

5-6. Типы лазеров, применяемых в неразрушающем контроле. Полупроводниковые лазеры. Газовые лазеры. Лазеры на парах металлов. Лазеры на красителях.

Полупроводниковые лазеры (ППЛ).

Отличительной особенностью ППЛ является инверсия на переходах между состояниями в электронных энергетических зонах полупроводниковых кристаллов, а не отдельных частиц. Эти энергетические зоны возникают вследствие расщепления уровней энергии валентных электронов атомов, составляющих кристаллическую решетку кристалла, в сильном периодическом в пространстве внутрикристаллическом поле собственных атомов кристалла. В этом поле индивидуальные атомы теряют свои валентные электроны, локализованность которых исчезает. Другими словами, в сильном периодическом поле валентные электроны атомов полупроводникового кристалла обобществляются. Коллективные движения обобществленных электронов в разрешенных энергетических зонах ПП кристалла обеспечивают его электропроводность.

Как известно, носителями тока в полупроводниках являются электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. Пусть с помощью какого-либо внешнего воздействия (накачки) созданы избыточные по отношению к равновесным электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. Возвращение к равновесию, т.е. рекомбинация избыточных электронов и дырок, может происходить излучательно на оптическом переходе зона-зона. Поскольку обычно упомянутая рекомбинация реализуется в области $p-n$ перехода, ППЛ еще иногда называют диодными лазерами или лазерными диодами.

Большая вероятность излучательных переходов в прямозонных полупроводниках и большая плотность состояний в зонах позволяют получать исключительно высокие значения коэффициентов усиления, превышающие в некоторых особо благоприятных случаях 10^4 см^{-1} . В лазерах на основе твердых диэлектриков с примесными активными центрами, называемых обычно твердотельными лазерами, в отличие от ППЛ используются переходы между дискретными уровнями энергии изолированных ионов. Плотность активных частиц и вероятность переходов в них существенно ниже, поэтому для них характерны значительно меньшие коэффициенты усиления и, следовательно, заметно большие линейные размеры активных элементов. Наиболее близки к ППЛ лазеры на органических красителях и центрах окраски, для которых в силу интенсивного взаимодействия их активных центров с окружением характерны широкие энергетические зоны, а в силу высокой плотности центров – большие коэффициенты усиления, хотя и не достигающие значений, свойственных ППЛ.

Важным отличием ППЛ от остальных лазеров на конденсированных средах является электропроводность полупроводников, позволяющая осуществлять их накачку электрическим током и тем самым непосредственно преобразовывать электрическую энергию в лазерное излучение.

Таким образом, ППЛ занимают в квантовой электронике особое место, отличаясь от всех прочих лазеров рядом важных особенностей.

С практической точки зрения наиболее существенны следующие достоинства ППЛ.

1. Компактность, обусловленная гигантским коэффициентом усиления в полупроводниках.
2. Большой КПД (до 90% и выше), благодаря высокой эффективности преобразования подводимой энергии в лазерное излучение при накачке достаточно совершенных полупроводниковых монокристаллов электрическим током.
3. Широкий диапазон длин волн генерации, обусловленный возможностью выбора ПП материала с шириной запрещенной зоны, соответствующей излучению на переходах зона-зона практически в любой точке спектрального интервала от 0,3 до 30 мкм.
4. Плавная перестройка длины волны излучения, в результате зависимости спектрально-оптических свойств полупроводников и прежде всего ширины запрещенной зоны от температуры, давления, магнитного поля и т.п.
5. Малоинерционность, обусловленная малостью времен релаксации и практически безынерционностью создания неравновесных электронов и дырок при накачке электрическим током, приводящая к возможности модуляции излучения изменением тока накачки с частотами, достигающими 10 ГГц.
6. Простота конструкции, обусловленная возможностью накачки постоянным током и приводящая к совместимости ППЛ с интегральными схемами полупроводниковой электроники, устройствами интегральной оптики и волоконных оптических линий связи. Все эти свойства открывают широкие возможности для применения ППЛ в различных датчиках и системах ОНК.

Недостатки ППЛ являются, как это часто бывает, продолжением их достоинств. Малые размеры приводят к низким значениям выходной мощности или энергии. Кроме того, ППЛ, как и все приборы ПП электроники, чувствительны к перегрузкам (разрушаются при потоках оптического излучения в несколько мегаватт на

квадратный сантиметр) и к перегреву, приводящему к резкому повышению порога самовозбуждения и даже к необратимому разрушению при нагреве свыше некоторой характерной для каждого лазера температуры. Лазерная генерация получена при использовании многих различных полупроводниковых материалов, общим числом в несколько десятков. Наибольшее распространение получили материалы типа арсенида галлия (GaAs) и более сложные типа $(\text{Ga} + \text{Al})\text{As}$, $(\text{Ga} + \text{In})\text{As}$, $\text{Ga}(\text{As} + \text{P})$ и др. Для ограничения области, в которой имеется усиление, и повышения ее волноводных свойств используют многослойные гетероструктуры. В них центральный слой с усилением помещен между слоями с более широкими запрещенными зонами для ограничения диффузии инжектированных носителей заряда и волноводного распространения света. Эти материалы, кроме обычного требования чистоты и отсутствия дефектов, должны обладать высокой оптической однородностью и малой вероятностью безызлучательной рекомбинации электронов и дырок.

Рекомбинацией электронов и дырок в полупроводниках называется процесс, приводящий к переходу электрона из зоны проводимости в валентную зону, в результате которого происходит исчезновение пары электрон проводимости – дырка. Рекомбинация всегда означает переход носителя тока на более низкие уровни энергии – либо в валентную зону, либо на примесный уровень в запрещенной зоне.

При термодинамическом равновесии рекомбинация уравнивает процесс тепловой генерации носителей, а скорость этих взаимно обратных процессов такова, что их совместное действие приводит к установлению распределения Ферми для электронов и дырок по энергиям.

Известно много механизмов рекомбинации, которые отличаются друг от друга направлением передачи энергии, выделяемой при рекомбинации. Если избыток энергии выделяется в виде кванта излучения, то происходит излучательная рекомбинация. Этот элементарный акт генерации света в полупроводниках подобен излучательному распаду возбужденного состояния в системах с дискретным спектром.

Инверсия в распределении электронов между валентной зоной и зоной проводимости ПП кристалла может быть получена несколькими способами. Весьма высокой эффективностью обладает электронно-лучевая накачка, приводящая к генерации неравновесных пар носителей и тем самым к генерации лазерного излучения во множестве материалов, в том числе и достаточно широкозонных (коротковолновый диапазон). Однако более распространенным является возбуждение полупроводников постоянным током, осуществляющим инжекцию электронов и дырок в область p - n перехода полупроводникового диода (попросту говоря, пропусканием тока через диод в прямом направлении). Создаваемые таким образом так называемые инжекционные (или диодные) ППЛ получили наибольшее распространение в силу своей простоты, надежности и высокого КПД.

Генерация лазерного излучения в них возникает при вынужденной рекомбинации избыточных носителей заряда в p - n переходе и прилегающих к нему областях с энергией кванта, близкой к ширине запрещенной зоны. Усиление имеет место в тонком слое, толщина которого определяется диффузионной длиной пробега носителей заряда и составляет единицы и даже десятые доли микрона. Усиливающий слой обладает волноводными свойствами вследствие градиента показателя преломления в направлении, перпендикулярном слою. Методами гетероэпитаксиальной технологии удается повысить эти волноводные свойства и локализацию излучательной рекомбинации электронов и дырок.

Отражателями резонатора инжекционного лазера обычно являются грани самого ПП кристалла, сколотого по кристаллографическим осям. На них могут наноситься отражающие покрытия, но обычно френелевского отражения оказывается достаточно для получения приемлемой добротности резонатора. Применяется также и распределенная обратная связь (РОС) в виде периодической пространственной модуляции какого-либо оптического параметра всего волновода или его части. Нерабочие поверхности кристалла для снижения добротности паразитных мод делают шероховатыми.

Несколько лазерных диодов могут быть конструктивно объединены в один блок (линейку), образуя многоэлементную решетку. Излучение двумерной матрицы лазерных диодов, объединенное специальной оптической системой, может достигать мощности в несколько киловатт и использоваться для обработки различных материалов. Мощности же единичных лазерных диодов в непрерывном режиме достигают в настоящее время 0,5Вт для красного и 2Вт для ИК диапазона.

Спектр излучения ППЛ зависит от ширины и формы линии усиления, которые меняются при изменении уровня накачки. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны и плотности заполнения электронных состояний в энергетических зонах влияет на изменение формы и положение центральной частоты перехода. Линия спонтанного излучения однородно уширена, однако получение одномодового излучения в ППЛ затруднено из-за сильного влияния пространственной неоднородности насыщения усиления в поле стоячей волны в резонаторе и сложности создания пространственно однородной накачки.

Скорость смещения центра линии усиления при нагреве лазерного диода импульсом накачки превышает скорость температурного дрейфа частот резонатора. Это приводит к непрерывному или дискретному изменению спектрального состава излучения в течение действия импульса.

Таким образом, ширина линии излучения ППЛ обычно составляет несколько десятков ангстрем.

Одномодовый режим излучения и узкий спектр можно получить лишь в генераторах непрерывного режима с внешним селективным резонатором и при условии стабилизации тока накачки и температуры.

Диаграмма направленности ППЛ существенно больше диаграммы, определяемой дифракционной расходимостью излучения. Это обусловлено сильной оптической неоднородностью материала перехода.

Диаграмма направленности шире в плоскости, перпендикулярной плоскости перехода, чем в плоскости самого перехода, так как размер излучающей поверхности в плоскости перехода больше.

Стабильность характеристик излучения ППЛ зависит от стабильности температурного режима генерации, в свою очередь определяемой нестабильностью тока накачки. Неоднородность усиления активного элемента приводит к нестационарным колебательным процессам вследствие нелинейных явлений неоднородного пространственного насыщения активной среды и нелинейных потерь за счет температурной неравномерности нагрева и многофотонного поглощения.

Гелий- неоновые лазеры (ГНЛ).

В ГНЛ излучают атомы неона, а атомы гелия служат для резонансного их возбуждения при столкновениях, т.к. метастабильные уровни возбужденных атомов гелия практически совпадают с двумя верхними лазерными уровнями неона. Также помогает увеличивать инверсию населенности оптимальная геометрия разрядной трубки: поскольку гашение нижнего рабочего уровня атома весьма эффективно происходит при столкновениях со стенками, в обычных условиях оптимальный внутренний диаметр трубки 3 - 7мм.

Поэтому объем активной среды и мощность генерации можно поднять, только увеличивая длину трубки. В настоящее время за рубежом промышленно выпускаются ГНЛ, генерирующие на 6 длинах волн от 325 до 3391нм, однако самое большое распространение получили ГНЛ с $\lambda=633\text{нм}$ (красный цвет). Питание тлеющего разряда постоянным током при напряжении 1-2 кВ осуществляется стабилизированным вырямителем, поджигается разряд импульсным напряжением (около 10кВ), подаваемым на наружный электрод при разряде конденсатора 1-2мкФ. Типичные характеристики ГНЛ на $\lambda=633\text{нм}$ ЛГН-215: выходная мощность 50мВт, диаметр пучка - 2мм, КПД - 0,1%, расходимость - 0,5мрад, ширина линии генерации около 1ГГц, ресурс 10тыс. час. Применяется ГНЛ для юстировки и визуализации положения невидимых лучей других лазеров, интерферометрии и голографии, медицине.

Аргоновые лазеры.

Эти лазеры характерны высокой (около 35эВ) энергией возбуждения примерно четырехуровневой схемы, что определяет их малый (около 0,1%) КПД. Накачка ионов аргона осуществляется ударами электронов, поэтому поддержание достаточной степени ионизации (20%) и высокой температуры электронов необходимо пропускать через газ ток большой плотности (от сотен до тысяч А/см²). Поэтому приходится создавать дуговой разряд в капилляре диаметром 1 - 10мм, что требует эффективного охлаждения последнего проточной водой. Для сжатия области разряда и увода ее от стенок капилляра используют мощные магниты (с напряженностью поля порядка 10 -100 кА/м), также охлаждаемые водой, а сам капилляр делают из бериллиевой керамики, обладающей высокой теплопроводностью и хорошими изоляционными свойствами. Без принятия специальных мер аргонный лазер излучает на 10-12 длинах волн от 351 до 529нм, причем 45 и 35% общей мощности получается на линиях 488 и 515нм соответственно. Для приложений, требующих монохроматичности пучка (например, голографии) внутрь резонатора вводят дисперсионные элементы. Характеристики типичного промышленного аргонного лазера ЛГН-503 львовского производства таковы: максимальная выходная мощность на одной длине волны 488нм - 1Вт, диаметр пучка - 2.5мм, расходимость излучения - 0,9 мрад, минимальный ресурс - 2000часов, потребляемый от сети 380В ток - до 20А. Типичные применения кроме неразрушающего контроля - микротехнология (фотолитография, скрайбирование тонких пленок, маркировка), голография, фотохимия, медицина и биология, научные исследования.

Гелий-кадмиевый лазер .

(ГКЛ) -самый распространенный из ионных лазеров, в которых излучают ионы металлов (Se, Hg, Zn и др). Гелий в нем играет ту же роль, что и в ГНЛ. ГКЛ способен излучать в синей области ($\lambda=442\text{нм}$, мощность 10 - 200мВт, КПД порядка 0,1%) и в УФ ($\lambda=325\text{нм}$, на порядок меньшая мощность). Продольный разряд, накачивающий ГКЛ, вызывает явление катафореза (направленного движения ионов в разряде под действием внешнего электрического поля), приводящее к перемещению паров кадмия к катоду. Оно приводит к запалению окна трубки кадмием и уменьшению эффективной длины активной среды из-за градиента концентрации. Для борьбы с этим явлением используют трубки с двумя анодами и постоянной подпиткой

кадмия в разряд или схемы с рециркуляцией кадмия. Параметры типичного отечественного ГКЛ ЛГ-70, работающего в непрерывном одномодовом режиме: $\lambda=442\text{нм}$, мощность - 25Вт, поляризация - линейная, диаметр пучка - 1,5мм, расходимость - 0,4мрад, ресурс - до 5000час, масса около 25 + 50 кг, охлаждение воздушное. Предназначен он для записи и считывания информации, используется для изготовления фотошаблонов в фотолитографии, для голографической записи и контроля различных параметров газов и др. сред.

Медный лазер (МЛ). В атомарных лазерах на парах металлов (медь, золото, свинец, марганец и т.д.) удастся существенно повысить КПД за счет избежания больших потерь на ионизацию. Однако в них приходится использовать относительно долгоживущий нижний уровень, так что стационарная генерация невозможна, а частота следования импульсов ограничена временем жизни нижнего лазерного уровня (т.н. самоограниченная генерация). Параметры типичного МЛ (другие заметно менее эффективны) ИЛГИ - 101: $\lambda=511\text{нм}$ и 578нм , средняя мощность - 10Вт, частота следования импульсов - 10кГц, длительность импульса - 30нс, КПД - 0,2%, диаметр пучка - 2см, расходимость -5мрад, рабочая температура -1500°С, ресурс трубки - 500час, охлаждение - водяное одноконтурное. Из-за того, что разогрев среды осуществляется импульсами накачки, время выхода на рабочий режим - 2часа. Огромный коэффициент усиления - в тысячи раз на проход дает возможность использовать усилитель на парах меди в проекционных микроскопах и основанных на них системах прецизионной обработки (см. Лаб№ 2), еще более широко МЛ используются для накачки лазеров на красителях , резки тонколистовых материалов, в навигации и зондировании атмосферы и т.п.

Лазеры на красителях (ЛК).

Самая характерная особенность ЛК - обусловленная широкой линией усиления возможность перестройки длины волны генерации. Наибольшее распространение получили ЛК на органических красителях, из которых самыми эффективными являются ксантеновые, полиметиновые и оксазиновые, кумарины, флалимиды, производные оксазола и диазола. Один из самых распространенных и эффективных - родамин 6G ($\text{N}_{26}\text{H}_{27}\text{N}_2\text{O}_3\text{Cl}$), растворимый как в этиловом и метиловом спиртах, так и в воде, с диапазоном перестройки $\lambda=570 - 610\text{нм}$. Накачиваются ЛК как лампами, так и другими лазерами, режим накачки определяет и режим генерации. Поскольку излучение накачки сильно поглощается красителем, последний приходится прокачивать через тонкую кювету либо формировать в виде струи. Для перестройки длины волны используются различные дисперсионные элементы, помещаемые в резонатор: призмы, решетки и т.п. Приведем для примера характеристики отечественного ЛЖИ-504: источник накачки - МЛ ИЛГИ-101 («Криостат-1»), длительность импульса - 20нс, частота следования - 10кГц, средняя мощность - 60мВт, диапазон длин волн генерации 530 - 710нм, ширина линии генерации - 0,05нм (0,01нм с использованием внутрирезонаторного эталона Фабри-Перо), расходимость - 5мрад.

Экимерные лазеры (ЭЛ).

Экимер - это возбужденная двухатомная молекула (excited dimer), не существующая в невозбужденном состоянии (обычно по крайней мере один из этих атомов - атом благородного газа, а второй может быть и галогеном, и кислородом). Отсутствие заселенности нижнего уровня означает, что любая населенность верхнего уже создаст инверсию. Накачиваются промышленные экимерные лазеры при помощи электрического разряда, реальный их КПД достигает нескольких %, средняя мощность достигает сотен ватт при частоте следования импульсов в несколько сот Гц, расходимость при использовании соответствующего резонатора может достигать дифракционного предела. Генерируют ЭЛ в УФ диапазоне и используются в микроэлектронике в процессах травления (абляции), литографии, осаждения пленок, для осуществления процессов селективной фотохимии (разделение изотопов, тонкая очистка веществ), накачки перестраиваемых лазеров на красителях, в медицине, научных исследованиях. Ведутся работы по возбуждению управляемой термоядерной реакции при помощи лазера, для чего в Лос-Аламосе был разработан КгF лазер с энергией импульса 10кДж и апертурой 1м X 1м.