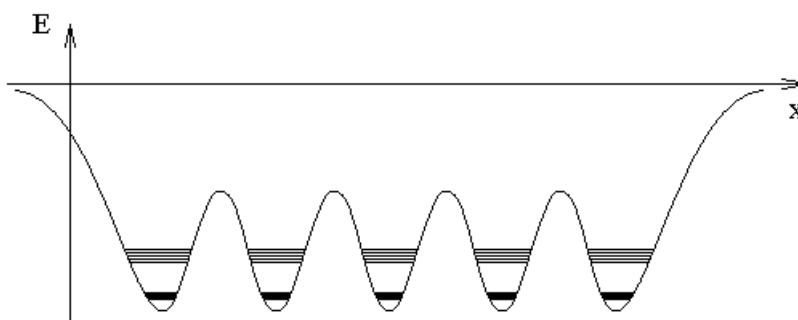


Факультативно. Уровни энергии твердого тела.

Если рядом находятся два одинаковых атома, то каждый уровень энергии одиночного атома раздваивается. Если рядом находятся три одинаковых атома, то каждый уровень энергии растрояивается. Если рядом находятся N атомов, то вместо каждого уровня образуется N близких друг другу уровней энергии. Если $N \approx 10^{23}$, то вместо каждого уровня образуется целая зона уровней энергии. Это и есть энергетические зоны в твердом теле.

Рассмотрим зависимость потенциальной энергии электрона от его координаты в твердом теле. Около каждого атома образуется минимум потенциальной энергии электрона.



Каждый уровень энергии уединенного атома расщепляется в зону уровней, которые принадлежат всему кристаллу, а не одному атому. Согласно квантовой механике электрон способен туннелировать из одной потенциальной ямы в другую через потенциальный барьер, оставаясь при этом на уровне энергии, расположенном ниже высоты потенциального барьера. Чем выше уровень энергии одиночного атома, тем легче электрон туннелирует (просачивается) через потенциальный барьер из одной потенциальной ямы в другую, тем выше частота туннелирования. Частотное расстояние между соседними уровнями энергии в зоне равно частоте туннелирования электронов. Чем выше частота туннелирования, тем шире становится энергетическая зона.

Для нижних уровней энергии одиночного атома вероятность туннелирования через барьер очень мала, при этом уровни энергии почти не расщепляются и остаются одиночными уровнями, а не зонами уровней.

Если электрон часто переходит из одной потенциальной ямы в другую, то это свободный электрон, а зона уровней энергии — зона проводимости. Если электрон редко переходит, то это связанный электрон, а зона — валентная зона.

Между валентной зоной уровней энергии и зоной проводимости находится зона совсем без уровней — запрещенная зона.



При изображении энергетических зон по вертикали откладывают энергию уровня, а по горизонтали обычно ничего не откладывают. Уровни энергии рисуют горизонтальными отрезками, потому что отрезки лучше видно, чем точки на оси энергии.

Если верхнее занятое электронами состояние находится в валентной зоне, то материал — диэлектрик. Диэлектрик не проводит электрический ток.

Если верхнее занятое электронами состояние находится в зоне проводимости, то материал — проводник. Проводник проводит электрический ток.

В полупроводнике при температуре абсолютного нуля $T = 0$ верхнее занятое состояние находится в валентной зоне. При комнатной температуре есть очень небольшое количество электронов в зоне проводимости, так как ширина запрещенной зоны полупроводника (например, для кремния 1.12 эВ, для германия 0.78 эВ) сравнима с тепловой энергией kT (0.026 эВ), хотя и заметно больше, чем kT . При этом очень малая часть электронов на хвосте распределения Ферми — Дирака, аналога распределения Больцмана, все же попадает в зону проводимости.

Факультативно. Полупроводники *n*- и *p*-типа.

Типичные полупроводники 4-х валентны: кремний Si, германий Ge. В чистых полупроводниках проводимость настолько мала, что проводимость реального полупроводника всегда определяется его примесями.

Добавление примесей — легирование полупроводника.

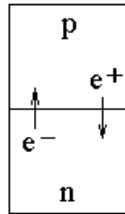
Если примесь 5-и валентна (P — фосфор), то атом примеси имеет лишний электрон (примесь — донор электронов), который легко отрывается и начинает блуждать по полупроводнику. Положительный заряд недостатка электрона остается неподвижно у атома примеси, а отрицательный заряд блуждает по полупроводнику. Получается полупроводник *n*-типа. У него негативные носители тока, поэтому полупроводник *n*-типа.

Если примесь 3-х валентна (In — индий), то к атому примеси легко прилипает лишний электрон (примесь — акцептор). Отрицательный заряд остается неподвижно у атома примеси. Недосток электрона — дырка. Дырка перемещается от одного атома полупроводника к другому. Получается полупроводник *p*-типа. У него позитивные носители тока, поэтому полупроводник *p*-типа.

Факультативно. Полупроводниковый диод.

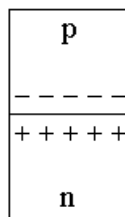
Рассмотрим, что происходит при соприкосновении полупроводника n -типа и полупроводника p -типа.

Электроны диффундируют через контакт двух полупроводников из полупроводника n -типа в полупроводник p -типа. Дырки диффундируют во встречном направлении из p в n полупроводник.

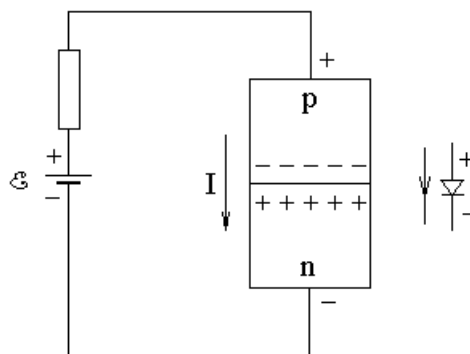


Электроны в чужом для них полупроводнике p -типа называют неосновными носителями тока, как и дырки в полупроводнике n -типа. Неосновные носители тока в чужом для них полупроводнике встречаются с основными носителями и рекомбинируют.

В результате рекомбинации в области контакта уменьшается концентрация носителей тока и появляется слой, обедненный носителями.



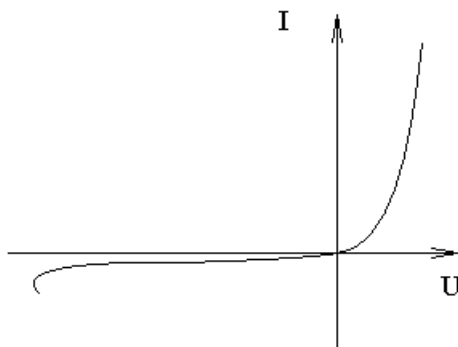
Рекомбинируя в чужом полупроводнике, неосновные носители оставляют перенесенный через контакт заряд. В области контакта появляется двойной электрический слой, похожий на заряженный конденсатор. Как и на конденсаторе, на двойном слое происходит падение напряжения. Это напряжение возрастает до тех пор, пока оно не останавливает диффузию оставшихся носителей тока через контакт.



Если к контакту приложить внешнее электрическое поле, которое уменьшает контактное напряжение, то диффузия носителей тока возобновляется. Через контакт течет ток.

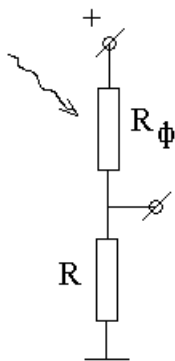
Если к контакту приложить внешнее электрическое поле, которое увеличивает запирающее контактное напряжение, то тока нет.

То есть контакт двух полупроводников представляет собой диод. Он пропускает электрический ток в одну сторону и не пропускает в другую.



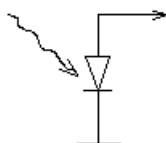
Экзамен. Приемники света: фоторезистор, фотодиод, ФЭУ, лавинный фотодиод.

Полупроводник можно использовать, как фоторезистор. При поглощении кванта света в полупроводнике происходит переход электрона из валентной зоны в зону проводимости. При этом образуется пара электрон-дырка. Под действием приложенного напряжения дырки будут двигаться по полю, а электрона — против поля, и потечет электрический ток. Проводимость полупроводника будет тем больше, чем больше в нем носителей тока: электронов и дырок. То есть сопротивление полупроводника уменьшается в результате поглощения света. Такое устройство называют фотосопротивлением или фоторезистором.



Часто в качестве приемника света используется фотодиод. Рассмотрим три варианта включения фотодиода в электрическую схему.

1). Режим фото ЭДС.



При поглощении кванта света в области $p-n$ перехода образуется пара электрон-дырка, это процесс обратный рекомбинации. Контактное напряжение

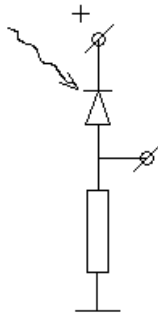
в области $p-n$ перехода ускоряет электроны в одну сторону, а дырки — в другую. Контактная разность потенциалов уменьшается.

При указанной на рисунке выше полярности включения фотодиода под действием света на выходе образуется положительное напряжение $U_{вых} > 0$.

Преимущество схемы — малые шумы. Недосток — нелинейная зависимость напряжения на выходе от мощности света.

Пример использования фотодиода в режиме фото ЭДС — солнечные батареи.

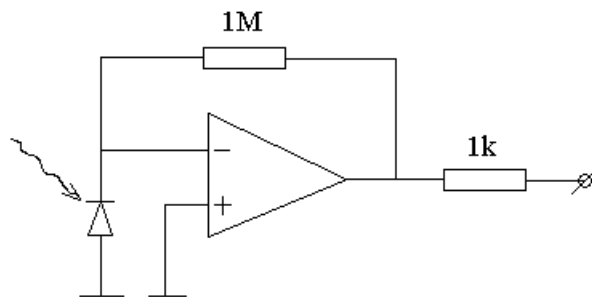
2). Режим включения с внешним источником напряжения.



Напряжение на выходе схемы линейно растет пропорционально мощности света.

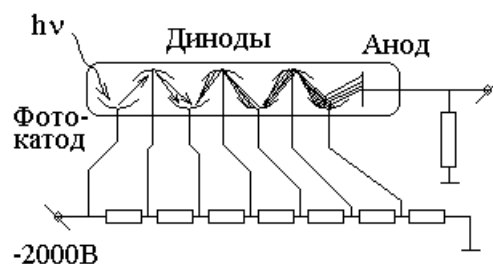
Преимущество схемы — линейность и большая чувствительность (высокий коэффициент передачи). Недосток схемы — большие шумы.

3). Режим короткого замыкания.



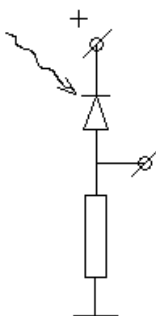
Преимущества схемы — высокая линейность, малые шумы, высокий коэффициент передачи. При указанной полярности включения фотодиода под действием света на выходе операционного усилителя образуется положительное напряжение $U_{вых} > 0$.

ФЭУ — фотоэлектронный умножитель.



Фотон выбивает электрон из фотокатода. Электрон ускоряется электрическим полем между фотокатодом и ближайшим динодом. Ускоренный полем электрон выбивает из ближайшего динода несколько электронов. Эти несколько электронов ускоряются электрическим полем к следующему диноду. Каждый из этих электронов выбивает несколько электронов из очередного динода, и так далее. Лавина примерно из 10^6 электронов достигает анода и формирует импульс тока и импульс отрицательного напряжения на резисторе в цепи анода.

Лавинный фотодиод включают аналогично одному из вариантов включения обычного фотодиода,



но в случае лавинного фотодиода напряжение питания почти равно напряжению пробоя фотодиода. Под действием кванта света в $p-n$ переходе образуется пара электрон-дырка. Электрон ускоряется в $p-n$ переходе приложенным электрическим полем, по пути сталкивается с электронами других атомов и формирует лавину из выбитых электронов и дырок. Эта лавина создает импульс тока. Ток создает падение напряжения на резисторе. На время импульса тока напряжение на лавинном фотодиоде уменьшается ниже напряжения пробоя. Лавина прекращается. Характерный размер лавины — 30 электронов на один фотон.

Лавинный фотодиод, как и ФЭУ, может быть использован в так называемом режиме счета фотонов — в режиме регистрации отдельных фотонов.

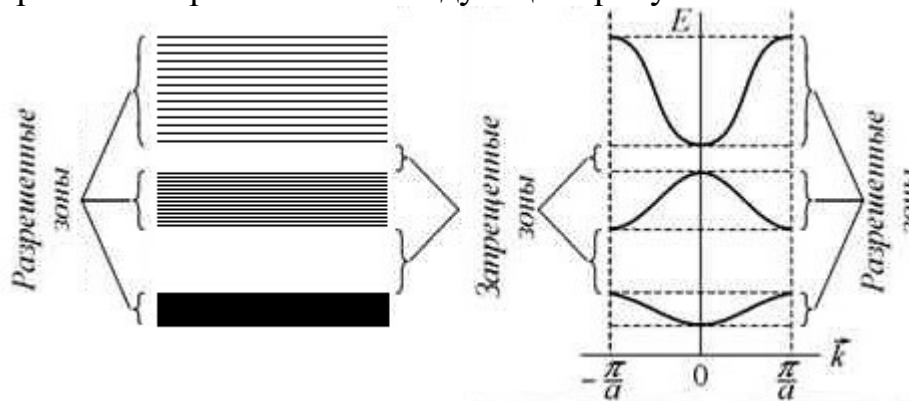
Факультативно. Светодиод.

Если к диоду приложить отпирающее напряжение, то через диод пойдет ток. При этом электроны и дырки проходят через $p-n$ переход и оказываются в чужом для себя полупроводнике, где они являются неосновными носителями тока. Встречаясь с основными носителями, они рекомбинируют. Энергия

рекомбинации может выделяться либо в виде теплоты, либо в виде излучения фотона. Это и есть излучение светодиода.

Можно сказать, что любой диод является светодиодом, но одни диоды излучают очень слабо с низким КПД (коэффициентом полезного действия), а другие излучают хорошо.

Хорошо излучают прямозонные диоды, а плохо — непрямозонные. Здесь речь идет о запрещенной зоне полупроводника. Уровни энергии, например, зоны проводимости можно изображать не только в виде горизонтальных отрезков, но и в виде зависимости энергии электрона от его волнового вектора, как это изображено в правой части следующего рисунка.



http://dssp.petrus.ru/p/tutorial/ftt/Part9/part9_2_1.htm

Дело в том, что электрон в твердом теле распространяется, как волна (волна де Бройля), переходя от одного атома твердого тела к другому атому. В вакууме длина волны де Бройля $\lambda = \frac{h}{mV}$. При этом импульс электрона

$$p = mV = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} = \hbar k. \text{ Такая же связь импульса и волнового числа}$$

$$\text{справедлива для фотона } p = mV = mc = \frac{mc^2}{c} = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu}{\lambda\nu} = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} = \hbar k \text{ и}$$

для любой другой частицы, рассматриваемой как волна де Бройля. В вакууме через импульс свободного электрона можно выразить его кинетическую

$$\text{энергию } E_{\text{кин}} = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}. \text{ Можно сказать, что каждому уровню энергии}$$

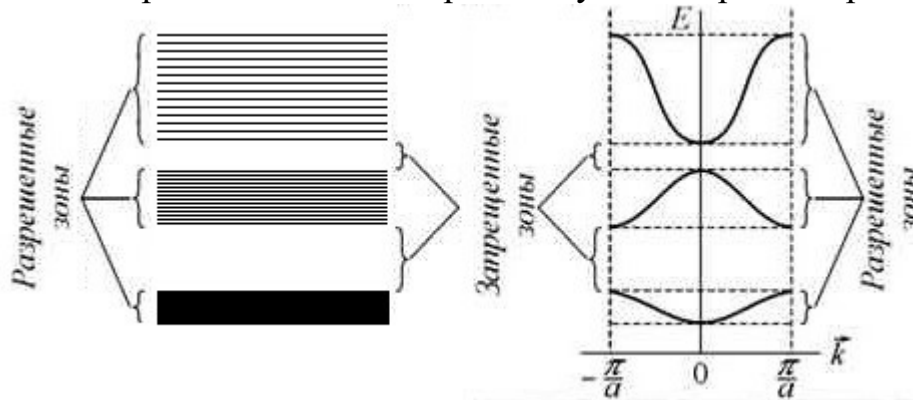
энергетической зоны соответствует свое дискретное значение вектора $\vec{k}$. В полупроводниковом кристалле импульс электрона невозможно измерить, поэтому в полупроводнике говорят только о квазиимпульсе $\vec{p} = \hbar \vec{k}$.

Встречные волны де Бройля образуют стоячую волну. Пучности стоячей волны могут по-разному располагаться относительно потенциальных ям твердого тела. В результате зависимость полной энергии от импульса

$$\text{становится более сложной } E_{\text{полн}} \neq \frac{\hbar^2 k^2}{2m}. \text{ С учетом этой зависимости}$$

энергетическую зону вместо горизонтальных отрезков (в левой части рисунка)

можно изобразить функцией $E(k)$ (в правой части рисунка), где k кинетической энергии электрона в твердом теле добавлена потенциальная энергия его взаимодействия с ионами атомарной решетки твердого тела. В правой части рисунка изображена зависимость полной энергии электрона от волнового числа в простейшем одномерном случае с периодом решетки a .



http://dssp.petrsu.ru/p/tutorial/ftt/Part9/part9_2_1.htm

Пусть верхняя энергетическая зона на левом рисунке — это зона проводимости. Под ней после запрещенной зоны находится валентная зона. В валентной зоне проводимость осуществляется дырками (дырочная проводимость). Энергетически выгодна малая скорость дырки, то есть малая скорость дырки соответствует минимальной энергии. Дырка — это недостаток электрона, поэтому электрон с малой скоростью в валентной зоне имеет максимальную энергию.

Наиболее вероятное состояние в валентной зоне — дырки с нулевой скоростью. Тогда зависимость энергии от импульса электрона — парабола ветвями вниз.

Переход электрона снизу вверх с вершины валентной зоны на дно зоны проводимости соответствует переходу с одним и тем же значением $k=0$ для обоих уровней. Этот случай соответствует так называемому прямозонному полупроводнику (слева на следующем рисунке).

Для трехмерной структуры кристалла зависимость энергии электрона от его волнового вектора будет трехмерной и может быть гораздо более сложной.

В трехмерном полупроводнике зависимость энергии от импульса различная в разных направлениях. Электрон — это волна де Бройля. В полупроводнике образуется стоячая волна, пучности которой могут совпадать с потенциальными ямами для электрона. Полная энергия электрона с такой длиной волны может быть меньше, чем полная энергия электрона с нулевым импульсом и нулевым волновым числом. В результате получается так называемый непрямозонный полупроводник (на рисунке ниже, справа).

Если электрон в полупроводнике попал в зону проводимости, то в результате столкновений с атомами полупроводника электрон очень быстро опускается на дно зоны проводимости.

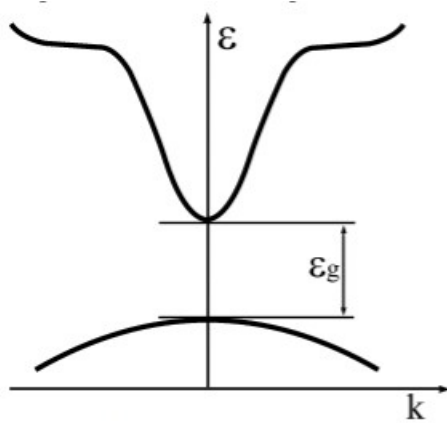


Рис.3а. Прямозонный полупроводник
(GaAs, InAs, InP и т.п.)

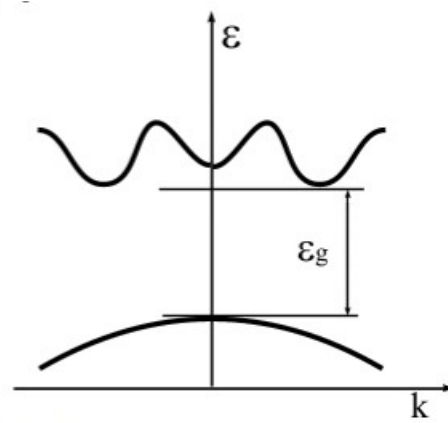
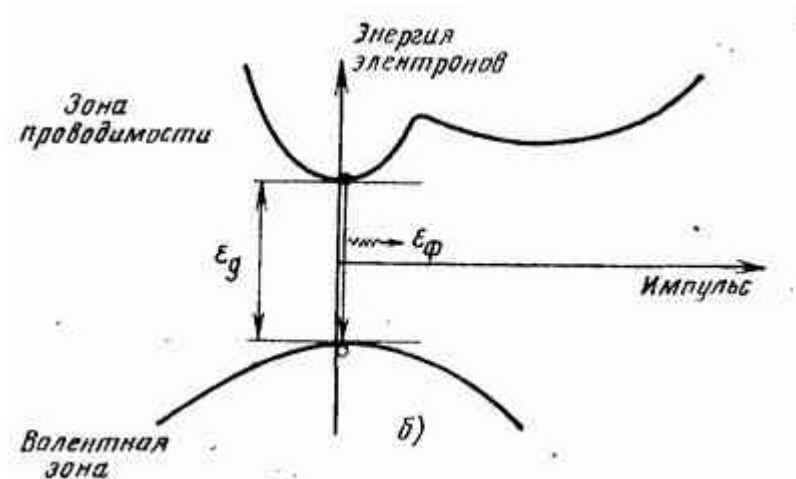


Рис.3б. Непрямозонный полупроводник
(Ge, Si, GaP и т.п.)

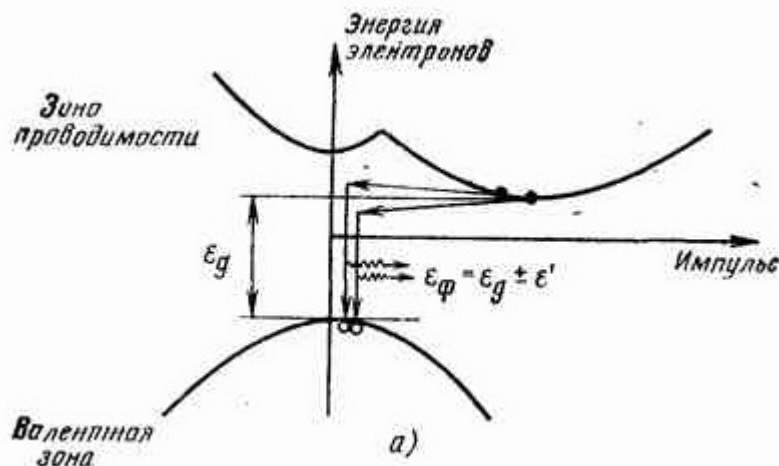
Парфенов В.В., Закиров Р.Х. Физика полупроводников (методическое пособие к практикуму по физике твердого тела).

В прямозонном полупроводнике дно зоны проводимости находится напротив вершины валентной зоны. При переходе электрона сверху вниз со дна зоны проводимости на вершину валентной зоны не изменяется волновой вектор электрона и соответственно не изменяется его импульс, оставаясь около нулевого значения.



http://sci.alnam.ru/book_opt.php?id=53

В непрямозонном полупроводнике (на рисунке ниже) дно зоны проводимости находится в стороне от вершины валентной зоны. При переходе электрона со дна зоны проводимости на вершину валентной зоны заметно изменяется волновой вектор и импульс электрона $\vec{p} = \hbar \vec{k}$.



http://sci.ainam.ru/book_opt.php?id=53

Импульс фотона $p = \frac{h\nu}{c} = \hbar k$ очень мал и изменение импульса электрона

гораздо больше импульса фотона, поэтому импульс электрона нельзя передать фотону. Если импульс электрона изменяется, то одновременно с излучением фотона нужно передать изменение импульса электрона волне групповых колебаний атомов в полупроводнике — так называемому оптическому фонону с противофазным колебанием соседних атомов.

Вероятность перехода электрона с одновременной передачей импульса оптическому фонону ультразвуковой волны в непрямозонном полупроводнике гораздо меньше, чем вероятность перехода с передачей энергии и импульса фотону в прямозонном полупроводнике. Поэтому прямозонные полупроводники являются хорошими светодиодами, а непрямозонные — плохими.

Германий Ge и кремний Si — непрямозонные полупроводники, поэтому они не используются в качестве светодиодов. Прямозонные полупроводники GaAs (галлий-арсеник — арсенид галлия), InSb (индий-сбистим — сурьма) — антимонид индия) используются в полупроводниковых лазерах. О полупроводниковых лазерах речь пойдет ниже. В качестве доноров при формировании электронной проводимости для GaAs (валентность Ga — 3, валентность As — 5) используются химические элементы VI группы: Se, Te. В качестве акцепторов для формирования дырочной проводимости применяют химические элементы II группы: Zn, Cd.

Экзамен. Полупроводниковые лазеры. Управление частотой генерации полупроводникового лазера.

Если у светодиода отполировать две параллельные грани, так чтобы плоскость $p-n$ перехода была перпендикулярна отполированным граням, то получится полупроводниковый лазер. Отполированные грани при этом играют роль зеркал лазера.

Если пропустить электрический ток через диод в прямом направлении, то электроны и дырки проходят через $p-n$ переход и рекомбинируют в чужом для

них полупроводнике. Электроны при этом находятся около дна зоны проводимости, а дырки — около вершины валентной зоны. Рекомбинация электрона и дырки — это просто переход электрона со дна зоны проводимости на вершину валентной зоны. В соответствии с распределением Больцмана по энергиям электроны в обеих зонах стараются занять наиболее низкие уровни энергии, поэтому уровни энергии на дне зоны проводимости всегда заняты, а уровни на вершине валентной зоны всегда свободны. То есть между этими уровнями образуется инверсия заселенностей. Инверсия велика, поэтому большое усиление света. Большое усиление означает, что любые зеркала, в частности отполированные грани полупроводника, будут вносить потери меньшие, чем усиление лазерной среды.

Факультативная вставка.

Длины волн излучения некоторых лазеров можно посмотреть здесь:

	Средний инфракрасный
1540 нм	Ег:стекло, Ег:кристаллы
	Ближний инфракрасный
1152 нм	He-Ne
1090 нм	Ar
1060-1064 нм	Nd:стекла, Nd:кристаллы
1064 нм	Nd:YAG, Nd:YVO4
700-1000 нм	Ti:сапфир
780-980 нм	лазерные диоды GaAs, GaAlAs, InGaAs
848 нм	лазерные мыши
808 нм	лазерный диод накачки DPSS
780 нм	лазерный диод от привода CD
	Красный
694 нм	рубин (только импульсный)
630-680 нм	лазерные диоды на InGaAlP
650 нм	Лазерная указка, лазер от привода DVD
635 нм	дорогие лазерные диоды
632,8 нм	He-Ne
	Оранжевый
627 нм	пары Au
615 нм	He-Hg
612 нм	He-Ne
	Желтый
594 нм	He-Ne
578 нм	пары Cu
564 нм	He-Hg
	Зеленый
543 нм	He-Ne
532 нм	удвоенный Nd:YAG или Nd:YVO4, DPSS, зеленые указки
514.5 нм	Ar
511 нм	пары Cu
520нм	зеленые лазерные диоды (новая разработка)
	Голубой
501,7 н	Ar
496,5 нм	Ar
488,0 нм	Ar
476,5 нм	Ar
	Синий
473 нм	Nd:YAG или Nd:YVO4, DPSS (только импульсный или квазинепрерывный)
457,9 нм	Ar
445 нм	лазерный диод InGaN
442 нм	He-Cd
	Фиолетовый
416 нм	Kr
405 нм	лазерный диод InN, Blu-Ray, фиолетовая указка
	Ультрафиолетовый
337,1 нм	N ₂ , воздух (только импульсный)
325 нм	He-Cd

Наиболее распространены полупроводниковые лазеры в виде лазерной указки. Кратко обсудим некоторые из них.

Обычные кремниевые диоды непрямозонные, и лазеры на них не получаются. Хорошим прямозонным полупроводником является кристалл GaAs. Интересно, что кристалл полупроводника AlAs имеет тот же вид кристаллической решетки и почти то же самое расстояние между атомами кристалла. Это позволяет заменять в кристалле GaAs некоторые атомы Ga на атомы Al. При этом сохраняется правильная структура кристалла, но увеличивается ширина запрещенной зоны. Ширина запрещенной зоны определяет частоту генерации лазера $\Delta E = h\nu$. В результате в зависимости от концентрации атомов Al можно получить генерацию на разных длинах волн. Вместо атомов Al можно добавить атомы In.

780-980 нм: GaAs, GaAlAs, InGaAs.

808 нм. Мощный полупроводниковый лазер.

Формально длина волны этого лазера находится за пределами видимого диапазона длин волн (400 нм — 700 нм), но глаз видит мощный лазерный луч, как слабый красный. Этот лазер используется в качестве оптической накачки лазерной среды других твердотельных лазеров (Diode-pumped solid-state laser, DPSS). В 4-х уровневой схеме поглощение излучения этого лазера переводит атомы усиливающей свет среды другого лазера с уровня 1 на уровень 4. Оптическая накачка вместо рассмотренного нами ранее разряда в газе.

630-680 нм: InGaAlP с разными концентрациями.

650 нм. Это самый дешевый и самый распространенный красный лазер (лазер с излучением в красном диапазоне спектра), который обычно используется в качестве лазерной указки.

589 нм и 593.5 нм. Желтые лазерные указки относительно дорогие и маломощные (подробнее в следующем вопросе).

532 нм. Зеленая лазерная указка (подробнее в следующем вопросе).

445 нм. Синий лазер (лазерная указка) InGaN.

405 нм. Фиолетовый лазер (лазерная указка) InN.

Конец факультативной вставки.

Частотой генерации полупроводникового лазера управляют изменением температуры кристалла и изменением силы тока через кристалл. Длину волны генерации полупроводниковых лазеров можно изменять на пару нанометров, нагревая или охлаждая лазер. Исключением являются лазерные указки излучения зеленого и желтого света, где генерация возникает не на полупроводниковых уровнях энергии, а на уровнях атома неодима Nd.

При нагревании полупроводникового лазерного кристалла длина волны генерации лазера увеличивается. Дело в том, что с увеличением температуры $T \nearrow$ увеличивается амплитуда колебания атомов, и в тот момент, когда соседние атомы оказываются ближе друг к другу, электронам соседних атомов становится легче меняться местами. Возрастает частота обменных переходов электронов между потенциальными ямами соседних атомов. Эта частота равна частотному расщеплению соседних уровней энергии в энергетической зоне. Возрастает частотное расщепление уровней энергии, возрастает ширина

энергетической зоны уровней энергии, а ширина энергетического зазора между зонами уровней сокращается. То есть уменьшается ширина запрещенной зоны $\Delta E \searrow$. Уменьшение ширины запрещенной зоны уменьшает частоту генерации лазера $\Delta E = h\nu$. Соответственно, увеличивается длина волны света $\lambda \nu = \frac{c}{n}$:

$$T \nearrow \longrightarrow \Delta E \searrow \longrightarrow \nu \searrow \longrightarrow \lambda \nearrow.$$

Температурное управление длиной волны (частотой) генерации полупроводникового лазера очень медленное. Быстро изменять частоту генерации можно изменением величины тока через полупроводниковый диод, так как при изменении силы тока эффективная температура изменяется прямо внутри p - n перехода.

Факультативная вставка.

Если ток через лазерный p - n переход модулировать с частотой в несколько гигагерц, то излучение лазера будет частотно модулировано этой же частотой. Хотя на более низких частотах (десятки мегагерц) модуляции тока частота полупроводникового лазера практически не модулируется.

Конец факультативной вставки.