной интенсивности и импульсами большой плотности тока.

Весьма интересной с методической точки зрения представляется работа французских ученых Ж. П ф и с т е р а и П. Б а р ю ш а (Эколь Нормаль), исследовавших воздействие радиации (протонная бомбардировка) на диффузию примесей в кремнии с помощью весьма чувствительных методов (смещение $P-N$ -перехода в кристалле).

В работе японских ученых А. Х и р а к и и Т. С у и т а (университет Осака) сделана попытка исследовать влияние вакансий, введенных закалкой в монокристаллы германия, на электрические свойства. По утверждению авторов, вакансиям соответствуют мелкие акцепторные уровни, удаленные на $0,02 \text{ эв}$ от валентной зоны. Результаты, несмотря на тщательность подготовки образцов и контрольные измерения содержания таких примесей, как медь, по нашему мнению, нельзя считать окончательными, но работа в этом направлении, с привлечением независимых методов исследования, должна в будущем дать принципиально важные сведения.

III. ПОСЕЩЕНИЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЦЕНТРОВ ЯПОНИИ СОВЕТСКОЙ ДЕЛЕГАЦИЕЙ

Работы в области экспериментальной физики твердого тела, в первую очередь физики полупроводников, проводятся в Японии на весьма высоком уровне, с использованием первоклассного оборудования, как правило (за крайне редкими исключениями) изготовленного японскими фирмами.

Среди аппаратуры, используемой в важнейшей, первой стадии исследований — выращивании монокристаллов, следует отметить электронные управляющие устройства для контроля температуры и мощности вакуумных печей фирмы Kokusai, позволяющие поддерживать температуру с точностью $\pm 1^\circ$ в области до 1600°C . Интенсивно ведется работа по получению дендритных лент германия и кремния и по синтезу новых полупроводниковых соединений. Обращают на себя внимание магниты, позволяющие поддерживать в большом зазоре (примерно 70 мм) однородное стационарное поле до $40\,000 \text{ гаусс}$. В настоящее время готовится серийный выпуск сверхпроводящих магнитов, наиболее удобных в ряде случаев в работах по физике полупроводников.

Как в лаборатории «Нишпон», так и в Институте физики твердого тела широко ведутся работы с использованием жидкого гелия и современной микроволновой техники (спиновый электронный резонанс). Лабораторные корпуса, построенные за последние 5—6 лет, имеют установки для кондиционирования воздуха. Экспериментальные установки, разработанные японскими учеными, часто содержат оригинальные особен-

ности. Это можно сказать, в частности, относительно устройств для измерений эффектов анизотропии в сжатых или растянутых кристаллах полупроводников.

По утверждению японских ученых, в последнее время имеется тенденция к значительному расширению работ по исследованию электролюминесценции и фотопроводимости в полупроводниках. В течение последних лет в фирме «Ниппон», а также и в других крупных фирмах, например «Тошиба», «Сони», связанных с массовым производством полупроводниковой аппаратуры, возникли отделы фундаментальных исследований, аналогичные соответствующим отделам лабораторий таких фирм, как «General Electric» или «Bell» в США, и занятые вопросами, связанными с дальними перспективами практических применений (на 5—10 лет вперед) или с выяснением принципиальных проблем, важных в общей теории полупроводников.

Некоторые из работ, проводимых в лаборатории «Ниппон», уже упоминались в связи с докладами на конференции. Среди работ, не включенных в программу Конференции, следует отметить исследование принципов действия квантовых микроволновых генераторов, параметрических усилителей, а также исследования магнитных свойств кристаллов. Японские ученые живо интересуются последними достижениями науки в СССР, но испытывают большие трудности с переводом работ, опубликованных на русском языке. Издаваемые в США переводы основных советских журналов запаздывают на 4—5 месяцев.

В. С. Вавилов

