

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время наблюдается очевидный дефицит в литературе, посвященной приемникам оптического излучения. Сказанное относится в первую очередь к учебной и учебно-методической литературе. Приемники оптического излучения составляют существенную долю от элементных средств, используемых в оптико-электронном приборостроении и промышленности.

Предлагаемый учебник отражает различные аспекты теории приемников оптического излучения, такие как основы построения приемников различных типов, их параметры и характеристики.

Важным представляется включение в учебник большого раздела, посвященного параметрам, характеристикам, схемам включения и конструктивным особенностям приемников оптического излучения отечественных и зарубежных фирм, в том числе ведущих фирм США, Англии, Германии, Японии и других стран. Подобный раздел заметно увеличивает ценность издания и иллюстрирует важнейшие принципы создания современных приемников излучения.

В главе 1 приведена классификация приемников оптического излучения и рассмотрены их параметры и характеристики. В главе 2 рассмотрены приемники оптического измерения на основе внутреннего фотоэффекта. Глава 3 посвящена многоэлементным приемникам излучения, схемам включения фотоприемников на основе ПЗС-структур. В главе 4 описаны приемники излучения на основе внешнего фотоэффекта. В главе 5 представлены материалы по тепловым приемникам оптического излучения. Заключительная 6 глава посвящена приемникам на термоупругом эффекте в кристаллическом кварце, а также рассмотрению глаза как специфического приемника оптического излучения.

Следует отметить, что материалы учебника представляют несомненный интерес для аспирантов и инженерно-технических работников, имеющих дело с различными проблемами оптико-электронных приборов и систем.

Предлагаемый учебник подготовлен на основе лекционного курса «Приемники излучения», длительное время читаемого студентам сотрудниками кафедры «Оптико-электронные приборы и системы» Национального исследовательского университета ИТМО г. Санкт-Петербурга.

Авторы благодарят М. Г. Челибанову и Е. А. Сычеву за неоценимую помощь в подготовке рукописи к печати.

Авторы осознают, что данная книга не лишена недостатков, и с пониманием относятся к отзывам и замечаниям.

Отзывы и пожелания по содержанию книги просим направлять по адресу: Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, пр. Кронверкский, д. 49. Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики.

СОКРАЩЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В КНИГЕ

- АТЭ — анизотропный термоэлемент.
АЦП — аналого-цифровой преобразователь.
БЗУ — буферное запоминающее устройство.
БУМ — блок управления матрицей.
ВЗ — валентная зона.
ВР — верхний регистр.
ВУ — видеоусилитель.
ВЧ — высокочастотный.
ГМП — гибридный матричный приемник.
ГОИ — государственный оптический институт.
ДФЭУ — динамический фотодиодный умножитель.
ДЭУСП — специальный динамический электронный умножитель со скрещенным электрическим и магнитным полем.
ЗГ — задающий генератор.
ЗП — зона проводимости.
ИК — инфракрасный диапазон спектра.
ИКФ — инверсионный координатный фотоприемник.
КПД — коэффициент полезного действия.
КСИ — кадровый синхроимпульс.
КФ — координатный фотоприемник.
ЛПЗС — линейка ПЗС.
ЛФД — лавинный фотодиод.
МДП — металл — диэлектрик — полупроводник.
МКС — многокомпонентная система.
МКФ — многоэлементный координатный приемник.
МП — матричный приемник.
МПЗИ — матричный прибор с зарядовой инжекцией.
МПЗС — матрица ПЗС.
МПИ — многоэлементный приемник излучения.
МПТЭК — многоэлементный приемник на термоупругом эффекте в кристаллическом кварце.
МЦПОИ — многоцветный приемник оптического излучения.
НР — нижний регистр.
НСЛ — неселективный.
ОАП — оптико-акустический приемник излучения.
ОП — оптический прибор.
ОУ — операционный усилитель.

- ОЭД — оптико-электронный датчик.
ОЭП — оптико-электронный прибор.
ОЭПТЭК — оптический элемент — термоупругий преобразователь.
ОЭС — оптико-электронная система.
ПБФД — поверхностно-барьерный фотодиод.
ПЗИ — прибор с зарядовой инжекцией.
ПЗС — прибор с зарядовой связью.
ПОИ — приемник оптического излучения.
ППИ — пироэлектрический приемник излучения.
ПСГ — программируемый синхрогенератор.
ПТЭК — приемник на основе термоупругого эффекта в кристаллическом кварце.
ПУУС — преобразователь уровня управляющих сигналов.
ПФТ — полевой фототранзистор.
РТЭ — радиационный термоэлемент.
СВЧ — сверхвысокая частота.
СВЧФЭ — фотоэлемент со сверхвысокочастотным полем.
СЛ — селективный.
СН — секция накопления.
СП — секция памяти.
ССИ — строчный синхроимпульс.
ТГС — триглицинсульфат.
ТКС — температурный коэффициент сопротивления.
ТПОИ — тепловой приемник оптического излучения.
ТЭ — термоэлемент.
УФ — ультрафиолетовый диапазон спектра.
ФВС — формирователь видеосигнала.
ФД — фотодиод.
ФП — фотопотенциометр.
ФПЗС — ПЗС-фотоприемник.
ФПУ — фотоприемный узел (устройство).
ФР — фоторезистор.
ФТ — фототранзистор.
ФТИ — фототиристор.
ФФ — формирователь фаз.
ФФД — функциональный фотодиод.
ФФП — функциональный фотопотенциометр.
ФФР — функциональный фоторезистор.
ФЭ — фотоэлемент.
ФЭБВ — фотоэлемент бегущей волны.
ФЭУ — фотоэлектронный умножитель.
ФЭУБВ — улучшенный вариант фотоэлемента бегущей волны.
ЧКХ — частотно-контрастная характеристика.
ЩФФР — щелевой функциональный фоторезистор.
ЭВМ — электронно-вычислительная машина.
ЭДС — электродвижущая сила.
ЭОП — электронно-оптический преобразователь.

ОБОЗНАЧЕНИЯ ТЕРМИНОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КНИГЕ

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

- E_e [Вт/м²] — облученность.
 E_v [лм/м² = лк] — освещенность.
 H_e [Дж/м²] — энергетическая экспозиция.
 H_v [лк·с] — световая экспозиция.
 I_e [Вт/ср] — сила излучения в ваттах на стерадиан.
 I_v [лм/ср = кд] — сила света в люменах на стерадиан.
 $K(\lambda)$ [лм/Вт] — распределение спектральной световой эффективности монохроматического излучения.
 $K_{\lambda_{\max}} = 683$ [лм/Вт] — коэффициент максимальной световой эффективности монохроматического излучения при $\lambda = 0,555$ мкм.
 L_e [Вт/(м²·ср)] — энергетическая яркость.
 L_v [лм/(м²·ср) = кд/м²] — яркость.
 M_e [Вт/м²] — энергетическая светимость.
 M_v [лм/м²] — светимость.
 Q_e [Дж] — энергия излучения.
 Q_v [лм·с] — световая энергия.
 $V(\lambda) = K(\lambda)/K_{\lambda_{\max}}$ — относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения.
 θ_e [Вт·с/ср] — энергетическое освещивание.
 θ_v [лм·с/ср = кд·с] — освещивание.
 λ [мкм] — длина волны электромагнитного излучения в микрометрах.
 Φ_e [Вт] — поток излучения в ваттах.
 Φ_v [лм] — световой поток в люменах.
 $\Phi_{e\lambda}$ [Вт/мкм] — спектральная плотность потока излучения.
 $\Phi_{v\lambda}$ [лм/мкм] — спектральная плотность светового потока.
 $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ — распределение спектральной плотности потока излучения в относительных единицах.
 $\Phi_{v\lambda}(\lambda)$ — распределение спектральной плотности светового потока излучения в относительных единицах.
 $\Phi_{e\lambda_{\max}}$ [Вт/мкм] — максимальное значение спектральной плотности потока излучения.
 $\Phi_{e\lambda} = \Phi_{e\lambda}/\Phi_{e\lambda_{\max}}$ — спектральная плотность потока излучения в относительных величинах.
 $\varphi_{e\lambda}(\lambda) = \Phi_{e\lambda}(\lambda)/\Phi_{e\lambda_{\max}}$ — распределение спектральной плотности потока излучения в относительных величинах.

- $\Phi_{v\lambda,\max}$ [лм/мкм] — максимальное значение спектральной плотности светового потока.
- $\Phi_{v\lambda} = \Phi_{v\lambda}/\Phi_{v\lambda,\max}$ — спектральная плотность светового потока в относительных величинах.
- $\varphi_{v\lambda}(\lambda) = \Phi_{v\lambda}(\lambda)/\Phi_{v\lambda,\max}$ — распределение спектральной плотности светового потока в относительных величинах.

ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОИ

- A — площадь фоточувствительной площадки ПОИ.
- $c = 2,998 \cdot 10^8$ [м/с] — скорость распространения электромагнитных колебаний в вакууме.
- C — емкость ПОИ.
- $d\omega$ — элементарный пространственный угол, в котором распространяется излучение в стерадианах [ср].
- dA_1 — элементарная площадь излучателя.
- dA_2 — элементарная облучаемая (освещаемая) площадка.
- $d\Phi_e$ [Вт] — элементарный поток излучения в интервале $d\lambda$.
- $D^*(\Phi_\Phi)$ — фоновая характеристика обнаружительной способности ПОИ.
- $D^*(f)$ — частотная характеристика удельной обнаружительной способности ПОИ.
- D — обнаружительная способность ПОИ.
- D_1 — обнаружительная способность в единичной полосе частот ПОИ.
- D^* — удельная обнаружительная способность ПОИ.
- E_C — минимальная энергия, которую может иметь свободный электрон.
- E_V — максимальная энергия электронов в связанном состоянии в валентной зоне.
- $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ [Кл] — заряд электрона.
- $f_{\text{гр}}$ — граничная частота модуляции потока излучения для фотоприемника, при которой сигнал за счет инерционных свойств фотоприемника падает в 2 раза.
- f_m — частота модуляции потока излучения.
- $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ [Дж·с] — постоянная Планка.
- I_t — темновой ток ПОИ.
- $\bar{I}_{\text{др.ш}}^2$ — дисперсия тока дробового шума ПОИ.
- $\bar{I}_{\text{тш}}^2$ — дисперсия теплового тока шума.
- $\bar{I}_{\text{грш}}^2$ — дисперсия тока генерационно-рекомбинационного шума для фоторезисторов на основе собственной проводимости.
- $\bar{I}_{\text{мш}}^2$ — дисперсия тока шума мерцания ФЭ.
- $\bar{I}_{\text{ш}\Sigma}^2$ — дисперсия суммарного тока шумов.
- I_Φ — фототок ПОИ.
- $I_{\text{ш}}$ — ток шума ПОИ.
- $I(U)$ — вольт-амперная характеристика ПОИ.
- $I_\Phi(\Phi_e)$ — энергетическая характеристика фототока ПОИ.
- $I_{\text{ш}}(U)$ — вольтовая характеристика тока шума ПОИ.
- $I_{\text{ш}}(\Phi_\Phi)$ — фоновая характеристика тока шума ПОИ.
- $I_{\text{ш}}(f)$ — частотная характеристика тока шума.
- I_o — общий ток в цепи ПОИ.
- $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ [Дж·К⁻¹] — постоянная Больцмана.

- $K(f)$ — коэффициент усиления измерительного тракта по напряжению от частоты.
 $k_{\text{гл}}$ — коэффициент полезного действия глаза в относительных величинах.
 M — коэффициент умножения по току.
 P_{max} — максимальная допустимая рассеиваемая электрическая мощность ПОИ.
 $R(T), I_{\text{т}}(T), I_{\text{ш}}(T)$, — изменение различных параметров ПОИ от температуры.
 $U_{\text{ш}}(T), D^*(T)$ и т. д.
 $R_{\text{т}}$ — темновое сопротивление фотоприемника.
 $R_{\text{д}}$ — динамическое сопротивление фотоприемника.
 $R(E_v)$ — люкс-омическая характеристика ПОИ.
 $R(\Phi_{\phi})$ — фоновая характеристика сопротивления ПОИ.
 $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки.
 $S(U)$ — вольтовая характеристика чувствительности ПОИ.
 $S_{\text{инт}}$ — интегральная чувствительность фотоприемника.
 S_I — интегральная токовая чувствительность фотоприемника.
 S_{λ} — монохроматическая чувствительность фотоприемника.
 $S_{\text{отн}}(\lambda)$ или $s(\lambda)$ — распределение монохроматической чувствительности в относительных единицах.
 $S_{\text{абс}}(\lambda)$ или $S(\lambda)$ — распределение абсолютной спектральной чувствительности фотоприемника.
 $S_{\text{имп}}$ — импульсная чувствительность фотоприемника.
 $S(\Phi_{\phi})$ — фоновая характеристика чувствительности ПОИ.
 $S(f)$ — частотная характеристика чувствительности ПОИ.
 S_{Φ_e} — чувствительность ПОИ по потоку излучения.
 S_{Φ_v} — чувствительность ПОИ по световому потоку.
 S_{E_v} — чувствительность ПОИ по освещенности.
 S_U — интегральная вольтовая чувствительность фотоприемника.
 $S_{U_{\lambda,\text{max}}}$ — вольтовая чувствительность ПОИ в максимуме чувствительности.
 $S_{D_{\lambda,\text{max}}}$ — токовая чувствительность ПОИ в максимуме чувствительности.
 $T [\text{K}]$ — абсолютная температура в градусах Кельвина.
 $U_{\text{ш}}$ — напряжение шума ПОИ.
 U_p — рабочее напряжение питания ПОИ.
 $U_{\text{ш}}(U)$ — вольтовая характеристика напряжения шума ПОИ.
 $U_{\Phi}(\Phi_e)$ — энергетическая характеристика напряжения фотосигнала ПОИ.
 $U_{\text{ш}}(\Phi_{\phi})$ — фоновая характеристика напряжения шума ПОИ.
 $U_{\text{ш}}(f)$ — частотная характеристика напряжения шума на нагрузке.
 U_o — общее напряжение на нагрузке ПОИ.
 $U_{\text{т}}$ — темновое напряжение на нагрузке ПОИ.
 $\overline{U}_{\text{тщ}}^2$ — дисперсия напряжения теплового шума.
 $\overline{U}_{\text{грш}}^2$ — дисперсия напряжения генерационно-рекомбинационного шума для фоторезисторов на основе собственной проводимости.
 $\overline{U}_{\text{тк.ш}}^2$ — дисперсия напряжения темнового тока шума фотокатода.
 $\overline{U}_{\text{др.ш}}^2$ — дисперсия напряжения дробового шума ПОИ.
 $\overline{U}_{\text{ш}\Sigma}^2$ — дисперсия суммарного напряжения шумов.
 $\alpha_{\text{т}}$ — коэффициент поглощения.

- $\alpha_{\tau\lambda}$ — спектральный коэффициент поглощения.
 δS — нестабильность чувствительности ПОИ.
 ΔE_s — ширина запрещенной зоны полупроводника.
 ΔE_a — ширина зоны между акцепторным уровнем E_a и валентной зоной E_v .
 ΔE_d — ширина зоны между донорным уровнем E_d и зоной проводимости E_c .
 $\Delta\lambda_{\text{эфф}}$ — эффективная ширина полосы чувствительности фотоприемника.
 $\Delta\lambda_{\text{эфф.т}}$ — эффективная полоса чувствительности для тепловых ПОИ.
 Δf — полоса частот усилительного тракта.
 $\Delta\lambda_{\text{эфф.т}}^0$ — эффективная полоса чувствительности для тепловых ПОИ от черного тела.
 $\Delta f'_{\text{эфф}}$ — эффективная шумовая полоса пропускания измерительного тракта.
 ε_t — коэффициент теплового излучения.
 $\varepsilon_{\tau\lambda}$ — спектральный коэффициент теплового излучения.
 χ — коэффициент использования потока излучения фотоприемником в относительных единицах.
 λ_{max} — длина волны излучения, при которой спектральная чувствительность фотоприемника имеет максимальное значение.
 λ' — коротковолновая граница спектральной чувствительности фотоприемника, где чувствительность падает до $0,1S_{\lambda_{\text{max}}}$.
 λ'' — длинноволновая граница спектральной чувствительности ПОИ, где чувствительность падает до $0,1S_{\lambda_{\text{max}}}$.
 $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}]$ — постоянная Стефана — Больцмана.
 τ — постоянная времени фотоприемника.
 $\tau_{\text{сп}}$ — постоянная времени фотоприемника по фронту спада импульса.
 $\tau_{\text{н}}$ — постоянная времени фотоприемника по фронту нарастания импульса.
 τ_{RC} или $\tau_{\text{рел}}$ — постоянная времени схемной релаксации.
 $\Phi_{\text{п}}^*$ — удельный порог чувствительности ПОИ.
 $\phi(f)$ — фазовая характеристика ПОИ.
 $\Phi_{\text{рад.п}}$ — радиационный порог чувствительности ПОИ (на уровне фона).
 $\Phi_{\text{п.п}}$ — квантовая пороговая чувствительность ПОИ.
 $\Phi_{\text{п}}$ — порог чувствительности в заданной полосе частот.
 $\Phi_{\text{п.1}}$ — порог чувствительности в единичной полосе частот ПОИ.
 Φ_1 — действующее значение потока излучения.
 $\Phi_{\text{эфф}}$ — эффективный поток излучения.
 $\Phi_{\text{ф}}$ — поток излучения фона.

ФОТОРЕЗИСТОРЫ

- d — ширина фоточувствительного элемента ФР.
 $E_{\text{р.п}}$ — облученность ПОИ в фотонах.
 g — объемная скорость генерации носителей заряда.
 h — толщина пластинки полупроводника ПОИ.
 H — толщина фоточувствительного элемента ФР.
 l — длина фоточувствительного элемента ФР.
 n_0 и p_0 — равновесная концентрация электронов и дырок в полупроводнике соответственно.

- $P_{\text{фрmax}}$ — максимально допустимая электрическая мощность рас-
сения.
 $r_{\text{св}}$ и $r_{\text{т}}$ — сопротивление освещенной и неосвещенной частей ФР.
 R_{Φ} — сопротивление ФР при потоке Φ .
 S_R — относительное изменение сопротивления ФР, не зависи-
щее от схемы включения.
 S_{I_d} — динамическая токовая чувствительность ПОИ.
 t — время.
 u_e и u_h — подвижности электронов и дырок.
 $U_{\text{п}}$ — напряжение питания.
 $U_{\text{фрmax}}$ — максимальное допустимое напряжение питания.
 $\alpha(\lambda)$ — спектральный показатель поглощения.
 Δp и Δp — генерированные излучением электроны и дырки соответ-
ственно.
 $\Delta\sigma$ — приращение удельной проводимости ФР при освещении.
 $\Delta\Phi$ — приращение потока излучения.
 ΔR_{Φ} — изменение сопротивления ФР при приращении потока
излучения на $\Delta\Phi$.
 ΔU_c — приращение падения напряжения на нагрузке ПОИ.
 ΔI — приращение тока в цепи ПОИ.
 $\eta(\lambda)$ — фотонный (квантовый) выход полупроводника.
 ν — частота электромагнитных колебаний.
 σ_0 — собственная темновая удельная проводимость ФР.

ФОТОДИОДЫ

- $A_{\text{фд}}$ — площадь фоточувствительной площадки фотодиода.
 h_n — толщина базы n -полупроводника.
 h_p — толщина базы p -полупроводника.
 I_s — темновой ток термически генерированных неосновных
носителей.
 I_{Φ} — фототок.
 $I_{\text{фрmax}}$ — максимальный фототок.
 $j_{\Phi\lambda}$ — плотность фототока от излучения с длиной волны λ .
 p^+n — значительная примесь p -типа.
 $p-n^+$ — значительная примесь n -типа.
 R_0 — сопротивление $p-n$ -перехода при отсутствии освещения.
 $R_{\text{нmax}}$ — максимальное сопротивление нагрузки.
 U_R — падение напряжения на нагрузке от протекающего тока в
цепи ПОИ.
 $U_{\text{фд}}$ — напряжение на ФД.
 $U_{\text{хх}}$ — напряжение холостого хода ПОИ.
 $Z_{\text{н}}$ — полное реактивное и активное сопротивление нагрузки.
 v — доля перекомбинированных носителей заряда, доспехших
до $p-n$ -перехода.
 $\rho(\lambda)$ — спектральный коэффициент отражения.
 Φ_{max} — максимальный поток излучения.

ЛАВИННЫЕ ФОТОДИОДЫ, ФОТОТРАНЗИСТОРЫ, ПОЛЕВЫЕ ФОТОТРАНЗИСТОРЫ

- $I_{\text{э}}$ — ток эмиттера.
 $I_{\text{к}}$ — ток коллектора.
 $j_{\text{вх}}$ — плотность входного тока ЛФД.
 j_{Φ} — плотность фототока.

- j_t — плотность темнового тока.
 L_{dp} — индуктивность дросселя.
 R_s — сопротивление эмиттерного перехода по постоянному току ФТ.
 R_k — сопротивление коллекторного перехода ФТ.
 $S = dI_c/dU_n$ — крутизна характеристики передачи ПФТ.
 $U_{\text{пер}}$ — напряжение в области объемного заряда в $p-n$ -переходе ЛФД.
 $U_{\text{пр}}$ — напряжение лавинного пробоя ЛФД.
 $U_{\text{с-н}}$ — напряжение от фотосигнала на нагрузке ПФТ.
 β — коэффициент передачи по току ФТ.
 ΔI_c — приращение тока сигнала ПФТ.

ФОТОТИРИСТОРЫ

- $I_{k,01}, I_{k,02}$ — обратные темновые токи утечки коллекторных переходов ФТИ.
 $I_{\phi 1}, I_{\phi 2}, I_{\phi 3}$ — первичные фототоки, возникающие у $p-n$ -переходов П1, П2, П3 ФТИ.
 $U_{\text{вкл}}$ — напряжение включения ФТИ.
 $U_{\text{вкл},0}$ — напряжение включения ФТИ при $\Phi = 0$.
 α_n и α_p — коэффициенты усиления по току ФТИ типов $p-n-p$ и $n-p$ соответственно.
 $\Phi_{\text{спр}}$ — максимальный управляющий световой поток, при котором происходит спрямление выходной вольт-амперной характеристики ФТИ.
 $\Phi_{\text{пуск}}$ — пусковой поток излучения ФТИ.

МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ КООРДИНАТНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ

- C_{oc} — паразитная емкость монтажа в цепи обратной связи.
 $e_{\text{шу}}$ — спектральная плотность напряжения шума усилителя.
 I_n — ток в нагрузке.
 $I_{\text{опр}}$ — ток опрашиваемого элемента.
 $I_{\text{неопр}(i)}$ — ток через неопрашиваемую i -ю ветвь.
 $I'_{\text{опр}}$ — суммарный ток неопрашиваемых ветвей.
 $I_{nx}, I_{mx} (I_{ny}, I_{my})$ — токи элементов МКФ при смещении изображения по оси X (оси Y).
 $i_{\text{шпу}}$ — спектральная плотность шумового тока усилителя.
 $i_{\text{шФД}}$ — спектральная плотность шумового тока фотодиода.
 $i_{R_{\text{oc}}}$ — спектральная плотность шумового тока сопротивления резистора R_{oc} .
 K — коэффициент усиления операционного усилителя (ОУ).
 k_{Σ} — коэффициент передачи сумматора.
 k_R — коэффициент сопротивления.
 k_0 — коэффициент усиления операционного усилителя.
 R_{oc} — сопротивление резистора в цепи обратной связи.
 R_d — динамическое сопротивление.
 $R_{\text{вх}}$ — входное сопротивление.
 $R_{nx}, R_{mx} (R_{ny}, R_{my})$ — сопротивление элементов n и m при смещении изображения по оси X (оси Y).
 $R_{\phi i}, R_{ti}$ — сопротивление элементов при воздействии излучения и без него соответственно.
 T_R — температура резистора в цепи ОС.

- $U_x (U_y)$ — выходной сигнал МКФ при смещении точечного изображения по оси $X (Y)$.
 $U_{nx}, U_{mx} (U_{ny}, U_{my})$ — напряжение на элементах n и m МКФ при смещении точечного изображения по оси $X (Y)$.
 $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение.
 U_c — выходное напряжение в цепи ОС.
 Z_{oc} — выходное сопротивление в цепи ОС.
 $Z_{\text{вх}}$ — входное сопротивление.
 Δk_0 — нестабильность коэффициента усиления ОУ.
 δ — относительное изменение сигнала на выходе ФПУ.
 ω — угловая частота в спектре сигнала, $\omega = 2\pi f$, где f — циклическая частота.
 $\tau_{\text{имп}}$ — длительность импульса облучения.

ПРИБОРЫ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

- $A_{\text{эл}}$ — площадь электрода.
 $C'_{\text{ок}}$ — удельная емкость пленки окисла.
 d и d' — соответственно размеры элемента вдоль направления строк и столбцов матрицы.
 $d_{\text{ок}}$ — толщина пленки окисла.
 E_{max} — предельно допустимое значение напряженности электрического поля в пленке окисла ПЗС-структуры.
 f_t — тактовая частота переключения потенциалов.
 f_x и f_y — пространственные частоты входного оптического гармонического сигнала на фоточувствительной площадке.
 h_t — коэффициент относительного разброса темновых токов по кристаллу.
 H_t — коэффициент относительного разброса темновых токов по кристаллу ПЗС.
 \bar{i}_t — средняя плотность темнового тока.
 \bar{i}_c — средняя плотность тока накопления сигнального заряда.
 k_{cb} — коэффициент взаимного влияния (связи) элементов.
 N_{max} — максимальное число зарядов, накапливаемых в потенциальной яме ПЗС.
 N_a — концентрация акцепторной примеси в подложке.
 n_n, p_p — концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике.
 N_{max} — предельный заряд, который может быть накоплен в ячейке ПЗС.
 $n = km$ — общее число потенциальных ям вдоль направления переноса заряда, где k — число фаз управления, m — число ячеек вдоль направления переноса.
 $N_{\text{пс}}$ — плотность поверхностных состояний на один электрон-вольт.
 n_0 — число нулевых (пустых) потенциальных ям ПЗС.
 N — число носителей, уходящих из зарядового пакета на поверхностные состояния за один перенос в расчете на единицу площади поверхности ПЗС, пересчитанное к числу зарядов ПЗС.
 Q_p — заряд информационного пакета ПЗС.
 $Q(x_i y_j)$ — зарядовый рельеф ПЗС, адекватный пространственному распределению освещенности.
 Q_c — сигнальный заряд в элементе ПЗС, возникающий при освещении.

- Q_t — темновой заряд в элементе ПЗС, возникающий за счет тепловой генерации.
 \bar{Q}_t — среднее по кристаллу значение темнового заряда.
 q_1 — заряд до акта передачи.
 q_2 — заряд, перенесенный в соседнюю потенциальную яму.
 q_0 — заряд, накопленный в ячейке ПЗС до переноса.
 \bar{q}_t — среднее число темновых электронов.
 \bar{q}_Φ — среднее число фоновых зарядов.
 \bar{q}_c — среднее значение сигнального заряда от объекта наблюдения.
 T_n — время накопления.
 T_{xp} — время хранения информации в ПЗС-структуратах.
 T_i — период следования импульсов генератора, управляющего ПЗС-структурой.
 $U_{зап}$ — напряжение записи информации ПЗС-структурой.
 $U_{хр}$ — напряжение хранения информации в элементах ПЗС.
 $U_{вых}$ — выходное напряжение.
 U_n — напряжение на металлическом электроде относительно подложки в режиме накопления.
 W — полная энергия, отдаваемая генератором тактовых импульсов за цикл передачи ПЗС.
 $W(f_x)$ — частотно-контрастная характеристика ПЗС в горизонтальном направлении.
 $W(f_y)$ — частотно-контрастная характеристика ПЗС в вертикальном направлении.
 x_i и y_j — соответственно координаты центра изображения элемента i -го столбца и j -й строки матрицы ПЗС.
 ϵ_0 — диэлектрическая постоянная.
 $\epsilon_{ок}$ — диэлектрическая проницаемость окисла.
 ϵ — коэффициент неэффективности передачи.
 σ_r — количественная характеристика геометрического шума.
 $\sigma_{ш.н}$ — среднеквадратическое значение шумового напряжения на выходе ПЗС.
 $k_{(v/q)}$ — коэффициент преобразования заряда в выходное напряжение.
 $\sigma_{\Sigma ш.н}$ — суммарное среднеквадратическое значение шумового напряжения на выходе ПЗС.
 $\sigma_{ш.т}$ — среднеквадратическое число зарядов в j -й ячейке ПЗС.
 $\sigma_{ш.ф}$ — среднеквадратическое значение флуктуации числа зарядов, обусловленное фоновым излучением.
 $\sigma_{ш.с}$ — среднеквадратическое значение флуктуации числа сигнальных зарядов, накапливаемых в ячейках ПЗС и характеризующих фотонный шум.
 $\sigma_{ш.г}$ — среднеквадратическое отклонение среднего числа темновых зарядов в различных ячейках ПЗС, характеризующее геометрический шум.
 $\sigma_{ш.п}$ — среднеквадратическое значение флуктуаций заряда при переносе ПЗС.
 $\sigma_{ш.в.у}$ — среднеквадратическое значение шума выходного устройства.
 Δx и Δy — пространственные периоды ПЗС-структурь секции накопления в вертикальном и горизонтальном направлениях соответственно.
 ψ — отношение сигнал/шум.

ФОТОЭЛЕМЕНТЫ И ФОТОУМНОЖИТЕЛИ

- C_p — разделительная емкость ФЭ.
 $C_{бл}$ — емкость блокировки ФЭ.
 E_Φ — фотоэлектронная работа выхода.
 f_m — частота модуляции потока излучения.
 I_k — суммарный ток фотокатода.
 $I_{др}$ — ток дробового шума.
 $I_{тепл}$ — ток теплового шума.
 $I_{та}$ — темновой ток анода.
 $I_{тк}$ — темновой ток фотокатода.
 $I_{фк}$ — ток фотокатода от засветки.
 $I_i(t)$ — импульс тока i -го каскада.
 m и u — масса и скорость фотоэлектрона.
 n_d — среднее число эмиттируемых динодом электронов.
 n_K — число первичных фотоэлектронов, вылетевших из фотокатода при его освещении.
 n_a — число электронов, собираемых на анод.
 Q_i — заряд электронного пакета, эмиттируемого i -м динодом.
 Q_{ci} — заряд, выдаваемый на динод конденсатором C_i .
 S_a — интегральная анодная чувствительность ФЭУ.
 $S_{фк}$ — интегральная чувствительность фотокатода.
 $U_{ак}$ — напряжение между анодом и фотокатодом.
 γ_K — коэффициент сбора фотоэлектронов, вылетевших из фотокатода на первый динод.
 γ_i — коэффициент сбора носителей от динода i к диноду K .
 $\Delta M/M$ — относительное изменение коэффициента усиления ФЭУ.
 σ — коэффициент вторичной электронной эмиссии ФЭУ.
 σ_i — коэффициент вторичной эмиссии i -го динода.
 $\tau_n = 1/f_m$ — длительность светового импульса.

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

- L_Φ — яркость темнового фона ЭОП.
 Γ_e — электронно-оптическое увеличение.
 ξ — световая отдача экрана ЭОП.
 η — коэффициент преобразования ЭОП.
 η_L — коэффициент яркости ЭОП.

ТЕРМОЭЛЕМЕНТЫ

- Π_t — коэффициент Пельтье.
 α — коэффициент поглощения.
 $\alpha_{t\parallel}$ и $\alpha_{t\perp}$ — коэффициенты термо-ЭДС ТЭ по направлениям, параллельному и перпендикулярному данному кристаллографическому направлению.
 α_t — удельная термо-ЭДС.
 ΔV_t — термо-ЭДС.
 $\eta_{тэ}$ — коэффициент полезного действия ТЭ.
 σ_t — полная термическая проводимость спая ТЭ.

БОЛОМЕТРЫ

- $C_{бол}$ — теплоемкость чувствительного слоя болометра.
 α_t — температурный коэффициент сопротивления болометра.
 $\alpha_{тп}$ — температурный коэффициент сопротивления полупроводникового болометра.
 $\sigma_{т.бол}$ — полная термическая проводимость болометра.

**ПРИЕМНИКИ НА ОСНОВЕ
ТЕРМОУПРУГОГО ЭФФЕКТА
В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КВАРЦЕ**

- A — площадь фотоприемной площадки ПТЭК.
 $a = \lambda/C\gamma$ — коэффициент температуропроводности.
 a_{11} — коэффициент температуропроводности кристаллического кварца в направлении, перпендикулярном к оптической оси Z .
 A_a — амплитудный коэффициент ПТЭК.
 C — удельная теплоемкость.
 $C_{\text{тк}}$ — удельная теплоемкость кристаллического кварца.
 $C_{\text{пр}}$ — емкость ПТЭК.
 $C_{\text{вх}}$ — емкость входной цепи.
 d_{11}, d_{14} — пьезомодули кварца.
 E_{max} — облученность ПТЭК.
 f — частота модуляции потока излучения.
 F — термоупругий потенциал перемещения.
 G — модуль сдвига.
- $G = C_{11} = 8,605 \cdot 10^{11}$ [дин/см²] — модуль упругости кристаллического кварца по оси X .
 h — толщина кварцевой пластинки.
 $k_{\text{п}}$ — коэффициент поглощения ПТЭК.
 $k_{\text{тун}}$ — импульсный коэффициент термоупругого преобразования ПТЭК.
 k_1 и k_2 — коэффициенты, связанные со свойствами ПТЭК.
 $\overline{P_x}$ — вектор поляризации кристаллического кварца по оси X .
 q — удельный тепловой поток.
 Q_A [дж/см²] — поверхностная плотность энергии излучения.
 $R_{\text{ут}}$ — сопротивление утечки.
 $R_{\text{вх}}$ — сопротивление входной цепи.
 V — скорость распространения тепловой волны.
 $|V_{\text{вх}}|$ — модуль комплексного напряжения.
 $Z = 1/f$ — продолжительность полного колебания температуры.
 α_{11} — коэффициент линейного расширения.
 $\alpha_{11} = 13,6 \cdot 10^{-6}$ [К⁻¹] — коэффициент линейного расширения кристаллического кварца в направлении, перпендикулярном оси Z .
 γ — плотность.
 $\gamma_{\text{к}}$ — плотность кристаллического кварца.
 ϵ — диэлектрическая проницаемость кристаллического кварца.
 λ — коэффициент теплопроводности.
 λ_{11} — коэффициент теплопроводности кристаллического кварца в направлении, перпендикулярном оси Z .
 $\lambda_{\text{тепл}}$ — длина тепловой волны в ПТЭК.
 μ — коэффициент Пуассона.
 σ_{yy} — термоупругое напряжение по оси Y .
 σ_{zz} — термоупругое напряжение по оси Z .
 $\tau_{\text{и}}$ — длительность импульса.
 $v = v(x, t)$ — одномерное нестационарное тепловое поле полупространства (x — координата, t — время).
 v_{max} — максимальное значение нестационарной температуры.
 φ — фазовый сдвиг выходного сигнала.
 $\varphi_{\text{о}}$ — фазовый сдвиг от реакции электрической цепи.

РАДИАЦИОННЫЕ КАЛОРИМЕТРЫ

Q_H — энергия импульса.
 V_{\max} — максимальное значение ЭДС термобатареи или падение напряжения на термометре сопротивления.

ГЛАЗ

D_t — диаметр телескопа.
 D'_t — выходной зрачок телескопа.
 d_r — размер зрачка глаза.
 E_∞ — пороговый блеск бесконечно удаленного объекта.
 $f_{\text{об}}$ и $f_{\text{ок}}$ — фокусные расстояния объектива и окуляра соответственно.
 h — размер объекта.
 k — коэффициент пропорциональности.
 L_n — пороговая яркость для глаза.
 U — половина апертурного угла объектива.
 α и α' — угловые размеры наблюдаемого объекта в пространстве предметов и изображений соответственно.
 $\Gamma_{\text{пред}}$ — предельное увеличение микроскопа.
 γ — коэффициент контрастности.
 δ — предельное угловое разрешение глаза.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универ»
e-Univers.ru