

## ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПАРЫ

Оптоэлектронная пара, или оптопара – это полупроводниковый прибор, состоящий из светоизлучающего и фотоприемного элемента, между которыми существует связь через оптический канал. Светоизлучатель, фотоприемник и оптический канал, реализующий гальваническую развязку между входом и выходом, конструктивно объединены в одном корпусе.

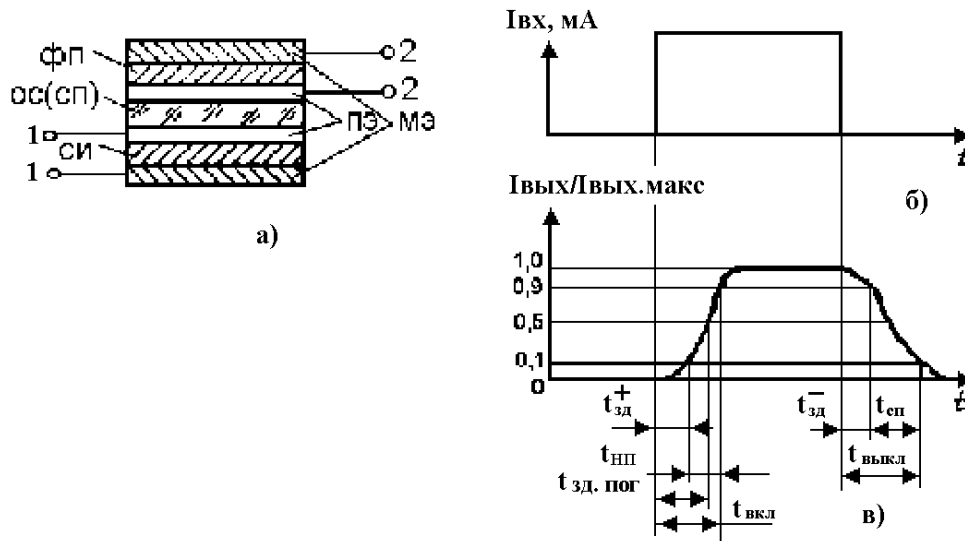


Рис.1

Оптопара используется как элемент электрической развязки в цифровых и импульсных устройствах, устройствах передачи аналоговых сигналов, системах автоматики для бесконтактного управления высоковольтными источниками питания и др. Она является составным элементом оптических микросхем. В устройстве оптопары (Рис.1.а) СИ - светоизлучатель, ФП - фотоприемник, ОС (СП) - оптическая среда, МЭ - металлические электроды, ПЭ - прозрачные электроды. В качестве светоизлучателя в оптопарах применяются светодиоды, лазеры и другие излучатели, а в качестве фотоприемника - фотодиоды, фототранзисторы, фоторезисторы и фототиристоры. По типу используемого фотоприемника различают диодные, транзисторные, тиристорные и резисторные оптопары.

Принцип действия оптопары показан на Рис.1. На вход оптопары поступает электрический сигнал, например, импульс тока  $I_{вх}$  (Рис.1.б), преобразуемый светоизлучателем в импульс светового потока. Световой импульс излучается на рабочей длине волны в направлении фотоприемника, проходит через

оптическую среду с малым затуханием и в фотоприемнике преобразуется в электрический сигнал. Форма выходного импульса тока показана на (Рис. 1.в). Преобразование электрический сигнал - световой сигнал осуществляется с помощью модуляции оптической несущей в светоизлучателе. Гальваническая развязка входной 11 и выходной 22 цепей оптопары достигается за счет оптически прозрачной диэлектрической среды между приемником и излучателем, причем все компоненты оптопары должны быть оптически согласованы. Это достигается соответствующим выбором материалов. На Рис.2 приведены примеры подобранных пар полупроводниковых материалов для фотоприемника и светоизлучателя в диапазоне волн 0.2 - 20 мкм. В качестве светоизлучателей оптопар преимущественно используются светодиоды.

Использование лазеров в оптопарах экономически оправдано только в быстродействующих системах. Учитывая, что спектр излучения светодиодов оптопар относительно узкий, чувствительность фотоприемника должна быть максимальной на рабочей длине волны светоизлучателя.

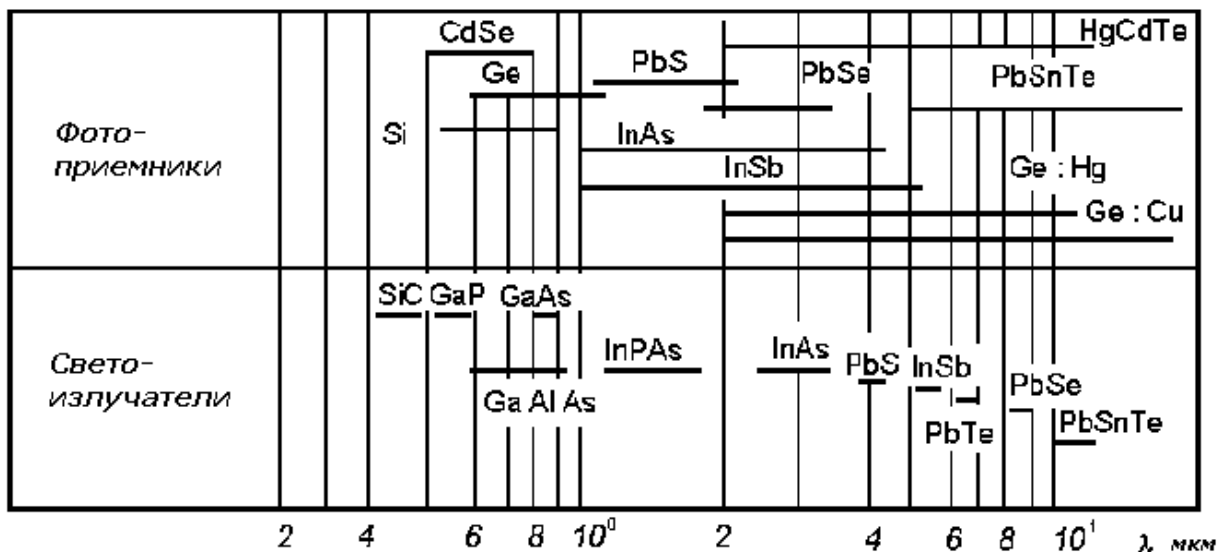


Рис.2

### Основные параметры оптопар.

Основные параметры оптопар можно разбить на четыре группы.

#### Входные параметры

Входные параметры характеризуют режим работы светоизлучателя. Если в качестве светоизлучателя используется светодиод, то его электрические параметры составляют основу входных параметров оптопары:

- **Входное напряжение оптопары  $U_{вх}$**  при заданном постоянном входном токе.

- **Номинальный входной ток  $I_{вх.ном}$  и максимальный входной ток  $I_{вх.макс}$**  через светоизлучатель.
- **Максимальное обратное входное напряжение  $U_{вх.обр}$**
- **Входная емкость  $C_{вх.}$**

#### **Выходные параметры.**

Выходные параметры характеризуются режимами работы и характеристиками фотоприемников, таких как фоторезистор, фототранзистор и т.д.

- **Максимально допустимый выходной ток  $I_{вых.макс}$**  через фотоприемник во включенном состоянии оптопары
- **Максимально допустимое обратное выходное напряжение  $U_{вых.обр.макс.}$**
- **Выходная емкость  $C_{вых.}$**

#### **Параметры передачи сигналов.**

Параметры передачи в целом характеризуют частотные, импульсные свойства оптопар.

- **Коэффициент передачи оптопары  $K_i$ .** Данный коэффициент имеет различный физический смысл для различных типов оптопар:

Различают **статический  $K_i = (I_{вых} - I_y) / I_{вх}$**  и **дифференциальный  $K_{ид} = dI_{вых} / dI_{вх}$**  коэффициенты передачи по току **диодных** и **транзисторных** оптопар. Если выходной транзистор фотоприемника работает в режиме насыщения, то статический коэффициент передачи определяется для тока  $I_{вых}$ , соответствующим напряжением насыщения  $U_{ост}$ . Коэффициент передачи **резисторных** оптопар - это отношение темнового и светового выходных сопротивлений, т.е.  **$K_i = R_{тм} / R_{св.}$**  Для **фототиристора** коэффициент передачи не имеет физического смысла т.к. после включения, фототиристор остается в этом состоянии при любом входном напряжении. Поэтому параметром данного элемента является ток включения – это минимальный входной ток оптопары  $I_{вх}$ , переводящий фототиристор во включенное состояние, а также максимально допустимый входной ток помехи  $I_{пом.вх}$ , при котором фототиристор еще не включается. Параметр  $I_{пом.вх}$  характеризует помехоустойчивость тиристорной оптопары от ложного включения.

- **Максимальная скорость передачи сигналов  $F_{макс}$**  – это число сигналов, которое можно передать через оптопару в единицу времени без потери или ложного появления хотя бы одного из них. Характеризует быстродействие оптопары, работающей в устройствах передачи цифровых сигналов.

- **Время нарастания  $t_{нр}$  и спада  $t_{сп}$**  – время нарастания отсчитывается от уровня 0,1  $I_{вых.макс}$  до уровня 0,9  $I_{вых.макс}$ . (Рис.1.в)

- **Время задержки фронта импульса  $t_{зд}$**  – это время задержки при включении отсчитывается от момента поступления входного сигнала до момента нарастания выходного до уровня 0,1  $I_{вых.макс}$ .

- **Время логической задержки  $t_{зд.лог}$**  – это время задержки от момента подачи сигнала на вход оптопары до момента нарастания выходного сигнала до уровня 0,5  $I_{вых.макс}$ .

- **Быстродействие оптопар** в импульсных и цифровых схемах оценивается суммарным временем переключения

$t_{пер} = t_{вкл} + t_{выкл}$ , где  $t_{вкл} = t_{зд}^+ + t_{нр}$ , а  $t_{выкл} = t_{зд}^- + t_{сп}$ .

- **Коэффициент передачи по току:**

$$K_I = k_\lambda k_{пр} \eta_{св} \eta_{ф} M, \quad (1)$$

Где:  $k_\lambda$  - коэффициент спектрального согласования,  $k_{пр}$  – коэффициент прозрачности оптической среды,  $\eta_{св}$  – внешний квантовый выход светоизлучателя,  $M$  – коэффициент усиления фотоприемника.

**Коэффициент спектрального согласования светоизлучателя  $k_\lambda$** , фотоприемника и оптической среды, зависит от различия спектральных характеристик светоизлучателя и фотоприемника в рабочем диапазоне волн; спектральной характеристики пропускания оптической среды. На Рис.3 показаны спектральные характеристики пропускания стекла и полимера, которые используются в качестве оптических сред оптопар. По оси ординат отложена нормированная спектральная характеристика пропускания оптической среды. В ближней инфракрасной области длин волн в полимере наблюдается резонансное поглощение излучения химическими группами OH, CH<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub>, NH<sub>2</sub>, NH и др. На спектральной характеристике пропускания резонансному поглощению соответствуют узкие провалы. В диапазоне рабочих волн коэффициент пропускания оптической среды должен быть близок к единице.

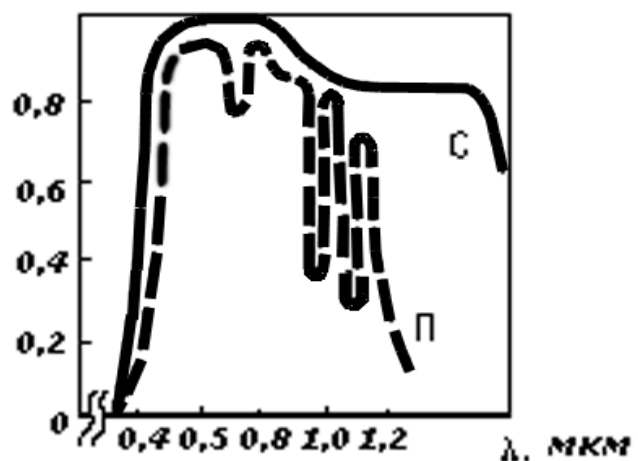


Рис.3

**Коэффициент прозрачности оптической среды  $k_{пр}$**  Для увеличения коэффициента подбирают материал светоизлучателя, фотоприемника и оптической среды по коэффициенту преломления, технологически устраняют инородные включения на границах раздела светоизлучатель - оптическая среда - фотоприемник, используют однородные среды, просветляющие покрытия и световоды в канале связи светоизлучатель - фотоприемник, улучшают конструкцию оптопары.

**Внешний квантовый выход светоизлучателя<sup>1</sup>  $\eta_{св}$ .** Для повышения внешнего квантового выхода светодиода следует, во-первых, уменьшать потери излучения квантов в зоне генерации, добиваться полного внутреннего отражения на границе раздела полупроводник - оптическая среда и уменьшать потери торцевого и обратного излучения (потери на торцевое и обратное излучение светодиода снижены в конструкции оптопары на рис. 4) светодиода; во-вторых, увеличивать коэффициент инжекции электрического перехода светодиода и в-третьих, сокращать доли безызлучательной и конкурирующей рекомбинации<sup>2</sup> в переходе светодиода, т.е. повышать внутренний квантовый выход.

Также для увеличения квантового выхода необходимо выбирать оптимальные материалы светодиодов, использовать в их структуре гетеропереходы<sup>3</sup>, уменьшать коэффициент отражения на границе оптическая среда - полупроводник, а также снижать потери пассивного поглощения в полупроводнике,

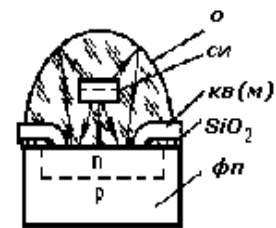


Рис.4

<sup>1</sup> **Квантовый выход светоизлучателя** - имеет обратный смысл, чем для фотоприемников, т.е. это отношение образованных фотонов к общему числу электронов, поступивших на вход.

<sup>2</sup> **Меры по сокращению безызлучательной и конкурирующей рекомбинации:** в мезоструктуре p-n перехода светодиода на арсениде галлия, производят легирование кремнием, GaAs (Si). При этом резко снижена безызлучательная рекомбинация, получен предельно высокий коэффициент инжекции. Из-за различий спектральных характеристик излучения и поглощения этого материала потери самопоглощения малы.

<sup>3</sup> **Гетеропереходы** формируются при контакте двух полупроводников с различными ширинами запрещенной зоны. Это позволяет с минимальными потерями ввести в полупроводниковый прибор или вывести из него оптическое излучение.

не приводящие к образованию неравновесных носителей, и рекомбинационным потерям.

**Коэффициент усиления  $M$  фотоприемника (фототранзистора).** С увеличением коэффициента усиления фотоприемника  $M$  в большинстве случаев быстродействие оптопар снижается. Использование рациональных структур фотоприемника, например, фотодиод - транзистор, позволяет получить приемлемый коэффициент усиления без существенного снижения быстродействия оптопары.

#### Параметры гальванической развязки:

- **Максимально допустимое пиковое напряжение** между входом и выходом оптопары  $U_{РАЗВ.П.МАКС}$ .
- **Максимально допустимое напряжение** между входом и выходом  $U_{РАЗВ.МАКС}$ .
- **Прходная емкость  $C_{РАЗВ}$ .** Это емкость между входом и выходом оптопары, характеризующий частотные свойства. Этот параметр нужно стараться уменьшать для этого используют конструкцию оптопары, приведенную на (Рис. 6).
- **Сопротивление гальванической развязки  $R_{РАЗВ}$ .** —это сопротивление между входом и выходом оптопары.
- **Максимально допустимое пиковое напряжение** характеризует электрическую прочность оптопары и обычно  $U_{РАЗВ.П.МАКС} > 1\text{кВ}$ .

#### 4. Эквивалентная схема

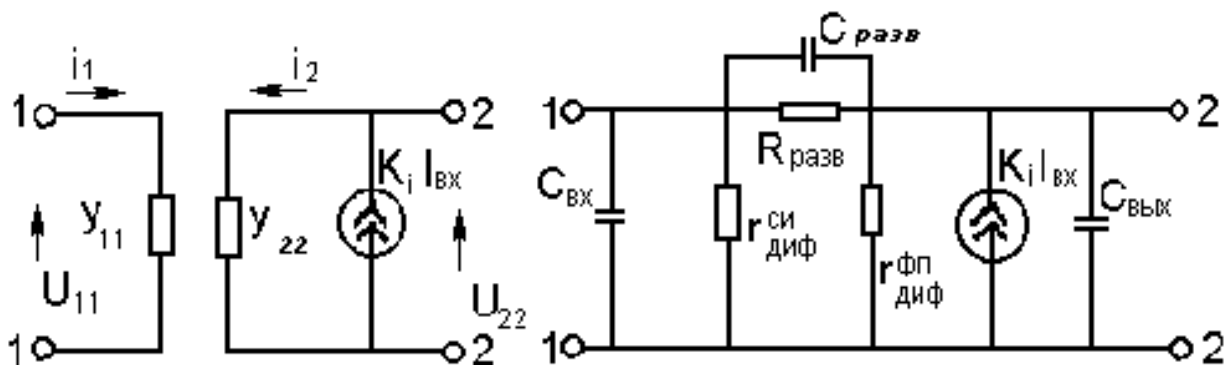


Рис.5

В режиме передачи аналоговых сигналов оптопару можно представить в виде линейного четырехполюсника с  $Y$  - параметрами. Сигнал в оптопаре передается только от светоизлучателя к фотоприемнику, поэтому четырехполюсник должен быть направленным. Его схема содержит лишь идеальные генера-

торы, а проводимость цепи обратной связи четырехполюсника  $y_{12}=0$ . На Рис.5 показана эквивалентная схема оптопары с идеальной гальванической развязкой. Входной электрический сигнал реальной оптопары через параметры развязки  $R_{разв}$  и  $C_{разв}$  поступает на выход четырехполюсника. С учетом параметров развязки эквивалентная схема преобразуется: конденсатор  $C_{вх}$  и резистор  $r_{диф}^{си}$  моделируют входную емкость и дифференциальное сопротивление светоизлучателя, конденсатор  $C_{вых}$  и резистор  $r_{диф}^{фп}$  – моделирует выходную емкость и выходное дифференциальное сопротивление фотоприемника, конденсатор  $C_{разв}$  и резистор  $R_{разв}$  - учитывают емкость и сопротивление развязки оптопары, источник тока  $KiI_{вх}$  – показывает преобразование входного сигнала оптопарой.

### 5. Конструкции оптоэлектронных пар.

Конструкции оптопар различны: составные на дискретных элементах, пленочные, монолитные. Рассмотрим примеры конструкций оптопар на дискретных элементах. В бескорпусной оптопаре (Рис.6) СИ - светоизлучатель; ФП - фотоприемник; ОС - оптическая среда; 1 - выводы светоизлучателя; 2 - выводы фотоприемника. Кристаллы светоизлучателя и фотоприемника размещены в оптической иммерсионной среде строго параллельно. В качестве оптической среды используются в основном органические полимерные оптические клеи. Распространенные в оптопарах светодиоды<sup>4</sup> имеют кольцевую излучающую область с расположенным в центре и вынесенным из активной области излучения омическим контактом. В такой конструкции при минимальной площади свечения светодиода уменьшаются потери энергии излучения из-за затенения и

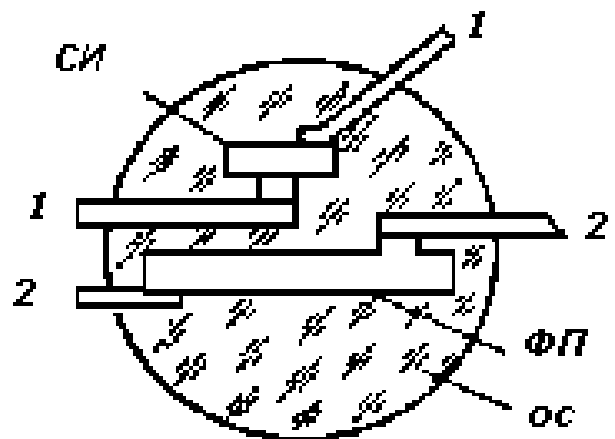


Рис.6

<sup>4</sup> Светодиоды на арсениде галлия GaAs(Si) имеют КПД 6 - 8 % и внешний квантовый выход  $\eta_{св}=0,07...0,09$ . Используются также светодиоды с коэффициентом инжекции гетероперехода ( $\eta_{св}=0,03...0,04$ ) на соединении GaAlAs, а на высоких частотах входных сигналов светодиоды с двойной гетероструктурой GaAlAs ( $\eta_{св}=0,02...0,03$ ).

краевых эффектов, снижаются требования к точности взаимного расположения светодиода и фотоприемника.

Для повышения коэффициента передачи оптопары чувствительная площадь фотоприемника многократно превышает излучательную площадь светодиода. Структуру фотоприемников оптопар изготавливают в основном из кремния. Наибольшее распространение получили фотодиоды с р-і-п структурой, биполярные фототранзисторы, фототиристоры, структуры фотодиод - транзистор и др.

Конструкция оптопары в металлостеклянном корпусе приведена на Рис.7. Для уменьшения емкости развязки до  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  пФ в оптическую среду встраивают заземленную металлическую сетку ЗС или стекло с проводящим покрытием из материалов  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ . Сопротивление развязки оптопары достигают значения  $10^{14}$ - $10^{16}$  Ом.

Потери на торцевое и обратное излучение светодиода снижены в конструкции оптопары на Рис.4, где **О** - отражатель; **КВ(М)** - металлический коль-

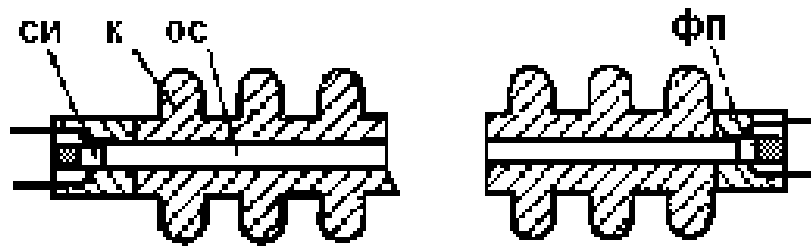


Рис.8

цевой вывод р- области фотоприемника, изолированный от п- области диэлек-

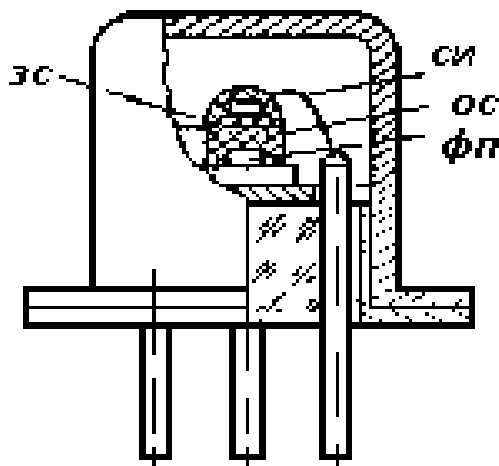


Рис.7

трическим слоем  $\text{SiO}_2$ . Отражатель направляет лучи светодиода, показанные на рисунке линиями со стрелками, на чувствительную площадь фотодиода и увеличивает примерно вдвое коэффициент передачи оптопары. Конструктивное исполнение оптопары с гальванической развязкой до нескольких десятков киловольт показано на Рис 8. Развязку обеспечивает жесткий стеклянный световод **ОС**, помещенный в корпус оптопары **К**.

Пример пленочной конструкции оптопары приведен на Рис. 1.а. На стеклянную подложку **СП** с двух сторон наносится слой  $\text{SnO}_2$ , образующий про-

зрачные электроды **ПЭ**. На одном из прозрачных электродов методом вакуумного испарения формируется пленочный слой люминофора - сернистого цинка  $ZnS$ , активированного примесями меди  $Cu$  и марганца  $Mn$ , а затем - металлический электрод **МЭ**. На другой прозрачный электрод наносится фоторезистивный слой сульфида кадмия с центрами чувствительности из атомов меди  $CdS:Cu$ , а на него напыляется металлический электрод **МЭ** гребенчатой структуры. Тонкопленочный люминофор - светоизлучатель **СИ** оптопары может работать при малом напряжении постоянного тока. Свечение обусловлено возбуждением атомов марганца в люминофоре «горячими» (высокоэнергетичными) электронами, образующимися в гетеропроходе  $p-Cu_2S - n-ZnS(Mn)$  в поверхностном слое пленки. Световой поток распространяется в направлении фотоприемника оптопар **ФП** фоторезистора через стеклянную подложку и прозрачные электроды, образующие оптическую среду.

**К достоинствам оптоэлектронных пар** относятся почти идеальная гальваническая развязка, невосприимчивость оптического канала связи к воздействию электромагнитных помех, совместимость по параметрам входных и выходных сигналов с интегральными схемами, широкие функциональные возможности.

**Недостатки оптоэлектронных пар** - низкий КПД преобразования энергии сигналов, высокая потребляемая мощность, температурная зависимость параметров, относительно малый рабочий диапазон температур, невысокий срок службы, конструктивное несовершенство и др. носят временный характер.