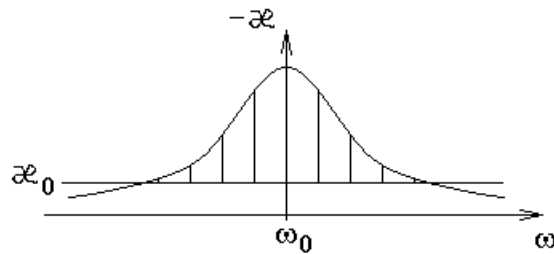


Экзамен. Селекция лазерных мод. Пленка Троицкого.

Обычно внутри частотного контура усиления лазерной среды при условии усиления больше потерь $(-k) > k_0$ помещается несколько продольных мод с интервалом $\Delta \nu = \frac{c}{2nL}$.



В случае доплеровского уширения линии усиления лазер излучает на всех отмеченных частотах одновременно.

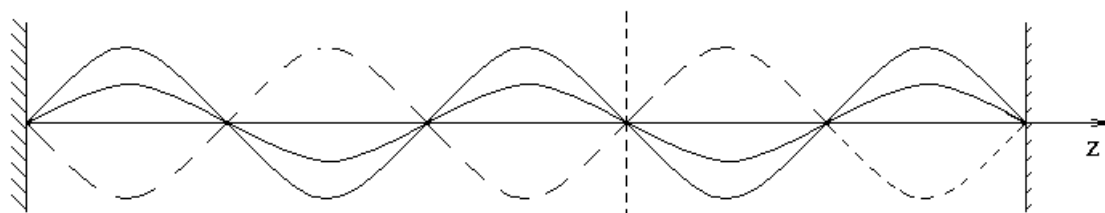
Чтобы получить одночастотный режим генерации лазера нужно подавить генерацию на лишних продольных модах. Эту задачу селекции продольных мод можно решить с помощью пленки Троицкого.

Пленки Троицкого бывают двух типов: с металлическим напылением (поглощающая) и с диэлектрическим узором (рассеивающая).

Толщина пленки Троицкого должна быть гораздо меньше половины длины волны.

Пленку Троицкого помещают внутрь резонатора лазера перпендикулярно лучу.

Если пленка Троицкого находится в узле стоячей волны поля \vec{E} , то пленка не поглощает и не рассеивает свет.



пленка Троицкого

Если же пленка Троицкого находится в пучности стоячей лазерной волны, то она поглощает или рассеивает свет и вносит дополнительные потери в соответствующую продольную моду.

Генерация остается только для тех продольных мод, для которых пленка находится в узле стоячей волны.

Рассмотрим теперь селекцию поперечных лазерных мод.

Селекция поперечных мод обычно осуществляется внутррезонаторной ирисовой диафрагмой.

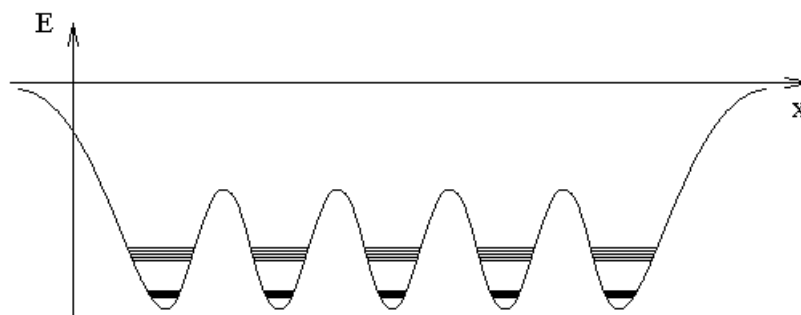
Ирисовая диафрагма — отверстие в непрозрачном экране, диаметр которого можно изменять. Конструктивно ирисовая диафрагма состоит из нескольких металлических лепестков. Ирис — цветок.

Диафрагму ставят симметрично относительно оси резонатора. Моды с большими поперечными индексами имеют световое поле, которое частично занимает объем достаточно далеко расположенный от оси резонатора. Диаметр диафрагмы можно подобрать так, чтобы из всех поперечных мод генерация осталась только на низшей моде с индексами (0,0) или, как говорят, только на продольной моде. В этом и состоит селекция поперечных мод лазера.

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.

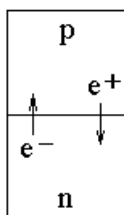
Если примесь 3-х валентна (In — индий), то к атому примеси легко прилипает лишний электрон (примесь — акцептор). Отрицательный заряд остается неподвижно у атома примеси. Недосток электрона — дырка. Дырка перемещается от одного атома полупроводника к другому. Получается

полупроводник p -типа. У него позитивные носители тока, поэтому полупроводник p -типа.

Факультативно. Полупроводниковый диод.

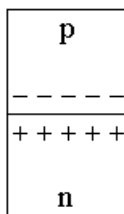
Рассмотрим, что происходит при соприкосновении полупроводника n -типа и полупроводника p -типа.

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

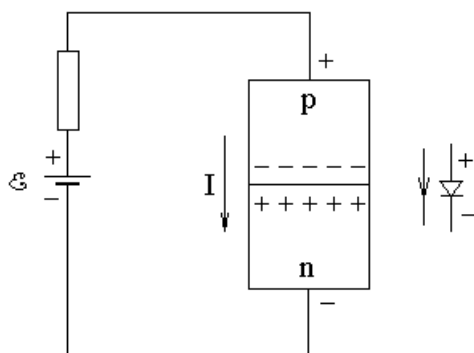


Электроны в чужом для них полупроводнике p -типа называют неосновными носителями тока, как и дырки в полупроводнике n -типа. Неосновные носители тока в чужом для них полупроводнике встречаются с основными носителями и рекомбинируют.

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



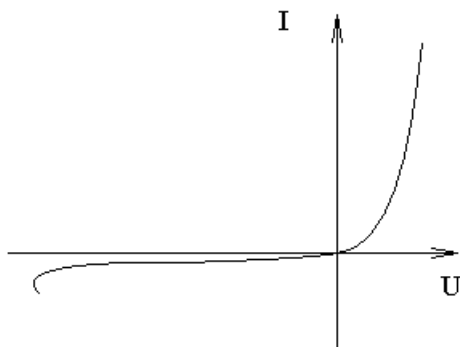
Рекомбинируя в чужом полупроводнике, неосновные носители оставляют перенесенный через контакт заряд. В области контакта появляется двойной электрический слой, похожий на заряженный конденсатор. Как и на конденсаторе, на двойном слое происходит падение напряжения. Это напряжение возрастает до тех пор,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

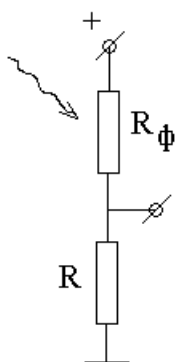
Если к контакту приложить внешнее электрическое поле, которое увеличивает запирающее контактное напряжение, то тока нет.

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



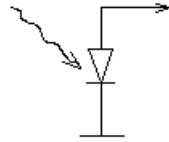
Экзамен. Приемники света: фоторезистор, фотодиод, ФЭУ, лавинный фотодиод.

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.

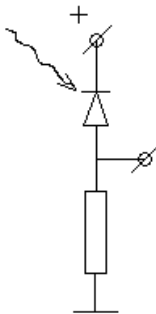


При поглощении кванта света в области $p-n$ перехода образуется пара электрон-дырка, это процесс обратный рекомбинации. Контактное напряжение в области $p-n$ перехода ускоряет электроны в одну сторону, а дырки — в другую. Контактная разность потенциалов уменьшается.

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

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

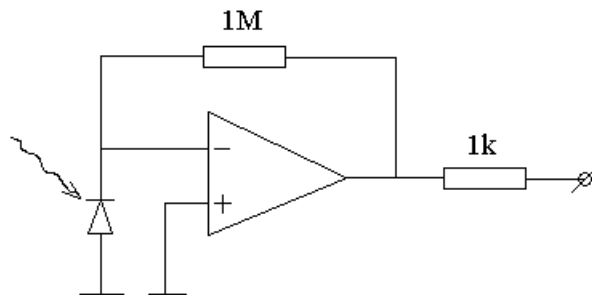
2). Режим включения с внешним источником напряжения.



Напряжение на выходе схемы линейно растет пропорционально мощности света.

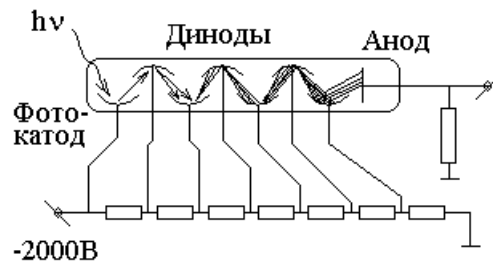
Преимущество схемы — линейность и большая чувствительность (высокий коэффициент передачи). Недостаток схемы — большие шумы.

3). Режим короткого замыкания.



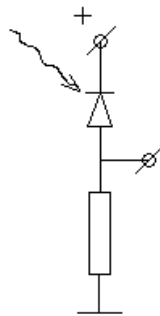
Преимущества схемы — высокая линейность, малые шумы, высокий коэффициент передачи. При указанной полярности включения фотодиода под действием света на выходе операционного усилителя образуется положительное напряжение $U_{вых} > 0$.

ФЭУ.



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 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.

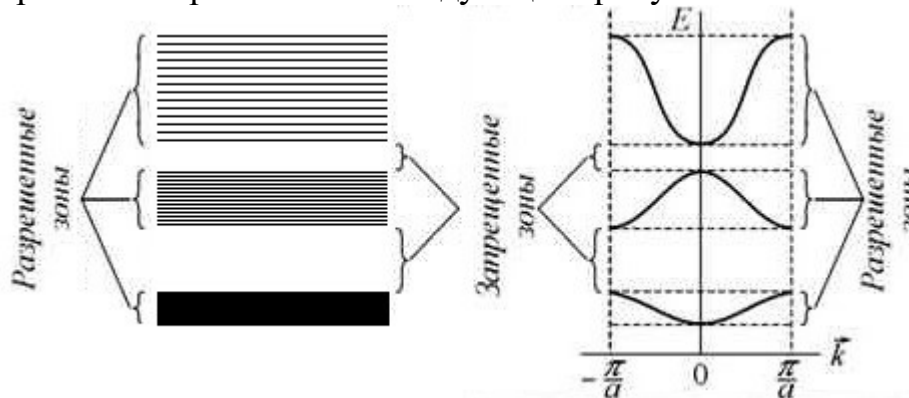
Лавинный фотодиод, как и ФЭУ, может быть использован в так называемом режиме счета фотонов — в режиме регистрации отдельных фотонов.

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 — непрямоzonные. 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.petsu.ru/p/tutorial/ft/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 энергию $E_{кин} = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$. Можно сказать, что каждому уровню энергии

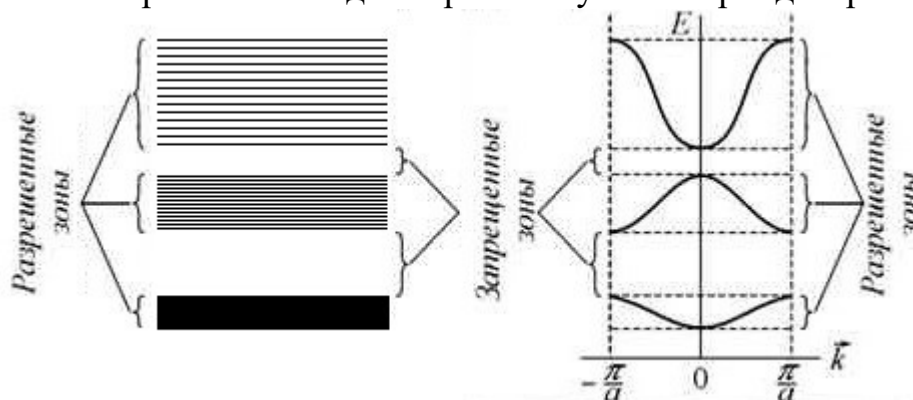
энергетической зоны соответствует свое дискретное значение вектора \vec{k} . В полупроводниковом кристалле импульс электрона невозможно измерить, поэтому в полупроводнике говорят только о квазиимпульсе $\vec{p} = \hbar\vec{k}$.

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

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

энергетическую зону вместо горизонтальных отрезков (в левой части рисунка) можно изобразить функцией $E(k)$ (в правой части рисунка), где к 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/fft/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 с вершины валентной зоны на дно зоны проводимости соответствует переходу с одним и тем же значением $k = 0$ для обеих 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 справа).

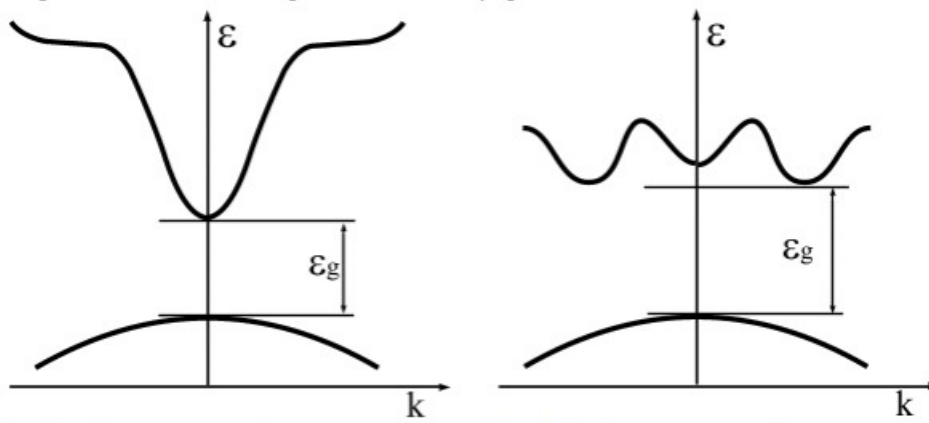
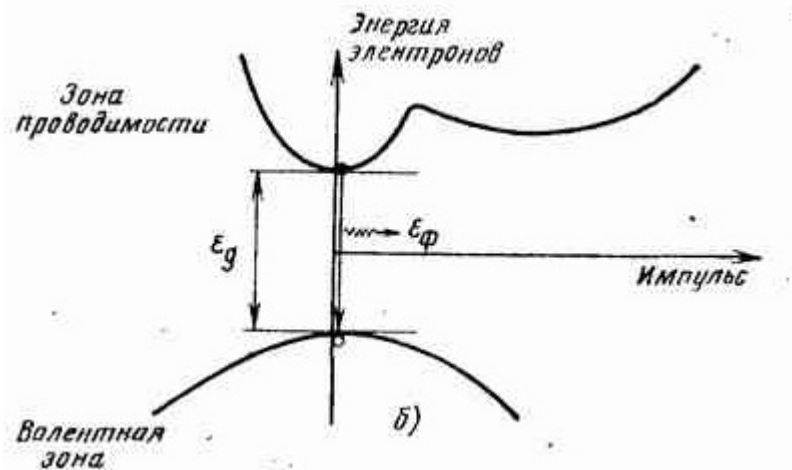


Рис.3а. Прямозонный полупроводник (GaAs, InAs, InP и т.п.) Рис.3б. Непрямозонный полупроводник (Ge, Si, GaP и т.п.)

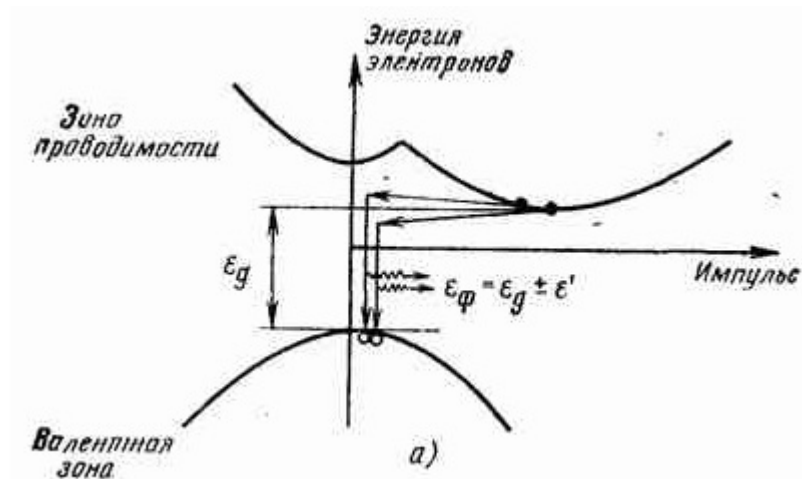
Парфенов В.В., Закиров Р.Х. Физика полупроводников (методическое пособие к практикуму по физике твердого тела).

В прямозонном полупроводнике при переходе электрона 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 при переходе электрона со дна зоны проводимости на вершину валентной зоны изменяется волновой вектор и импульс электрона $\vec{p} = \hbar\vec{k}$.



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

Импульс фотона $p = \frac{h\nu}{c} = \hbar k$ очень мал, изменение импульса электрона гораздо больше импульса фотона, поэтому его 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-стибид — сурьма) — антимонид индия) используются в полупроводниковых лазерах. О полупроводниковых лазерах речь пойдет ниже. В качестве доноров при формировании электронной проводимости GaAs используются химические элементы VI группы: Se, Te. В качестве акцепторов для формирования дырочной проводимости применяют химические элементы II группы: Zn, Cd.