

ЛЕКЦИЯ 3. МЕХАНИЗМЫ ПОГЛОЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКАМИ И ДИЭЛЕКТРИКАМИ

В отличие от металлов в энергетическом спектре полупроводников и диэлектриков существует запрещенная зона E_g , не содержащая энергетических уровней. Кроме того, легированные полупроводники характеризуются глубиной залегания донорных (акцепторных) уровней E_i ($i = d, a$). Поэтому в зависимости от соотношения между энергией кванта $h\nu$ и указанными энергетическими параметрами, включая температуру kT , в полупроводниковых материалах могут реализовываться следующие типы механизмов поглощения.

Полупроводниковый механизм ($h\nu > E_g \gg kT$).

Характерен для собственных (чистых) полупроводников, в зоне проводимости и в валентной зоне которых свободных носителей нет. Преодолевая запрещенную зону фотоны рождают электрон-дырочные пары, которые передают энергию решетке в виде тепла за счет двух процессов: а) передачи избыточной кинетической энергии $\Delta E = h\nu - E_g$ при релаксации электронов к дну зоны проводимости, а дырок — к потолку валентной зоны и б) безызлучательной рекомбинации на ловушках. Механизм эффективен, когда время безызлучательных переходов мало по сравнению с временами, характерными для излучательной рекомбинации. При этом росту концентрации свободных неравновесных носителей \tilde{n}_e препятствует не только безызлучательная рекомбинация на ловушках, вероятность которой W пропорциональна \tilde{n}_e , но и процессы междузонной излучательной рекомбинации $W \sim \tilde{n}_e^2$, ударной рекомбинации $W \sim \tilde{n}_e^3$ и амбиполярной диффузии электронов и дырок вглубь объема за счет градиента концентрации неравновесных носителей (рис.1).

В чистом виде этот механизм наблюдается при относительно невысоких уровнях плотности потока излучения или в начальный период действия лазерного импульса и в дальнейшем переходит в индуцированный металлический механизм поглощения.

Индукцированный металлический механизм поглощения ($h\nu > E_g$).

Характерен как для собственных, так и для легированных полупроводников. Поглощение происходит на неравновесных свободных носителях, генерируемых самим излучением. Приобретенная от фотонов кинетическая энергия электронов и дырок передается решетке в виде тепла за счет электрон-фононной релаксации, как в металлах.

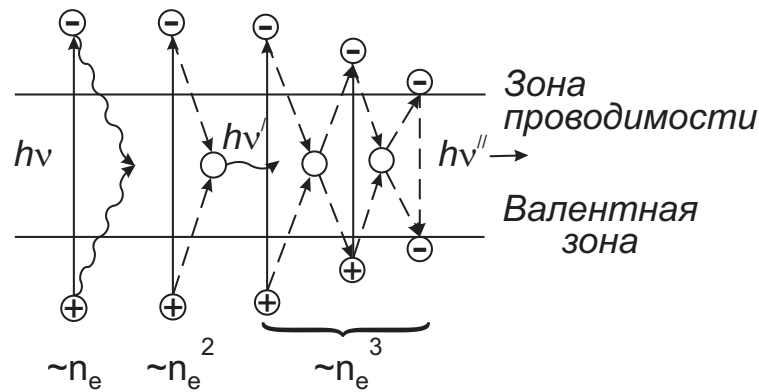


Рис. 1: Схема полупроводникового механизма поглощения.

Механизм становится эффективным, когда концентрация неравновесных свободных носителей (\tilde{n}_e, \tilde{n}_p), существенно превышающая концентрацию равновесных носителей (n_e, n_p), достигает величин $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$, сравнимых с концентрацией свободных электронов в металлах (рис.2).

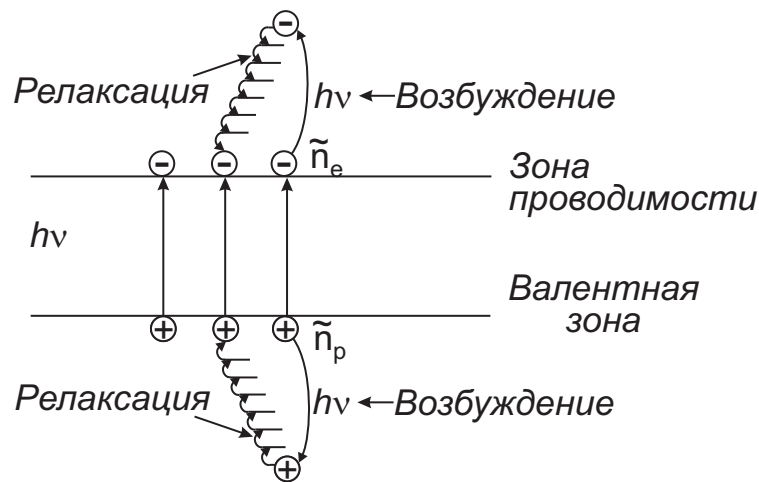


Рис. 2: Схема индуцированного металлического механизма поглощения.

Примесный механизм ($kT < E_i < h\nu < E_g$)

Характерен для легированных полупроводников, когда энергия кванта света меньше ширины запрещенной зоны, но превосходит глубину залегания донорных или акцепторных уровней. Этот механизм наблюдается при относительно низких начальных температурах решетки, когда концентрация равновесных носителей мала ($n_i \simeq N_i \exp(-E_i/kT)$) в сравнении с полной концентрацией N_i донорных или акцепторных центров ($i = e, d$). По мере возбуждения примесных уровней и разогрева решетки при-

месный механизм переходит в индуцированный металлический механизм поглощения (рис.3). Однако, в отличие от рассматриваемого выше случая, концентрация неравновесных носителей ограничена значением N_i .

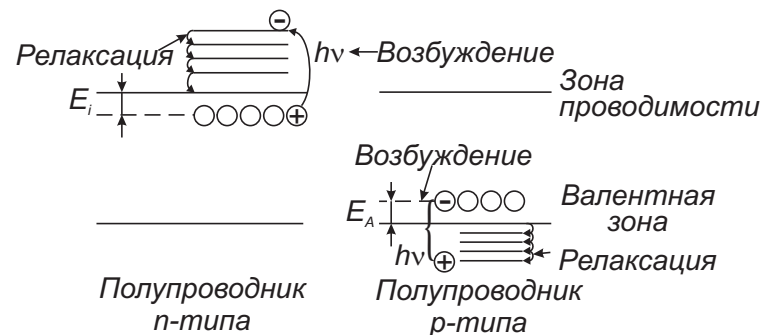


Рис. 3: Схема примесного механизма поглощения.

Металлический механизм ($h\nu < E_g, E_i \sim kT$)

Характерен для легированных полупроводников. В зоне проводимости или в валентной зоне имеется большая концентрация равновесных свободных носителей ($n_i \simeq N_i \exp(-E_i/kT)$), на которых, также, как в металлах, происходит поглощение света. Однако, в отличие от металлов, концентрация свободных электронов ограничена концентрацией донорных или акцепторных уровней N_i (рис.4).

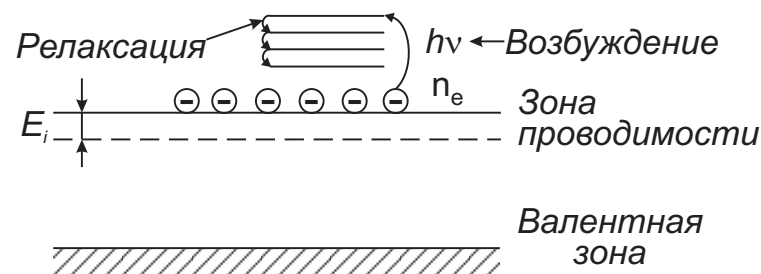


Рис. 4: Схема металлического механизма поглощения.

Диэлектрический механизм ($kT \ll h\nu \ll E_g$).

Энергии кванта недостаточно для преодоления запрещенной зоны и рождения электрон-дырочной пары. Поглощение света происходит при непосредственном взаимодействии излучения с решеткой (оптической ветвью фононного спектра). Этот механизм поглощения существует для длинноволнового излучения CO_2 -лазеров с $\lambda = 10,6$ мкм и наиболее интенсивен в области $\lambda \sim 50$ мкм. Конкуренцию составляют многофо-

тонные процессы генерации электрон-дырочных пар и поглощение на дефектах решетки. Вероятность многофотонных процессов достаточно мала и, как правило, их вклад в поглощение несущественен.

Рост концентрации свободных фотоэлектронов изменяет электрические и оптические свойства полупроводника, в частности, их коэффициент поглощения и отражательную способность. Так, в случае реализации индуцированного металлического механизма поглощения при $h\nu > E_g$ экспериментально показано, что при плотности потока $q > 10^6$ Вт/см² на стадии, предшествующей разрушению поверхности, за время $10^{-9} \div 10^{-8}$ с, концентрация свободных носителей повышается до $10^{20} \div 10^{21}$ см⁻³. В этом случае полупроводник по оптическим свойствам приближается к металлу. Например, для германия, облучаемого импульсом рубинового лазера при $q \sim 10^7$ Вт/см², величина коэффициента поглощения достигает значений $10^4 \div 10^5$ см⁻¹. Одновременно с этим возрастает и частота электрон-фононной релаксации, приближаясь к значениям, характерным для металлов. В отличие от металлов, начальный этап поглощения в полупроводниках характерен тем, что свободный электрон, поглотивший фотон, может передать решетке лишь энергию $\Delta E = h\nu - E_g$. Поэтому пока концентрация свободных электронов незначительна, т.е. пока мала доля поглощаемого светового потока, передача энергии решетке происходит значительно медленнее, чем в металлах.

Заметное повышение температуры начинается при некоторой концентрации неравновесных носителей \tilde{n}'_e . В этом случае начало эффективного нагрева решетки полупроводника определяется временем τ' достижения концентрации \tilde{n}'_e , а не временем электрон-фононной релаксации τ_{ep} , как в металлах. Оценки показывают, что для облучения германия неодимовым лазером при $q \sim 10^7$ Вт/см² $\tilde{n}'_e \simeq 5 \cdot 10^{20}$ см⁻³, $\tau' = 10^{-8} - 10^{-11}$ с при плотности потока фотонов $I = 10^{25}$ см² · с⁻¹.

Перенос энергии от поверхностных слоев полупроводника в объем так же, как и в металле, определяется процессами теплопроводности. При этом в начальной стадии процесса, когда концентрация свободных электронов в отличие от металла невелика, преобладает фононная теплопроводность. По мере роста концентрации \tilde{n}_e , все большая часть энергии переносится электронами проводимости, и они начинают воздействовать на суммарную теплопроводность, когда $\tilde{n}_e > \tilde{n}'_e$.

Перенос энергии в полупроводнике может также осуществляться за счет рекомбинационного излучения.

Аналог механизма металлического поглощения при $h\nu < E_g$ может проявляться также и в собственных полупроводниках. Как правило, на начальном этапе концентрация свободных носителей $n_e \sim \exp(-E_g/2kT)$ мала и поглощение незначительно. Однако при относительно высоких плотностях потока излучения возможен “разогрев” первоначально малого количества электронов в зоне проводимости, что может привести к термической ионизации валентной зоны и к развитию самоускоряющегося процесса разогрева вещества за счет роста концентрации свободных носителей.

Поглощение света диэлектриками сильно зависит от длины волны. В ИК– области поглощение определяется колебательными состояниями кристаллической решетки, а в органических соединениях – межмолекулярными колебаниями. Для этих материалов в ИК– области типичны значения коэффициента поглощения $10^2 \div 10^4 \text{ см}^{-1}$. В видимой области спектра поглощение может быть обусловлено примесями (например, ионами переходных металлов, дефектами кристаллической решетки и т.п.) или “хвостом” сильных УФ– полос поглощения. Оно может также вызываться дискретными электронными переходами в молекулярных кристаллах (например, во многих органических соединениях). Типичные коэффициенты поглощения в этой области $10^{-1} \div 10^3 \text{ см}^{-1}$.