

2.8 Конструкционные компоненты квантовой электроники и оптоэлектроники

Лазерное усиление

Процесс лазерного усиления упрощенно состоит в следующем. Под воздействием внешнего фотона на атом, находящийся в возбужденном состоянии, происходит переход возбужденного атома в другое энергетическое состояние; этот переход сопровождается испусканием нового фотона, энергия которого равна энергии внешнего фотона. Если создать систему возбужденных атомов и пропускать через нее оптическое излучение, то возможно усиление излучения, которое называется лазерным усилением.

Рассмотрим процесс возникновения лазерного усиления подробнее, считая, что за счет энергии внешнего воздействия (так называемой энергии накачки) E_n часть электронов с нижних равновесных уровней E_1 перешла на более высокие уровни E_3 , а затем оказалась на уровне возбуждения E_2 (рис. 2.8.1). Возвращение этих электронов с уровня E_2 на уровень E_1 сопровождается испусканием фотонов с частотой:

$$\vartheta = \frac{E_2 - E_1}{h}. \quad (2.8.1)$$

Такой переход электронов не связан с вынуждающими фотонами и приводит к возникновению спонтанного (некогерентного) излучения (переходы 1-3 на рисунке), при котором момент испускания и направление вектора поляризации каждого фотона случайны, а результирующий поток излучения описывается среднестатистическими параметрами.



Рис.2.8.1

Одновременно со спонтанными переходами существует вероятность вынужденных переходов из энергетического состояния E_2 в E_1 (переходы 4 и 5 на рис. 2.8.1). Такие переходы называют лазерными. Они связаны с действием вынуждающих фотонов, при этом все активные атомы излучают практически одновременно и так, что испускаемые фотоны неотличимы от тех, которые их вызвали, то есть происходит когерентное (вынужденное) излучение, совпадающее по направлению, частоте, фазе и поляризации с вынуждающим излучением.

Вынужденные переходы возникают под действием внешнего электромагнитного поля, частота которого совпадает или близка к частоте перехода, определяемой формулой (2.8.1). Следует заметить, что на вынужденный переход не затрачивается энергия внешнего поля, которая является лишь стимулятором процесса. Вынужденные переходы (как и спонтанные) носят статистический характер.

Помимо спонтанных и вынужденных переходов существуют переходы из E_1 в более высокие энергетические состояния, сопровождающиеся поглощением энергии (переход 6 на рисунке). Лазерное усиление возможно лишь в том случае, если число вынужденных переходов больше числа спонтанных переходов и переходов, связанных с поглощением вынуждающего излучения. Определим условия, при которых возможно лазерное усиление.

Количество вынужденных переходов за время Δt приближенно можно выразить в виде:

$$n_{\text{лаз}} = B_{21} Q_{\text{вын}} N_2 \Delta t, \quad (2.8.2)$$

где B_{21} — вероятность вынужденного перехода;

$Q_{\text{вын}}$ — энергия вынуждающего излучения;

N_2 — концентрация атомов в энергетическом состоянии E .

Количество спонтанных переходов от вынуждающего излучения не зависит и приближенно равно:

$$n_{\text{спон}} = -A_{21} N_2 \Delta t, \quad (2.8.3)$$

где $-A_{21}$ — вероятность спонтанного перехода.

Квантовые переходы с уровня E_1 на уровень E_3 сопровождаются поглощением энергии вынуждающего излучения. Их количество равно:

$$n_{\text{спон}} = -Q_{\text{вын}} B_{12} N_1 \Delta t, \quad (2.8.4)$$

где B_{12} — вероятность квантового перехода с поглощением энергии;

N_1 — концентрация атомов в энергетическом состоянии E_1 .

Полагая в первом приближении равенство вероятностей $B_1 = B_2 = B$, получим условие лазерного усиления в виде:

$$B(N_2 - N_1)Q_{\text{вын}} - A_{21} N_2 > 0. \quad (2.8.5)$$

При малом уровне спонтанного излучения условие лазерного усиления принимает вид:

$$N_2 - N_1 > 0. \quad (2.8.6)$$

В равновесном состоянии распределение атомов по различным энергетическим состояниям подчиняется статистике Максвелла—Больцмана:

$$N_2 = N_1 \exp \frac{-(E_2 - E_1)}{kT} \quad (2.8.7)$$

При этом $N_2 - N_1 < 0$, и лазерное усиление невозможно. Для того чтобы выполнялось условие (2.8.6), необходимо осуществить предварительное внешнее воздействие (накачку), приводящее к увеличению N_2 .

Для количественной оценки лазерного усиления вводят понятие населенности уровня энергии, под которым понимают число атомов в единице объема, имеющих одинаковое энергетическое состояние. В состоянии термодинамического равновесия населенность верхнего уровня меньше, чем нижнего ($N_2 < N_1$). Для того чтобы получить усиление, необходимо выполнить условие $N_2 > N_1$. Такое состояние называют состоянием с инверсией населенностей уровней. Формально это состояние возможно при отрицательной температуре ($T < 0$). Среда, в которой осуществлена инверсия населенностей, называется активной средой

Таким образом, для усиления вынужденного излучения необходимо, во-первых, осуществить инверсию населенностей и, во-вторых, подавить

спонтанное излучение. Наименьший уровень энергии накачки, при котором выполняется условие инверсии, называется порогом инверсии.

Принцип лазерного усиления в рубиновом стержне схематически показан на рис. 2.8.2. Возбужденный внешним воздействием атом излучает фотон, который, достигнув другого возбужденного атома, вызывает появление нового фотона. Затем два фотона превращаются в четыре и т.д. В результате вдоль оси стержня возникает лавина фотонов, в которой все фотоны «шагают в ногу» с одинаковой частотой и фазой. Лавина катится вдоль стержня, становясь все мощнее за счет новых фотонов, захваченных по пути, и, достигнув торца стержня, излучается в виде очень тонкого светового луча с расходимостью около $0,003^\circ$

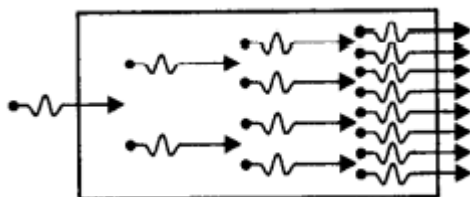


Рис.2.8.2

Генерация излучения

Чтобы рассмотренный лазерный усилитель превратить в лазер — генератор излучения, необходимо ввести положительную обратную связь (ПОС). Параметры звена обратной связи выбираются так, чтобы энергия излучения, которая передается с выхода лазерного усилителя на его вход, была достаточной для компенсации потерь в замкнутой цепи обратной связи. В лазере в качестве звена ПОС используют оптические резонаторы, которые в простейшем случае состоят из двух зеркал, расположенных на торцах стержня (рис. 2.8.3). Для вывода излучения одно из зеркал делают полупрозрачным. Фотоны, направление движения которых образует малые углы со осью стержня, после многократных отражений от зеркал приобретают энергию достаточную для того, чтобы через полупрозрачное зеркало покинуть стержень в виде узкого луча. Фотоны, направление движения которых не совпадает с осью стержня, выходят из него через боковые поверхности.

Излучение лазеров имеет ряд замечательных особенностей. Во-первых, энергия излучается в виде узкого пучка, который легко фокусируется на

площадку размером $\lambda_{\text{лаз}}^2$. ($\lambda_{\text{лаз}}^2$ — длина волны лазерного излучения). Например, если лазер излучает импульс энергии 1 Дж в течение 1 мс с длиной волны порядка 0.7 мкм, то есть имеет мощность около 1 кВт, то интенсивность сфокусированного лазерного пучка достигает значения порядка 10^{11} Вт/см². Практически достижимая интенсивность сфокусированного лазерного пучка может достигать 10^{20} Вт/см². Огромная мощность лазерного излучения приводит к тому, что материалы, освещенные лазером, могут нагреваться. Благодаря этому лазеры нашли применение в промышленности, науке и технике. Лучом лазера можно выполнять точную обработку деталей, прожигать в материале отверстия с точностью до долей микрометра, осуществлять точечную сварку, испарять часть поверхностного слоя или часть пленки, что широко используется в микроэлектронике. Те же свойства лазерного луча нашли применение в хирургии. Мощные лазеры используются для бурения нефтяных скважин и в военной технике. Концентрация энергии современных лазеров достаточна для того, чтобы на расстоянии сотен километров прожигать броню танков, корпуса ракет, фюзеляжи самолетов.

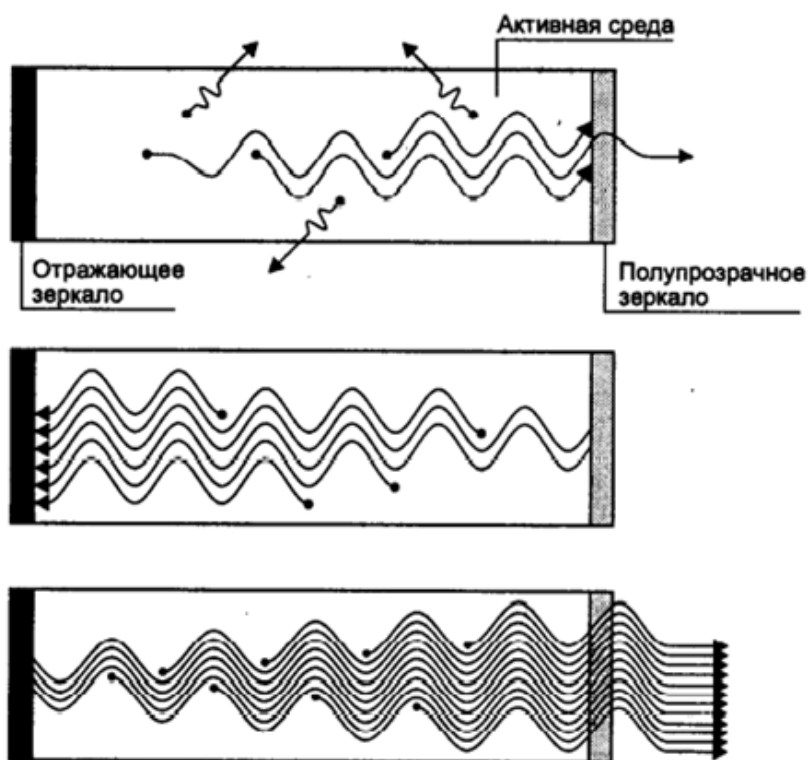


Рис.2.8.3

Второй особенностью лазерного излучения является высокая монохроматичность, то есть практически лазер излучает одну-единственную частоту и соответствующую ей одну-единственную длину волны. Это объясняется тем, что у всех фотонов в лазерном пучке одинаковая энергия. Поэтому лазер можно использовать в качестве стандарта частоты, отклонение которой от номинала не превышает $\pm 10^{-3}$ Гц, Монохроматичность и когерентность лазерных излучений сделали их незаменимым средством для точного измерения времени и частот, а высокая концентрированность и направленность лазерного луча обеспечивают возможность измерения расстояний, перемещений и размеров.

Исключительно важной областью применения лазерного излучения является связь. На земле связь осуществляется по световодам, которые представляют собой кабели из специального стекла или прозрачной пластмассы. Эти вещества обладают высокой прозрачностью и вызывают очень малое затухание лазерного луча. Кроме устройств связи лазерное излучение используют в локаторах, имеющих более высокую точность, нежели радиолокаторы, и для осуществления связи с космическими объектами.

На применении лазерного излучения основана голография — область науки и техники, занимающаяся получением объемных изображений, а также оптической обработкой и хранением информации. Лазерные методы используются также для высококачественной звукозаписи и видеозаписи. Ведется разработка систем голографического телевидения.

Основные разновидности лазеров

Существует множество лазеров разного типа, различающихся активной средой и способом накачки. В качестве активной среды применяют твердые, жидкие и газообразные вещества, а из многих способов накачки чаще всего используется оптическая накачка, а также накачка электрическим разрядом в самой активной среде. Накачка может быть непрерывной и импульсной. Рассмотрим основные типы лазеров:

Твердотельные лазеры

Твердотельными называют лазеры, в которых активной средой являются кристаллические или аморфные диэлектрики (стекла),

легированные ионами хрома или редкоземельных элементов. В первом твердотельном лазере (1960 г.) использовался кристалл рубина.

Рубин — это твердое кристаллическое вещество. Основой его является корунд — диэлектрический кристалл оксида алюминия (Al_2O_3). Рубином он становится тогда, когда небольшую часть атомов алюминия в этом кристалле заменяют ионы хрома. С введением ионов хрома кристалл принимает характерный для рубина красный цвет. Энергетическая диаграмма, характеризующая структуру разрешенных уровней хрома, показана на рис. 2.8.4. Она содержит основной энергетический уровень E_1 , два узких уровня E_{2a} и E_{2b} и две сравнительно широкие полосы энергий E_3 и E_4 , которые представляют собой совокупность большого числа близко расположенных разрешенных уровней.

Если атом хрома возбудить, то он сначала перейдет из основного состояния в полосу E_3 или E_4 , а спустя очень короткое время (10^{-8} с) — на уровень E_{2a} или E_{2b} . При переходе на уровни E_2 атом хрома не излучает. Его энергия тратится на возбуждение колебаний кристаллической решетки рубина. Возможность возвращения атома с полос E_3 и E_4 снова на уровень E_1 хотя и существует, но скорость этого процесса пренебрежимо мала по сравнению со скоростью перехода на уровни E_2 .

На уровнях E_2 атом находится около 10^{-3} с. Такое длительное время (по сравнению с 10^{-8} с) позволяет накапливать атомы хрома на уровнях E_2 . Если достаточно быстро переводить атомы хрома с уровня E_1 в полосы E_3 и E_4 то на уровнях E_2 можно накопить более половины атомов хрома. В этом случае уровни E_2 окажутся более заселенными, чем уровень E_1 , то есть возникнет инверсия населенностей.

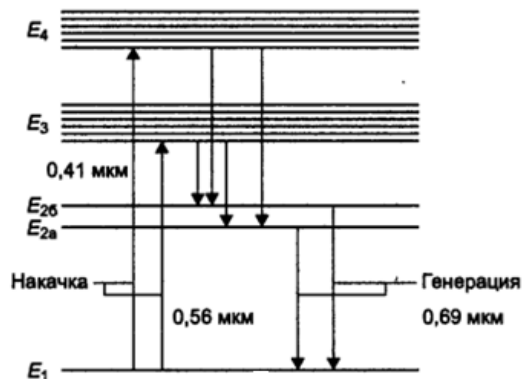


Рис.2.8.4

Для перевода атомов хрома с уровня E_1 на уровни E_3 и E_4 (накачка) используют мощные лампы-вспышки. Перевести атомы хрома непосредственно с уровня E_1 на уровни E_2 нельзя. Объясняется это тем, что свет вызывает в кристалле два процесса: поглощение света невозбужденными атомами и вынужденное испускание его возбужденными атомами. Если оба процесса происходят между двумя уровнями, то они протекают с одинаковой скоростью. Поэтому максимум того, что можно получить при накачке, — уровнять населенности. Для получения инверсии населенностей необходим третий уровень как своеобразный «перевалочный пункт».

Лампа-вспышка испускает импульс света длительностью около 10^{-3} с, близкий к белому, то есть с широким спектром частот. Для переброса ионов хрома на уровни E_3 и E_4 затрачивается только часть спектрального состава и, соответственно, энергии светового потока (около 15%). Для перевода иона хрома с уровня E_1 в полосу E_3 используется излучение с длиной волны 0,56 мкм, а переброс в полосу E_4 происходит при излучении с длиной волны около 0,41 мкм.

Наличие широких энергетических полос в спектре ионов хрома является благоприятным обстоятельством для создания лазера. Чем шире эти полосы, тем больше ионов может в них разместиться. Переход ионов хрома из широких полос на уровни E_2 позволяет концентрировать атомы хрома в небольшом энергетическом интервале, что позволяет получить высокую монохроматичность излучения при переходе атомов хрома с уровней E_2 на основной уровень E_1 . При переходе с уровня E_{2a} на уровень E_1 излучение происходит с длиной волны 0,6943 мкм, при переходе с уровня E_{2b} — с длиной волны 0,6929 мкм. Наиболее благоприятны условия для генерации света с длиной волны 0,6943 мкм.

Устройство рубинового лазера иллюстрирует рис. 2.8.5. В стеклянной трубке расположен рубиновый стержень, на торцах которого имеются отражающие зеркала. Стержень возбуждается импульсной лампой и охлаждается проточной водой или жидким азотом.

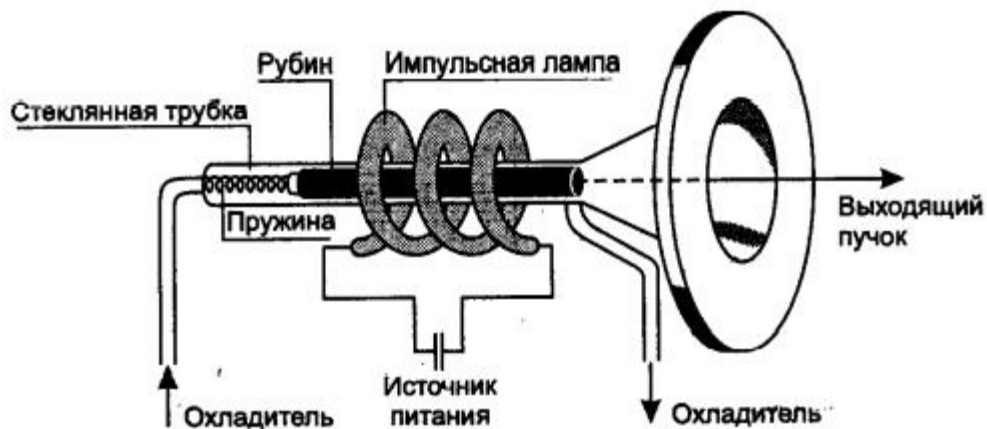


Рис.2.8.5

Кроме рубина в твердотельных лазерах применяют стекла, активированные неодимом. Благодаря хорошей технологичности и низкой стоимости стеклянных лазерных стержней, а также возможности изготовления длинных стержней лазеры на стекле обладают преимуществом по сравнению с рубиновыми лазерами. Однако стекло имеет значительно меньшую, чем рубин, теплопроводность, что вызывает необходимость применения более эффективных систем охлаждения. Длина волны излучения стеклянного лазера составляет 1,06 мкм.

В оптических системах связи находит применение лазер на иттрий-алюминиевом гранате (сокращенно YAG), легированный активными ионами неодима. Иттрий-алюминиевый гранат с примесью неодима (сокращенно YAG-Nd) является уникальным материалом, обладающим хорошей теплопроводностью, большой твердостью и удовлетворительными оптическими свойствами. Такой лазер излучает колебания с длиной волны 1,064 мкм. Конструкция YAG-Nd-лазера очень компактна. Лазер содержит стержень длиной 5 мм и толщиной 0,5 мм, который накачивается с торца GaAlAs-светодиодом. Более компактную конструкцию имеет YAG-лазер, легированный неодим-пентафосфатом $\text{NdP}_3\text{O}_{14}$. Накачка такого лазера осуществляется светодиодом с длиной волны 0,5 мкм. Этот лазер имеет очень низкий порог накачки (примерно 1 мВт), что позволяет назвать его микролазером.

Газовые лазеры

Газовыми лазерами называют оптические квантовые генераторы, в которых активной средой является газ, смесь нескольких газов или смесь газа с парами металла. В зависимости от того, состояние каких частиц используется для получения инверсии населенностей, различают атомные, ионные и молекулярные лазеры.

Газовые лазеры являются наиболее распространенным типом лазеров. Они излучают на волнах от ультрафиолетового до инфракрасного диапазона (0,15-699,5 мкм) и обладают самой высокой степенью когерентности по сравнению со всеми остальными источниками света. Газовая среда имеет хорошую оптическую однородность, поэтому позволяет получить наименьший угол расхождения пучка (около 1°),

Гелий-неоновый атомный лазер

Активной средой гелий-неонового атомного лазера является смесь двух газов — гелия (He) и неона (Ne), а лазерными уровнями — энергетические уровни возбужденных атомов неона. Для создания инверсии населенностей используют электрическую накачку путем создания тлеющего разряда в газоразрядной трубке. Схема лазера с возбуждением постоянным током показана на рис. 2.8.6. Диаграмма энергетических уровней гелия и неона приведена на рис. 2.8.7. Основные состояния атомов обозначены римской цифрой I.

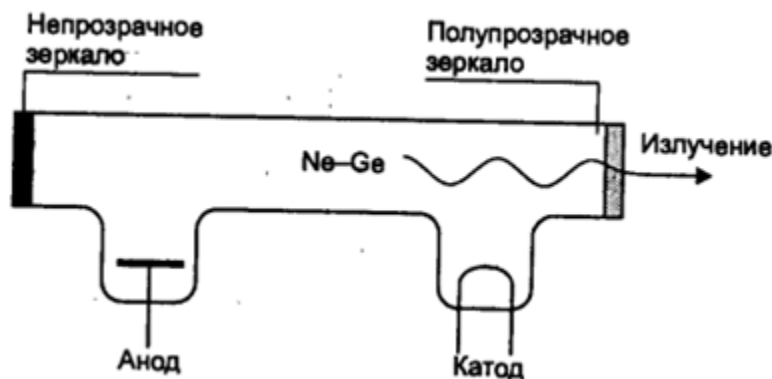


Рис.2.8.6

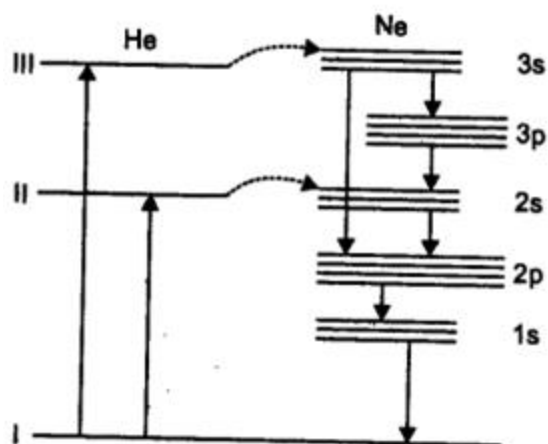


Рис.2.8.7

В соответствии с распределением Больцмана при $\Delta E \gg kT$ (оптический диапазон) уровни возбуждения атомов гелия и неона свободны. При разряде вследствие неупругих соударений со свободными электронами происходит возбуждение атомов гелия, которые могут переходить на метастабильные уровни II и III. Энергия возбужденных атомов гелия передается далее атомам неона. Энергетические уровни гелия II и III очень близки к уровням 2s и 3s неона. Поэтому при неупругих соударениях возбужденных атомов гелия с невозбужденными атомами неона происходит эффективная передача избыточной энергии атомов гелия атомам неона. Атомы неона переходят в возбужденное состояние 2s или 3s, а атомы гелия — в основное состояние I.

Кроме того, атомы неона переходят на уровни 2s или 3s вследствие соударений с быстрыми электронами. Так образуются два «канала», по которым заселяются верхние уровни атомов неона, в то время как нижние уровни атомов неона заселяются только при соударении невозбужденных атомов с электронами. Подбирая соотношение концентраций атомов гелия и неона и значение тока разряда, можно добиться преобладания скорости заселения верхних уровней неона над скоростью заселения нижних уровней, то есть добиться инверсии населенностей уровней.

Атомы гелия являются посредниками при передаче энергии от быстрых электронов к атомам неона. Поэтому гелий можно назвать вспомогательным, а неон — основным, или рабочим, газом. Обычно диапазон отношения концентрации гелия и неона составляет от 5 до 15, Эффективность передачи энергии оказывается высокой также потому, что время жизни гелия на

уровнях II и III продолжительное (10^{-3} с). Эти уровни являются метастабильными: для них запрещены переходы в основное состояние.

Рабочий переход $3s \rightarrow 3p$ соответствует длине волны излучения 3,39 мкм, Это наиболее эффективный переход, усиление на нем достигает 20 дБ/м. Вынужденное излучение осуществляется на переходе $2s \rightarrow 2p$ с длиной волны 1,1525 мкм, а на $3s \rightarrow 2p$ с длиной волны 0,6328 мкм. Так как инверсия для всех трех переходов достигается примерно в одинаковых условиях разряда, то для выделения излучения одной длины волны нужно применять специальные меры, например вводить в резонатор селективный поглотитель.

Частицы уровня $2p$ возвращаются на основной уровень в два этапа. Сначала происходит спонтанный переход $2p \rightarrow 1s$, а затем с метастабильного уровня $1s$ частицы удаляются из-за диффузии на стенки газоразрядной трубки, которым они отдают избыток своей энергии. Чтобы облегчить диффузию, надо уменьшить диаметр газоразрядной трубки. Обычно диаметр трубки не превышает 10 мм.

Выходная мощность лазера зависит от тока разряда, общего давления в газовой смеси, соотношения парциальных давлений гелия и неона, диаметра разрядной трубки. При малом токе (но больше пускового) мощность генерации возрастает с ростом тока, так как увеличивается количество электронов в плазме газового разряда. При этом убыстряются процессы заселения верхних энергетических уровней гелия и неона, что приводит к увеличению разности населенностей рабочих уровней. Однако после достижения определенной концентрации электронов в плазме существенную роль начинает играть процесс ступенчатого возбуждения нижних рабочих уровней неона $2p$ и $3p$ с метастабильных уровней $1s$. Это приводит к снижению инверсии населенности рабочих уровней и, следовательно, к уменьшению мощности генерации.

С ростом общего давления увеличиваются концентрации атомов гелия и неона, растут населенность возбужденных уровней и выходная мощность. Однако при высоком давлении, когда концентрация частиц в разряде становится большой, уменьшается длина свободного пробега электрона и соответственно уменьшается энергия, приобретаемая электроном на этом пути в электрическом поле, что приводит к уменьшению энергии,

передаваемой атомам гелия, и к снижению мощности излучения. Оптимальное давление составляет примерно 100 Па.

Ионный лазер

В ионных лазерах применяют ионы инертных газов, а также ионизированные пары различных химических элементов. В этих лазерах используются энергетические переходы между уровнями возбужденных ионов. Для получения большой мощности необходима высокая концентрация ионов в разряде. Поэтому применяется дуговой разряд с высокой плотностью тока.

Наиболее распространенным из ионных лазеров является аргоновый лазер, работающий на квантовых переходах между возбужденными состояниями иона Ar_2^+ в видимой части спектра ($\lambda = 0,45-0,51$ мкм). Для повышения плотности разряда в ионных лазерах применяют продольное магнитное поле, которое удерживает заряженные частицы вблизи оси трубки. Мощность излучения ионных лазеров выше, чем лазеров, работающих на атомных переходах. В непрерывном режиме выходная мощность составляет десятки ватт, а в импульсном — десятки киловатт. Однако КПД ионных лазеров очень низкий (0,01-0,3 %).

Молекулярный лазер

Недостатком атомных и ионных лазеров является их низкий КПД. Это объясняется, в частности, тем, что для перевода одного атома рабочего газа на верхний энергетический уровень необходима энергия около 20 эВ, а в получаемом при генерации излучении энергия кванта составляет около 2 эВ. То есть эффективность преобразования энергии электрона, возбудившего атом рабочего или буферного газа, составляет всего 0,1. Кроме того, лишь небольшая доля электронов, участвующих в газовом разряде, расходует свою энергию на создание инверсии. В молекулярных лазерах соотношение между энергией излученного кванта и энергией возбуждения существенно выше (порядка 0,5).

Наиболее распространенным молекулярным лазером является лазер на смеси углекислого газа CO_2 с азотом N_2 , в которую добавлен гелий. Упрощенная схема энергетических уровней углекислого газа и азота приведена на рис. 2.8.8. В газоразрядной плазме при неупругих столкновениях с электронами возбуждаются молекулы CO_2 , при этом

происходит заселение уровней 1' и 4. Кроме того, происходит передача энергии от молекул азота к молекулам CO_2 , Это также приводит к возбуждению уровня 4. Эффективность возбуждения велика, так как уровень 1' расположен по энергии близко к уровню 4. Эти уровни имеют продолжительное время жизни. Излучательными переходами являются переходы 4 – 3 и 4 – 2, создающие вынужденное излучение на длинах волн 10.6 и 9.6 мкм. Наиболее интенсивным является переход с длиной волны 10.6 мкм, при этом генерация на других переходах специально подавляется.

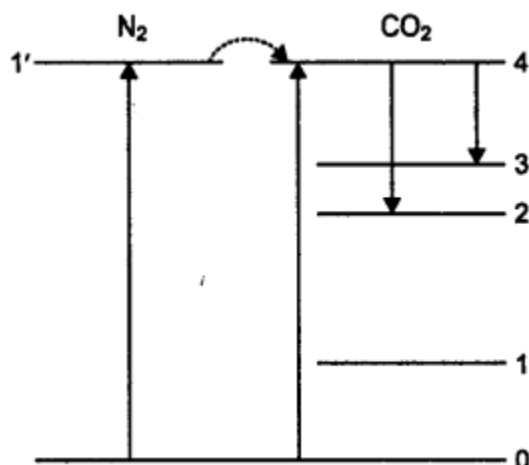


Рис.2.8.8

Газодинамический лазер

В 1966 году В. К. Конюховым и А. М. Прохоровым был предложен, а в 1970 году создан инфракрасный лазер на углекислом газе в смеси с азотом с охлаждением в сверхзвуковом сопле, получивший название газодинамического лазера. Инверсия населенностей уровней в газодинамическом лазере происходит при быстром (сверхзвуковом) расширении предварительно нагретой газовой смеси.

Схема газодинамического лазера приведена на рис. 2.8.9. При сжигании топлива в камере сгорания получается углекислый газ, который здесь же смешивается в определенной пропорции с азотом и водяным паром, образуя высокотемпературную плазму. Газовая смесь под давлением 1700 Па со сверхзвуковой скоростью проходит через сопло и за ним расширяется и охлаждается. Вследствие относительно большого времени жизни верхнего уровня молекулы CO_2 и малого времени прохождения газа через сопло

населенность возбужденного при нагреве газа верхнего уровня сохраняется за время движения молекул от камеры сгорания до оптического резонатора. Значительно меньшее время жизни частицы на нижнем уровне приводит к тому, что населенность нижнего уровня оказывается много меньше населенности верхнего уровня уже на расстоянии нескольких сантиметров от сопла. Таким способом создается инверсия населенностей уровней, и газ поступает в резонатор, состоящий из двух зеркал, параллельных потоку.

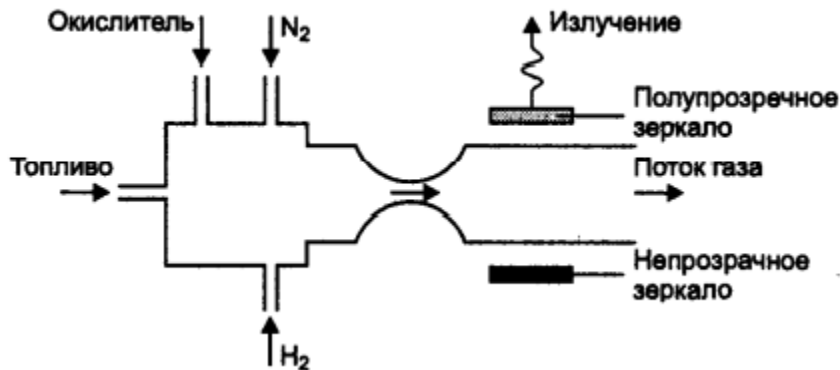


Рис.2.8.9

Полупроводниковые лазеры

Для того чтобы заставить полупроводник усиливать падающий на него свет, необходимо, как и в любом другом лазере, создать в нем инверсию населенностей, с тем чтобы концентрация электронов в области, примыкающей ко дну зоны проводимости, была выше концентрации электронов в области, примыкающей к потолку валентной зоны. На рис. 2.8.10 показана энергетическая диаграмма идеального состояния полупроводника, когда узкая полоса разрешенных энергетических уровней вблизи дна зоны проводимости заполнена электронами, а узкая полоса энергетических уровней у потолка валентной зоны не содержит электронов, то есть заполнена дырками. Если в такой идеальной полупроводник попадают фотоны с энергией $h\nu$, большей ширины запрещенной зоны $\Delta E_{з-0}$, но меньшей $\Delta E_з$, то возникают вынужденные переходы электронов из зоны проводимости в валентную зону с испусканием новых фотонов, точно совпадающих по своим свойствам с первичными фотонами. Если полупроводник поместить между отражающими зеркалами, заставляющими родившиеся фотоны снова и снова проходить через кристалл, создавая

каждый раз новые лавины фотонов, то можно осуществить генерацию монохроматического света.

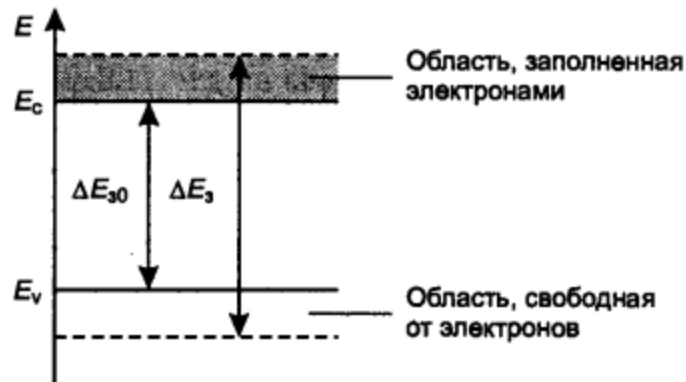


Рис.2.8.10

В полупроводниках возможны следующие методы получения инверсии населенностей: инжекция носителей заряда через p-n-переход (инжекционные лазеры), электронная накачка и оптическая накачка. Наибольшее распространение получил метод инжекции носителей заряда.

Инжекционный лазер

В инжекционных лазерах используется p-n-переход, образованный вырожденными полупроводниками с разным типом электропроводности. Если к такому p-n-переходу приложить прямое напряжение, то уровни Ферми E_{Fn} и E_{Fp} , разойдутся на величину приложенного напряжения (рис. 2.8.11). При этом в некоторой области перехода с шириной δ одновременно будет велико число электронов в полосе ΔE_c и дырок (свободных уровней) в энергетической полосе ΔE_v , то есть распределение носителей заряда оказывается подобным распределению, показанному на рис. 2.8.10, что свидетельствует об инверсии населенностей. В этой области происходит наиболее интенсивная рекомбинация электронов и дырок, сопровождающаяся спонтанным излучением с энергией, большей ширины запрещенной зоны. Чем больше внешнее напряжение, тем больше концентрация электронов и дырок в области δ , тем сильнее выражена инверсия населенностей. При некотором пороговом напряжении (пороговом токе), когда вынужденное излучение, вызванное спонтанным излучением, достаточно для компенсации потерь света в материале полупроводника и в отражающих поверхностях, наступает генерация.

Таким образом, р-п-переход при малых токах является источником спонтанного излучения, что имеет место в светоизлучающих диодах, а при токах больше порогового — источником когерентного излучения, что имеет место в лазерах.

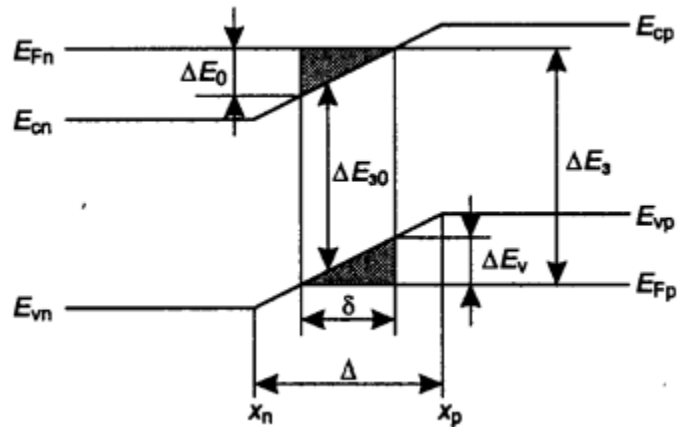


Рис.2.8.11

Первые инжекционные лазеры были созданы на арсениде галлия. Типичный лазер изготавливается в форме прямоугольного параллелепипеда с длинами сторон от долей миллиметра до одного миллиметра (рис. 2.8.12). Две грани полупроводника перпендикулярны плоскости р-п-перехода и образуют после шлифовки зеркала резонатора. Две другие грани наклонены к плоскости р-п-перехода, чтобы не создать в этом направлении условий для самовозбуждения. Излучение выходит из узкой области р-и-перехода перпендикулярно параллельным граням полупроводника.

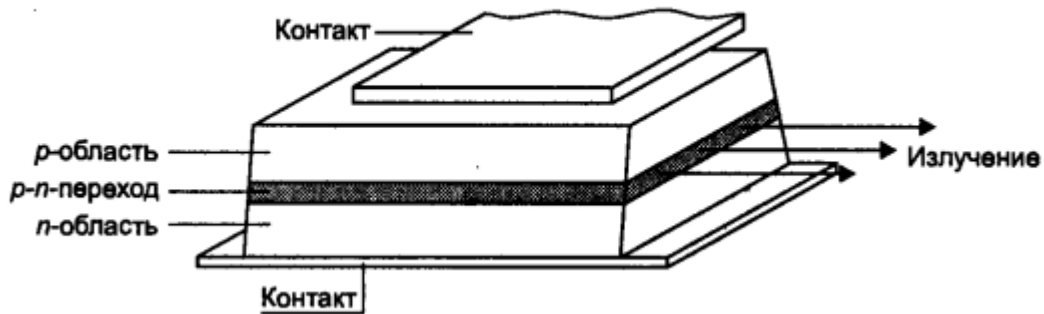


Рис.2.8.12

Пороговый ток лазера в значительной степени зависит от температуры и концентрации примесей. Понижение температуры облегчает вырождение полупроводников и, следовательно, уменьшает пороговый ток. Лазеры на арсениде галлия работают при температуре жидкого гелия 4,2 К или жидкого азота 77 К. В настоящее время разработаны инжекционные лазеры, работающие в импульсном режиме при комнатной температуре. Если при температуре жидкого гелия пороговый ток составляет 100 А/см^2 , то при комнатной температуре он достигает 10^5 А/см^2 .

Инжекционные лазеры, обладая рядом недостатков (большая расходимость луча, широкая линия излучения), имеют ряд важных преимуществ перед другими лазерами. Они обладают высоким КПД, малыми размерами, простотой конструкции, большой мощностью, снимаемой с 1 см^2 излучающей поверхности, возможностью работы в импульсном режиме при комнатной температуре. Преимущества полупроводниковых лазеров заключаются также в простоте модуляции излучения, осуществляемой изменением тока накачки. Все эти достоинства открывают широкие возможности практического применения таких лазеров.

Гетеролазер

Энергетические диаграммы гетеропереходов характеризуются различными потенциальными барьерами для встречных потоков электронов и дырок, что вызывает одностороннюю инжекцию носителей заряда из широкозонного эмиттера в узкозонную базу. При этом концентрация инжектированных в базу носителей заряда может на несколько порядков превышать свое равновесное значение в эмиттерной области.

Лазеры на основе гетеропереходов (гетеролазеры) были предложены Ж. И. Алферовым. В гетеролазере нет необходимости легировать полупроводник до вырождения, так как условие инверсии населенностей энергетических уровней выполняется за счет разницы в ширине запрещенных зон. Структура гетеролазера представлена на рис. 2.8.13. Она состоит из области GaAs n-типа, узкой области GaAs p-типа и области тройного соединения AlGaAs p-типа. Активной является средняя область, в которой создается инверсия населенностей. На границе средней и правой областей образуется потенциальный барьер, который ограничивает длину свободного пробега электронов, инжектированных из левой области, и тем самым повышает эффективность образования вынужденного излучения.

Кроме того, из-за различия в коэффициентах преломления в средней и правой областях на их границе наблюдается внутреннее отражение света (волноводный эффект), что уменьшает поглощение света в правой неактивной области.

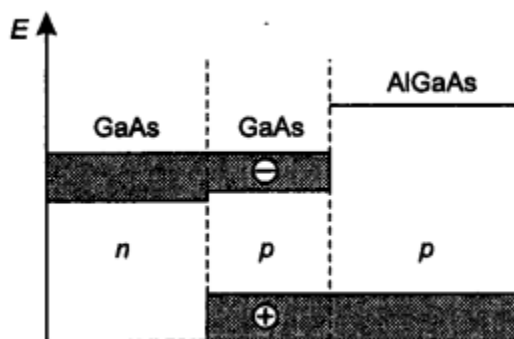


Рис.2.8.13

В нашей стране были разработаны также гетеролазеры с полным внутренним отражением света с обеих сторон от активного слоя, названные лазерами с двойной гетероструктурой, или ДГС-лазерами. В этих лазерах удалось существенно снизить плотность порогового тока и получить большой КПД, что позволило при комнатной температуре осуществить режим непрерывного излучения, который ранее был возможен только при температуре жидкого азота. В ДГС-лазерах на основе соединений GaAs—GaAlAs при комнатной температуре плотность порогового тока составляет менее 1 кА/см^2 .

Отличительными особенностями гетеролазеров являются высокий КПД, удобство возбуждения, малые габариты. Путем изменения концентрации примесного алюминия от 0 до 30 % в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ можно изготавливать лазеры с различной длиной волны излучения в пределах от 0,68 до 0,9 мкм.

За разработку полупроводниковых приборов на основе гетеропереходов Ж. И. Алферов в 2001 году был удостоен Нобелевской премии.