ПОЧЕРК МОЛОДОСТИ,

или рассказ о том, как извлекли из жидкого азота полупроводниковые лазеры, заставили их непрерывно излучать при комнатной температуре и переместили частоту излучения в диапазон видимого света

Р. СВОРЕНЬ, специальный корреспондент журнала «Наука и жизнь».

«Наука и жизнь» № 5, 1978.

Слова эти — «нулевой цикл» — узаконенный строительный термин, он относится к сооружению той части здания, которая лежит ниже уровня земли, ниже нулевой отметки. Проще говоря, «нулевой цикл» — это закладка фундамента. Именно с него, с этого цикла, с этого комплекса сложных и трудоёмких работ начинается строительство любого объекта. Потом вырастают на прочном фундаменте этажи, появляются нарядные интерьеры, уютные квартиры, быстроходные лифты, и уже мало кто задумывается о том, с чего начинался дом.

Во всяком деле имеются свои «нулевые циклы», свои невидимые миру фундаментальные работы, истинное значение которых зачастую понимают лишь специалисты. Сейчас нам предстоит интересная встреча с группой учёных, которые сегодня работают на переднем крае физики полупроводников, создают фундамент для электроники завтрашнего дня. Это лауреаты премии Ленинского комсомола 1976 года Иван Арсентьев, Пётр Копьев, Вячеслав Мишурный и Валерий Румянцев. Для встречи с ними мы отправляемся в Ленинград, в ордена Ленина Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Академии наук СССР, или, как его иногда коротко называют, Физтех. Наш конечный пункт — лаборатория контактных явлений в полупроводниках. Руководит ею член-корреспондент Академии наук СССР, лауреат Ленинской премии Жорес Иванович Алфёров.

Научный руководитель молодых физиков и сам довольно молод: в мартовские дни 1977 года, когда его питомцы готовились к поездке в Москву на вручение премии Ленинского комсомола, Алфёрову исполнилось сорок семь. И примерно в это же время он мог бы отметить двадцатипятилетие своей работы в Физтехе. Научные интересы Алфёрова всегда были связаны с физикой полупроводников. Ему, в частности, посчастливилось от самых первых ступеней развивать фундаментальные исследования так называемых гетеропереходов в полупроводниках.

СОТВОРЕНИЕ ПЕРЕХОДА

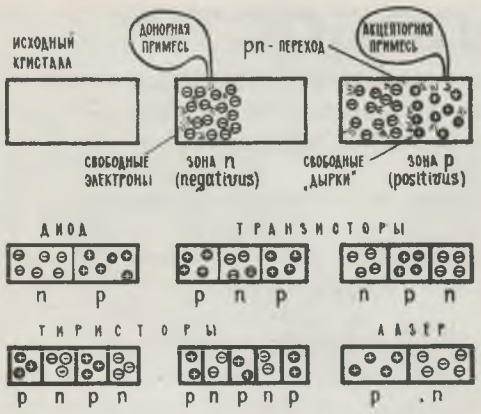
Сам термин «гетеропереходы» на русский язык, наверное, следует перевести как «переходы между разнородными частями».

Мы хорошо помним ещё со школьных времён, что все вещества можно разделить на две группы — проводники и диэлектрики (изоляторы). В первых, в проводниках, есть свободные электрические заряды, а в диэлектриках свободных зарядов нет. Между проводниками и диэлектриками находится ещё одна большая группа веществ, которые называют полупроводниками. В полупроводниках самих по себе есть свободные заряды, но их во много тысяч раз меньше, чем, скажем, в меди или железе. Поэтому полупроводники сами по себе проводят ток значительно хуже, чем классические проводники — металлы.

Обратите внимание на оговорку «сами по себе» — от неё начинается путь к удивительным явлениям, которые как раз и определили интерес современной техники к полупроводниковым материалам.

Физики с виртуозной точностью научились производить с полупроводниками различные операции, которые можно объединить одним понятием — «легирование». Это «легирование» есть не что иное, как введение различных примесей в чистый полупроводниковый материал. Примесей, которые даже в ничтожных количествах — миллионные и миллиардные доли процента — радикально меняют свойства «самого по себе» полупроводника.

Действие примесей в самом упрощённом виде можно описать так: они занимают места в кристаллической решётке основного вещества; в результате такой замены в полупроводнике резко возрастает количество свободных зарядов, и по своим свойствам он заметно приближается к металлическому проводнику. Причём



Легирование полупроводникового кристалла, то есть введение определённых примесей, создаёт в нём сравнительно большое количество свободных электрических зарядов, отрицательных — электронов, или положительных — «дырок». Основа всех полупроводниковых приборов — это pn-переход, граница между участками кристалла с дырочной проводимостью (зона p) и электронной (зона n).

после введения некоторых примесей — их называют донорами — в полупроводнике появляются свободные электроны; на картинках в популярных брошюрах их обычно изображают в виде этаких маленьких шариков или кружков с «минусом» в середине. Другие примеси — их называют акцепторами — создают в полупроводнике свободные положительные заряды; на картинках их тоже рисуют в виде маленьких шариков или кружков, но уже, конечно, с «плюсом» в середине. Причём в таком рисунке значительно больше искажается истина, чем там, где в виде шариков изображались свободные электроны. Дело в том, что свободных, подвижных частиц с положительным зарядом, с «плюсом», в полупроводниковом материале вообще нет. Их роль выполняют так называемые «дырки» — положительные заряды неподвижных атомов с недостающими электронами на орбите. Такой атом может перехватить электрон у своего соседа, и теперь уже тот станет носителем положительного заряда. В результате быстрого перескакивания электрона из атома в атом в полупроводнике будет перемещаться «дырка», будет двигаться положительный заряд. Полупроводниковые материалы с донорными примесями называют полупроводниками типа «*n*», а с акцепторными примесями — полупроводниками типа «*p*». Главное волшебство начинается там, где в одном кристалле соприкасаются участки с электрической проводимостью разного типа. Такая область соприкосновения называется *pn*-переходом, и этот переход есть основа почти всех электронных полупроводниковых приборов.

Уже одиночный *pn*-переход есть основа вполне законченного электронного прибора — это диод, который пропускает ток только в одну сторону, только от зоны *p* к зоне *n*. Он делает то, что раньше поручали электровакуумному диоду, радиолампе с двумя металлическими электродами. А трёхслойный «пирог» — кристалл с двумя переходами, то есть со структурой *p-n-p* или со структурой *n-p-n* — это уже усилительный прибор, транзистор.

КРИСТАЛЛЫ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА

Основой традиционных полупроводниковых диодов или транзисторов всегда был однородный полупроводниковый кристалл — германий или кремний. В самом кристалле, как уже говорилось, были области с разными примесями, но основной материал оставался неизменным. А вот в гетероструктурах не только создаются области с разными свободными зарядами — электронами и «дырками». В гетероструктурах по мере выращивания кристалла меняют саму его основу, само вещество, из которого строится кристаллическая решётка.

Начинают, например, выращивать полупроводниковый кристалл из арсенида галлия *GaAs*, а продолжают выращивания, заменяя частично или полностью атомы галлия на атомы алюминия. Таким образом, гетеропереход — это контакт различных по химическому составу полупроводников, осуществлённый в одном кристалле.

Для чего они нужны? Для чего простой однородный кристалл заменять сложными гетероструктурами? Конечно же делается это ради определённых практических выигрышей. Создание гетероструктур есть принципиально новый способ управления физическими процессами, которые происходят в полупроводниковом приборе. Очень отдалённо это напоминает создание сложных многоэлектродных радиоламп — чтобы управлять движением зарядов в лампе, улучшать её усилительные способности, в баллон вводили дополнительные электроды — ставили дополнительные спирали и

«Наука и жизнь» № 5, 1978.

сетки на пути электронного луча, тормозили или ускоряли электроны электрическими полями, сжимали электронный поток своего рода отражающими пластинами. В полупроводниковый кристаллик не влезешь, чтобы как-то повлиять на движение зарядов в нём. Но зато тонкими технологическими приёмами, созданием гетероструктур, можно влиять на физические свойства кристаллика в определённых его участках и именно таким способом добиваться нужных характеристик будущего прибора.

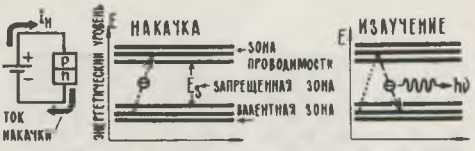
О том, что это даёт в различных полупроводниковых приборах, рассказывают рисунки на стр. 23.

ЧЕТЫРЕ МИКРОБИОГРАФИИ

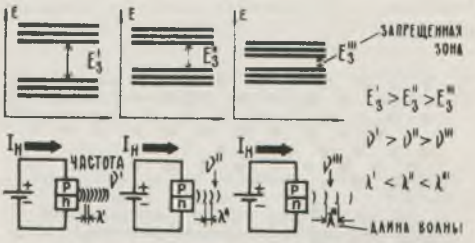
Отмеченная премией Ленинского комсомола работа официально называется так: «Получение и исследование широкозонных твёрдых растворов соединений A_3B_5 и создание на их основе эффективных инжекционных источников излучения в видимой области спектра». Прежде чем пояснять, что стоит за этим названием, попросим авторов работы представиться и хотя бы в нескольких словах рассказать о себе.

— Вы думаете, лучше по алфавиту? Пожалуйста... Я Арсентьев Иван Никитич. Родился в Воронеже в 1943 году, в семье рабочего. Сам тоже пошёл по этой линии — работал столяром, а среднее образование получил в вечерней школе. Уже где-то в самом конце, в десятом классе, по-настоящему понял, что это за удивительно интересная вещь — физика. И просто-таки неотвратимо захотел работать именно в этой области. Поступил в Воронежский университет на физфак. А через пять лет завершающие шаги в своём высшем образовании — подготовку диплома — делал в Ленинграде. Был я направлен в один очень хороший исследовательский институт, однако же поработал в нём всего недели две. В студенческом общежитии сосед по комнате рассказал мне о некоторых работах, которые в то время велись в Физтехе, и я, не подумав даже, что формально не имею на это права, стал готовить диплом по физтеховской тематике. Ходил к Жоресу Ивановичу, который в то время был кандидатом наук и руководил очень небольшой группой. Скандал потом в деканате, конечно, был большой, но кратковременный. А жизнь оказалась навсегда связанной с делом, о котором мечтал. Закончив университет, сначала работал старшим лаборантом в физтеховском филиале. Потом служба в армии, два года в заводской лаборатории на полупроводниковом производстве. В итоге лишь в 1973 году поступил в аспирантуру в лабораторию Алфёрова и смог вовсю включиться в дело. Вспоминаю, что когда пришёл, то ветеран Дима Гарбузов встретил меня такими словами: «Я работаю до двенадцати ночи». А мне, между прочим, именно такой работы и хотелось.

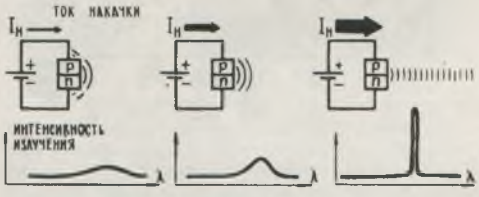
— Я Копьёв Пётр Сергеевич. В прошлом году отметил своё тридцатилетие. Женат, жена — инженер-химик. Сыну Алёше 4 года. К нынешней своей научной тематике пришёл довольно прямым и, наверное, типичным путём. Окончил школу с золотой медалью. Поступил на физический факуль-



Электрический ток, проходя через диод, в прямом направлении поставляет в область pn-перехода свободные электроны, имеющие сравнительно высокий энергетический уровень; в pn-переходе эти электроны рекомбинируют с «дырками» и отдают избыток энергии в виде излучения.

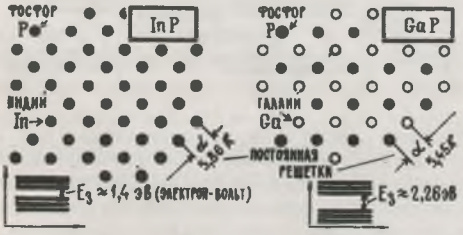


Частота излучения, а значит, и длина волны зависят от ширины запрещённой зоны.

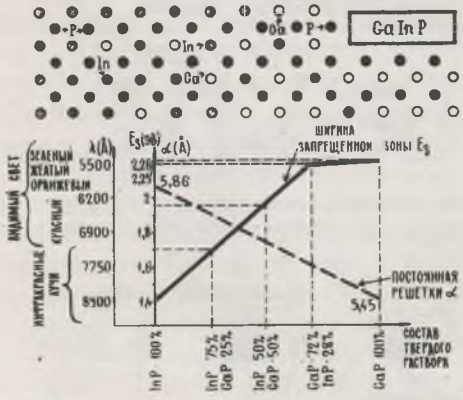


Светоизлучающий диод может дать лазерное (когерентное) излучение лишь после того, как ток накачки превысит некоторую пороговую величину и в pn-переход будет поставляться необходимое количество электронов и «дырок».

тет Ленинградского университета, окончил его в 1970 году с отличием. Диплом писал по полупроводниковым приборам — туннельным диодам, работал над ним именно в этой лаборатории, у Жореса Ивановича. Здесь же окончил аспирантуру в семьдесят третьем году и почти сразу же защитился. Тема диссертационной работы уже была непосредственно связана с гетеропереходами. Работу в этой области начинали вместе со Славой Мишурным, начинали от самого нуля. Здесь, наверное, уместно сразу же сказать, что Слава, так же, как и Ваня Арсентьев, технолог. Они как раз и делают экспериментальные полупроводниковые структуры. А я, как и Валерий Румянцев, грубо говоря, измеритель: мы исследуем полученные структуры, измеряем их параметры, физические характеристики. Но, конечно, вся работа в целом общая, все



Ширина запрещённой зоны данного кристаллического вещества связана с параметром решётки — расстоянием между ближайшими атомами.



В трёхкомпонентном твёрдом растворе галлий-индий-фосфор атомы галлия и индия располагаются случайным образом по законам статистики; параметр решётки, ширина запрещённой зоны и, следовательно, длина излучаемой волны зависят от процентного соотношения исходных соединений индий-фосфор и галлий-фосфор.

вместе думаем, спорим, намечаем, что и как делать, если что-нибудь не получается. В нашем деле ведь чаще всего что-нибудь не получается. И нужно много раз пробовать, менять, проверять и снова пробовать, пока получится то, что хотелось.

— Мишурный Вячеслав Андреевич. Возраст — тридцать два. До золотой медали в школе немного не дотянул, получил серебряную. Закончил тот же институт, что и наш Жорес Иванович — ЛЭТИ имени В. И. Ульянова (Ленина). И, между прочим, тот же факультет — электронной техники. По возрасту среди наших я на втором месте — сейчас мне 32 года. А дочке — 7 лет. К числу наиболее важных событий в жизни нужно скорее всего отнести те, которые помогли мне стать технологом. Мы, кстати, не всегда достаточно верно понимаем само это слово — «технология», считаем, что создатель новой техники — это конструктор, что именно он разрабатывает новые приборы и машины. А технолог вроде бы просто помощник конструктора: он подсказывает, как можно изготовить, «воплотить в металле» то или иное конструкторское творение. Но в действительности во многих областях техники сейчас всё бывает по-другому — именно технолог и создаёт новый прибор. Возьмите, к примеру, фотоэлемент, или светоизлучающий диод, или полупроводниковый лазер. Что в них есть, с точки зрения конструктора? Микроскопический кристалл, держатель, корпус и пара выводов. Главное, что есть в этих приборах, сформировано в самом кристалле, сформировано очень точным введением определённых примесей, созданием *pn*-перехода с нужными свойствами. И сделано это всё именно технологами. Так вот, технологом я стал, к слову сказать, не в институте и не на «Светлане», где проработал два года. Технологом я стал здесь, в Физтехе, в огромной степени благодаря старшему нашему товарищу Диме Третьякову. От него и получил я настоящее «чувство технологии».

— Румянцев Валерий Дмитриевич. В нашей группе занимаюсь тем же, чем Петя Копьев, — измерениями. И биография у меня почти такая же, как у него: родился тоже в сорок шестом, школу тоже окончил с золотой медалью, а институт с отличием. Но, правда, другой институт — точной механики и оптики — ЛИТМО. К Жоресу

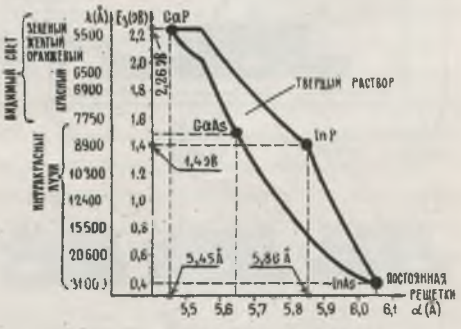
«Наука и жизнь» № 5, 1978.

Ивановичу попал, проработав два года в отраслевом институте, и, признаюсь, поначалу было довольно тяжело. Мы вот с Петром Сергеевичем работали в одной комнате, и я первое время даже не очень понимал, что он делает, — в исследованиях полупроводниковых структур и приборов используются знакомые мне радиотехнические методы и приборы, но есть масса особенностей, тонкостей, которые нужно не просто понять, нужно глубоко прочувствовать. К счастью, период «прочувствования» был кратким. Этому способствовало дружеское и в то же время требовательное отношение товарищей, что, кстати, характерно для всей нашей лаборатории. В какой-то момент мне показалось, что можно многого добиться, если создавать полупроводниковые гетероструктуры на основе четырёхкомпонентных соединений, таких, скажем, как индий-галлий-фосфор-алюминий. Подобное предложение в то время вполне могло показаться преждевременным — у нас ещё не всё было ясно и с трёхкомпонентными структурами. И хотя первое время ребята смотрели на идею скептически, они не отмахнулись от неё. Хорошо, что потом мы все вместе разобрались в проблеме, и четырёхкомпонентные соединения пошли. Они действительно позволили получить хорошие результаты, ранее не достижимые.

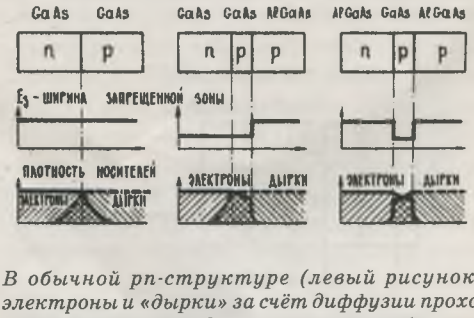
В каждом рассказе молодого физика, в каждой, как сказал кто-то из них, микробиографии, конечно, очень много сугубо личного, своего, неповторимого. Но и много общего во всех этих четырёх научных стартах, много такого, что смело можно назвать типичным для наших молодых людей, выбравших путь в науку.

Прежде всего, у всех почти одинаковы главные движущие силы на этом пути — интерес к делу, к научной проблеме. И непременное стремление к тому, чтобы твоё дело служило людям, обществу — в каждом из четырёх микрорассказов были такие, например, слова: «...работу можно будет считать завершённой, когда в наших домах появятся полупроводниковые плоские телеэкраны...», или «...эта гетероструктура есть уже некий реальный вклад в создание полупроводниковых излучателей для световодной связи, которая откроет людям новые огромные возможности общения...», или «...конечно же есть смысл тратить годы на работу с этими кристаллами — от них лежит путь к оптическим вычислительным машинам, которые могут совершить революцию в технике и в самой нашей жизни...».

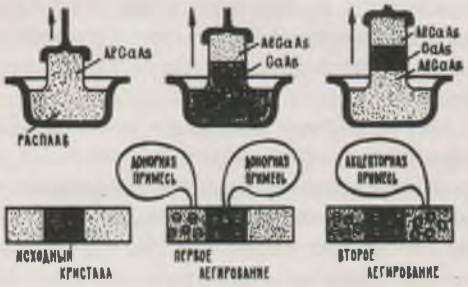
Много общего и в тех частях четырёх микробиографий, которые относятся к формированию специалиста. И к формированию человека. У всей четвёрки молодых академических физиков за плечами студенческие трудовые семестры — у одних на целине, у других в бригадах бетонщиков на далёком Севере и Дальнем Востоке или на железнодорожном строительстве в прикаспийских степях. Об этом рассказывалось всегда с каким-то особым подъёмом, и не может быть никаких сомнений, трудовые семестры сделали свою большую воспитательную работу, помогли отградуировать шкалу жизненных ценностей.



Для четырёхкомпонентного твёрдого раствора существует большая область возможных сочетаний исходных веществ с большим набором значений параметра решётки и ширины запрещённой зоны (длины излучаемой волны).



В обычной pn-структуре (левый рисунок) электроны и «дырки» за счёт диффузии проходят сравнительно далеко в «чужие» области; в двойной гетероструктуре (средний рисунок) материал с большой шириной запрещённой зоны как бы отталкивает электроны, повышает их концентрацию в самом pn-переходе; аналогичным образом в тройной гетероструктуре (правый рисунок) в районе pn-перехода повышается концентрация «дырок».



Образование гетероструктуры можно представить себе как результат выращивания кристалла с одновременной заменой исходного вещества; в дальнейшем в таком кристалле «переменного состава» можно создать зоны разной проводимости с помощью обычного легирования.

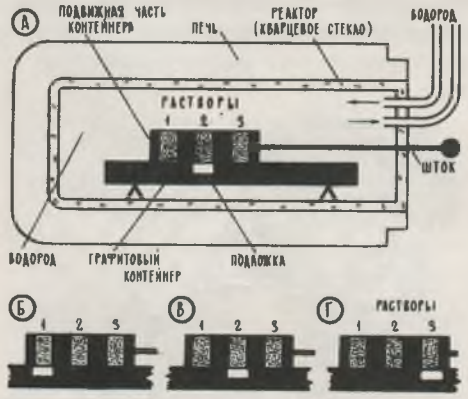
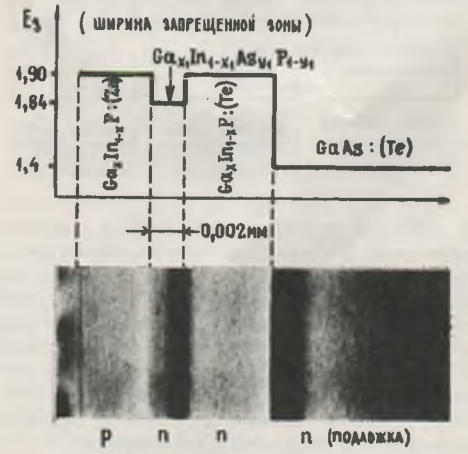


Схема экспериментальной установки для создания гетероструктур. Они образуются на кристаллической подложке в результате последовательной эпитаксии (наращивания) различных полупроводниковых соединений из жидких растворов; после очередной эпитаксии подвижная часть графитового контейнера перемещается, и над подложкой оказывается следующий раствор.



СОЮЗ ИЗЛУЧЕНИЯ И ТОКА

Внимательный читатель, наверное, обратил внимание на то, что в нашем рассказе уже несколько раз мелькали упоминания об устройствах, в которых главное действующее лицо — свет. И все они — световые компьютеры, лазеры, плоский телевизионный экран, оптическая связь, солнечные электростанции — в этих упоминаниях были связаны с полупроводниками. А дело здесь в том, что уже с первых своих шагов физика полупроводников вступила в союз с оптикой, и в наши дни союз этот сделал немало прекрасных подарков технике. Таких, например, как полупроводниковые фотоэлементы, превращающие световую энергию в электрическую,— из них, в частности, собраны панели солнечных батарей, которые кормят электроэнергией космические корабли. Или таких, как светодиоды, из которых собирают цифровые табло многих микрокомпьютеров. Или, наконец, полупроводниковые лазеры, предмет исследований нашей четвёрки молодых физиков.

Полупроводниковый лазер — это тот же диод. Или, если точнее, определённого типа полупроводниковый диод при определённых условиях может давать лазерное излучение. Когда диод включён в прямом направлении и пропускает ток, то к *pn*-переходу с обеих сторон движутся заряды: из зоны *n* — электроны, из зоны *p* — «дырки». В узкой области *pn*-перехода они рекомбинируют, объединяются — свободные электроны занимают места в атомах с недостающими электронами. И каждый такой акт рекомбинации сопровождается выделением порции энергии, часто выбрасыванием кванта света или инфракрасного излучения. Частота (длина волны) излучения зависит от так называемой ширины запрещённой зоны данного полупроводника. Это настолько важная характеристика, что о ней стоит сказать несколько слов особо.

Фотография, полученная с помощью микроскопа (увеличение примерно в 2000 раз), позволяет увидеть «разрез» гетероструктуры из трёх- и четырёхкомпонентных твёрдых растворов. Вверху — график изменения ширины запрещённой зоны и химический состав различных участков гетероструктуры; в скобках указана легирующая примесь, она создаёт необходимый тип проводимости; индексы x и y отображают содержание того или иного соединения в твёрдом растворе.

«Наука и жизнь» № 5, 1978.

Электроны на орбитах атома могут обладать строго определёнными запасами энергии, или, иными словами, могут иметь строго определённые энергетические уровни. Их принято отображать горизонтальными линиями на диаграмме уровней — чем больше энергия электрона, тем выше расположена линия. Самые высокие — уровни внешних, валентных электронов, комплект этих уровней называют валентной зоной (здесь слово «зона» не имеет ничего общего с районами кристалла, с его зонами *n* и *p*; просто два разных понятия названы одним и тем же словом «зона»). Можно каким-то образом ещё больше увеличить энергию электрона, но при этом он уже уйдёт из атома, станет свободной частицей. Такие электроны как раз и участвуют в создании тока, их называют электронами проводимости. А комплект энергетических уровней этих электронов образует так называемую зону проводимости — она, конечно, выше, чем валентная зона. И не просто выше — между валентной зоной и зоной проводимости всегда существует скачок; есть некоторый диапазон энергетических состояний, в которых электрон в принципе не может находиться. Именно «в принципе» — это запрещено законами квантовой механики. Вот этот диапазон запрещённых состояний, запрещённых уровней и называют запрещённой зоной. Энергия электронов, их энергетический уровень измеряются в электрон-вольтах, в этих же единицах измеряется и ширина запрещённой зоны, то есть различие энергетических уровней. И последнее — определяется ширина запрещённой зоны самим полупроводниковым веществом, его химическим составом и структурой.

Рекомбинация пары электрон-«дырка» — это, по сути дела, переход электрона из зоны проводимости в валентную зону. Энергия, которую теряет электрон, как раз и расходуется на излучение. И она, эта энергия, естественно, тем больше, чем выше энергетическая ступенька, с которой «спрыгнул» электрон. А чем большая энергия вложена в квант излучения, тем выше его частота, короче длина волны.

В зоне проводимости так же, как и в валентной, много близких уровней, и из области *pn*-перехода, где рекомбинируют электроны и «дырки», идёт излучение разных, хотя и довольно близких частот. Излучение, разумеется, появляется лишь тогда, когда через *pn*-переход идёт ток, и расходится оно по кристаллу во все стороны. Пока это ещё не лазер, так работает, скажем, светодиод — создал ток, получил свет. Чтобы получить лазерный луч, то есть монохроматическое, когерентное излучение, нужно, чтобы выполнялся целый ряд особых условий. Главное из них — нужно, чтобы одновременно многие электроны излучали на близких частотах. На очень близких. А для этого, в свою очередь, нужно, чтобы большое количество электронов поднялось на очень близкие энергетические ступеньки в зоне проводимости. И итог, к сожалению, не очень радостный: чтобы получить лазерное излучение из *pn*-перехода, нужно пропустить через него большой ток. Этот ток не что иное, как накачка, он поставляет в *pn*-переход сами излучатели, поставляет электроны и «дырки».

В огромном лазерном семействе полупроводниковые лазеры выделяются несколькими неповторимыми особенностями. В них, например, легко управлять интенсивностью излучения, модулировать его, — для этого достаточно просто менять силу тока через переход; эти лазеры миниатюрны, только они пока могут на равных войти в современную электронику, где размеры деталей измеряются миллиметрами и микронами. Идея полупроводниковых лазеров появилась лет двадцать назад, на заре квантовой электроники; огромный вклад в её реализацию внесли советские физики, главным образом в Москве, в Физическом институте имени П. Н. Лебедева, и в Ленинграде, в Физтехе. В течение сравнительно короткого времени были найдены десятки полупроводниковых материалов для лазеров, созданы конкретные приборы. Однако долгие годы оставался практически неустранимым главный недостаток приборов — необходимость большого тока накачки. Из-за этого, в частности, лазеры, работающие в непрерывном режиме, приходилось сильно охлаждать, обычно до температуры жидкого азота — до 77°K, то есть до минус 196°C. И именно идея гетеропереходов открыла путь к резкому снижению тока накачки.

В полупроводниковом лазере с простейшей гетероструктурой одна из областей кристалла, скажем, зона *p*, образована из двух разных веществ. Причём вещество, которое находится дальше от *pn*-перехода,

имеет большую ширину запрещённой зоны. И благодаря этому оно как бы отталкивает в сторону *pn*-перехода электроны, которые за счёт диффузии неизбежно пролезают на чужую территорию. В более сложной структуре ещё и вещество зоны *n* подбирают с таким расчётом, чтобы в неё за счёт диффузии не протекали «дырки». В результате в узкой области самого перехода «бесплатно» повышается концентрация электронов и «дырок», а значит, уже нужен меньший ток для накачки лазера. И появляются гетеролазеры, дающие непрерывное излучение при сравнительно высокой температуре, вплоть до комнатной. И выше. Впервые в мире такие лазеры были созданы в Физтехе в 1969 году.

Это только просто говорится «кристалл образован из двух разных веществ». В действительности же стыковка двух веществ в одном кристалле для лазера — дело очень сложное. Прежде всего нужно с высокой точностью согласовать постоянную решётку — расстояния между атомами исходных веществ. Если постоянная решётка будет различаться хотя бы на несколько сотых долей ангстрема, то никакого лазера не получится, всё излучение погибнет внутри кристалла, на его внутренних дефектах. Кроме того, должны быть подобраны температурные и оптические характеристики материалов. Переход от одного материала к другому должен сопровождаться определённым изменением ширины запрещённой зоны — в этом-то и смысл гетероперехода. Причем запрещённая зона активной области должна обеспечивать заданную длину волны излучения. Кстати, именно эта сторона дела была предметом исследований героев нашего повествования.

Дело в том, что первые гетеролазеры излучали в инфракрасной и красной областях — запрещённая зона излучающего вещества, как правило, получалась довольно узкой. И задача ставилась так: создать гетероструктуру с более широкозонной излучающей областью. Работы велись с трёхкомпонентными твёрдыми растворами соединений A_3B_5, в то время уже традиционными; обозначение A_3B_5 говорит о том, что в соединение входят элементы третьей и пятой групп таблицы Менделеева, например, фосфор и индий (InP) или галлий и мышьяк (GaAs). Твёрдый раствор — это, по сути дела, гибрид двух кристаллов, он выращивается из расплава, в котором есть компоненты и одного и другого. А характеристики гибрида зависят от соотношения этих компонентов.

Поиски новых материалов для гетероструктур — чрезвычайно трудоёмкая экспериментальная работа. Ведётся она, разумеется, не вслепую, каждый новый результат анализируется с позиций тонкой теории полупроводников, из него извлекаются какие-то полезные выводы для следующих проб.

Исследование сложных трёхкомпонентных растворов привело к парадоксальному, казалось бы, выводу: нужно ещё больше усложнить систему, от трёх веществ перейти к четырём. Работать с четырёхкомпонентной системой, конечно, сложней, чем с трёхкомпонентной — резко возрастает число возможных комбинаций исходных веществ, но одновременно и больше возможностей для согласования различных областей сложной гетероструктуры. Именно сделав трудный шаг к четырёхкомпонентным твёрдым растворам и начав, по сути дела, новый раунд исканий, молодые физики в итоге добились успеха: созданные ими гетероструктуры дали лазерное излучение, и сдвинулась, наконец, вверх сама частота излучения — удалось получить оранжевый лазерный луч и даже зелёный.

И ещё один результат — о нём рассказывает Жорес Иванович Алфёров:

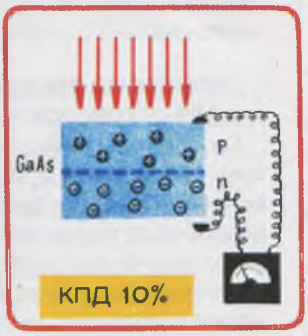
— Работа, удостоенная премии Ленинского комсомола, не просто находится на передовых рубежах мировой науки, результаты работы на ряде участков далеко продвинулись за эти рубежи. Выполненные в условиях жёсткой конкуренции с крупными научными центрами США и Японии, эти исследования дали нашей стране лидирующее положение в одной из важных областей физики и технологии полупроводниковых приборов. Хочется особо отметить, что методы исследований и технологические приёмы были получены самими молодыми физиками, а не их старшими товарищами. И, таким образом, важным результатом всей этой работы нужно, наверное, считать рождение четырёх серьёзных исследователей со своим научным почерком. Исследователей, умеющих принимать самостоятельные решения и брать на себя ответственность за их результаты.

«Наука и жизнь» № 5, 1978.

ГЕТЕРОПЕРЕХОДЫ

позволяют улучшить важные характеристики ряда полупроводниковых приборов

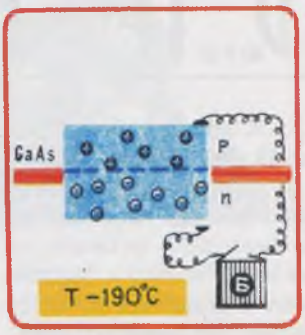
БЕЗ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ



ФОТОЭЛЕМЕНТ



СВЕТОДИОД

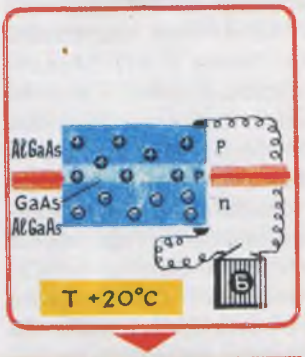


ЛАЗЕР

С ГЕТЕРОПЕРЕХОДАМИ









Излучение гетеролазера (снимок сделан с торца, со стороны излучающей грани кристалла), работающего при комнатной температуре на волне длиной 6600 ангстрем.

Иллюстрация Юрия Чеснокова.

«Наука и жизнь» № 5, 1978.

Бюро Научно-Технической Информации

ТЕСТОВЫЙ ПАРАШЮТ ДЛЯ «ЭКЗОМАРСА-2020»

До запуска российско-европейского проекта «ЭкзоМарс-2020» осталось не так много времени. Миссия предполагает высадку на поверхность Красной планеты автоматического марсохода и посадочной платформы (см. также с. 41). Международные правила защиты планет требуют, чтобы любые аппараты, отправляемые на Марс, проходили строгую стерилизацию, во избежание занесения туда земных микробов. Сотрудники Европейского космического агентства (ЕКА) разработали тестовую модель основного парашюта миссии и провели эксперимент по его тепловой стерилизации в Лаборатории жизни и физических наук в техническом центре ЕКА в Нидерландах. Стерилизацию парашюта диаметром 35 м, сложенного в «пончик» диаметром 80 см, проводили в печи, нагретой до 125°С в течение 35 часов и 26 минут. Квалификационный парашют из нейлона и кевлара оснастили термодатчиками, что позволяет наблюдать, сколько времени требуется для достижения требуемой температуры даже в самых труднодоступных местах сложенного изделия. Эксперимент проводили в чистом помещении площадью 35 м²: весь воздух для чистого помещения проходит через двухступенчатую систему фильтров. Требования к одежде персонала чистой комнаты значительно строже, чем к одежде больничного хирурга, а возможные остатки загрязнений на одежде сдуваются воздушным душем.

Испытуемая модель парашюта после завершения эксперимента была отправлена на тестирование, чтобы убедиться, что стерилизация не вызвала изменения свойств материала изделия. Позднее предполагается протестировать летательную модель парашюта, идентичную тестовой, но без термодатчиков.

Ранее меньший парашют первой ступени миссии «ЭкзоМарс» диаметром 15 м уже прошёл стерилизацию с использованием духового шкафа. Этот парашют должен раскрываться при начальном, сверхзвуковом входе в атмосферу. Второй, более крупный, раскрывается после того, как спускаемый аппарат замедляется до скорости меньше звуковой. Процесс стерилизации должен снизить суммарную «бионагрузку» миссии до одной десятитысячной от её первоначального уровня.



Техник помещает свёрнутый тестовый парашют в стерилизатор с сухим нагревателем. Эксперимент предназначен для миссии ЕКА и Роскосмоса «ЭкзоМарс-2020».

ОЛОВЯННАЯ ОДЁЖКА ДЛЯ ОПТОВОЛОКНА

Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова (Санкт-Петербург) разработал термостойкое оптоволокно для телекоммуникаций. Оптоволоконные кабели должны быть не только механически и химически стойкими, но и работать в широком диапазоне температур. Обычно оптоволокно эксплуатируют при температурах от –20°С до +60°С. Кварцевое оптоволокно, разработанное санкт-петербургскими инженерами, способно работать в диапазоне температур от –50°С до +200°С. Такая термостойкость достигнута благодаря оловянному покрытию с добавками висмута, защищающему волокно от разрушения. Толщина покрытия с особым химическим составом варьируется от 20 до 80 мкм и может использоваться на волокнах диаметром от 125 до 1200 мкм.

Отметим, что ранее, в 2017 году, Оптический институт им. С. И. Вавилова представил оптоволокно из кварцевого стекла с механизмом формирования и удержания в сердцевине передаваемого излучения, работающее в спектральном диапазоне от видимого света до среднего инфракрасного.

СЛОЖНЫЙ МАГНИТНЫЙ МАТЕРИАЛ ИЗ ПРОСТЫХ ВЕЩЕСТВ

Магнитным соединениям со сложной структурой прочат большое будущее в качестве материалов для новых

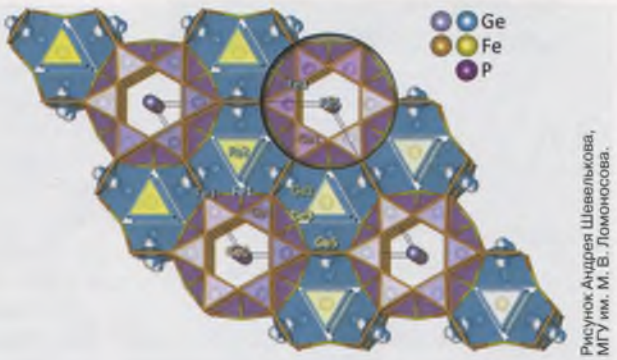


Рисунок Андрея Шевелькова, МГУ им. М. В. Ломоносова.

Блочная кристаллическая структура синтезированного материала. Видно, что в некоторых позициях атомы германия замещены на атомы фосфора и мышьяка.

запоминающих устройств с большой плотностью записи и скоростью работы. Кроме того, некоторые подобные соединения обладают способностью менять свою температуру при изменении внешнего магнитного поля. Столь необычное свойство, очевидно, найдёт применение в новой технике.

Сотрудники химического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова синтезировали магнитные соединения со сложной структурой из простых веществ — порошков железа, германия, фосфора и мышьяка. Отличительная черта этих соединений — блочная кристаллическая структура, в которой присутствуют магнитоактивные атомы, имеющие различное окружение. За счёт различия в атомном окружении направление и величина магнитного момента на магнитоактивных атомах различаются, что создаёт сложную магнитную структуру. То есть даже в одной элементарной кристаллической ячейке материала содержатся блоки с разным типом структур.

Атомная структура синтезированных в МГУ веществ состоит из блоков двух типов, чередующихся в одной кристаллографической плоскости. Блоки представляют собой колонки шириной в несколько атомов. Формирование такой структуры происходит вследствие замещения в определённых позициях атомов германия на атомы фосфора и мышьяка.

Созданные соединения — антиферромагнетики, то есть обладают очень слабой намагниченностью. Однако их поведение необычно: например, их намагниченность при низких температурах возрастает с уменьшением температуры, что нехарактерно для антиферромагнетиков.

ИДЕАЛЬНЫЙ ПРЕРЫВАТЕЛЬ СВЕТА

В оптических системах связи импульсы света непрерывного лазерного излучения имеют определённую продолжительность. Обычно для получения подобных импульсов используют механические прерыватели света — диски с отверстиями той или иной формы. Диски вращаются с некоторой угловой скоростью, и лазерный свет то проходит через отверстия, то прерывается. Однако очень трудно добиться равномерного вращения, и на выходе устройства получаются импульсы света разной продолжительности.

Российско-германская группа исследователей, в которую вошли сотрудники Казанского федерального университета, Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН и Дармштадтского технического университета, разработали микроскопический квантовый прерыватель света, лишённый этого недостатка механического устройства. Новый прерыватель использует баланс между световым давлением и силой Казимира. Как поясняет профессор Казанского федерального университета Владимир Мостепаненко, эффект Казимира заключается во взаимном притяжении двух, расположенных на расстоянии в десятки и сотни нанометров друг от друга, проводящих незаряженных тел под действием квантовых флуктуаций вакуума. Предложенный квантовый прерыватель света представляет собой два параллельно расположенных и обращённых друг к другу зеркала, одно из которых (например, правое) может отклоняться под действием светового давления и силы Казимира, направленных в разные стороны. Если расстояние между зеркалами составляет чуть более половины длины волны лазерного излучения, давление света в устройстве в определённый момент времени резко усиливается, что приводит к отклонению правого зеркала и к уменьшению силы Казимира, притягивающей зеркала друг к другу. В результате излучение выходит наружу. При этом сила Казимира возвращает правое зеркало в исходное положение, и всё повторяется сначала.