





# МОЛНИИ В КРИСТАЛЛЕ

Доктор технических наук  
Ю. Р. НОСОВ

Спросите специалиста по электронике — инженера, научного работника, руководителя предприятия: что сегодня самое перспективное и многообещающее в этой области? Восемь из десяти ответят: «Оптоэлектроника!»

Давняя мысль об использовании в информатике не только электрических сигналов (как это предлагает традиционная микроэлектроника), но и сигналов световых, оптических — эта мысль оказалась очень плодотворной. Выяснилось, что благодаря слиянию электроники с оптикой возможности устройств вычислительной техники и связи неизмеримо возрастут: в сотни и тысячи раз повысится их быстродействие, устройства станут более надежными, помехоустойчивыми, миниатюрными.

Все это было понято еще в шестидесятые годы. Так почему же, вправе спросить читатель, многое и сейчас остается по-прежнему лишь обещанием? А дело вот в чем. Чтобы «впрячь» свет в работу, надо научиться обращаться с ним так же свободно и просто, как с электрическим током. Научиться усиливать и преобразовывать световые сигналы, без потерь передавать их из точки в точку, записывать и сохранять. Но прежде всего надо научиться их генерировать. Что бы ни говорилось о важности всех элементов оптоэлектронной системы, именно источник световых сигналов, излучатель, является ее первоосновой, «альфой и омегой» оптоэлектроники. И конечно, нужен не просто любой излучатель, как, например, осветительная лампа, а такой, который по миниатюрности, экономичности, долговечности был бы под стать транзисторам и интегральным схемам.

Очевидно, что решение проблемы излучателя могло быть найдено лишь в сфере полупроводников.

Перенесемся мысленно лет на тридцать назад. В те годы полупроводниковая наука работала на нужды транзисторной техники — ведь именно с этими приборами связывались большие надежды электроники. Первые транзисторы изготавливались из германия, но было ясно, что лучшие результаты могут быть достигнуты на кремнии и на таком новом тогда полупроводнике как арсенид галлия — двухкомпонентном соединении мышьяка и галлия (GaAs). «Кремниевое» направление быстро достигло успехов и с 1960 года стало основой не только транзисторной техники, но и микроэлектроники.

А вот из арсенида галлия транзисторы упорно не желали получаться. И миллионные затраты на создание совершенных монокристаллов GaAs уже готовы были списать в убыток, оправдываясь тем, что «наука требует жертв», но... Не всегда известно, где найдешь, где потеряешь. Вдруг и на этом, «тупиковом», направлении засветилась надежда, причем засветилась в буквальном смысле слова.

В 1956 году обнаружили: при пропускании электрического тока через арсенидогаллиевый диод он начинает излучать!\*) Так появились светодиоды. Физики и инженеры буквально набросились на интересный эффект. Тотчас же установили, что полупроводниковый кристалл в светодиоде не раскаляется — значит, ответственна за излучение люминесценция, давно известная ученым как «холодное свечение».

Разобрались и в механизме работы светодиода. Используемый в нем

\*) Вообще говоря, излучение полупроводникового диода впервые наблюдал в 1927 году наш соотечественник О. В. Лосев, но интенсивность свечения была так ничтожна, что практического применения «эффект Лосева» не получил, был забыт, и через 30 лет все пришлось повторить. Ситуация не столь уж редкая в науке.



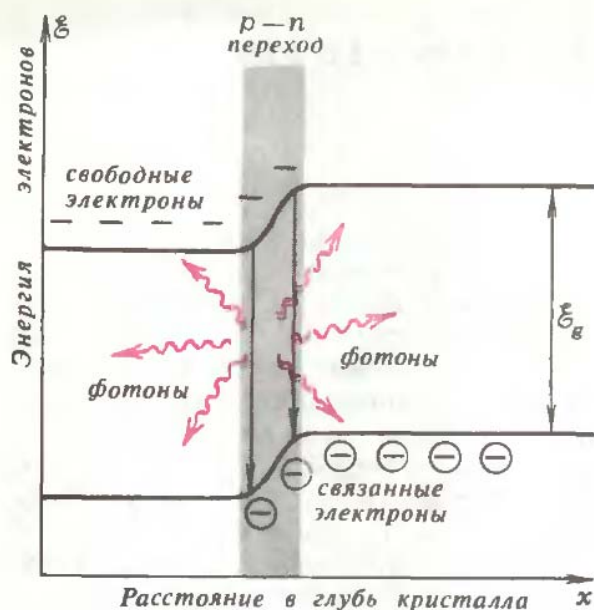


Рис. 1.

кристалл арсенида галлия неоднороден, не все его области одинаковы по свойствам. Легирование различными специальными примесями приводит к тому, что одна половина кристалла (левая на рисунке 1) обогащается подвижными электронами, другая половина (правая) — обедняется. Зато энергия этих электронов в правой половине больше; на границе между двумя частями кристалла (это  $p-n$ -переход, играющий исключительно важную роль во всей полупроводниковой электронике) энергия изменяется скачкообразно. Этот энергетический барьер «запрещает» электронам «просто так» пересекать  $p-n$ -переход слева направо. Только когда к кристаллу извне прикладывается электрическое напряжение, барьер несколько понижается, и часть электронов перетекает вправо — происходит инжекция электронов из эмиттера в базу. Вот здесь, поблизости от  $p-n$ -перехода, и происходит то, ради чего мы затеяли это повествование: электрон неожиданно скачком теряет приобретенную энергию, переходя из подвижного состояния в связанное, а отданная им порция энергии может выделяться, в частности, в виде кванта излучения, фотона. Таким образом, энергию электрического тока светодиод преобразовал с некоторым КПД в энергию излучения!

Картина такая, будто тяжелый камень вкатывают на вершину горы, откуда он летит в пропасть и, ударившись на дне ее о такие же камни, высекает искру. От того, с какой высоты упадет камень, зависит цвет свечения искры — чем шире энергетический зазор между подвижным и связанным состояниями электрона (его называют шириной запрещенной зоны полупроводника  $\epsilon_g$ ), тем больше энергия кванта и тем короче длина волны излучения. С ростом  $\epsilon_g$  цвет свечения смещается по спектру в направлении к сине-фиолетовому участку. При большом токе, пропускаемом через светодиод, «каменепад» становится столь интенсивным, что отдельные «искры» сливаются в непрерывное свечение.

На этом, пожалуй, стоит оборвать иносказание, памятуя, что если метафора и способствует познанию явления, то отнюдь не тем, что она с этим явлением совпадает. Истинная картина квантовых переходов электронов, вызывающих генерацию фотонов, ни к каким другим процессам не может быть сведена, в чем, собственно, и нет необходимости, потому что, будучи понятой, эта картина столь же проста и наглядна, как и другие физические процессы (во всяком случае, не сложнее реального камнепада в горах).

В те годы, о которых идет речь, теория люминесценции уже была хорошо разработана и позволяла не только рассчитывать процессы в кристаллах с известными свойствами, но и предсказывать новые эффекты. А рассчитывать и предсказывать было что.

Дело в том, что первые GaAs-светодиоды излучали в невидимой инфракрасной области спектра. Конечно, такое излучение воспринимается различными фотоприемниками и находит много важных технических применений. Но все же... Хотелось, чтобы светодиоды работали и для глаза — этого самого главного инструмента человека в постижении окружающего мира. Хотелось, чтобы светодиоды засветились всеми цвета-



ми радуги, ярко и чисто. Значит, необходимо было найти другие подходящие полупроводники с большей, чем у арсенида галлия, шириной запрещенной зоны. И как всегда, когда физические механизмы поняты и задача четко сформулирована, средства ее решения нашлись.

Вскоре\*) уже никого не удивляло, что светодиоды на фосфиде галлия интенсивно излучают красный или зеленый свет в зависимости от вида вводимых в кристалл примесей. Использование тройного соединения галлия, мышьяка и фосфора позволило получать любое свечение в интервале от темно-красного до оранжевого и почти желтого. Карбид кремния засветился в желто-зеленой и голубой областях спектра, правда очень-очень слабо. И только синий цвет, как метерлинковская ускользающая синяя птица, все никак не дается в руки ученым. А самыми яркими оказались красные светодиоды — именно под «алыми парусами» оптоэлектроника уверенно «вплыла» в технику и в наш быт.

Во многих устройствах используются наборы из большого числа светодиодов, размещаемых в определенном порядке на общем щитке. По команде, поступающей от устройства управления, из отдельных светящихся точек выписывается нужная цифра, буква, график. Это навело на естественную мысль: зачем пластину полупроводника разрезать на отдельные кристаллики, а потом, уже в составе светодиодов, снова собирать их вместе? Так появились знакосинтезирующие индикаторы — внутри общей пластмассовой оболочки размещается несколько кристаллов либо один кристалл с несколькими точками, светящимися независимо друг от друга.

Светодиоды и индикаторы, появившиеся в промышленности в конце 60-х годов, нашли широчайшее при-

менение. Сегодня их мировое производство приближается к 10 миллиардам(!) штук в год. В электронных часах и калькуляторах, на приборных щитках робототехнических комплексов и гибких производственных систем, в кнопках и клавишах самой различной радио- и электротехнической аппаратуры, на пультах управления самолетов и подводных лодок — где только не вспыхивают эти ярко-красные светлячки и цифры.

Правда, возможности светодиодов ограничены, они используются лишь в устройствах индивидуального пользования при небольших расстояниях от индикатора до глаза. Но уже поговаривают о том, чтобы некоторые марки автомашин оснастить стоп-сигналами из наборов сверхинтенсивных светодиодов. Конечно, до светодиодного освещения квартир далеко, хотя кто знает «что день грядущий нам готовит?».

Однако пора и дух перевести, попробуем слегка подытожить. Все, о чем мы здесь говорили, касалось, говоря техническим языком, применения светодиодов в устройствах отображения информации. С их помощью информация, рождающаяся в недрах ЭВМ в виде электрических импульсов, превращается в зримо воспринимаемую и таким образом реально доходит до человека. Нужны, важны такие устройства? Несомненно! Но ведь это только часть тех проблем, в решении которых должна (и может) оптоэлектроника помочь информатике. Ведь еще остаются проблемы переработки, передачи, хранения информации. Какую лепту может здесь внести светодиод? Увы... Дифирамбы невольно затихают, яркая радуга цветов блекнет...

Во-первых, как уже отмечалось, интенсивность светодиодов очень мала — то, что чувствует глаз, не всегда улавливает фотоприемник, да еще удаленный на некоторое расстояние. Во-вторых, оказалось, что излучение светодиода не монохроматично — о количественной оценке этого недостатка мы поговорим ниже, а сейчас лишь укажем, что такое излуче-

\*) Так, оглядываясь назад, мы говорим сегодня, но вообще-то за этим «вскоре» стоит около десятка лет тончайших аналитических исследований, синтеза сверхчистых полупроводников, разработок новых конструкций и технологий...



ние, захватывающее целую полосу длин волн, не годится для многих оптоэлектронных устройств.

И наконец, главное — светодиод светит почти равномерно во все стороны, сконцентрировать его энергию в одном, остронаправленном луче невозможно. Простейшую для электрических цепей задачу — передать сигнал из точки *A* в точку *B* и только в нее — светодиод решить не может. Большая часть световой энергии тратится не просто бесполезно, она «засоряет» окружающее пространство, происходит утечка информации. Светодиод — этот беспечный транжир и мот, болтун, не способный держать язык за зубами, — явно не пара информатике, где все точно рассчитано и выверено, и на каждый бит отпущено ровно столько энергии, сколько необходимо.

К счастью, светодиоду как излучателю есть прекрасная альтернатива — это лазер, характеризующийся высокоинтенсивным почти монохроматическим остронаправленным излучением. Сделаем здесь небольшое отступление и поговорим о количественном содержании этих свойств лазера.

Направленность характеризуется телесным углом  $\alpha$ , внутри которого лежат генерируемые излучателем лучи; если лучи расходятся, симметрично удаляясь от некоторой оси (направление излучения), то для оценки расходимости используют плоский угол, измеряемый как обычно — в радианах, градусах, минутах.

Строго монохроматических волн в природе не бывает, поэтому для характеристики приближения реального волнового потока к идеальному говорят о степени монохроматичности. Количественно это — отношение полосы длин волн генерируемого излучения  $\Delta\lambda$  к длине волны в центре полосы  $\lambda_0$ ; чем меньше  $\Delta\lambda/\lambda_0$ , тем совершеннее лазер. Для примера укажем, что типичный газовый — гелий-неоновый — лазер обеспечивает  $\alpha < 1'$  и  $\Delta\lambda/\lambda_0 < 0,000001$ . Такой поток вполне подходит для устройств вычислительной оптоэлектроники —

этот термин в последнее время используют для характеристики того направления, которое связано с обработкой информации, представленной в виде оптических сигналов.

Вроде бы все хорошо, однако не будем спешить с окончательным заключением. Представим себе все тот же гелий-неоновый лазер с его почти полуметровой разрядной стеклянной трубкой и с высоковольтным источником питания массой в несколько килограммов. А теперь положим рядом интегральную схему размером с почтовую марку, которая содержит около миллиона (!) транзисторов и требует всего лишь 5-ти вольтового питания. Совместимы ли эти два изделия? Согласитесь, не очень. И эта несовместимость подтвердилась с полной определенностью — многочисленные попытки использовать лазеры в микроэлектронных вычислительных устройствах фактически провалились. Вот уже поистине «в одну упряжку впрячь не можно вола и трепетную лань».

Очевидно, что достигнуть совместности можно лишь в одном-единственном варианте — если лазер, как и микросхемы, будет полупроводниковым.

...История создания полупроводникового лазера весьма характерна для научных открытий XX века. В 1960 году почти одновременно были изобретены твердотельный (рубиновый) и газовый (гелий-неоновый) лазеры, а вскоре после этого ученые предсказали возможность создания и полупроводникового лазера. По аналогии с другими полупроводниковыми приборами такому лазеру предрекали сверхминиатюрность, долговечность, стойкость к внешним воздействиям, низкую стоимость, высокую воспроизводимость параметров и возможность их изменения в очень широких пределах. Создать подобный прибор было очень заманчиво, и в ведущих физических лабораториях мира буквально наперегонки началась охота за полупроводниковым лазером — каждому хотелось накрыть красивую бабочку своим сачком.



А когда теоретики довольно точно просчитали, какова должна быть квантовая структура исходного кристалла, тогда круг полупроводников, «подозреваемых» в возможной причастности к лазерному эффекту, резко сузился. Судьба «бабочки» была предопределена... В канун 1963 года почти одновременно в лабораториях США и СССР были созданы первые полупроводниковые лазеры.

Как и при экспериментах со светодиодами, в пластине арсенида галлия (снова этот полупроводник явился «пионером») изготавливали  $p-n$ -переход; отличие заключалось лишь в том, что при легировании вводилось гораздо больше примесей, вследствие чего образовывалось и больше свободных электронов. Затем, нажимая на пластину острием ланцета, выкалывали из нее крошечные квадратные кристаллики. Пластина колется строго по кристаллографическим плоскостям, поэтому боковые противоположные грани кристаллика оказываются плоскопараллельными и зеркальными; эти два зеркала образуют резонатор, необходимый для лазерной генерации. Затем кристаллик нижней гранью напаивался на массивную медную подложку (для теплоотвода), к верхней грани присоединялся второй, более тонкий электрод — структура готова для исследований.

При пропускании тока кристалл начинал генерировать инфракрасное излучение, причем, как и положено светодиоду, слабо и во все стороны. Но как только ток увеличивали до некоторого значения (его называли пороговым током), картина существенно менялась — резко возрастала мощность излучения, и интенсивный свет вырывался с боковых граней из тех мест (полосок), где плоскость  $p-n$ -перехода пересекает грани резонатора. Исследовали спектр излучения и оказалось, что полоса генерируемых волн резко сжалась. Больше сомнений не оставалось — это лазер!

Быстро разобрались в механизме его работы. Так же как и в светодиоде, приложенное извне электрическое напряжение «загоняет» электрон на «энергетическую горку», только

«горка» эта чуть повыше, а количество электронов намного больше. «Накачаные» электроны скапливаются около  $p-n$ -перехода (здесь образуется активная зона) и, «падая с горки», порождают кванты излучения. Но на этом аналогия со светодиодом кончается. Световая волна, распространяясь вдоль плоскости  $p-n$ -перехода, отражается от зеркальных граней и, многократно проходя через активную зону, вынуждает электроны «упасть с горки». Получается, что огромное количество электронов одновременно и строго одинаковым способом выполняют предписанный им квантовый переход (на рисунке 1 этот переход обозначен черной стрелкой). Поэтому-то луч лазера имеет высокую степень монохроматичности, а также вполне определенную поляризацию. По механизму своего возникновения такое излучение называют вынужденным, стимулированным, индуцированным (это все — синонимы), тогда как излучение светодиода — спонтанное (случайное по направлению и поляризации и в какой-то степени — по длине волны).

О новом приборе заговорили. Казалось очевидным, что вот-вот в оптоэлектронике начнутся большие перемены. Но время шло, а реального применения хоть в какой-нибудь аппаратуре только что родившийся лазер не находил. И вскоре эйфория сменилась удивленным разочарованием, в которое пока еще не хотелось верить.

Лазер работал лишь при низкой, «азотной» температуре ( $-196^\circ\text{C}$ ) и только при условии, что ток пропускали короткими редкими импульсами. При этом долговечность его (как-то неловко даже употреблять здесь этот термин) не превышала нескольких десятков часов. Во всех других случаях он мгновенно перегревался и выходил из строя. Оказалось также, что по степени монохроматичности он лишь в 10—20 раз был лучше светодиода ( $\Delta\lambda/\lambda \approx 0,005$  против 0,05 у светодиода) и в тысячи раз хуже газового лазера. Да и по угловой расходимости ( $\alpha \approx 30^\circ$ ) полупроводниковый лазер скорее походил



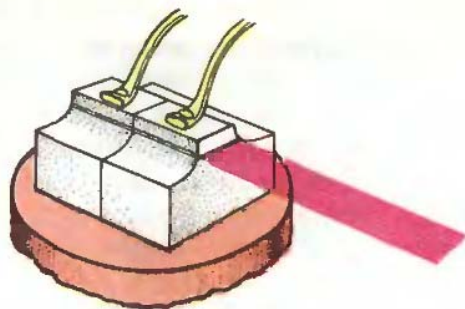


Рис. 2.

на улучшенный светодиод. «Какой же это лазер?» — воскликнули обманутые в своих ожиданиях «оптоэлектронщики-примененцы», обиженно прекратили эксперименты с новым прибором и вновь обратились к теоретизированию по поводу ослепительного будущего «идеальной» оптоэлектроники.

Самое страшное заключалось в том, что недостатки полупроводникового лазера получили вполне строгое и, казалось бы, непреодолимое физическое обоснование. Электроны, инжектируемые  $p-n$ -переходом, не желали задерживаться в тонкой активной зоне, а разбегались по всему кристаллу; то же происходило и со световой волной. Потерянные электроны и кванты, не давая вклада в лазерный эффект, лишь бесполезно разогревали кристалл. Как удержать этих неугомонных переносчиков электрического тока и светового излучения в какой-то одной части кристалла? Ведь заслонку или экран внутрь не введешь — это все-таки монокристалл, в решетке которого атомы располагаются в идеальном порядке. Когда начинали погоню за «красивой бабочкой», обо всем этом как-то не думалось. А теперь стало казаться, что «бабочке» уготовлена судьба заспиртованного экспоната кунсткамеры физических диковин.

И все-таки — в который раз! — изворотливость человеческого разума восторжествовала. Дело решили гетероструктуры. Если в кристалле арсенида галлия часть атомов галлия заменить на атомы алюминия, то структура кристаллической решетки совершенно не изменится — настолько атомы этих двух элементов идентичны по физическим свойствам. Однако

при этом образуется новый полупроводник — арсенид галлия-алюминия, у которого ширина запрещенной зоны больше, чем у чистого арсенида галлия. Граница между двумя этими полупроводниками внутри единого монокристалла и представляет собой гетеропереход; в этой области имеется энергетический барьер и одновременно с ним образуется «оптический барьер» — граница раздела двух полупроводников с разными показателями преломления. Активная зона с большим показателем преломления, «ограниченная» гетерограницами, стала идеальной ловушкой для электронов и световодом для света.

А дальше слово было за «Ее Величеством Технологией». Прошло не так уж много времени, и научились внутри монокристалла изготавливать пары гетеропереходов, расположенных параллельно друг другу на расстоянии, выдержанном с фантастической точностью в несколько атомных слоев. Пороговый ток снизился до десятков миллиампер, верхняя граница рабочей температуры достигла  $100^\circ\text{C}$ , долговечность (правда, у отдельных образцов) достигла десятков лет. С этого начался «Ренессанс» полупроводниковых лазеров. Изобретения и усовершенствования посыпались как из рога изобилия. Надо еще больше снизить пороговый ток? Пожалуйста, используйте структуру, в которой активная зона «зажата» гетеропереходами не только сверху и снизу, но и с боков. Тончайшая микронная нить активного полупроводника возбуждается током всего в 1 мА! Надо сузить спектр излучения? И это пожалуйста. Если одну из гетерограниц сделать волнистой, то избирательность резонатора резко возрастает и степень монохроматичности становится такой же, как у газового лазера. Хочется продвинуться еще дальше по этому пути — используйте структуру с двумя «связанными» кристаллами (рис. 2).

(Окончание см. на с. 31)