



# Оптоэлектрические ИП:

- 1. Основы теории оптоэлектрического преобразователя;**
- 2. Структурные схемы оптоэлектрических ИП;**
- 3. Источники излучения;**
- 4. Приемники излучения.**

# Основы теории оптоэлектрического преобразователя

**Оптоэлектроника** — раздел электроники, занимающийся вопросами использования оптических и электрических методов обработки, хранения и передачи информации.

Его **предметная область** охватывает теоретическое исследование взаимодействия электромагнитных полей оптического диапазона (**частоты  $3 \times 10^{11}$  —  $3 \times 10^{17}$  Гц или длины волн 1 нм — 1 мм**) с электронами в твёрдых телах и других субстанциях.

Помимо этого оптоэлектроника включает в себя прикладные принципы создания оптоэлектронных приборов, которые функционируют на основе этого теоретического фундамента. Определяющей их особенностью является совместное использование электронных и оптических сигналов в качестве носителей информации, а также — **преобразование оптической и электрической энергии друг в друга**.

# Основы теории оптоэлектрического преобразователя

**Оптическая система** (*англ. optical system*) — совокупность оптических элементов (преломляющих, отражающих, дифракционных и т. п.), созданная для преобразования световых пучков (в геометрической оптике), радиоволн (в радиооптике), заряженных частиц (в электронной и ионной оптике).

**Оптическая схема** — графическое представление процесса изменения света в оптической системе.

**Оптический прибор** (*англ. optical instrument*) — конструктивным образом оформленная для выполнения конкретной задачи оптическая система, состоящая, по крайней мере, из одного из базовых оптических элементов. В состав оптического прибора могут входить источники света и приёмники излучения. В иной формулировке, Прибор называют оптическим, если хотя бы одна его основная функция выполняется оптической системой.

# Основы теории оптоэлектрического преобразователя

## Классификация устройств по назначению

- 1. Для преобразования света в электрический ток** — фотосопротивления (фоторезисторы), фотодиоды (рпн, лавинный), фототранзисторы, фототиристоры, пироэлектрические приёмники, приборы с зарядовой связью (ПЗС), фотоэлектронные умножители (ФЭУ).
- 2. Для преобразования тока в световое излучение** — различного рода лампы накаливания, электролюминесцентные индикаторы, полупроводниковые светодиоды и лазеры (газовые, твердотельные, полупроводниковые).
- 3. Для изоляции электрических цепей (последовательного преобразования «ток-свет-ток»)** служат отдельные устройства оптоэлектроники — оптопары — резисторные, диодные, транзисторные, тиристорные, оптопары на одно-переходных фототранзисторах и оптопары с открытым оптическим каналом.
- 4. Для применения в различных электронных устройствах** служат оптоэлектронные интегральные схемы — интегральные микросхемы, в которых осуществляется оптическая связь между отдельными узлами или компонентами с целью изоляции их друг от друга (гальванической развязки).

# Структурные схемы оптоэлектрических ИП

**Обобщенная структурная схема оптоэлектрического преобразователя (Рис. 1)** содержит источник излучения, оптический канал, приемник излучения и измерительную цепь. Измеряемая величина  $X$  воздействует непосредственно на источник излучения, изменяя параметры излучаемого потока  $\Phi_1$ , или на оптический канал, модулируя соответствующий параметр потока в процессе распространения излучения. Чаще всего под действием измеряемой величины изменяется интенсивность лучистого потока, например, вследствие изменения температуры излучателя, пропускания, поглощения или рассеяния оптического канала, однако могут изменяться также фазовый сдвиг между электромагнитными колебаниями в двух лучах, вызываемый разностью оптического хода этих лучей, и частота и длина волны излучения, генерируемого источником. Соответственно структурные схемы оптоэлектрических преобразователей могут быть разделены на три группы: схемы измерения интенсивности излучения, схемы измерения сдвига фаз и угла поворота плоскости колебаний и схемы измерения частоты и длины волны электромагнитных колебаний оптического диапазона. Непосредственное измерение частоты колебаний и угла сдвига между колебаниями оптического диапазона затруднено из-за отсутствия фотоприемников электронных схем, быстродействие которых соответствует частотам **1014–1017 Гц**. Схемы измерения частоты и фазы колебаний строятся в подавляющем большинстве случаев предварительным преобразованием в интенсивность излучения или гетеродинным преобразованием частоты.



**Рис. 1** – обобщенная структурная схема оптоэлектрического преобразователя семейства характеристик МРП.

# Структурные схемы оптоэлектрических ИП

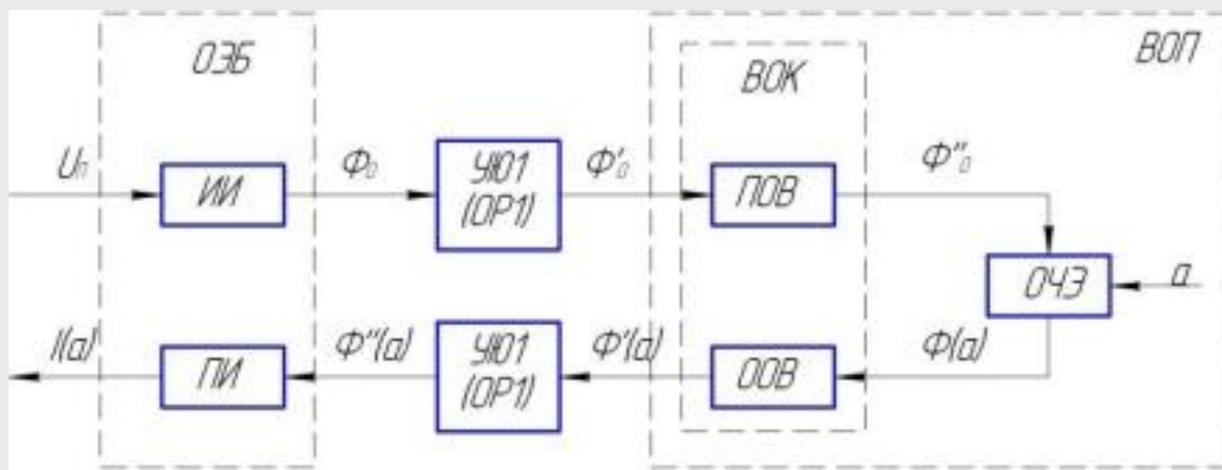
На стадии проектирования необходимо проводить тщательный метрологический анализ будущего волоконно-оптического преобразователя перемещения (**ВОПП**) с управляющим элементов в виде шарообразной линзы, принять соответствующие решения по снижению возможных погрешностей.

**Структурная схема ВОПП** представлена на **Рис. 2**.

**ВОПП** состоит из оптического чувствительного элемента (**ОЧЭ**), выполненного в виде шарообразной линзы, и волоконно-оптического кабеля (**ВОК**).

**ВОК** представляет собой жгут подводящего оптического волокна (**ПОВ**) и отводящего оптического волокна (**ООВ**).

Оптоэлектронный блок (**ОЭБ**) состоит из источника излучения (**ИИ**) и приемника излучения (**ПИ**), выполняющие функцию преобразования оптического излучения в электрический ток (**напряжение**) и обратно.



**Рис. 2** – структурная схема волоконно-оптического преобразователя перемещения.

# Структурные схемы оптоэлектрических ИП

Для эффективной передачи светового потока от **ИИ** к **ПОВ** и от **ООВ** к **ПИ** вводятся узлы юстировки (**УЮ**). Если в узлах юстировки отсутствуют подвижные элементы для юстировки, то они выполняют роль стыковочных элементов. В этом случае их целесообразно назвать оптическими разъемами (**ОР**).

В соответствии со структурной схемой вибродатчика (см. **Рис. 2**) изменения энергетических соотношений и структуры пучка света осуществляются в оптических разъемах **ОР1**, **ОР2** и **ОЧЭ**.

Процесс управления световым потоком в данных узлах заключается в выборе оптимальных конструктивно-энергетических соотношений на этапе проектирования и конструирования, **например**: определяются количество и взаимное расположение оптических волокон (**ОВ**) в приемном торце **ВОК**, выбираются типы, геометрические параметры и соотношения взаимного расположения **ИИ**, **ОВ** и оптических элементов и т.д.

И к первому, и ко второму оптическому разъему **ОР1**, **ОР2** предъявляется одно **основное требование**: передача максимально возможной мощности излучения, определяемой коэффициентами передачи трактов "**ИИ – ПОВ**" **КИС** и "**ООВ – ПИ**" **КСП**.

Во втором случае данная задача решается достаточно просто, так как площадь сечения **ООВ**, как правило, значительно меньше площади светочувствительных площадок фотодиодов типа **КФДМ**, **ФД256**, **ФД19КК** и т.п., используемых в качестве **ПИ** в современных оптических датчиках. Практически вся мощность с выхода **ООВ** попадает на **ПИ**, т.е. **КСП**  $\approx 1$ . Несколько сложнее обстоит дело с вводом излучения от **ИИ** в **ПОВ**.

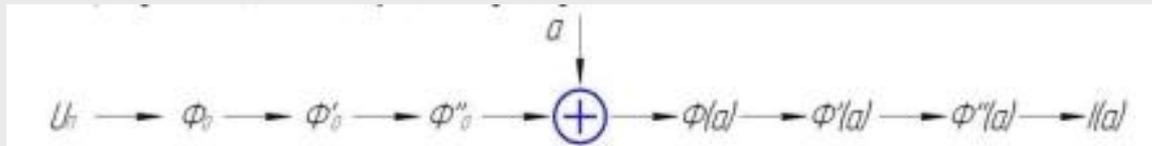
# Структурные схемы оптоэлектрических ИП

Принцип действия данного **ВОПП** заключается в следующем. Электрический сигнал **УП**, поступающий на вход **ОЭБ**, преобразуется с помощью электрооптического преобразователя **ИИ** в оптический сигнал  **$\Phi_0$** , который поступает на вход **ПОВ** через оптический разъем **ОР1** и подается в зону измерения, т.е. на **ОЧЭ** (см. **Рис. 2**).

Измерение параметров вибрации основано на регистрации изменения интенсивности светового потока, фокусирующегося на **ООВ** шарообразной линзой.

Линза одновременно является модулятором оптического сигнала, фокусирующим элементом и инерционной массой, перемещающейся в соответствии с законом изменения измеряемой величины (ускорения) относительно **ПОВ** и **ООВ**. Таким образом, для модуляции интенсивности оптического сигнала используется зависимость величины угла преломления падающего на линзу луча от изменения кривизны поверхности линзы при ее перемещении. Световой поток  **$\Phi(a)$** , промодулированный в функции контролируемого параметра “**a**”, поступает в **ООВ**. По **ООВ** световой поток направляется на **ПИ** через оптический разъем **ОР2**, где преобразуется в эквивалентный фототок  **$I(a)$** . Таким образом, на выходе **ПИ** получается ток, по амплитуде которого можно судить о вибрации в зоне измерения.

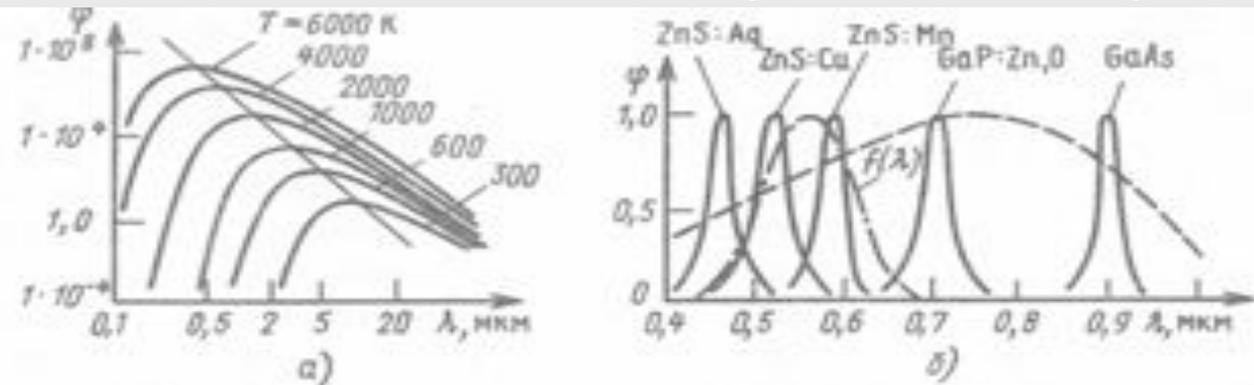
Т.е. происходят **следующие преобразования**:



Требуемая (**номинальная**) **функция преобразования ВОПП** в общем виде имеет следующий вид:  $J_H = F(a)$ .

# Источники излучения

**Источники излучения** могут быть двух основных типов, имеющих различные свойства. **Тепловое излучение** создается нагретыми телами и его интенсивность и спектральное распределение определяются известной **формулой Планка**. Из этой формулы следует, что общая энергия, излучаемая телом за **1 с**, на всех длинах волн  $\lambda$ , растет пропорционально  **$T^4$**  ( $T$  — абсолютная температура), а максимум кривых излучательной способности тел  $\varphi(\lambda)$  при повышении  $T$  сдвигается в сторону меньших длин волн (**Рис. 3 а**), причем длина волны, соответствующая этому максимуму,  **$\lambda_{max} = b_2 T^{-1}$** , где  **$b_2 = 2898 \text{ мкм}\cdot\text{К}$**  для абсолютно черного тела. На интервале от **0**  $\lambda_{max}$  до **3  $\lambda_{max}$**  приходится **90%** всего излучения. При  **$T = 2898 \text{ К}$**   **$\lambda_{max} = 1 \text{ мкм}$**  и основная часть излучения находится в инфракрасной области. Энергия квантов, соответствующих данной  $\lambda$ , может быть получена из формулы  **$h\nu = 1,24/\lambda$**  ( $\lambda$  выражена в микрометрах,  $h\nu$  — в электрон-вольтах). Значения коэффициента  **$b_2$**  для вольфрама и других металлов несколько ниже ( **$b_2 = 2660 \text{ мкм}\cdot\text{К}$** ).



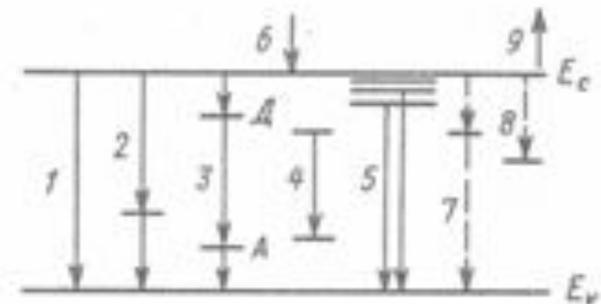
**Рис. 3** – спектр излучения абсолютно черного тела (**а**) и спектры люминесценции нескольких полупроводников (**б**).

# Источники излучения

**Лампы накаливания** могут быть сделаны достаточно миниатюрными, но они обладают сравнительно низким **к.п.д** и большой инерционностью; **конструкция ламп** включает вакуумный баллон, что плохо согласуется с технологией полупроводниковых схем. В современной оптоэлектронике используют в основном люминесценцию твердых тел (**холодное свечение**). При люминесценции энергия, необходимая для излучения, может подводиться к телу любым нетепловым способом (**облучением фотонами или электронами, действием электрического поля и т. д.**).

Соответственно различают фотолюминесценцию, катодолюминесценцию, электролюминесценцию и другие виды люминесценции. Обычно люминесценция наблюдается при комнатной и более низкой температуре, при которой тепловое излучение очень мало и все видимое излучение является люминесценцией. В общем случае при данной температуре излучение может складываться из теплового и люминесцентного, поэтому, **люминесценцией** называется излучение, избыточное над тепловым при данной температуре и продолжающееся после прекращения возбуждения некоторое время, превышающее период **световой волны** ( $t_c \approx 1 \cdot 10^{-14} - 10^{-8} \text{ с}$ ). Обычно эта задержка реакции люминесцирующего вещества (люминофора) на выключение возбуждения значительно больше  $t_c$  и является характерной для люминесценции, отражая процессы преобразования энергии в люминофоре.

**Рис. 4** – электронные переходы, сопровождающиеся **1-5** и несопровождающиеся **6-9** излучением света.

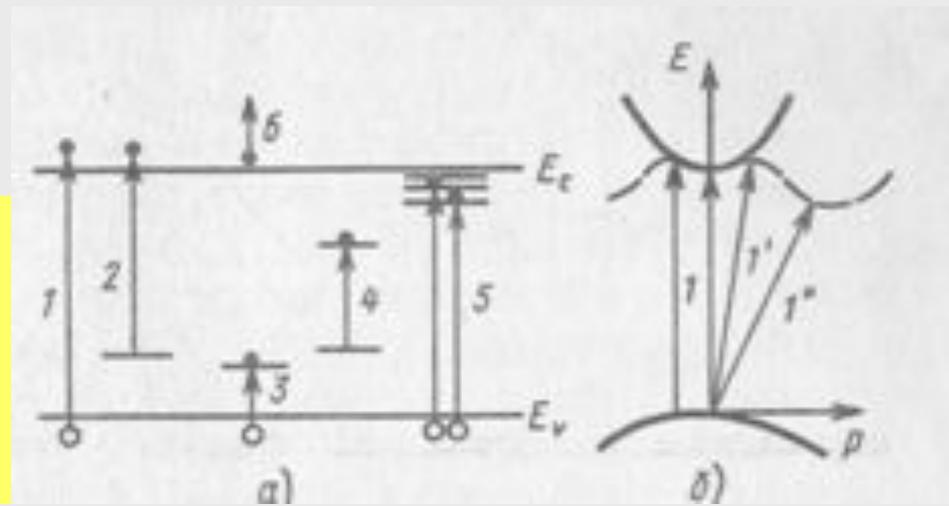


# Приемники излучения

При прохождении света через вещество его интенсивность уменьшается. Часть энергии излучения поглощается и идет на увеличение энергии электронов или теплового движения атомов.

На **Рис. 5**, а показаны возможные переходы электронов в кристаллах под действием света ( $E_c$ —энергия, соответствующая нижнему краю зоны проводимости,  $E_v$  — верхнему краю валентной зоны). **Переход 1** приводит к появлению электрона в зоне проводимости и дырки в валентной зоне, он возможен при энергии фотонов  $h\nu \geq \Delta E = E_c - E_v$ , т. е. большей ширины запрещенной зоны  $\Delta E$ . При меньшей энергии фотонов могут происходить переходы электронов с локальных уровней примесей или дефектов решетки кристаллов в зону проводимости (**переход 2**) или из валентной зоны на эти уровни (**переход 3**). При этом в разрешенных зонах энергии появляется только по одному носителю заряда. **Переходы 1, 2, 3** изменяют электропроводность твердых тел, на этом явлении внутреннего фотоэффекта основана работа большинства фотоприемников. При внутризонных **переходах 4** электрон не освобождается и процесс поглощения света не приводит к изменению электропроводности кристалла. Это относится к экситонному поглощению (**переход 5**) и поглощению свободными носителями заряда (**переход 6**).

**Рис. 5** – основные электронные переходы при поглощении света в кристаллах (а), прямые и не прямые межзонные переходы (б).



# Приемники излучения

При поглощении электроном фотона должны выполняться законы сохранения энергии и импульса, поэтому более полно процесс поглощения света описывается с помощью диаграммы, учитывающей изменение энергии  $E$  и импульса  $p$ . На **Рис. 5 б** изображена зависимость от  $p$  энергии электрона в зоне проводимости (**вверху**) и дырки в валентной зоне (**внизу**). Сплошная линия соответствует полупроводнику, у которого минимумы энергии электрона и энергии дырки (**она увеличивается вниз на рисунке**) приходятся на одно и то же значение импульса (**так называемые прямые зоны**). В наиболее простом случае кинетическая энергия электрона связана с импульсом соотношением  $E=p^2/(2m)$ . Стрелки **1** изображают «прямые» переходы электрона, происходящие без изменения импульса. Импульс фотона, равный  $h\nu/c$  ( $\nu$  - частота,  $c$  — скорость света), очень мал, и соответствующим приращением импульса электрона, поглотившего фотон, можно пренебречь. **Переход 1** является «**непрямым**» и происходит с изменением импульса электрона. При этом в процессе поглощения фотона участвует третья частица — **фонон** (квант колебательной энергии кристалла). В случае материалов с прямыми зонами преобладают прямые межзонные переходы, не требующие участия третьей частицы. К веществам, **обладающим прямыми зонами**, относятся такие используемые в оптоэлектронике материалы, как **GaAs** (ширина запрещенной зоны  $\Delta E=1,4\text{эВ}$ ), **CdSe** ( $1,8\text{эВ}$ ), **CdS** ( $2,5\text{эВ}$ ), **ZnS** ( $3,7\text{эВ}$ ) и др. Может осуществляться случай, когда экстремумы энергий электронов и дырок на диаграмме  $E(p)$  приходятся на различные  $p$  (штриховая линия на **Рис. 5 б**). Теперь переходы при наименьшей энергии фотонов возможны только не прямые. При более высоких энергиях фотонов сохраняется возможность прямых переходов (**1**). К материалам с **непрямыми зонами** относятся, например, **Ge** ( $\Delta E=0,7\text{эВ}$ ), **Si** ( $1,1\text{эВ}$ ), **AlAs** ( $2,2\text{эВ}$ ), **GaP** ( $2,3\text{эВ}$ ) и **SiC** различных политипов ( $2,4—3,1\text{эВ}$ ).

# Приемники излучения

Если под действием света осуществляются переходы с участием примесных уровней (*переходы 2, 3* на *Рис. 5 а*), то третьей частицей, обеспечивающей выполнение закона сохранения импульса, может быть примесный центр.

**Поток излучения** экспоненциально уменьшается по мере углубления в образец. Величину  $\alpha$  называют **коэффициентом поглощения**, она выражается в сантиметрах в минус первой степени. При  $x = x^* = 1/\alpha$  имеем  $\Phi(x) = \Phi_0/e$  (где  $e = 2,72$ ), т. е. коэффициент  $\alpha$  является величиной, обратной расстоянию  $x^*$ , на котором поток уменьшается в  $e$  раз. Величину  $x^*$  обычно называют длиной поглощения света. Если при собственном поглощении  $\alpha = 10^5 \text{ см}^{-1}$ , то  $x^* = 0,1 \text{ мкм}$ . В случае примесного поглощения света  $\alpha$  гораздо меньше, так как концентрация примесных электронов или акцепторных уровней сравнительно мала (обычно порядка  $10^{16} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$  против  $5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$  валентных электронов основного вещества).

При концентрации примеси около  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  коэффициент примесного поглощения  $\alpha \approx 10 \text{ см}^{-1}$ . В кристаллах с большой долей ионной связи возможно возбуждение колебаний решетки световыми волнами.

Поглощение такого типа становится особенно сильным в области резонанса ( $\sim 10^{13} \text{ Гц}$ ).

# Приемники излучения

**Поглощение света свободными носителями заряда пропорционально их концентрации**

Различные типы поглощения проявляются при различных энергиях квантов  $h\nu$ . Обобщенная зависимость  $\alpha$  от  $h\nu$  выглядит примерно так, как показано на *Рис. 6*. **Собственное поглощение** начинается при частоте  $\nu_0$ , соответствующей  $h\nu_0 = \Delta E$ .

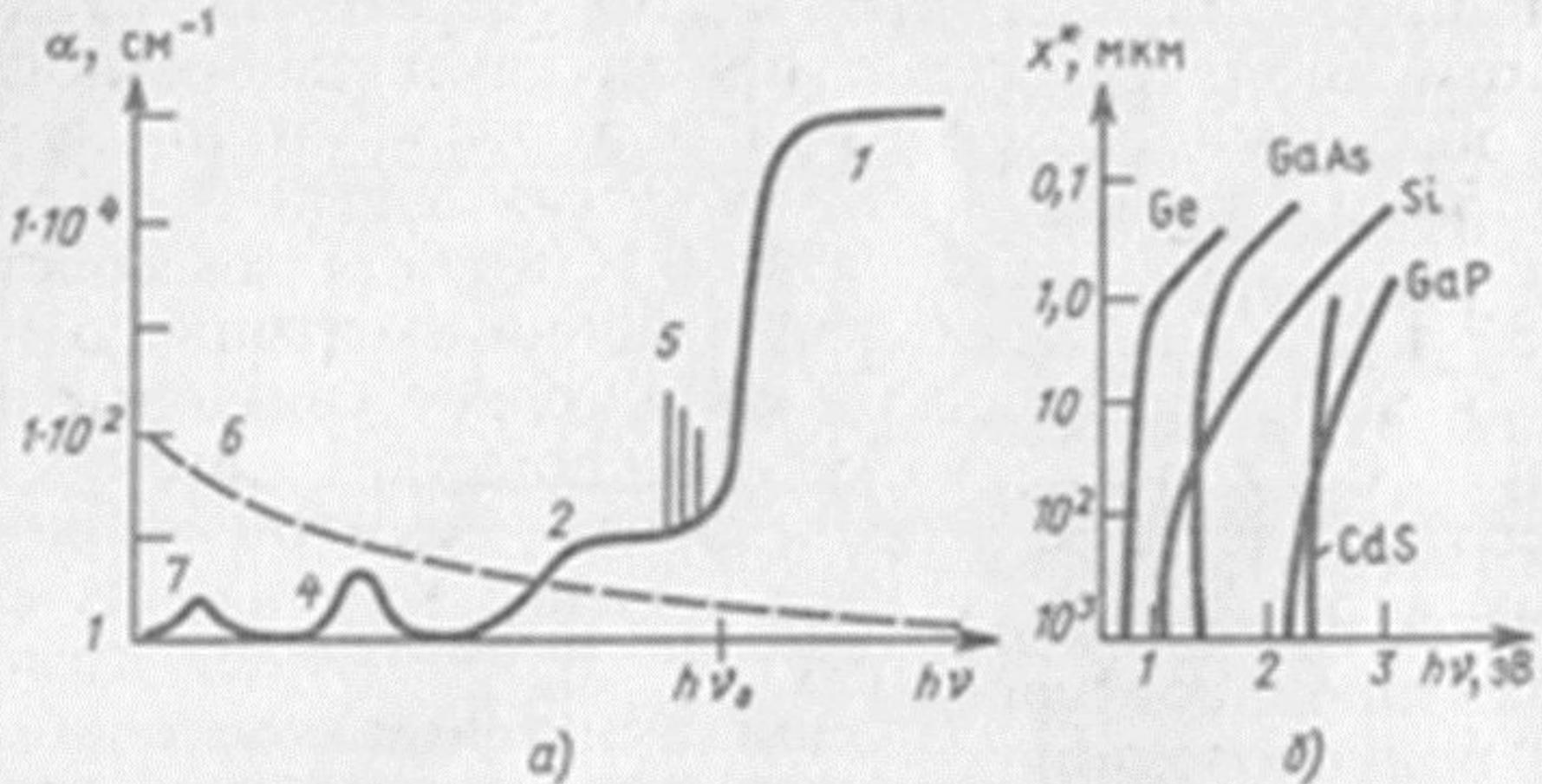
**Примесное поглощение** создает полосы **2** и **4** (нумерация полос та же, что и для переходов на *Рис. 5*). В широком интервале частот присутствует слабое поглощение света свободными электронами или дырками (**6**), в инфракрасной области проявляется пик **7**, связанный с поглощением излучения ионами решетки ( $h\nu \approx 0,1 \text{ эВ}$ ). У края собственного поглощения располагаются узкие линии экситонного поглощения (**5**). **Экситон** представляет собой слабо связанные электрон и дырку, образующие водородоподобную систему, которая имеет серию энергетических уровней. Экситон является нейтральным образованием и его появление не приводит к изменению электрических характеристик образца. Если температура достаточно высока, чтобы под действием тепловой энергии электрон перешел в зону проводимости, то при экситонном поглощении получится тот же результат, что и при собственном поглощении света.

В фотоприемниках обычно используют *собственное поглощение*.

*Примесное поглощение* используют только в некоторых случаях—для расширения спектральной характеристики в длинноволновую область.

Примеры зависимости  $x^*$  от энергии фотонов  $h\nu$  в области собственного поглощения кристаллов приведены на *Рис. 6 б (следующий слайд)*.

# Приемники излучения



**Рис. 6** – схематический спектр поглощения света твердым телом (а), и спектры собственного поглощения нескольких веществ (б).

**Спасибо за внимание!**