

535.318

ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ *)

А. Чайновет

Основной частью систем связи на световых волнах является волокно. Толщиной не более человеческого волоса, оно с высокой точностью изготавливается из сверхчистого стекла и обладает низкими дисперсией и ослаблением света (до 1 дб/км).

Вскоре после изобретения лазера стало ясно, что открытая атмосфера является далеко не оптимальной средой для передачи света. Это привело к необходимости исследовать возможности использования для передачи светового сигнала от одной точки трубопроводов к другой (возможно, эвакуированных и содержащих контролируемую пропускающую среду). При необходимости такие трубопроводы можно было бы оборудовать системами линз и зеркал, позволяющих корректировать пучок и изменять направление его распространения. Можно было бы разработать также

*) Chynoweth A. G. The Fiber Lightguide.— Phys. Today, May 1976, v. 29, No. 5 (Special issue: Lightwave Communications), pp. 28—30, 32, 34, 36.— Перевод Р. Г. Маева и А. С. Семенова.

и соответствующие сервомеханизмы для юстировки зеркал и линз, компенсирующие изменения, возникающие вследствие теплового расширения и деформации, обусловленной другими причинами. Такие системы, без сомнения, могли бы быть построены¹, однако они оказались бы довольно громоздкими, и если бы и нашли применение, то лишь в тяжелых системах связи, таких, например, как система дорожного движения.

Одним из вариантов такого подхода, который исследовался в 60-е годы, была так называемая газовая линза. В наполненном газом трубопроводе с помощью соответствующих нагревательных элементов создавался радиальный градиент температуры, который вызывал градиент

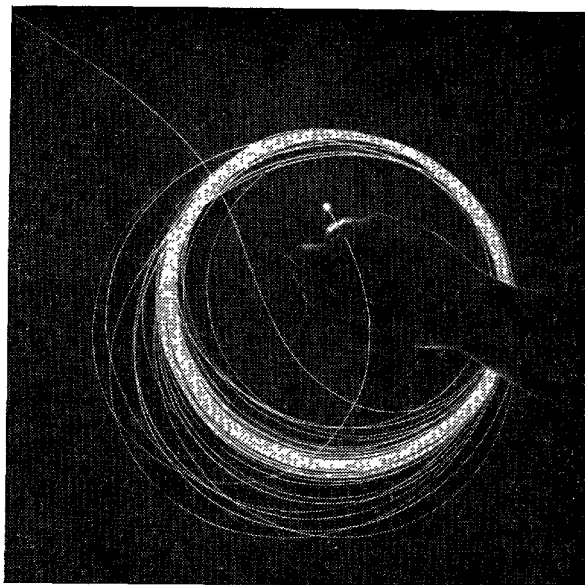


Рис. 1. Световой сигнал на выходе волокна.

Оптические волноводы, такие, как это стеклянное волокно, в не слишком далеком будущем смогут «нести» ваш голос, зашифрованный цифровым кодом. Волокна крепкие, гибкие и могут быть соединены вместе в кабель; утка света на плавных изгибах не является серьезной проблемой.

плотности газа и, следовательно, показателя преломления. Такой радиальный градиент показателя преломления позволял обеспечить волноводный эффект для светового пучка, распространяющегося с большей или меньшей точностью вдоль оси такой газовой линзы. Но хотя эксперименты и подтвердили техническую корректность такого способа, чрезвычайная сложность и многочисленные практические трудности² принудили от него отказаться.

Методом, который был хорошо известен и уже длительное время использовался для передачи света на относительно короткие расстояния, был метод, использующий световые трубки, в которых свет проводится — за счет полного внутреннего отражения — вдоль посеребренных внутри полых трубок или вдоль пластмассовых стержней. Такие схемы, употреблявшиеся во многих случаях, вначале не рассматривались в качестве кандидатов для применения на больших расстояниях из-за относительно высокого ослабления, которым они обладали. Ч. Као и Д. А. Хокман из лабораторий «Стандарт телекоммуникаций» в Англии впервые предположили (в 1966 г.), что световые трубки или стеклянные волоконные световоды могут быть выполнены с потерями, достаточно низкими для того, чтобы

их использовать в качестве передающей среды на достаточно далекие расстояния³. В то время лучшие оптические стекла имели ослабление порядка нескольких тысяч дб/км . Для получения практически осуществимых систем связи необходимо было иметь ослабление в 20 дб/км или меньше. Эти цифры дают некоторое представление об огромном прогрессе в технологии изготовления стекла, который был необходим для этих целей, но Као считал его возможным. Его мнение подкреплялось измерениями поглощения в чистом плавленом кварце, которое составляло лишь несколько десятков дб/км .

Фотография на рис. 1 показывает существующие сегодня стеклянные волокна, используемые в качестве среды для передачи света.

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

С самого начала было очевидно, и это осознавалось во многих лабораториях, что основная волноводная структура должна состоять из сердечника с заданным показателем преломления, окруженного оболочкой, показатель преломления которой несколько меньше. По таким структурам

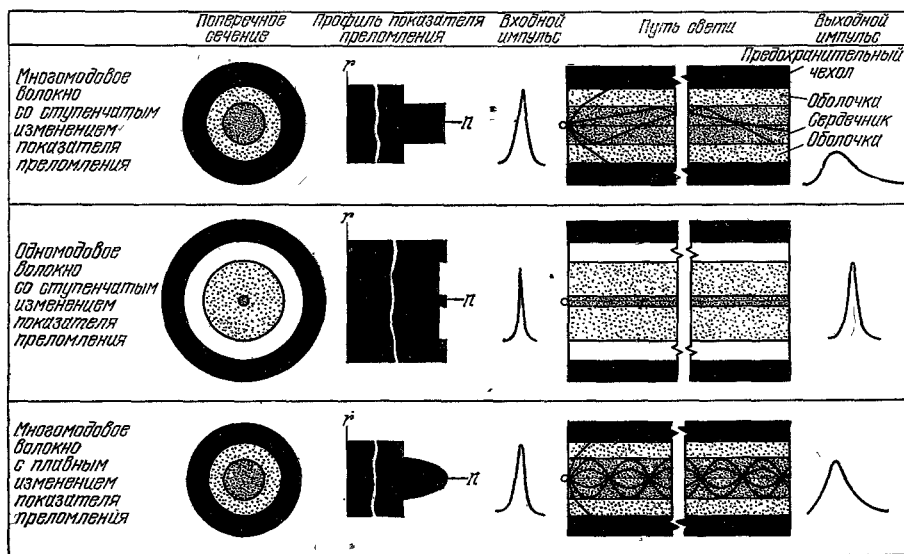


Рис. 2. Схематическое изображение основных типов оптических волноводов, показывающее поперечное сечение стеклянных волокон, профиль показателя преломления в них, пути типичных траекторий света и расплывание световых импульсов (поперек оси волокна) во времени.

оптические волноводные моды могут распространяться, претерпевая полное внутреннее отражение или преломление на границе сердечник — оболочка. И для сердечника, и для оболочки должно использоваться чрезвычайно чистое стекло с низкими оптическими потерями, но в первую очередь это относится к сердечнику, по которому переносится большая часть оптической энергии.

Рассматривались два основных типа волноводов; они показаны на рис. 2. Первый представляет собой многомодовое волокно с сердечником относительно большого диаметра. Это волокно имеет относительно большую числовую апертуру, что делает его особенно подходящим для

собираения света от некогерентного светового источника, такого, как световылучающий диод. Однако простое многомодовое волокно обладает одним существенным недостатком: поскольку световые лучи, или моды, распространяющиеся вдоль волновода в виде относительно резких зигзагов, достигают другого конца волновода позже, чем свет, бегущий вдоль оси, многомодовый волновод обладает довольно большой дисперсией. Таким образом коллимированные импульсы света, поступившие на один конец, по мере прохождения по волноводу расплываются. Это, очевидно, накладывает ограничение сверху на ширину полосы частот, которые могут быть переданы по волноводу данной длины.

Обойти эту трудность можно, создав одномодовое волокно, в котором будет распространяться только одна мода, образующая очень малые углы с осью. Это можно сделать, выбирая либо очень малый диаметр сердечника, либо очень малую разность показателя преломления сердечника и оболочки. Оба способа накладывают очень высокие требования на точность процессов изготовления волновода.

Во многих случаях наиболее привлекательным и изящным решением этой задачи является создание волокна с плавным изменением показателя преломления. По сути дела, это твердотельный аналог упоминавшейся выше газовой линзы. В таком волокне показатель преломления плавно изменяется по радиусу, имея самое высокое значение на оси сердечника волновода и падая по некоторому заданному закону по направлению к периферии сердечника. В качестве первого приближения подходящим является параболический профиль показателя преломления. Мода, или луч, распространяющийся под относительно большим углом к оси, попадая в область постепенно падающего показателя преломления, изгибается этим градиентом в обратном направлении. Но поскольку какое-то время этот луч распространяется в веществе с низким показателем преломления, он имеет более высокую скорость по сравнению с лучом, распространяющимся вдоль оси, т. е. в области с высоким показателем преломления. Правильно выбрав профиль волновода, мы можем держать эти лучи в фазе. Таким образом, многомодовое волокно с плавным изменением показателя преломления и существенно уменьшенными оптическими потерями стало основным объектом в этих поисках волновода из оптического волокна, или волоконного световода, как он теперь называется.

ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЕ ТРУДНОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С ВЫБОРОМ СТЕКЛА

Физика обычно поражает, как мало количественных ответов можно было получить на вопросы, возникавшие перед учеными, приступавшими к поискам подходящей технологии стекла. Десять лет назад отсутствовала достаточно подробная и однозначная информация о таких основных характеристиках, как зависимость коэффициентов преломления и теплового расширения стекла от его состава. Это вносило очень большую долю эмпирического элемента в поиски оптимальной комбинации материалов для сердечника и оболочки. Разумеется, было известно, что необходимо достичь беспрецедентного уровня чистоты стекла, чтобы получить требуемое оптическое ослабление, и было известно, что наибольшее беспокойство, по-видимому, должны вызывать примеси, связанные с ионами различных металлов переходной группы и с водой. Но, опять-таки, количество информации в литературе о спектрах поглощения ионов в различных стеклах было недостаточным. Как правило, было неизвестно, какой уровень концентрации примесей может быть допустим в стеклах или, более того, не знали даже валентные состояния, в которых эти примеси находятся. Почти не было разработано аналитических методов, пригодных для измерения

количества следов примесей в исходном сырье и стеклах, изготовленных из него. Одним из побочных следствий рассматриваемой «стеклянной программы» было создание более тонкой технологии химического анализа. Особенно ценным оказалось применение нейтронного активационного анализа для обнаружения следов примесей. Благодаря ему оказалось возможным детектирование примесей на уровне нескольких миллиардных долей.

Другим вопросом являлось определение теоретического нижнего предела ослабления в чистом стекле. Связан ли этот предел с влиянием края полосы поглощения (хвоста), как это принято считать, например, для

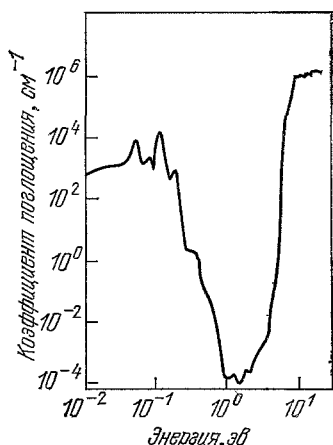


Рис. 3. Спектр поглощения натрий-кальциевого стекла, полученный комбинацией измерений, выполненных со стеклянными слитками в области высокого ослабления, с данными для волокон в области низких потерь. (Из работы Б. Дж. Багли и др. ⁴.)

аморфных полупроводников, или с рассеянием на неоднородностях состава и структуры? Впоследствии оказалось, что для рассматриваемых оксидных стекол эффект края полосы поглощения не оказывает существенного влияния на нижний предел ослабления.

Путем комбинирования спектров поглощения (в стеклянных слитках) в области с относительно высоким поглощением и для достаточно прозрачных областей (в стеклянных волокнах) удалось получить спектры поглощения стекла ⁴, более полные, нежели спектры других материалов. Они перекрывают диапазон изменений коэффициента поглощения больше, чем на десять порядков по величине, а длины волн от 0,05 до 200 мкм. Спектр поглощения натрий-кальциевого стекла показан на рис. 3, причем во всех исследованных стеклах на краю полосы пропускания действительный уровень поглощения всегда мог быть соотнесен с остаточными примесями. Дальнейшая очистка всегда приводила к дальнейшему уменьшению коэффициента поглощения.

Неоднородности плотности и структуры увеличивали потери за счет рассеяния, и здесь вновь давал себя знать недостаток наших знаний о том, каков уровень потерь за счет рассеяния в стеклах различного состава. Можно было предполагать наличие других источников потерь на рассеяние света, таких как пузырьки, преципитаты (выпавшие фазы), трещины, отдельные фазы и нерегулярности на границе сердечник — оболочка. Кроме того, возникали и другие вопросы, на которые, очевидно, в конце концов необходимо было найти ответ: например, какую механическую прочность стеклянного волокна можно гарантировать на длительный срок в зависимости от характера окружающей среды? Ко всем этим проблемам добавлялось еще и то, что большая часть известных сведений была получена эмпирически.

ВЫБОР СТЕКЛЯННЫХ СИСТЕМ

Имеются лишь два вида стекол, которые могут рассматриваться в качестве основы для изготовления оптических волокон. Это многокомпонентные стекла, которые содержат большое количество окислов, и стекла с высоким содержанием кремнезема, представляющие собой, по существу, плавленый кварц, чистый или с добавками. Первые плавятся при

гораздо более низкой температуре и могут быть изготовлены с большими вариациями состава, поэтому они привлекли внимание в целом ряде лабораторий. Этому способствовало также существующее мнение, что они обладают большими потенциальными возможностями и менее сложны для обработки, чем высокотемпературные кварцевые стекла. Однако главной проблемой оставалось приготовление достаточно чистых исходных материалов, из которых предстояло изготавливать стекла, и поддержание этой чистоты в процессе изготовления. Сверхчистое производство стекла традиционно осуществлялось в платиновых тиглях, и загрязнения от тигля и печи создавали главную проблему среди множества других. Тем не менее на многокомпонентных стеклах были получены впечатляющие результаты, в особенности японскими учеными при разработке стеклянных волокон типа «Селфок»⁵ и позже учеными из «Бритиш пост оффис»⁶.

Оригинальные волокна типа «Селфок» представляют собой одну из интересных ранних разработок в области волоконной техники. В них однородный стеклянный стержень превращался в структуру сердечник — оболочка путем ионно-обменного процесса при помещении этого стержня в ванну с расплавом солей. Ионный обмен между стержнем и ванной вызывал плавное изменение состава и, следовательно, радиальный градиент показателя преломления, который обеспечивал самофокусирующее действие в многомодовом волокне.

Позже та же группа японских ученых, как и их коллеги из «Бритиш пост оффис», применили метод двух тиглей для формирования волокна непосредственно из расплава. Небольшой градиент показателя преломления возникает при этом за счет внутренней диффузии в процессе вытягивания⁷.

Первое действительно существенное достижение в оптической связи было сделано учеными из фирмы «Корнинг гласс уоркс», когда они разработали волокна на основе стекол с высоким содержанием кремния. В 1970 г. они сообщили⁸ о волокнах с ослаблением всего 20 дБ/км; затем они улучшили эту цифру до 4, а вскоре и до 2 дБ/км⁹. Они получили эти волокна методом пламенного гидролиза, при котором тетрахлорид кремния с соответствующими галоидными добавками вступает в реакцию с кислородом и образует белый кварцевый осадок, откладывающийся на кварцевой заготовке. Вращением заготовки и перемещением пламени от одного конца к другому добиваются нарастания этого белого осадка. Изменяя концентрацию легирующих добавок во время роста осадка, ученые фирмы «Корнинг» также добились возможности получать градиент состава. Затем осадок путем соответствующей термообработки сплавляется в прозрачное стекло, после этого заготовка удаляется. Из такой «преформы», как она была названа, может быть вытянуто волокно, причем те слои, которые высадились первыми, становятся сердечником, а последние — оболочкой.

Тем временем в лабораториях Белл также было признано, что кварц имеет много преимуществ: его химическая чистота и низкие потери, как было известно ранее, вполне достижимы даже для коммерческих его сортов. В идеале предполагалось, что для сердечника должен быть применен чистый плавленый кварц, но задача состояла в том, чтобы найти материал с более низким показателем преломления, который был бы пригоден в качестве оболочки. Успех пришел с открытием того, что кварц, легированный бором (так называемое боросиликатное стекло), может быть изготовлен с показателем преломления более низким, чем у чистого кварца¹⁰. Немедленно было придумано множество комбинаций с использованием кварцевого сердечника и боросиликатной оболочки. Было обнаружено, что такие волокна могут быть получены с помощью одного из вариантов метода химического осаждения из газовой фазы, аналогичного методу,

применяемому в полупроводниковой технологии. Согласно основной схеме в обычную трубку из коммерчески доступного кварца подаются тетрахлорид кремния и легирующие газы; там они при соответствующей температуре вступают в реакцию и продукт реакции в виде стеклянного слоя осаждается на внутренней поверхности трубки. Измеряя в процессе реакции состав газов, можно создать радиальное распределение состава стекла и, следовательно, его показателя преломления.

Обычный процесс химического осаждения из газовой фазы¹¹, при котором печь окружает кварцевую трубку, является сравнительно медленным процессом. Большим шагом вперед явилась разработка модификации этого процесса¹², в которой реакция происходит в трубке, нагреваемой снаружи водородно-кислородным пламенем; этот метод показан на рис. 4. В результате процесс осаждения значительно ускорился и стал удобнее

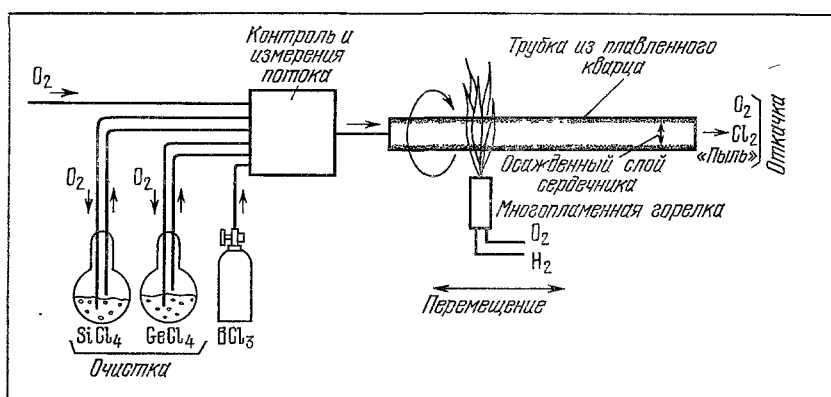


Рис. 4. Модифицированный процесс химического осаждения паров для изготовления преформы, из которой вытягивается волокно.

В этом процессе, разработанном Дж. Б. Макчесни и П. Б. О'Коннором, первые осажденные слои становятся оболочкой, а последние — сердечником.

с практической точки зрения. Более того, при этом может быть осуществлен очень точный контроль за радиальным распределением состава стекла.

Благодаря этому модифицированному методу процесс выращивания волноводных структур приобрел большую степень гибкости. Кварц, как материал сердечника, может быть легирован бором с целью уменьшения показателя преломления, однако его можно и легировать германием или другими соединениями и в этом случае его показатель преломления увеличится. Следовательно, если нужно, внутренняя поверхность трубки может быть сначала покрыта боросиликатным стеклом, а затем можно постепенно перейти к кварцу, легированному германием, с тем, чтобы получить большую числовую апертуру. Можно легко представить себе и другие варианты этого способа.

После того как одна из таких преформ приготовлена, подача газа для реакции прекращается, температура пламени увеличивается так, чтобы трубка нагрелась до температуры размягчения, после чего она схлопывается в сплошной стержень. При этом слои, которые были осаждены последними, становятся сердечником волновода, а первые — оболочкой. Первичная трубка действует как опорный и предохраняющий элемент. Любопытно, что при должном внимании к Природе она склонна к сотрудничеству, так что трубка схлопывается очень симметрично и концентрическая геометрия, необходимая для оптического волоконного волновода, не нарушается.

ВЫТЯГИВАНИЕ ВОЛОКОН

После того как твердый стержень преформы готов, из его нагретого конца вытягивается волокно; из большинства преформ может быть вытянуто волокно длиной в несколько километров. Затем оно наматывается на барабан. При стабильно и плавно работающей намоточной машине и соответствующем контроле всех элементов диаметр волокна может удерживаться в пределах очень «тесных» допусков. И опять Природа оказывается удивительно склонной к сотрудничеству: поперечное сечение волокна представляет собой уменьшенную копию сечения огромной по сравнению с волокном преформы. В типичном случае преформа диаметром в 1 см вытягивается в волокно с внешним диаметром около ста микрон.

Другим способом вытягивания волокна, более привлекательным с точки зрения контроля и обратной связи, оказался способ, использующий в качестве источника нагрева мощный газовый лазер на CO_2 , как показано на рис. 5. Кварц непрозрачен на длине волны 10,6 мкм, соответствующей рабочей волне CO_2 -лазера. Таким образом он оказался высокоэффективным и легко контролируемым источником нагрева.

Одним из наименее понятных свойств стеклянных волокон является их механическая прочность, которая быстро ухудшается, если они остаются незащищенными. Чистое волокно, сразу после того как оно вышло из фильеры, может выдерживать усилия, достигающие миллиона фунтов на квадратный дюйм (примерно 7 тыс. т/см^2). Чтобы сохранить столь высокую прочность, нужно создать защитное покрытие, обычно из какого-нибудь полимера. Чаще всего оно наносится при пропускании волокна через покрывающую ванну на пути к приемному барабану.

Кроме того, волокно может быть помещено в пластмассовый чехол, плотно или свободно охватывающий его. Для этого волокно пропускают через дополнительную фильеру, в которой протекает другой расплавленный полимер.

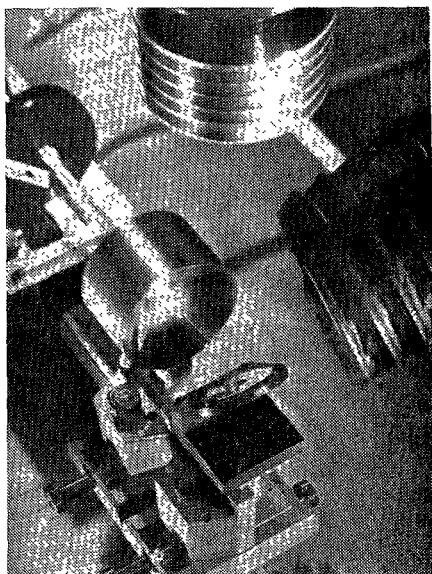


Рис. 5. Вытягивание волокна из конца преформы на основе кварца (нагрев производится сфокусированным зеркалом пучком мощного лазера на двуокиси углерода). (Фото лабораторий «Белл».)

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКОН

Типичная кривая поглощения для волокна, получаемого по модифицированному методу химического осаждения из газовой фазы, показана на рис. 6¹⁴. Она практически представляет собой основную линию, связанную с предельным рассеянием, на которую наложен небольшой пик поглощения, обусловленного группой ОН. Одним из преимуществ процесса, применяемого для изготовления преформы, является то, что используется сырье уже сверхвысокой чистоты, характерной для полупроводникового производства, так что другие пики примесного поглощения обычно

отсутствуют. С коротковолновой стороны полосы ОН поглощение обычно лежит в диапазоне 3—5 дБ/км, тогда как с длинноволновой стороны оно может достигать 1 дБ/км, цифры, которая была получена на 1,06 мкм, и, как правило, падает ниже 2 дБ/км. Столь низкие ослабления стали теперь обычным делом и могут быть воспроизведены, а это является несомненным достижением и вызывает интерес к оптической связи со стороны специалистов в области систем связи.

Тщательный контроль за размерами поперечного сечения волокна необходим не только с целью уменьшения волноводных потерь, но и с точки зрения кабельной и соединительной техники. В стабилизации методики вытягивания волокна также достигнуты большие успехи; теперь достаточно обычным делом стал контроль за диаметром и концентричностью сердечника и оболочки в пределах $\pm 1\%$.

О значении возможности точно контролировать радиальное распределение показателя преломления с целью уменьшения дисперсии мод уже

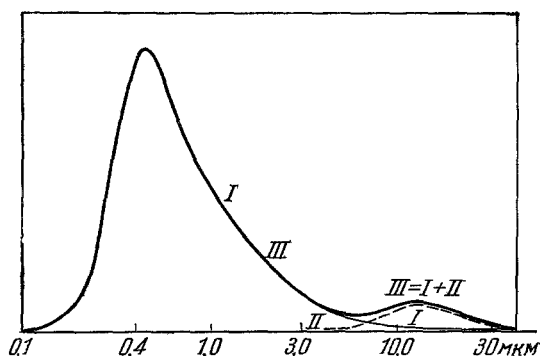


Рис. 6. Типичный спектр поглощения стеклянных волокон, вытянутых из преформ, полученных по модифицированному методу химического осаждения из газовой фазы. Пик на кривой связан с группой ОН.

говорилося. Единственным средством, устраняющим дисперсию мод, является близкий к параболе профиль показателя преломления. Однако, вообще говоря, следует принимать во внимание и дисперсию вещества (аналог хроматической aberrации). Хотя разброс по длинам волн во входном импульсе и мал, на больших расстояниях эффект дисперсии в материале вещества может дать значительное растягивание импульса во времени. Для уменьшения этих эффектов оптимальный профиль показателя преломления нужно выбирать несколько отличным от параболического. На рис. 7 показан типичный профиль такого типа. (Следует заметить, что для большинства стекол дисперсия вещества падает с ростом длины волны и фактически может достигнуть нуля между 1,3 и 1,4 мкм.)

Путем точного изготовления серии волокон со слегка отличающимися профилями показателя преломления удалось измерить изменение дисперсии импульса в зависимости от профиля в боросиликатных волоконных системах¹⁵. Вблизи оптимального (для исследовавшегося состава стекла) профиля импульс растягивался во времени всего лишь на 0,17 нсек на километр. Эта цифра примерно в 70 раз лучше, чем в волокне со ступенчатым профилем, показатели преломления в котором у сердечника и у оболочки имеют ту же величину, что на оси и на периферии волокна с плавным профилем.

Одним из основных достоинств оптических волоконных волноводов по сравнению, например, с УКВ волноводами является их гибкость.

Гибкость их такова, что волокна без всяких напряжений можно проложить внутри и вне оборудования с относительно острыми углами, исключая возможность обрывов. Однако тенденция оптических мод к утечке в оболочку на изгибах вносит дополнительные оптические потери. Хотя длинные изгибы постоянного радиуса могут вносить большие потери, однако

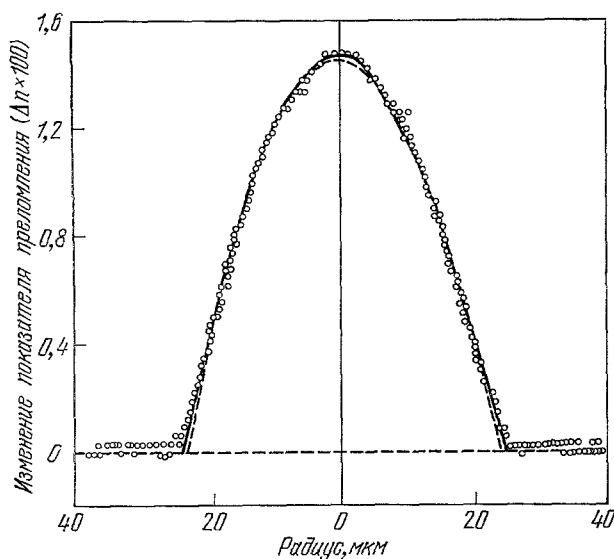


Рис. 7. Профиль показателя преломления волокна, измеренный с помощью методики интерференционных полос.

Приблизительно параболическое распределение по радиусу сводит к минимуму дисперсию мод.

хаотичные мелкие изменения кривизны, называемые «микроизгибами», на практике оказываются более серьезными. Эти потери могут быть уменьшены соответствующим выбором разности показателей преломления сердечника и оболочки, а также выбором размера всего волокна и несущего покрытия, которое придает соответствующую жесткость волокну.

ДРУГИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИЧЕСКИМ ВОЛОКНАМ

Проведенный выше анализ позволяет сделать вывод о том, что оптические характеристики стеклянных волокон в высшей степени удовлетворяют требованиям к среде, передающей информацию. Однако имеется целый ряд других требований, которые должны быть выполнены прежде, чем стеклянные волноводы смогут рассматриваться как практически реальная передающая система. Пожалуй, наиболее важными из них являются требования механической прочности и стабильности. Так, например, если кабели, выполненные из большого числа волокон, предполагается подвергать обычному обращению (и, в частности, протаскивать через соответствующие каналы аппаратуры), то, очевидно, к ним предъявляется требование выдерживать большие силы натяжения, возникающие в этом случае.

Как уже упоминалось, одной из серьезных особенностей стеклянных волокон, природа которой пока еще недостаточно понята, является значительное колебание прочности, которое наблюдается от образца к образцу. Верхний предел прочности стеклянных волокон приближается, по-видимому, к миллиону фунтов на квадратный дюйм, однако многие изоли-

рованные образцы обнаруживают прочность в десятки и даже в некоторых случаях в сотни раз меньшую. Высокая прочность, которой, как правило, обладают «свежеизготовленные» волокна, очень быстро падает со временем, если их не защитить каким-либо покрытием. Взаимодействие между поверхностными микротрещинами материала и химической активностью молекул воды, например, в настоящее время изучено неудовлетворительно. В отсутствие же представлений о таком взаимодействии для объяснения явлений коррозии приходится прибегать к опробованным и оправдавшим себя эмпирическим методам, а именно, обеспечивать защитное покрытие волокон после их вытягивания так быстро, как только возможно. С помощью таких методов недавно удалось достичь существенных успехов в увеличении прочности волокон.

После выбора волокон, которые удовлетворяют требуемым оптическим и механическим характеристикам, следующим шагом является объединение их в кабели, заключающие большое число волокон. Здесь также разрабатывается новая технология. Сформулируем некоторые из наиболее существенных свойств, которыми должны обладать такие кабели. Итак, кабели должны:

- ограничивать предельную степень изгиба, заданную соответствующими ограничениями отдельных волокон;
- сохранять расположение всех отдельных волокон в определенном пространственном положении друг относительно друга с тем, чтобы обеспечить возможность сращивания и соединений кабелей;
- обладать в целом малым поперечным сечением с тем, чтобы сохранить основное преимущество оптических волокон, каждое из которых не толще человеческого волоса, по сравнению с системами электрических проводов;
- максимально упростить сращивание отдельных секций, вплоть до возможности осуществлять это в полевых условиях.

К настоящему времени в этой области уже достигнуты определенные успехи. В некоторых случаях в условиях лабораторных макетов достаточно просто осуществляются сращивания с потерями в среднем $0,1 \text{ дб}$. Таким образом, очевидно, что при наличии потерь в оптических волокнах порядка $4\text{--}5 \text{ дб/км}$ и потерях на сращивания $0,1 \text{ дб}$ (напомним, что полные потери, которые допустимы между источником и приемником для типичных из разрабатываемых оптических систем, могут составлять примерно 55 дб) оптические волноводы позволяют обеспечить передачу сигнала без ретрансляции на несколько километров.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Из всего вышесказанного очевидно, что в технологии оптических волноводов достигнуты исключительные успехи. За несколько лет технология стекла, отвечая требованиям, предъявляемым к ней общими ограничениями систем оптической связи, уменьшила потери, обнаруживаемые в стекле, от нескольких тысяч (в типичных оптических стеклах) до примерно 1 дб/км . Хотя в начале программы эти цели казались недостижимыми, однако постепенно, одна за другой, все технические проблемы были решены.

Большинство успехов в этой области были достигнуты эмпирическим путем, а не на основании точной количественной теории, в отличие, например, от ситуации с полупроводниковыми кристаллами. В последнем случае наши знания достигли такого уровня, на котором необходимые для целей конструируемого прибора параметры материала, в частности, наперед заданные химический состав и его структура, могут быть получены исходя из предварительного аналитического исследования. Со стеклом

ситуация иная: во многих случаях состояние наших фундаментальных знаний о стекле и его свойствах сравнимо с тем, что мы знали о кремнии в начале 50-х годов.

К настоящему времени имеется множество фундаментальных вопросов, которые требуют ответа. Например, могут ли быть созданы стекла с еще лучшими оптическими поглощающими и рассеивающими свойствами? Можно ли найти пути уменьшения дисперсии импульса? Могут ли быть изобретены более совершенные процессы формирования заготовок для изготовления волокон? Может ли быть достигнута более высокая степень контроля concentричности и диаметра в процессе вытягивания волокон? Какова практически долговременная прочность оптических волокон для различных окружающих условий? Каков механизм растрескивания стекла под напряжением? Какие материалы больше всего подходят для защиты стекла от химического воздействия? Как добиться адгезии таких материалов и стеклянной поверхности? И наконец, какие эффекты возникают при длительном облучении низкими уровнями ионизирующего ядерного и космического излучения?

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Kompfner R.— Appl. Optics, 1972, v. 11, p. 2412.
2. Gloge D.— Proc. IEEE, 1970, v. 58, p. 1513.
3. Kao K. C., Hockman G. A. — Proc. IEEE (London), 1966, v. 113, p. 1151.
4. Bagley B. G., Vogel E. M., French W. G., Pasteur G. A., Gan J. A., Tauc J.— J. Non-cryst. Sol. (будет опубликовано).
5. Koizumi K., Ikeda Y., Kitano I., Farukawa M., Sumimoto T.— Appl. Optics, 1974, v. 13, p. 255.
6. Beales K. J., Duncan W. J., News G. R.— In: Optical Fibre Communications. — IEE Conference Publication No. 132: 1975.— P. 27.
7. Koizumi K., Ikeda Y.— Ibid.— P. 24.
8. Kapron F. P., Keck D. B., Maurer R. D.— Appl. Phys. Lett., 1970, v. 17, p. 423.
9. Maurer R. D. — In: Proc. of the 10th Intern. Congress on Glass.— 1974. — P.6.
10. Van Uter L. G., Pinnow D. A., Williams J. C., Rich T. C., Taeger R. E., Grodkiewicz W. H.— Mater. Res. Bull., 1973, v. 8, p. 469.
11. French W. G., Pearson A. D., Tasker G. W., MacChesney J. B.— Appl. Phys. Lett., 1973, v. 23, p. 338.
12. MacChesney J. B., O'Connor P. B., Presby H. M.— Proc. IEEE, 1974, v. 62, p. 1278.
13. Taeger R. E.— Am. Ceram. Soc. Bull., 1973, v. 52, p. 704.
14. Tasker G. W., French W. G.— Proc. IEEE, 1974, v. 62, p. 1282.
15. Cohen L. G., Tasker G. W., French W. G., Simpson J. R. — Appl. Phys. Lett., 1976, v. 28, p. 391.

535 318

ИСТОЧНИКИ СВЕТА *)

Г. Крессел, А. Ладани, М. Эттенберг, Г. Локвуд

Излучающие свет диоды просты по конструкции, однако свет лазеров на гетеропереходах испытывает меньшую дисперсию и более эффективно соединяется с волокном; оба типа источников уже обладают сроком службы свыше года.

Выбор системы для оптической связи в значительной степени определяется доступностью необходимых для нее элементов. Хотя системы,

*) Kressel H., Ladany I., Ettenberg M., Lockwood H. Light Sources.— Phys. Today, May 1976, v. 29, No. 5 (Special issue: Light Communications), pp. 38—42, 45—46.— Перевод Р. Г. Маева и А. С. Семенова.

использующие передачу сигнала через атмосферу и применимы в некоторых случаях, они в основном могут употребляться в небольших установках, с присущими им допустимыми ограничениями. Оптической передающей средой, которая должна иметь большое значение в будущем, является волокно стеклянное или пластиковое; и, следовательно, определяющими являются свойства этих волокон: поглощение, дисперсия, механическая прочность и т. п.

Другим определяющим фактором является требование совместимости друг с другом трех основных компонент: источников, волокон и приемников, которые должны быть использованы в системе. К счастью, выяснилось, что такая совместимость существует, и это оказалось одной из причин того, что оптическая связь является быстро развивающейся областью. Коммерчески доступные оптические волокна обладают умеренными потерями и малой дисперсией (как модовой дисперсией, так и дисперсией среды) в диапазоне длин волн 0,8—1,1 мкм. В этой статье мы обсудим современное положение с полупроводниковыми источниками света, работающими именно в этом диапазоне, а поскольку здесь могут быть применимы как когерентные, так и некогерентные источники, мы будем обсуждать как лазеры, так и светоизлучающие диоды.

Мы ограничимся в этой статье независимыми дискретными элементами. Полупроводниковые лазерные элементы, как ожидается, в будущем могут продвинуться в область интегральных функций, в направлении, которое описано в статье Э. Конвелл *).

ГЕТЕРОПЕРЕХОДНЫЕ СТРУКТУРЫ

Потенциальные возможности лазерных диодов для оптической связи и других приложений были реализованы лишь после появления первых практически пригодных лазерных структур на основе гетеропереходов арсенида—алюминия—галлия и арсенида галлия¹⁻⁵. Имевшиеся ранее лазеры на гомопереходах в GaAs имели столь высокие пороговые и рабочие токи, что практически не могли успешно работать при комнатной температуре. В некоторых гетеролазерах, которые мы будем обсуждать, пороговые плотности тока уменьшились на два порядка, т. е. до 500 а/см² по сравнению с 50 000 а/см² для гомопереходов. В результате этих достижений удалось получить компактные лазеры, работающие в непрерывном режиме с высокой яркостью и выходной мощностью в диапазоне 10 мвт, которая может быть непосредственно промодулирована с частотой до сотен мегагерц. Рис. 1 наглядно иллюстрирует малые размеры и яркость одного из таких непрерывных лазеров, конструкция которого аналогична используемым в системах оптической связи.

С появлением оптических волокон, обладающих потерями меньше 20 дб/км, следует ожидать, что многокилометровые (даже без ретрансляторов) системы с высокой скоростью передачи данных станут конкурентоспособными по сравнению с существующими коаксиальными системами электрической связи.

Имеется также множество приложений волоконной оптической связи как для передачи сигнала на короткие расстояния, так и при условии низкой скорости передачи данных (например, в местных распределительных системах). Светоизлучающие диоды удовлетворяют многим требованиям таких систем, а поскольку они не являются пороговыми приборами, их выходная мощность не чувствительна, как у лазеров, к небольшим колебаниям рабочего тока или окружающей температуры. В технологии свето-

*) Перевод в этом номере УФН, с. 639 (Прим. ред.)

диодов много общего с лазерной технологией, поэтому они имеют тенденцию к совместному развитию. Фактически на сегодняшний день светодиоды достигли выходной мощности в несколько милливатт с частотой модуляции 100—200 мГц.

Наиболее разработана в настоящее время технология лазеров и светодиодов на основе тройного сплава $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Технологически это выглядит так: на подложку из GaAs с высокой степенью точности методом жидкостной эпитаксии последовательно наращиваются тонкие (0,05—1 мкм) слои. Применяя состав сплава в области рекомбинации материала с прямой запрещенной зоной⁶ можно менять длину волны излучения в диапазоне 0,8—0,9 мкм, наиболее интересным в данном случае. Излучение



Рис. 1. Этот, похожий на маяк лилипутов, непрерывный лазер с двойной гетероструктурой кажется еще меньше по сравнению с обычной швейной иглой.

Показанный здесь источник, излучающий на длине волны примерно 7500 Å, аналогичен по конструкции приборам оптической связи, которые работают в районе 8200 Å (эта длина волны плохо воспринимается цветной пленкой). Излучающая область этого лазера имеет ширину около 15 мкм и толщину около 0,5 мкм. (Фотография предоставлена лабораториями фирмы RCA.)

(в том числе и в лазерном режиме) может быть получено на более коротких длинах волн, но при этом ослабление и дисперсия в волокнах становятся более заметными. Самые чистые (свободные от группы ОН) из имеющихся волокон имеют ослабление и дисперсию, которые в диапазоне 1,0—1,4 мкм уменьшаются до ничтожной величины, так что появляется необходимость в разработке новых систем сплавов и технологии гетеропереходов, излучающих и в этом диапазоне.

В системе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ при изменении x от 0 до 1 параметр решетки меняется лишь на 0,14%. Поэтому гетеропереходы в этой системе создают несущественные дефекты, связанные с упругой деформацией, и обладают долговременной надежностью. В большинстве других тройных соединений ширина запрещенной зоны и параметр решетки значительно изменяются в диапазоне между экстремумами, соответствующими двойным соединениям, которые их составляют; примерами таких тройных соединений могут служить $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ и $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$. В результате, гетеропереходные структуры в этих материалах содержат множество дефектов, вызванных неизбежными деформациями на границах гетероперехода. Однако, например, такая гетероструктура как арсенид индия-гал-

лия — фосфид индия-галлия может быть согласована по параметру решетки и свободна от дефектов.

Другим способом получения эффективных излучающих диодов в диапазоне 1,0—1,1 мкм является создание гетеропереходов на основе четверных соединений, таких как $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ и $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$. В этих сплавах, которые перекрывают данный диапазон, ширина запрещенной зоны и параметр решетки могут выбираться независимо, как показано на рис. 2. Ценой некоторой сложности такая более высокая степень свободы позволяет создавать гетеропереходы, свободные от деформационных дефектов.

Как свидетельствует все возрастающее число публикаций, имеются определенные успехи в разработке лазеров и светодиодов в районе 1,1 мкм.

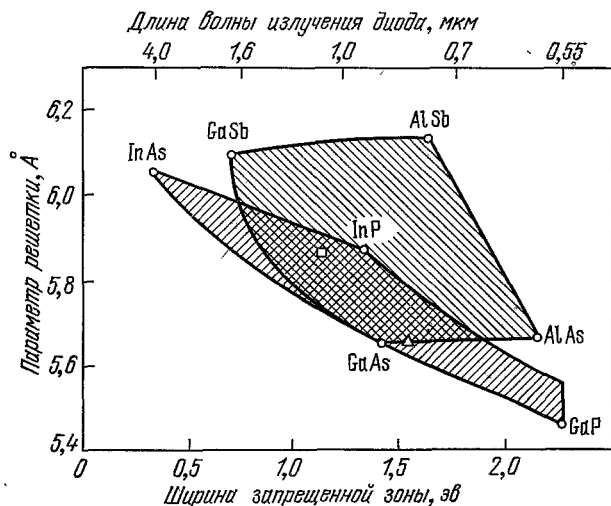


Рис. 2. Значения ширины запрещенной зоны и параметра решетки, перекрываемые четверными соединениями $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ и $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$.

Границы областей представляют собой тройные соединения, а их вершины — двойные. Показаны два практически интересных сплава: квадратик (□) соответствует сплаву $\text{In}_{0,80}\text{Ga}_{0,20}\text{As}_{0,35}\text{P}_{0,65}$, его параметр решетки совпадает с параметром InP, из которого может быть изготовлена подложка; на его основе может быть создан диод, излучающий на длине волны 1,1 мкм; треугольник (△) показывает положение сплава $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$, который совпадает по параметру решетки с GaAs и излучает примерно на 0,82 мкм.

Однако предстоит еще многое сделать для обеспечения их надежности и устранения влияния дефектов решетки. Будет ли оправдано такое усложнение технологии заметными улучшениями как ослабления, так и дисперсии, в конечном счете, определится стоимостью и сроком службы приборов.

Проблема несовпадения параметров решетки в гетеропереходах может рассматриваться и с точки зрения несоответствия дислокационных сеток. Например, при 1 %-ном содержании дефектов решетки на поверхности дислокации будут рождаться приблизительно на каждые 100 атомных плоскостей. Поскольку ядро дислокации состоит из центров безызлучательной рекомбинации, столь высокая плотность дислокаций уменьшает внутреннюю квантовую эффективность диодов. Более того, для дислокаций граница структуры не всегда непреодолима так, что они могут распространяться и в глубь многослойных структур.

Влияние дислокаций на эффективность излучения наглядно иллюстрирует рис. 3, на котором сравниваются микрофотографии рядов дислокаций, полученные с помощью электронного микроскопа (съемка на про-

свет) в несовпадающей гетероструктуре и с помощью катодолюминесцентного сканирования аналогичной структуры. Темные линии и пятна на микрофотографии катодолюминесценции являются областями с низкой излучательной эффективностью и соответствуют дислокациям, расположенным параллельно и перпендикулярно к плоскости наблюдения. Следовательно, при создании гетероструктур для светодиодов и лазеров чрезвычайно важно либо выбрать систему с полностью совпадающими решетками, либо удалить дислокации из активной области путем постепенного изменения состава полупроводника.

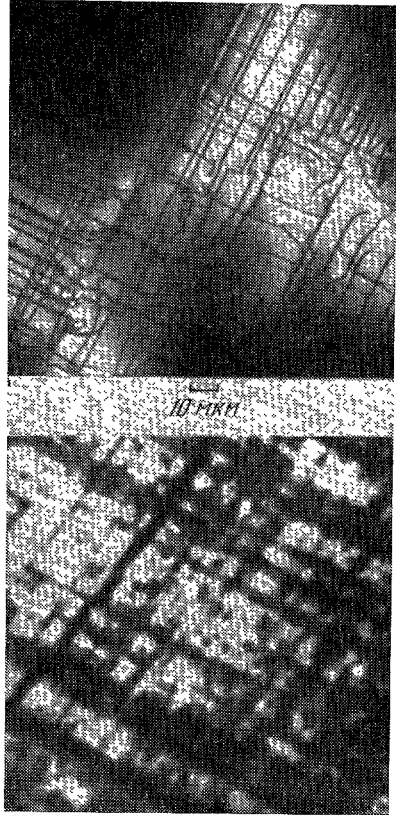
ЛАЗЕРЫ В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ

Хотя имеется множество возможных конфигураций лазерных диодов, работающих в непрерывном режиме, симметричный двойной гетеропереход с полосковым контактом является общепринятым. Это простейшая и наиболее подходящая с точки зрения оптической связи лазерная геометрия. На схематическом и реальном поперечном разрезе такого типичного лазера, показанном на рис. 4, виден оптический резонатор (область рекомбинации), ограниченный диэлектрическими стенками с большой шириной запрещенной зоны. За ними следуют области GaAs *n*- и *p*-типа проводимости, на которые нанесены омические контакты.

Для эффективной генерации лазерного диода требуется эффективное удержание неосновных носителей и излучение в оптическом резонаторе, который одновременно представляет собой область рекомбинации диода. Обе эти задачи успешно обеспечивают гетеропереходы. Радиационное удержание в них обеспечивается скачком диэлектрической проницаемости, а носители удерживают потенциальный барьер, образующийся в результате различия в ширине запрещенной зоны материалов, образующих гетеропереход. Средняя плотность пар носителей, инжектируемых в область рекомбинации диода с двойным гетеропереходом при плотности тока j , равна

$$\Delta N \approx \frac{j\tau}{ed},$$

где e — заряд электрона, τ — время жизни носителей, а d — ширина области рекомбинации (т. е. протяженность гетероперехода). В типичном лазерном диоде на GaAs ΔN на пороге генерации при комнатной темпе-



Ри. 3. Ряды дислокаций, вызванных несоответствием решеток, в слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ с постепенным изменением состава, выращенным по методу газовой эпитаксии на подложке из GaP. Верхнее фото — микрофотография, полученная с помощью электронного микроскопа (съемка на просвет); взято из работы [7]. Нижнее фото — картина катодолуминесценции при сканировании электронным пучком; дислокации вблизи поверхности видны в виде неизлучающих областей.

ратуре составляет \approx примерно $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Для уменьшения пороговой плотности тока мы ограничиваем ширину области рекомбинации, помещая гетеропереход, образующий потенциальный барьер для неосновных носителей, на расстоянии, меньшем диффузионной длины от инжектирующего гетероперехода. Однако для предотвращения чрезмерной излучательной рекомбинации инжектируемых носителей существенно, чтобы границы этих гетеропереходов были относительно свободны от дефектов.

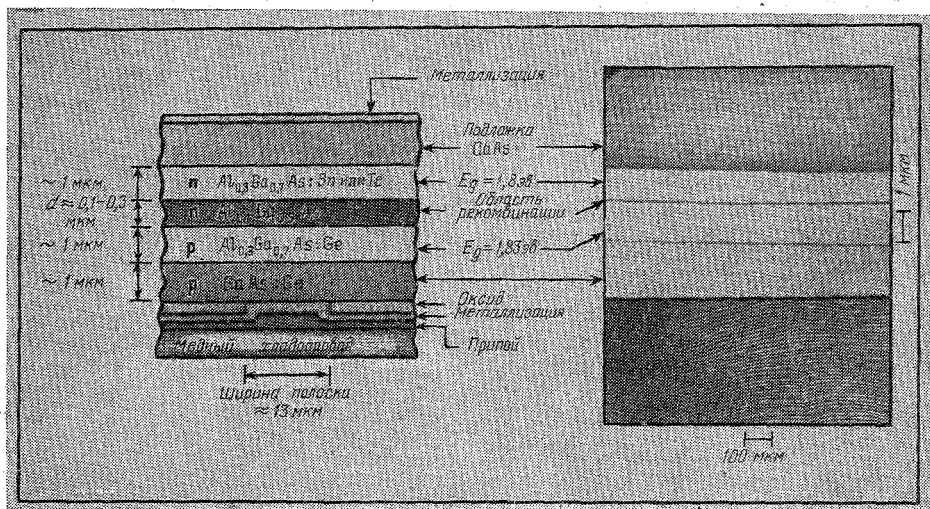


Рис. 4. Поперечный разрез типичного лазера для оптической связи изображен схематически (слева, не в масштабе) и на микрофотографии образца (справа), который был отполирован под малым углом, для получения большого увеличения в поперечном направлении.

«Террасная» структура, видная на нижней части фотографии, — артефакт роста, связанный с некоторой шероховатостью поверхности роста.

Безызлучательные потери носителей на границе характеризуются скоростью рекомбинации s на этой границе. В условиях обычного режима генерации мы можем записать эффективную скорость рекомбинации, связанной с существованием границы, в виде

$$\tau_{эфф}^{-1} \approx \tau_0^{-1} + 2sd^{-1},$$

где τ_0^{-1} — скорость рекомбинации в отсутствие границы. Внутренняя квантовая эффективность равна

$$\eta_i \approx \frac{\tau_{эфф}}{\tau_0},$$

так что

$$\eta_i \approx \frac{1}{1 + 2s\tau_0 d^{-1}}.$$

В типичных лазерных диодах $d = 0,3 \text{ мкм}$, а $\tau_0 \sim 10^{-9} \text{ сек}$. Следовательно, для получения внутренней квантовой эффективности в 50% нужно, чтобы $s \leq 2 \cdot 10^4 \text{ см/сек}$.

Единственным существенным вкладом в скорость рекомбинации s являются безызлучательно рекомбинирующие состояния, возникающие в гетеропереходах из-за несовпадения параметров решеток двух материалов. Если это несовпадение менее 0,1%, то s будет меньше, чем $2 \cdot 10^4 \text{ см/сек}$.

и в этом случае непрерывный режим возможен. Экспериментальные данные относительно s в гетеропереходах GaAs — Ga_{1-x}Al_xAs показывают, что в обычно используемых лазерных структурах (где $\Delta a_0/a_0 \leq 0,07\%$) $s \approx 5 \cdot 10^8$ см/сек — величина, вполне удовлетворительная для диодов с узкой областью рекомбинации.

Для того чтобы добиться распространения волн вдоль плоскости перехода, и одновременно для уменьшения порогового тока и повышения эффективности, необходимо обеспечить вынужденное излучение в области инверсной населенности (или в непосредственной близости от нее). Два гетероперехода, как это видно из рис. 4, обеспечивают контролируемую степень удержания излучения вследствие более высокого показателя преломления в узкозонной области рекомбинации. Доля удерживаемого излучения зависит от протяженности гетероперехода d и скачка коэффициента преломления Δn на длине волны генерации⁹. Так, например, в структурах Al_xGa_{1-x}As — GaAs $\Delta n \approx 0,62x$ при $\lambda \approx 0,9$ мкм. Вообще говоря, чтобы избежать потерь, возникающих вследствие асимметрии в таких тонких волноводах, желательно, чтобы Δn было постоянным вдоль всего гетероперехода. Однако даже в лазерах с двойной симметричной гетероструктурой удержание волны в пределах гетероперехода постепенно снижается с уменьшением его протяженности.

От доли излучения, удерживаемой в области рекомбинации лазера с двойным гетеропереходом, зависит как диаграмма направленности излучения, так и пороговая плотность тока. Зависимость диаграммы направленности (распределение излучения в дальней зоне) связана с тем, что она определяется эффективными размерами источника (распределением излучения в ближней зоне); пороговая же плотность тока J_n определяется прежде всего оптическим усилением на пороге:

усиливается только та часть оптического потока, которая распространяется в пределах области рекомбинации. На рис. 5 показаны вычисленные и экспериментально полученные значения J_n в зависимости от d при разных значениях Δn , соответствующих разным высотам барьеров гетероперехода. Самое маленькое значение J_n , равное 475 а/см², получено¹⁰ при $d = 0,1$ мкм и $\Delta n = 0,4$ (данные соответствуют структуре Al_{0,6}Ga_{0,4}As — GaAs — Al_{0,6}Ga_{0,4}As). Следует заметить также, что высота барьера влияет и на высокотемпературный режим работы лазеров¹¹.

Желательный максимум пороговой плотности тока для работы в непрерывном режиме лежит ниже 2000 а/см², причем двойные гетеропереходные лазерные диоды стабильно работают при комнатной температуре при концентрации Al в активной области от 0 до 12%. Вследствие соответствующего изменения ширины запрещенной зоны это соответствует диапазону длин волны излучения $0,8$ — $0,9$ мкм. Недавно было сделано сообщение¹² о получении режима непрерывной генерации при комнатной тем-

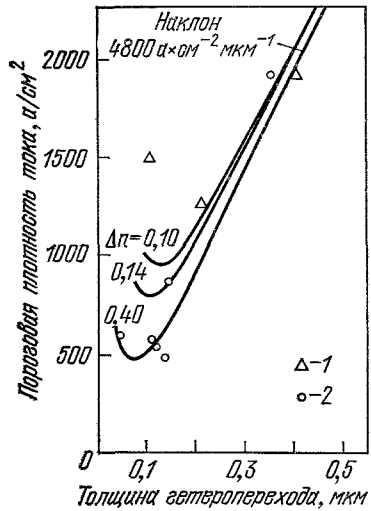


Рис. 5. Пороговая плотность тока в зависимости от толщины гетероперехода в двойных гетеропереходах на Al_xGa_{1-x}As.

Экспериментальные точки соответствуют скачкам концентрации алюминия $\Delta x = 0,20$ (1) и $0,65$ (2). Теоретические кривые построены для указанных скачков показателя преломления Δn , причем предполагалось, что $\Delta n = 0,62\Delta x$.

пературе на длине волны $1,0 \text{ мкм}$ в системе $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, причем была достигнута $J_n = 2000 \text{ а/см}^2$. В другой работе¹² сообщалось об импульсном режиме при комнатной температуре и низких порогах в гетеросистеме $\text{InGaAsP} - \text{InP}$.

ПОЛОСКОВАЯ ГЕОМЕТРИЯ

Лазерные диоды изготавливаются скалыванием по двум параллельным граням, образующим оптический резонатор. Чтобы ограничить размер в поперечном направлении, в непрерывных лазерных диодах используется полосковая геометрия, показанная на рис. 6. Такая конструкция обладает следующими преимуществами:

— излучение испускается из малой области; это упрощает ввод излучения в волокно с малой числовой апертурой;

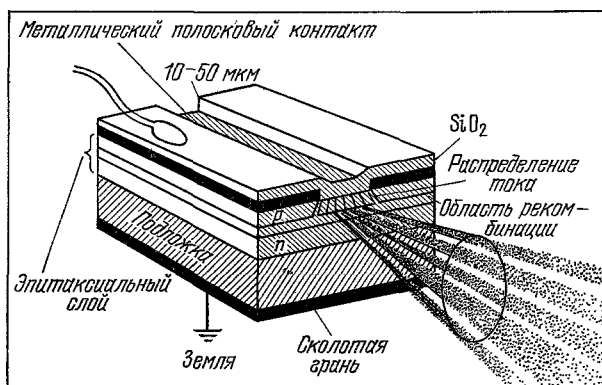


Рис. 6. Схема типичного гетеролазера непрерывного излучения.

Чтобы показать полосковый контакт, рисунок перевернут по сравнению с рис. 4. Распирение пучка в поперечном направлении вызывается дифракцией.

— рабочие токи могут быть сделаны минимальными, поскольку активная область может быть образована с помощью довольно простой методики фотолитографического нанесения контактов;

— облегчается диссипация тепла в диоде, так как выделяющая тепло активная область находится в середине неактивной полупроводниковой среды;

— вследствие небольшой величины активной области требуется, чтобы свободной от дефектов оказалась лишь небольшая часть области рекомбинации;

— активная область в двух главных направлениях изолирована от окружающей среды. Предполагают, что этот фактор существен с точки зрения длительности срока службы диода.

В простейшей структуре с полосковым контактом¹³ активная область изготавливается в виде открытой полоски нанесением пленки SiO_2 . Поверхность диода затем металлизировается, и омический контакт образуется только на открытой части поверхности. В других используемых методах полосковый контакт образуется путем имплантации глубоких ионных центров, увеличивающих сопротивление в боковом направлении, или же путем протравливания канавки. Различные технологические вопросы рассматриваются в статьях специального выпуска «Journal of Quantum Electronics», посвященного полупроводниковым лазерам¹⁴.

Диоды, работающие в непрерывном режиме, как правило, имеют тонкую p -область, припаянную к медному теплопроводу. Это позволяет улучшить теплоотвод, а мягкий припой (например, индий), позволяет уменьшить напряжения в структуре.

Поперечной шириной излучающей области можно регулировать рабочий уровень мощности. Например, 100 *мвт* в непрерывном режиме (с одной грани) может быть получено при ширине полоски 100 *мкм*. Однако при уровнях мощности, обычных для оптической связи (5—10 *мвт*), используются полоски шириной примерно 13 *мкм*. Такая ширина полосок является результатом компромисса между желанием, с одной стороны, иметь достаточно низкие рабочие токи, а с другой, — получить приемлемый уровень мощности. Типичная кривая зависимости выходной мощности от диодного тока представлена на рис. 7. Температура перехода в таких приборах лишь на несколько градусов превышает температуру теплопровода. Так, например, вычисленное значение разности температур при обычной входной мощности, равной 0,5 *вт*, токе через диод 0,3 *а* и тепловом сопротивлении 14 *к/вт* составляет 7 °К.

Электромагнитные моды лазерного резонатора образуют две независимые системы с поперечной электрической и поперечной магнитной поляризациями. Номера мод m , s и q определяют число синусоидальных полуволн, укладываемых вдоль трех осей резонатора — поперечной, боковой и продольной соответственно.

Разрешенные продольные моды определяются средним показателем преломления и величиной дисперсии. В обычных диодных лазерах расстояние между модами резонатора Фабри — Перо составляет несколько ангстрем. Боковые моды определяются прежде всего боковыми граничными условиями диода. В лазерах с полосковой геометрией в основном существуют лишь моды низких порядков, расстояние между ними 0,1—0,2 Å и они проявляются как спутники при каждой продольной моде. Поперечные моды зависят от изменения диэлектрической проницаемости в направлении, перпендикулярном к плоскости перехода. В диодах, рассматриваемых нами, существует только основная мода, что является следствием ограничения ширины волноводной области (толщины гетероперехода) значением, существенно меньшим одного микрона. Таким образом, диаграмма направленности излучения состоит из одного лепестка в направлении, перпендикулярном к переходу. (Поперечные моды высших порядков вызвали бы лепестки типа «заячьих ушей», нежелательные при вводе излучения в волокно.)

При работе лазера в режиме основной поперечной моды полная угловая ширина пучка на уровне половинной мощности в направлении, перпендикулярном к плоскости перехода, зависит от распределения излучения в ближней зоне. Чем уже излучающая область в направлении, перпендикулярном к переходу, тем шире пучок. В обычных непрерывных диодных лазерах ширина пучка примерно 30—50°. Ширина пучка в плоскости перехода (в боковом направлении) обычно составляет 5—10° и лишь слегка зависит от топологии диода и его внутренней геометрии. По край-

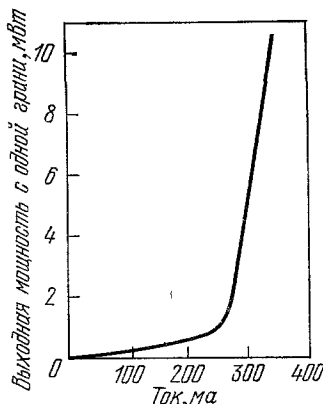


Рис. 7. Мощность непрерывного излучения, выходящего из одной грани типичного лазера на арсениде алюминия—галлия, в зависимости от протекающего тока при комнатной температуре.

ней мере половина мощности, испускаемой с одного торца диода, может быть введена в многомодовое волокно со ступенчатым показателем преломления с числовой апертурой 0,14 и диаметром сердечника 80 мкм.

Поскольку режим генерации на основной поперечной моде легко достигим, большинство лазерных диодов с узкой полосой работает на нескольких продольных модах, и следовательно, излучают в спектральной полосе шириной 10—30 Å, хотя некоторые из них могут давать и несколько

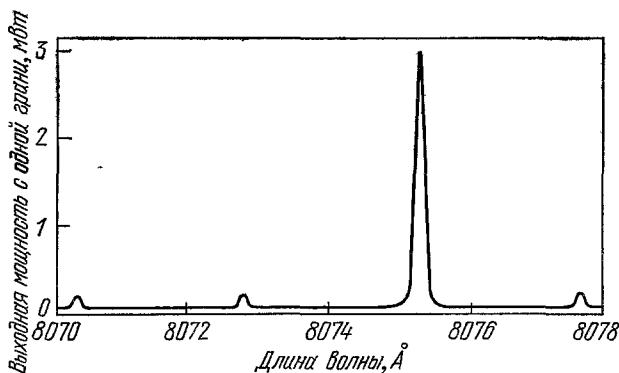


Рис. 8. Спектр излучения с одной грани непрерывного лазера на AlGaAs. Он излучает 3 мвт в режиме одной продольной и основных поперечной и боковой мод.

милливатт в одной моде. На рис. 8 показан спектр излучения такого лазера, работающего на основных боковой и поперечной модах и на одной продольной моде. Его ширина линии равна 0,15 Å, а излучаемая мощность 3 мвт.

Способы модуляции лазерного излучения весьма разнообразны и зависят от конкретного приложения. Для получения быстрой импульсной модуляции диод накачивается током, близким к пороговому (но несколько ниже его), а затем уже подается импульсный ток с соответствующим уровнем над порогом. Если же нет предварительного «тока подпитки», то возникнет задержка генерации (связанная со спонтанным временем жизни носителей), до тех пор, пока населенность носителей не окажется полностью инвертирована и лазер включится. Эта задержка (в обычном случае несколько наносекунд) исчезает, если на диод подано такое «подпороговое» смещение.

СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ

Ширина спектра светодиодов при комнатной температуре обычно составляет 1—2 kT° (300—600 Å), т. е. на один или два порядка больше, чем для обычных лазерных диодов. Вследствие спектральной дисперсии волокон это может ограничить применение светодиодов для волоконной связи на большие расстояния. Более того, эффективность ввода излучения светодиода в волокно с низкой числовой апертурой гораздо меньше, чем для лазерных диодов. Однако светодиоды имеют и преимущества, состоящие в простоте конструкции и меньшей температурной зависимости мощности излучения. Например, спонтанная мощность светодиода уменьшается лишь в 1,5—2 раза с ростом температуры диода от комнатной до 100° С (при постоянном токе); при этом мощность лазерного диода уменьшилась бы больше, чем втрое.

Топология светоизлучающих диодов выбирается с таким расчетом, чтобы уменьшить собственное перепоглощение излучения, обеспечить ре-

жим работы при высокой плотности тока и увеличить эффективность ввода излучения в волокно. Хотя используемые структуры применимы к любым материалам, большинство работ о применении таких диодов в оптической связи до сих пор было посвящено $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Для оптической связи рассматриваются в основном две конфигурации диодов: поверхностный излучатель¹⁵ и боковой излучатель^{16, 17}. В поверхностном излучателе область рекомбинации лежит вблизи поверхности, как показано на рис. 9. Для ввода волокна в подложке из GaAs протравливается углубление. Излучение такого диода практически изотропно. Гетероструктуры с боковым излучением имеют геометрию, аналогичную лазерной геометрии, изображенной на рис. 6. В них для улучшения направленности излучения в направлении, перпендикулярном к плоскости перехода, используется внутренний волновод, связанный с гетеропереходом,

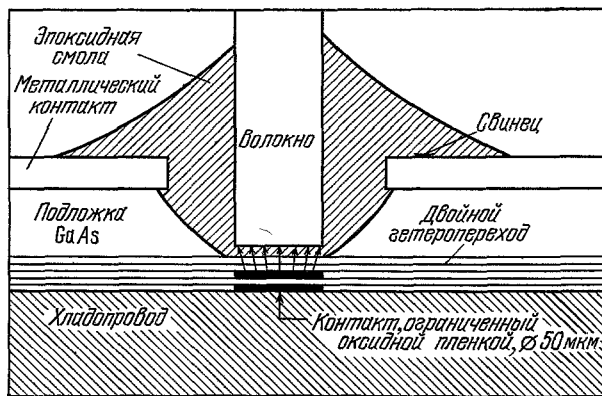


Рис. 9. Схематический разрез светодиода, излучающего с поверхности через протравленное углубление, который сконструирован специально для волоконной оптики.

¹Излучение в диодах такого типа изотропно

по которому распространяется спонтанное излучение. Боковые размеры излучающей области подгоняются под размеры волокна, но обычно составляют 50—100 мкм.

Структуры с боковым и поверхностным излучением, дающие выходную мощность в несколько милливатт в диапазоне спектра 0,8—0,9 мкм, работают при токах 100—200 мА (2000—4000 а/см²). Потери на ввод излучения в волокно со ступенчатым показателем преломления при числовой апертуре 0,14 составляют 17—20 дБ для поверхностных излучателей и 12—16 дБ для боковых (ср. с 3 дБ для инжекционных лазеров). Поскольку входные потери обратно пропорциональны квадрату числовой апертуры, в волокна с большей апертурой можно ввести гораздо большую мощность. Но и при таких потерях из светодиода с двойным гетеропереходом на основе $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$ можно ввести в волокно с числовой апертурой 0,14 и диаметром 80 мкм примерно 0,1 мВт световой мощности, излучаемой при токе через диод около 200 мА и приложенном напряжении 1,7 в.

Рассмотрим теперь проблему модуляции. Мощность излучения светодиода (при постоянной величине импульсов тока) следующим образом зависит от частоты модуляции:

$$\frac{P(\omega)}{P_0} = [1 + (\omega\tau)^2]^{-1/2},$$

где τ — время жизни инжектированных носителей в области рекомбинации, а P_0 — мощность излучения при постоянном токе. (Однако паразит-

ные элементы схемы могут привести к уменьшению диапазона модуляции мощности ниже этой величины.)

Очевидно, что для получения высокоскоростных диодов требуется, чтобы τ имело возможно меньшее значение (однако без потерь во внутренней квантовой эффективности). Низкие значения τ получаются при высоких уровнях легирования, однако в GaAs и соединениях его группы образуется высокая плотность центров безызлучательной рекомбинации, при условии, когда концентрация легирующей примеси приближается к пределу растворимости при заданной температуре роста. Из известных до сих пор в литературе данных по светодиодам максимальной частотой модуляции обладает двойная гетероструктура, легированная германием: около 200 мГц (в точке 3 дБ) ¹⁸. Преимущество использования германия состоит в том, что он может быть введен в GaAs с концентрацией до $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, обеспечивая таким образом время жизни порядка одной наносекунды без излишнего ухудшения внутренней квантовой эффективности.

Что касается светодиодов в области 1,0—1,1 мкм, то в структурах InGaAs с излучением с поверхности была достигнута мощность порядка 1 мВт ¹⁸, и здесь можно ожидать дальнейшего прогресса, связанного в особенности с использованием гетеропереходов на InGaAs — InGaP с совпадающей решеткой ¹⁹.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ПРИГОДНОСТЬ ДИОДОВ

В любой реальной системе оптической связи следует прежде всего рассматривать практическую пригодность составляющих ее элементов. Поэтому главной задачей было исследование бесчисленного множества механизмов отказа, которым были подвержены ранние электролюминесцентные приборы ²⁰. Типы повреждений принято идентифицировать как поверхностные (имеется в виду излучающая поверхность) и объемные; они могут иметь постепенный и катастрофический характер. Поверхностная деградация является специфически лазерной проблемой, поскольку излучающие грани, где она и происходит, являются зеркалами, ограничивающими резонатор Фабри — Перо. С другой стороны, объемная деградация может происходить как в лазерах, так и в светодиодах. Большинство механизмов отказа были устранены с усовершенствованием всех этапов технологии (выращивание кристалла, изготовление диода), однако немногие оставшиеся требуют к себе самого внимательного отношения, поскольку именно они определяют предельный срок службы приборов. Согласно недостаточно подтвержденным данным среднее время работы до отказа в случае приложений в телефонии лежит в диапазоне 100 000 часов. Истощающей модели повреждений лазерных граней до сих пор не построено, однако уже к настоящему времени накоплены в этой области значительные феноменологические сведения.

Повреждение излучающей поверхности интенсивными световыми полями — явление, хорошо известное в твердотельных лазерах, и природа его аналогична природе повреждений, обнаруженных во всех типах полупроводниковых лазеров при различных условиях, когда плотность оптической мощности в области рекомбинации достигает величин порядка 10^6 Вт/см^2 . Разрушение лазерной поверхности проявляется в виде локального разложения материала, а также, в некоторых случаях, в виде «растрескивания».

Критический уровень разрушения зависит, кроме того, от длительности импульса t , уменьшаясь в диапазоне 20—2000 нсек как $t^{-1/2}$. Неудивительно поэтому, что поверхностные разрушения могут возникать в лазерных диодах, работающих в непрерывном режиме при комнатной температу-

ре, когда их излучение происходит на максимальном уровне (даже при сравнительно низкой полной мощности). Вследствие неоднородного распределения излучения в плоскости перехода в лазерах с полосковым контактом установить критерии уровня излучения в зависимости от полной мощности затруднительно. Однако порог разрушения при длительности импульса 100 нсек примерно в 100 раз меньше, чем в диодах, работающих в непрерывном режиме и отобранных из той же партии ²¹.

Кроме зависимости от плотности оптического потока и длительности импульса, было обнаружено, что окружающие условия, в особенности влажность и дефекты поверхности (царапины, соринки) также могут приводить к преждевременному повреждению поверхности. Для устранения этих причин следует, очевидно, работать при точно определенном максимальном уровне мощности, а грани лазера должны иметь защитное диэлектрическое покрытие для изоляции их от окружающей среды. Для лазеров, работающих в непрерывном режиме, диапазон линейной плотности мощности составляет примерно 1 мвт на один микрон ширины полоски. Повреждение грани, по крайней мере на ранней стадии, проявляется обычно в уменьшении дифференциальной квантовой эффективности при отсутствии роста пороговой плотности тока.

Другой тип разрушений, объемная деградация, сопровождается ростом пороговой плотности тока и падением дифференциальной квантовой эффективности вследствие уменьшения внутренней квантовой эффективности и увеличения коэффициента поглощения. Может также происходить небольшое уменьшение мощности излучения, но не обязательно: так, если диод лазерный и работает вблизи порога, он может просто отключиться. В любом случае небольшой регулировкой тока удастся восстановить прежний уровень мощности. При такой обратной связи определение срока службы становится достаточно произвольным и зависящим от выбора условий.

Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что постепенная деградация происходит в результате возрастания концентрации безызлучательных центров в области рекомбинации, развивающихся из дефектов, существовавших в ней первоначально. Точечные дефекты могут также диффундировать в активную область из смежных областей. Такими дефектами являются дислокации и вкрапления примесных атомов. Следует упомянуть наблюдающийся в отдельных деградирующих лазерах эффект образования «темных линий» в областях, где люминесценция постепенно гаснет ²². Эти области отождествляются с большими цепями дислокаций, развивающихся из существовавших в начале небольших отрезков путем миграции вакансий или атомов в междоузлиях ²³. Кроме того, в процесс деградации, по-видимому, вносят вклад и большинство диспергированных центров безызлучательной рекомбинации, таких, как естественные точечные дефекты.

Как известно, процесс многофотонного испускания происходит в результате безызлучательной электронно-дырочной рекомбинации, которая вызывает интенсивные колебания центров, уменьшающих таким образом свою энергию смещения ²⁴. (Действительно ли все точечные дефекты образуются в пределах области рекомбинации, остается неясным.) Следовательно, если происходит безызлучательная электронно-дырочная рекомбинация, скажем, на поверхностных разрушениях диода (как в случае эксперимента со сплюснутым краем диода, описанного в работе ²⁵), то она ускоряет движение точечных дефектов в активную область прибора.

Как полагают, на срок службы приборов влияют также стехиометрия материала в активной области и вблизи от нее и природа легирующей примеси ²⁶. Лучшей начальной стехиометрией можно объяснить более высокое сопротивление процессу деградации у диодов на основе $Al_{0,1}Ga_{0,9}As$ в

в активной области по сравнению с диодами на основе GaAs. Наконец, области, где происходит безызлучательная рекомбинация, должны иметь тенденцию к увеличению своих размеров, приводя к сильной неоднородности процессов деградации, что обычно и наблюдается на опыте.

С 1970 г. достигнуты значительные успехи в решении проблемы деградации лазеров и светодиодов благодаря прогрессу в технологии процессов эпитаксиального выращивания из жидкой фазы и последующей обработки диодов. Изоляция излучающих граней диэлектрическим покрытием практически устранила поверхностные разрушения как один из основных видов отказов в лазерах с непрерывным режимом работы. Предельный срок службы современных приборов остается неопределенным, однако имеются накопленные данные о приборах, работающих в постоянном режиме в течение уже более 14 000 часов без серьезного уменьшения выходной мощности. Приведем два примера о сроках службы сравнительно недавно изготовленных нами диодов:

— в большом количестве светодиодов из AlGaAs, излучающих примерно 1 мвт на длине волны 0,8 мкм, мощность излучения с точностью 5% оставалась постоянной в течение 14 000 часов работы;

— в непрерывных лазерах на AlGaAs, излучающих от 5 до 10 мвт с одной грани на длине волны 0,82 мкм, максимальное отклонение было меньше 20% в течение 10 000 часов.

Лазерные диоды с незащищенными гранями работали свыше 15 000 часов, однако с более значительным ухудшением мощности при фиксированном токе. Эти данные находятся в резком контрасте с характеристиками аналогичных устройств, использовавшихся всего несколько лет назад, для которых лучшие сроки службы исчислялись сотнями часов.

БУДУЩИЕ ДИОДЫ

Что касается дальнейших работ, то гетероструктуры на AlGaAs, излучающие в диапазоне 0,80—0,85 мкм, должны развиваться до тех пор, пока не станет возможным практическое осуществление сложных систем с лазерами и светодиодами. Это должно произойти в результате широких исследований свойств материалов и технологии, а также после выявления главных факторов, влияющих на срок службы этих приборов. В настоящее время начались также исследования диодов, излучающих в диапазоне 1,0—1,1 мкм, и обладающих рядом потенциальных преимуществ с точки зрения поглощения и дисперсии в волокнах. Создание таких диодов выдвигает большой комплекс проблем, связанных с материалами (по сравнению с диодами из AlGaAs), поскольку в этом случае необходимо использование разнородных сплавов для получения согласованных решеток.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Kressel H., Nelson H.— RCA Rev., 1969, v. 30, p. 106.
 2. Hayashi I., Panish M. B., Foу P. W.— IEEE J. Quantum Electron., 1969, v. 5, p. 244.
 3. Алферов Ж. И., Андреев В. М., Портной Е. Л., Трукан М. К.— ФТП, 1970, т. 3, с. 1107.
 4. Hayashi I., Panish M. B., Foу P. W., Sumski S.— Appl. Phys. Lett., 1970, v. 17, p. 109.
 5. Kressel H., Howrylo F. Z.— Ibid., p. 169.
 6. Duke C. B., Holonyak N. Jr.— Phys. Today, May 1973, v. 26, No. 5, p. 23.
 7. Olsen G. H.— J. Cryst. Growth., 1975, v. 31, p. 223.
 8. Stern F.— IEEE J. Quantum Electron., 1973, v. 9, p. 290.
- Yariv A. Quantum Electronics.— 2nd ed.— N. Y.: J. Wiley, 1975.
Pankove J. I. Optical Processes in Semiconductors.— Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1971.

- Miller S. E., Tingye Li, Marcatili E. A. J.—*Proc. IEEE*, 1973, v. 61, p. 1726.
9. Butler J. K., Kressel H., Ladany I.—*IEEE J. Quantum Electron.*, 1975, v. 11, p. 402.
Dumke W. P.—*Ibid.*, p. 400.
Selway P. R., Goodwin A. R.—*J. Phys. Ser. D*, 1972, v. 5, p. 9041.
Casey H. C., Jr., Panish M. B., Merz J. L.—*J. Appl. Phys.*, 1973, v. 44, p. 5470.
 10. Ettenberg M.—*Appl. Phys. Lett.*, 1976, v. 27, p. 652.
 11. Goodwin A. R., Peters J. R., Pion M., Thompson G. H., Whiteway J. E. A.—*J. Appl. Phys.*, 1975, v. 46, p. 3126.
 12. Nahory R. E., Pollak M. A., Beeke E. D., De Winter J. C., Dixon R. W.—*Appl. Phys. Lett.*, 1976, v. 28, p. 19.
Hsieh J. J.—*Ibid.*, p. 283.
 13. Dymont J. C.—*Ibid.*, 1966, v. 10, p. 84.
 14. *IEEE J. Quantum Electron.*, July 1975, v. 11, No. 7, pp. 381—562.
 15. Burrus C. A., Miller B. I.—*Opt. Comm.*, 1971, v. 41, p. 307.
 16. Ettenberg M., Lockwood H. F., Wittke J., Kressel H.—*In: Techn. Digest of the 1973 Intern. Electron Devices Meeting.—Washington, D. C.—P. 317.*
 17. Kressel H., Ettenberg M.—*Proc. IEEE*, 1975, v. 63, p. 1360.
 18. Nuese C. J., Enstrom R. E.—*IEEE Trans. Electron Devices*, 1972, v. ED-19, p. 1067.
 19. Nuese C. J., Olsen G. H.—*Appl. Phys. Lett.*, 1975, v. 26, p. 528.
 20. Kressel H., Lockwood H. F.—*J. de Phys.*, 1974, C3, Suppl. 35, p. 223.
 21. Kressel H., Landany I.—*RCA Rev.*, 1975, v. 36, p. 230.
 22. De Loach B. C., Hakki B. W., Hartman R. L., D'Asaro L. A.—*Proc. IEEE*, 1973, v. 61, p. 1042.
 23. Itoh R., Nakashima H., Kishino S., Nakado O.—*IEEE J. Quantum Electron.*, 1975, v. 11, p. 551.
 23. Petroff P., Hartman R. L.—*Appl. Phys. Lett.*, 1973, v. 23, p. 469.
 24. Gold R. D., Weisberg L. R.—*Solid State Electron.*, 1964, v. 7, p. 811.
 25. Ladany I., Kressel H.—*Appl. Phys. Lett.*, 1974, v. 25, p. 708.
 26. Ettenberg M., Kressel H.—*Appl. Phys. Lett.*, 1975, v. 26, p. 478.
McMullin P. G., Blum J., Shih K. K., Smith A. W., Woodhouse C. R.—*Ibid.*, 1974, v. 24, p. 595.