

6  
Д. / А-25  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ СОВЕТ ИНСТИТУТОВ ФИЗИКИ,  
МЕТАЛЛОФИЗИКИ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ АКАДЕМИИ НАУК  
УССР

---

С. В. СВЕЧНИКОВ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ФОТОДВУХПОЛЮСНИКОВ  
КАК ЭЛЕМЕНТОВ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Автореферат  
диссертации, представленной на соискание ученой степени  
доктора технических наук

КИЕВ — 1985



АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ УЧЕНЫЙ СОВЕТ ИНСТИТУТОВ ФИЗИКИ,  
МЕТАЛЛОФИЗИКИ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ АН У С С Р.

С. В. СВЕЧНИКОВ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОТОДВУХПОЛЮСНИКОВ КАК  
ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Автореферат  
диссертации на соискание  
ученой степени доктора  
технических наук.

Киев, 1965 г.

Центральная библиотека  
ЕНЕРГОТЕХНИКА



6  
А 25

OK

Работа выполнена в Институте полупроводников АН УССР  
(Київ)

Об"единенный Ученый Совет институтов физики, металло-физики и полупроводников АН УССР препровождает Вам для ознакомления автореферат диссертации Свечникова С.В. на тему: "Физические основы фотодвухполюсников как элементов электрической цепи", представленной на соискание ученой степени доктора технических наук.

Автореферат разослан 4 июля 1965 г.  
Защита состоится в сентябре м-це 1965 г.

Отзыв просим направлять по адресу:  
Київ-28, Б-Китаевская 144, Институт физики АН УССР.

Ученый секретарь Об"единенного Совета  
доктор физ.-мат. наук (М.С.Бродин)

308674

**Центральная научная  
БИБЛИОТЕКА  
Академии наук Киргизской ССР**

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Реферлируемая диссертация является физико-техническим исследованием в области фотоэлектрических приборов на основе полупроводников типа А<sup>III</sup>В<sup>V</sup>I. Ее содержание составляет разработка и анализ принципа фотоэлектрического преобразования, ограниченного внутренним фотоэффектом в однородных, гомогенных полупроводниках. В ней рассматриваются свойства, характеристики, методы построения и анализа фотодвухполюсников как перспективных элементов систем фотоэлектрической автоматики, управления, измерения, контроля и преобразования. В этом смысле диссертацию следует рассматривать как первую попытку систематической разработки физических основ расчета фотодвухполюсников.

Отличительной особенностью фотоэлектрических приборов является управление по лучу (фотоэлектрический вход). По сигнальной, электрической цепи они приводятся к полуавтономным четырех- или двухполюсникам, параметры которых определяются параметрами фотоэлектрического входа. У этих элементов вход и выход в электрическом отношении оказываются полностью развязанными, что дает основание классифицировать их как фоточетырехполюсники или фотодвухполюсники.

Фотоэлектрические приборы на основе гомогенных полупроводников в большинстве случаев приводятся к фотодвухполюсникам. К последним относятся фоторезисторы, фотоваристоры, фотодиоды, фотоваракторы, фотокоммутаторы и др. В таких приборах как фотопотенциометры, фототранзисторы, фотогираторы фотодвухполюсник является их основным структурным элементом. Он представляет собой об"ем полупроводника, заключенного между двумя электродами служащими для связи с внешней электрической цепью, проводимость которого изменяется под действием излучения. Характеристики и параметры



фотодвухполюсников определяются физическими процессами, обусловленными, с одной стороны, собственно внутренним фотоэффектом в полупроводнике, а с другой стороны, контактными явлениями, связанными с прохождением через полупроводник сквозного тока.

Сопротивление фотодвухполюсника  $Z_{\varphi}$  является в общем случае комплексным и нелинейным:  $Z_{\varphi} = f(L, \lambda, \omega_L, \omega, i)$ , где  $L$ ,  $\lambda$ ,  $\omega_L$  - интенсивность, длина волны и частота модуляции возбуждающего излучения;  $\omega$  - частота питающего напряжения;  $i$  - ток через элемент.

Таким образом, исследование фотодвухполюсников должно включать в себя исследование их фотоэлектрических характеристик и анализ их как элементов электрической цепи, обуславливающий оптимальный режим фотодвухполюсников в схемах.

Параметры фотодвухполюсника определяются по его основным характеристикам, к которым относятся: спектральная, световая или люксамперная, вольтамперная, переходная, частотная, температурная.

В зависимости от типа фотодвухполюсника выходной его параметр может соответствовать току, сопротивлению, емкости и другим величинам.

Совокупность перечисленных характеристик вместе с характеристиками, отражающими специфику того или другого прибора, позволяет определить систему параметров фотодвухполюсника, связывающую расчет его цепи с физическими закономерностями внутреннего фотоэффекта в полупроводнике. Для этого необходимо располагать не только эмпирическими характеристиками фотодвухполюсника, но также и возможностью их анализа, основывающегося на закономерностях внутреннего фотоэффекта в полупроводниках. Требования к фотопроводнику определяются высокой чувствительностью в заданной области спектра, широким диапазоном темновых удельных сопротивлений, начиная от состояния изолятора, высокой технологичностью, широким диапазо-

ном рабочих температур. Наилучшим образом перечисленным требованиям удовлетворяют соединения второй и шестой групп периодической системы элементов  $A^{IVVI}$ : сульфиды, селениды, теллуриды  $Zn$  и  $Cd$ . Это позволяет на основе полупроводников типа  $A^{IVVI}$  разрабатывать высокоэффективные фотоэлектрические приборы, упрощает методики их исследования, дает возможность выявить и реализовать все особенности принципа фотоэлектрического преобразования. При этом свойства полупроводника накладывают ограничения лишь на количественные характеристики фотодвухполюсников. Методы же анализа и расчета остаются достаточно общими и могут быть распространены на фотодвухполюсники любого другого типа.

Большой интерес к полупроводникам типа  $A^{IVVI}$  проявляется также в связи с их высокой чувствительностью к ионизирующим  $\alpha$ -, рентгеновскому,  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучениям. Этот интерес стимулируется развитием радиоактивных методов автоматики, контроля, преобразования, рентгено- и  $\gamma$ -дефектоскопии, диагностики, терапии и пр. Исследование закономерностей и особенностей внутреннего фотоэффекта под действием ионизирующего излучения в полупроводниках типа  $A^{IVVI}$  являются основой для разработки высокочувствительных надежных малогабаритных индикаторов, дозиметров, счетчиков, мишеней рентгеновских видиконов, электролюминесцентных преобразователей, источников питания и пр. В этой области сделано чрезвычайно мало. Вместе с тем уже сейчас очевидно, что использование внутреннего фотоэффекта под действием ионизирующего излучения - это новое направление в массовом применении полупроводников. Особенно перспективным в этом смысле является в настоящее время область рентгеновского излучения до 200 кэВ. Если будет доказана корреляция между рентгено- и фотопроводимостью, то тем самым окажется возможным распространение методов анализа и расчета фотодвухполюсников, разработанных для видимой части спектра, и на область ионизирующего излучения.



Резюмируя сказанное, можно следующим образом формулировать основные задачи, связанные с разработкой физических основ фотодвухполюсников: 1. Разработка и реализация принципа фотоэлектрического преобразования в фотодвухполюсниках на основе полупроводниковых соединений типа А<sup>IV</sup>В<sup>VI</sup>. 2. Разработка методов анализа и расчета фотодвухполюсников как элементов электрической цепи. 3. Разработка экспериментальных методик исследования фотодвухполюсников. 4. Исследование характеристик и режимов работы фотодвухполюсников. 5. Исследование влияния контактов на характеристики фотодвухполюсников. 6. Исследование закономерностей и особенностей фотопроводимости и проводимости в ионизирующем излучении, в частности, рентгенопроводимости.

В качестве объектов исследования в диссертации рассматриваются фоторезисторы, фотоваракторы, фотоключи, фотопотенциометры, большинство из которых относится к оригинальным разработкам. Перечисленные приборы выполнены на основе монокристаллов и пленок сернистого кадмия и некоторых его аналогов.

Диссертация содержит шесть глав, в которых в соответствии с поставленной задачей рассматриваются: 1. Фоторезисторы как элементы электрической цепи. 2. Особенности переходных характеристик фоторезисторов и методы их частотной коррекции. 3. Фотоэлектрические коммутаторы. 4. Физические основы фотоваракторов. 5. Вопросы теории и расчета фотопотенциометров как фотоэлектрических преобразователей. 6. Некоторые особенности рентгенопроводимости полупроводников типа А<sup>IV</sup>В<sup>VI</sup>.

Кроме того, в приложения внесены вопросы, связанные с оригинальными разработками технологии получения и исследованием общих электрофизических свойств тонких фоточувствительных пленок А<sup>IV</sup>В<sup>VI</sup>, контактов к ним (линейных, запорных, прозрачных и непрозрачных), а также электрической формовки контактов как одного из методов

получения заданных параметров контактов и стабилизации их свойств. Каждой главе предпослан параграф отображающий состояние и постановку вопроса.

ГЛАВА ПЕРВАЯ. Исследуются характеристики фоторезисторов, исходя из общей зависимости  $i_{\varphi} = f(L, U_{\varphi})$  с учетом возможных нелинейностей фототока. Обсуждается корреляция шумовых и фотоэлектрических характеристик фоторезисторов, их эквивалентные схемы и система параметров. В данную главу включены вопросы температурной коррекции цепей с фоторезисторами и расчета их элементов.

В основу анализа положено феноменологическое выражение для фототока

$$i_{\varphi} = \frac{ea\mu\tau k_n}{d^2} L U_{\varphi}, \quad (1)$$

где  $a$  - квантовый выход;  $e, \mu, \tau$  - заряд, подвижность, среднее время жизни носителей тока;  $k_n$  - коэффициент поглощения;  $L$  - интенсивность возбуждающего излучения;  $U_{\varphi}$  - приложенное к фоторезистору напряжение;  $d$  - расстояние между электродами.

Принимая для  $\tau = \tau(L, U_{\varphi}), \mu = \mu(L, U_{\varphi})$  степенную аппроксимацию, (1) можно привести к виду

$$i_{\varphi} = A_0 L^{\alpha} U_{\varphi}^{\gamma}, \quad (2)$$

где

$$A_0 = \frac{ea_0\tau_0\mu_0k_n}{d^2}; \quad \alpha = \frac{L}{i_{\varphi}(L)} \cdot \frac{\partial i_{\varphi}}{\partial L}; \quad \gamma = \frac{U_{\varphi}}{i_{\varphi}(U_{\varphi})} \cdot \frac{\partial i_{\varphi}}{\partial U_{\varphi}}$$

Выражение (2) было экспериментально проверено на промышленных фоторезисторах, на монокристаллах  $CdS, CdSe, CdTe, CdS_x, CdSe_{1-x}$  с омическими и запорными контактами, на сублимированных пленках тех же соединений, в условиях возбуждения неразложенным белым светом, монохроматическим излучением видимого диапазона, жестким сильно проникающим ионизирующим излучением, в



случае продольной и поперечной фотопроводимости. Во всех перечисленных случаях оно хорошо выполняется в широком диапазоне

$L$  и  $V_{\varphi}$  (2 + 3 порядка). Коэффициенты нелинейности люкс- и вольтамперной характеристик  $\alpha = \alpha(V_{\varphi})_{L=const}$   $\delta = \delta(L)_{V_{\varphi}=const}$

Зависимость  $\alpha = \alpha(V_{\varphi})$  связывалась нами с отклонением контакта от нелинейности. Представляя переходное сопротивление контакта параллельным  $C_k R_k$  - контуром, можно показать, что  $Z_k(\omega) \sim V_{\varphi}^{\delta} L^{\alpha}$ . Для режима об'емного заряда были получены зависимости  $\alpha = \alpha(V_{\varphi})$ ,  $\delta = \delta(L)$ , отвечающие случаям постоянного и переменного приложенных напряжений. Они оказались качественно различными:  $\alpha(V_{\varphi})$  почти линейно возрастающая функция,  $\delta(L)$  наоборот, падающая. Этот результат находится в хорошем качественном согласии с экспериментальными данными, полученными на монокристаллических фоторезисторах с золотыми и платиновыми нелинейными контактами.

Об'яснение зависимости  $\delta(L)$  было дано нами через посредство зависимости подвижности носителей тока от степени заполнения уровней прилипания. В широком диапазоне изменения  $L$ , как показывают экспериментальные данные,  $\mu_s(L) \sim L^{d_s}$ , откуда  $\delta' = \delta - 1 \sim L^{-d_s}$ , где  $d_s < d$ .

В случае  $\alpha = \alpha(V_{\varphi})$ ,  $\delta = \delta(L)$  для фоторезистора возможен режим управляемой нелинейности для люксамперных характеристик по  $V_{\varphi}$ , для вольтамперных - по  $L$ , что было подтверждено экспериментально.

Показана корреляция фотоэлектрических  $i_{\varphi} = f(L, V_{\varphi}, \lambda)$  и шумовых  $i_{ш} = \varphi(L, V_{\varphi}, \lambda)$  характеристик фоторезисторов. Отсюда  $i_{ш} = B_{ш}(L) V_{\varphi}^m$ ,  $i_{ш} = A_{ш}(V_{\varphi}) L^n$ . Это позволяет при расчете шумовых параметров фоторезисторов пользоваться той же методикой, что и при расчете его фотоэлектрических параметров. Удовлетворительная корреляция наблюдается также в области низких частот между

спектральным распределением шума и частотной характеристикой фотолока. Для сернистого кадмия относительная спектральная плотность шума  $\delta_{ш} < 0,5$  и зависит от типа полупроводника, рода контактов, состояния поверхности.

Температурный коэффициент полного тока фоторезистора определяется шумной

$$\beta_T = \beta_{T\tau} + \beta_{T\varphi}, \quad (4)$$

где  $\beta_{T\tau} = \frac{1}{I_{\tau}} \frac{dI_{\tau}}{dT}$  - температурный коэффициент темнового тока;  $\beta_{T\varphi} = \frac{1}{I_{\varphi}} \frac{dI_{\varphi}}{dT}$  - температурный коэффициент фототока. Показано, что для высокочувствительных фотопроводников типа А<sup>П</sup>У<sup>И</sup>

$$\beta_{T\tau} \ll \beta_{T\varphi} \quad \text{При этом в широком диапазоне температур} \\ (173 - 373^{\circ}K) \quad \beta_T > 0, \quad \text{и} \\ i_{\varphi} \approx I_0 e^{\frac{qV}{kT}}, \quad (5)$$

где для фоторезисторов на основе сернистого и селенистого кадмия  $\beta \approx 10^{-8} + (4 + 5)10^{-4}$  град.<sup>-1</sup>

Аномально большой температурный коэффициент фототока (1-10 град.<sup>-1</sup>), при  $T \approx 293^{\circ}K$  наблюдается в случае температурного гашения фотопроводимости. В настоящей работе этот эффект был реализован на продольных монокристаллических фоторезисторах с  $\delta_{ш}$  или  $\delta_{\varphi}$  - контактами, полученными катодным напылением в сильных полях. Такие элементы могут быть использованы для регистрации длинноволнового инфракрасного излучения.

Рассмотрены два случая элементарной температурной коррекции цепей с фотодвухполюсниками: по току и по напряжению. Такая коррекция не снижает коэффициента передачи цепи фотодвухполюсника и допускает включение элементов коррекции внешней и частотной характеристик датчика. Показано, что таким путем удается повысить температурную стабильность цепи на порядок. При этом относительная погрешность коррекции обусловлена зависимостями

$$\Delta \alpha(T) = \frac{\alpha_{\tau(T)} - \alpha_{\tau(T_0)}}{\alpha_{\tau(T_0)}}, \quad \Delta \beta_T(L) = \frac{\beta_{T(L)} - \beta_{T(L_0)}}{\beta_{T(L_0)}}, \quad (6)$$



где

$$dL = \frac{k_n}{k_n + k_p}$$

Исходя из общего выражения для фототока, основное уравнение фотодвухполюсника можно привести к виду

$$di_{\varphi} = \frac{1}{R_i} (G dL + dU_{\varphi}), \quad (7)$$

где

$$\frac{1}{L_i} = \frac{\partial i_{\varphi}}{\partial U_{\varphi}}; \quad S_i = \frac{\partial i_{\varphi}}{\partial L}; \quad G = S_i R_i$$

Отсюда следует возможность представления фотодвухполюсника эквивалентным генератором напряжения либо тока. Расчет цепи эквивалентного генератора производится исходя из системы параметров фотодвухполюсника:  $A_0, \delta, \alpha, R_i, S_i, R_{\varphi \text{ дон}}$ . Вольтовая чувствительность датчика, его статическая чувствительность, порог чувствительности, максимально допустимое рабочее напряжение определяются соответственно

$$S_u = S_i R_i \frac{\delta}{1+\delta}; \quad S_0 = \frac{S_i}{\alpha}; \quad R_u = \frac{2 \bar{U}_{i0} (1+\delta)}{\delta S_i R_i}; \quad U_{\varphi \text{ макс}} = \frac{R_{\varphi \text{ дон}}}{S_0 L} \quad (8)$$

Представление об эквивалентном генераторе вместе с введенной системой параметров является удобным, так как позволяет при расчете цепей с фотодвухполюсниками использовать хорошо разработанный аппарат расчета электронных цепей.

**ГЛАВА ВТОРАЯ.** Исследовались переходные характеристики фоторезисторов типа  $A^{ПВУ}$  и зависимость их кинетических параметров от режимов работы ( $L, T^{\circ}, E_{\varphi}, \lambda$ , уровня подсветки). Разработан метод эффективной коррекции частотной, переходной и выходной характеристик фотодвухполюсников с использованием элементов отрицательного сопротивления. Развита метод мгновенных времен применительно к исследованию и аппроксимации переходных характеристик фотодвухполюсников.

Логическое завершение настоящие исследования получили в разработке универсального корректирующего каскада к фотоприемни-

кам типа фоторезисторов и дифференциального  $\tau$  - метра.

Исследование переходных характеристик фоторезисторов при возбуждении излучением различного качества, различной интенсивности, в условиях различных температур, при различных значениях смещающего поля показало, что они отвечают либо экспоненциальному  $i_{\varphi s}(t) = I_{\varphi y} (1 - e^{-t/\tau_0})$ , либо гиперболическому  $i_{\varphi s}(t) = I_{\varphi y} e^{-t/\tau_3}$ , либо гиперболическому  $i_{\varphi s}(t) = I_{\varphi y} \frac{t}{\tau_3}$ , либо гиперболическому  $i_{\varphi s}(t) = I_{\varphi y} \frac{t}{(1 + a_3 t)^{n+1}}$  законам протекания процесса - постоянные процессов установления, зависящие от от режима фотодвухполюсника. В большинстве случаев с достаточной для расчета цепей с фотодвухполюсниками степенью приближения переходные характеристики фототока могут быть аппроксимированы экспонентами, параметрами которых выступают скачек фототока  $\Delta i_{\varphi}$  для быстрого участка и усредненные постоянные времени  $\tau_0, \tau_3$ . При этом  $\Delta i_{\varphi} = f(L, \lambda, T^{\circ}, E_{\varphi}, i_{\varphi_0})$ ;  $\tau_0 = \tau_0(\tau_0, L, \lambda, T^{\circ}, E_{\varphi}, i_{\varphi_0})$ ;  $\tau_3 = \tau_3(\tau_0, L, \lambda, T^{\circ}, E_{\varphi}, i_{\varphi_0})$ , где  $\Delta i_{\varphi}, \tau_0, \tau_3$  - эмпирические параметры фотодвухполюсника, определяемые винетикой фотопроводимости, родом контактов и его конструкцией. Получены эмпирические соотношения, позволяющие рассчитывать при известных аппроксимирующих коэффициентах  $\Delta i_{\varphi}, \tau_0, \tau_3$  в соответствии с режимом работы фотодвухполюсника.

Показано, что использование фоторезисторов для регистрации низкочастотных модулированных сигналов ограничивается их следящим режимом. Следящий и неследящий режимы определяются временем выхода  $\tau_0 = \tau_0(L)$ , ограничивающим длинновременную релаксацию, сильно зависящую от уровня подсветки. При  $\tau_0 \ll \frac{1}{4\pi\omega_L}$  фототок следует за мгновенным изменением импульсов излучения; при  $\tau_0 \gg \frac{1}{4\pi\omega_L}$  имеет место интегрирование  $\Pi$  - образного импульса с наполнением. Выражения, определяющие установления концентраций носителей тока

$$n(t) = \frac{N_{ct}}{\pi} (1 - e^{-t/\tau_0}) + \frac{N_{ct}}{2} \sin \omega_L t - \frac{2}{3} \frac{N_{ct}}{\pi} (\cos 2\omega_L t - e^{-t/\tau_0})$$

при  $\tau_0 \ll \frac{1}{4\pi\omega_L}$



$$u(t) \approx \frac{K_{CT}}{\pi} (1 - e^{-t/\tau_0}) - \frac{K_{CT}}{\omega_L} 2\pi\tau_0 (\cos \omega_L t - e^{-t/\tau_0}) - \frac{K_{CT} 3\pi\tau_0}{\omega_L} \sin 2\omega_L t \quad (10)$$

при  $\tau_0 \gg \frac{1}{4\pi\omega_L}$

При переменных параметрах переходных характеристик их точная аппроксимация возможна лишь по мгновенному времени релаксации. В диссертации разработан метод функционального преобразования релаксационных кривых фототока, при котором однозначно задается их аппроксимация в дифференциальных параметрах процесса. При  $dt \rightarrow dt$   $\tau_m \rightarrow \tau$  в случае экспоненциального,  $\tau_m \rightarrow \frac{1}{\alpha_m K_m} + \frac{1}{K_m} t$  в случае гиперболического протекания процессов.

Разработана и изготовлена оригинальная модель дифференциального  $\tau$ -метра. Он представляет собой электронное функциональное устройство. В основу его работы положен алгоритм, по которому входная величина  $[i_\varphi(t)]$  на интервале  $dt = \frac{di_\varphi}{dt}$  делится на свою производную  $[i'_\varphi(t)]$ , взятую с обратным знаком. Применение  $\tau$ -метра не ограничивается случаями фотопроводимости. Он может быть использован для исследования устанавливающихся процессов в любых электрических цепях.

Эффективный метод коррекции переходных, частотных и выходных характеристик фоторезисторов обеспечивается введением в их цепь отрицательного сопротивления, компенсирующего сопротивление нагрузки. Для фоторезистора это соответствует режиму идеального генератора тока. Коррекция отрицательным сопротивлением позволяет повысить быстродействие инерционного датчика на 2-3 порядка практически без снижения отношения сигнала в шуму. При коррекции выходной характеристики это отвечает повышению эффективной чувствительности датчика у границ диапазона ( $L_{мин} - L_{макс}$ ) на 2-3 порядка. При этом выходная характеристика равномерна вплоть до значений  $L = 10^3 - 10^4$  эк.

Идея коррекции отрицательным сопротивлением была реализована

в простом активном четырехполюснике на базе двухкаскадного конверторного усилителя. Были разработаны и исследованы варианты на электронных лампах и транзисторах. В диссертации приводятся их характеристики и параметры, подтверждающие основные выводы и результаты анализа. Такой четырехполюсник может быть рекомендован в качестве универсального предусилителя для фотодатчиков типа фоторезисторов. В миниатюрном исполнении он был с успехом применен в фотореле, в фотокоммутаторах, в фотопреобразователях цепей усилителей постоянного тока.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ. Приводятся результаты исследования работы фотодвухполюсников в ключевом режиме. Формулируются требования к фотоключам, исходя из условий заданных полосы пропускания, быстродействия, пределов коммутируемой мощности, коэффициента коммутации. С этих позиций рассмотрены возможные конструкции фотоключей, выполненных по типу продольных и поперечных фоторезисторов, а также особенности коммутации ими низковольтных и высоковольтных цепей.

Анализируются переходные характеристики фотоключей с учетом действия отрицательной обратной связи по сопротивлению нагрузки. Метод переходных характеристик развит для исследования природы и свойств контактов металл-полупроводник.

Статический коэффициент коммутации фотоключа определяется отношением фототока к току, ограниченному объемным зарядом. Отсюда получены неравенства, определяющие порог срабатывания и минимальное расстояние между электродами, при которых реализуется ключевой режим фоторезисторов

$$L \gg \frac{S_k V_\varphi^{s-1}}{d k_n}; d \gg 10^{-5} \sqrt{K_{z мин} S_k k_n V_k}, \quad (11)$$

где  $K_{z мин} = \left| \frac{Z_T}{Z_\varphi} \right|$  - отношение темнового к световому импульсов фотоключа. При этом

$$\frac{1.6 \cdot 10^{-4} L^2 (V_k - i_k k_n)}{i_k d} > \frac{d}{S_k} > \frac{Z_T \omega \epsilon}{4\pi} \quad (12)$$



Таким образом, с ростом мощности ключа при заданном коэффициенте коммутации снижается верхняя граница его полосы пропускания.

Показана возможность получения на основе монокристаллов и пленок сернистого кадмия низковольтных ( $V_p \leq 10^{-2} \text{ В}$ ) и высоковольтных ( $V_p \geq 1,5 \cdot 10^3 \text{ В}$ ) фотоключей с порогом срабатывания  $1 \rightarrow 10 \text{ лк}$  и коэффициентом коммутации  $> 10^4$ . Первые выполняются по типу продольных фоторезисторов с серебряными антизапорными контактами, вторые - по типу продольных фоторезисторов с золотыми и теллуровыми запорными контактами. Приведены их характеристики и параметры.

Из анализа эквивалентной схемы продольного фотоключа следует, что его быстродействие ограничивается емкостью элемента, обуславливающей высокий удельный вес схемной релаксации в установлении тока.

Особенностью режима фотоключей является работа на высокоомную нагрузку. При этом существенное влияние на переходные характеристики фотоключа оказывает отрицательная обратная связь по току. В случае контактов, отклоняющихся от нейтральных, обратная связь при линейной кинетике фотопроводимости приводит к ускорению переднего и появлению  $\delta$ -образности у заднего фронтов импульса фототока. Этот эффект связывается нами с наличием у контакта емкости

объемного заряда  $C_k = f(\varphi_k)$ , где  $\varphi_k \approx V_0 - i_p R_k$ . В общем случае, когда  $C_k \neq 0$  для кривой затухания фототока было получено выражение

$$\frac{t}{\tau_3} = \ln \frac{(1 + \sqrt{1 - \frac{V_k}{V_0}})(1 - \sqrt{1 - \frac{V_{k0}}{V_0}})}{(1 - \sqrt{1 - \frac{V_k}{V_0}})(1 + \sqrt{1 - \frac{V_{k0}}{V_0}})} - 2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V_k}{V_0}}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V_{k0}}{V_0}}} \right), \quad (13)$$

где  $V_{k0} = I_{py} R_k$ , которое хорошо согласуется с экспериментальными данными, взятыми непосредственно по осциллограммам.

Выражение (13) было получено и другим независимым путем при подстановке в кинетическое уравнение

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{x}{\tau_3(t)}$$

значения  $\tau_3 = \tau_{30} V^{-\alpha_3}$  соответствующего аппроксимации эмпирических кривых  $\tau_3 = \tau_3(V_p)$ .

Из анализа (13) получен критерий ограничения сопротивления нагрузки по условию нелинейного влияния обратной связи

$$R_k \leq 0,4 \frac{V_0}{I_{py}} \quad (14)$$

Из (14) видно, что оно существенно меньше значений  $R_k$ , определяемых по условию максимального коэффициента передачи последовательной цепи фоторезистора.

Аналогичное рассмотрение было проделано для нейтрального контакта. Показано, что в этом случае

$$\frac{t}{\tau_3} = \ln \left( \frac{R_k}{R_{py}} \frac{V_0 - V_k}{V_k} \right). \quad (15)$$

Точка перегиба лежит при  $t_0 = 0$  и на осциллограммах практически не проявляется. Со стороны переднего фронта  $i_p(t)$ , в противоположность антизапорному и запорному контактам, наблюдается замедление процесса с  $\tau_0' = 2\tau_0$ .

Поскольку для каждого типа контакта характерна своя зависимость  $C_k = f(\varphi_k)$ , постольку представляется возможным связать природу контакта с видом релаксационных кривых  $i_p(t)$  при наличии глубокой отрицательной обратной связи. Метод прост и отличается высокой чувствительностью. Он был проверен на нейтральных кадмиевых, антизапорных кадмиевых и индиевых, запорных золотых и теллуровых контактах к монокристаллам и пленкам  $CdS$  и  $CdSe$ . Результаты сравнивались с данными вольтамперных характеристик и измерениями низкочастотного шума.

Разработанный в диссертации метод переходных характеристик может рассматриваться как существенное дополнение к известным методам зондовых вольтамперных и шумовых характеристик при исследовании природы и свойств контакта металл-полупроводник.



**ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.** Разработаны физические основы фотоваракторов на полупроводниках типа А<sup>П</sup>В<sup>У</sup>І.

Проанализированы случаи поверхностно-барьерной и структурной фотоёмкости. Исследованы характеристики фотоваракторов различных типов. Получены соотношения, позволяющие рассчитывать фотоваракторы как элементы электрической цепи по условию оптимума их параметров. Рассмотрены принципиальные устройства и технология фотоваракторов на основе пленок и монокристаллов сернистого и селенистого кадмия. Разработана оригинальная методика исследования параметров  $R_{var} C_{var}$  - цепей, к которым приводятся фотоваракторы, продольные фоторезисторы, мишени видиконов, электролюминесцентные ячейки и пр. Оригинальная методика предложена также в случае определения параметров вентиляльных фотоэлементов с большой барьерной ёмкостью. Поверхностно-барьерная фотоёмкость исследовалась на монокристаллах и пленках  $CdS$  и  $CdSe$  толщиной 8-12 мк, на противоположные поверхности которых катодным распылением наносилось золото, серебро или медь. Из эквивалентной схемы элемента следует

$$C_3 \approx \frac{1 + \omega^2 R_k^2 C_k^2}{\omega^2 C_k^2 R_k^2} \cdot \frac{C_k R_k}{R_n} \quad (16)$$

где  $C_k = C_k(L, \lambda)$ ;  $R_k = R_k(L, \lambda)$ ;  $R_n = R_n(L, \lambda)$ .

Ограничивая ёмкость  $C_k$  ёмкостью объёмного заряда и принимая в случае сернистого кадмия в широком диапазоне освещенностей  $R_n \sim L^{-1/2}$ , было получено  $C_k \sim (L)^{1/2}$  и  $C_3 \sim L$ . Экспериментально линейная световая характеристика у фотоварактора на основе сернистого кадмия наблюдалась до освещенностей 100-200 лк, что хорошо согласуется с изложенным выше. Ее крутизна составляет 10-100 пф/лк.мм<sup>2</sup> при  $V_0 > 1$  в и 10<sup>8</sup>-10<sup>4</sup> пф/лк.мм<sup>2</sup> при  $V_0 \leq 10^{-1}-10^{-2}$  в. При этом  $R_k = 10^8-10^9$  ом/мм<sup>2</sup>,  $R_n = 10^6-10^7$  ом/мм<sup>2</sup> в темноте и 10<sup>7</sup>-10<sup>5</sup>, 10<sup>3</sup>-10<sup>4</sup> ом/мм<sup>2</sup> на свету соответственно. Отсюда низкая добротность варакторов данного типа, что ограничивает их применение низкочас-

тотными цепями.

Исходя из принципиальной конструкции фотоварактора на основе структурной фотоёмкости, предложена его эквивалентная схема. Из ее анализа следует

$$\frac{C_3}{C_T} = \varphi = \frac{a^{2\alpha} + g_0^2}{a^{2\alpha} + g_0^2(1+\kappa)} \quad (17)$$

где  $\left(\frac{R_k}{R_{k0}}\right) = \left(\frac{L_0}{L}\right)^\alpha$ ;  $g_0 = \omega R_{k0} C_k$ ;  $\frac{L}{L_0} = a$ ;  $\frac{C_T}{C_k} = \kappa$ .

Отсюда приведенная крутизна

$$S_c = \frac{2g^2\kappa}{[1+g^2(1+\kappa)]^2} \quad (18)$$

Ее максимальное значение соответствует  $\kappa = \kappa_0 \approx \frac{1+g^2}{g^2}$ . При этом  $S_{cm} = S(g)$ . Показано, что добротность фотоварактора  $Q_3 = Q_3(S_{cm})$ . Оптимальные  $Q_3$  и  $S_c$  имеют место при  $\kappa \geq \kappa_0$  и  $g = 2+5$ . Экспериментальная проверка основных соотношений приведена на лабораторных образцах фотоваракторов на базе крупных монокристаллов (5x0,5 мм), сублимированных поликристаллических пленок  $CdS$  толщиной 250 мк и аморфных пленок  $CdS_x CdSe_{1-x}$ , толщиной 15-30 мк. В качестве прозрачных электродов использовались  $SnO_2$  и  $CdO$ , в качестве изолирующей прослойки -  $SiO$  и халькогенидные стекла.

Кроме световых, были исследованы также спектральные, температурные и переходные их характеристики. Они соответствуют аналогичным характеристикам фоторезисторов в соответствии с зависимостью  $R_n = f(L, \lambda, t, T^0)$ , определяющей  $C_3 = \varphi(L, \lambda, t, T^0)$ .

Разработан метод определения параметров  $R_{var} C_{var}$  - цепей по их частотным и фазовым характеристикам в случае, когда число независимых переменных не превышает пяти, этого достаточно для большинства фотодвухполюсников любого типа. Характерные точки на кривых  $Z_x = Z(\omega)$ ,  $\varphi_x = \varphi(\omega)$  определяются как

$$Z \rightarrow Z_0 = R_{in} + \sum_{i=1}^n R_i \quad \text{при } \omega \rightarrow 0; \quad (19)$$



$$Z \rightarrow Z_{\infty} = R_m \quad \text{при } \omega \rightarrow \infty;$$

$$Z = Z_m \cos \varphi_k = R_m + \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{1 + \omega_k^2 R_i^2 C_i^2} \quad \text{при } \omega = \omega_k > 0; \quad (20)$$

$$Z = Z_0 \sin \varphi_k = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_k R_i^2 C_i^2}{1 + \omega_k^2 R_i^2 C_i^2}, \quad (22)$$

$$Z = Z_0 \sin \varphi_0 = \sum_{i=1}^n \omega_0 C_i \quad \text{при } \omega = \omega_0 < \infty, \quad (23)$$

где  $R_m$  - поперечное сопротивление контактов.

Таким образом, могут быть определены независимо не только эквивалентные, но и структурные параметры фотодвухполюсников и исследованы их зависимости от различных воздействующих факторов в том числе от величины смещающего постоянного или переменного напряжения.

В диссертации частотно-фазовый метод был применен для определения параметров обоих рассмотренных типов фотоваракторов при числе независимых величин три и пять соответственно. Он прост, универсален и обеспечивает точность в пределах 10 %, что вполне приемлемо для конструктивного расчета фотодвухполюсников. Сравнение эксперимента с расчетом показало правильность принятых ранее их эквивалентных схем.

Другая методика определения параметров эквивалентной схемы поверхностно-барьерной фотоемкости вытекает из анализа ее переходных характеристик. Их вид обусловлен процессами заряда и разряда емкости  $C_k$  в  $R_c$  - контуре. Эта методика была применена при исследовании зависимостей  $C_k = C_k(L, \lambda)$ ,  $R_k = R_k(L, \lambda)$ , фотозащитных элементов типа ФЭС в режиме фотоваракторов. Она отличается исключительной простотой и надежностью. Точность ее ограничивается точностью обработки осциллограмм, по которым определяются постоянные времени процессов релаксации.

**ГЛАВА ПЯТАЯ.** Дан анализ и конкретные разработки фотопотенциометров, управляемых в функции электрических параметров, исходя из наибольшей эффективности преобразования: электрический сигнал - световой сигнал - электрический сигнал. Разработана последовательная теория следящих фотопотенциометров, исследованы режимы их работы. Проанализирован общий случай использования фотопотенциометров в режиме функциональных преобразователей. Экспериментальные исследования были проведены на лабораторных макетах преобразователей, выполненных на основе пленочной технологии.

Из структурной схемы фотопотенциометра как преобразователя следует, что его выходная характеристика  $R_{\varphi} = R(\xi_y)$ , где  $\xi_y$  - управляющий фактор, определяется характеристикой преобразующего элемента  $L = L(\xi_y)$  с одной стороны и световой характеристикой фотодвухполюсника  $R_{\varphi} = R(L)$  с другой стороны. При этом крутизна преобразования зависит от степени корреляции их спектральных характеристик. Были исследованы различные управляемые источники света как элементы фотопреобразователей в сочетании с различными фоторезисторами. Показано, что в настоящее время наибольшую эффективность преобразования обеспечивают газоразрядные и электролюминесцентные источники, у которых  $L \sim \xi_y^{\delta_n}$ , где  $\delta_n \geq 1$ . Используя фоторезисторы на основе  $Al^{III}V^{VI}$  того или иного состава, удается реализовать корреляционный коэффициент  $0,7 \div 0,75$  при крутизне выходной характеристики  $10^2 \div 10^7$  ом/в. При этом

$$\frac{dR_{\varphi}(\xi_y)}{d\xi_y} = \frac{1}{\left(\frac{R_{\varphi 0}}{R_T}\right) + \left(\frac{\xi_y}{\xi_0}\right)^{\alpha_2}}; \quad \frac{dR_{\varphi}}{d\xi_y} \sim \frac{\alpha_2}{\left(\frac{\xi_y}{\xi_0}\right)^{1+\alpha_2}}, \quad (24)$$

где  $\alpha_2 = \alpha \delta_n$ ;  $\xi_0$  - постоянная.

Для проверки основных положений теории нами были разработаны и изготовлены фотопотенциометры на миниатюрных газоразрядных лампах с холодным катодом,  $ZnS: Mn$  - сублимат-фосфором,  $GAP: Zn$  - диодах в сочетании с  $CdS: Cu$ ,  $CdSe$ ,  $CdS_x$ ,  $CdSe_{1-x}$

308674

Центральная научная  
БИБЛИОТЕКА  
Академии наук Киргизской ССР



пленочных фоторезисторах. Их характеристики оказывались близки к оптимальным.

Разработана теория следящего фотопотенциометра. Его дифференциальное уравнение

$$\psi_i''(x) = \frac{1}{L_i^2} \psi_i(x), \quad (25)$$

где  $\psi_i$  - эффективный потенциал на фотослое;  $L_i$  - радиус его спада. Уравнение (25) справедливо с точностью до индексов как для темновой, так и для световой областей фотопотенциометра. В соответствии с (25) эквивалентная схема следящего фотопотенциометра представляется неоднородной длиной линией. Общее решение (25) трудно обозримо и непригодно ни для анализа, ни для расчета. Получен критерий, допускающий переход к схеме с сосредоточенными параметрами. Показано, что в случае фотопроводников типа А<sup>П</sup>В<sup>У</sup>1 он выполняется с достаточной степенью приближения. При этом основное уравнение фотопотенциометра имеет вид:

$$\varphi(\eta_e) = \frac{A + D\eta_e}{C + B\eta_e - F\eta_e^2}, \quad (26)$$

где  $\eta_e$  - координата светового зонда. По нему рассчитываются выходная и нагрузочная характеристики фотопотенциометра, а также основные параметры (коэффициенты передачи и нелинейности, динамический диапазон, разрешающая способность и др.), отвечающие оптимальным условиям его работы. Показано, что для следящих фотопотенциометров возможны три режима: потенциальный, токовый, обращенный. Дан их анализ, приведены характеристики.

Линейный случай отвечает потенциальному режиму с экстремальными параметрами фотопотенциометра. Токовый режим отвечает нелинейной выходной характеристике фотопотенциометра. Для него может быть указана область параметра  $\zeta_e = \frac{L}{L_e}$  = ширина светового зонда / длина потенциометра, соответствующая оптимальным характеристикам прибора. Режим обращенного фотопотенциометра (теневого зонда) характеризуется высоким коэффициентом нелинейности и узким дина-

мическим диапазоном. Это ограничивает его применение частными задачами. Показано, что при переменной ширине резистивного слоя

$$W = W(x) \quad \text{на основе фотопотенциометров возможно выполнение}$$

функционального преобразования электрических сигналов. Дифференциальное уравнение в этом случае

$$\frac{d^2 C}{dF^2} = \frac{1}{v^2(F)} e(F) \quad (27)$$

не имеет общего решения. В пренебрежении токами утечки в случае узкого светового зонда было получено выражение для профиля резистивного слоя по заданной функции преобразования  $\varphi(x)$

$$W(x) = \frac{-2/m_0 \varphi^2(x)}{\varphi'(x) \left\{ 1 \pm \frac{F(L_e) - \frac{m_0}{2\varphi(x)}}{\frac{F(L_e)}{4} [F(L_e) + 4m_0] + \frac{m_0}{4\varphi^2(x)} [m_0 - 2\varphi(x)F(L_e)]} \right\}}, \quad (28)$$

где  $m_0$  - параметр.

В частных случаях малых токов нагрузки

$$W(x) = - \frac{\varphi^2(x)}{m_0 \frac{d\varphi(x)}{dx}}, \quad (29)$$

и режима холостого хода

$$W(x) = - \frac{C}{\frac{d\varphi(x)}{dx}}, \quad (30)$$

где  $C$  - масштабная постоянная.

Максимальная частота преобразования ограничивается эффектами накопления в фотопроводнике. Это вызывает возрастание утечки, нелинейных искажений, эффективной ширины зонда и уменьшения выходного сигнала. Проведен анализ зависимостей параметров фотопотенциометра от частоты воспроизведения выходной функции и параметров фотопроводимости.

Максимальная скорость сканирования, ограниченная эффектами накопления, определяется как

$$V_{\max} = \frac{L_e - l}{L_3} \quad (31)$$



и зависит от постоянной времени релаксации фотопроводимости в световом зонде.

Экспериментальная проверка теории проводилась на лабораторных макетах фотопотенциометров на основе  $\text{SnO}_2$  в качестве резистивного слоя и  $\text{CdS}$  в качестве фотодвухполосника с линейной и  $\sin-\cos$  - функцией преобразования.

Приведенные в диссертации исследования показывают хорошее согласие расчета с экспериментом.

**ГЛАВА ШЕСТАЯ.** Рассмотрены основные закономерности и особенности рентгенопроводимости сернистого кадмия: спектральное распределение, зондовые характеристики, феноменологический и абсолютный квантовый выходы, энергия разделения пары электрон-дырка. Исследована корреляция рентгено- и фотопроводимости. Приводятся экспериментальные данные по влиянию подсветки светом различных длин волн на дозиметрические характеристики и кинетику рентгенопроводимости. Для исследования особенностей рентгенопроводимости разработан метод сравнения ее закономерностей с закономерностями фотопроводимости в условиях уравнивания коэффициентов поглощения. Измерения проводились на специально отобранных монокристаллах сернистого кадмия, содержащих быстрые и медленные уровни рекомбинации и отличающиеся наличием либо быстрых, либо медленных уровней прилипания.

Спектральное распределение рентгенопроводимости исследовалось на монохроматическом излучении  $\text{K}\alpha$  -  $\text{Ca}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{W}$ , что соответствует  $\lambda = 0,21 - 2,8 \text{ \AA}$ .

При условии уравнивания числа поглощенных в кристалле

квантов  $i\varphi(\lambda) \sim a(\lambda)\tau(\lambda)$ . Экспериментально снятая зависимость  $i\varphi(\lambda)$  имеет характерный максимум в коротковолновой части спектра, положение которого зависит от толщины кристалла и смещается с ее увеличением в сторону коротких волн. Показано, что вид характеристики  $i\varphi(\lambda)$  определяется зависимостями коэффициента поглощения и квантового выхода от  $\lambda$ .

На форму кривой  $i\varphi(\lambda)$  существенное влияние оказывает реабсорбция вторичного излучения кадмия, с которой связано положение основного максимума  $i\varphi(\lambda)$ . При достаточно больших толщинах кристаллов ( $> 100 \text{ мк}$ ) максимум на кривой  $i\varphi(\lambda)$  исчезает и фототок возрастает линейно с увеличением энергии рентгеновского излучения. Этот эффект был исследован на кристаллах сернистого кадмия толщиной 5, 19, 84, 300 мк, на которых он экспериментально хорошо проявляется.

Сопоставление рентген- и фоточувствительности проводилось для видимого излучения, соответствующего максимуму спектральной характеристики (для  $\text{CdS}$   $\lambda = 5130 \text{ \AA}$ ) и рентгеновского монохроматического  $\text{K}\alpha$  - излучения меди ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ), для которых коэффициенты поглощения одинаковы. При этом между рентгено- и фотопроводимостью  $\text{CdS}$ ,  $\text{CdSe}$ ,  $\text{CdS}_x$ ,  $\text{CdS}_{1-x}$  существует полная корреляция, чему отвечает

$$\frac{i\varphi(\lambda_p)}{i\varphi(\lambda_{cs})} = \text{const}$$

Отклонение экспериментальных точек от прямой наблюдается лишь при нарушении основного принятого условия  $k_n(\lambda_p) = k_n(\lambda_{cs})$  главным образом за счет смещения по тем или другим причинам спектрального распределения фотопроводимости, по сравнению с общим случаем.



Такое же хорошее соответствие показывают и зависимости феноменологических квантовых выходов от подсветки:  $A_{sch}(L), A_{sp}(L)$  как в случае кристаллов с медленными, так и в случае кристаллов с быстрыми уровнями прилипания.

В зависимости от наличия в образцах уровней прилипания определенных типов, величина  $A_{sp}$  для  $h\nu = 8,94$  кэв колеблется от нескольких десятков ( $10 \div 52$ ) до нескольких сотен (750-900).

Данные, полученные при исследованиях корреляции рентгено- и фотопроводимости были использованы для вычислений истинного квантового выхода рентгенопроводимости и энергии разделения пары электрон-дырка. Показано, что в адекватных условиях  $\tau_p = \tau_{sch}, \mu_p = \mu_{sch}$ . Таким образом, при  $\tau_p = const$

$$a_p = \frac{i_{grp}}{i_{sch}} \cdot \frac{N_{sch}}{N_p}$$

где  $N_p$  - число поглощенных в кристалле квантов. По данным измерений тридцати образцов при  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$  были получены значения  $a_p = (1,6 \div 1,8) \cdot 10^8$ . Им соответствует энергия разделения пары электрон-дырка, равная 4,9 - 5,5 эв.

Корреляция закономерностей рентгено- и фотопроводимости сернистого кадмия и его аналогов проявляется и в ходе зондовых характеристик, снятых при уравнивании коэффициентов поглощения ( $k_n$ ) и фототоков в максимуме. Показано, что максимум зондовых характеристик как при возбуждении рентгеновским, так и при возбуждении видимым излучениями может быть локали-

зован в любой точке межэлектродного промежутка. Из анализа различных факторов, могущих влиять на вид зондовых характеристик рентгеновского и фототока, следует, что последние не могут быть отнесены к особенностям рентгенопроводимости сернистого кадмия, как это предполагалось ранее.

Исследование влияния подсветки на характеристики рентгенопроводимости сернистого кадмия проводилось для  $\lambda = 4500, 4900, 5180, 5300, 6800 \text{ \AA}$ . Длина волны рентгеновского излучения соответствовала  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ , что для  $\lambda = 5180$  отвечает условию  $k_{np} = k_{sch}$ . Показано, что действие подсветки может проявляться как аддитивно, так и неаддитивно. В последнем случае эффект существенно зависит от длины волны подсветки и для него может быть указана красная граница. Неаддитивность характерна для кристаллов с быстрыми уровнями прилипания. При этом действие подсветки приводит, к очувствлению кристалла к рентгеновскому излучению, что сопровождается увеличением добавки фототока, и возрастанию времени релаксации рентгенопроводимости. Эти изменения при подоветках интенсивностью  $10^{10} \frac{\text{квантов}}{\text{мм}^2 \text{ сек}}$  могут достигать порядка величины.

Неаддитивное действие подсветки связывалось нами с изменением условий рекомбинации через медленный канал при возбуждении электронно-собственным светом ( $\lambda = 5180 \text{ \AA}$ ) на  $n$ -уровни (наряду с зона-зонным переходом).

Аддитивное действие подсветки наблюдается у кристаллов с медленными уровнями прилипания. При этом действие подсветки не приводит к нелинейным эффектам в рентгенопроводимости. Сам эффект аддитивности не зависит от длины волны подсветки.



Из изложенного следует ограничения применения подсветки для очувствления  $CdS$  - детекторов рентгеновского излучения и повышения их быстродействия.

ПРИЛОЖЕНИЕ. Оригинальную часть приложения составляют разработка технологии и исследование а. контактов к монокристаллам и пленкам сернистого кадмия и его аналогов, б. фоточувствительных пленок материалов  $A^{IV}B^{VI}$ .

а. Используя метод катодного напыления, были разработаны омические контакты к  $CdS$ ,  $CdSe$ ,  $CdS_xCdSe_{1-x}$  на основе  $Cd$  (непрозрачный контакт), на основе  $CdO$  (прозрачный контакт).

Вольтамперные характеристики обоих контактов линейны в широком диапазоне напряжений (0-100 в), температур (123<sup>0</sup>-363<sup>0</sup>К) в освещенностей (до 1000 лк). Среднеквадратичное значение напряжения шума в полосе 200 гц на уровне 1000 гц у монокристаллических

$CdS$  - фоторезисторов с кадмиевыми и окисно-кадмиевыми контактами составляет по порядку величины  $10^{-7}$  в в темноте и  $10^{-5}$  в при  $L = 1250$  лк. Проводящие пленки окиси кадмия прозрачны в области длин волн 5400 до 6600 А, что хорошо согласуется с областями фоточувствительности  $CdS$  и  $CdSe$ . В указанном диапазоне пропускание для контактов толщиной до 600 мкм составляет 75 - 86 % при коэффициенте отражения 12 - 15 %. В качестве запорного контакта к сернистому и селенистому кадмию был предложен теллур. Теллур наносился методами испарения в вакууме и катодного распыления с дальнейшими термической обработкой или электрической формовкой.

Среднее значение коэффициента выпрямления на теллуриновом контакте составляет  $10^3 + 10^2$ .

Разработан метод и устройство электрической формовки импульсами тока заданных амплитуды, длительности и частоты контактов

к фотодвухполюсникам. Исследовано влияние формовки на свойства контакта. Показано, что таким образом можно формировать как запорные, так и антизапорные контакты. Электрическая формовка улучшает и стабилизирует свойства контактов. Она может рассматриваться как один из перспективных технологических приемов, обеспечивающих заданные свойства фотодвухполюсников на основе материалов  $A^{IV}B^{VI}$ .

б. Для получения пленок сернистого кадмия и его аналогов были применены методы вакуумного напыления. В одном случае испарялась заранее приготовленная активированная шихта, фотоэлектрические свойства которой оптимальны, в другом - неактивированный порошок с последующим введением примеси в пленку либо в процессе ее роста, либо в процессе ее отжига. Отжиг является одним из основных этапов получения высокой фоточувствительности пленки. В качестве подложки использовались стекло, стекло, покрытое  $InO_2$ ,  $Ti_2O_3$ , полированный и шероховатый ситал.

Разработана технология пленок толщиной 1 - 600 мкм, удельным темновым сопротивлением  $10^8 - 10^{12}$  ом.см, с кратностью изменения сопротивления  $10^3 + 10^7$  ( $L = 400$  лк), с подвижностью лежащей в пределах  $2 + 70$  в/см<sup>2</sup> сек, с чувствительностью как в видимой, так и рентгеновской областях спектра. Пленки устойчивы на воздухе, отличаются хорошей адгезией к подложке и допускают механическую шлифовку и полировку.

Показано, что на основе твердых растворов  $CdS_xCdSe_{1-x}$  могут быть получены устойчивые аморфные фоточувствительные пленки с высокой подвижностью (40 - 70 см<sup>2</sup>/в.сек) и свойствами, близкими к монокристаллам.

В диссертации приводятся технологические режимы напыле-



ния пленок и их термообработки, а также их основные фотоэлектрические характеристики и параметры.

Пленки были использованы для разработок различных фотодвухполюсников, электролюминесцентных преобразователей рентгеновского излучения и усилителей изображения, мишеней видиконов и других фотоэлектрических приборов и устройств.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По существу настоящей диссертации можно сделать следующие общие выводы:

Принцип фотоэлектрического преобразования, будучи реализован в электронных цепях, приводит к новому направлению полупроводниковой электроники - фотоэлектрическим функциональным преобразователям.

Введение в электронные и электрические цепи оптической связи позволяет значительно упростить схемы, повысить их эффективность, осуществить бесконтактное управление, исключить гальваническую связь между управляемым и управляющим элементами.

Особенности и многообразие характеристик фотоэлектрических преобразователей в целом определяется особенностями и многообразием характеристик фотодвухполюсников, входящих в них в качестве одного из основных структурных элементов.

В диссертации рассматривались фотодвухполюсники на основе полупроводниковых материалов, представляющих собой соединения второй и шестой групп периодической системы элементов.

Однако, полученные при этом общие выводы не теряют своей общности и в случае фотодвухполюсников на основе любых других возможных полупроводников.

Фотодвухполюсник как элемент электрической цепи может быть представлен либо эквивалентным генератором напряжения, либо эквивалентным генератором тока. Параметры обоих генераторов определяются вольтамперными, люксамперными, спектральными, температурными, шумовыми и переходными характеристиками фотодвухполюсников. Основные характеристики фотодвухполюсников могут быть рассчитаны, исходя из общего выражения для фототока и системы их параметров.

Введенная система параметров непосредственно следует из анализа физических процессов, обуславливающих механизм внутреннего фотоэффекта в полупроводнике, установления и прохождения через него сквозного тока.

Отклонение контактов от нейтральных является во многих случаях причиной, обуславливающей нелинейность статических и динамических характеристик фотодвухполюсников. При этом становится возможным получение управляемой нелинейности по параметрам  $L$ ,  $V_{\phi}$ ,  $i_{\phi}$ .

Сказанное остается справедливым и для возбуждения фотодвухполюсников рентгеновскими лучами. Можно считать установленным факт наличия корреляции между рентгено- и фотопроводимостями. Это дает основание вывести, полученные при исследовании основных закономерностей фотопроводимости, переносить на основные закономерности рентгенопроводимости.

Впервые измерены значения абсолютного и феноменологического квантовых выходов рентгенопроводимости в сернистом кадмии и его анадогах, а также значение энергии разделения пары электрон-дырка в этих материалах при возбуждении их рентгеновскими лучами. Таким образом, чувствительность материалов  $A^{PVI}$  к жесткому, рентгеновскому излучению становится управляемым свойством в той



мере, в какой поддается управлению их фоточувствительность.

На параметры рентгенопроводимости существенное влияние оказывает подсветка видимым светом. При этом действие подсветки может быть аддитивным и неаддитивным. В последнем случае эффект показывает спектральную зависимость. Для него можно указать красную границу. Это накладывает ограничения на выбор качества подсветки и позволяет использовать ее как управляющий фактор.

Эффективная коррекция переходных, частотных и выходных характеристик фотодвухполюсников достигается введением в их цепи отрицательных сопротивлений, что позволяет осуществлять коррекцию примерно при постоянном отношении сигнала к шуму. На этом принципе разработан универсальный предусилительный каскад, допускающий согласование фотоприемника с усилителями различных типов в широком диапазоне режимов датчика.

Возможности фотоэлектрического преобразования значительно расширяются, если в электрическую цепь, наряду с фотодвухполюсником, вводятся управляемые источники света. Использование в качестве управляемых источников света электролюминесценции, обеспечивает наибольшую эффективность преобразования, высокую технологичность, экономичность и микроминиатюрность фотоэлектрических преобразователей, получивших название оптронов.

В оптроне реализуется один из принципов преобразования:  
а. световой сигнал - электрический сигнал - световой сигнал,  
б. электрический сигнал - световой сигнал - электрический сигнал.

В первом случае на основе оптронов возможно изготовление усилителей и преобразователей света, усилителей изображения, во втором - усилителей и преобразователей электрических сигналов.

При этом использование всех преимуществ оптической связи в оптроне превращает фотоэлектрические преобразователи в новый класс безвакуумных электронных цепей.

В настоящей диссертации принцип фотоэлектрического преобразования, особенности расчета и анализа фотодвухполюсников как элементов электрической цепи иллюстрированы на примерах фоторезисторов, фотоключей, фотоваракторов, фотопотенциометров. Большинство из этих приборов являются новыми, оригинальными разработками, значительно расширяющими область применения внутреннего фотоэффекта в гомогенных полупроводниках.

В ней также разработан ряд новых измерительных методов и устройств, применявшихся для исследования переходных характеристик, контактных явлений, рентгенопроводимости, фотоемкости и электрической формовки фотодвухполюсников. Разработаны технологии получения омических и запорных контактов к монокристаллам и пленкам  $A^{IV}B^{VI}$ , а также фоточувствительных поликристаллических и аморфных пленок этих материалов, применявшихся для изготовления различных типов фотодвухполюсников.

Основные результаты диссертации опубликованы в монографии автора / I /, а также в следующих открытых работах:

1. Свечников С.В., Фотодвухполюсники, Изд. "Техника", 1965.
2. Свечников С.В., Свойства монокристаллических фотосопротивлений из сернистого кадмия при возбуждении рентгеновыми лучами, ЖТФ, т. XXII, в. 8, 1306, 1952.
3. Свечников С.В., Процессы релаксации фотопроводимости в *CdS*-фотосопротивлениях при возбуждении рентгеновыми лучами, ЖТФ, т. XXIII, в. 6, 942, 1953.



4. Свечников С.В., Кристаллический фотометр и рентгендозиметр на  $CdS$  - фотосопротивлениях, ЖТФ, т. XXIII, в. II, 2094, 1958.
5. Свечников С.В., К свойствам  $CdS$  - фотосопротивлений в ионизирующем излучении, УФН, т. 55, в. I, 126, 1955.
6. Свечников С.В., Свойства сернисто-кадмиевых фотосопротивлений при облучении  $\alpha$ - и  $\beta$ -лучами, ЖТФ, т. XXVI, в. 8, 1964, 1956.
7. Свечников С.В., К определению параметров сернисто-серебряных фотоэлементов с запорным слоем, ЖТФ, т. XXVII, в. 5, 914, 1957.
8. Свечников С.В., О некоторых сравнительных характеристиках фотосопротивлений ФСК-М и ФС-К при облучении рентгеновскими лучами, ЖТФ, т. XXVII, в. 4, 656, 1957.
9. Свечников С.В., Александров В.Г., Некоторые фотоэлектрические свойства  $CdSe$  и  $CdTe$  - монокристаллов, ЖТФ, т. XXII, в. 5, 919, 1957.
10. Свечников С.В., Дворцин В.И., Некоторые характеристики шумов в  $CdS$  - фотосопротивлениях, Радиотехника и электроника, т. III, в. 3, 409, 1958.
11. Свечников С.В., Характеристики добавочной проводимости монокристаллов сернистого кадмия при возбуждении рентгеновскими лучами, Статические характеристики, ЖТФ, т. XXVII, в. II, 2493, 1957.
12. Свечников С.В., Характеристики добавочной проводимости монокристаллов селенистого кадмия при возбуждении рентгеновскими лучами. Особенности кинетики, ЖТФ, т. XXVII, в. II, 2508, 1957.
13. Свечников С.В., К вопросу об особенностях фотопроводимости в соединении кадмия, ЖЭТФ, т. XXXIV, в. 3, 548, 1958.

14. Свечников С.В., Фотосопротивления как элементы электрической цепи, Автоматика и телемеханика, ТКХ, № 4, 508, 1959.
15. Свечников С.В., Перспективы применения полупроводников для контроля ионизирующего излучения, Радиоактивные методы контроля и регулирования производственных процессов, Труды научно-техн. конференции, Изд. АН Латв. ССР, Рига, 1959.
16. Свечников С.В., Петренко А.И., Электронный прибор для измерения постоянной времени переходных процессов, Автоматика и приборостроение, в. П, 56, 1961.
17. Свечников С.В., Чалая В.Г., Шейнкман М.К., О зондовых характеристиках рентгеновского и фототоков в монокристаллах сернистого кадмия, УФЖ, т. УП, № 4, 396, 1962.
18. Свечников С.В., Чалая В.Г., К спектральному распределению внутреннего фотоэффекта в монокристаллах сернистого кадмия при возбуждении рентгеновскими лучами, Сб. "Радиоизотопные методы автоматического контроля", т. 2, Фрунзе, АН Киргиз. ССР, 1962.
19. Свечников С.В., Чалая В.Г., Некоторые особенности продольной фотопроводимости монокристаллов типа  $CdS$ , УФЖ, т. УП, № 6, 623, 1962.
20. Свечников С.В., Чалая В.Г., Об эквивалентной схеме и фотоемкости продольных  $CdS$  - фотосопротивлений, УФЖ, т. УП, № 6, 664, 1963.
21. Свечников С.В., Чалая В.Г., К проблеме омического контакта к фотосопротивлениям  $CdS$  и его аналогам, УФЖ, т. УП, № 10, 1164, 1963.
22. Свечников С.В., Чалая В.Г., К спектральному распределению внутреннего фотоэффекта в монокристаллах  $CdS$  при возбуждении рентгеновскими лучами, УФЖ, т. УП, № 10, 1157, 1963.



23. Свечников С.В., Чалая В.Г., Фотосопротивления в ключевом режиме, Автоматика и приборостроение, апрель-июнь, 62, 1963.
24. Свечников С.В., Бесконтактный фотопотенциометр, Автоматика и телемеханика, т. XXIV, № 9, 1292, 1963.
25. Свечников С.В., Шуваев В.А., Фотопотенциометр, управляемый в функции напряжения, Автоматика и приборостроение, № 4, 51, 1964.
26. Свечников С.В., Чалая В.Г., Исследование феноменологического квантового выхода рентгенопроводимости монокристаллов сернистого кадмия, УФЖ, № 6, 1965.
27. Свечников С.В., Чалая В.Г., Исследование корреляции фото- и рентгенопроводимости монокристаллов сернистого кадмия, УФЖ, № 10, 1965.
28. Свечников С.В., Денбовецкий С.В., Устройство для определения мгновенных времен релаксации, авторское свидетельство № 158783, 9.У1, 1962.
29. Свечников С.В., Моравский В.Э., Схема управления шовными конденсаторными машинами, авторское свидетельство № 113338, 1960.
30. Свечников С.В., Вакуленко Е.М., Устройство для автоматического ограничения амплитуды на рабочей емкости сварочной конденсаторной машины, авторское свидетельство № 141564, 1961.
31. Денбовецкий С.В., Свечников С.В., Методика исследования параметров релаксационных процессов физических систем, ПТЭ, № 1, 110, 1964.
32. Конозюк И.Д., Свечников С.В., Чалая В.Г., Некоторые особенности фото- и рентгенопроводимости монокристаллов сернистого кадмия, УФЖ, т. У1, № 2, 207, 1961.

33. Красников Н.И., Олексенко П.Ф., Свечников С.В., Аналоговое быстродействующее устройство, модулирующее операцию деления, Автоматика и приборостроение, № 8, 1965.
34. Олексенко П.Ф., Свечников С.В., Универсальный предусилительный каскад для усиления фототоков фотосопротивлений, Автоматика и приборостроение, № 2, 58, 1964.
35. Зюганов А.Н., Свечников С.В., Бесконтактный следящий фотопотенциометр, Радиотехника и электроника, № 7, 1965.
36. Зюганов А.Н., Олексенко П.Ф., Свечников С.В., Влияние сопротивления нагрузки на переходные характеристики фотосопротивлений, Автоматика и телемеханика, 1965 (в печати).
37. Олексенко П.Ф., Свечников С.В., Корректирующий каскад к фотосопротивлениям, ПТЭ, 1965 (в печати).
38. Олексенко П.Ф., Свечников С.В., Некоторые вопросы коррекции частотной и выходной характеристик фоторезисторов, Изд. АН УССР "Наукова думка", Киев, 1965.