

И.П. Торшина, Ю.Г. Якушенков

**ВЫБОР ПРИЕМНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОПТИКО-
ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА**

Москва
Издательство МИИГАиК
2017

УДК 681.78.01
Т 59

Рецензенты:

Томский государственный университет (профессор, доктор физ.-мат. наук **И.В. Самохвалов**);
доцент, кандидат техн. наук **А.С. Филонов** (МИИГАиК)

Торшина И.П., Якушенков Ю. Г.

Т 59 Выбор приемника излучения при проектировании опτικο-электронного прибора: учебное пособие. — М.: Изд-во МИИГАиК, 2017. —58 с., ил.

ISBN 978-5-91188-074-3

Рассмотрены основные типы приемников излучения, используемые в современных опτικο-электронных приборах. Излагается обобщенная методология выбора приемника при проектировании опτικο-электронных приборов.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по дисциплинам «Опτικο-электронные приборы и системы», «Источники и приемники оптического излучения».

Пособие подготовлено в рамках выполнения государственного задания по проекту 793.

УДК 681.78.01

ISBN 978-5-91188-074-3

© Торшина И.П., Якушенков Ю.Г., 2017
© Издательство МИИГАиК, 2017

Сокращения, используемые в тексте

- ДСКЯ — структура на квантово-размерных ямах, работающая в длинноволновой области спектра
- ДФД — фотодиод, работающий в длинноволновой области спектра
- ИК — инфракрасный (ая)
- КМОП — комплементарная структура «металл-окисел-полупроводник»
- КПД — коэффициент полезного действия
- КРТ — соединение «кадмий–ртуть–теллур»
- КРЯ — квантово-размерная яма
- КФД — фотодиод, чувствительный в коротковолновой области спектра
- МДПИ — многодиапазонный приемник излучения
- МКС — микрокриогенная система
- МПИ — многоэлементный приемник излучения
- ОКС — оптический контактный слой
- ОЭП — оптико-электронный прибор
- ОЭПиС — оптико-электронные приборы и системы
- ОЭС — оптико-электронная система
- ПЗС — прибор с зарядовой связью
- ПОИ — приемник оптического излучения
- ПНВ — прибор ночного видения
- ПЧХ — пространственно-частотная характеристика
- СКЯ — структура на квантовых ямах
- СР-ФПУ — фотоприемное устройство на основе суперрешетки с деформированным слоем типа II
- ТЭО — термоэлектрический охладитель
- ТЭС — термоэлектрическая стабилизация
- УФ — ультрафиолетовый
- ФД — фотодиод
- ФКТ-ФПУ — фотоприемное устройство на квантовых точках
- ФПЗС — фотоэлектрический прибор с зарядовой связью
- ФПМ — функция передачи модуляции
- ФПУ — фотоприемное устройство
- ФР — фоторезистор
- ФТ — фототранзистор
- ФЭ — фотоэлемент
- ФЭУ — фотоэлектронный умножитель
- ЧКХ — частотно-контрастная характеристика
- ЭДС — электродвижущая сила
- ЭОП — электронно-оптический преобразователь
- ЭШРТ — эквивалентная шумам разность температур

Предисловие

В настоящее время оптико-электронные приборы и системы (ОЭП и ОЭС) используются при решении самых разнообразных задач, возникающих в различных отраслях народного хозяйства, науки, техники, а также при обеспечении обороноспособности страны. При проектировании ОЭП одной из часто возникающих проблем является выбор приемника оптического излучения (ПОИ), являющегося одним из важнейших узлов этих приборов или систем. На выбор того или иного типа приемника, как правило, влияет большое количество факторов, определяемых назначением ОЭП, условиями его функционирования, технико-экономическими требованиями, доступностью для разработчика того или иного вида приемника и мн. др. Поэтому выбор ПОИ становится актуальным уже на первых этапах проектирования ОЭП.

Целью настоящего пособия является разработка достаточно общей методики выбора ПОИ. Физические основы работы приемников различных типов и их конструктивные и эксплуатационные особенности неоднократно рассматривались в литературе [1–7 и др.]. Тем не менее авторы стремились очень кратко напомнить об особенностях основных типов ПОИ, поскольку без этого трудно выбрать наиболее подходящий тип и даже марку приемника для решения поставленной перед разработчиками прибора конкретной задачи.

Поскольку для сравнения различных типов и видов ПОИ необходимо определенное единообразие в описании их свойств, в настоящем пособии читателю предлагается достаточно общая система описания параметров и характеристик ПОИ, которая затем уточняется применительно к отдельным типам и видам ПОИ.

Пособие рассчитано прежде всего на студентов, выполняющих курсовые и выпускные квалификационные работы, а также начинающих разработчиков, знакомых с принципами действия, физическими основами работы и общей методологией расчета и ОЭП и ОЭС [1–3, 7–9].

1. Определение и классификация приемников излучения

Устройство, предназначенное для преобразования оптического сигнала в электрический, называют приемником оптического излучения (приемником излучения, фотоприемником), а также фотоприемным устройством (ФПУ), в котором в единую конструкцию объединены собственно приемник и схема предварительной обработки электрического сигнала, например схема предварительного усиления. Приемники можно разделить на две большие группы: биологические (глаз, кожный покров, растительность и др.) и физические, к которым относят устройства, преобразующие видимое, инфракрасное (ИК) или ультрафиолетовое (УФ) излучение в электрический сигнал (термоэлементы, болометры, фотоэлементы и фотоумножители, фотодиоды, фоторезисторы и некоторые другие), электронно-оптические преобразователи, фотопленки различных видов и другие фоточувствительные материалы [1–11].

Помимо преобразования одного вида энергии (оптической) в другой (электрическую) многие специальные приемники излучения и ФПУ выполняют в ОЭП и другие функции: преобразуют закон распределения освещенности (а не просто поток излучения) в соответствующий электрический сигнал, служат для анализа закона распределения освещенности в изображении, служат для определения координат изображений и их отдельных зон, служат для фильтрации полезного сигнала на фоне помех и т.д. Типичными ПИ такого типа являются электровакуумные передающие телевизионные трубки, а также их твердотельные аналоги, например ПЗС-матрицы.

В данном пособии рассматриваются наиболее общие свойства приемников, в первую очередь, как преобразователей энергии оптического излучения в электрический сигнал, важные для согласования приемника с другими звеньями ОЭП, а также для выполнения перечисленных выше функций.

Физические приемники излучения разделяются на два основных класса — фотоэлектрические (фотонные) и тепловые. Принцип действия фотоэлектрических ПИ основан на внешнем (фотоэлементы, фотоэлектронные умножители и др.) или внутреннем (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и др.) фотоэффекте. Все фотоэлектрические

приемники являются селективными, т.е. их чувствительность зависит от частоты (или длины волны) излучения, падающего на приемник.

В тепловых ПОИ энергия оптического излучения сначала преобразуется в тепловую, а лишь затем происходят изменения свойств приемника: возникает термоЭДС (термоэлементы), изменяется проводимость (болметры) или диэлектрическая постоянная (пироэлектрические ПИ), формируется чувствительный слой (эвапорографы) и т.д. Тепловые приемники неселективны.

Отдельными видами ПОИ являются: многодиапазонные (много-спектральные), работающие в двух или более диапазонах оптического спектра; многоэлементные ПОИ; координатные (позиционно-чувствительные) ПОИ, у которых выходной сигнал зависит от координат изображения на чувствительном слое, и ряд других.

Классификация ПОИ проводится также по диапазону спектральной чувствительности, степени охлаждения чувствительного слоя, быстродействию, физическим принципам действия (лавинные, инжекционные, гетеродинные, иммерсионные и др. ПОИ).

2. Параметры приемников излучения

Параметрами ПОИ обычно называют величины, характеризующие свойства приемника при работе его в определенных условиях и служащие критериями оценки его качества. Рассмотрим основные параметры ПОИ, с которыми наиболее часто приходится иметь дело разработчику ОЭП.

Чувствительность. В общем случае чувствительность приемника – это отношение изменения электрической величины на выходе ПОИ, вызванного падающим на него излучением, к количественной характеристике этого излучения в заданных эксплуатационных условиях. В зависимости от характеристики излучения различают чувствительность к потоку излучения s_e , чувствительность к световому потоку s_v , чувствительность к облученности s_{Ee} или к освещенности s_{Ev} .

Токовой чувствительностью s_I называется чувствительность ПОИ, у которого измеряемой электрической величиной является сила фототока, а вольтовой s_v — чувствительность при измерении напряжения на выходе ПОИ.

Интегральной чувствительностью ПОИ называется чувствительность к немонахроматическому излучению заданного спектрального состава, а *монохроматической чувствительностью* s_λ — чувствительность к монохроматическому излучению с длиной волны λ .

Различают также *статическую чувствительность*, определяемую отношением постоянных значений измеряемых на выходе и на входе ПОИ величин, и *дифференциальную* — отношение малых приращений этих величин. Иногда чувствительность характеризуется отношением числа квантов, вызвавших фотоэффект, к общему числу квантов излучения, попавших на чувствительную площадку ПОИ. Это отношение принято называть *квантовой эффективностью или квантовым выходом*. Поскольку сигнал на выходе цепи включения для некоторых типов ПОИ может зависеть от напряжения питания (например, у фоторезисторов), иногда вводят понятие об *удельной чувствительности*, которая представляет собой чувствительность, отнесенную к 1 В питающего напряжения.

Пороговые и шумовые параметры. Помимо полезного регулярного сигнала на выходе ПОИ всегда имеется хаотический сигнал со случайными амплитудой и частотой — шум приемника излучения.

Источники шума могут быть как внутренними, обусловленными процессами, происходящими в чувствительном слое ПОИ, так и внешними по отношению к ПОИ и ОЭП в целом, например, зависящими от флуктуаций приходящего сигнала. Шум не позволяет регистрировать сколь угодно малые сигналы, которые становятся незаметными на его фоне, т.е. ограничивает предельные возможности прибора. В рационально сконструированном ОЭП чувствительность к малым входным сигналам зависит только от уровня собственных (внутренних) шумов ПОИ.

Током или напряжением шума ПОИ называется среднее квадратическое значение флуктуации тока, протекающего через ПОИ, или напряжения на заданной нагрузке в его цепи включения в указанной полосе частот, в отсутствие облучения чувствительной площадки ПОИ. Основные виды шумов для ПОИ (теплового, генерационно-рекомбинационного, мерцания, радиационного, геометрического) и формулы для их расчета приведены в [1–4, 6, 8].

Порогом чувствительности приемника Φ_{Π} в заданной полосе частот называется среднее квадратическое значение первой гармоники попадающего на ПОИ модулированного потока излучения с заданным спектральным распределением, при котором среднее квадратическое значение первой гармоники напряжения (тока) сигнала равно среднему квадратическому напряжению (току) шума в заданной полосе частот на частоте модуляции потока:

$$\Phi_{\Pi} = \frac{\sqrt{V_{\text{ш}}^2}}{s_{\text{в}}} \quad \text{или} \quad \Phi_{\Pi} = \frac{\sqrt{I_{\text{ш}}^2}}{s_{\text{I}}}. \quad (1)$$

Применительно к фотоэлементам и фотоумножителям величину Φ_{Π} называют эквивалентом шума. Иногда порог чувствительности ПОИ характеризуют величиной, эквивалентной шумам облученности или освещенности чувствительного слоя E_{Π} .

Поскольку шум зависит от ширины полосы частот Δf , в которой его измеряют, то Φ_{Π} зависит от Δf . Для более удобного сравнения различных приемников введено понятие *порога чувствительности ПОИ в единичной полосе частот* — отношение величины Φ_{Π} к полосе частот:

$$\Phi_{\Pi\Pi} = \frac{\Phi_{\Pi}}{\sqrt{\Delta f}}.$$

Величина, обратная $\Phi_{\Pi\Pi}$, называется *обнаружительной способностью приемника*:

$$D = \frac{1}{\Phi_{\Pi\Pi}}.$$

Следует отметить, что этот параметр неоднозначен для различных конструкций ПОИ одного и того же типа, так как для различных площадей A чувствительного слоя параметры s_v и $\bar{V}_{ш}^2$ непостоянны. Поэтому более удобно пользоваться *удельной обнаружительной способностью приемника*:

$$D^* = s_v \frac{\sqrt{A\Delta f}}{\bar{V}_{ш}}. \quad (2)$$

Следует указать, что все перечисленные параметры рассматриваются по отношению к излучателю с одной и той же температурой (температурой паспортизации ПОИ) и при постоянной температуре чувствительного слоя ПОИ. Если $\Phi_{ш}$, D и D^* измеряются по отношению к монохроматическому излучению, то вводится индекс, обозначающий длину волны, например D_{λ}^* .

Поскольку величины s_v и $\bar{V}_{ш}^2$ являются в общем случае функциями длины волны λ , то и D^* также является функцией λ . Наиболее часто встречается случай, когда радиационный шум гораздо меньше других составляющих шума приемника, т.е. зависимость $\bar{V}_{ш}^2$ от λ можно пренебречь. Для этого случая

$$D^*(\lambda) = D_{\lambda}^* = \frac{\sqrt{A\Delta f}}{\bar{V}_{ш}} s_v(\lambda) = \frac{\sqrt{A\Delta f}}{\bar{V}_{ш}} s_{v\lambda}.$$

В некоторых расчетах удобно пользоваться приближением, описываемым линейной зависимостью монохроматической обнаружительной способности D_{λ}^* от длины волны λ , т.е.

$$D_{\lambda}^* = \frac{\lambda}{\lambda_{\max}} D_{\lambda_{\max}}^*,$$

где λ_{\max} — длина волны, на которой D_{λ}^* имеет максимальное значение.

Инерционность. Это свойство ПОИ оценивается его постоянной времени τ , в качестве которой принимают время нарастания $\tau_{0,1...0,9}$ — интервал времени между точками переходной характеристики ПОИ, за который сигнал на выходе ПОИ изменяется при внезапном облучении от 0,1 до 0,9 своего установившегося значения при длительном облучении, или время спада $\tau_{0,9...0,1}$ — интервал времени уменьшения сигнала после прекращения облучения ПОИ от 0,9 до 0,1 его установившегося значения.

Постоянная времени τ определяет граничную частоту модуляции сигнала на входе фотоприемника $f_{гп}$ — частоту синусоидально моду-

лированного потока излучения, падающего на ПОИ, при которой его чувствительность снижается до значения 0,707 чувствительности при немодулированном излучении.

Граничную частоту модуляции определяют по-разному, в зависимости от допуска на падение чувствительности s . Так, при $s(f_{гр})=0,16s(0)$ частота $f_{гр}=1/\tau$, а при $s(f_{гр})=0,71s(0)$ — $f_{гр}=1/(2\pi\tau)$. Часто принимают $f_{гр}=1/(3\tau)$.

С о п р о т и в л е н и е п р и е м н и к а. Этот параметр особенно важен при выборе или расчете цепи включения ПОИ. Зная его, можно найти оптимальное сопротивление нагрузки ПОИ. Для различных ПОИ используются разные параметры, с помощью которых можно оценить сопротивление чувствительного элемента. Например, для фоторезисторов в качестве параметра рассматривается *темновое сопротивление* R_T — сопротивление приемника в случае отсутствия облучения приемника. Для фотодиодов обычно приводят значение *дифференциального сопротивления* R_d , которое равно отношению малых приращений напряжения сигнала к фототоку при заданных эксплуатационных условиях, например, при заданной облученности ПОИ.

При согласовании приемника с последующей электронной схемой разработчику приходится учитывать величину R_T (или R_d) при выборе типа усилителя и схемы связи приемника с усилителем.

С п е к т р а л ь н ы е п а р а м е т р ы (параметры спектральной характеристики). Коротковолновая и длинноволновая границы спектральной чувствительности ПОИ определяются как наименьшая и наибольшая, соответственно, длины волн монохроматического излучения, при которых чувствительность ПОИ равна 0,1 ее максимального значения.

Эффективность приема излучения в диапазоне $\lambda_1 \dots \lambda_2$ можно оценить с помощью величины, называемой *коэффициентом использования* или спектральным КПД приемника:

$$\varphi = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda} d\lambda},$$

где s_{λ} — спектральная характеристика чувствительности ПИ; Φ_{λ} — спектральная плотность потока излучения, падающего на ПИ.

Строго говоря, коэффициент использования можно считать параметром ПИ только в том случае, если рассматривать его по отношению к какому-то определенному источнику излучения, например, эталонному.

Г е о м е т р и ч е с к и е, э л е к т р и ч е с к и е и д р у г и е п а р а м е т р ы. Для оценки конструктивных особенностей ПИ при работе его в составе ОЭП необходимо знать такие его параметры, как *площадь и конфигурация чувствительного слоя, оптические свойства* (коэффи-

циенты поглощения, преломления и отражения), *емкость, напряжение питания* (рабочее напряжение), *температура чувствительного слоя* и ряд других параметров, описывающих его свойства.

Отдельные группы параметров характеризуют специфические свойства различных типов приемников, например, фоторезисторов, фотодиодов, болометров, координатных и многоэлементных фотоприемников и др. [1–6].

3. Характеристики приемников излучения

Зависимость, определяющая изменение какого-либо параметра приемника при изменении внешнего воздействия на него, называется характеристикой.

Спектральные характеристики. Вследствие избирательности поглощения энергии излучения большинством ПОИ их чувствительность к монохроматическому излучению меняется с изменением длины волны падающего потока. Эту чувствительность называют *спектральной*, а зависимость ее от длины волны падающего на приемник монохроматического потока излучения — *спектральной характеристикой чувствительности* (рис. 1).

Человеческий глаз неодинаково чувствителен к излучению различных длин волн. Если для некоторого излучателя измерить поток излучения $\Phi_{\text{эл}}$ в бесконечно малом диапазоне длин волн $\Delta\lambda$ и световой поток $\Phi_{\text{вл}}$, воспринимаемый глазом в том же диапазоне, то отношение значения светового потока к значению потока излучения будет характери-

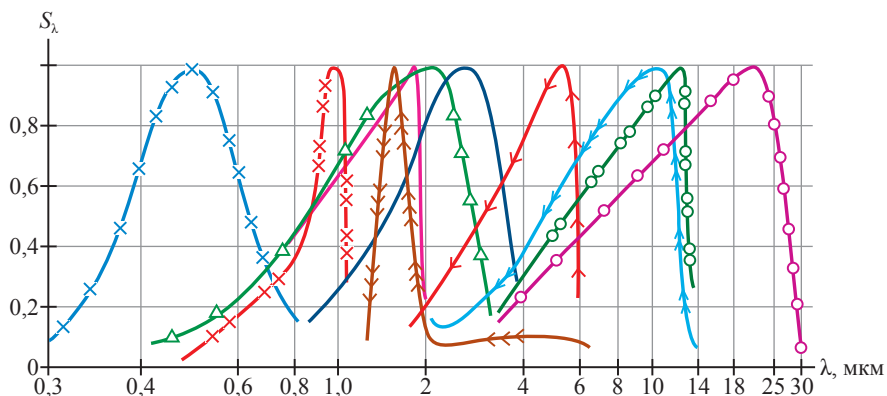


Рис. 1. Спектральные характеристики некоторых ПОИ:

—×— сернисто-кадмиевый фоторезистор CdS; —×— кремниевый фотодиод; —— германиевый фотодиод; —△— неохлаждаемый фоторезистор PbS₂₉₅; —— охлаждаемый фоторезистор PbS₇₈; —<— охлаждаемый фоторезистор InSb₇₈; —<<— глубокоохлаждаемый (T=30 K) фоторезистор Ge; —○— охлаждаемый фотоприемник (фоторезистор, фотодиод) Hg_{1-x}Cd_xTe при x=0,95 и температуре охлаждения T=70 K; —○— то же, при x=0,1 и температуре охлаждения T=83 K; —<<<— охлаждаемый фоторезистор Ge:Au₇₈

звать *спектральную световую эффективность* $K_\lambda = K(\lambda) = \Phi_{e\lambda} / \Phi_{e\lambda}$. Отношение K_λ для какой-либо λ к максимальному значению K_M (для дневного зрения $K_M = 683$ лм/Вт) называется *относительной спектральной световой эффективностью* V_λ . Графики V_λ называют *кривыми спектральной чувствительности глаза*, или *кривыми видности* (рис. 2). Очевидно, что световой поток

$$\Phi_v = \int_0^\infty K_\lambda \Phi_{e\lambda} d\lambda = \int_{0,4}^{0,76} K_\lambda \Phi_{e\lambda} d\lambda = 683 \int_{0,4}^{0,76} V_\lambda \Phi_{e\lambda} d\lambda.$$

На рис. 3 и 4 приведены спектральные характеристики основных типов фотокатодов и катодолуминесцентных экранов, применяемых в электронно-оптических преобразователях (ЭОП) [11].

Вольтовые характеристики. Вольтовые характеристики выражают зависимости чувствительности, тока и напряжения шума, удельной обнаружительной способности и других параметров от напряжения, приложенного к приемнику. Вольтовая характеристика

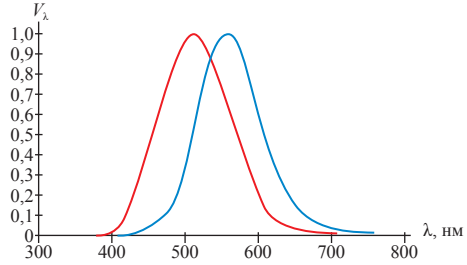


Рис. 2. Кривые относительной спектральной чувствительности глаза:
— дневное зрение; — сумеречное зрение

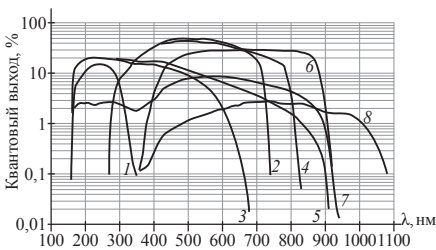


Рис. 3. Спектральные характеристики основных типов фотокатодов ЭОП:

- 1 — CsTe; 2 — GaAsP; 3 — SbNa: Cs (двухщелочной);
- 4 — GaAsP (с продленной чувствительностью в красной области спектра); 5 — Na K Sb: Cs (многощелочной);
- 6 — GaAs:Cs (с отрицательным электронным средотвтом); 7 — Na K Sb:Cs (с продленной чувствительностью в красной области спектра); 8 — InGaAs:Cs (с отрицательным электронным средотвтом)

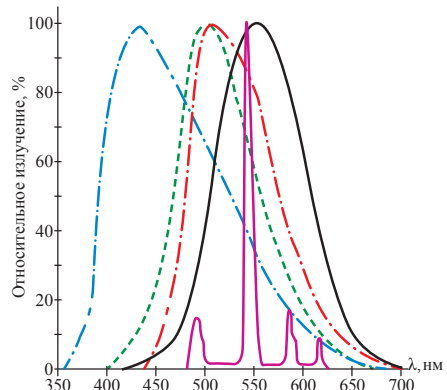


Рис. 4. Спектральные характеристики катодолуминесцентных экранов [11]:

- спектральная чувствительность глаза;
- К-71; — КС-525;
- К-60; — КФЛ-544

чувствительности $s(U)$ определяется при фиксированном потоке излучения, падающего на ПОИ.

Зависимости параметров от мощности излучения. К ним относятся: *люкс-омическая характеристика фоторезистора* — зависимость светового сопротивления фоторезистора от освещенности); *энергетические характеристики* — зависимости силы тока I или напряжения V сигнала от потока излучения, падающего на ПОИ; *световая характеристика фотоумножителя* — зависимость анодного тока фотоумножителя от значения потока и ряд других.

Зная энергетические характеристики ПОИ, можно легко определить его интегральную (вольтовую, токовую) чувствительность, которая является крутизной зависимости $U=f(\Phi)$ или $I=f(\Phi)$.

Селективные ПОИ при увеличении потока, падающего на них, ведут себя подобно глазу — их чувствительность падает. Поскольку для большинства таких приемников энергетические характеристики нелинейны, т.е. крутизна в различных точках неодинакова, чувствительность ПОИ необходимо определять при заданной освещенности (облученности) его приемной площадки, а также при заданном спектральном составе излучения. При других освещенностях значение чувствительности может быть иным, поэтому при изменениях потока, падающего на ПОИ, следует учитывать изменение чувствительности, пользуясь энергетической характеристикой.

Частотные характеристики. Зависимость чувствительности ПОИ от частоты модуляции падающего на него потока излучения называется *частотной характеристикой чувствительности*. Эта характеристика связана с постоянной времени приемника τ . Максимально допустимая (граничная) частота модуляции $f_{гр}$ зависит именно от значения τ .

Зависимость D^* от частоты модуляции потока излучения называется *частотной характеристикой удельной обнаружительной способности*.

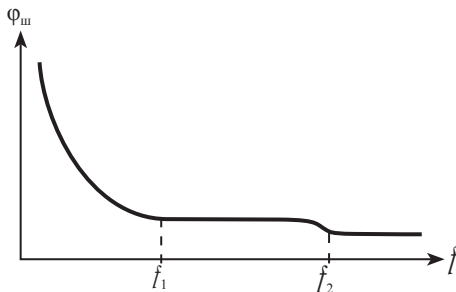


Рис. 5. Типичный спектр мощности шума ПОИ

Иногда к частотным характеристикам относят *спектральные плотности тока* или *напряжения шума* ПОИ — распределения плотности $\varphi_{ш}$ дисперсии тока или напряжения шума приемника по частотам. Эти зависимости называют также *спектром мощности шума*. Типичная зависимость такого рода для полупроводниковых ПОИ приведена на рис. 5.

В области «избыточного» шума, обусловленного главным образом контактными явлениями и флуктуациями скорости рекомбинации носителей (на частотах $0 \dots f_1$), спектр шума подчиняется закону $1/f^x$ причем $x \approx 1$. Обычно граница этой области f_1 не превышает 1000 Гц.

В области частот $f_1 \dots f_2$, где практически имеет место равномерное распределение, основным является генерационно-рекомбинационный шум, а в области выше f_2 (десятки и более килогерц) — тепловой.

Зная подобные характеристики для конкретных приемников, можно выбрать частоту модуляции сигнала и полосу пропускания системы так, чтобы по возможности уменьшить влияние собственных шумов ПОИ на чувствительность прибора. С точки зрения уменьшения дисперсии шума $\sigma_{ш}$ в заданной полосе Δf целесообразно увеличивать рабочую частоту модуляции f_0 и сужать полосу пропускания Δf системы, так как

$$D_{ш} = \sigma_{ш}^2 = \int_{f_0 - \Delta f/2}^{f_0 + \Delta f/2} \varphi_{ш}(f) df.$$

Температурные характеристики. Это — зависимости, определяющие изменение различных параметров ПОИ, например, тока и напряжения шума, сопротивления и чувствительности, при изменении температуры его чувствительного слоя.

Фоновые характеристики. Это — зависимости параметров (сопротивления, чувствительности, тока и напряжения шумов, удельной обнаружительной способности) от немодулированного потока излучения фона.

Временные и пространственные характеристики. К ним обычно относят: *переходные характеристики*, описывающие изменение сигнала на выходе ПОИ при внезапном облучении или затемнении его чувствительного слоя; *зонную характеристику* — распределение чувствительности по площадке приемника; *угловую характеристику чувствительности* — ее зависимость от угла падения лучей на чувствительный слой ПОИ, а для координатных ПОИ — *координатную характеристику*, определяющую зависимость сигнала на выходе ПОИ от координаты изображения (пятна) на чувствительном слое, и *временной дрейф нулевой точки координатного ПОИ* — смещение нулевой точки координатной характеристики при постоянной температуре в течение заданного интервала времени. К временным характеристикам можно отнести также *зависимости изменения параметров приемника во времени*, характеризующие их стабильность.

Многоэлементные ПОИ часто описываются также *пространственно-частотной характеристикой* — ПЧХ (*функцией передачи модуляции* — ФПМ), модуль которой (*частотно-контрастная характеристика* — ЧКХ) определяет качество передачи контраста изображения в виде функции пространственной частоты проецируемой на ПОИ штриховой миры.

4. Паспортизация приемников. Пересчет их параметров

Так как параметры и характеристики ПОИ существенно зависят от условий их эксплуатации, спектрального состава и других параметров потока, необходимо четко оговорить некоторые стандартные (нормальные) условия, в которых следует проводить их измерения (паспортизацию). Кроме того, параметры и характеристики ПОИ разных типов и назначения резко различаются между собой, поэтому ограничиться для всех ПОИ одними и теми же стандартными условиями не представляется возможным.

Приемники, работающие в средней и длинноволновой части ИК спектра, т.е. в диапазоне 1,5...20 мкм (обычно это охлаждаемые ПОИ), калибруют по излучателю — черному телу с температурой 373 К. Неохлаждаемые фоторезисторы, работающие в ИК спектральном диапазоне до 5 мкм, калибруют по черному телу с температурой 573 К. Параметры ПОИ, работающих в видимом диапазоне, определяют по лампам накаливания — источникам *A* с цветовой температурой вольфрамовой нити $T_{ц} = 2856$ К, источникам *B* ($T_{ц} = 4800$ К) и *C* ($T_{ц} = 6500$ К).

В зависимости от инерционности ПОИ и спектра шумов устанавливаются различные частоты модуляции и полосы пропускания при их паспортизации. Чувствительность многих фоторезисторов определяется при частотах модуляции 400 и 500 Гц и полосе пропускания измерительной установки в несколько десятков герц. Весьма инерционные тепловые ПОИ паспортизуются при частотах модуляции потока в несколько герц, а малоинерционные ПОИ — при частотах 900...1000 Гц.

Оговариваются также температура окружающей среды, влажность, давление и такие параметры измерительной установки, как входное сопротивление $R_{вх}$ (обычно $R_{вх} \gg R_{г}$) и уровень шума $\bar{V}_{ш}$, приведенный к выходу ПОИ (обычно уровень шума $\bar{V}_{ш}$ установки должен быть не менее чем в два раза меньше уровня шумов исследуемого ПОИ).

Иногда некоторые важнейшие условия измерений параметра приводятся в качестве индексов при его обозначении. Например, $D_{500,90,1}^*$ означает, что измерение D^* велось по черному телу с температурой 500 К при частоте модуляции 90 Гц и было отнесено к полосе пропускания 1 Гц.

В реальных условиях работы ПОИ принимает поток, как правило, отличающийся по своему спектральному составу от потока, используемому при паспортизации. В ряде случаев ПОИ, откалиброванный по отношению к излучению со сплошным спектром (например, по отношению к излучению черного тела), работает с монохроматическим потоком (например, потоком, приходящим от лазера). Поэтому в каждом таком случае параметры ПОИ должны быть пересчитаны для новых условий. Рассмотрим характерный пример пересчета чувствительности ПОИ.

Пусть имеется ПОИ с чувствительностью s_{v1} к излучению со спектральной плотностью потока излучения $\Phi_{\lambda 1}$. Требуется определить его чувствительность s_{v2} к излучению источника, описываемому функцией $\Phi_{\lambda 2}$, т.е., например, к излучателю с другой температурой.

Выражение для чувствительности ПОИ в общем виде можно записать как

$$s_v = \frac{\Delta V}{\Delta \Phi} = s_{\lambda \max} \frac{\int_{\lambda_m}^{\lambda_n} s_{\lambda} \tau_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_m}^{\lambda_n} \tau_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda},$$

где Φ_{λ} — функция, описывающая распределение потока, пришедшего на ПОИ в диапазоне $\lambda_m \dots \lambda_n$ по спектру длин волн; τ_{λ} — спектральный коэффициент пропускания среды; s_{λ} — спектральная характеристика чувствительности ПОИ; $s_{\lambda \max}$ — абсолютное значение спектральной чувствительности в максимуме спектральной характеристики ПОИ.

При измерении чувствительности s_{v1} работа происходит в среде со спектральным пропусканием $\tau_{\lambda 1}$ в диапазоне $\lambda_1 \dots \lambda_2$, а при работе по излучателю, свойства которого описываются функцией $\Phi_{\lambda 2}$ — в среде с пропусканием $\tau_{\lambda 2}$ в диапазоне $\lambda_3 \dots \lambda_4$, причем $\tau_{\lambda 2}$ может учитывать и пропускание оптики прибора.

Если в случае калибровки ПОИ и при его работе в реальных условиях рабочая точка энергетической характеристики для монохроматического потока лежит в линейной зоне, т.е. $s_{\lambda \max 1} = s_{\lambda \max 2} = s_{\lambda \max}$, то, очевидно,

$$s_{v1} = s_{\lambda \max} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s_{\lambda} \tau_{\lambda 1} \Phi_{\lambda 1} d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \tau_{\lambda 1} \Phi_{\lambda 1} d\lambda}; \quad s_{v2} = s_{\lambda \max} \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} s_{\lambda} \tau_{\lambda 2} \Phi_{\lambda 2} d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \tau_{\lambda 2} \Phi_{\lambda 2} d\lambda};$$

$$S_{\lambda \max} = S_{\nu 1} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda 1} \Phi_{\lambda 1} d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} s_{\lambda} \tau_{\lambda 1} \Phi_{\lambda 1} d\lambda} = S_{\nu 2} \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \tau_{\lambda 2} \Phi_{\lambda 2} d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} s_{\lambda} \tau_{\lambda 2} \Phi_{\lambda 2} d\lambda},$$

откуда искомая величина

$$S_{\nu 2} = S_{\nu 1} \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} s_{\lambda} \tau_{\lambda 2} \Phi_{\lambda 2} d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \tau_{\lambda 2} \Phi_{\lambda 2} d\lambda} \cdot \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda 1} \Phi_{\lambda 1} d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} s_{\lambda} \tau_{\lambda 1} \Phi_{\lambda 1} d\lambda}. \quad (3)$$

В том случае, когда берутся одинаковые пределы интегрирования по λ , а величины $\tau_{\lambda 1}$ и $\tau_{\lambda 2}$ принимаются постоянными, т.е. не зависящими от λ ,

$$s_{\lambda 2} = s_{\lambda 1} \varphi_2 / \varphi_1, \quad (4)$$

где φ_1 и φ_2 — коэффициенты использования (см. раздел 2).

Часто в практике подобных расчетов приходится переходить от параметров, размерность которых выражена в световых единицах, к параметрам с размерностью в энергетических единицах. Например, значение токовой чувствительности кремниевого фотодиода приводится в единицах ампер на люмен, в то время как максимум его спектральной характеристики чувствительности приходится на ближнюю ИК область, где поток измеряется не в люменах, а в ваттах. Паспортная чувствительность s_I в ампер на люмен определяется по источнику — лампе с определенными температурой нити накала T_1 ($T_1 = 2856$ К) и спектром $\Phi_{\lambda 1}$, и может быть с учетом формулы для светового потока представлена для диапазона $\lambda_1 \dots \lambda_2$ как

$$s_{I2} = \frac{\Delta I}{\Delta \Phi_{\nu}} = s_{I \max} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s_{\lambda} \tau_{\lambda 1} \Phi_{\lambda 1} d\lambda}{683 \int_{0,4}^{\lambda_1} V_{\lambda} \tau_{\lambda 1} \Phi_{\lambda 1} d\lambda}.$$

Рассуждая так же, как и при выводе (3), можно получить следующее выражение для токовой чувствительности s_{I2} , определенной для излучателя со спектром $\Phi_{\lambda 2}$ в диапазоне $\lambda_3 \dots \lambda_4$:

$$s_{I2} = s_{I1} \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} s_{\lambda} \tau_{\lambda 2} \Phi_{\lambda 2} d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \tau_{\lambda 2} \Phi_{\lambda 2} d\lambda} \cdot \frac{\int_{\lambda_1}^{0,76} V_{\lambda} \tau_{\lambda 1} \Phi_{\lambda 1} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{0,4} s_{\lambda} \tau_{\lambda 1} \Phi_{\lambda 1} d\lambda}. \quad (5)$$

Аналогично можно пересчитать и другие параметры, изменяющиеся с переходом к излучателю с новым спектральным составом излучения. Например, для пересчета порога чувствительности можно воспользоваться зависимостью (4), и если радиационный шум ПОИ мал по сравнению с другими шумовыми составляющими, то формула для величин Φ_{II} в соответствии с (1) и (4) будет выглядеть следующим образом:

$$\Phi_{II2} = \Phi_{II1} \varphi_1 / \varphi_2. \quad (6)$$

Результаты пересчета могут быть одним из важнейших факторов при выборе ПОИ для конкретных условий работы ОЭП.

Общую методику пересчета параметров можно свести к следующей последовательности действий:

1) составляется развернутое (через спектральные плотности отдельных функций) выражение для известного (паспортного) параметра ПОИ с учетом его размерности;

2) такое же выражение составляется для искомого — пересчитываемого параметра с учетом отличий в условиях работы ПОИ и размерности по сравнению с паспортным параметром;

3) полученная система из двух уравнений решается относительно искомой величины.

Эта же методика может быть использована и при пересчете интегральных параметров в спектральные, т.е. при определении чувствительности ПОИ к монохроматическому излучению. Пусть, например, требуется определить чувствительность ПОИ, откалиброванного по излучению известного спектрального состава $\Phi_{\lambda 2}$ для какой-либо длины волны λ (для монохроматического излучения) в абсолютных единицах $s_{\lambda \text{абс}} = s_{\lambda \text{абс}}(\lambda)$, если известны кривая спектральной чувствительности приемника s_{λ} , построенная в относительных единицах, и значение абсолютной интегральной чувствительности $s_{\Sigma} = s_{\text{инт}}$, измеренное в диапазоне $\lambda_m \dots \lambda_n$, включающем λ .

Поскольку интегральную чувствительность для диапазона $\lambda_m \dots \lambda_n$ можно выразить как

$$s_{\Sigma} = s_{\lambda \text{max}} \frac{\int_{\lambda_m}^{\lambda_n} s_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_m}^{\lambda_n} \Phi_{\lambda} d\lambda},$$

то максимальная монохроматическая абсолютная чувствительность

$$s_{\lambda \max} = s_{\Sigma} \frac{\int_{\lambda_m}^{\lambda_n} \Phi_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_m}^{\lambda_n} s_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda}. \quad (7)$$

Так как $s_{\lambda} = s_{\lambda \text{абс}} / s_{\lambda \text{макс}}$, то после подстановки в (7) $s_{\lambda \text{макс}}$ искомая абсолютная спектральная чувствительность на длине волны λ определится как

$$s_{\lambda \text{абс}} = s_{\lambda} s_{\Sigma} \frac{\int_{\lambda_m}^{\lambda_n} \Phi_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_m}^{\lambda_n} s_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda}. \quad (8)$$

Чувствительность s_{Σ} для всего диапазона длин волн, в котором работает ПОИ, приводится обычно в его паспорте (интегральная, вольтовая или токовая чувствительность).

По аналогии для световых величин

$$s_{\lambda \text{абс}} = 683 s_{\lambda} s_{\Sigma} \frac{\int_{\lambda_m}^{0,76} V_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_m}^{0,4} s_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda}. \quad (9)$$

Здесь $s_{\lambda \text{абс}}$ выражена в амперах на ватт (А/Вт) или вольтах на ватт (В/Вт); s_{Σ} — в амперах на люмен (А/лм) или вольтах на люмен (В/лм). Величина $s_{\lambda \text{абс}}$ зависит не от вида источника (черное тело, лазер и т.д.), относительно которого она определяется, а лишь от квантового выхода на данной длине волны. В [1–3] приведены некоторые удобные для практических расчетов формулы.

Порог чувствительности в ваттах для монохроматического излучения с длиной волны λ_i определяется как

$$\Phi_{\text{П}\lambda_i} = \Phi_{\text{П}} \frac{\int_{\lambda_m}^{\lambda_n} s_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda}{s_{\lambda_i} \int_{\lambda_m}^{\lambda_n} \Phi_{\lambda} d\lambda}, \quad (10)$$

а для монохроматического светового потока в люменах

$$\Phi_{\text{П}\lambda_i} = \Phi_{\text{П}} \frac{\int_{\lambda_m}^{\lambda_n} s_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda}{683 s_{\lambda_i} \int_{\lambda_m}^{\lambda_n} V_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda}. \quad (11)$$

Для перехода к квантовой форме представления порогового потока $\Phi_{\text{П}\lambda_i}$ необходимо разделить (10) на энергию кванта, т.е.

$$\Phi_{\text{П}\lambda_i}^q = \frac{\Phi_{\text{П}\lambda_i}}{h\nu_i} = \frac{\Phi_{\text{П}\lambda_i} \lambda_i}{hc}. \quad (12)$$

Для вычисления интегралов во всех приведенных выше выражениях можно воспользоваться любым из известных способов графического интегрирования. Аналитический способ чаще всего неприемлем, так как зависимость s_{λ} трудно описать какой-либо функцией, а, кроме того, интегрирование функции Φ_{λ} также представляется громоздкой операцией. Можно значительно облегчить расчет, если заменить интегралы суммами, например, для (8):

$$S_{\lambda\text{абс}} = s_{\lambda} s_{\Sigma} \frac{\sum_{\lambda_m}^{\lambda_n} \Phi_{\lambda}}{\sum_{\lambda_m}^{\lambda_n} s_{\lambda} \Phi_{\lambda}}. \quad (13)$$

Если в рассматриваемом спектральном диапазоне спектральный коэффициент пропускания оптических сред — величина непостоянная, то в формулы (7)–(13) следует ввести функции τ_{λ} , как в (3).

5. Основные виды приемников излучения, применяемых в оптико-электронных приборах

Рассмотрим краткую сравнительную характеристику основных групп и видов ПОИ, наиболее широко используемых в оптико-электронном приборостроении, имея в виду, что подробному изложению физических принципов их работы, особенностей схем включения и других вопросов посвящена многочисленная литература [1–6, 10, 11 и др.]. Здесь же основное внимание уделяется основным достоинствам и недостаткам ПОИ различных типов, важным для выбора приемника для конкретного ОЭП.

5.1. Приемники с внешним фотоэффектом

Фотоэмиссионные ПОИ. К этим приемникам относятся вакуумные и газонаполненные фотоэлементы (ФЭ), фотоэлектронные умножители (ФЭУ), а иногда и электронно-оптические преобразователи (ЭОП). В основе внешнего фотоэлектрического эффекта лежит эмиссия фотоэлектронов под действием падающего излучения. Так как энергия фотонов падающего излучения уменьшается с увеличением длины волны (уменьшением частоты электромагнитных колебаний), для каждого вещества фотокатода существует длинноволновая («красная») граница внешнего фотоэффекта, при которой энергия фотоэлектрона не превышает работу выхода, необходимую для эмиссии электрона.

Разрешение сигналов во времени у ФЭ и ФЭУ определяется временем движения электронов от места их образования до поверхности фотокатода, временем их пролета от фотокатода до анода и переходными процессами в цепи нагрузки фотоприемника. В совокупности эти времена малы; соответственно малы и постоянные времена этих ПОИ — они достигают $10^{-10} \dots 10^{-11}$ с, а у специальных ФЭ и ФЭУ еще меньше.

Характеристики некоторых часто встречающихся на практике фотокатодов приведены в табл. 1 [4, 11]. Параметры современных ПОИ этого класса позволяют применять их как для регистрации чрезвычайно малых световых потоков ($10^{-13} \dots 10^{-14}$ лм), так и для приема очень мощных излучений. Спектральные характеристики ФЭ и ФЭУ определяются типом фотокатода, а их постоянная времени обычно не превышает 10^{-9} с. Токовая чувствительность ФЭУ зависит от числа каскадов умножения и

напряжения питания и может достигать нескольких десятков ампер на люмен. При этом важно отметить их относительно большой линейный участок световых характеристик. Линейная зависимость выходного тока от освещенности на фотокатоде иногда сохраняется при освещенности более 10^3 лк.

К недостаткам ФЭУ следует отнести необходимость иметь высокое стабилизированное питающее напряжение (сотни и тысячи вольт), возможность потери эмиссионной способности некоторых типов ФЭУ при освещении значительными световыми потоками, необходимость защиты от внешних магнитных и электростатических полей, сравнительную сложность схемы включения и большие габаритные размеры по сравнению с другими приемниками. Шумы фотоэмиссионных ПОИ зависят главным образом от дробового шума и низкочастотного фликкер-эффекта (эффекта мерцания). Следует также учитывать шум, обусловленный вторичной эмиссией, и шум в нагрузке.

Т а б л и ц а 1

Характеристики некоторых фотокатодов [4, 11]

Тип фотокатода	Максимум спектральной чувствительности, мкм	$\lambda_{гр}$, мкм	Интегральная (токовая) чувствительность, мкА/лм	Плотность темнового тока при 20°C, А/см ²	Постоянная времени, с
Кислородно-сурьмяно-цезиевый	0,4...0,8	1,3	20...60	10^{-12}	10^{-9}
Сурьмяно-цезиевый	0,4...0,5	0,8	120...180	10^{-15}	
Многощелочной	0,4...0,6	0,9	150...250	10^{-16}	
С отрицательным электронным средством	0,4...0,8	1,1...1,4	1300...1700	10^{-13}	

У фотоэмиссионных ПОИ можно наблюдать весьма значительную неравномерность чувствительности по площади фотокатода. Основной метод борьбы с ней — создание такой оптической схемы прибора, при которой фотокатод облучается не в малой зоне, а по всей площади, т.е. необходимо применение конденсоров [1–3].

Электронно-оптические преобразователи (ЭОП). Электронно-оптические преобразователи являются основным элементом ОЭП ночного видения [11].

В последние годы все большее распространение получают гибридные преобразователи, в которых используются фотоприемные модули на основе электронно-чувствительных ПЗС-матриц. Схема одного из таких модулей показана на рис. 6 [11].

5.2. Приемники с внутренним фотоэффектом

Фоторезисторы.
В основе работы фоторезистора (ФР) лежит изменение электропроводности чувствительного слоя при облучении.

Наряду с полезным сигналом, поступающим обычно на ФР в виде модулированного потока, часто присутствует посторонний мешающий фон. Наличие последнего вызывает уменьшение сопротивления фоторезистора R_{ϕ} даже при отсутствии сигнала, что необходимо учитывать при выборе значения сопротивления нагрузки приемника.

Задача оптимального выбора параметров цепи включения облегчается, если известны энергетические и фоновые характеристики приемника.

Иногда более целесообразно использовать зависимость изменения сопротивления приемника от его освещенности, т.е. $R_{\phi} = f(E)$. Эта характеристика позволяет выбрать сопротивление нагрузки $R_{н}$, находящееся в оптимальном соотношении с сопротивлением приемника R_{ϕ} при различных освещенностях чувствительного слоя.

Значения интегральной и вольтовой чувствительности, измеренные при отсутствии постоянного фона, будут отличаться от значений, полученных при наличии фона. При этом меняется и уровень шума на выходе ФР. В этих условиях пороговый поток также изменяется. У многих типов фоторезисторов при достижении определенного (порогового) значения $U_{п}$ наступает резкое увеличение уровня шума при сравнительно небольшом нарастании сигнала. Это значение обычно не превышает нескольких десятков вольт, в редких случаях (например, для некоторых сернисто-кадмиевых ФР) — нескольких сотен вольт.

Нужно отметить, что наиболее чувствительные ФР оказываются и наиболее инерционными. Для ряда из них установлена прямая связь между порогом чувствительности $\Phi_{п}$ и постоянной времени ФР τ вида $\Phi_{п} \tau = \text{const.}$

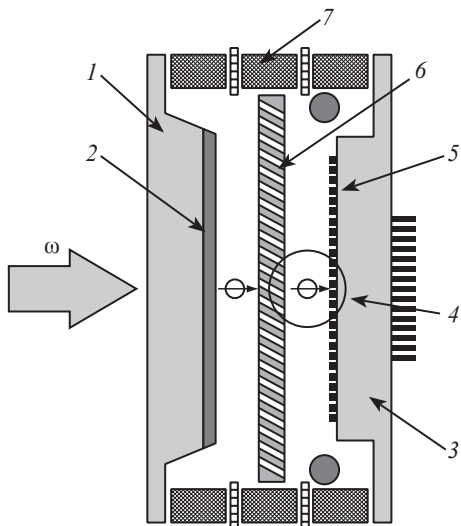


Рис. 6. Фотоприемный модуль на основе электронно-чувствительной ПЗС-матрицы:
 ω — поток фотонов, 1 — входное окно; 2 — фотоэмиссионный катод; 3 — керамическое основание; 4 — усиленный поток электронов; 5 — электронно-чувствительная ПЗС-матрица; 6 — микроканальная пластина; 7 — металлокерамический корпус

Допустимая мощность рассеяния ФР зависит от материала чувствительного слоя, а также от режима облучения. При непрерывном облучении эта мощность находится в пределах от сотых до десятых долей ватта, при импульсном облучении она достигает единиц ватт. Уменьшение температуры чувствительного слоя расширяет спектральный диапазон его работы в ИК-области спектра и увеличивает его интегральную чувствительность. При охлаждении шумы уменьшаются, а следовательно, увеличивается обнаружительная способность ФР. Кроме того, при охлаждении увеличивается постоянная времени и его темновое сопротивление.

Достоинствами ФР являются малые размеры и масса, пониженное по сравнению с фотоэмиссионными приемниками напряжение питания, возможность работы в широком спектральном диапазоне. Ряд ФР имеет очень высокую интегральную чувствительность, мощность их рассеяния достаточна для управления электрической цепью мощностью в несколько ватт.

К недостаткам фотоприемников этого класса можно отнести повышенную инерционность, значительную зависимость характеристик и параметров от температуры, малую линейную зону энергетической характеристики, зависимость выходного сигнала от площади засветки чувствительного слоя.

Типовые параметры некоторых ФР приведены в табл. 2. Сведения о других их параметрах и характеристиках, в частности конструктивных размерах, форме и размерах чувствительного слоя, питающих напряжениях и др., приведены в работах [1, 4 и др.].

Фотодиоды и фототранзисторы. Фотодиодом (ФД) принято называть полупроводниковый ПИ, основанный на использовании односторонней проводимости *p-n*-перехода, при освещении которого или образуется ЭДС (фотогальванический, или вентильный режим), или при наличии источника питания в цепи ФД изменяется его обратный ток (фотодиодный режим). В настоящее время материалами для изготовления фотодиодов служат в основном Ge, Si, InSb, GaAs, GaP, а также тройные соединения, например GaAsP, GaAlAs, GaInP, HgCdTe.

Важной характеристикой фотодиода является стабильность его параметров при изменении температуры, влажности, давления окружающей среды. В этом отношении кремниевые ФД имеют существенные преимущества перед германиевыми. Темновой ток кремниевых ФД почти постоянен, а темновой ток германиевых ФД при изменении температуры от 20 до 50°C может изменяться в 3...5 раз. Другим достоинством кремниевых фотодиодов является возможность работы с

Таблица 2

Типовые параметры фоторезисторов

Материал	Рабочая температура, К	Диапазон спектральной чувствительности, мкм	λ_{max} , мкм	Удельный монохроматический пороговый поток для λ_{max} $\Phi_{\text{порог}}^*$, Вт·см ⁻¹ ·Гц ^{-1/2}	Интегральная чувствительность $S_{\text{инт}}$ В·Вт ⁻¹ ·см ⁻²	Постоянная времени, мкс	Темповое сопротивление, Ом
CdS	295	0,3...0,90	0,5...0,6	$0,3 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-12}$ [90, 2π]	$(3 \dots 6) \cdot 10^5$ [2856, 0]	$(1 \dots 5) \cdot 10^4$	$10^6 \dots 10^7$
PbS	295	0,5...3,5	2,1	$(0,7 \dots 3,3) \cdot 10^{-11}$ [90, 2π]	20...30 [573, 500]	30	$(5 \dots 25) \cdot 10^4$
PbSe	78	0,8...6,0	5,0	$(0,2 \dots 1,0) \cdot 10^{-10}$ [90, 2π]	20...110 [373, 90]	10...50	$(0,2 \dots 20) \cdot 10^4$
PbTe	78...90	0,5...5,5	4,0...4,5	$(3,3 \dots 6,7) \cdot 10^{-10}$ [90, 2π]	150...300 [373, 400]	20...100	$(1 \dots 4) \cdot 10^7$
InSb	195	1,0...6,1	5,0	$4,0 \cdot 10^{-10}$ [900, 2π]	—	1	60
HgCdTe	78	3,5...14,0	12,2	$(1,1 \dots 2,6) \cdot 10^{-11}$ [90, 60°]	—	5	100
Ge-Si:Au	50	2,0...12,7	7,5	$(1,3 \dots 1,4) \cdot 10^{-10}$ [900, 2π]	—	1	$2,5 \cdot 10^6$
Ge:Au	30	2,0...14,0	10,6	$(2 \dots 5) \cdot 10^{-11}$ [900, 70°]	150...160 [373, 400]	0,1...1,0	$(5 \dots 10) \cdot 10^5$

Примечание. В квадратных скобках в графе значений Φ^* указаны частота модуляции потока и угловое поле ПОИ, а в графе значений $S_{\text{инт}}$ — температура источника в Кельвинах, по которому калибровался ПОИ, и частота модуляции потока

большими обратными напряжениями (до 100 В), что недопустимо для германиевых ФД.

Спектральная чувствительность ФД меняется при переходе от фотогальванического режима к фотодиодному. Эта чувствительность зависит также от температуры чувствительного слоя. С понижением температуры спектральная характеристика и ее максимум смещаются в коротковолновую область.

Постоянная времени фотодиода $\tau_{\text{фд}}$ в значительной степени зависит от способа его изготовления, размеров площадки. Для сплавных ФД значение $\tau_{\text{фд}}$ обычно близко к 10^{-5} с; для диффузионных при маленьких площадках $\tau_{\text{фд}}$ может достигать 10^{-6} с. В специальных ФД с малой толщиной базы можно достигнуть $\tau_{\text{фд}} = 10^{-10}$ с.

Стремление увеличить чувствительность фотодиодов и уменьшить их постоянную времени привело к разработке *p-i-n-фотодиодов* [4].

При площади чувствительного слоя около 100 мм^2 кремниевые *p-i-n*-ФД обладают чувствительностью $0,015 \text{ А}\cdot\text{Вт}^{-1}$ при $\lambda=0,4 \text{ мкм}$ и временном разрешении 5 нс. При приеме излучения с $\lambda=0,9 \text{ мкм}$ и напряжении смещения $U_{\text{см}}=1000 \text{ В}$ их чувствительность составляет $0,53 \text{ А}\cdot\text{Вт}^{-1}$, а темновой ток 20 мкА при $U=700 \text{ В}$ $U_{\text{см}}=300 \text{ В}$. Световые характеристики этих диодов линейны до значений фототоков, равных 6 А.

В фотодиоде усиление тока можно получить умножением числа носителей. На этом принципе основаны *лавинные* ФД [4], в которых при обратном напряжении, равном или близком к пробивному, в области *p-n*-перехода подвижные носители приобретают столь высокие скорости, что вызывают ионизацию атомов решетки, т.е. образуют новые электронно-дырочные пары. Это же ускорение действует и на носители, появившиеся в области *p-n*-перехода при его освещении. Для обеспечения стабильности коэффициента усиления фототока необходимо очень тщательно стабилизировать питающее напряжение и температуру, что усложняет использование лавинных фотодиодов. Эти ПОИ используют для приема слабых сигналов, в основном при лазерной локации. Их постоянная времени составляет $10^{-8}\dots 10^{-9}$ с при коэффициенте внутреннего усиления до $10^4\dots 10^5$ и рабочем напряжении 30...100 В.

Помимо указанных выше можно отметить *фотодиоды с барьером Шоттки*, характеризующиеся сравнительно простой технологией изготовления, параметры которых близки к параметрам *p-i-n*-ФД, а также *гетерофотодиоды* [4].

Сравнительно большие темновые токи при включении обычных фотодиодов в фотодиодном режиме делают невозможным их использование для измерения малых потоков. В этом случае необходимо ра-

ботать в фотогальваническом режиме, при котором обнаружительная способность системы определяется практически не весьма малыми шумами приемника, а шумами схемы его включения или последующих электронных звеньев.

Фототранзисторы (ФТ). Это обладающие свойством усиления фототока ПОИ с двумя *p-n*-переходами, в которых происходит направленное движение носителей тока. Фототранзисторы имеют высокий квантовый выход (около 100). Однако наличие второго *p-n*-перехода приводит к значительному увеличению шумов, поэтому часто предпочитают использовать фотодиоды, добавляя дополнительный каскад в усилитель сигнала, шум которого меньше влияет на обнаружительную способность прибора по сравнению с шумом, возникающим при использовании фототранзистора.

К недостаткам фототранзисторов относятся: значительная нестабильность параметров и характеристик во времени и при изменении температуры окружающей среды; меньшая, чем у ФД, обнаружительная способность. Следует отметить, что у ряда ФТ в центре чувствительного слоя вследствие затенения эмиттером части базы имеется «слепое пятно». Поэтому при их использовании необходимо распределять поток по всей чувствительной поверхности фотослоя, т. е. применять конденсоры.

Параметры некоторых отечественных фотодиодов и фототранзисторов приведены в табл. 3.

Фотоприемники на основе многокомпонентных систем. В последние десятилетия в ОЭП, работающих в ИК-области спектра, широко применяют узкозонные ПОИ на основе твердых раство-

Т а б л и ц а 3

Параметры некоторых фотодиодов и фототранзисторов

Параметры	Тип приемника/Материал				
	ФД-7Г/ Ge	КФДМ/ Si	ФД-24К/ Si	ФТГ-3/ Ge	ФТ-1К/ Si
Диапазон спектральной чувствительности $\Delta\lambda$, мкм	0,4...1,9	0,5...1,2	0,47...1,12	0,4...1,9	0,5...1,2
λ_{max} , мкм	1,6	1,0	1,0	1,6	1,0
Интегральная токовая чувствительность s , мкА/лк, I	0,1	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$0,6 \cdot 10^{-2}$	750 мА/лм	0,4
Постоянная времени τ , с	—	10^{-6}	10^{-5}	—	$8 \cdot 10^{-5}$
Напряжение питания, $U_{\text{п}}$, В	10	20...22	26...28	25	25
Порог чувствительности $\Phi_{\text{п}1}$, лм·Гц ^{-1/2}	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	—	$2,5 \cdot 10^{-7}$
Площадь чувствительного слоя, мм ²	4,9	1...2	78	3	2...3

ров широко применяют узкозонные ПОИ на основе твердых растворов (тройных и более соединений) HgCdTe , PbStTe , PbStSe , AlGaSb , InGaAs , GaAsSb , InGaAsP .

В зависимости от химического состава твердого раствора изменяется ширина запрещенной зоны, а, следовательно, и спектральная характеристика фотоприемника, которая может перекрывать широкую ИК-область вплоть до 30 мкм. Для сдвига этой характеристики в длинноволновый ИК-диапазон требуется охлаждение до более низких температур. Так, очень распространенные сегодня фотодиоды на основе HgCdTe в диапазоне 3...5 мкм могут работать при температуре охлаждения 120...200 К, но при использовании их в диапазоне 8...14 мкм требуют охлаждения до температур около 77 К.

На базе указанных материалов в последние десятилетия создано большое число многоэлементных приемников излучения, в том числе работающих одновременно в двух и более спектральных диапазонах [4, 6, 10 и др.]. Эти ПОИ обладают высокой обнаружительной способностью, хорошей спектральной селективностью, хорошим быстродействием и с успехом применяются во многих областях науки и техники, например в лазерной локации, системах обнаружения и распознавания различных объектов и многих других оптико-электронных приборах и системах.

5.3. Тепловые (неселективные) приемники излучения

К этому типу ПОИ относятся термоэлементы, болометры, пироэлектрические приемники, оптико-акустические приемники и некоторые другие. Принцип работы *термоэлементов* основан на использовании термоэлектрического эффекта Зеебека, который заключается в появлении электродвижущей силы (термоЭДС) в цепи, состоящей из двух разнородных по составу проводников, при условии, что между двумя их спаями имеется разность температур, т.е. контактные разности потенциалов на каждом спае различны. Падение напряжения на сопротивлении нагрузки R измеряется во внешней цепи. Обычно сопротивление термоэлемента очень мало, что обуславливает необходимость применения трансформаторного входа в качестве согласующего звена между ПОИ и усилителем, а это усложняет конструкцию прибора. К недостаткам термоэлементов следует также отнести их большую инерционность (постоянная времени составляет десятки и сотни миллисекунд).

Принцип работы *резистивного болометра* основан на изменении электрического сопротивления полупроводника или металла при нагреве чувствительной площадки под действием падающего на него потока излучения. Относительное изменение сопротивления болометра R_0

при изменении его температуры на ΔT в случае, если $\Delta R_6 \ll R_6$, можно представить уравнением

$$\Delta R_6 / R_6 = \beta_T \Delta T.$$

Для большинства металлов температурный коэффициент сопротивления β_T в широком диапазоне температур обратно пропорционален температуре, т.е. $\beta_T = 1/T$, а для большинства полупроводников $\beta_T = -3000/T^2$. Важно отметить различные знаки изменения сопротивления полупроводниковых и металлических болометров.

Простейшая схема включения болометра аналогична схеме включения фоторезистора. Болометр обычно включают по мостовой схеме [1, 4], которая питается постоянным или переменным током. Влияние окружающей температуры может вызвать нежелательный разбаланс моста, поэтому в качестве уравнивающего элемента схемы часто используют также болометр, называемый *компенсационным*. При изменении внешних условий оба болометра в одинаковой степени изменяют свое сопротивление, в результате чего равновесие моста сохраняется. Поток от излучателя попадает только на один болометр, что вызывает разбаланс моста.

В *пирозлектрических* ПОИ при малейших изменениях температуры приемника — сегнетоэлектрика с постоянной электрической поляризацией эта поляризация заметно изменяется, что ведет к изменению разности потенциалов на выходах приемника. Пирозлектрические ПОИ являются емкостными, а не резисторными, т.е. их полное сопротивление уменьшается с ростом частоты модуляции падающего на них излучения. Поэтому они позволяют получить очень широкую и равномерную частотную характеристику.

Подбором активной нагрузки R в цепи включения пирозлектрического ПОИ частотную характеристику можно сделать равномерной вплоть до очень высоких частот (до 107 Гц и выше). При $R = 1000$ МОм спад характеристики наблюдается с частоты 300 Гц, а при $R = 100$ кОм — с $3 \cdot 10^6$ Гц, но в последнем случае пороговый поток приемника увеличивается примерно в 10^4 раз [4].

В *диэлектрических болометрах* в качестве чувствительных элементов используются ферроэлектрические конденсаторы. При изменении температуры ферроэлектрического конденсатора меняется его диэлектрическая постоянная и, следовательно, емкость конденсатора. При приложенном к конденсатору напряжении изменяется заряд, поступающий с него на схему считывания сигнала. Как известно, все ферроэлектрики при приложении напряжения обнаруживают пирозлектрическое свой-

ство — спонтанная поляризация является функцией температуры T . Ее изменение характеризуется пирозлектрическим коэффициентом диэлектрика. Заряд, возникающий на чувствительном слое диэлектрического болометра, пропорционален величине пирозлектрического коэффициента и скорости изменения температуры этого слоя. Поэтому для регистрации неподвижных объектов и сцен с неизменной температурой входной сигнал (поток излучения) приходится модулировать, т.е. периодически прерывать. Наличие обтюратора (модулятора) усложняет конструкцию ОЭП с описываемыми приемниками. Однако при этом появляется возможность отфильтровывать низкочастотные шумы в электронном тракте системы.

Помимо рассмотренных выше ПОИ в некоторых современных ОЭП иногда используют приемники, основанные и на других физических эффектах (ПОИ с СВЧ-смещением, оптико-акустические и др.), нашедшие пока ограниченное применение.

В табл. 4 приведены параметры типовых тепловых ПОИ.

Т а б л и ц а 4

Параметры некоторых тепловых приемников излучения

Тип ПИ	Размеры чувствительного элемента, мм (площадь, мм ²)	Сопротивление, Ом	Интегральная чувствительность, В·Вт ⁻¹	Удельная обнаружительная способность, Вт ⁻¹ ·см·Гц ^{-1/2}	Постоянная времени, мс
Термоэлемент ТКС-3×1,5	3×1,5	4...20	1...4	4,56·10 ⁸	—
Болометр металлический БМ6-Ф1	1,9×0,4	100...400	15	10 ⁹	22
Болометр полупроводниковый БКМ-5	1×1	1,5·10 ⁶	100	2·10 ⁸	4
Пирозлектрический приемник БП2-2	(0,78)	—	300	4,56·10 ⁶	—
Пирозлектрический приемник МГ-30 (с предусилителем)	1×1	≤500	≥1000	0,5·10 ⁸	—
Болометр полупроводниковый глубокоохлаждаемый (4,23 К)	7×0,7	10 ⁵	1,1·10 ⁴	2·10 ¹⁰	10 ⁻²

5.4. Многоэлементные приемники излучения

Многоэлементные приемники излучения (МПИ) могут быть двух типов: с полной электрической развязкой отдельных чувствительных элементов и с внутренними электрическими связями. Приемник первого типа представляет собой набор отдельных одноэлементных приемников,

обычно изготавливаемых на единой подложке и имеющих самостоятельные каналы предварительного усиления. Такие приемники при большом числе элементов имеют увеличенные габаритные размеры и большое число выводов. При интегральном исполнении приемников второго типа реализуется гораздо большее число каналов, но взаимовлияние и разброс параметров отдельных элементов, наличие коммутационных переходных процессов и утечек по токоведущим шинам и подложкам и ряд других недостатков требуют принятия специальных мер [5, 6].

Приемники первого типа позволяют осуществить произвольную координатную выборку отдельных элементов. Однако на сегодня они уступают МПИ второго типа по числу этих элементов (и по пространственному разрешению), динамическому диапазону амплитуд принимаемых сигналов и по уровню шумов коммутации.

Простейшим приемником первого типа является двухплощадочный (разрезной) приемник, состоящий из двух частей, разделенных небольшим промежутком, который играет роль нулевой точки координатной характеристики. Такой приемник обычно используется как простейший амплитудный анализатор.

Помимо однокоординатных двухплощадочных приемников имеются и двухкоординатные приемники. Простейший из них – координатный разрезной фотодиод, представляющий собой пластину полупроводника с *p-n*-переходом, разделенную на четыре части с малыми промежутками между ними (порядка 0,05...0,1 мм).

В последние десятилетия для работы в составе различных ОЭП были разработаны двумерные (матричные, или мозаичные) МПИ с числом элементов от нескольких десятков до нескольких тысяч. Современные фотоприемные устройства с двумерными МПИ (фотоматрицами) состоят из структурированного, т.е. разделенного на отдельные элементы (пиксели), фоточувствительного слоя (собственно МПИ) и электрически связанной с ним системы считывания (съема) и первичной обработки сигналов, образующихся на отдельных элементах при их облучении потоком, собираемым оптической системой (объективом). Фотоприемные устройства (ФПУ) могут выполняться по гибридной технологии, когда каждый элемент фоточувствительного слоя соединяется через свой контакт с отдельной ячейкой схемы считывания, т.е. собственно приемник излучения и схема считывания формируются в различных объемах (кристаллах, чипах, на разных подложках), или по монолитной технологии, когда фоточувствительные элементы и ячейки схемы считывания формируются в одном объеме.

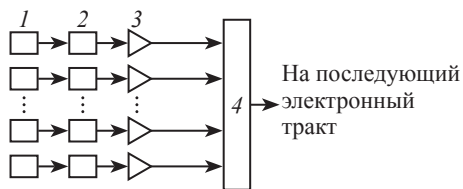


Рис. 7. Структурная схема многоэлементного фотоприемного устройства

В большинстве современных ОЭС с матричными МПИ (ОЭС «смотрящего» типа) используются фотоприемные устройства с накоплением сигналов. Структурная схема простейшего ФПУ с накоплением сигналов представлена на рис. 7. Каждый из чувствительных элементов 1 матричного МПИ присоединен к накопителю зарядов 2 — емкости, обеспечивающей накопление зарядов от данного элемента за время между его опросами. Через предусилители 3 сигналы с помощью мультиплексора 4 передаются на последующий электронный тракт, т.е. заряд накопителей считывается через определенный промежуток времени t_k . Во многих приемниках накопление осуществляется на элементе, общем для строки или столбца, т.е. время накопления ограничивается не временем кадра, а временем считывания строки или столбца. Во многих освоенных промышленностью МПИ размеры отдельных элементов достаточно малы (от единиц до десятков микрометров) при таких же примерно размерах промежутков между элементами [4–6, 10].

При разработке многих ОЭС возникает ряд специфических требований к параметрам МПИ и фотоприемных устройств на их основе. Так, часто требуется высокое энергетическое, пространственное и временное разрешение ОЭС, а для этого необходимо обеспечивать высокую тактовую частоту — частоту считывания сигналов с отдельных элементов, т.е. применять малоинерционные и высокочувствительные приемники излучения. Быстродействие современных МПИ определяется временем цикла опроса матрицы (или одного элемента) и постоянной времени составляющих ее элементов.

Принципиальной особенностью МПИ, являющихся одновременно анализаторами изображения, создаваемого объективом ОЭП, является дискретизация непрерывного оптического сигнала-изображения, часто сопровождающаяся и его квантованием по уровню. В соответствии с теоремой Котельникова [1] погрешность представления непрерывного сигнала конечным числом его отсчетов уменьшается с ростом этого числа. Поэтому для повышения разрешающей способности МПИ-анализатора желательно уменьшать размер элемента приемника и тем самым увеличивать число отсчетов элементов разложения.

Совершенствование таких МПИ ведется за счет увеличения числа элементов в мозаике или матрице с одновременным сокращением про-

В большинстве современных ОЭС с матричными МПИ (ОЭС «смотрящего» типа) используются фотоприемные устройства с накоплением сигналов. Структурная схема простейшего ФПУ с накоплением сигналов представлена на рис. 7. Каждый из чувствительных

межутков между ними, повышения как интегральной, так и пороговой чувствительности отдельных элементов, применения более совершенных схем генераторов разверток, сдвиговых регистров и другого электронного «обрамления» фотоматрицы. С точки зрения качественного анализа изображений особенно важно обеспечить высокую однородность параметров отдельных элементов мозаики и стабильность их в процессе эксплуатации. Поскольку у многих МПИ разброс параметров достаточно велик и может достигать десятков процентов, приходится вводить специальные цепи калибровки и коррекции, что существенно усложняет электронный тракт [6]. Еще одним источником погрешности могут быть межэлементные связи (перекрестные искажения и утечки), которые приводят к заметным потерям энергии сигнала (до нескольких десятков процентов).

Наряду с обычными шумами, присущими одноэлементным приемникам, в МПИ и ФПУ на их основе имеют место шумы, определяемые особенностями их конструкции и схемами работы, а также способами считывания сигнала, образуемого на отдельных элементах приемника. К основным видам шума обычно относят:

- радиационный фоновый шум;

- геометрический шум, определяемый неоднородностью параметров отдельных элементов МПИ и ФПУ;

- тепловой шум, вызываемый теми же, что и в одноплощадочных приемниках, явлениями термоэмиссии носителей;

- неустраняемый минимальный уровень шума — шумовой «пьедестал» (floor noise);

- шум вследствие неполной эффективности переноса зарядов в отдельных типах приемников;

- шум выходной цепи (схемы накопления и считывания зарядов) МПИ.

Все эти составляющие выражают обычно числом электронов («шумовых» электронов), приходящихся на один элемент (пиксел) ФПУ.

Большое значение имеет геометрический шум, возникающий из-за различий чувствительности, темновых токов и других параметров и характеристик отдельных элементов МПИ и ФПУ. По своей сути это пространственно изменяющийся шум, но он превращается во временной шум, когда осуществляется считывание сигналов с отдельных элементов МПИ (электронное сканирование или выборка сигналов). Борьба с таким видом шума достаточно сложно. В последние годы для этого успешно используют методы электронной коррекции (одноточечной, двухточечной, нелинейной), зачастую реализуемые непосредственно в

процессе работы МПИ, т.е. в реальном масштабе времени [6]. Иногда с целью его уменьшения используют осреднение сигналов, снимаемых с нескольких соседних элементов в процессе принудительного сканирования изображения (колебания изображения).

Для МПИ, работающих в средней и длинноволновой ИК-областях спектра, обычно считают, что источником паразитного сигнала (шума), который создается из-за неоднородности отдельных пикселей, является излучение фона, т.е. рассматривают пороговый режим работы МПИ. Нужно отметить, что высокая квантовая эффективность, свойственная ряду материалов, из которых изготавливаются МПИ (обычно фотовольтаические), усложняет требования к системе съема и обработки сигналов. Это связано с быстрым насыщением считывающих устройств, что на практике вынуждает повышать скорость считывания, т.е. увеличивать частоту кадров, чему может препятствовать инерционность приемника. Иногда для борьбы с насыщением приходится уменьшать спектральный диапазон работы МПИ и всей системы.

Для работы в ИК-диапазоне спектра создаются гибридные мозаичные ПОИ, в которых фоточувствительный слой выполняется в виде мозаики из отдельных фотодиодов или фоторезисторов, соединенных со схемами накопления и считывания зарядов с фотоприемников. Эти схемы строятся на базе ПЗС (прибор с зарядовой связью) или КМОП (комплементарная структура «металл-окисел-полупроводник») ячеек [10].

К числу наиболее распространенных фотонных охлаждаемых МПИ относятся приемники с тройными соединениями «кадмий-ртуть-теллур» (HgCdTe или КРТ), работающие как в средневолновом (3... 5 мкм), так и в длинноволновом (8... 14 мкм) ИК-диапазонах; построенные на базе барьеров Шоттки PtSi/Si (или просто PtSi), работающие в диапазонах 1... 3 мкм и 3... 5 мкм, а также на основе InSb (3... 5 мкм) и приемники на структурах с квантово-размерными ямами (КРЯ), работающие в сравнительно узких спектральных полосах внутри диапазона 2... 20 мкм.

Наиболее перспективными матричными ФПУ для инфракрасных систем (ИКС), работающих в среднем и длинноволновом ИК-диапазонах, представляются приемники на базе КРТ (КРТ-ФПУ) и КРЯ (КРЯ-ФПУ), а также появившиеся сравнительно недавно ФПУ на квантовых точках и суперрешетках с деформированным слоем (strained layer superlattice — SLS) типа II (СР-ФПУ) [6, 10].

Представляет интерес сравнить отдельные типы современных охлаждаемых фотоприемников, используемых для создания таких матричных ФПУ. На рис. 8 приведены теоретические зависимости удель-

ной обнаружительной способности D^* таких приемников с различной квантовой эффективностью η от температуры охлаждения T [10].

Матричные фотоприемники или ФПУ на базе КРЯ имеют достаточно узкие спектральные характеристики в двух или более спектральных диапазонах. В них используются недорогие подложки (GaAs), они имеют низкий процент дефектных пикселей. Отработанная технология и узкополосное поглощение ($\Delta\lambda / \lambda = 0,1 \dots 0,2$) позволяют производить двух- и многодиапазонные ФПУ на базе КРЯ с почти не перекрывающимися рабочими спектральными диапазонами [5, 10 и др.].

Для увеличения поглощения падающего на приемник излучения в современных ФПУ на основе КРЯ фоточувствительный слой соединен с резонатором или дифракционной решеткой. Наиболее часто используется резонатор Фабри–Перо. Однако изготовление этих резонаторов с малой шириной ямы и его соединение с фоточувствительным слоем, размещаемым между пластинами резонатора, заметно затрудняет изготовление приемников. При этом также возникает необходимость иметь дополнительные технические операции для создания различных полос поглощения в одном и том же чувствительном слое.

Малая квантовая эффективность КРЯ-ФПУ из-за невозможности приема нормально падающего на приемник излучения вынуждает иметь продолжительное время накопления зарядов для достижения эквивалентной шумам разности температур (ЭШРТ). Кроме того, для уменьшения темновых токов температура их охлаждения должна быть меньше, чем у КРТ.

В ФПУ на квантовых точках (ФКТ-ФПУ), по сравнению с КРЯ-ФПУ, квантовые ямы заменены квантовыми точками, имеющими объемную локализацию во всех направлениях. Приемники излучения на квантовых точках принято считать одними

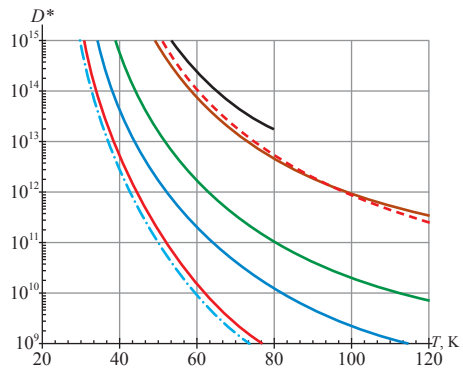


Рис. 8. Теоретические зависимости удельной обнаружительной способности D^* при граничной длине волны спектральной характеристики 10 мкм от температуры охлаждения T для различных приемников ИК-излучения:

- фотоэмиссионных ($\eta = 67\%$);
- на основе примесной фотопроводимости ($\eta = 35\%$); — на базе квантоворазмерных ям ($\eta = 33\%$); — на базе квантовых точек при $\eta = 2$ и 67% , соответственно; - - - на основе тройных соединений «кадмий-ртуть-теллур» при $\eta = 67\%$; — на основе суперрешеток с деформированным слоем типа II

из наиболее перспективных для создания новых ИКС третьего поколения. В [5, 10] отмечаются как достоинства такие свойства ФКТ-ФПУ как возможность принимать излучение, падающее по нормали к поверхности фоточувствительного слоя, т.е. высокая квантовая чувствительность, малый темновой ток, сравнительно высокая рабочая температура, а также хорошо освоенная технология изготовления таких матричных ФПУ.

Созданы приемники, способные работать в средневолновом ИК-диапазоне (3...5 мкм) при температуре охлаждения выше 200 К и в длинноволновом ИК-диапазоне (8...12 мкм) при 140 К [10].

Работа фотоприемников на основе суперрешеток с деформированным слоем типа II (СР-ФПУ) основана на аномальном взаимном расположении зоны проводимости InAs и валентной зоны GaSb — первая расположена ниже второй. Ширину запрещенной зоны в них можно подбирать в широких пределах (3...30 мкм), и она в большей степени зависит от толщины слоев, нежели от композиции материалов. Технология изготовления СР-ФПУ, основанная на молекулярно-лучевой эпитаксии, позволяет формировать однородные фоточувствительные слои с высоким процентом годных приемников. При этом имеется возможность точной регулировки $\lambda_{гр}$. Значение $\lambda_{гр}$ растет с увеличением рабочей температуры; значение ЭШРТ остается практически постоянным до 90 К, после чего начинает резко возрастать. Это вызвано уменьшением ширины запрещенной зоны, что ведет к возрастанию тепловой генерации носителей заряда.

Интерес к СР-ФПУ, обладающим большим коэффициентом поглощения, возник из-за возможности замены ими КРТ-ФПУ, а также из-за того, что они поглощают нормально падающее на них излучение, так что в отличие от ФКЯ-ФПУ никакие дифракционные структуры в их конструкции не требуются. Технология их изготовления основана на хорошо отработанной технологии изготовления материалов группы A_3B_5 на дешевых подложках. Из рис. 8 видно, что теоретическое значение D^* у них выше, чем у других типов приемников.

Для работы в указанных спектральных диапазонах упомянутые выше приемники, как правило, требуют охлаждения до достаточно низких температур, что заметно усложняет конструкцию ФПУ и всей ОЭС. Однако сегодня технология их получения достаточно хорошо освоена; серийно изготавливаются МПИ самых различных форматов. В системах, где они используются, достигнуты высокие геометрическое и энергетическое (температурное) разрешения.

При выборе МПИ следует учитывать не только однородность параметров его отдельных элементов, но и чувствительность (квантовую

эффективность η) фотослоя. Вследствие гораздо большей чувствительности приемники на основе InSb и HgCdTe ($\eta > 50\%$) часто предпочтительнее более однородных структур на базе PtSi ($\eta \approx 1\%$), особенно при работе на длинах волн свыше 4 мкм.

Матричные ФПУ ближнего и коротковолнового ИК-диапазона на базе InGaSb и InGaAs неоднократно предлагались для использования в ОЭС, работающих комбинированным (активно-пассивным) методом. Активный канал, работающий на безопасных для глаза длинах волн, может использоваться для приема отраженного от цели излучения лазера, и при стробировании по дальности может быть увеличена дальность обнаружения и распознавания различных целей, как это имеет место в лидарах. Разработка миниатюрных неохлаждаемых InGaAs-матриц рассматривается как путь замены электронно-оптических преобразователей в приборах ночного видения.

Большое внимание разработчиков ОЭС привлекают неохлаждаемые МПИ ИК-диапазона. Хотя они обладают меньшей чувствительностью и большей инерционностью, по сравнению с охлаждаемыми фотоэлектрическими МПИ, системы с такими приемниками не используют дорогостоящих систем охлаждения, имеющих ограниченный срок работы. По совместимости неохлаждаемых тепловых приемников со схемами считывания, создаваемыми, как правило, на основе кремниевых технологий, они заметно лучше охлаждаемых фотоэлектрических МПИ. Тенденция использовать неохлаждаемые МПИ четко прослеживается при создании недорогих ОЭС массового применения.

Основными типами неохлаждаемых МПИ являются приемники на базе резистивных и диэлектрических болометров, часто называемые *микроболометрами*. Предпринимались попытки создания термоэлектрических МПИ (многоэлементных термопар, использующих эффект Зеебека) формата до 128×128 элементов с размером пиксела 100×100 мкм, однако широкого распространения эти приемники не нашли.

В последнее время неохлаждаемые ФПУ на базе микроболометров продолжают заметно совершенствоваться [3–5, 10 и др.]. В ОЭС третьего поколения (двух- или многодиапазонных на матричных ФПУ) они используются либо в отдельном спектральном канале — обычно в длинноволновой ИК-области, либо обеспечивают работу в двух сравнительно узких полосах спектра, находящихся внутри длинноволнового ИК-диапазона (8...14 мкм). Выделение этих узких полос осуществляется с помощью оптических фильтров.

Продолжающееся уменьшение размеров пикселей микроболометров привело к увеличению формата матриц и повышению бы-

стродействия ИК-систем при сохранении высокой чувствительности. Уменьшение размеров пикселей помимо увеличения разрешающей способности позволяет уменьшить размеры и массу всей системы, а также дает возможность изготавливать крупноформатные матрицы без нарушения эксплуатационных размеров фотолитографических систем, используемых при изготовлении матриц.

В табл. 5 приведены обобщенные значения параметров и характеристик наиболее распространенных матричных многоэлементных приемников ИК-излучения, выпускаемых серийно в настоящее время [5, 6, 10].

Многоэлементными ПОИ с внутренними электрическими связями, работающими в видимой области и ближнем ИК-диапазоне, являются фотоприемники на базе приборов с зарядовой связью (*фотоПЗС*), которыми принято называть полупроводниковые устройства, в которых при подаче на них определенной последовательности тактовых импульсов осуществляется управляемое перемещение пакетов зарядов вдоль полупроводниковой подложки [2–4].

Уровень шума в фотоПЗС обычно определяется флуктуациями числа электронов в зарядовых пакетах, вызванными фотонным шумом сигнала, дробовым шумом темного тока, шумами захвата носителей в структуре ПЗС, шумом фонового заряда и др. Охлаждение до минус 20...40°C и другие методы снижения шумов позволяют уменьшить число шумовых электронов до 15...30 в полосе частот до 1 МГц и обеспечить работу ПИ при перепаде освещенностей $10^4 \dots 10^5$.

Разрешающая способность ПЗС снижается при больших засветках вследствие переполнения потенциальных ям и диффузии носителей, генерируемых в нижней зоне подложки. Эти явления вызывают растекание зарядов, т.е. появление паразитных зарядов в соседних чувствительных элементах, и смаз изображения. Кроме того, на качество работы фотоПЗС существенное влияние оказывают различия в значениях чувствительности, темного тока и других параметров отдельных элементов МПИ, т.е. геометрический шум.

К достоинствам ПЗС относятся:

высокая разрешающая способность;

малое потребление мощности, затрачиваемой на обработку информации;

отсутствие необходимости создавать большое число *p-n*-переходов и контактов к ним, а следовательно, хорошая технологичность и надежность;

высокое быстродействие, характеризующееся частотами развертки порядка мегагерц и более;

Т а б л и ц а 5
Сравнение наиболее распространенных матричных многоэлементных приемников инфракрасного излучения,
выпускаемых серийно

Характеристики	Тип приемника						Микрооблометры
	КРТ		PrSi/Si	InSb	КРЯ		
Спектральный рабочий диапазон, мкм	3...5	8...12	3...5	3...5	3...5	8...10	7...14
Типовые форматы матриц	128×128 256×256 384×288 640×512 640×480	128×128 256×256 320×240	128×128 256×256 512×512 640×480 1024×1024 1040×1040	256×256 320×256 512×512 640×480 1024×1024	640×512	128×128 256×256 320×256 384×288 640×480	160×128 256×128 320×240 384×288
Шаг пикселей матрицы, мкм	25...50	25...50	17...40	25...40	25...30	25...40	45...51
Эквивалентная шуму разность температур $\Delta T_{\text{н}}$, МК	7...16 (K=1,2...1,8)	8...18 (K=1,2...1,8)	33...90 (K=1...1,8)	10...100 (K=1,1)	20...35 (K=2)	13...35 (K=2)	80 (K=1)
Рабочая температура, К	120...200	80	<80	80...120	40...75	40...75	300
Система охлаждения	МКС, ТЭО	МКС	МКС	МКС	МКС	МКС	ТЭС
Коэффициент заполнения	>0,9	>0,7	0,4...0,7	>0,98	0,85	0,85	0,44...0,80
Частота кадров, Гц	<400	<150...300	30...50	25...60	30	50	25...60
Особенности	Высокая квантовая эффективность позволяет получать малые значения $\Delta T_{\text{н}}$ при небольших временах накопления $t_{\text{н}}$ и соответственно больших кадровых частотах F . Из-за сложной технологии получения материала КРТ мал процент выхода готовых изделий и высокая стоимость МПИ, которая резко возрастает по мере увеличения формата матрицы	Технология изготовления МПИ достаточно проста. Высокая однородность параметров отдельных пикселей. Ограниченный спектральный рабочий диапазон. Низкая квантовая эффективность. При понижении температуры наблюдаемая спектральная характеристика в диапазоне 4...5 мкм ухудшается (возрастает) $\Delta T_{\text{н}}$	Технология изготовления хорошо освоена. Стоимость изготовления МПИ выше, чем у PrSi/Si, но ниже, чем у КРТ. Высокая квантовая эффективность обеспечивает получение малых значений $\Delta T_{\text{н}}$ при небольших временах накопления. Отграниченный спектральный рабочий диапазон	Технология изготовления хорошо освоена. Стоимость изготовления МПИ выше, чем у PrSi/Si, но ниже, чем у КРТ. Высокая квантовая эффективность обеспечивает получение малых значений $\Delta T_{\text{н}}$ при небольших временах накопления. Отграниченный спектральный рабочий диапазон	Сравнительно простая освоения технологии изготовления позволяет иметь высокий процент выхода МПИ большими форматами. Узкие рабочие спектральные диапазоны. За счет использования большого времени накопления при большом количестве кадровых частотах возможно получать $\Delta T_{\text{н}}$ для МПИ из КРТ. Необходимо иметь очень низкую рабочую температуру (40...50 К) для обеспечения высокой обнаружительной способности. Невысокая квантовая эффективность применения оптических блоков сопряжения (типа дифракционных решеток)	Отсутствие системы охлаждения упрощает конструкцию ФПУ и ОЭП в целом, снижает их стоимость, энерготребление, время готовности к работе, увеличивает надежность и срок службы системы	

Примечание: МКС — микрокриогенная система; ТЭО — термоэлектрическая система; ТЭС — термоэлектрический охладитель; ГЭС — термоэлектрическая стабилизация

возможность обрабатывать и кодировать изображение непосредственно в самом формирователе сигнала, так как на вход ПЗС информация подается в аналоговой форме, а управление ПЗС осуществляется цифровыми методами и сигнал на выходе дискретен.

Основные недостатки ПЗС:

неоднородность фотоэлектрических свойств, прежде всего чувствительности отдельных элементов, достигающая часто десятков процентов;

ограниченный спектральный рабочий диапазон (0,5...1,1 мкм и лишь у некоторых до 3...5 мкм);

невозможность произвольной выборки сигнала с любого элемента ПЗС, т.е. строго определенная последовательность «опроса» элементов приемника;

выход из строя всей строки развертки при потере чувствительности (например, «прожоге» при воздействии мощного лазерного излучения) одного из элементов этой строки.

Для распространенных фотоПЗС наряду с другими составляющими шума необходимо учитывать неэффективность переноса носителей заряда между ячейками ПЗС. Среднее квадратическое значение эквивалентного шумового заряда определяется по формуле

$$\Delta n_{\text{эф}} = \sqrt{2}(1 - \varepsilon)m(n_c^2 + n_{\text{ф}}^2),$$

где ε — коэффициент эффективности переноса заряда от ячейки к ячейке; m — число ячеек ПЗС, проходимых зарядовым пакетом; n — число фотоэлектронов, составляющих сигнал n_c и фон $n_{\text{ф}}$ соответственно.

Параметры некоторых отечественных и зарубежных фотоматриц на основе ПЗС приведены в табл. 6 и 7.

Помимо ПЗС для работы в ближневолновом ИК-диапазоне используются матричные ФПУ на базе InGaSb и InGaAs. Последние успешно применяются, например, в ОЭС, работающих комбинированным (активно-пассивным) методом. Активный канал, работающий на безопасных для глаза длинах волн (1,5...1,7 мкм), может использоваться для приема отраженного от цели излучения лазера, а пассивный позволяет обнаруживать и распознавать объекты по их излучению в среднем и длинноволновом ИК-диапазонах. Разработка таких миниатюрных неохлаждаемых матриц иногда рассматривается как путь замены обычных ЭОП в приборах ночного видения на гибридные преобразователи.

5.5. Многодиапазонные (многоспектральные) приемники излучения

В отдельную группу выделяют ПОИ, работающие в двух или более спектральных диапазонах. Имеются многочисленные публикации

Т а б л и ц а 6

Параметры некоторых отечественных двумерных фотоПЗС

Параметр	Тип				
	К569АП1	К1200ЦМ1	К1200ЦМ2	ФПЗС1м	ФПЗС2м
Количество элементов	64×128	144×232	288×360	576×572	288×256
Размеры одного элемента, мкм	32×32	27×20	18×11	24×11	30×16
Шаг структуры, мкм	36×32	27×27	18×19	24×28	30×23
Сигнал насыщения, В	0,5	0,1	—	0,3	0,6
Экспозиция насыщения, лк·с	Нет данных	0,1	—	0,1	0,16
Неравномерность темного сигнала, %	10	10	—	10	10
Максимальная тактовая частота, МГц	0,6	2,5	3,5	—	—
Неравномерность интегральной чувствительности, %	20	10	3,5	10	10

т а б л и ц а 7

Параметры некоторых матричных зарубежных фотоПЗС

Фирма-изготовитель или марка ПЗС	Число элементов	Размер элемента, мкм	Общий размер чувствительной площадки, мм	Динамический диапазон, дБ
Philips-Valdo	795×294	11×22,5	8,8×6,6	45
Sanyo MXA 1010	608×575	10×10	6×4,6	—
ICX 018L	510×492	17×13	8,8×6,6	67
MN 8230	449×579	15,2×8,3	6,5×4,9	72
Mitshubishi	510×485	13×10	6,6×4,9	69
HE 98211	320×244	27×27	8,8×6,6	—

[1–6, 10 и др.], в которых приводится информация о разработках и исследованиях ОЭП, работающих одновременно в видимом или ближнем ИК и в средневолновом (3... 5 мкм) или длинноволновом (8... 14 мкм) ИК-диапазонах. Приемники, работающие в двух более спектральных диапазонах, называют двух- и многоцветными.

В ОЭП с такими приемниками важно четко разделять рабочие спектральные диапазоны, в которых они работают, т.е. не допускать так называемых спектральных перекрестных связей. В системах с двумя или более ФПУ, каждое из которых работает в своем спектральном диапазоне и конструктивно отделено от других путем применения полосовых оптических фильтров, такое разделение достигается сравнительно просто. Однако в ФПУ с совмещением в одной конструкции

приемников, работающих в различных спектральных диапазонах, предотвращение наложения их спектральных характеристик составляет серьезную проблему.

Разделение спектральных рабочих диапазонов в одном ФПУ может быть произведено различными способами. Возможно разделение площади чувствительного слоя на отдельные участки, принимающие излучение в различных спектральных диапазонах. Такой способ спектрального разделения «по площади» сложен в технологическом отношении, обладает рядом других недостатков и поэтому используется редко. В настоящее время разделение на отдельные спектральные каналы осуществляется преимущественно «по глубине», а не «по площади», т.е. с помощью создания двух- и многослойных фотоприемных полупроводниковых структур, отдельные слои которых поглощают излучение в различных спектральных диапазонах.

Учитывая различие в уровнях сигналов от наблюдаемых объектов и фонов, а также в спектральных чувствительностях приемников (словес приемника), работающих в отдельных спектральных каналах ОЭП, важно обеспечить соответствующую калибровку (градуировку) этих каналов. Такая калибровка или балансировка необходимых уровней сигналов может быть реализована как аппаратными, так и программными методами. Например, можно изменять время накопления сигналов в отдельных каналах или коэффициенты усиления и напряжения смещения в цепях приемников различных каналов. Кроме того, нужно учитывать различия в уровнях шума, особенно геометрического в ОЭП с МПИ, свойственные отдельным каналам прибора. Наиболее просто бороться с этим фактором путем раздельной коррекции шумов и неоднородностей параметров отдельных пикселей МПИ, например индивидуальной подборкой коэффициентов усиления и напряжений смещения в ФПУ с многодиапазонными приемниками излучения (МДПИ).

Решение указанных проблем возможно также посредством изменения ширины спектральных характеристик $\Delta\lambda_i$ отдельных каналов ОЭП. Правда, этот путь далеко не всегда применим, поскольку выбор $\Delta\lambda_i$ по большей части обусловлен требованиями оптимизации спектральных характеристик с точки зрения успешного решения основной задачи, стоящей перед ОЭП. Поэтому все же представляется, что наиболее рационально надлежашую балансировку сигналов в отдельных каналах ОЭС осуществлять путем управления с помощью соответствующей электронной схемы, например изменяя время накопления сигнала приемником излучения каждого из каналов, регулируя коэффициенты усиления и напряжения смещения.

На рис. 9 показана схема работы одного пиксела двухдиапазонного фотovoltaического МДПИ. Излучение, проходящее через подложку, на которую последовательно наносится несколько фоточувствительных слоев, поступает сначала на n -слой коротковолнового фотодиода (КФД), в котором оно поглощается в коротковолновом диапазоне. Затем, пройдя через разделительный оптический контактный слой ОКС слой p -типа, в слое ДФД (длинноволновой фотодиод) поглощается составляющая оптического сигнала в диапазоне больших длин волн.

Такая схема может работать в режиме одновременного (см. рис. 9, *а*) или последовательного (см. рис. 9, *б*) считывания сигнала. В первом случае в составе пиксела схемы считывания могут находиться две отдельных ячейки (накопительные емкости, источники напряжения смещения, предусилители и др.), работающие одновременно. В схеме последовательного считывания при подаче напряжения смещения вольтовая характеристика одного из фотодиодов смещена в прямом направлении, а другого — в обратном. Изменение полярности смещения ведет к изменению спектральной чувствительности.

Отсутствие контакта с промежуточным омическим слоем в схеме с последовательным считыванием (см. рис. 9, *б*) требует лишь одного выводного контакта для каждого пиксела МДПИ, что упрощает конструкцию ФПУ. Однако независимость питания каждого из фотодиодов пиксела (КФД и ДФД) в схеме с одновременным считыванием позволяет проще регулировать соотношение между сигналами, образующимися в каждом из спектральных каналов. Поскольку поток фотонов обычно в длинноволновом диапазоне больше, чем в коротковолновом, в схеме считывания и последующем электронном тракте обычно приходится устанавливать необходимое соотношение между сигналами, соответствующими каждому из рабочих спектральных диапазонов.

Разработаны принципиально новые схемы считывания для получения одинакового динамического диапазона сигналов в двух- и трехспектральных каналах ФПУ, например, схем с вычитанием сигналов, когда сигнал в одном из двух рабочих

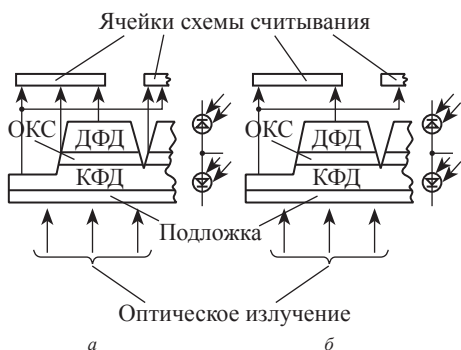


Рис. 9. Схема работы одного пиксела двухцветного фотодиодного МДПИ с одновременным (*а*) и последовательным (*б*) считыванием сигнала

спектральных диапазонов образуется как разность между суммарным для обоих диапазонов фототоком и фототоком, считываемым во втором рабочем спектральном диапазоне. Недостатки таких схем заключаются в уменьшении размеров и емкости отдельных ячеек схемы считывания двух- и трехдиапазонных ФПУ. Двухдиапазонные МДПИ в основном создаются на базе сверхрешеток – структур с квантовыми ямами (СКЯ-приемники) типа GaAs/AlGaAs и реже InGaAs/InAlAs [5, 10 и др.]. Эти приемники могут работать одновременно в ближнем, среднем и длинноволновом ИК-диапазонах или в нескольких узких спектральных полосах внутри каждого из этих диапазонов. Возможность регулирования ширины спектральной характеристики от узкой до достаточно широкой является одним из достоинств этого типа МДПИ, которые особенно предпочтительны при создании систем, одновременно работающих в видимом и инфракрасном диапазонах, поскольку фоточувствительные структуры выращиваются на единой подложке и обработка сигналов, получаемых в рабочих спектральных диапазонах, ведется одновременно.

Изменяя долю падения напряжения на каждом из последовательно включенных одноцветных СКЯ, образующих в совокупности двух- или многодиапазонный приемник («сэндвич») и разделенных тонкими сильно легированными слоями, можно смещать положение максимумов спектральных характеристик $\lambda_{\text{макс}}$ отдельных структур (одноцветных СКЯ) в широком спектральном интервале — от 3 до 20 мкм. При этом спектральные характеристики достаточно узки – отношение ширины характеристики $\Delta\lambda$ к $\lambda_{\text{макс}}$ достигает 0,4 и менее (до 0,1), что позволяет избежать перекрытия отдельных спектральных диапазонов и использовать оптические фильтры для их разделения. Это выгодно отличает СКЯ-МДПИ от МДПИ на базе КРТ.

6. Методы выбора приемника излучения

Выбор приемника излучения зависит от большого числа факторов, к которым относятся прежде всего назначение и принцип действия ОЭП или ОЭС, условия их работы, характеристики наблюдаемых или исследуемых объектов, фонов и помех и ряд других. В начале проектирования прибора или системы обычно намечаются или определяются в соответствии с техническим заданием достаточно широкий спектральный диапазон работы приемника, необходимость его охлаждения, быстродействие, срок службы и некоторые другие тактико-технические и технико-экономические характеристики приемника и всего ОЭП или ОЭС.

Основой для выбора приемника и его важнейших параметров и характеристик во многом может служить энергетический расчет, целью которого обычно является определение таких соотношений между полезным сигналом и шумами, при которых достигается заданное или вычисленное в соответствии с техническим заданием значение показателя эффективности работы ОЭС — критерия ее качества. Такими показателями могут являться отношение «сигнал–шум», разрешение системы (энергетическое, пространственное, временное, спектральное), ряд технико-экономических показателей [1–3]. В той или иной форме энергетический расчет выполняется практически всегда, т.е. при разработке любой ОЭС. Он позволяет найти важнейшие габаритные параметры оптической системы (площадь входного зрачка, относительное отверстие, угловое поле и др.), определить необходимое значение порогового потока или обнаружительной способности приемника излучения, сформулировать требования к источнику излучения, определить ряд требований к сканирующей системе и к электронному тракту ОЭС. Очень часто энергетический расчет помогает определить точностные характеристики ОЭС. Вкратце напомним основные положения и порядок проведения энергетического расчета [1–3, 7 и др.].

Основные этапы обобщенной методики энергетического расчета.

1. Составление схемы энергетической модели ОЭС для выбранного или заданного сценария ее работы, включающего различные излучатели и среды (цель, помехи, фоны, среда распространения оптического сигнала; их взаимное расположение и др.).

2. Составление в общем виде основного энергетического уравнения или неравенства, определяющего заданные условия выполнения качественной работы ОЭС. Этими условиями могут быть: превышение порога чувствительности $\Phi_{\text{поп}}$ прибора разности между полезным сигналом $\Phi_{\text{вх}}$ и сигналом от помехи $\Phi_{\text{пом}}$ на входе прибора в заданное число раз; превышение контраста между полезным сигналом и сигналом от фона (освещенности, создаваемые источником полезного сигнала E_c и фона $E_{\text{ф}}$ соответственно) некоторого порогового значения K_p , т.е. $(E_c - E_{\text{ф}})/(E_c + E_{\text{ф}}) > K_p$, разрешение системы (энергетическое, пространственное, временное, спектральное), ряд технико-экономических показателей и т.п. Это уравнение или неравенство является, по сути дела, обобщенным описанием алгоритма работы ОЭС.

3. Представление входящих в это уравнение величин полезных сигналов, шумов и помех в виде функций параметров и характеристик излучателя, передающей оптической системы, наблюдаемого объекта, среды распространения, приемной оптической системы, ФПУ и других звеньев ОЭС, т.е. составление «развернутого» выражения для оценки показателя эффективности работы ОЭС.

4. Выбор или расчет числового значения условия, устанавливающего требуемое для качественной (надежной) работы ОЭС соотношение между сигналом и шумами. Очень часто им является отношение «сигнал – шум», определяемое из заданных характеристик обнаружения [1].

5. Решение основного энергетического уравнения (неравенства), представленного в соответствии с п. 3 в развернутом виде, относительно одного или нескольких входящих в него параметров.

6. Выбор или расчет остальных параметров ОЭС.

7. Окончательный (проверочный) энергетический расчет, сводящийся часто к проверке выполнения неравенства – основного энергетического уравнения – после окончательного выбора или определения всех входящих в него величин.

В качестве примеров энергетического уравнения в виде функции параметров всей системы и условий ее эксплуатации при преобладании внутренних шумов — шумов фотоприемного устройства (ФПУ) можно привести следующие выражения [1, 2]:

$$\mu_u = \frac{u_{\text{с.в.ых}}}{\sigma_{\text{ш.в.ых}}} = \frac{k_M \int_0^{\infty} \Phi_c(\lambda) \tau_0(\lambda) s_{\text{в.ф}}(\lambda) d\lambda}{\sigma_{\text{ш.в.ых}}} \quad (14)$$

ИЛИ

$$\mu_u = \frac{k_m k_f \int_0^{\infty} \Phi_c(\lambda) \tau_0(\lambda) D_{f_t}^*(\lambda) d\lambda}{\sqrt{A \Delta f_s}} \quad (15)$$

Здесь μ_u — отношение «сигнал–шум» в виде отношения амплитуды напряжения $u_{c.вых}$ на выходе ФПУ к среднему квадратическому значению шума $\sigma_{ш.вых}$; k_m — коэффициент, учитывающий видоизменения сигнала в электронных звеньях ОЭС и, в частности, потери мощности сигнала за счет модуляции потока; $\Phi_c(\lambda)$ — сигнал в виде потока излучения, являющийся функцией длины волны излучения λ ; $\tau_0(\lambda)$ — спектральная характеристика пропускания всей оптической системы, включая и модулятор; $s_{v_{f_t}}$ — спектральная характеристика вольтовой чувствительности ФПУ для центральной частоты f_t ; Δf_s — эквивалентная полоса частот; $D_{f_t}^*$ — удельная обнаружительная способность ФПУ; A — площадь чувствительного слоя ФПУ.

При выборе приемника производится оценка чувствительности и обнаружительной способности различных приемников с учетом влияния фонов, помех, шумов и сравнение их между собой по этим параметрам. Оценка качества отдельных приемников зависит от степени согласования спектральной чувствительности приемника со спектром излучения наблюдаемого объекта и спектральными характеристиками пропускания среды и оптической системы. Если известны коэффициенты использования сравниваемых приемников, то такую оценку можно провести следующим образом.

В случае, когда пороговая чувствительность всей ОЭС ограничивается лишь внутренними шумами — шумами приемника излучения, наилучшим является приемник, имеющий наименьший пороговый поток $\Phi_{пр}$, пересчитанный от условий паспортизации Φ_n к условиям работы ОЭС:

$$\Phi_{пр} = \Phi_n / \varphi_p \quad (16)$$

Здесь φ_n и φ_p — коэффициенты использования приемника для излучения, используемого при паспортизации, и для реальных рабочих условий, т.е. для $\Phi_{рл}$ (см. раздел 2). Эти коэффициенты рассчитываются с учетом селективного характера пропускания оптических сред на пути от источника к приемнику. Пороговый поток для помехи

$$\Phi_{пом} = \Phi_n \varphi_n / \varphi_{пом} \quad (17)$$

где $\varphi_{пом}$ — коэффициент использования излучения помехи.

Объединяя критерии (16) и (17), находим, что наилучшим является тот приемник, у которого отношение $\varphi_p/\varphi_{\text{пом}}$ наибольшее. При таком сравнении приемников необходимо учитывать возможное изменение порогового потока Φ_p в зависимости от суммарной освещенности на чувствительном слое приемника, что можно оценить с помощью его энергетической и фоновой характеристик. Излучение фона и внешних помех вызывает не только дополнительный ложный сигнал, но и приводит к увеличению собственных шумов приемника. Это также следует учитывать при выборе приемника.

В тех случаях, когда коэффициенты использования приемника неизвестны и не определен спектральный рабочий диапазон его работы, сопоставлять приемники целесообразно по максимуму отношения «сигнал-помеха». Достаточно простая методика такого сопоставления состоит в следующем.

В соответствии с формулами для величин потоков, приходящих на приемник от наблюдаемого объекта и от помех [1–3], в них следует подставлять спектральные коэффициенты пропускания среды τ_{cl} , в которой работает прибор, например атмосферы, а также спектральные плотности излучения источника и помехи, например фона. Иногда принимают, что коэффициенты пропускания среды одинаковы для излучения, поступающего от объекта и от помехи, а КПД оптической системы η_0 постоянен в рабочем спектральном диапазоне $\lambda_1 \dots \lambda_2$.

Значения интегралов в числителях (14) и (15) можно легко найти, используя простейшие графо-аналитические методы. Для этого в одном масштабе и в относительных единицах нужно построить зависимости $\Phi_c(\lambda)\tau_0(\lambda)$, $s_{\nu_{\text{f}}}$ или $D_{\text{f}}^*(\lambda)$. Затем следует найти площади соответствующих интегралов $Q_{\text{об}}$ и $Q_{\text{пом}}$ — числителей (14) и (15) в предварительно выбранном диапазоне $\lambda_1 \dots \lambda_2$. Если на одних и тех же графиках построить $s_{\nu_{\text{f}}}$ или $D_{\text{f}}^*(\lambda)$ не для одного, а для нескольких приемников, то, сравнивая отношения $Q_{\text{об}}$ и $Q_{\text{пом}}$, для этих приемников, можно выбрать оптимальный ПОИ с точки зрения спектральных соотношений в диапазоне $\lambda_1 \dots \lambda_2$.

На практике ОЭС часто может работать в условиях значительного облучения (засветки) полезным сигналом и фоном. Примером могут служить ОЭС, обнаруживающие изменения излучения мощного лазерного источника, или ОЭС дистанционного зондирования, работающие в условиях излучения подстилающей поверхности, создаваемого мощной солнечной подсветкой в виде потока $\Phi_{\text{ф}}$, попадающего на чувствительный слой приемника. В таких случаях при выполнении п. 3 обобщенной методики необходимо учитывать возможные изменения

ряда параметров и характеристик, входящих в «развернутое» выражение показателя эффективности работы ОЭС. Крутизна энергетической характеристики ФПУ, являющаяся его вольтовой s_v или токовой s_i чувствительностью, меняется не только из-за различия спектрального состава излучения при калибровке ФПУ и при его эксплуатации, что может учитываться путем пересчета параметров приемника (см. раздел 2), но и из-за нарушения линейности энергетических и фоновых характеристик ФПУ при облучении его мощным источником. Нелинейность пороговой чувствительности или удельной обнаружительной способности ФПУ D^* , которая может входить в «развернутое» энергетическое уравнение или неравенство, а также их разброс от образца к образцу часто делают невозможной подстановку в энергетическое уравнение паспортных значений s_v , s_i , D^* . К сожалению, в многочисленной литературе, посвященной ФПУ, данные об энергетических и фоновых характеристиках их чувствительности $s_v = f_s(\Phi)$ и шумов $\sigma_v = f_{ш}(\Phi)$ характеристиках, как правило, отсутствуют. Поэтому при проведении энергетических расчетов ОЭС, работающих в условиях мощных засветок, необходимо перед проведением п. 3 определять энергетические и фоновые характеристики конкретного используемого ФПУ, соответствующие условиям эксплуатации ОЭС.

После выбора приемника по его спектральным, энергетическим и фоновым характеристикам необходимо проверить оптимальность сделанного выбора и по другим критериям. Число этих критериев может быть, весьма большим в зависимости от назначения ОЭП и условий его работы. К ним относятся самые различные параметры: быстродействие, минимальные или максимальные достижимые размеры чувствительной площадки приемника, сопротивление, необходимое питание, стоимость и многие др. В настоящее время номенклатура приемников излучения достаточно велика, что дает возможность выбирать их для самых различных практических применений. Выше в разделе 5 приводились сведения о достоинствах и недостатках наиболее распространенных сегодня ПОИ.

Выбирая спектральный диапазон, оценивая соответствие чувствительности различных приемников требованиям, вытекающим из энергетического расчета, наконец, оценивая оптимальность согласования параметров и характеристик приемников и других звеньев прибора, нельзя забывать об условиях эксплуатации прибора. Это особенно важно для полевых приборов и систем, устанавливаемых на летательных аппаратах, где требуется высокая надежность приемника, стабильность его параметров во времени и в сложных метеорологических условиях,

малые массы и габариты как самих приемников, так и источников их питания или охлаждающих устройств. Очевидно, что только приемник, удовлетворяющий всем перечисленным требованиям, а также и другим, специфичным для каждой конкретной ОЭС, и является оптимальным для использования в ее составе.

Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию приемников оптического излучения (ПОИ).
2. Объясните принцип действия фотоэлектрических ПОИ.
3. Объясните принцип действия тепловых ПОИ.
4. Что называется параметром ПОИ? Приведите основные параметры приемников излучения.
5. Дайте определение следующим понятиям: ток шума ПОИ, напряжение шума ПОИ.
6. Чем определяется тепловой шум ?
7. Чем определяется дробовый шум?
8. Чем определяется радиационный (фотонный) шум?
9. Что называется чувствительностью приемника излучения?
10. Дайте определение порога чувствительности ПОИ в заданной полосе частот.
11. Дайте определение порога чувствительности ПОИ в единичной полосе частот.
12. Что такое пороговый поток приемника излучения Φ_n ?
13. Как называется величина, обратная Φ_n ? Какова её размерность?
14. Приведите формулу удельной обнаружительной способности ПОИ.
15. Приведите вид (примерный) энергетической характеристики ПОИ.
16. Приведите вид (примерный) фоновой характеристики ПОИ.
17. Приведите вид (примерный) частотной характеристики ПОИ.
18. Приведите вид (примерный) спектра шума ПОИ.
19. В чем различие между энергетической и фоновой характеристиками ПОИ?
20. Чем оценивается инерционность ПОИ?
21. Приведите основные характеристики ПОИ.
22. Что такое координатная характеристика двухэлементного ПОИ? От чего зависит её вид?
23. Что такое дрейф нуля координатной характеристики приемника излучения? От чего он зависит?
24. С какой целью производится пересчет параметров ПОИ? Укажите порядок пересчета параметров ПОИ.
25. Значение порогового потока ПОИ в энергетической системе равно $\Phi_{\text{зп}}$ определялось по эталонному источнику черному телу с температурой T_s . Напишите формулу пересчета этого параметра к температуре T_p .

26. Какие параметры ПОИ должны быть пересчитаны при изменении температуры наблюдаемого объекта относительно температуры черного тела или другого излучателя, по которому калибровался приемник?

27. Как называется отношение изменения электрической величины на выходе приемника излучения, вызванного падающим на него излучением, к количественной характеристике этого излучения в заданных эксплуатационных условиях?

28. Объясните назначение и принцип действия электронно-оптического преобразователя (ЭОП).

29. Какие приборы, устройства, элементы необходимы для определения спектральной чувствительности ПОИ?

30. Какие приборы, устройства, элементы необходимы для определения пороговой чувствительности ПОИ ?

31. Какие приборы, устройства, элементы необходимы для определения обнаружительной способности ПОИ?

32. Какие приборы, устройства, элементы необходимы для определения постоянной времени ПОИ ?

33. Нарисуйте структурную схему установки для определения важнейших параметров и характеристик приемника излучения: спектральной чувствительности, пороговой чувствительности, постоянной времени ПОИ.

34. Какие типы многоэлементных приемников излучения используются в современных ОЭП и ОЭС?

35. Перечислите виды шумов, присущие многоэлементным приемникам излучения (МПИ).

36. Что мешает уменьшать размеры отдельных чувствительных элементов многоэлементного приемника излучения?

37. Что ограничивает число отдельных элементов (пикселей) МПИ?

38. Укажите достоинства и недостатки приборов с зарядовой связью.

39. Какие функции могут выполнять многоэлементные приемники излучения (МПИ), работая в составе ОЭП?

40. Какие типы МПИ известны в настоящее время?

41. Какими специфическими шумами обладают МПИ?

42. Чем объясняется тенденция применения многодиапазонных (многоспектральных) ПОИ в составе ОЭП?

43. Какие требования предъявляются к многодиапазонным (многоспектральным) ПОИ?

44. Сравните между собой различные типы многоэлементных приемников излучения.

45. Сравните между собой различные типы многодиапазонных приемников излучения.

Список литературы

1. *Якушенков Ю.Г.* Теория и расчет оптико-электронных приборов: учебник для вузов. –Изд. 6-е, перераб. и доп. –М.: Логос, 2011. –568 с.
2. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Введение в проектирование оптико-электронных приборов: системный подход: Учебник/ Под ред. Ю.Г. Якушенкова. –М.: Университетская книга, 2016. –488 с.
3. *Якушенков Ю.Г.* Основы оптико-электронного приборостроения: Учебник. –Изд. 2-е, перераб. и доп. –М.: Логос, 2013. –376 с.
4. *Ишанин Г.Г., Челибанов В.П.* Приемники оптического излучения: Учебник / Под ред. В.В.Корогаева. –СПб.: Изд-во «Лань», 2014. –304 с.
5. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. –М.: Логос, 2007. –192 с.
6. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Инфракрасные системы «смотрящего» типа. –М.: Логос, 2004. –444 с.
7. *Парвлюсов Ю.Б., Родионов С.А., Солдатов В.П.* и др. Проектирование оптико-электронных приборов: Учебник / Под общ. ред. Ю.Г. Якушенкова –М.: Логос, 2000. –488 с.
8. *Высокоточные угловые измерения / Аникст Д.А., Константинович К.М., Меськин И.В.* и др. Под ред. Ю.Г. Якушенкова. –М.: Машиностроение, 1987. –480 с.
9. *Торшина И.П.* Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации. –М.: Университетская книга; Логос, 2009. –248 с.
10. *Тарасов В.В., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г.* Инфракрасные системы 3-го поколения / Под общ. ред. Ю.Г. Якушенкова. –М.: Логос. –2011. –240 с.
11. *Грузевич Ю.К.* Оптико-электронные приборы ночного видения. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. –276 с.

Содержание

Предисловие	4
1. Определение и классификация приемников излучения	5
2. Параметры приемников излучения	7
3. Характеристики приемников излучения.....	12
4. Паспортизация приемников. Пересчет их параметров.....	17
5. Основные виды приемников излучения, применяемых в оптико-электронных приборах	23
5.1. Приемники с внешним фотоэффектом	23
5.2. Приемники с внутренним фотоэффектом.....	25
5.3. Тепловые (неселективные) приемники излучения	30
5.4. Многоэлементные приемники излучения	32
5.5. Многодиапазонные (многоспектральные) приемники излучения ..	42
6. Методы выбора приемника излучения	47
Контрольные вопросы	53
Список литературы	55

Учебное издание

Ирина Павловна Торшина
Юрий Григорьевич Якушенков

ВЫБОР ПРИЕМНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА

Зав. редакцией *Е.А. Евтеева*

Компьютерная верстка *Е.Б. Кузнецова*

Дизайн обложки *А.Ю. Боков*

Подписано в печать 23.01.2017. Гарнитура Таймс

Формат 60×90/16. Бумага офсетная.

Объем 4 усл. печ. л.

Тираж 50 экз.

Заказ 001 Цена договорная

Издательство МИИГАиК

105064, Москва, Гороховский пер., 4

Отпечатано в типографии МИИГАиК