

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

**А.Н. Агафонов**

## **Приемники излучения видимого, инфракрасного и терагерцового диапазонов**

Электронное учебное пособие

Работа выполнена по мероприятию блока 2 «Развитие и повышение эффективности научно-инновационной деятельности» и блока 3 «Развитие информационной научно-образовательной среды и инфраструктуры» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка мультиспектральных систем мониторинга инфракрасного и терагерцового диапазонов»  
Соглашение № 2/20 от 3.06.2013 г.

САМАРА  
2013

УДК 621.38(075)  
ББК 32.85я7  
А 235

Автор: **Агафонов Андрей Николаевич**

Редакторская обработка А. Н. Агафонов  
Компьютерная верстка А. Н. Агафонов  
Доверстка А. Н. Агафонов

**Агафонов А. Н.** Приемники излучения видимого, инфракрасного и терагерцового диапазонов [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / А. Н. Агафонов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. и граф. дан. ( 1,63 Мбайт). - Самара, 2013. -1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Рассмотрены конструкция, назначение и принципы действия приемников излучения видимого, инфракрасного и терагерцового диапазонов.

Электронное учебное пособие предназначено для подготовки бакалавров направления 210100.62 «Электроника и наноэлектроника» радиотехнического факультета, изучающих дисциплину «Основы проектирования интегральной оптики и фотоники» в 7 семестре.

Разработано на кафедре наноинженерии.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2013

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| 1. Классификация приемников оптического излучения .....                           | 4  |
| 2. Поглощение света в твердых телах.....  | 5  |
| 3. Основные характеристики и параметры фотоприемников.....                        | 8  |
| 4. Фотоэлектрические приемники излучения .....                                    | 12 |
| 4.1. Фоторезисторы .....  | 12 |
| 4.2. Фотодиоды.....   | 17 |
| 4.2.1. Фотоэффект на p-n переходе. Общие сведения о работе фотодиода.<br>.....    | 17 |
| 4.2.2. P-i-n фотодиоды .....  | 20 |
| 4.2.3. Фотодиоды с барьером Шоттки .....  | 22 |
| 4.2.4. Гетерофотодиоды.....   | 24 |
| 4.2.5. МДП-фотодиоды.....   | 25 |
| 4.2.6. Лавинные фотодиоды.....  | 25 |
| 4.3. Фототранзисторы .....  | 30 |
| 4.3.1. Общие сведения о фототранзисторах .....                                    | 30 |
| 4.3.2. МДП-фототранзисторы .....  | 32 |
| 4.3.3. Гетерофототранзисторы.....   | 33 |
| 5. Тепловые приемники излучения .....   | 35 |
| 5.1. Боллометры.....  | 35 |
| 5.2. Пирометры.....   | 41 |
| 6. Особенности приемников терагерцового излучения .....                           | 43 |
| 6.1. Проблема детектирования в терагерцовом диапазоне.....                        | 43 |
| 6.2. Детекторы прямого обнаружения .....  | 43 |
| 6.3. Детекторы с гетеродинным обнаружением.....                                   | 46 |
| Список источников .....   | 48 |
| Приложение А. Классификация приемников оптического излучения.....                 | 49 |
| Приложение Б. Спектральный диапазон различных типов приемников<br>излучения. .... | 50 |

## 1. Классификация приемников оптического излучения

Фотоприемник - приемник оптического излучения - прибор, в котором под действием оптического излучения происходят изменения, позволяющие обнаружить и измерить характеристики излучения.

В зависимости от физических явлений, положенных в основу принципа действия, и особенностей конструктивного исполнения все приемники оптического излучения делятся на три группы: фотоэлектрические, фотоэлектронные и тепловые.

Фотоэлектрические приемники излучения основаны на использовании внутреннего фотоэффекта и полупроводниковой технологии изготовления (по конструктивному исполнению они относятся к полупроводниковым приборам).

В фотоэлектронных приборах электронный поток (луч) движется под действием электрического поля в вакуумном или газонаполненном приборе. Преобладающим физическим принципом действия фотоэлектронных приборов является фотоэмиссия электронов из фотокатода (внешний фотоэффект). В отдельных видах фотоэлектронных приборов используются также внутренний фотоэффект (видиконы) и тепловой эффект (пировидиконы).

Работа тепловых приемников излучения основана на тепловом эффекте – изменении сопротивления чувствительного элемента при изменении его температуры под действием поглощенного им излучения. По конструктивному исполнению они также относятся к полупроводниковым приборам.

Пример классификации приёмников оптического излучения приведен в приложении А.

В данном пособии рассматриваются наиболее распространенные в настоящее время типы фотоприёмников – фотоэлектрические и тепловые.

## 2. Поглощение света в твердых телах

При прохождении света через вещество его интенсивность понижается. Взаимодействие света с веществом может происходить без изменения энергии фотонов и с изменением. Процессы взаимодействия без изменения энергии фотонов включают в себя отражение, преломление, рассеяние, пропускание света, вращение плоскости поляризации и др. Процессы взаимодействия с изменением энергии фотонов включают в себя различные виды поглощения. Часть энергии излучения поглощается в веществе, следовательно, увеличивается энергия электронов в нем. В общем случае необходимо учитывать 7 механизмов поглощения оптического излучения (рис. 1а): 1 - фотогенерация электронно-дырочных пар (собственное поглощение), 2,3 - примесное поглощение, 4 - внутрицентровое поглощение, 5 - экситонное поглощение, 6 - электронное поглощение, вызывающее увеличение энергии электронов без увеличения их концентрации, 7 - фононное поглощение, т.е. поглощение кристаллической решеткой. Для всех видов поглощения должны выполняться законы сохранения энергии и импульса. В зависимости от строения зон полупроводника электронные переходы подразделяются на прямые и непрямые (рис. 1б.), поглощение фотонов сопровождается только лишь прямыми переходами электронов.

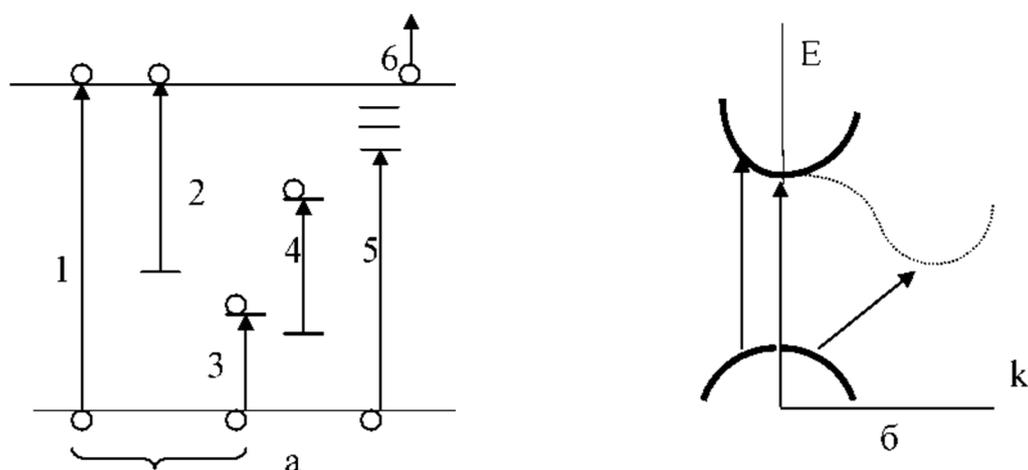


Рисунок 1. Основные электронные переходы при поглощении света в полупроводнике (а), прямые и непрямые межзонные переходы (б).

Ширина запрещенной зоны  $E_g$  полупроводника определяет минимальные значения энергии поглощаемых фотонов: GaAs - 1,4 эВ, CdSe - 1,8 эВ, CdS - 2,5 эВ, ZnS - 3,7 эВ, Ge - 0,7 эВ, Si - 1,1 эВ, GaP - 2,3 эВ, SiC - 2,4-3,1 эВ. Для собственного поглощения должно выполняться условие  $h\nu > E_g$ , т.е. энергия фотона должна быть не меньше ширины запрещенной зоны. Необходимо учитывать, что для полупроводников в сильном электрическом поле проявляется эффект Франца-Келдыша, приводящий к уменьшению ширины запрещенной зоны  $E_g(E)$ . Для примесного поглощения энергия фотонов должна быть не меньше глубины залегания примесного уровня в запрещенной зоне. Количественное описание процессов поглощения света проводится с использованием закона Бугера-Ламберта. Если величина светового потока, падающего на полупроводник  $\Phi_0$ , то на глубине  $x$  его величина составляет -  $\Phi(x)$ . Изменение величины светового потока на расстоянии  $dx$  составляет  $d\Phi/dx = -a\Phi(x)$ , где  $a$  коэффициент поглощения света. Тогда  $d\Phi/\Phi = -a dx$ , т.е. световой поток спадает по экспоненте вглубь полупроводника  $\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-a x)$ . При собственном поглощении величина коэффициента поглощения значительна  $a = 10^5 \text{ см}^{-1}$ , а длина поглощения очень мала  $x^* = 0,1 \text{ мкм}$ . Для примесного поглощения значения этих параметров зависят от концентрации примеси, для  $N = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;  $a = 10 \text{ см}^{-1}$ ;  $x^* = 0.1 \text{ см}$ . Для 1,2,3 (рис. 1а) механизмов поглощение сопровождается изменением количества свободных носителей, т.е. изменением проводимости и тока. В фотоприемниках обычно используется собственное поглощение. Примесное поглощение используется редко, например, для расширения спектральной характеристики в длинноволновой области. Экситонное (5) и внутрицентровое (4) поглощение, а также поглощение свободными носителями (6), поглощение кристаллической решеткой (7) в фотоприемниках практически не используется.

Внутренний фотоэффект в полупроводниках характеризуется квантовым выходом  $\eta_1$  т.е. числом неравновесных носителей (пар), создаваемых каждым поглощенным фотоном. Чувствительность

фотоприемника зависит от скорости генерации  $G$ , которая зависит от величины квантового выхода  $\eta_1$ . Получим выражение для скорости генерации носителей. Пусть на единичную площадку приемника по направлению  $x$  перпендикулярно поверхности падает поток излучения, имеющий плотность  $\Phi_1(x)$ . Изменение плотности потока с расстоянием -  $d\Phi_1/dx = -\alpha*\Phi_1(x)$ . Тогда выражение для энергии, поглощенной в единичном объеме на толщине  $dx$  -  $d\Phi_1 = -\alpha*\Phi_1(x)*dx$ . Число фотонов  $Q_1$ , поглощенных за 1 секунду в единичном объеме на глубине  $x$ ,  $Q_1 = \alpha*\Phi_1/h\nu$ . Число неравновесных носителей, возникающих за 1с в единичном объеме,  $G(x)=\eta_1*Q_1=\eta_1*\alpha*\Phi_1(x)/h\nu$ . В области собственного поглощения  $\eta_1 = 1$ , тогда  $Q_1 \sim 1/\nu$ . Если величина светового потока постоянна, скорость генерации носителей  $G$  падает с ростом частоты излучения, фототок  $\sim G \sim 1/\nu$ . В одних типах приемников (например, фотодиоды)  $I_0$  определяется величиной произведения  $G(x)*V$  ( $V$  - объем материала). В других типах (лавинный фотодиод, фоторезистор, фототранзистор) -  $I_0 = e*G(x)*Z(E)$ , где  $Z(E)$  - коэффициент усиления, зависящий от электрического поля ( $Z - 10^2 - 10^6$ ).

Чувствительность фотоприемника определяется тем, насколько сильно изменяются его электрические характеристики при облучении светом, т.е. зависит от квантового выхода и коэффициента усиления.

### 3. Основные характеристики и параметры фотоприемников

**Спектральная характеристика** чувствительности отображает реакцию приемника на воздействие излучения с разной длиной волны, она определяет спектральную область применения прибора.

**Энергетическая (световая) характеристика** отображает зависимость фотоответа прибора от интенсивности возбуждающего потока излучения (ампер-ваттная, вольт-ваттная, люкс-амперная). Энергетической характеристикой называют также зависимость интегральной или спектральной чувствительности приемника от интенсивности облучения.

**Пороговые характеристики** - показывают способность фотоприемника регистрировать излучение малой интенсивности. В основном они определяются уровнем собственных шумов прибора - флуктуаций тока в отсутствие облучения или при немодулированном световом потоке.

**Вольт-амперная характеристика** отображает зависимость тока фотоприемника от приложенного напряжения.

**Частотные характеристики** описывают зависимость чувствительности от частоты модуляции излучения или длительности импульсов и характеризуют инерционность прибора.

**Температурные характеристики** определяют зависимость параметров прибора от температуры окружающей среды. Рабочий температурный интервал указывают в паспорте прибора, при этом указывают значения основных параметров в крайних точках интервала.

К основным параметрам фотоприемников относят *рабочее и максимально допустимое напряжение, мощность рассеивания, тепловое сопротивление*.

**Чувствительность фотоприемников** описывается токовой или вольтовой чувствительностью. Токовая чувствительность (А/лм или А/Вт) определяет значение фототока, создаваемого единичным потоком излучения:  
$$S_1 = I_{\Phi}/\Phi.$$

**Вольтовая чувствительность** характеризует значение фотонапряжения, отнесенное к единице потока излучения (В/лм или В/Вт):  
 $S_V = U_\Phi / \Phi$ .

В общем случае зависимости  $I_\Phi(\Phi)$  и  $U_\Phi(\Phi)$  являются нелинейными, то есть чувствительность может зависеть от величины потока излучения.

**Коротковолновая (длинноволновая) граница** спектральной чувствительности определяется наименьшей (наибольшей) длиной волны монохроматического излучения, при которой монохроматическая чувствительность прибора равна 0,1 от ее максимального значения.

**Динамический диапазон линейности** (в децибелах) характеризует область значений светового потока  $\Phi$  (от  $\Phi_{\min}$  до  $\Phi_{\max}$ ), в которой энергетическая (световая) характеристика является линейной:  
 $\Delta = 10 \lg \Phi_{\max} / \Phi_{\min}$

**Инерционность** фотоприемника характеризуют постоянные времени нарастания  $\tau_n$  и  $\tau_{сп}$  спада фотоотклика для импульса излучения. Рост и спад фототока обычно описывается экспоненциальными зависимостями:

$$J_\Phi = J_{\max} (1 - \exp(-t/\tau_n)), J_\Phi = J_{\max} \exp(-t/\tau_{сп}). \quad (1)$$

Постоянные времени определяют предельные значения рабочей частоты модуляции светового потока, при котором еще не заметно уменьшение фотоотклика. Обычно  $\tau_n < \tau_{сп}$ , но имеют одинаковый порядок. При синусоидальной модуляции светового потока быстродействие приборов характеризуют *граничной частотой*, на которой фотоотклик уменьшается до уровня 0,7 стационарного значения.

Токи в фотоприемнике при отсутствии и наличии освещения испытывают случайные отклонения  $\Delta J$  от среднего значения. Отклонения имеют различные знаки, поэтому среднее значение отклонения их среднего значения  $\Delta J_{cp} = 0$ . Мера случайного отклонения (флуктуации) - среднее значение квадрата отклонения  $\Delta J_{cp}$ . Фототок, соответствующий световому сигналу, наблюдается на фоне этих отклонений (шумов), определяющих

наименьший световой сигнал, который может быть зафиксирован. Шумы могут иметь различное происхождение. Тепловой шум (Джонсона-Найквиста) обусловлен хаотичностью теплового движения электронов, концентрация их в различных участках полупроводников изменяется со временем. Отклонения тока  $\Delta J_{cp}^2 = \Delta f kT/R$ , где  $\Delta f$  - полоса наблюдаемых частот колебаний (разложение Фурье),  $R$  - сопротивление образца,  $T$  - температура. Дробовый шум обусловлен отклонением от среднего значения числа электронов, проходящих через прибор при постоянном внешнем напряжении.  $\Delta J_{cp}^2 = 2eJ \Delta f$ . Причинами его возникновения могут служить случайные процессы генерации, рекомбинации и диффузии и др. Существуют и другие виды шумов: фотонный, фоновый, технологический и т.д. Пороговая чувствительность - уровень светового потока  $\Phi_{п}$ , при котором сигнал равен шуму, то есть  $\Delta J_{ф}^2 = \Delta J_{cp}^2$ . Так как  $(\Delta J_{cp}^2)^{1/2}$  и  $\Phi_{п}$  могут зависеть от площади  $S$  приемника и полосы частот пропускания  $\Delta f$ , то при оценке способности фотоприемники регистрировать слабые световые потоки в качестве параметра используется приведенный пороговый поток  $\Phi_{п}^* = \Phi_{п}/(S\Delta f)^{1/2}$  или обнаружительная способность  $D^* = 1/\Phi_{п}^*$ . Значение  $D^*$  относят обычно к  $\lambda_{max}$ , соответствующей максимальной спектральной чувствительности приемника, к определенной частоте модуляции (прерывания) светового потока и полосе  $\Delta f$ , (обычно 1 Гц), включающей  $f$ , размерность - м\*Гц/Вт.

Оптическая информация в оптоэлектронных устройствах практически сводится к двум видам: дискретные сигналы (во времени, пространстве и в спектральной области) и световые образы.

К приемникам дискретных сигналов предъявляют следующие требования.

1. Высокая чувствительность на заданной длине волны, задаваемой источником (лазером, излучающим диодом и др.), т.е. высокий КПД.
2. Высокое быстродействие, которое может быть обеспечено

выбором физических принципов работы, уменьшением значений емкости и сопротивления.

К фотоприемникам световых образов предъявляются следующие требования.

1. Многоэлементность - пространственная разрешающая способность возрастает при увеличении числа ячеек.
2. Совместимость фоточувствительного раstra с электронной схемой считывания (сканирования) и воспроизведения информации, в оптимальном случае обе части устройства конструктивно и технологически объединены.
3. Широкий спектр (например, видимый диапазон).
4. Режим фотонного накопления - смена воспроизводимых образов достаточно инерционна ( $\sim 1/25$  с), но каждая ячейка должна быть быстродействующей.
5. Широкий рабочий динамический диапазон, т.е. приемник должен воспринимать как яркие, так и бледные области.
6. Минимальный уровень шумов.

## 4. Фотоэлектрические приемники излучения

### 4.1. Фоторезисторы

В неосвещенном полупроводнике, когда электроны и дырки образуются только за счет термического возбуждения, удельная проводимость равна:

$$\sigma_0 = e(n_0\mu_n + p_0\mu_p) \quad (2)$$

где  $n_0$  и  $p_0$  — равновесная концентрация электронов и дырок. Проводимость  $\sigma_0$  называется темновой. Процесс образования свободных носителей под действием света называется их оптической генерацией. В результате генерации проводимость становится равной:

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p), \quad (3)$$

где  $n = n_0 + \Delta n$ ,  $p = p_0 + \Delta p$ . Здесь  $\Delta n$  и  $\Delta p$  — соответствующие концентрации избыточных (неравновесных) электронов и дырок, появившихся в результате освещения полупроводника. Удельную фотопроводимость определяют как разность между проводимостью при освещении и в темноте:

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0 = e(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p) \quad (4)$$

Из сказанного ясно, что полная электропроводность складывается из темновой и фотопроводимости:

$$\sigma = \sigma_T + \sigma_\Phi \quad (5)$$

Кроме генерации свободных носителей идет обратный процесс — их рекомбинация. В начале освещения, пока избыточных носителей мало, рекомбинация мала, но по мере увеличения  $n$  и  $p$  она увеличивается. Через некоторое время после начала освещения устанавливается стационарная фотопроводимость  $\Delta\sigma_{ст}$ , которой отвечают стационарные значения  $\Delta n_{ст}$  и  $\Delta p_{ст}$ . Таким образом, каждый избыточный носитель находится в свободном состоянии некоторое время до рекомбинации (время жизни). Для различных носителей, например дырок, в одном и том же полупроводнике время жизни

различно, поэтому вводится понятие среднего времени жизни  $\tau$ . Далее ограничимся рассмотрением собственной фотопроводимости. Изменение концентрации неравновесных электронов  $\Delta n$  во времени за счет процессов генерации и рекомбинации описывается уравнением:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = G - \frac{\Delta n}{\tau} \quad (6)$$

Здесь  $G$  - скорость (темп) генерации электронно-дырочных пар в единичном объеме полупроводника под действием света;  $\Delta n/\tau$  - убыль избыточных пар в единичном объеме за 1с за счет рекомбинации. Для стационарной фотопроводимости, когда  $d(\Delta n)/dt=0$ , из (6) получаем стационарную концентрацию электронов  $\Delta n_{СТ}=G\tau$  (в собственном полупроводнике такая же концентрация дырок  $\Delta p_{СТ}=\Delta n_{СТ}$ ). Тогда фотопроводимость:

$$\Delta\sigma_{СТ}=e\Delta n_{СТ}(\mu_n+\mu_p) = G\tau e(\mu_n+\mu_p) \quad (7)$$

Таким образом, при неизменном темпе генерации удельная фотопроводимость больше в тех полупроводниках, у которых свободные носители имеют большую подвижность и большее время жизни. В зависимости от структуры материала, степени его чистоты и температуры среднее время жизни может меняться в пределах  $\tau \sim 10^{-1} - 10^{-3}$  с.

Темп генерации определяется процессами взаимодействия света с веществом.

Пусть на пластику полупроводника падает монохроматическое излучение с плотностью потока фотонов  $N_0$ , [с<sup>-1</sup>м<sup>-2</sup>].

Вследствие поглощения поток фотонов становится слабее с увеличением глубины  $x$  пластины (закон Бугера):

$$N(x) = N_0 \exp(-\alpha x) \quad (8)$$

где  $\alpha$  - коэффициент поглощения света (зависит от материала и длины волны). В соответствии с формулой (8) плотность фотонов на задней грани

пластины толщиной  $\Delta x$  равняется  $N_0 \exp(-\alpha x)$ . Достигшие задней грани пластины фотоны избежали поглощения. Значит, в образце поглотилось:

$$\Delta N = N_0 - N_0 \exp(-\alpha \Delta x) = N_0(1 - \exp(-\alpha \Delta x)). \quad (9)$$

Если  $\alpha \Delta x \ll 1$ , т.е. если коэффициент поглощения мал или пластина тонкая, то

$$\Delta N = N_0 \alpha \Delta x \quad (10)$$

Число электронно-дырочных пар  $\Delta N_{\text{ПАР}}$ , образуемых поглощенными фотонами:

$$\Delta N_{\text{ПАР}} = \beta \Delta N = \beta N_0 \alpha \Delta x. \quad (11)$$

Коэффициент пропорциональности  $\beta$  называется квантовым выходом внутреннего фотоэффекта. Он показывает, какая доля поглощенных фотонов образовала пару носителей тока. Обычно  $\beta < 1$ , так как есть конкурирующие процессы поглощения света без образования электронов и дырок. Разделив  $\Delta N_{\text{ПАР}}$  на толщину пластины, получим темп генерации пар в единичном объеме:

$$G = \Delta N_{\text{ПАР}} / \Delta x = \beta N_0 \alpha. \quad (12)$$

Подставляя выражение (12) для  $G$  в формулу (7), получим:

$$\Delta \sigma_{\text{СТ}} = e \beta \alpha \tau (\mu_n + \mu_p) N_0 \quad (13)$$

При частоте излучения  $\nu$ , плотность потока фотонов  $N_0$  можно выразить через энергетическую освещенность  $P$  [Вт/м<sup>2</sup>]:

$$N_0 = P / (h\nu) \quad (14)$$

Тогда (13) можно записать в виде:

$$\Delta \sigma_{\text{СТ}} = e \beta \alpha \tau (\mu_n + \mu_p) P / (h\nu) \quad (15)$$

Фототок  $J_{\Phi}$ , протекающий через пластику при напряжении  $U$  между ее гранями, пропорционален произведению  $\Delta \sigma_{\text{СТ}}$  на  $U$ :

$$J_{\Phi} \sim \Delta \sigma_{\text{СТ}} U \sim e \beta \alpha \tau (\mu_n + \mu_p) P / (h\nu). \quad (16)$$

Формула (16) приближенная, так как при ее выводе рассматривалась

упрощенная картина процессов в полупроводниках. Фактическая зависимость фототока от освещенности  $P$  может отличаться от линейной. Итак, если свет падает достаточно долго, то в полупроводнике возникает стационарная фотопроводимость, определяемая формулой (15). Рассмотрим кратко переходные процессы при включении и выключении света. Соответствующие зависимости можно получить, решая (6). Если в момент  $t=0$  включается свет, то концентрация избыточных носителей и пропорциональная ей фотопроводимость увеличиваются во времени по закону:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_{ст} \exp(-t/\tau) \quad (17)$$

Динамика фотопроводимости при включении и выключении света показана на рис. 2.

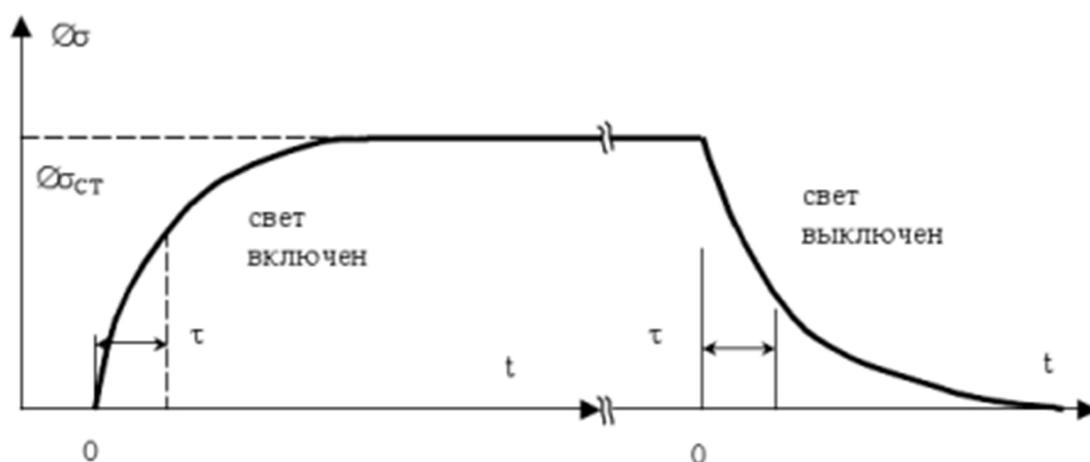


Рисунок 2. Нестационарная фотопроводимость

Основными материалами, используемыми для изготовления фоторезисторов, являются полупроводниковые соединения: CdS, CdSe, PbS, получаемые по толсто пленочной и тонко пленочной технологии, а также - Si, Ge, GaAs, используемые в полупроводниковой технологии. Фоторезисторы на основе соединения CdSe характеризуются следующими значениями параметров:  $R_T \sim 10^6$  Ом,  $A_{max} \sim 0,7$  мкм,  $U_{раб} \sim 20$ В,  $S \sim 600$  мА/лм. Для фоторезисторов на основе PbS -  $R_T/R_{св} \sim 10^5-10^6$ ,  $\tau \sim 0,1$ мс.

Для фоторезисторов на основе GaAs инерционность приборов значительно ниже  $\tau \sim 10^{-12}$  с - для мощного лазерного излучения,  $\tau \sim 10^{-9}$  с для

обычной засветки.

Достоинствами фоторезисторов являются линейность вольтамперной характеристики, отсутствие выпрямления и внутренней ЭДС, основным недостатком невысокое быстродействие.

## 4.2. Фотодиоды

### 4.2.1. Фотоэффект на p-n переходе. Общие сведения о работе фотодиода.

Рассмотрим контакт p-полупроводника и n-полупроводника (p-n-переход). В области контакта происходит изгиб энергетических зон, приводящий к их взаимному смещению. Это показано на рис.3, где штриховой прямой изображен уровень энергии Ферми (в состоянии термодинамического равновесия положение уровня Ферми в p-области совпадает с его положением в n-области), 1 — дно зоны проводимости, 2 — вершина валентной зоны.

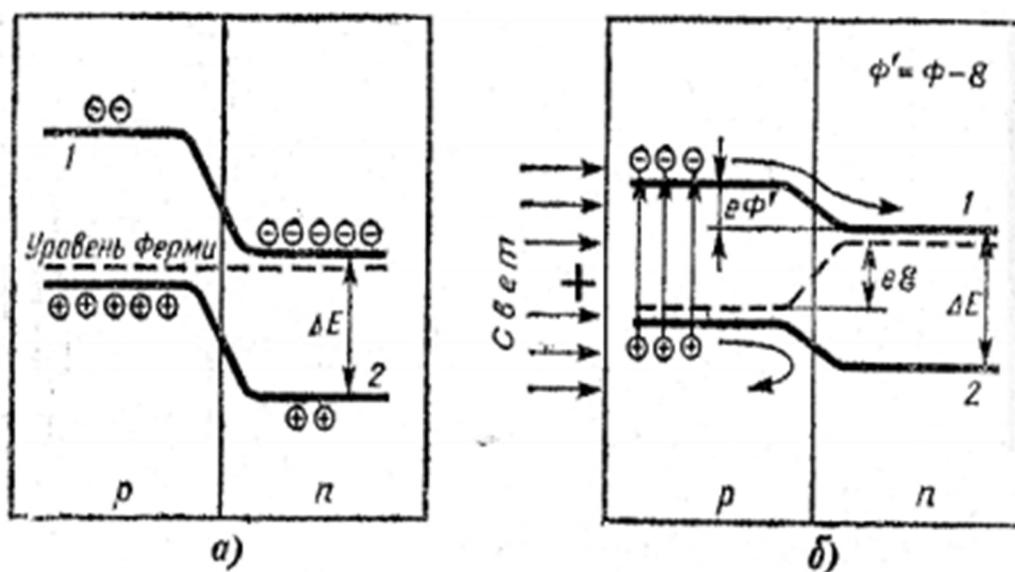


Рисунок 3. Энергетическая диаграмма p-n перехода при отсутствии (а) и наличии (б) освещения.

Основными носителями заряда в p-области являются дырки; их концентрация много больше концентрации электронов проводимости. В n-области наблюдается обратная картина; там основными носителями являются электроны проводимости. Диффузии электронов проводимости из области с высокой их концентрацией (n-области) в область с низкой концентрацией (в p-область) препятствует потенциальный барьер высотой  $e\phi$ ;  $\phi$  — контактная разность потенциалов. Аналогичное замечание можно сделать относительно диффузии дырок из p-области в n-область. Иными словами, контактная разность потенциалов в p-n-переходе препятствует

уходу основных носителей из «своей» области. В то же время она способствует уходу в другую область неосновных носителей (но этому уходу препятствует более высокая концентрация соответствующих носителей в той области, куда они могли бы уйти).

Предположим теперь, что на р-полупроводник с наружной стороны падает поток фотонов (рис.3,б). Энергия фотонов превышает ширину запрещенной зоны. Фотоны генерируют электроны проводимости и дырки, которые, возникнув, начинают диффундировать через р-область по направлению к р-п-переходу. Электроны проводимости являются для р-области неосновными носителями, поэтому внутреннее поле в р-п-переходе «втягивает» их в п-область. Что же касается дырок, то они являются для р-области основными носителями, поэтому поле в р-п-переходе задержит их и возвратит обратно в р-область. В результате происходит пространственное разделение оптически генерированных электронов и дырок; р-полупроводник приобретает положительный, а п-полупроводник — отрицательный заряд, что эквивалентно возникновению ЭДС. При этом уровни Ферми в р-области и п-области смещаются друг относительно друга на  $e\varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — фотоЭДС; контактная разность потенциалов уменьшается на  $\varepsilon$  (рис. 3). Внутренний фотоэффект, проявляющийся в возникновении фотоЭДС, называют также фотогальваническим (или фотовольтаическим) эффектом. Одним из видов этого эффекта является возникновение вентильной (барьерной) фотоЭДС в р-п-переходе.

Фотодиоды – селективные регистрирующие фотоэлектрические ПЛЭ, основанные на явлении фотовольтаического эффекта в полупроводниковом контактном переходе и предназначенные как для работы с приложением внешнего напряжения, так и без него. Как было сказано выше, фотовольтаическим эффектом – (фотогальваническим, вентильным) – называют форму внутреннего фотоэффекта в полупроводниках со свойствами, неоднородными для движения фотоносителей даже при отсутствии внешнего напряжения, при которой оптически генерированные

неравновесные носители заряда пространственно разделяются в объеме полупроводника вследствие его неоднородности, образуя при этом пространственно разделенные объемные заряды и, следовательно, разность потенциалов между участками облученного образца, называемую фото ЭДС ( $V_F$ ). Если эти участки соединить проводником, то при облучении полупроводника во внешней цепи возникает электрический ток, направленный на уменьшение объемных зарядов - фототок ( $J_f$ ). К фотовольтаическим эффектам относятся, например:

- диффузионный фотоэффект,
- фотомагнитоэлектрический эффект,
- фотовольтаический эффект в полупроводниковом, контактном переходе.

Наибольшее применение в современных ПЛЭ нашел последний вид фотовольтаического эффекта, при котором разделение фотоносителей происходит за счет действия внутреннего электростатического поля. Внутреннее электростатическое поле образуется в объеме полупроводника в области контакта полупроводников с разным типом проводимости (p-n 26 перехода) или контакта полупроводника с металлом.

Время пролета электронами и дырками области поля в p-n переходе определяется скоростью дрейфа и составляет  $\sim 10^{-10}$  с. Однако значительная часть излучения поглощается за пределами области пространственного заряда, фотогенерированные носители попадают в ОПЗ вследствие диффузии. Диффузионная длина неосновных носителей заряда в кремнии  $L_{n,p}$  составляет  $\sim 5 \cdot 10^{-3}$  см, что ограничивает время диффузионного переноса -  $\tau \sim 10^{-6} - 10^{-2}$  с.

Область спектральной чувствительности определяется зависимостью коэффициента поглощения от длины волны оптического излучения  $\alpha(\lambda)$ . Длинноволновая граница  $\lambda_{\max}$  определяется шириной запрещенной зоны используемого полупроводника и составляет 1,1 мкм для кремния и 1,7 мкм для германия, для больших длин волн поглощение резко уменьшается.

Коротковолновая граница  $\lambda_{\min}$  определяется резким увеличением коэффициента поглощения  $>10^5 \text{ см}^{-1}$ , тогда поглощение происходит очень близко к поверхности, где велика скорость рекомбинации ( $\lambda_{\min} \sim 0,3 \text{ мкм}$  для Si и Ge).

Частотные характеристики фотодиодов определяются тремя факторами: диффузией, дрейфом и емкостью ОПЗ. Для уменьшения длительности диффузионных процессов переход располагают близко к поверхности. В фотодиодах с p-n переходом основное поглощение излучения происходит не в ОПЗ, а в p- или n-области. Так как, обычно,  $D_n > D_p$ , в качестве внешней используют p-область. Для уменьшения длительности процессов перезарядки емкости ОПЗ уменьшают емкость p-n перехода, оптимизируя его толщину,  $d_{\text{opt}} \sim 5 \text{ мкм}$ . Фотодиод не обладает внутренним усилением ( $Z = 1$ ).

Для снижения потерь на отражение света от поверхности используют просветляющее покрытие, обычно пленки ZnS ( $n = 2,3$ ).

Достоинства фотодиодов:

Простая технология, однородность параметров изготавливаемых структур (что особенно важно для многоэлементных приемников).

Малое сопротивление базы обеспечивает высокие значения фотоЭДС (для Si до 0,7- 0,8 В).

Совместимость технологии с технологией ИС, что дает возможность изготавливать интегральные фотоприемники.

#### **4.2.2. P-i-n фотодиоды**

P-i-n фотодиоды представляют собой наиболее типичные фотоприемники на основе p-n переходов с большим обедненным слоем. Структура этих диодов включает n+ основу, достаточно широкую слаболегированную i-область и тонкую p+-область. Оптимальное сочетание высокой чувствительности и быстродействия в них обуславливается малым влиянием процессов диффузии носителей.

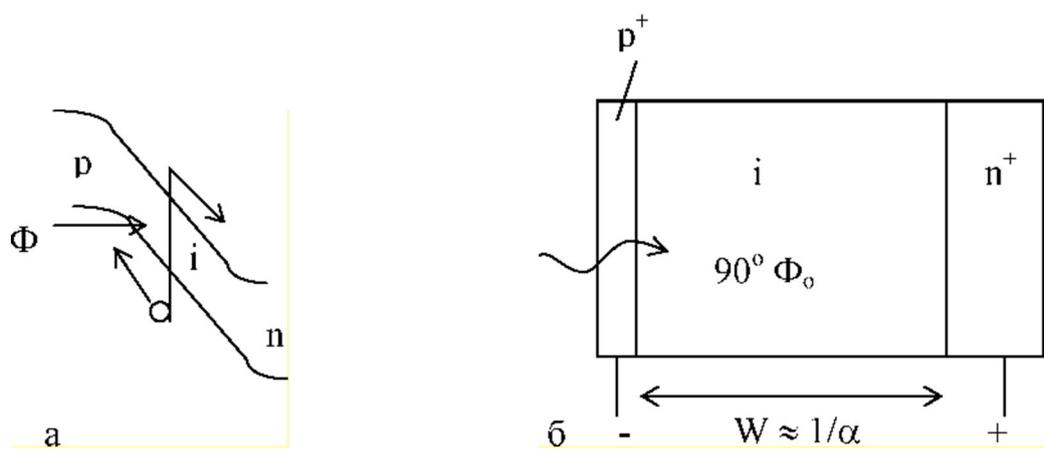


Рисунок 4. Энергетическая диаграмма p-i-n фотодиода при освещении под обратным смещением (а) и относительные размеры p-i-n областей структуры (б).

Изготовление структур производится с использованием планарно-эпитаксиальной технологии. В качестве базовой подложки используется высокоомный слаболегированный кремний p-типа проводимости ( $\rho > 10^4 \text{ Ом*см}$ ) толщиной 200 мкм. На ней с помощью эпитаксии выращивается пленка n+-Si с  $\rho < 0,01 \text{ Ом*см}$  толщиной 30-70 мкм. Затем производится подшлифовка пластины со стороны высокоомной области до ее толщины 30-70 мкм. (Прямая эпитаксия слаболегированного кремния  $\rho > 100-1000 \text{ Ом*см}$  на низкоомной подложке затруднительна, так как процесс должен протекать очень долго, при этом образуется повышенная плотность дефектов.) На высокоомной стороне пластины диффузией формируется низкоомный p+-слой толщиной 0,2-0,3 мкм.

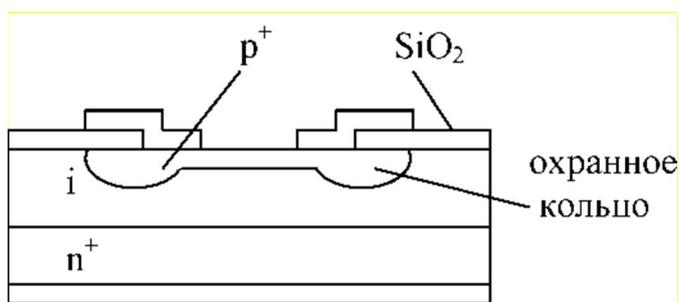


Рисунок 5. Структура p-i-n фотодиода.

К достоинствам p-i-n фотодиодов относятся следующие:

- Высокая фоточувствительность (для  $\lambda \sim 0,9 \text{ мкм}$   $S_{j\text{max}} \sim 0,7 \text{ А/Вт}$ )

и высокое быстродействие ( $10^{-9}$ - $10^{-10}$  с).

- Высокая фоточувствительность в длинноволновой части спектра (обусловлена широкой  $i$ -областью).
- Малая барьерная емкость.
- Высокая эффективность при малых обратных напряжениях.

К недостаткам  $p$ - $i$ - $n$  фотодиодов относятся.

- Малая фотоЭДС ( $< 0,35$ - $0,45$  В).
- Повышенные токи утечки.
- Невысокая воспроизводимость.
- $P$ - $i$ - $n$  диоды не совместимы с ИС.

#### 4.2.3. Фотодиоды с барьером Шоттки

Фотоприемники с поверхностным барьером Шоттки также обладают высоким быстродействием и эффективностью. Барьеры на контакте металла с полупроводником могут быть получены и на полупроводниковых материалах, в которых невозможно создать  $p$ - $n$  переходы. Если электронный полупроводник контактирует с металлом, у которого работа выхода меньше работы выхода полупроводника, то определенное число электронов переходит из полупроводника в металл. Ионизированная донорная примесь в полупроводнике образует слой положительного пространственного заряда, обладающий высоким сопротивлением. При включении диода в обратном направлении ширина ОПЗ увеличивается в соответствии с формулой

$$d_{\text{опз}} = [ 2\epsilon\epsilon_0 (\phi_K + V) / eN_D ]^{1/2}, \quad (18)$$

где  $\phi_K$  - контактная разность потенциалов. Если  $N_D = 10^{17}$  см<sup>-3</sup>;  $V \approx 1$ - $5$ В; то  $d \approx (1-10) \cdot 10^{-5}$  см.

Тонкий слой металла толщиной 0,01 мкм наносится на полупроводник вакуумным напылением. Для уменьшения потерь излучения, вызываемых отражением света от поверхности металла, на него наносят просветляющее покрытие (обычно пленка ZnS).

Излучение направляют сквозь полупрозрачную пленку металла (слой

Au пропускает 95% потока излучения с  $\lambda = 0,63$  мкм). Если  $d > x^*$ , основная часть излучения поглощается в ОПЗ. Возникающие электронно-дырочные пары быстро разделяются полем и время пролета носителей может быть очень малым ( $10^{-11}$ - $10^{-10}$  с). Таким образом, фотодиод с барьером Шоттки является аналогом p-i-n фотодиода в коротковолновой части спектра, когда все излучение поглощается в ОПЗ. В этих фотодиодах с уменьшением длины волны излучение так же поглощается в слое пространственного заряда, но ближе к металлу. Поэтому коротковолновая граница спектральной области смещается в сторону меньших значений и они могут использоваться как эффективные приемники ультрафиолетового излучения. Длинноволновая граница определяется величиной потенциального барьера контакта металл-полупроводник и расположена дальше, так как высота барьера всегда меньше ширины запрещенной зоны. Таким образом, спектральная область фотодиодов с барьером Шоттки значительно шире в обе стороны, чем у p-n переходов.

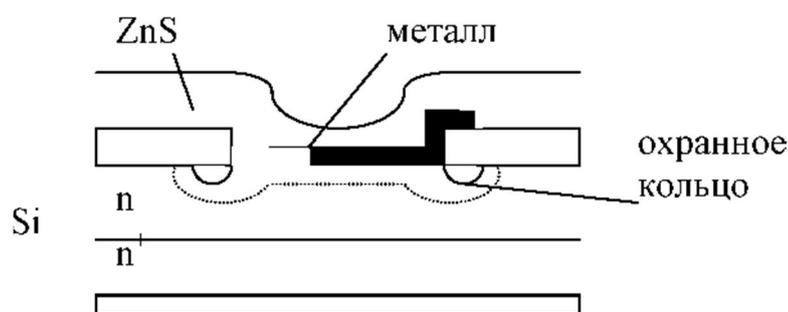


Рисунок 6. Структура фотодиода с барьером Шоттки.

По сравнению с p-n переходами сопротивление диодов Шоттки намного меньше, поэтому время перезарядки мало и инерционность обусловлена только временем пролета носителей через область пространственного заряда. Величина  $\tau$  может быть порядка  $10^{-10}$ - $10^{-11}$  с, что позволяет использовать фотодиоды при СВЧ модуляции излучения. Чувствительность диодов достигает 0,5 А/Вт.

Достоинства фотодиодов с барьером Шоттки.

- Простота изготовления и разнообразие полупроводников (даже

те, на которых не удастся создать p-n переход: Si, Ge, A3B5, A2B6).

- Высокая чувствительность и быстродействие.
- Совместимость с технологией ИС.

#### 4.2.4. Гетерофотодиоды

Гетерофотодиоды являются перспективными фотоприемниками, сочетающими высокую чувствительность и быстродействие. Для изготовления фотодиодов используют гетероструктуры на основе соединений A3B5. Типичная структура гетерофотодиода показана на рис. 7. В ней создаются две области: широкозонное окно и фоточувствительный p-n переход. Окно из широкозонного сильнолегированного полупроводника обеспечивает малое сопротивление и высокую прозрачность для принимаемого излучения, которое поглощается в слое узкозонного полупроводника, толщина p-слоя обычно соответствует длине поглощения излучения.

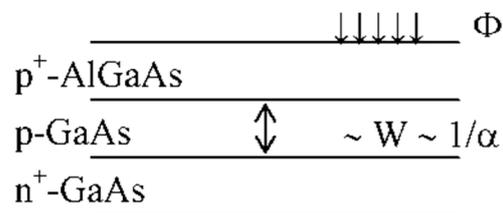


Рисунок 7. Расположение слоев в гетерофотодиоде.

Процессы поглощения излучения и разделения фотонесителей в гетерофотодиодах аналогичны явлениям, происходящим в p-i-n фотодиодах и фотодиодах с барьером Шоттки. Их инерционность также определяется временем пролета носителей через область пространственного заряда.

Для приема излучения с длиной волны  $\lambda = 0,85$  мкм используются p-n переходы на основе GaAs или GaAsP, для  $\lambda = 1,3-1,55$  мкм - InGaAs и InGaAsP.

Достоинства гетерофотодиодов:

- Высокое быстродействие ( $\sim 10^{-10}$  с) и фоточувствительность при малых рабочих напряжениях.

- Высокие значения фотоЭДС (для GaAs -  $V_{xx} = 0,8-1,1В$ ).
- Высокий КПД, близкий к 100%.
- Меньшие, чем у обычных фотодиодов, темновые токи и шумы.
- Большой температурный диапазон и радиационная стойкость.
- Технологическая совместимость с устройствами интегральной оптики.

В то же время используемые материалы являются более дорогими и технология изготовления более сложная.

#### **4.2.5. МДП-фотодиоды**

В них для приема излучения используется фоточувствительная МДП-структура в режиме обеднения поверхности полупроводника. В области пространственного заряда вблизи поверхности происходит фотогенерация и разделение носителей. Вследствие этого происходит модуляция проводимости, возникает наведенная фотоЭДС (для МДП-ИС внутреннее сопротивление очень велико). Для регистрации излучения может использоваться также фотоёмкостный эффект. В МДПДМ-фотоприемниках необходимо применять динамический режим работы. Достоинствами МДП-фотодиодов являются функциональная и конструкционно-технологическая гибкость, малые шумы и темновые токи, совместимость с МДП-ИС. В то же время технология изготовления таких приемников сложнее (высокие требования к качеству границы раздела полупроводник-диэлектрик и свойствам диэлектрика).

#### **4.2.6. Лавинные фотодиоды**

В лавинных фотодиодах происходит усиление первичного фототока вследствие лавинного умножения неравновесных носителей в сильном электрическом поле слоя пространственного заряда р-п перехода при условии, что ширина ОПЗ превышает длину свободного пробега носителей заряда. Процесс умножения происходит следующим образом. При увеличении обратного напряжения на р-п переходе до определенной

величины  $U_n$  носители заряда в сильном электрическом поле ( $E \sim 10^4 - 10^5$  В/см) начинают набирать достаточную скорость для ионизации атомов с образованием пары электрон-дырка. Образовавшиеся носители сами принимают участие в дальнейшей ионизации. Процесс нарастания концентрации носителей, а следовательно и тока, носит лавинный характер. Скорость нарастания тока зависит от коэффициентов ударной ионизации электронов и дырок.

Коэффициент умножения носителей  $M = J/J_0 = n/n_0$ , где  $n_0$  - число электронов, вошедших в область сильного поля,  $n$  - число электронов, вышедших из этой зоны. Величина  $M$  отражает общее число ионизаций, совершенных как первичными, так и вторичными электронами.  $N = (n - n_0)/n_0$  - выход процесса ионизации (число ионизаций, приходящихся на один электрон, прошедший область поля), связан с коэффициентом умножения соотношением  $M = 1/(1-N)$ . Выход ионизации зависит от коэффициентов ударной ионизации (числа пар, созданных носителем на 1 см пути) для электронов  $\alpha_i$  и дырок  $\beta_i$ , а также от ширины области поля ( $d$ ). Значение коэффициента умножения  $M$  определяет величину коэффициента внутреннего усиления фотодиода ( $Z$  до  $10^3$ ). Инерционность процесса лавинного умножения очень мала  $< 10^{-9}$  с.

Аналогичным образом происходит и умножение носителей заряда, возникающих при освещении фотодиода. Коэффициент умножения  $M = J/J_p$  определяется отношением полного тока на выходе к начальному току, состоящему из фототока и темнового тока ( $J_p = J_\phi + J_S$ ). Выходной ток также состоит из умноженного фототока и умноженного темнового тока  $J = J_{\phi y} + J_{S y}$ . Следовательно,  $M = (J_{\phi y} + J_{S y}) / (J_\phi + J_S)$ . Обычно коэффициент умножения определяется по эмпирической формуле  $M = [1 - (V/V_n)^c]^{-1}$ , где  $c = 2-6$  - постоянный коэффициент для каждого полупроводникового материала.

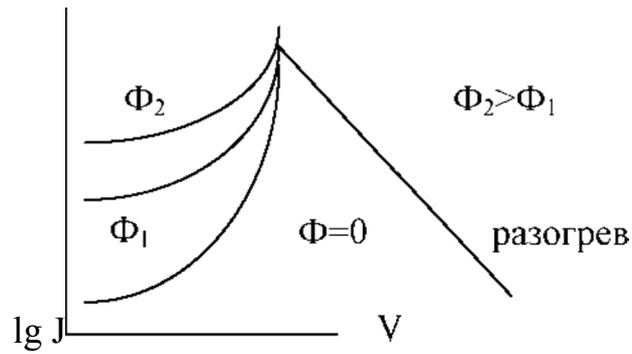


Рисунок 8. Вольт-амперные характеристики лавинного фотодиода без освещения ( $\Phi = 0$ ) и при разных уровнях освещения ( $\Phi_2 > \Phi_1$ )

Очевидно, что большие значения коэффициента умножения и фоточувствительности могут быть получены только при малом темновом токе.  $U_{\text{раб}}$  близко к  $U_{\text{п}}$ , поэтому лавинные фотодиоды имеют «внутреннее» усиление, которое не сопровождается снижением быстродействия.

Высокое усиление и быстродействие фотоприемников можно получить, если p-i-n фотодиоды подключить к электронной схеме с любым большим коэффициентом усиления, но шумы входных каскадов усилителей обычно на несколько порядков больше шумов качественного p-i-n фотодиода (у которого шумы малы, а квантовая эффективность велика), поэтому реализовать все потенциальные возможности p-i-n фотодиода не удастся вследствие низкого порога чувствительности). Введение внутреннего усиления, воздействующего и на сигнал и на шум, приводит к возрастанию отношения сигнал/шум при условии, что усиленный шум фотоприемника меньше шумов входного каскада усилителя, поэтому лавинные фотодиоды имеют преимущества перед p-i-n фотодиодами в условиях приема слабых, минимально различимых сигналов.

Оптимальной структурой кремниевых лавинных фотодиодов является n-p-i-p структура, или ЛФД с проникновением (проколом):

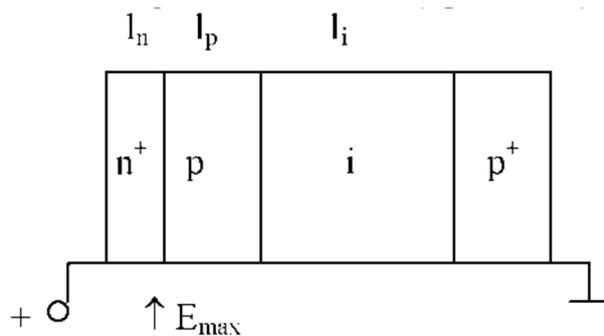


Рисунок 9. Простая геометрическая модель лавинного фотодиода.

В этом случае максимальное значение напряженности электрического поля  $E_{\max}$ , достаточное для возникновения и поддержания лавинного размножения, создается в  $n^+$ - $p$  переходе. Фотоносители быстро вытягиваются из  $i$ -области и размножаются в  $p$ -области.

Изготовление лавинных фотодиодов производится с использованием обратной эпитаксии, аналогично технологии изготовления  $p$ - $i$ - $n$  фотодиодов. Необходимо точно задать распределение примесей,  $n^+$ -область должна иметь малое удельное сопротивление, тогда ОПЗ имеет малый размер в  $n^+$ -области и пространственный заряд распределяется почти полностью в  $p$ - и  $i$ -областях.

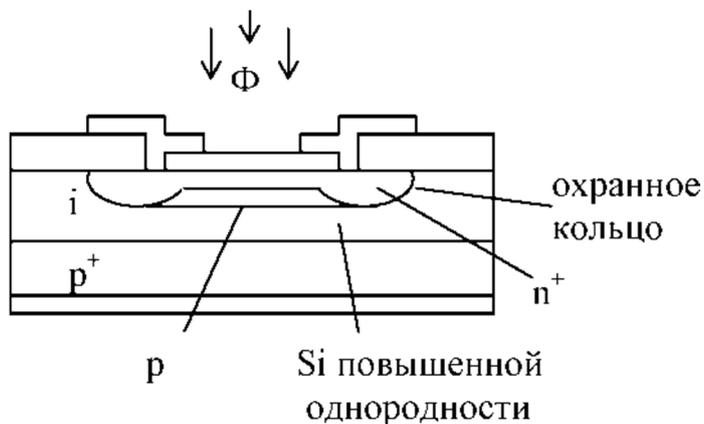


Рисунок 10. Структура лавинного фотодиода.

Типичные значения:  $\Phi = 20-300$  мкм,  $l_i = 20-70$  мкм,  $l_p = 2-5$  мкм,  $l_n/l_p=0,1-0,3$ .

Концентрация примесей в  $i$ -области:  $N_A = (0,2-1) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $E_{\max}=(3-5) \cdot 10^5 \text{ В/см}$ ,  $E_i = 10^3-10^4 \text{ В/см}$ ,  $\delta D_A/D_A < 3\%$ . Рабочее напряжение должно быть достаточным для того, чтобы ОПЗ распространялось на всю  $p$ -и  $i$ -область.

Лавинные фотодиоды изготавливаются с середины 60-х годов на основе германия, затем на основе кремния, и с конца 70-х на АЗВ5.

Особенности лавинных фотодиодов.

- Сложность, уникальность изготовления, высокая стоимость.
- Высокое рабочее напряжение, расход мощности, следовательно, они не совместимы с ИМС.
- Необходимость стабилизации рабочего напряжения и температуры.
- Отсутствие конструкций матричного типа.

Основные достоинства лавинных фотодиодов: большое усиление, высокое быстродействие и малые шумы. Поэтому эти фотоприемники широко используются в ВОЛС. К недостаткам лавинных фотодиодов следует отнести, во-первых, зависимость коэффициента умножения от интенсивности света и соответствующее нарушение линейности зависимости  $I(\Phi)$ , во-вторых, высокие требования к стабильности питающего напряжения (0,01-0,02%), поскольку коэффициент умножения сильно зависит от напряжения.

### 4.3. Фототранзисторы

#### 4.3.1. Общие сведения о фототранзисторах

Фототранзистор - фоточувствительный полупроводниковый приемник излучения, по структуре подобный транзистору и обеспечивающий внутреннее усиление сигнала. Его можно представить состоящим из фотодиода и транзистора. Фотодиодом является освещаемая часть перехода база-коллектор, транзистором - часть структуры, расположенная непосредственно под эмиттером. Так как фотодиод и коллекторный переход транзистора конструктивно объединены, то фототок суммируется с коллекторным током. Напряжение питания подводят так, чтобы коллекторный переход был закрыт, а эмиттерный - открыт. База может быть отключенной. При освещении базы в ней возникают электронно-дырочные пары. Так же как и в фотодиоде, пары, достигшие в результате диффузии коллекторного перехода, разделяются полем перехода, неосновные носители из базы движутся в коллектор, при этом его ток увеличивается. Основные носители остаются в базе, понижая ее потенциал относительно эмиттера. При этом на эмиттерном переходе создается дополнительное прямое напряжение, вызывающее дополнительную инжекцию из эмиттера в базу и соответствующее увеличение тока коллектора.

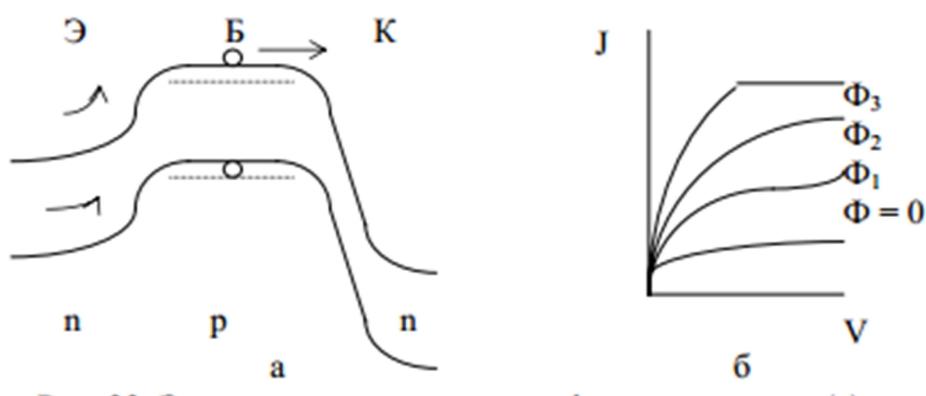


Рисунок 11. Энергетическая диаграмма фототранзистора (а) и вольт-амперные характеристики фототранзистора при разных уровнях освещения (б).

Рассмотрим, например, работу фототранзистора в схеме с общим

эмиттером при отключенной базе. Фототок коллекторного перехода суммируется с обратным током коллектора, поэтому в формуле для тока транзистора вместо  $J_{K0}$  следует поставить  $J_{K0} + J_{\Phi}$ :  $J = (J_{K0} + J_{\Phi}) / (1 - \alpha)$ . При  $J_{K0} \gg J_{\Phi}$ ,  $J = J_{\Phi} / (1 - \alpha) \approx \beta J_{\Phi}$ , т.е. фототок фототранзистора усиливается в  $\beta$  раз по сравнению током фотодиода. Соответственно в  $\beta$  раз увеличивается и чувствительность. Ток может быть усилен в 1000 раз, поэтому чувствительность фототранзистора во много раз больше чувствительности фотодиода. Однако поскольку произведение коэффициента усиления на полосу частот величина постоянная, то предельная частота уменьшается в  $\beta$  раз. Наличие диффузии носителей обуславливает значительную инерционность прибора  $\tau = 10^{-5} - 10^{-6}$  с. При сужении базы время диффузии уменьшается, но уменьшается и чувствительность. Для германиевых фототранзисторов  $S_1 = 0,2 - 0,5$  А/лм,  $U_{\text{раб}} = 3$  В,  $I_{\text{темн}} = 300$  мкА,  $\tau = 0,2$  мс.

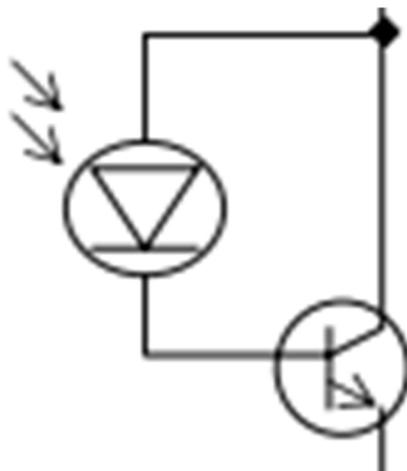


Рисунок 12. Эквивалентная схема фототранзистора

В корпусе прибора предусмотрено прозрачное окно, через которое световой поток попадает обычно на базовую область фототранзистора. Площадь фоточувствительной площадки составляет 1- 3 мм<sup>2</sup>. Существует две разновидности конструкций фототранзисторов: поперечная и продольная. Продольные транзисторы имеют более простую конструкцию и технологию, удобны для включения в интегральные схемы, но уступают по своим функциональным параметрам.

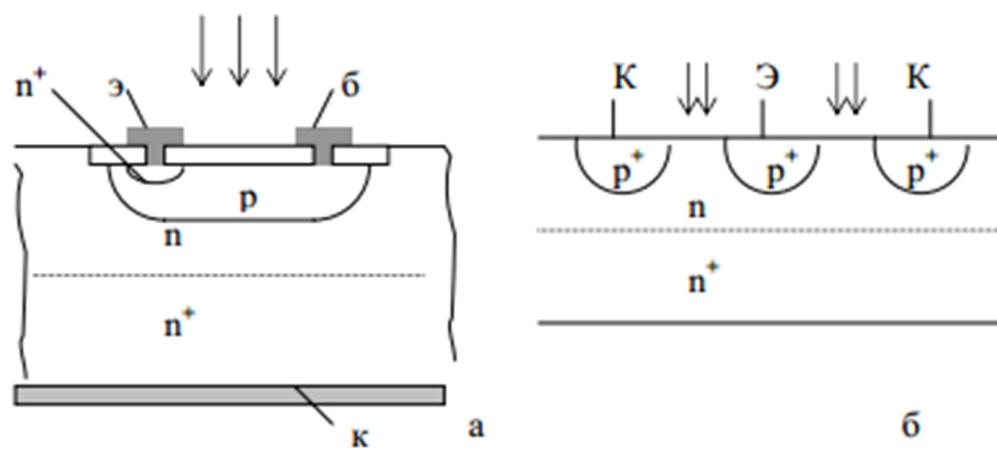


Рисунок 13. Структура поперечного (а) и продольного (б) фототранзисторов.

Достоинства фототранзисторов: наличие механизма внутреннего усиления, т.е. высокая фоточувствительность, схемотехническая гибкость, связанная с наличием третьего электрода.

Основные недостатки: ограниченное быстродействие и температурная зависимость параметров.

#### 4.3.2. МДП-фототранзисторы

МДП-фототранзистор представляет собой полевой транзистор с изолированным затвором, в котором поглощаемый в подзатворной области световой поток приводит к изменению проводимости канала между истоком и стоком. Вызванное светом увеличение тока приводит к изменению порогового напряжения и крутизны передаточной характеристики. Электрод затвора должен быть изготовлен из прозрачного или полупрозрачного материала. МДП-фототранзистор, таким образом, является аналогом фоторезистора, но может быть использован любом режиме подзатворного канала: обогащении, обеднении, инверсии.

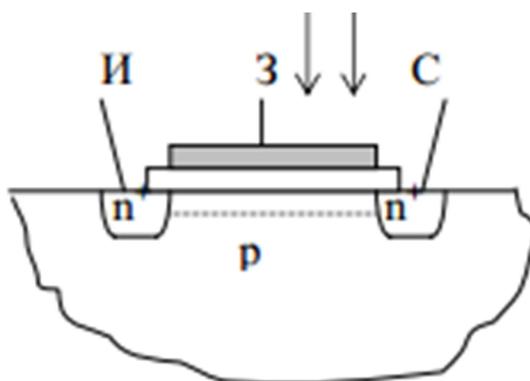


Рисунок 14. Структура МДП-фототранзистора.

При использовании в качестве фотоприемников МДП-транзисторов их целесообразно применять в сочетании с фотодиодом на основе р-п перехода. Техно-логически фотодиод и МДП-транзистор изготавливаются на одной пластине полупроводника и фотодиод подключается к истоку и затвору. Так как ток через затвор не протекает, то фотодиод работает в режиме генерации фотоЭДС. При одновременном освещении р-п перехода и МДП-транзистора меняется как напряжение отсечки, так и фотонапряжение р-п перехода. Фото ЭДС р-п перехода изменяет потенциал затвора, поэтому изменяется ток в цепи исток-сток.

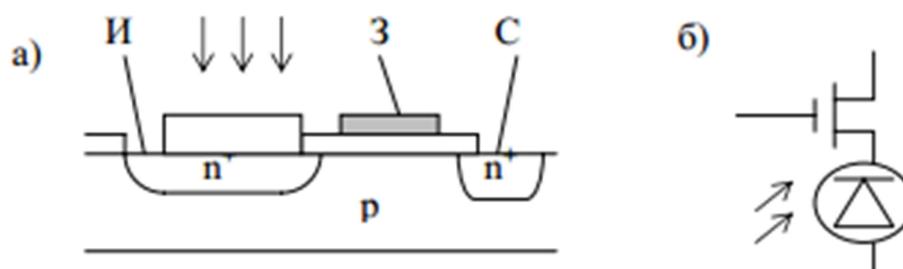


Рисунок 15. Структура (а) и эквивалентная схема (б) МДП-транзистора с фотодиодом на основе р-п перехода.

МДП-фототранзисторы являются удобными фоточувствительными элементами для создания многоэлементных фотоприемников.

#### 4.3.3. Гетерофототранзисторы

Гетерофототранзисторы используют принцип действия обычного фототранзистора в сочетании с достоинствами гетероструктур. В гетероструктурах используются широкозонные эмиттерные и коллекторные

окна, что позволяет применять прямую и обратную засветку. Тонкая фотоактивная базовая область, обусловленная идеальностью гетерограниц, обеспечивает накопление основных носителей заряда в базе и отсутствие просачивания неосновных носителей в эмиттер.

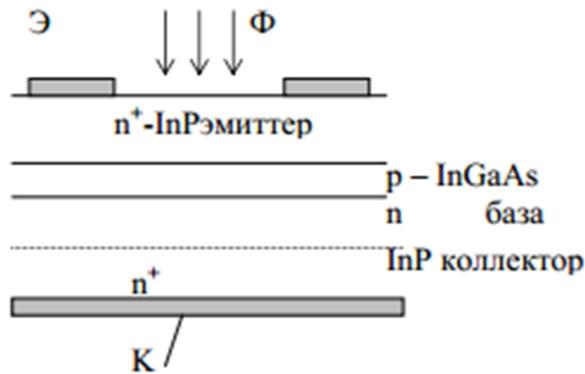


Рисунок 16. Структура гетерофототранзистора.

Гетерофототранзисторы имеют высокую фоточувствительность и быстродействие ( $10^{-9}$ - $10^{-10}$  с), низкое напряжение питания, возможность выбора спектральной области чувствительности. Но в то же время гетерофототранзистор используется обычно в диодном включении (вывод от узкой базы сложно сделать), поэтому не полностью реализуются схемотехнические возможности фототранзистора.

## 5. Тепловые приемники излучения

### 5.1. Болометры

Приборы для измерения энергии излучения, основанные на изменении сопротивления термочувствительного элемента при нагревании вследствие поглощения измеряемого потока излучения. Используются для измерения мощности интегрального (суммарного) излучения. Данный вид приемников оптического излучения является одним из первых, «дооптоэлектронных», но использующихся до сих пор.

Основной компонент болометра — очень тонкая пластинка (например, из платины или другого проводящего материала), зачернённая для лучшего поглощения излучения. Из-за своей малой толщины пластинка под действием излучения быстро нагревается и её сопротивление повышается. Для измерения малых отклонений сопротивления пластинки её включают в мостовую схему, которую балансируют при отсутствии засветки.

Для уменьшения влияния тепловых и радиационных помех современные болометры делаются компенсационного типа. С этой целью берут идентичный термочувствительный элемент и располагают его возможно ближе к рабочему, облучаемому элементу. Такие болометры обычно имеют три внешних вывода - от активного и компенсационного термисторов и от средней точки. Активный и компенсационный элементы болометра включаются в мостовую электрическую схему, при этом помехи, воздействующие в одинаковой степени на оба элемента, не вызывают нарушения баланса. Сопротивления других плеч моста, как правило, помещают в массивный металлический экранирующий кожух. Питание мостовой схемы осуществляют постоянным или переменным током с частотой несколько сот или тысяч Гц. При питании схемы постоянным током усиление сигнала с выхода болометра производят на частоте модуляции воспринимаемого лучистого потока. При питании схемы переменным током сигнал вначале усиливают на частоте изменения тока, а затем после детектирования — на частоте модуляции.

Для уменьшения инерционности чувствительный элемент болометра монтируется на кварцевой или стеклянной подложке, что приводит к уменьшению чувствительности на нулевой частоте модуляции регистрируемого излучения. Часто болометры изготавливаются вместе с предусилителем. Высокоомные болометры легко согласуются с входным сопротивлением лампового усилителя.

Болометры делятся на два основных типа: металлические и полупроводниковые.

Металлический болометр представляет собой термочувствительную полосу, изготовленную из рыхлого металла, нанесенного на подложку из диэлектрика, которая помещена в баллон.

Для уменьшения порога чувствительности площадь болометрической полосы делается небольшой, а для уменьшения постоянной времени - очень тонкой. Типичные размеры болометра сопротивления: площадь порядка 1 мм<sup>2</sup>, толщина 0,1-0,01 мкм; при таких размерах постоянная времени составляет 0,01-0,02 с. Получение тонких металлических полосок чисто механическими методами (например, прокаткой) связано с большими трудностями; поэтому в настоящее время их изготавливают методом термического распыления в вакууме на какую-либо диэлектрическую подложку, например на тонкую (0,02-0,03 мкм) пленку из нитроцеллюлозы, натянутую на рамку из стекла или керамики. При толщинах 0,1-0,01 мкм металлические слои частично прозрачны, и поэтому для увеличения коэффициента поглощения их покрывают слоем черни, обычно золотой, получаемой при термическом распылении золота в атмосфере чистого азота или водорода при давлении 1-5 мм рт. ст. Толщина слоя черни составляет 20-30 мкм.

Первые образцы металлических болометров состояли из тонкой зачерненной полосы платиновой фольги; в современных вариантах этих приборов используют золото, никель, висмут (для висмута ТКС равен 0,005 1/°C). Коэффициент преобразования таких приборов достигает 10-25 В/Вт.

Золотая чернь неселективна в широком диапазоне длин волн.

В большинстве случаев приемную и компенсационную полоски помещают в вакуумный (или заполненный инертным газом) баллон с окном из материала, прозрачного для излучения в исследуемой области спектра.

Особую группу болометров составляют металлические сверхпроводящие болометры, которые отличаются значительно меньшим порогом чувствительности. В этих болометрах используется эффект резкого уменьшения сопротивления у некоторых металлов и сплавов при низких температурах. Так, например, у применяемого чаще всего материала - нитрида ниобия - изменение температуры на 0,01 К в области перехода в сверхпроводящее состояние ( $T_c = 14,36$  К) приводит к изменению сопротивления в два раза. Благодаря большой величине температурного коэффициента сопротивления (50-100 1/°С) и низкой рабочей температуре величина порога чувствительности оказывается малой. Постоянную времени болометра можно уменьшить за счет отвода тепла от болометрической полоски в массивную подложку. Для болометра из нитрида ниобия постоянная времени 10 до 0,5 мкс.

Однако сложность криогенной системы и необходимость поддержания температуры в переходном диапазоне затрудняет применение сверхпроводящих болометров в инфракрасной аппаратуре, особенно предназначенной для установки на подвижных объектах.

Чувствительный элемент полупроводниковых болометров выполнен из полупроводникового материала толщиной 10-20 мкм, нанесенного на подложку в виде тонких прямоугольных пластин.

У полупроводниковых болометров температурный коэффициент сопротивления на порядок больше, чем у металлических (порядка 0,05 1/°С), соответственно больше у них и коэффициент преобразования, достигающий 1000 В/Вт. Кроме того они обладают большей механической прочностью по сравнению с металлическими, не требуют применения вакуумной оболочки, менее инерционны; всё это и обусловило их более широкое практическое

использование.

Для изготовления полупроводниковых болометров различными исследователями применялись из числа окисных полупроводников закись меди, окислы железа и другие полупроводники, а также германий, сурьма и другие материалы. Однако наилучшие результаты получены до сих пор со смесью окислов марганца, никеля и кобальта или со смесью окислов первых двух из этих металлов (Mn, Ni). Соотношение составляющих в оксидных смесях было подобрано таким образом, что удельное сопротивление первого из этих материалов оказалось равным  $250 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , второго -  $2500 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  (при  $25^\circ \text{ C}$ ) при температурном коэффициенте сопротивления  $0,04 \text{ 1}/^\circ\text{C}$ , что соответствует энергии активации носителей тока, примерно равной  $0,3 \text{ эВ}$ . В широких пределах изменения линейных размеров чувствительных элементов их сопротивление менялось от  $0,5$  до  $10 \text{ МОм}$ , что обеспечивает возможность прямой связи с сеткой входной лампы усилителя.

Технология получения полупроводниковых пленок для изготовления чувствительных элементов болометров в общих чертах состоит в следующем. Смесью окислов металлов смешивается с органической связкой и соответствующим растворителем «до степени плотности сливок». Полученная суспензия «размазывается» по полированной стеклянной поверхности и просушивается. Образовавшуюся после просушки пленку снимают со стекла и нарезают на образцы требуемых размеров и формы (с учетом последующей усадки при отжиге), после чего отжигают при температуре спекания около  $1100\text{-}1200^\circ \text{ C}$  на гладкой керамической поверхности. При этом происходит рекристаллизация и увеличение плотности образцов (усадка). При температурах порядка  $800^\circ \text{ C}$  начинается интенсивный рост кристаллов, усиливающийся с повышением температуры до  $900\text{-}1000^\circ \text{ C}$ . К  $1100\text{-}1200^\circ \text{ C}$  пространства между кристаллами закрываются, образуя замкнутые поры, и укрупнение кристаллов становится особенно отчетливым. Подобраный режим обжига позволил свести к минимуму шумы, возникающие вследствие наличия переходных

сопротивлений. Толщина применяемых болометрических слоев — порядка 10 мкм.

Опыт показывает, что наряду с правильным подбором режима отжига, а также вязкости исходной суспензии весьма существенное значение для сведения к минимуму уровня шумов имеет качество контактов с внешней цепью. Вполне удовлетворительные результаты были получены с применением для создания контактов серебряной (или золотой) пасты. Серебряная паста подобного рода применяется, например, в керамическом производстве, для изготовления печатных схем и т. д. и состоит обычно из окиси серебра или углекислого серебра и органической связки. Концы болометрических элементов покрываются подобной пастой. При нагреве до соответствующей температуры (600-700° С для серебряной пасты) органическая связка выгорает, а серебро восстанавливается и спекается с полупроводниковой пленкой, образуя матовый белый металлический слой, к которому могут быть припаяны токоподводящие проводники.

Порог чувствительности металлических болометров определяется шумом Джонсона (тепловым). У полупроводниковых болометров он выше, чем у металлических (несмотря на большое различие в коэффициенте преобразования), так как определяется токовым шумом. Порог чувствительности некоторых полупроводниковых болометров можно уменьшить путем их охлаждения, так как температурный коэффициент сопротивления полупроводников возрастает по абсолютной величине при понижении температуры. Это реализовано, например, в угольном болометре и болометре из германия, легированного галлием.

Порог чувствительности полупроводниковых болометров приблизительно прямо пропорционален корню квадратному из площади чувствительной площадки. Уменьшение размеров последней связано с трудностями создания оптической фокусирующей системы. Поэтому разработаны иммерсионные болометры, в которых чувствительный элемент находится в оптическом контакте с линзой, выполненной из материала с

большим показателем преломления. При размерах приемной площадки иммерсионного болометра  $0,1 \times 0,1$  мм можно получить выигрыш в пороговой чувствительности в 3,6 раза по сравнению с болометром, имеющим приемную площадку с размерами  $1 \times 1$  мм при прочих равных условиях.

Наибольшее отношение сигнал/шум болометр обеспечивает на частоте модуляции лучистого потока порядка 20 Гц. Увеличение частоты модуляцией до 25 Гц уменьшает отношение сигнал/шум в 1,2...1,5 раза.

Болометры характеризуются следующими параметрами:

- сопротивление активного элемента при комнатной температуре;
- рабочее напряжение;
- чувствительность (в В/Вт); определяется как отношение полезного сигнала, снимаемого с болометра, к мощности лучистой энергии при определенной частоте модуляции, падающей на активный элемент;
- порог чувствительности (в Вт), численно равный мощности излучения, которая вызывает сигнал, эквивалентный уровню собственных шумов болометра, т. е. порог чувствительности определяется минимальной мощностью излучения, которую при данных условиях способен зарегистрировать болометр;
- постоянная времени, характеризующая тепловую инерционность активного элемента;
- уровень собственных шумов.

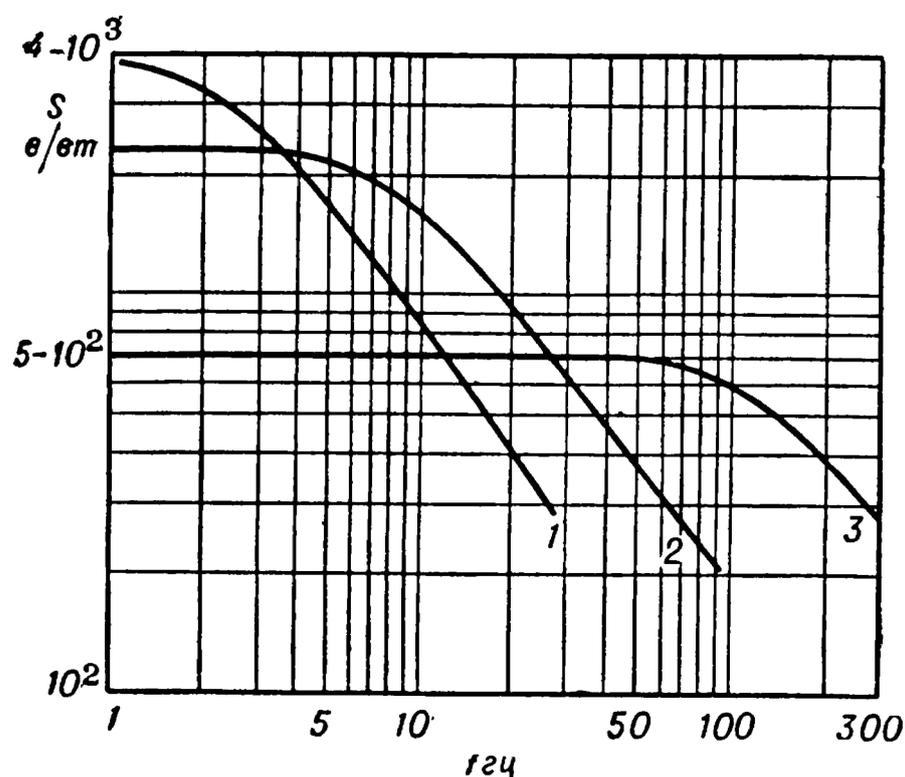


Рисунок 17. Зависимость чувствительности полупроводниковых болометров разных типов от частоты. 1 - без подложки; 2 - с тыльной металлической пластиной; 3 - с кварцевой подложкой.

Спектральный диапазон чувствительности болометров простирается до 50 мкм. При необходимости их можно сделать селективными приемниками при помощи внешнего оптического фильтра или путем введения соответствующих красителей в органическую пленку, наносимую на поглощающий слой.

## 5.2. Пирометры

В этом виде приемников оптического излучения используется пирозлектрический эффект, использующий температурную зависимость спонтанной поляризации сегнетоэлектрических материалов, т.е. они являются также тепловыми приемниками. Тепловые приемники излучения на основе пирозлектриков можно рассматривать как генераторы напряжения, внутреннее сопротивление которых носит емкостной характер, поэтому они пригодны для регистрации потоков излучения переменной интенсивности. Чувствительный элемент в пирозлектрических приемниках представляет

собой тонкую пластину пирозлектрика (триглицинсульфат, BaTiO<sub>3</sub>, PbTiO<sub>3</sub> и др.) с электродами на поверхности перпендикулярной полярной оси. Электрод со стороны источника покрыт слоем поглотителя (0,2-12 мкм). Наиболее высокое значение пирокоэффициента из распространенных пирозлектриков имеет керамика на основе цирконата- титаната свинца, легированного лантаном (ЦТСЛ) - до 400 мкКл/м \*К, но материал имеет и существенный недостаток - низкую температурную стабильность.

Чувствительность пирозлектрических приемников постоянна в широком диапазоне частот, поэтому они могут быть использованы при высоких частотах модуляции излучения (до 50 МГц), тогда как другие теплоприемники используются до 100 Гц. Пирозлектрические приемники применяются для регистрации излучения с частотой от 10<sup>10</sup> до 10<sup>20</sup> Гц, т.е. от инфракрасного до  $\gamma$ -излучения, диапазон регистрируемой мощности 10<sup>-9</sup>-10<sup>9</sup> Вт. Они могут использоваться при измерении быстро меняющихся тепловых процессов: в тепловидении, лазерной технике, в медицинских и космических приборах, преобразователях энергии, в частности, в пироконах, преобразующих распределение температуры неравномерно нагретых поверхностей в световые образы.

## **6. Особенности приемников терагерцового излучения**

### **6.1. Проблема детектирования в терагерцовом диапазоне**

В настоящее время существует большое разнообразие сенсоров терагерцового излучения как относительно традиционных (например болометров), так и основанных на различных принципах и материалах, появившихся недавно. Критическое различие между детектированием в субмиллиметровом диапазоне длин волн и детектировании в ИК диапазоне заключается в малой энергии фотонов.

Все терагерцовые системы обнаружения могут быть поделены на две группы – когерентные (гетеродинные) и некогерентные (прямого детектирования). Первые позволяют определять не только амплитуды сигналов, но и фазы, что важно для увеличения объема информации, получаемой об объекте. Некогерентные системы обнаружения позволяют определять только амплитуды сигналов и, как правило, являются широкополосными системами. Детекторы, используемые в этих двух системах обнаружения, сходны во многих случаях, но некоторые из них, например, низкотемпературные полупроводниковые болометры на горячих электронах невыгодно использовать в когерентных системах из-за относительно большого времени отклика ( $\tau \sim 10^{-7}$  с). Это также относится и к большинству неохлаждаемых тепловых детекторов.

### **6.2. Детекторы прямого обнаружения**

В субмиллиметровом и миллиметровом спектральных диапазонах сенсоры с прямым детектированием подходят для применений, не требующих ультравысокого ( $\nu/\Delta\nu \sim 10^6$ ) спектрального разрешения, которое обеспечивается гетеродинными спектроскопическими системами. Но в отличие от гетеродинных систем детектирования для них не существует проблем формирования многоэлементных матриц, обусловленных мощностью локального осциллятора или гетеродина и быстрым откликом детекторов ( $\tau \sim 10^{-10} \dots 10^{-11}$  с). Поэтому даже детекторы, действующие при

комнатной температуре с относительно большим временем отклика ( $\tau \sim 10^{-3}$  с) и умеренной чувствительностью, могут быть использованы в системах прямого детектирования. Среди таких детекторов для формирования терагерцовых изображений применяют, например, ячейки Голея и пироэлектрические детекторы, болометры и микроболометры, которые используют антенны для связи с малыми поглощающими тепловое излучение областями. Значение NEP для неохлаждаемых детекторов обычно составляет от  $10^{-10}$  до  $10^{-9}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> (табл. 1). В этой таблице использованы следующие обозначения: НЕМТ — транзисторы с высокой подвижностью электронов, MOSFET — МОП полевые транзисторы, SHEB — полупроводниковый болометр на горячих электронах. Также используются различные виды охлаждаемых полупроводниковых детекторов (болометры на основе InSb, Si, Ge с горячими электронами, примесные Si и Ge) со временем отклика ( $\tau \sim 10^{-6}$ – $10^{-8}$  с) и NEP  $10^{-13}$ ... $5 \cdot 10^{-17}$  Вт/Гц<sup>0,5</sup> при рабочей температуре  $T < 4$  К. Различные разработки болометров, охлаждаемых до  $T \sim 100$ ... $300$  мК, обладают наибольшей чувствительностью среди других детекторов прямого действия в субмиллиметровом и миллиметровом спектральных диапазонах, достигая NEP, ограниченной флуктуациями космического фонового излучения. Примесные фоторезисторы с прямым детектированием (Ge : Ga) чувствительны до длины волны около 400 мкм и могут быть объединены в матрицы, а также используются в субмиллиметровом спектральном диапазоне. Их пороговая мощность может достигать NEP  $5 \cdot 10^{-17}$  Вт/Гц<sup>0,5</sup> при  $\lambda = 150$  мкм и рабочей температуре  $T = 2$  К.

Таблица 1. Параметры некоторых неохлаждаемых терагерцовых детекторов.

| Тип детектора      | Частота модуляции, Гц | Рабочая частота, ТГц | NEP, Вт/Гц <sup>0,5</sup>  |
|--------------------|-----------------------|----------------------|--|
| Ячейка Голя        | ≤20                   | ≤30                  | 10 <sup>-9</sup> ...10 <sup>-10</sup>  |
| Пьезоэлектрические | ≤10 <sup>2</sup>      | ≤30                  | ≈(1...3) · 10 <sup>-9</sup> (уменьшается с увеличением ν)                                |
| Микроболометры     | ≤10 <sup>2</sup>      | ≤30                  | ≈10 <sup>-10</sup> (уменьшается с увеличением ν)   |
| Nb микроболометры  | —                     | ≤30                  | 5 · 10 <sup>-11</sup>  |
| Диоды Шоттки       | ≤10 <sup>10</sup>     | ≤10                  | ≤10 <sup>-10</sup> (уменьшается на несколько порядков при увеличении ν от 0,1 до 10 ТГц) |
| GaAs HEMT          | ≤2 · 10 <sup>10</sup> | ≤30                  | 10 <sup>-10</sup> (зависит от длины затвора и напряжения на затворе)                     |
| Si MOSFET          | 3 · 10 <sup>4</sup>   | 0,645                | 3 · 10 <sup>-10</sup>  |
| SHEB               | 10 <sup>8</sup>       | 0,03...2             | 4 · 10 <sup>-10</sup> (зависит от ν)   |

На детектор падает как сигнальное излучение с мощностью  $W_s$ , так и фоновое излучение с мощностью  $W_B$ . Фокусирующая оптика (линзы, зеркала и т. д.) используется для сбора излучения с большой площади и фокусировки ее на детектор. Часто оптический фильтр расположен до детектора для удаления фонового излучения в спектральном диапазоне длин волн, отличных от длины волны сигнала. Относительно малый электрический сигнал от детектора усиливается и генерируемый сигнал  $i_s$  в дальнейшем обрабатывается.

Можно показать, что для прямого детектирования с не фотопроводящими детекторами, когда преобладает шум флуктуаций фонового потока, минимально обнаруживаемый сигнал в условиях ограничения пороговых характеристик фоном (BLIP) определяется формулой

$$W_{S, dir}^{\min} = \left( \frac{2h\nu}{\eta} W_B \Delta f \right)^{0,5}, \text{ Вт}, \quad (19)$$

где  $n$  — квантовая эффективность детектора (эффективность связи) и  $\Delta f$  — полоса частот.

Способность обнаруживать малые сигналы для детекторов с прямым детектированием ограничена непреодолимым шумом фоновых фотонов, который не становится малым даже для космического фона. Характеристики этих детекторов ограничены фоновым шумом по сравнению с гетеродинными детекторами, характеристики которых ограничены квантовым шумом. Как правило, пороговая мощность, регистрируемая детекторами с прямым обнаружением, больше, чем для гетеродинных, что обусловлено вкладом других шумов, присутствующих в самом детекторе, в элементах схемы и усилителях.

### **6.3. Детекторы с гетеродинным обнаружением**

В гетеродинных детекторах сигналы с терагерцовыми или субтерагерцовыми частотами преобразуются в сигналы с более низкими промежуточными частотами (IF), предоставляя информацию об амплитуде и фазе входного излучения. На протяжении нескольких десятилетий такие детекторы применяются для высокоразрешающих спектроскопических исследований, космического дистанционного зондирования, а относительно недавно стали использоваться для формирования изображения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах.

Вдобавок к сигналу  $W_s$  и мощности фонового излучения  $W_B$  добавляется мощность излучения  $W_{LO}$  от локального осциллятора (например, лазера или любого другого вида узкополосного источника излучения). Локальный осциллятор LO необходим для обеспечения процесса оптического смешивания. Основными элементами миллиметровых или субмиллиметровых гетеродинных детекторов является смеситель, который необходим для смешивания  $W_s$  и  $W_{LO}$  и для генерации сигнала на промежуточной частоте. Ключевым компонентом смесителя является нелинейный смешивающий элемент (детектор), в котором сигнальная

мощность и мощность излучения локального осциллятора взаимодействуют при использовании некоторого вида диплексера (фильтра, предназначенного для объединения сигналов различных диапазонов частот, который служит для объединения двух портов в один). При использовании миллиметровой или субмиллиметровой матрицы выбор смесителя определяется доступностью источника мощности локального осциллятора в данном спектральном диапазоне, рабочей температурой смесителя и необходимой чувствительностью.

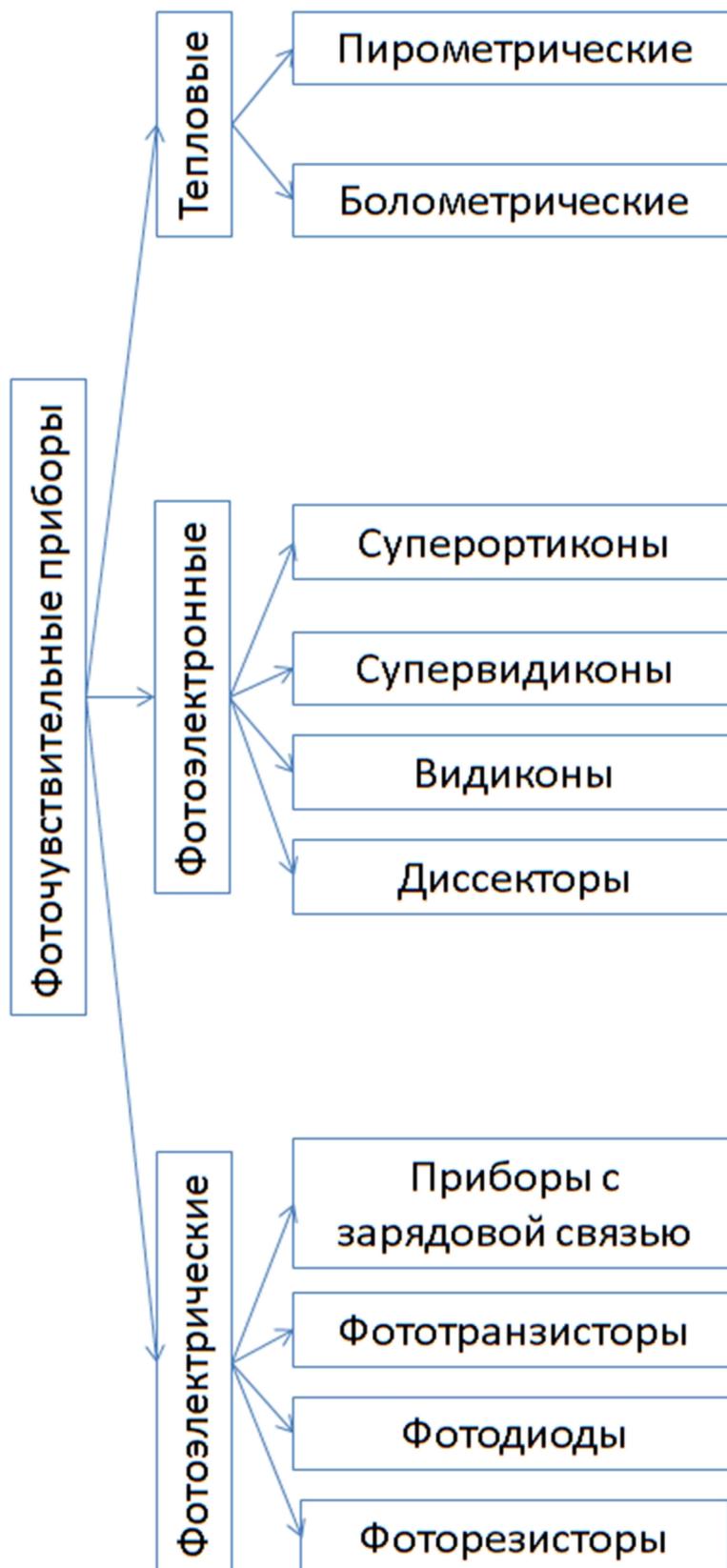
Основным преимуществом систем гетеродинного детектирования является то, что информация о частоте и фазе сигнала с частотой  $\nu_s$  преобразуется в частоту  $\nu_{IF}$ , которая находится в намного более низкочастотном диапазоне ( $\nu_{IF} \ll \nu_s$  соответствующем времени отклика электроники. Это преобразование ( $\nu_s \rightarrow \nu_{IF}$ ) называется гетеродинным переходом (конверсией). Если частоты сигнала и локального осциллятора равны между собой, то  $\nu_{IF} = 0$  (т. е. вырождается в постоянный сигнал), и такой процесс детектирования называется гомодинным переходом.

Для эффективного преобразования и обеспечения низкого шума в миллиметровом и субмиллиметровом спектральных диапазонах может быть использовано только несколько типов детекторов в качестве смесителей. Часто применяют приборы, имеющие сильную электрическую квадратичную нелинейность. Примерами являются прямосмещенные диоды Шоттки, сверхпроводник — диэлектрик — сверхпроводник (SIS) с туннельным переходом, полупроводниковые и сверхпроводниковые болометры НЕВ, сверхрешетки (SL).

## Список источников

1. Аксененко, М.Д., Приемники оптического излучения. Справочник. [Текст]/ М.Д Аксененко, Бараночников М.Л. -М.: Радио и связь,1987. - 296с.
2. Щука, А.А. Электроника [Текст]: учебное пособие/ А.А. Щука. -Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2005. -799 с.
3. Войцеховский, А.В. Детектирование в терагерцовом диапазоне. [Текст] А.В. Войцеховский, С.Н. Несмелов, Н.А. Кульчицкий, А.А. Мельников, П.П. Мальцев.// Нано и микросистемная техника. -2012. -№2. С. 28-35.
4. Самохвалов, М.К. Элементы и устройства оптоэлектроники[Текст]: учебное пособие/ М.К. Самохвалов.-Ульяновск, УлГТУ, -2003. - 125 с.
5. Guide for Infrared Spectroscopy. Bruker Optics. <http://www.bruker.com/products/molecular-vibrational-spectroscopy/opus-software/downloads.html>

## Приложение А. Классификация приемников оптического излучения



Приложение Б. Спектральный диапазон различных типов приемников излучения.

**DETECTORS**

