



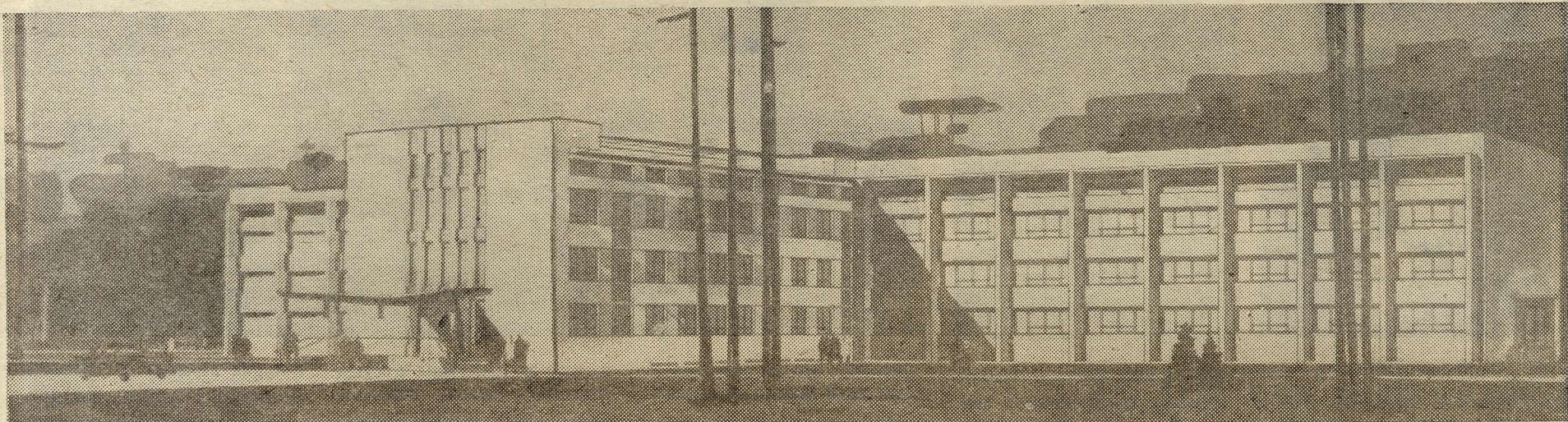
Пролетарии всех стран, соединяйтесь!

ЗА НАУКУ В СИБИРИ

ОРГАН
ПРЕЗИДИУМА
И МЕСТНОГО КОМИТЕТА
ПРОФСОЮЗА СО АН
СССР.

Год издания 8-й.
№ 3 (381).
15 января 1969 г.
СРЕДА.
Цена 4 коп.

НОВЫЙ КОРПУС ИНСТИТУТА



ДЕНЬ НАУКИ— ВТОРОЙ

ОТЧИТЫВАЕТСЯ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

В Академгородке продолжаются Дни науки, учрежденные президиумом СО АН и Советским райкомом КПСС.

Сегодня День науки — второй. Его проводят ученые Института физики полупроводников СО АН.

Известно, что полупроводники, проникая во многие области науки и техники, приобретают все большее значение. Они охватили уже все вопросы теории твердого тела и вызвали к жизни ряд новых производств. Полупроводниковые приборы начинают применяться не только в радиотехнике, но и автоматике, даже в энергетике. Быстрый рост и новизна дела требуют лучшего знакомства с полупроводниками и их свойствами не только физиков, но и инженеров и специалистов смежных профессий.

Этим определяется значение сегодняшнего Дня науки. Ученые института выступят с тематическими докладами на предприятиях, в научно-исследовательских и учебных институтах, техникумах.

15 декабря в 19 часов в Доме ученых состоится пресс-конференция с ведущими учеными института.

Специальные стенды в фойе Дома ученых расскажут об истории института, деятельности его лабораторий.

На выставке будут представлены книги и оттиски, авторами которых являются сотрудники института.

Специальная стенная газета и любительские кинофильмы расскажут о работе и отдыхе сотрудников.

Итак, еще один День науки...

В современных исследованиях по физике полупроводников применяются разнообразные методики, уникальные установки и даже ускорители частиц. С их помощью изучается стойкость полупроводников в радиационных полях и направленно изменяются свойства кристаллов.

Фото А. Зубцова.

Белоснежное здание среди зеленых сосен. Огромные окна. Тишина. Это новый корпус Института физики полупроводников для сверхчистых работ. Не все старожилы Академгородка знают, где он находится. Его расположение в глубине леса — не прихоть, а производственная необходимость.

В последние годы все чаще приходится слышать термин «полупроводниковая чистота». Некий материал, например, германий, очищается физическими методами (зонная плавка...) до чистоты, недоступной обычным методам. Малейшее загрязнение, и все нужно начинать сначала. И при проведении экспериментов на поверхности полупроводников, и на тонких полупроводниковых пленках необходимо создать такие условия, чтобы даже отдельные пылинки не могли попасть на объект исследования, который часто сам сравним с размером этой пылинки.

Построенный специализированный корпус герметически отделен от наружного воздуха пятью рядами стекла. В него подается очищенный особыми фильтрами воздух. Специальные зональные калориферы устанавливают необходимый климат в каждой комнате. Сжатый воздух, технологические газы подаются в каждую комнату централизованно тщательно очищенные. Вода многократно очищается сначала перегонкой, затем пропусканием через денонизующие смолы. Из лабораторий изгнаны сильноточные контакты, которые, образуя дугу при работе, могут загрязнить атмосферу комнаты металлическими ионами. Стекланные (основные материалы в корпусе: нержавеющая сталь, пластик, стекло) двери, белоснежные полированные стены и потолок, пластиковый пол — все для борьбы с пылью. Чтобы не заносить ее извне, сотрудники будут надевать чистую обувь, спецочки и шапочки из лавсанового полотна. При входе в корпус придется принять двухразовый воздушный душ, в корпусе нельзя будет курить, пользоваться косметикой. Стоянка автомашин отнесена на большое расстояние от корпуса и отделена от него перелеском.

Одним из основных отличий этого корпуса от подобных в нашей стране и за рубежом является возможность отдохнуть взгляду на красоту окружающего леса. Лаборатории корпуса, при тщательной герметизации, имеют естественное освещение.

Корпус спроектирован Новосибирским отделением ГИПРОНИИ, возвели его строители Сибкадемстроя.

Большую работу провело Управление капитального строительства СО АН СССР по снабжению стройки дефицитными материалами и специализированным оборудованием. В последнем вопросе большую помощь оказало нам Управление материально-технического снабжения СО АН СССР.

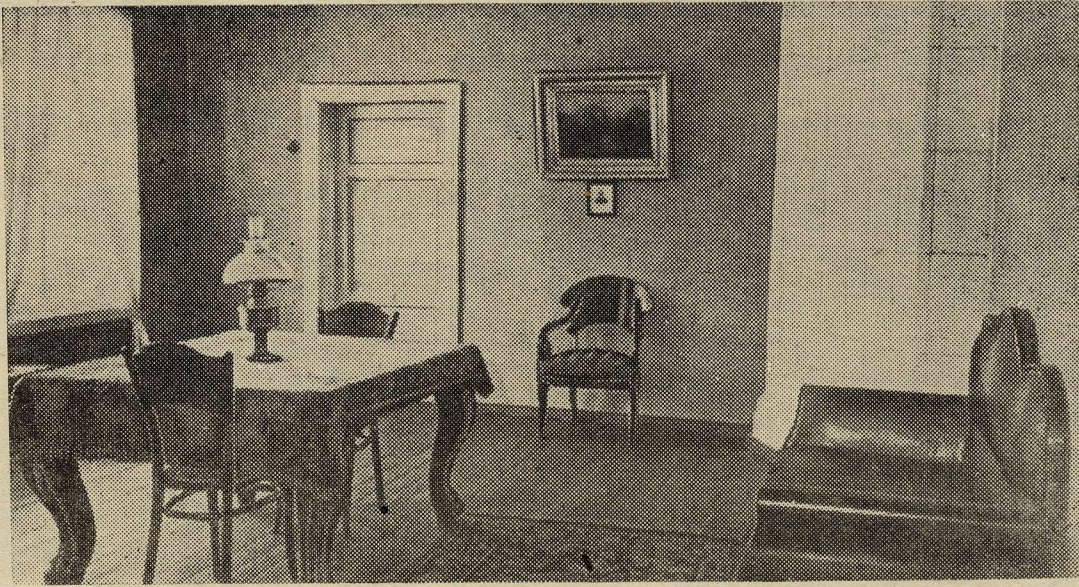
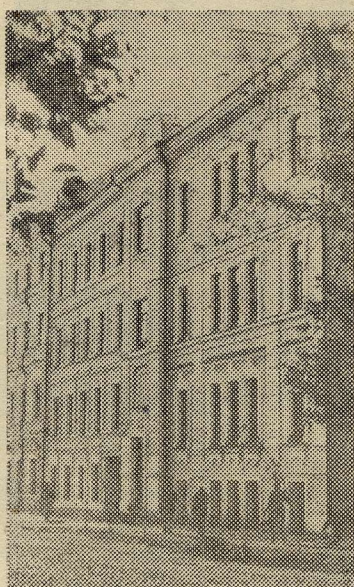
Коллектив лабораторий, исследующих рост кристаллов и пленок полупроводников, а также явления на поверхности полупроводников с нетерпением ожидает переезда в новое здание.

И. НЕИЗВЕСТНЫЙ,
заместитель директора ИФП СО
АН СССР.

НА СНИМКЕ: лабораторный термостатированный корпус Института физики полупроводников.

К 100-летию
со дня рождения
В. И. ЛЕНИНА

ПОДГОТОВКА К ИЗДАНИЮ ОБЩЕРУССКОЙ НЕЛЕГАЛЬНОЙ ГАЗЕТЫ



29 января 1900 года кончился срок сибирской ссылки Ленина. В тот же день он с семьей покинул Шушенское. Надежда Константиновна остановилась в Уфе, где должна была еще год отбывать ссылку.

Владимиру Ильичу было запрещено после ссылки проживать в Петербурге и Москве, во

всех университетских городах и крупных промышленных центрах. Но революционная работа требовала быть ближе к Петербургу. И Ленин решает поселиться в Пскове. По дороге из ссылки Ильич заехал в Уфу, посетил Москву и Петербург. Здесь он встречался с местными революционерами, вел с ними переговоры относительно

издания и транспортировки общерусской нелегальной газеты.

Ленин, еще будучи в ссылке, в Шушенском, всесторонне продумал план создания революционной пролетарской партии. В ряде статей — «Наша программа», «Наша ближайшая задача», «Насущный вопрос» — он подробно изложил этот план. Для того, чтобы русский рабочий класс смог выполнить свои исторические задачи, необходимо было, по мысли Ленина, ликвидировать разобщенность марксистских организаций, объединить их в единую пролетарскую партию, которая поведет массы на борьбу с самодержавием и капитализмом. Владимир Ильич неоднократно подчеркивал, что слабостью социал-демократического движения в России является его неорганизованность.

Но в деле создания партии нового типа не было готовых образцов. Нужно было идти самостоятельными путями. И Ленин указал эти пути. Он считал, что важнейшим орудием идейного и организационного сплочения русской социал-демократии в тогдашних условиях должна явиться общерусская нелегальная политическая газета.

Осуществляя намеченный план, Владимир Ильич по окончании ссылки несколько месяцев вел напряженную работу. В Псков он прибыл 26 февраля

и сразу же приступил к осуществлению своего тщательно продуманного плана издания общерусской политической нелегальной газеты. Предстояло много дел — надо было связаться с социал-демократическими организациями и отдельными товарищами, договориться с ними о поддержке газеты, требовалось решить финансовые вопросы, связанные с ее изданием. Сюда к нему приезжали социал-демократы из разных городов. Вскоре на конспиративном совещании обсуждался написанный Лениным проект программного заявления редакции будущей газеты. Тут был окончательно решен вопрос об издании газеты «Искра» и журнала «Заря». В проекте заявления подчеркивалось, что русской социал-демократии «пора уже выйти на дорогу открытой проповеди социализма, на дорогу открытой политической борьбы, — и создание общерусского социал-демократического органа должно быть первым шагом на этом пути».

В мае 1900 года В. И. Ленин пробыл неделю у матери в Подольске, Московской губернии, где она проживала в то время. Все эти дни были заполнены встречами с единомышленниками, которые из разных мест приезжали сюда, и Ленин улаживался с ними о шифре, корреспонденциях, о содействии газете. С этой же целью Владимир Ильич в тайне от

полиции побывал в Нижнем Новгороде, Самаре, Сызрани, которые посетил по пути, когда вместе с матерью и старшей сестрой навещал Надежду Константиновну в Уфе.

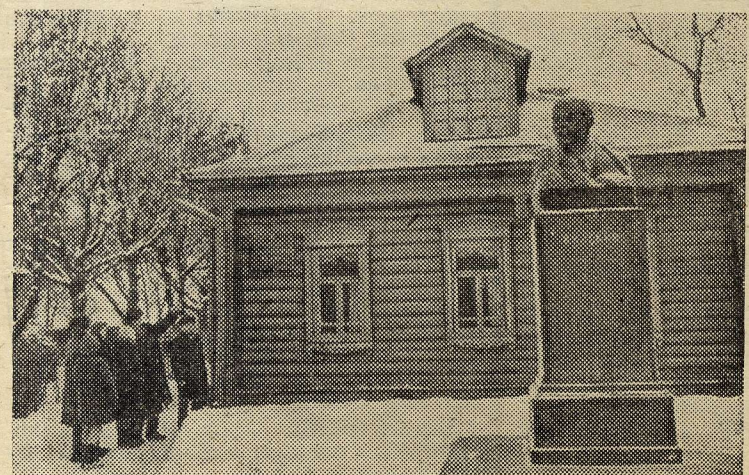
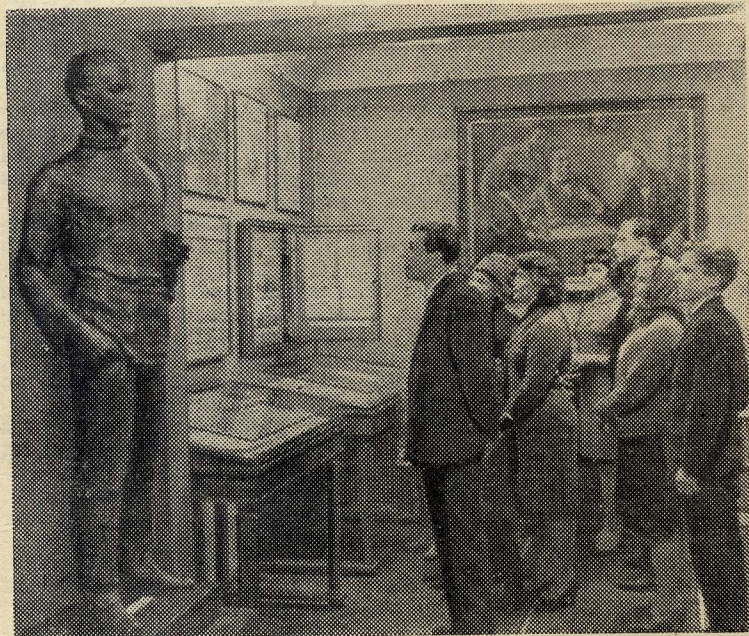
Ленин побывал в Риге для установления связи с латышскими социал-демократами. Встреча с ними состоялась, и рижане были восхищены Лениным и развернутым им планом.

Все это время Владимир Ильич находился под негласным надзором полиции. За его деятельностью следили неотступно, ибо царизм видел в революционере Ленине своего врага. (Недаром небезызвестный жандармский полковник Зубатов потом секретно писал своему начальству, что «крупнее Ульянова сейчас в революции нет никого». И предлагал организовать убийство Ленина).

Дальнейшее пребывание Владимира Ильича в России становилось все более и более опасным. К тому же издавать в России задуманную газету было невозможно из-за полицейских преследований. Ввиду этого было решено выпускать газету за границей. Проведя всю необходимую подготовительную работу, Владимир Ильич 16 июля 1900 года выехал за границу.

Началась первая эмиграция В. И. Ленина. Она длилась свыше пяти лет.

Фотохроника ТАСС.



На снимках (вверху):

● В. И. Ленин. Фото 1900 года.

● Псков. Дом № 3 по улице Ленина. В этом доме с конца марта по 1 июня 1900 года после окончания трехлетней сибирской ссылки жил и работал В. И. Ленин.

● Псков. Комната в Доме музея «Искры», где происходило нелегальное совещание русских социал-демократов по вопросу издания газеты «Искра» и журнала «Заря».

На снимках слева (сверху вниз):

● В мемориальном музее В. И. Ленина в Риге.

Весной 1900 года здесь останавливался Владимир Ильич, приехав в Ригу для налаживания связи с латышскими социал-демократами и организации транспортировки газеты «Искра».

В музее собрано много материалов, рассказывающих о жизни и деятельности В. И. Ленина.

● Родные В. И. Ленина, которые жили в Подольске (слева направо): М. Т. Елизаров, М. А. Ульянова, Д. И. Ульянов, М. И. Ульянова.

● Подольск. Экскурсия у Дома-музея В. И. Ленина. Владимир Ильич приезжал в Подольск летом 1900 года.

ДЕНЬ НАУКИ— ВТОРОЙ

В наше время — время быстрого научно-технического прогресса новые отрасли науки рождаются необычайно быстро. По сравнению с совсем молодыми научными направлениями — кибернетикой, бионикой, квантовой радиофизикой и многими другими — физика полупроводников представляется наукой с весьма солидным трудовым стажем. В то же время, в абсолютном исчислении времени, она еще очень молода. Самая первая в мире монография под названием «Электронные полупроводники», объемом всего в 92 страницы, была издана академиком А. Ф. Иоффе в 1933 году. Первая самостоятельная в организационном отношении лаборатория полупроводников была создана им же в 1952 году, а в 1954 году преобразована в Институт полупроводников Академии наук СССР.

Все эти даты, даже с точки зрения совсем молодых людей, воспринимаются не столь уж отдаленными. И в то же время, трудно себе представить современную технику без полупроводниковых устройств и систем. Очень многие технические достижения, определяющие современный уровень цивилизации, в той или иной мере связаны с использованием полупроводников, а прогресс целого ряда технических наук, таких, как кибернетика, вычислительная техника, космонавтика, был бы, видимо, и невозможен без полупроводников. Физика полупроводников развивалась параллельно, а чаще даже и с заметным отставанием по отношению к развитию своей дочерней науки — полупроводниковой электроники. Этим в значительной мере определялась резкая неравномерность в развитии полупроводниковой электроники. Последняя каждый раз делала качественный скачок, как только физике полупроводников удавалось ее догнать и хотя бы в какой-то мере разрешить те принципиальные научные проблемы, которые сдерживали дальнейшее развитие полупроводниковой электроники. Это не значит, конечно, что на пути развития полупроводниковой электроники не вставали чисто технологические трудности, однако, как правило, для их разрешения или обхода вмешательство физики полупроводников было тоже необходимо.

С позиций наших нынешних знаний и опыта трудно понять причины почти систематического отставания физики полупроводников от чрезвычайно быстрого роста запросов к ней со стороны полупроводниковой электроники. Этот анализ тем более важен, что, как мы увидим в дальнейшем, практически то же положение сохраняется и сейчас. Таких причин по сути дела две. Первая заключается в том, что продукция полупроводниковой электроники всегда оказывалась столь важной для технического прогресса, что приходилось ее выпускать, хотя технология ее изготовления, а зачастую даже и особенности ее работы были далеко не ясны в деталях. Но до выяснения ли этих деталей было, например, в сороковых годах, когда без полупроводниковых детекторов сверхвысоких частот не могли работать радиолокаторы? Или в пятидесятых годах, когда появление транзисторов позволяло на порядки уменьшить габариты, вес и расход энергии питания радиоаппаратуры? При этом, даже когда впоследствии выяснились, существенные недостатки полупроводниковых приборов, поначалу представлялось, что они могут быть преодолены некоторыми усовершенствованиями конструкции или технологии, но не потребуют серьезных физических исследований. А когда, наконец, разработчики полупроводниковых приборов убеждались в необходимости таких исследований, оказывалось, что физика полупроводников не готова к ним, поскольку не имеет необходимой для этого материальной базы.

И вот тут, в совершенно явном виде выступает вторая причина отставания физики полупроводников. Она заключается в недооценке того обстоятельства, что проблема полупроводников является очень «дорогой» проблемой. Она дает большие проценты на вложенный в нее капитал.

Для современных полупроводниковых лабораторий совершенно необходимы: сверхнизкие температуры, сильные магнитные поля, сверхвысокий вакуум, различные излучения от самых жестких до далекого инфракрасного, потоки электронов и ионов разных энергий, самые изощренные методы оптической спектроскопии, радиоспектроскопия, масс-спектрометрия, рентгеновские и электронно-микроскопические методы дефектоскопии, техника ультразвука и техника сверхвысоких частот и многое другое.

При этом большинство названных методов используется на пределе их возможностей, так как необходимо почувствовать примесь порядка миллионных долей процента и менее, поверхностные загрязнения в тысячные доли монокристаллического слоя, изменения структуры и свойств переходных слоев толщиной менее микрометра и т. п.

Еще сложней дела обстоят в исследовании физических основ микроэлектроники, на которых специализируется полупроводниковая часть нашего института. Поскольку сам термин «микроэлектроника» не имеет пока еще вполне однозначного определения, начнем с пояснения того содержания, которое мы в него вкладываем. Под полупроводниковой микроэлектроникой следует, как нам представляется, по-

нимать научно-техническое направление, разрабатывающее физические идеи и методы создания высоконадежных элементов, блоков и целых электронных систем в микроисполнении, способных выполнять определенные счетные, логические или управляющие функции. Упоминание о микроисполнении этих устройств имеет вполне определенный смысл. Оно не только и даже не столько подчеркивает малые их размеры, сколько указывает на новый принцип их построения, отличный от путей обычной электроники. Если последняя конструирует свои схемы из отдельных деталей: сопротивлений, конденсаторов,

А. В. РЖАНОВ,
директор Института физики полупроводников,
член-корреспондент АН СССР.
С. Г. РАУТИАН,
заведующий лабораторией, доктор
физико-математических наук.

БОЛЬШОЙ СТАЖ МОЛОДОЙ НАУКИ

индуктивностей и активных элементов — электронных ламп или транзисторов, то микроэлектроника в основном должна идти другим путем. Используя какое-либо новое явление, например, возникновение неустойчивостей при прохождении тока через полупроводник, она создает блоки генераторов электромагнитных колебаний, которые вообще не делятся на детали, поскольку такой блок в простейшем случае представляет собой кусочек полупроводника с двумя контактами к нему. В этом смысле определение микроэлектроники включает в себя и понятие функциональной электроники, основой которого является неединственность устройства на обычные детали электроники. Очевидно, что значения физики полупроводников для микроэлектроники много больше, чем для обычной полупроводниковой электроники. В то же время и трудности, встающие при решении задач физических основ микроэлектроники, более фундаментальны.

Начнем с того, что уже отработанные в известной мере (хотя далеко и не полностью) методы получения совершенных кристаллов полупроводников оказываются малоприменимыми для микроэлектроники. Действительно, нужные для ее целей слои и пленки толщиной в несколько микрон трудно отрезать от массивного кристалла, а если, идя на колоссальные потери материала, это даже и можно сделать, то такой слой надо на что-то прикрепить. В связи с этим первостепенной задачей современного этапа микроэлектроники является разработка новых методов получения тонких слоев полупроводников на неких подложках, желательно диэлектрических. В институте есть определенные успехи в этом направлении, причем интересно отметить, что в ряде случаев, новыми методами удается выращивать слои полупроводников более чистые и совершенные, чем массивные монокристаллы, полученные традиционными методами выращивания из расплава. Так в институте получены слои германия с содержанием остаточных примесей менее стомиллионной доли процента, очень

чистые слои арсенида галлия, слои германия и кремния на изолирующих подложках.

Следующая группа задач состоит в исследовании свойств тонких слоев. Наряду с чисто измерительными трудностями, с которыми тоже приходится считаться, когда речь идет об особо тонких слоях, основную трудность представляет теоретическое осмысливание результатов измерений. Сейчас все шире начинает распространяться представление, что тонкие слои и пленки представляют собой специфическое состояние вещества, в ряде отношений почти столь же отличное от массивного кристалла, как твердое тело от жидкости того же химического состава. Исследованиями последних лет выяснено, например, что взаимное расположение верхних слоев атомов или ионов кристалла существенно отличается от их расположения в объеме, а степень симметрии и вид элементарной ячейки поверхностной структуры резко отличны от объемных. Существование так называемых поверхностных состояний для электронов и процессов рассеяния электронов от поверхности приводит к тому, что удельная электропроводность тонких слоев при прочих равных условиях может отличаться от удельной электропроводности массивных кристаллов на много порядков величины. При особо малых толщинах, сравнимых с дебройлевской длиной волны электрона, проявляются квантовые эффекты, когда электропроводность начинает то возрастать, то уменьшаться при монотонном уменьшении толщины. Короче говоря, все электрические, оптические, тепловые и другие свойства полупроводников начинают зависеть, кроме всего прочего, еще и от толщины слоя полупроводника. Изучение этих зависимостей представляет особый интерес для микроэлектроники, но легко понять, что их установление является делом чрезвычайно трудным.

Как уже отмечалось, изучение электронных процессов в самих слоях полупроводников дали уже определенные выходы в микроэлектронику. Однако одно из основных направлений современной микроэлектроники связано с изучением свойств различных структур, в том числе и так называемых МДП-структур, представляющих собой комбинацию тонких слоев металла (М), диэлектрика (Д) и полупроводника (П). Такие структуры на основе кремния уже довольно давно исследуются у нас и за рубежом. Показано, что на их основе могут быть созданы весьма перспективные элементы и блоки самого различного назначения. Основным препятствием для их практического применения является недостаточная изученность границы раздела между полупроводником и диэлектриком, вследствие чего ее свойства оказываются плохо управляемыми и недостаточно стабильными. Сложность этой проблемы заключается в том, что основные свойства этой границы определяются строением нескольких монокристаллов полупроводника переходя в структуру слоя диэлектрика. В то же время, ее свойства зависят, например, от рельефа поверхности самого полупроводника, который должен быть минимальным и во всяком случае не превышать сотых долей микрона. Зависят они и от толщины и структуры слоя диэлектрика, который не может быть слишком тонким, т. к. иначе он не сможет защитить границу от внешних условий и т. д. Хотя наш институт и называется Институтом физики полупроводников, исторически так получилось, что в его стенах разрабатывается еще одна научная проблема, к полупроводникам отношения не имеющая. Речь идет о газовых оптических генераторах (лазерах), исследования которых составляют важный раздел современной квантовой радиофизики. Еще до создания института, в 1962 г., группа научных сотрудников Сибирского отделения, вошедшая впоследствии в наш институт, зажгла второй в СССР газовый лазер.

Исследования по квантовой радиофизике в институте проводились и проводятся сейчас в различных направлениях, в том числе по нелинейной оптике, твердотельным квантовым генераторам и др. Однако основным стержнем работ стало в настоящее время изучение газовых квантовых генераторов. Газовые квантовые генераторы (в дальнейшем радиократкости будем называть их ГКГ) замечательны во многих отношениях, но особое внимание привлекает исключительная монохроматичность их излучения.

Уже сейчас ясно, что создание источников света с высокой степенью монохроматичности позволило бы решить ряд фундаментальных проблем физики и многие важные задачи современной техники. Отметим некоторые из них. Известно, что в настоящее время эталоном длины является длина волны одной из линий излучения криптона. Относительная стабильность этого эталона, обусловленная конечной величиной ширины линии, чуть лучше, чем 10^{-7} . Это означает, в частности, что абсолютное измерение длины не может претендовать в настоящее время на относительную ошибку, меньшую 10^{-7} , каков бы ни был метод измерения. Если, например, измерять расстояние в 10 км, то абсолютная погрешность его измерения не может быть меньше 1 мм. А между тем, существует большой круг геодезических и гео-

(Окончание на 6 стр.)

ДЕНЬ НАУКИ—ВТОРОЙ

НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА

В последнее время значительное внимание в оптическом диапазоне привлекает проблема взаимодействия электромагнитных волн в нелинейных средах. Задачи оптики нелинейных сред приобретают интерес в связи с тем, что в полях оптических квантовых генераторов (ОКГ) удается экспериментально наблюдать разнообразные эффекты, такие, как генерация суммарных и разностных частот, параметрическое усиление и генерация, процессы вынужденного рассеяния, самодифракция света и т. д. При этом благодаря большой напряженности электрического поля излучения ОКГ (более 10^9 в/см) процесс преобразования излучения можно использовать в различных практических приложениях. С другой стороны сами процессы нелинейного взаимодействия световых волн являются мощными средствами изучения свойств сред. Некоторые из приведенных выше нелинейных оптических эффектов систематически изучаются в нашей лаборатории.

Так, исследуя влияние электрооптического эффекта на параметрический распад частот в кристалле $\text{K}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$ при температурах vicinity точки Кюри (-151°C), впервые удалось создать импульсный квантовый генератор света с перестройкой частоты излучения внешним электрическим полем. Такой перестраиваемый источник когерентного излучения дает возможность осуществлять ряд резонансных эффектов на оптических частотах. Например, при взаимодействии полупроводника с интенсивным когерентным оптическим излучением в области собственного поглощения возникает высокая концентрация носителей, порождающая новый характер рассеяния света в среде. Изменения частоты интенсивного потока когерентного света дают возможность осуществлять и так называемые многофоновые процессы, которые дают дополнительную информацию об энергетической структуре конденсированных сред. При распространении в диэлектрике с квадратичной поляризуемостью световой волны, наряду с другими нелинейными эффектами, возникает статическая поляризация. С физической точки зрения возникновение статической поляризации в диэлектрике является предельным случаем генерации разностной частоты в нелинейных кристаллах. Эффект в то же время аналогичен эффекту вынужденного переноса тока в радиодиапазоне, когда за счет квадратичной характеристики детектора возникает некоторая постоянная составляющая тока. В силу приведенной аналогии этот эффект получил название эффекта оптического выпрямления. Необходимо отметить, что эффект оптического выпрямления превращает непосредственно энергию световой

волны в электрическую энергию. В нашей лаборатории удалось осуществить такое преобразование с к. п. д. порядка 10^{-4} . Если удастся найти или получить среды с большими константами нелинейной восприимчивости, то в этом случае эффект оптического выпрямления можно было бы использовать в качестве прямого преобразования световой энергии в электрическую.

Далее относительная малая преломная и пространственная неомонохроматичность — взаимодействия волн могут привести к существенным особенностям протекания нелинейных оптических процессов. В связи с этим в нашей лаборатории проводятся исследования и по физическим процессам в ОКГ на люминесцентных материалах (рубин, стекло с присадкой неодима). Поиск путей создания искусственных источников света с высокой монохроматичностью когерентностью являются одной из важнейших задач квантовой электроники. Проблема создания мощных одночастотных ОКГ

усложняется тем, что при больших коэффициентах усиления активной среды (например, рубин) выполняется условие самовозбуждения для большого числа типов собственных колебаний резонатора. Существующие методы селективного типа колебаний эффективны только при небольших коэффициентах усиления (режим так называемой свободной генерации). В результате исследований нестационарных процессов ОКГ с импульсным изменением добротности резонатора в лаборатории был предложен метод, позволяющий эффективно изменять динамику процессов генерации, воздействуя на ОКГ внешним узкополосным световым полем, позволяющим формированию типов собственных колебаний резонатора. Этот метод позволил в настоящее время без применения сложных систем оптического усиления создать управляемый одночастотный ОКГ с импульсной мощностью 10^4 вт. Генератор узкополосного (высокомонохроматичного) сигнала в ОКГ на люминесцентном материале — задача весьма сложная. Существующие условия формирования разного рода узкополосных неоднородностей светового поля в резонаторе приводят к одновременной генерации многих типов колебаний. Группой сотрудников лаборатории разработан принципиально новый метод возбуждения одного типа колебаний в ОКГ.

Как видно из краткого обзора, основное направление лаборатории связано с исследованием характера взаимодействия интенсивного когерентного оптического излучения с веществом.

Г. КРИВОШЕКОВ,
кандидат технических наук.

ПОЛУПРОВОДНИКИ НА СЛУЖБЕ НАУКИ И ТЕХНИКИ, ДЛ

ДЛЯ ЧЕГО ОБЛУЧАЮТ ПОЛУПРОВОДНИКИ?

Л. С. СМIRHOV,
заведующий лабораторией радиационной физики

РАДИЦИОННАЯ физика бурно развивалась в последние два десятилетия, когда были поставлены и решены важнейшие вопросы стойкости материалов в радиационных полях и вопросы превращения энергии радиоактивного излучения в электроэнергию. В этот же период возникла и радиационная физика полупроводников. Она началась с попыток создания «атомных» батарей (устройств, аналогичных солнечным батареям, а в них вместо солнечного излучения преобразуется в электроэнергию излучение радиоактивных источников) и попыток управления свойствами полупроводников с помощью осуществления в кристаллах ядерных реакций. И хотя в этих работах не было получено больших успехов, быстро стало ясно, что полупроводники являются идеальными материалами для радиационной физики. Они исключительно чувствительны и позволяют при облучении детектировать дефекты структуры, и ионизация быстрыми частицами приводит к сильным временным изменениям концентрации носителей заряда.

Так как почти все используемые в практике свойства полупроводников определяются их реальной структурой и составом, изучение ионизационных процессов в кристаллах, изучение процессов образования и отжига радиационных дефектов приобрели особое значение.

Облучение частицами явилось «чистым» и хорошо контролируемым методом выведения кристаллов из равновесия как по концентрациям электронов и дырок, так и по типам и концентрациям структурных дефектов.

Облучение тяжелыми частицами приводит к образованию сложных радиационных дефектов (многочисленные нарушения напоминают переплавленные микрочастицы материала), что обуславливает необратимые изменения электрофизических свойств полупроводников. Этот случай мы здесь рассматривать не будем. Особый интерес представляет облучение полупроводников электронами и гамма-лучами. При этом, как правило, образуются простейшие структурные дефекты — пустые узлы (вакансии) и атомы, вытесненные в межузельные положения (межузельные атомы). Пара — вакансия и межузельный атом, носит название — дефект по Френкелю. Большая подвижность радиационных дефектов и их способность вступать во взаимодействие с другими несовершенствами решетки (например, с химическими примесями и дислокациями) сделали радиационную физику мощнейшим методом изучения реакций в твердых телах, методом изучения свойств микродефектов и кристаллов в целом. Подвижность простейших дефектов так велика, что реакции по взаимодействию идут даже при температуре жидкого азота, а, например, в кремнии иногда и при температуре жидкого гелия.

Случай облучения электронами и гамма-лучами удобен для исследовательских целей тем, что если не осуществлять специальных условий эксперимента, то почти все последствия облучения обратимо исчезнут при отжиге. Полный отжиг обычно происходит в районе $400-500^\circ\text{C}$. Наибольшее число работ по радиационной физике выполнено на классических полупроводниках — германии и кремнии. Здесь было установлено, что близкие пары вакансий — межузельный атом — могут быть в метастабильном состоянии, а отдельные пары имеют отталкивательный барьер, наличием и высотой которого и определяется эффективность рекомбинации компонент дефекта по Френкелю с другими несовершенствами решетки и друг с другом. Определены «пороги» образования дефектов, зависимость скорости образования дефектов от энергии электронов, температуры образцов, их ориентации по направлению к пучку и т. д. Многие на сегодняшний день известны о свойствах комплексов простейших радиационных дефектов с химическими примесями и дислокациями в этих материалах. Показано, что дислокации могут играть роль стоков для межузельных атомов, при этом кристаллы обогащаются вакансиями, дислокации и определяют эффективность рекомбинации и определяют эффективность рекомбинации в кристаллах дырок, который связан имеющийся там кислород. В связи с появлением радиационных дефектов, в запрещенной зоне полупроводников возникает целая система энергетических уровней, при этом сильно изменяются основные характеристики полупроводников: концентрация носителей заряда и их подвижность, время жизни неравновесных носителей заряда, спектры фотопроводимости и оптического поглощения и т. д. Часто это приводит в «порче» свойств кристаллов и к выходу из строя полупроводниковых приборов, но иногда полученные изменения оказываются полезными и таковыми являются возможности управления свойствами материала. Наиболее характерными в этом направлении результатами на сегодняшний день являются опыты по компенсации примесей в полупроводниках при облучении, по расширению области инфракрасной фотопроводимости, по управлению спектрами люминес-

ценции, по ускорению процессов упорядочения кристаллов.

В некоторых кристаллах изменение свойств даже при облучении электронами исключительно устойчиво. Например, изменения спектра люминесценции кристалла кремния кубической модификации не исчезают при отжиге вплоть до 1000°C , а сами изменения столь значительны, что эффект может быть использован как технологический прием для изменения спектра свечения или в точках дозиметрии.

Методы радиационной физики особенно много обещают при применении их к кристаллам высокотемпературных полупроводников, к кристаллам с ярко выраженными диэлектрическими свойствами, к кристаллам сложных соединений, но изучение элементарных полупроводников, таких, как германий и кремний, будет развиваться и по-прежнему еще интенсивнее и глубже. Эти исследования стали фундаментом радиационной физики полупроводников, и здесь можно ожидать исключительно глубоких и интересных результатов. Достигнутый уровень знаний уже позволяет создавать полупроводниковые приборы с достаточной радиационной стойкостью и предсказывать их поведение при длительном пребывании в радиационных полях, например, в космосе.

В последние годы быстро развивается еще одно направление радиационной физики — исследование полупроводников с помощью бомбардировки ионами легких элементов. Задача этого направления — управление свойствами полупроводников в тонких приповерхностных слоях, для технологии полупроводниковых приборов это задача номер один. Есть много методов создания нужных свойств и структуры, но бомбардировка ионами имеет перед ними ряд очевидных преимуществ: чистота, контролируемость, управление формой легированных участков, возможность автоматизации всего процесса производства приборов). К сожалению, процессы, происходящие при внедрении ионов в материал, еще мало изучены, и это ограничивает практическое применение метода. Именно поэтому во многих лабораториях мира идут в настоящее время исследования по легированию полупроводников бомбардировкой ионами и изучению сопутствующего явления: катодное распыление, захват адсорбированной примеси, прохождение при бомбардировке химических реакций и т. д. Эта методика также имеет особый интерес в связи с исследованием новых полупроводниковых материалов, где там, где обычные технологические методы малоэффективны, и в связи с возможностью создания принципиально новых приборов.

Не исключено, что большую роль радиационная физика будет играть при освоении аморфных и мезокомопонентных полупроводников. В Институте физики полупроводников СО АН лаборатории радиационной физики возникла одна из первых в конце 1962 года. Новичок тематики, особенности эксперимента, необходимость в ускорительных положениях немало трудностей на организационный период лаборатории. Сейчас многое позади. О том, что говорилось выше вообще по радиационной физике полупроводников, есть определенный вклад и нашей лаборатории.

В то же время поддерживать заданную скорость движения электронов оказывается труднее, чем до момента усиления звука (ведь электроны дополнительно тормозятся на звуковых колебаниях). А это означает, что закон Ома будет нарушен — образец в режиме усиления звука будет обладать нелинейной вольт — амперной характеристикой. При определенных условиях вольт — амперная характеристика может искажаться столь сильно, что возникает участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, и образец начинает генерировать электрические колебания.

Приведенное описание, конечно, является очень упрощенной схемой, однако оно правильно передает суть явления. Чтобы было ясно, что уже сделано, а что еще предстоит сделать, остановимся на физике взаимодействия электронов полупроводника со звуковой волной. Представим, что вдоль полупроводникового образца распространяется звуковая волна, т. е. по сдвигательные области сжатия и растяжения. В областях сжатия частицы полупроводника расположены ближе друг к другу, а в областях растяжения — дальше друг от друга, чем в невозмущенном кристалле. Это приводит к тому, что потенциальная энергия не будет равна средней потенциальной энергии электрона в кристалле — в одних местах она будет несколько больше, а в других — несколько меньше средней. И поскольку электроны свободны, они начнут перемещаться по кристаллу, накапливаясь в областях с минимальной энергией. Так как звуковая волна движется вместе с образцом, движется вместе с ней и минимум энергии, и, следовательно, движется и находящийся в этих минимумах электроны проводимости. Таким образом, звуковая волна порождает в полупроводнике некоторый электрический ток (без внешнего источника!). Этот ток получил название акусто — электрического тока. В то же время звуковая волна тратит некоторую долю своей энергии на увлечение электронов, и, следовательно, распространяется по полупроводнику, она затухает сильнее, чем в случае отсутствия свободных носителей. Это затухание называется электронным затуханием звука.



Заведующий лабораторией электронно-фононных взаимодействий, доктор физико-математических наук Л. С. Богданов.

Фото А. Зубова.

ПЕРВОЕ, что невольно хочется сказать о полупроводниках — «возможности их неисчерпаемости». И действительно, который год открываются все новые перспективы. Однако многие технологические возможности полупроводников еще недостаточно известны широкому кругу инженеров и техников. Это происходит потому, что соответствующие исследования еще не закончены, а «приборы» не получили технологического оформления. Об одном из таких «текущих» исследований и будет рассказано в данной заметке.

Речь пойдет об одном из аспектов электронно-фононных взаимодействий в полупроводниках — в частности, о взаимодействии электронов с направленным потоком фононов, т. е. со звуковыми колебаниями. И хотя эти исследования еще далеко не закончены, но уже сейчас возможно осуществлять прямое усиление звука (без предварительного преобразования звука в электрический сигнал), усиление электромагнитных колебаний сверх высокой частоты, генерацию звуковых волн без использования электрических генераторов, непосредственную генерацию электромагнитных колебаний и ряд других не менее важных устройств.

Однако, чтобы от принципиальной возможности перейти к практическому использованию, требуется еще значительная работа. Это является во многих лабораториях мира. Некоторые из возникающих проблем исследуются и в нашем институте.

Чтобы было ясно, что уже сделано, а что еще предстоит сделать,

Перед очередной серией экспериментов заведующий лабораторией радиационной физики Л. С. Смирнов (справа) и кандидат физико-математических наук Н. Н. Герасименко обсуждают изменения в конструкции электронной пушки, используемой для возбуждения люминесценции полупроводников.

Фото А. Зубова.

дает основные физические процессы, протекающие в образце при наличии в нем звуковой волны и электрического поля и позволяет нам понять те трудности, которые возникают при практическом осуществлении этого явления.

Итак, скорость электронов должна быть больше скорости звука! А это несколько тысяч метров в секунду! Чтобы достигнуть таких скоростей, нужны весьма большие электрические поля. Протекающий через образец ток становится недопустимо большим, образец нагревается и может просто сгореть. Поэтому напряжение к образцу прикладывается на очень короткое время, импульсно — чтобы за время действия электрического поля образец не успел значительно нагреться, а за время между импульсами — он успел полностью остыть. Все основные исследования выполнены в этом, импульсном, режиме.

Уже сейчас на полупроводниковом кристалле сульфид кадмия в импульсном режиме удалось получить усиление звука (в расчёте на 1 см длины кристалла) в несколько миллионов раз! И если раньше для усиления звука было

нужно превратить его сначала в электрический сигнал, то теперь оказывается выгодной и обратная ситуация — для усиления электрического сигнала достаточно сперва превратить его в звук.

Все это очень хорошо! Плохо только то, что импульсный режим не очень-то подходит для практических применений: мало того, что необходимо иметь специальный генератор прямоугольных импульсов (который, кстати сказать, существенно сложнее, чем обычный усилитель), но надо еще знать, когда поступит усиливаемый, чтобы к его приходу подать «тянувшее» поле на образец. Поэтому первоочередной задачей является переход от импульсного режима к непрерывному, когда «тянувшее» поле в образце будет создаваться простой гальванической батареей, а кристалл — усилитель будет непрерывно готов к работе.

Приведенное описание, конечно, является очень упрощенной схемой, однако оно правильно передает суть явления. Чтобы было ясно, что уже сделано, а что еще предстоит сделать,

остановимся на физике взаимодействия электронов полупроводника со звуковой волной. Представим, что вдоль полупроводникового образца распространяется звуковая волна, т. е. по сдвигательные области сжатия и растяжения. В областях сжатия частицы полупроводника расположены ближе друг к другу, а в областях растяжения — дальше друг от друга, чем в невозмущенном кристалле. Это приводит к тому, что потенциальная энергия не будет равна средней потенциальной энергии электрона в кристалле — в одних местах она будет несколько больше, а в других — несколько меньше средней. И поскольку электроны свободны, они начнут перемещаться по кристаллу, накапливаясь в областях с минимальной энергией. Так как звуковая волна движется вместе с образцом, движется вместе с ней и минимум энергии, и, следовательно, движется и находящийся в этих минимумах электроны проводимости. Таким образом, звуковая волна порождает в полупроводнике некоторый электрический ток (без внешнего источника!). Этот ток получил название акусто — электрического тока. В то же время звуковая волна тратит некоторую долю своей энергии на увлечение электронов, и, следовательно, распространяется по полупроводнику, она затухает сильнее, чем в случае отсутствия свободных носителей. Это затухание называется электронным затуханием звука.

Итак, скорость электронов должна быть больше скорости звука! А это несколько тысяч метров в секунду! Чтобы достигнуть таких скоростей, нужны весьма большие электрические поля. Протекающий через образец ток становится недопустимо большим, образец нагревается и может просто сгореть. Поэтому напряжение к образцу прикладывается на очень короткое время, импульсно — чтобы за время действия электрического поля образец не успел значительно нагреться, а за время между импульсами — он успел полностью остыть. Все основные исследования выполнены в этом, импульсном, режиме.

Уже сейчас на полупроводниковом кристалле сульфид кадмия в импульсном режиме удалось получить усиление звука (в расчёте на 1 см длины кристалла) в несколько миллионов раз! И если раньше для усиления звука было

нужно превратить его сначала в электрический сигнал, то теперь оказывается выгодной и обратная ситуация — для усиления электрического сигнала достаточно сперва превратить его в звук.

Все это очень хорошо! Плохо только то, что импульсный режим не очень-то подходит для практических применений: мало того, что необходимо иметь специальный генератор прямоугольных импульсов (который, кстати сказать, существенно сложнее, чем обычный усилитель), но надо еще знать, когда поступит усиливаемый, чтобы к его приходу подать «тянувшее» поле на образец. Поэтому первоочередной задачей является переход от импульсного режима к непрерывному, когда «тянувшее» поле в образце будет создаваться простой гальванической батареей, а кристалл — усилитель будет непрерывно готов к работе.

Приведенное описание, конечно, является очень упрощенной схемой, однако оно правильно передает суть явления. Чтобы было ясно, что уже сделано, а что еще предстоит сделать,

остановимся на физике взаимодействия электронов полупроводника со звуковой волной. Представим, что вдоль полупроводникового образца распространяется звуковая волна, т. е. по сдвигательные области сжатия и растяжения. В областях сжатия частицы полупроводника расположены ближе друг к другу, а в областях растяжения — дальше друг от друга, чем в невозмущенном кристалле. Это приводит к тому, что потенциальная энергия не будет равна средней потенциальной энергии электрона в кристалле — в одних местах она будет несколько больше, а в других — несколько меньше средней. И поскольку электроны свободны, они начнут перемещаться по кристаллу, накапливаясь в областях с минимальной энергией. Так как звуковая волна движется вместе с образцом, движется вместе с ней и минимум энергии, и, следовательно, движется и находящийся в этих минимумах электроны проводимости. Таким образом, звуковая волна порождает в полупроводнике некоторый электрический ток (без внешнего источника!). Этот ток получил название акусто — электрического тока. В то же время звуковая волна тратит некоторую долю своей энергии на увлечение электронов, и, следовательно, распространяется по полупроводнику, она затухает сильнее, чем в случае отсутствия свободных носителей. Это затухание называется электронным затуханием звука.

Итак, скорость электронов должна быть больше скорости звука! А это несколько тысяч метров в секунду! Чтобы достигнуть таких скоростей, нужны весьма большие электрические поля. Протекающий через образец ток становится недопустимо большим, образец нагревается и может просто сгореть. Поэтому напряжение к образцу прикладывается на очень короткое время, импульсно — чтобы за время действия электрического поля образец не успел значительно нагреться, а за время между импульсами — он успел полностью остыть. Все основные исследования выполнены в этом, импульсном, режиме.

Уже сейчас на полупроводниковом кристалле сульфид кадмия в импульсном режиме удалось получить усиление звука (в расчёте на 1 см длины кристалла) в несколько миллионов раз! И если раньше для усиления звука было

нужно превратить его сначала в электрический сигнал, то теперь оказывается выгодной и обратная ситуация — для усиления электрического сигнала достаточно сперва превратить его в звук.

Все это очень хорошо! Плохо только то, что импульсный режим не очень-то подходит для практических применений: мало того, что необходимо иметь специальный генератор прямоугольных импульсов (который, кстати сказать, существенно сложнее, чем обычный усилитель), но надо еще знать, когда поступит усиливаемый, чтобы к его приходу подать «тянувшее» поле на образец. Поэтому первоочередной задачей является переход от импульсного режима к непрерывному, когда «тянувшее» поле в образце будет создаваться простой гальванической батареей, а кристалл — усилитель будет непрерывно готов к работе.

ДЕНЬ НАУКИ— ВТОРОЙ

ОСОБЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ВАШ ТРАНЗИСТОР

Наивысшее достижение полупроводниковой электроники — полевой транзистор, нелинейная управляемая поверхностная емкость, обладающие уникальной фоточувствительностью в инфракрасной области спектра поликристаллические слои халкагенидов свинца — вот типичные примеры полупроводниковых устройств, использующих особое свойство поверхности полупроводников. В первых двух случаях эти свойства используются вполне сознательно, в последнем — решающими факторами для получения высокой фоточувствительности являются интуиция и практический опыт изготовителя. Однако общим для этих трех примеров является то, что особые свойства поверхности полупроводников служат нам здесь добрую службу.

Перечень таких примеров можно было бы продолжить. Но есть примеры и другого сорта. Ваш транзисторный радиоприемник потерял чувствительность. В чем дело? Знакомый радист ответит вам: «Все ясно, транзисторы состарились, нужно менять!» Но в чем состоит старение транзисторов?

В ряде статей этого номера рассказано о полупроводниковой микроэлектронике, об определяющем влиянии поверхности полупроводников или границ раздела полупроводник-диэлектрик на работоспособность элементов и блоков микроэлектроники. Исследование таких поверхностей проводится в лаборатории института, возглавляемой членом-корреспондентом АН СССР А. В. Ржановым.

(Окончание на 8 стр.).

Развитие физики полупроводников в последние годы главным образом направлено на исследование свойств и методов получения тонких пленок с целью создания приборов микроэлектроники. При этом либо используются известные ранее свойства полупроводников, либо новые явления, проявляющиеся только в тонких слоях. В отличие от макроскопических кристаллов, пленки металлов, диэлектриков и полупроводников изменяют свои свойства с толщиной вследствие заметного вклада поверхностной проводимости носителей, поверхностной диффузии и адсорбции примесей, поверхностных энергетических состояний и ряда других факторов. Изучением этих особенностей, созданием новых методов исследования и новых путей использования пленок занимается молодая наука — физика тонких твердых пленок. (см. «За науку в Сибири», 1968 г. № 330). Под твердой пленкой обычно понимается слой вещества, обладающий определенной кристаллической структурой и находящийся на подложке или снятый с нее после получения. Толщина пленок обычно не превосходит десятка микрон, но тонкими они считаются лишь тогда, когда некоторое физическое свойство, которое в данном случае считается определяющим, например, электропроводность или подвижность носителей заряда, начинается зависеть от толщины. Полупроводниковые пленки считаются тонкими, если их толщину перекрывает область экранирования приповерхностных зарядов, что в достаточно чистом кремнии и германии происходит, начиная с десятка микрон, а в арсениде галлия — при нескольких микронах. Разумеется, такие тонкие слои из обычных пластин травлением и шлифовкой не получить. Кроме того, для длительности сохранения свойств и высокого совершенства слои должны быть монокристалльными, без внутренних границ зерен, способных мигрировать и собирать атомы примесей. Это требует

НА СЛУЖБЕ ТОНКИЕ ПЛЕНКИ И ИХ ПРОБЛЕМЫ

разработки специальных методов получения полупроводниковых пленок. Старые методы нанесения пленок на различные подложки в вакууме путем теплового испарения или катодного распыления в газовом разряде, главным образом, применялись для металлов и диэлектриков. Использование металлических и диэлектрических пленок для создания проводящих или изолирующих слоев оказывается возможным в виде аморфных и поликристаллических слоев, так как изменение их свойств при переходе к монокристалльности относительно невелико.

Для полупроводниковых пленок основным оказался метод эпитаксии, осаждения на монокристалльную подложку, который позволил получить хорошие пленки и старыми методами при условии повышения степени вакуума до 10^{-8} — 10^{-9} торр, или скорости осаждения, например, путем взрыва исходного материала. При медленном осаждении в глубоком вакууме пленки растут достаточно чистыми, а при быстром — выделяющаяся теплота кристаллизации создает жидкий слой на поверхности растущей пленки, и пленка растет как единый монокристалл.

Однако вакуумные методы еще не позволяют получать стабильные совершенные пленки полупроводниковых соединений, таких, как арсенид галлия или карбид кремния ввиду различной скорости осаждения составляющих. Кроме того, в вакуумно-осажденных пленках много вакансий, изменяющих тип проводимости полупроводника.

Основным технологическим приемом получения полупроводниковых пленок из различных материалов в настоящее время является метод газотранспортных химических реакций переноса или разложения. В сочетании с эпитаксиальным осаждением пленок на монокристаллические подложки удается получать полупроводниковые пленки, по параметрам даже превосходящие вещество — источник. В 1967—68 годах на ВДХ в павильоне АН СССР нами экспонировались «Новые методы получения и легирования полупроводниковых пленок», за разработку

которых Институт физики полупроводников был удостоен Диплома 2 степени. Наряду с глубоким физическим анализом процесса зарождения и последующего роста образующихся кристаллитов были проведены технологические и конструкторские разработки, позволившие передать народному хозяйству ценные рекомендации по конструкции установок и режимам получения пленок германия, арсенида галлия, твердых растворов арсенид галлия — арсенид индия.

В настоящее время получены важные данные о свойствах границы раздела пленки с подложкой. Обнаружено существование переходного слоя, который препятствует получению тонких пленок при эпитаксии, так как свойства пленок с утончением ухудшаются и намечены пути сглаживания этого перехода.

Большое внимание уделялось изучению процессов и разработке методов жидкостной эпитаксии, при которой пленка полупроводника осаждается на подложку из раствора в расплавленном металле, например в галлии. При этом температура роста пленки значительно ниже температуры плавления полупроводника, диффузионные процессы ослаблены и переход пленка-подложка оказывается очень резким. Этим методом решена была задача легирования и получения «туннельных» и лазерных диодов с хорошими характеристиками.

Однако эпитаксиальные методы не позволяют получать монокристалльные пленки на произвольных изолирующих и металлических подложках, что так необходимо для широкого развития микроэлектроники. Поэтому большие работы проводились по разработке специальных методов получения пленок, из которых можно отметить «напечатывание» внешним ориентатором. Проведенные под руководством члена-корреспондента АН СССР А. В. Ржанова электрофизические исследования свойств таких пленок, результаты которых докладывались на IX Международной конференции по физике полупроводников в

1968 году, показали, что эта методика является весьма перспективной и может дать начало развитию нового направления в микроэлектронике.

Проблема получения пленок тесно связана с изучением особенностей протекания электронных процессов в пленках, образованием иведением дефектов в пленках, с технологией процессов получения из пленки действующего прибора микроэлектроники, например, транзистора, нелинейной емкости, датчика напряжения или напряженности магнитного поля. Поэтому работы лаборатории физики пленок тесно взаимосвязаны с работами лабораторий физики поверхности, структурных свойств, кинетических явлений, электрон-фононных взаимодействий, роста кристаллов и других. Успешно развиваются международные связи с научными сотрудниками Венгрии, Болгарии, Словакии, Академии наук. В совместной работе с заведующим отделом пленок Электротехнического института Словацкой Академии наук Я. Червеняком был освоен метод плазмовакuumного распыления и осаждения полупроводниковых и диэлектрических пленок, успешно внедряемый в производство.

В лаборатории физики пленок трудятся способные молодые исследователи, кандидаты наук А. Г. Клименко, Ю. Г. Сидоров, С. П. Пак, младшие научные сотрудники В. П. Мигаль, Р. Н. Ловятин, Е. А. Криворотов и многие другие энтузиасты нового направления физики полупроводников. С большим интересом в лаборатории работают студенты НГУ и физико-технического факультета НЭТИ — будущие специалисты по микроэлектронике и физике пленок.

Коллектив лаборатории готовится к интересным исследованиям, в специализированных помещениях нового корпуса и на новом отечественном и импортном оборудовании.

Л. АЛЕКСАНДРОВ,
заведующий лабораторией физики пленок, доктор физико-математических наук.

БОЛЬШОЙ СТАЖ МОЛОДОЙ НАУКИ

(Окончание. Начало на 3 стр.).
физических задач, где крайне необходима значительно более высокая точность. Таким образом, желание «улучшить» эталон длины отнюдь не связано с абстрактным стремлением к совершенству, но диктуется насущными задачами техники измерений. Газовые квантовые генераторы, несомненно, помогут решить проблему эталона длины.

Во многих случаях положение оказывается еще хуже, чем это следует из только что сказанного. Дело в том, что конкретные геодезические измерения зачастую проводятся оптическими методами, в которых непосредственно измеряется время распространения света на нужном расстоянии. Само же расстояние получается умножением измеренного времени на скорость света. Но скорость света известна лишь с относительной ошибкой 10^{-6} . Следовательно, весьма актуальным является измерение скорости света со значительно более высокой точностью. Разумеется, более точное знание скорости света желательно не только с точки зрения геодезии. Скорость света является фундаментальной величиной, играющей важную роль в космологии, ядерной физике, теории относительности и т. д.

Чтобы не возвращаться к этому вопросу, уместно отметить, что в нашем Институте предложен новый способ измерения скорости света, основанный на некоторых свойствах ГКГ. Потенциальные возможности этого метода намного лучше, чем существующая точность, с которой известна скорость света, и ограничены, по существу, лишь стабильностью

эталонной длины и времени. Наряду с указанными и другими фундаментальными проблемами, существует много более «близких» конкретных задач, которые можно решить с помощью ГКГ. Когерентность излучения ГКГ позволяет, например, очень полно моделировать излучение радиоантенны и свойства радиоволн, рассеянных разного рода объектами.

Можно было бы много говорить о применениях ГКГ в целом ряде других областей (аэродинамике, системах связи, физике плазмы, квантовой электроники, спектроскопии, химии и т. д.). Однако и сказанного достаточно для иллюстрации роли ГКГ в современной и будущей науке и технике.

В чем же состоит, с изложенной точки зрения, основная задача сегодняшнего дня? Ответ, на первый взгляд, очень прост — нужно сделать контрольные ГКГ с высокомонокроматическим излучением. Но сделать такие ГКГ отнюдь не просто. Улучшение «добротности» излучения даже в 100—1000 раз представляет собою сложную научно-техническую проблему, на пути решения которой возникают трудности исключительные. А предстоит нам с уровня 10^7 — 10^8 шагнуть до уровня 10^{10} . Поэтому проблема в целом естественным образом расценивается на несколько этапов, и в настоящее время речь идет о разработке ГКГ с относительной стабильностью частоты излучения около 10^{-10} — 10^{-12} . Над этой проблемой работают в научных организациях Советского Союза, в том числе, в колледии квантовой радиофизики — в Физическом институте

СОВРЕМЕННОГО ПРОГРЕССА

Согласно современным представлениям валентные электроны атомов в совершенном кристалле могут находиться в двух энергетических состояниях. Если атомы не возбуждены, то валентные электроны участвуют в формировании связей между атомами, заполняя некоторую зону энергетических состояний, так называемую валентную зону.

Под влиянием внешних воздействий — температуры, света, различного рода облучений — электроны могут получить энергию, достаточную для разрыва валентных связей, и перейти в свободное состояние, в котором они легко перемещаются по всему кристаллу. В этом случае принято говорить, что электроны располагаются в возбужденной зоне энергетических состояний — зоне проводимости.

Между валентной зоной и зоной проводимости в диэлектриках и полупроводниках расположена полоса запрещенных для электронов энергетических состояний — запрещенная зона. При малой величине запрещенной зоны, характерной для большинства полупроводников, под действием флуктуаций энергии теплового движения атомов часть электронов может перейти из валентной зоны в зону проводимости, обуславливая электропроводность полупроводника.

В несовершенном кристалле инородные примеси и структурные дефекты, нарушающие строгую периодичность строения кристалла, создают локальные энергетические уровни в запрещенной зоне, на которых тоже могут находиться электроны.

Таким образом, в различных кинетических электронных процессах возможен обмен электронами между зонами и уровнями с несовершенствами кристалла.

Структура энергетических зон и локальных состояний в запрещенной зоне энергетического спектра электронов в кристалле является фундаментальной характеристикой полупроводника, определяющей в значительной степени все его физические свойства. Теоретические и экспериментальные исследования германия, кремния, арсенида галлия и других полупроводников показали, что структура энергетических зон весьма сложна и имеет обычно ряд качественных особенностей, характерных для данного полупроводника.

Выявление и объяснение этих особенностей и причин, их обуславливающих, имеет не только принципиальное значение для теории твердого тела, но оказывается исключительно важным для практического применения полупроводниковых материалов в

разнообразных приборах. Действие туннельных диодов и полупроводниковых тензометров, квантовых генераторов и генераторов Ганна, инфракрасных детекторов и других устройств в той или иной степени определяется структурой энергетического спектра электронов.

В связи с этим и теория вынуждена переходить от изучения общих свойств твердых тел, основанного на использовании простейших моделей, к изучению конкретных материалов с учетом особенностей их зональной структуры. Однако вычислительные трудности, связанные с решением задачи о спектре электронов в твердом теле, исходя из общих принципов, видимо, неопределимы, поскольку это принципиально динамическая проблема многих тел. Поэтому обычный путь решения этой задачи сводится к весьма грубому качественному расчету, использующему, однако, точные групповые соотношения, вытекающие из симметрии кристалла. В результате, теория, как правило, устанавливает лишь типы зонной структуры и общий характер взаимодействия носителей заряда, совместимые с симметрией кристалла. Сопоставление теоретических расчетов с экспериментальными результатами позволяет опреде-



могут быть выражены через параметры энергетического спектра и взаимодействия носителей заряда с несовершенствами кристаллической структуры.

Следовательно, знание основ-

Доктор физико-математических наук А. Ф. Кравченко (слева) обсуждает с сотрудниками своей лаборатории В. А. Зименковым и Н. Д. Лариной результаты изменения поглощения ультразвука в арсениде галлия при низких температурах под действием света. Фото А. Зубцова.

СТРОПТИВЫЙ ХАРАКТЕР ЭЛЕКТРОНОВ

(Энергетический спектр электронов в полупроводниках)

литель, какой тип зонного спектра действительно реализуется в данном полупроводнике, и оценить численные значения основных параметров зонной структуры. Исследование особенностей энергетического спектра электронов в наиболее перспективных полупроводниковых материалах является важнейшей задачей нашей лаборатории. В настоящее время основные усилия направлены на изучение арсенида галлия, являющегося самым универсальным из всех известных полупроводников. На основе арсенида галлия можно изготовлять транзисторы, излучательные, интенсионные и СВЧ-диоды, фотонно-электронные триоды, генераторы Ганна, усилители, диодные модуляторы света, а также интегральные схемы.

Для определения особенностей спектра в лаборатории используются кинетические явления — явления движения электронов в кристалле под действием электрического и магнитного полей или градиента температуры. Эти экспериментальные методы достаточно эффективны, поскольку кинетические характеристики полупроводников

ных механизмов взаимодействия электронов с несовершенствами кристалла, или рассеяния электронов крайне важно для получения информации об энергетическом спектре из кинетических явлений. Кроме того, изучение процессов рассеяния электронов представляет большой самостоятельный интерес для понимания характера движения электронов в реальном кристалле и взаимодействия их с различного рода дефектами, а также для решения некоторых практических задач.

Дело в том, что эти процессы формируют такую важную характеристику движения электронов в кристалле, как подвижность — скорость дрейфа электрона в единичном электрическом поле, которая определяет в значительной мере параметры ряда полупроводниковых датчиков и частотные свойства полупроводниковых приборов.

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные за рубежом и в Советском Союзе, в том числе и в нашей лаборатории, показали, что энергетический спектр электронов может существенно изменяться под влиянием сильных

магнитных и электрических полей, давления, легирования и т. д. Зная характер изменения спектра под воздействием различных внешних факторов, можно надеяться, что в будущем мы сможем формировать те особенности спектра, которые необходимы для эффективной работы конкретного прибора.

В последние годы резко возрос интерес к исследованию физических свойств кристаллических пленок в связи с потребностями бурно развивающейся полупроводниковой микроэлектроники. Один из возможных путей миниатюризации полупроводниковых приборов является переход от дискретных приборов к интегральным схемам.

Однако при переходе к тонким слоям и малым объемам возникает целый ряд качественных особенностей движения электронов. Когда толщина пленки становится сравнимой с длиной свободного пробега электронов, существенно усиливается роль поверхностного рассеяния и появляется зависимость кинетических свойств от размеров и формы исследуемого кристалла; при определенных условиях

возникает анизотропия электропроводности, нелинейность в слабых электрических полях, доменная структура, сопровождающаяся большими поперечными полями, и другие «размерные» эффекты.

Еще более существенные изменения физических свойств пленок следует ожидать при переходе к толщинам, сравнимым с эффективной длиной деброя-левской волны носителей заряда. В этом случае наблюдается размерное квантование энергетического спектра электронов: энергетические зоны распадаются на отдельные слои или подзоны и возникают принципиально новые, специфические процессы рассеяния электронов. Особое значение при столь тонких пленках для формирования энергетического спектра приобретают электронные процессы, протекающие у поверхности.

Таким образом, исследование качественных изменений энергетического спектра электронов и процессов взаимодействия электронов с несовершенствами кристалла при переходе к тонким пленкам является исключительно перспективной задачей полупроводниковой электроники, над решением которой трудятся сотрудники нашей лаборатории.

А. КРАВЧЕНКО,
заведующий лабораторией кинетических явлений в полупроводниках, доктор физико-математических наук.

те им. П. Н. Лебедева АН СССР, и за границей. Эта задача является основной и для нас.

Трудности решения задачи, описанной в общих чертах выше, связаны с несколькими причинами. Важнейшая из них состоит в том, что генерация излучения в ГКГ происходит на собственной частоте резонатора, внутри которого находится активная среда, усиливающая электромагнитное излучение. Собственная частота резонатора подвержена разнообразным внешним воздействиям, — механическим вибрациям установки, акустическим и конвекционным изменениям окружающего воздуха, тепловому расширению деталей и т. д. Без устранения этих воздействий частота излучения изменяется в относительно широких пределах (около 10^{-7}), такой ГКГ не намного лучше обычных газоразрядных источников света. Таким образом, речь идет о том, чтобы снизить уровень этих помех на много порядков. Руководящая идея борьбы с неустойчивостью частоты излучения ГКГ состоит в том, чтобы каким-то образом «привязать» частоту резонатора к частоте какой-либо спектральной особенности линии излучения активного вещества (например, к частоте, при которой максимальна или минимальна мощность генерации). Из сказанного ясно, что на первый план выступают два пункта: 1) разработка конкретного, достаточно эффективного способа такой «привязки» и 2) получение необходимой совокупности сведений о том, к чему «привязываться», т. е. спектроскопических данных о форме, ширине и положении линии излучения активного

вещества.

В нашем институте сделаны важные шаги, связанные с обоими этими пунктами. Была предложена и детально изучена новая система ГКГ, практически полностью удовлетворительная с точки зрения «привязки» частоты излучения ГКГ к атомным частотам. (Одновременно и независимо аналогичная идея была высказана в ФИАНе). В ходе экспериментального исследования обнаружена совокупность дополнительных новых явлений, которые делают данную систему еще более интересной и перспективной. Используя результаты физических исследований, впервые в мире был создан ГКГ с воспроизводимостью частоты 10^9 . Есть все основания полагать, что в принципе возможно достичь стабильности и воспроизводимости частоты порядка 10^{13} . Это означает, что ГКГ станут самыми стабильными источниками электромагнитного излучения.

Вторым существенным компонентом, необходимым для достижения этой цели, являются спектроскопические данные о поведении атомов активной среды в сильных электромагнитных полях, которые возникают в генераторах. Всего несколько лет тому назад этот вопрос находился в совершенно неудовлетворительном состоянии. Речь идет не только о том, что не было каких-то конкретных сведений об интересующих нас объектах, но, что более существенно, в «обычной» спектроскопии не оказалось адекватных физических понятий и сколько-нибудь удовлетворительной теории. Во многих отечественных и зарубежных научных организациях были ши-

роко поставлены теоретические и экспериментальные исследования, в ходе которых получены важные результаты. Существенный вклад внесли и работы, проводимые в нашем институте. Была разработана детализированная теория излучения атомов и молекул, находящихся в сильных полях излучения. Ряд новых явлений, предсказанных на основе этой теории, обнаружены в наших лабораториях экспериментально. В результате можно говорить о создании новой главы спектроскопии, которая служит физической базой в исследованиях по спектральному характеристикам квантовых генераторов.

Сказанного, наверное, достаточно для того, чтобы почувствовать, что задачи, стоящие перед сотрудниками института, не относятся к числу простых. Они еще резко осложняются трудностями специальной научно-исследовательской и технологической аппаратурой, необходимой для исследовательских работ. В основном эти последние трудности преодолеваются усилиями наших инженеров, конструкторов и рабочих, которым приходится решать весьма сложные и ответственные технические проблемы.

Однако без трудностей не было бы и проблем, и все дело в том, можно ли их решать на данном этапе развития и оправданы ли соответствующие усилия и затраты.

Коллектив нашего института глубоко уверен, что он в состоянии внести вклад в решение поставленных проблем, а сами проблемы заслуживают того, чтобы ими заниматься с полной отдачей сил.

ОСОБЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

(Окончание. Нач. на 6 стр.)

Перед этой лабораторией стоят две основные задачи: 1. Исследование природы и энергетического спектра дефектов поверхности, а также механизмов некоторых электронных процессов в поверхностной области. 2. Исследование поверхностных химических реакций с целью создания поверхностных пленок, обеспечивающих стабилизацию поверхностных свойств полупроводников, т. е., по существу, стабилизацию концентрации и параметров электронных поверхностных состояний.

Заметим сразу, что обе эти задачи весьма тесно переплетаются между собой и дополняют друг друга.

Как же решаются нашей лабораторией сформулированные выше задачи?

Наиболее простым и определенным объектом физики поверхности является атомарно-чистая поверхность полупроводника. Весьма существенным для выяснения механизма поверхностных химических реакций, особенно их начальных стадий, представлено нам исследование адсорбции различных газов на атомарно-чистой поверхности полупроводников. В настоящее время группа сотрудников лаборатории под руководством кандидата физико-математических наук А. А. Французова проводит исследования адсорбции различных веществ на чистой поверхности полупроводников и ее влияния на электрофизические свойства поверхности (между прочим, это имеет некоторое отношение к вашему транзистору!). Почти все проведенные до настоящего времени адсорбционные измерения были выполнены на порошкообразных образцах, в то время, как электрофизические измерения возможны лишь на монокристаллах. В лаборатории построен время-пролетный масс-спектрометр, позволяющий регистрировать сублимацию весьма малых количеств поверхностных соединений (около 0,001 монослоя с монокристаллического образца площадью 1 см²). Этот прибор дает возможность проводить сравнение электрофизических характеристик поверхности монокристалла со степенью покрытия ее различными поверхностными соединениями.

Готовится ряд других экспериментов на чистых поверхностях германия и кремния.

Хотя наиболее фундаментальных результатов в области физики поверхности следует, по-видимому, ожидать от исследований атомарно-чистых поверхностей и поверхностей с малыми адсорбционными покрытиями, наибольший интерес для практики в настоящее время представляют исследования на «реальных» поверхностях и, в частности, исследование методов синтеза различных поверхностных диэлектрических пленок и свойств границы раздела полупроводник — диэлектрическая пленка. Основная задача состоит в изыскании способов получения воспроизводимых по электрофизическим характеристикам поверхностных диэлектрических пленок и границ раздела полупроводник — пленка. Иными словами, нужно создать «хорошую» границу раздела полупроводник — пленка, а затем защитить ее от воздействия внешнего газового окружения (вы чувствуете, что это тоже имеет отношение к вашему транзистору?). Решением этой задачи в нашей лаборатории занимается группа химиков под руководством кандидата химических

наук С. М. Репинского. К настоящему времени сотрудниками этой группы методом поверхностных химических реакций осуществлен синтез ряда поверхностных диэлектрических пленок на полупроводниках. В частности, получены пленки сульфида и нитрида германия на германии, нитрида кремния на кремнии и арсенида галлия. Проводятся также исследования механизма реакций жидкостного и газового травления полупроводников, т. е. именно эти реакции в значительной степени определяют электрофизические свойства реальной поверхности.

Весьма существенным при исследовании свойств реальной поверхности полупроводников является вопрос о структуре и составе поверхностных пленок. В связи с этим в лаборатории были освоены современные методы исследования состава и структуры поверхностных пленок с помощью масс-спектрометрии и инфракрасной спектроскопии многократного полного внутреннего отражения, эллипсометрический метод измерения толщины и показателя преломления весьма тонких (толщиной до нескольких ангстрем) поверхностных пленок и некоторые другие методы анализа.

Большое внимание в лаборатории уделяется, естественно, исследованию электронных процессов на реальной поверхности полупроводников и на границе раздела полупроводник — диэлектрическая пленка. Работа в этом направлении ведется большой группой сотрудников лаборатории с использованием целого ряда различных электрофизических методов (метод эффекта поля, метод вольт-емкостных характеристик, фотоэлектрические методы и т. п.). Интересные результаты при исследовании границы раздела германий — сульфид германия и германий — нитрид германия были получены кандидатом физико-математических наук С. В. Покровской.

Исследование электронных процессов на реальной поверхности кремния и на границе раздела кремний — нитрид кремния проводится под руководством кандидата физико-математических наук С. П. Синеца.

Весьма важная работа по исследованию реальной поверхности интересного полупроводникового материала — арсенида галлия — ведется в настоящее время под руководством кандидата физико-математических наук И. Г. Незвестного.

Ряд работ, проведенных в лаборатории, был посвящен исследованию энергетического спектра поверхностных состояний на полупроводниках, а также процессам взаимодействия света с поверхностными электронными состояниями.

Наконец, в лаборатории постоянно ведутся работы по договорам с предприятиями Министерства электронной промышленности.

В заключение хочется отметить, что перед нами стоят трудные задачи, но коллектив нашей лаборатории с оптимизмом смотрит в будущее и надеется, что организация комплексного исследования поверхности полупроводников позволит нам продвинуться вперед в понимании природы этого сложного объекта, создаст предпосылки для разработки новых полупроводниковых устройств, использующих уникальные особенности полупроводниковых поверхностей.

К. СВИТАШЕВ,
кандидат физико-математических наук.

ГЛАВНОЕ — УЧАСТИЕ

«Здоровье, бодрость духа, творческое вдохновение, бронза мускулов, дисциплина» — таковы ответы большинства сотрудников Института физики полупроводников на вопрос спортивной анкеты о том, что дают занятия физической культурой и спортом.

В этих ответах как нельзя лучше выражена взаимосвязь труда и активного отдыха и то благотворное влияние, которое оказывают систематические занятия физической культурой и спортом.

Главное — участие, вот девиз массовых спортивно-оздоровительных мероприятий. Прошедший год запомнился интересными событиями в спортивной жизни института. Это легкоатлетическая эстафета, посвященная Дню победы. Победитель — команда лаборатории тонких пленок. Капитан команды Жданов. Соревнования по стрельбе из пистолета, посвященные 50-летию Советской Армии, где разыгрывался, кроме лично-командного первенства, приз среди участников Великой Отечественной войны. 97 человек участвовали в этих соревнованиях. И, наконец, рекордным по количеству участвующих в соревнованиях явилось лично-командное первенство института по легкой атлетике — 119 человек. И хотя не было феноменальных результатов, но все участники получили хорошую зарядку «бодрости духа».

Футбольные поединки на приз «Большой Белой лошади», туристские походы выходного дня, рыбалка, поездки за грибами и ягодами — вот неполный перечень спортивно-оздоровительных мероприятий, оставивших в памяти ушедший 1968 год. Как-то незаметно, но в то же время закономерно пришли успехи в «большом спорте» — в первенствах СО АН. Футболисты выиграли зимнее первенство СО АН, лыжники — приз им. Алика Тульского и приз открытия зимнего сезона по II группе. Шахматисты в упорной борьбе с командой ИЯФ стали чемпионами СО АН, волейболисты и легкоатлеты — постоянные призеры первенств. В общем зачете спартакиады СО АН наш коллектив на III месте (трудно еще на равных бороться с такими гигантами, как, например, ИЯФ и т. д.).

Г. МИТЯШИН,
председатель спортсовета.

НОВОГОДНИЕ СОРЕВНОВАНИЯ

Хорошей традицией в научном городке стало проводить в первые числа нового года гонку лыжников. На старт вышло около 60 человек — ученые Сибирского отделения АН СССР, студенты НГУ, строители и члены спортклуба «Новатор». Первыми взяли старт женщины, они померялись силами на дистанции в 3 километра. Победительницей стала мастер спорта Ангелина Федорова — сотрудница Института теплофизики. Ее время 14 минут 29 секунд. Последующие места заняли студентки НГУ — Валентина Кузнецова (15 мин. 20 сек.) и Евгения Рябинина (16 мин. 05 сек.).

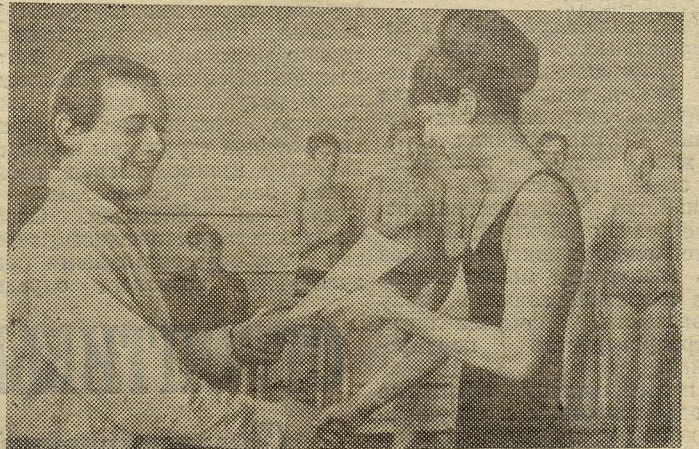
Дистанцию в шесть километров среди мужчин выиграл мастер спорта Александр Горлов — член сборной молодежной команды страны из спортклуба «Новатор». Его время 24 минуты 35 секунд.

На втором месте мастер спорта Альберт Беспалов — сотрудник Института ядерной физики (25 мин. 04 сек.).

А. МАЗЕИН.



Старший техник бюро измерительных приборов Светлана Незвестная — мастер спорта СССР по подводному плаванию, член сборной команды области (первенство области, Бердский залив, лето 1968 года).



Надежда Окунева получает грамоту за первое место в плавании вольным стилем на 500 метров. Она отличная аквалангистка, член сборной команды СССР по подводному плаванию.



Самая неорганизованная секция — охотничья. В ночь под выходные дни маленькие группы вооруженных людей покидают Академгородок. Этот снимок сделан на реке Тое, на крайнем севере Новосибирской области.

Дом ученых СО АН СССР

16 января — балет Новосибирского государственного академического театра оперы и балета Лебединое озеро.

В постановке заслуженного деятеля искусств П. А. Гусева и О. А. Виноградова. Солисты: Л. Д. Кайдани, А. П. Балаба-

нов, В. П. Новиков, В. И. Шевцов.

Начало в 19-30.

17 января — спектакль Новосибирского ТЮЗа: А. П. Чехов — Чайка. Главный режиссер театра заслуженный деятель искусств РСФСР Владимир Кузьмин.

Начало в 19-30.

Объявление

Совет киноклуба «Сигма» проводит обмен бите-оз и сбор членских взносов 22, 23 и 24 января с 19 часов 30 минут до 22 часов в фойе кинотеатра «Москва».

СОВЕТ КЛУБА.

**И. о. редактора
Т. А. ДРЕМОВА.**