

## ФОТОПРИЕМНИКИ ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Сырбу Н. Н., Стамов И. Г.

Рассмотрены монокристаллы и дискретные широкополосные поляризационно-управляемые инверторы знака фототока, работающие на основе селективного поглощения линейно поляризованного излучения (ЛПИ) в области прозрачности анизотропных кристаллов. Детекторы изготовлены в виде  $n-p$ -структур на базе кристаллов обеих модификаций и  $ZnAs_2$ . Область работы монокристалльного детектора ЛПИ на основе  $Me-n-p$ - или  $p-n-p$  ( $n-p-n$ )-структуры монокристалльного  $ZnP_2$  (1.4—1.7 эВ) определяется характером оптических переходов (запрещенные, разрешенные), обуславливающих величину коэффициента поглощения. Исследованы электрические, спектральные и азимутальные характеристики детекторов линейно поляризованного излучения. Для идеального детектора ЛПИ ( $Kd \rightarrow 0$ ) азимутальная чувствительность составляет 0.022 А/Вт. Для приемника ЛПИ на основе барьеров  $Au-ZnP_2$ . ( $C_{2h}^2$ )- $Au-ZnP_2(C_{2h}^2)$  азимутальная чувствительность — 0.0067 А/Вт.К.

Рассмотрены спектральные характеристики интерференционно-поляризованных фотоприемников излучения с барьером Шоттки.

В ряде экспериментальных задач необходимо определение ориентации плоскости поляризации излучения источника или объекта в пространстве или двух объектов друг относительно друга. В лабораторных условиях существует ряд методов определения плоскости поляризации [1]. В большинстве случаев используется измерение интенсивности света, отраженного от стопы (или прошедшего через стопу) диэлектрических пластин при угле падения, близком к углу Брюстера. Однако такой метод обладает большой погрешностью порядка нескольких градусов. Для определения плоскости колебания электрического вектора плоскополяризованного излучения необходимы приемники, способные изменять знак фототока от значения  $\pm U$  до  $\mp U$  при повороте плоскости поляризации на  $90^\circ$ . Такие приемники называются поляризационно-управляемыми инверторами знака фототока [2, 3] или «нуль-индикаторами» поляризованного излучения [4, 5] и необходимы в интегральной оптике (для уплотнения каналов связи) и волоконной, где использование поляризационных фильтров и ФЭУ (или фотодиодов) в дискретном исполнении трудноприменимы.

В данной работе рассмотрены конструкционные особенности и характеристики фотоприемников линейно поляризованного излучения на основе анизотропных полупроводников — диарсенидов и дифосфидов цинка.

«Гетеропереходы»  $ZnP_2(D_2^8)-ZnP_2(C_{2h}^2)$  получены из газовой фазы наращиванием  $\alpha$ -фазы на  $\beta$ -фазу и, наоборот, при изменении режимов в процессе роста. Переходы являются устойчивыми во времени и интервале температур 77+500 К. Двойники  $ZnAs_2-ZnAs_2$  получены также из газовой фазы.

Диарсенид цинка — прямозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны  $E_g = 0.9$  эВ. Прямые разрешенные экситонные состояния в поляризации  $E \parallel c$  обуславливают высокий коэффициент поглощения при  $\lambda = 1.3$  мкм. В поляризации  $E \perp c$  экситонные состояния запрещены. Краевое поглощение и при комнатной температуре для поляризаций  $E \parallel c$  и  $E \perp c$  не совпадает (рис. 1, а). Анизотропия электронных переходов ( $\Gamma_7 \rightarrow \Gamma_8$  и  $\Gamma_8 \rightarrow \Gamma_8$ ) и величина ширины запрещенной зоны при  $E \parallel c$  и  $E \perp c$  обуславливают высокую чувствительность в области 1.3 мкм. Последнее предопределило разработку приемников ЛПИ на основе  $ZnAs_2$ , так как именно на длине волны  $\lambda = 1.3$  мкм работают волоконно оптические линии связи и устройства интегральной оп-

тики. На рис. 1, б представлено краевое поглощение монокристаллов  $\text{CdP}_4$  в поляризациях  $E \parallel c$ ,  $E \perp c$  при 300 и 77 К. Краевое поглощение обусловлено прямыми разрешенными переходами. Изменяется поглощение в пределах  $4-10^3 \text{ см}^{-1}$  в интервале энергий 1.4—1.1 мкм. Величина расщепления краев поглощения для поляризаций  $E \parallel c$  и  $E \perp c$  в  $\text{CdP}_4$  больше, чем для  $\text{ZnAs}_2$ . Температурные коэффициенты смещения краев поглощения в этих поляризациях в обоих кристаллах различаются [6].

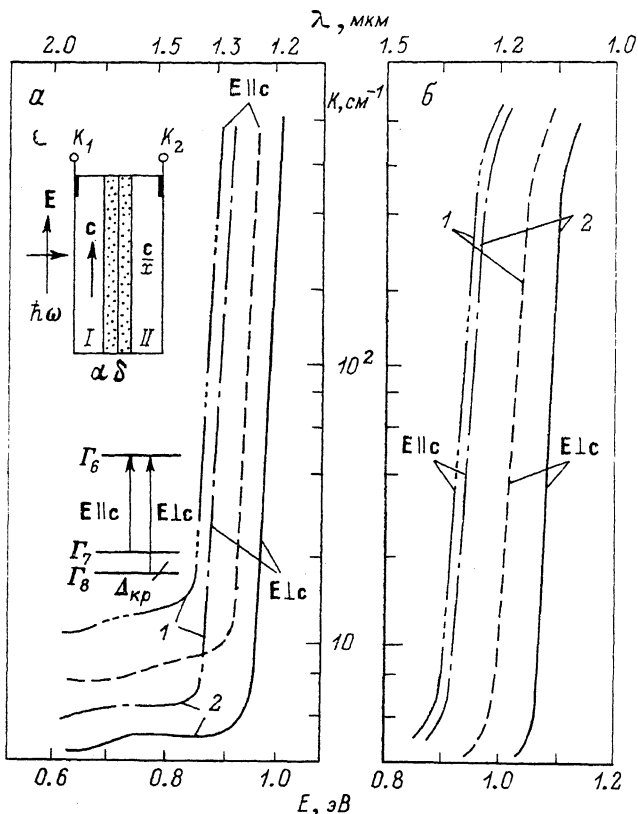


Рис. 1. Краевое поглощение  $\text{ZnAs}_2$  (а) и  $\text{CdP}_4$  (б).  
Т, К: 1 — 300, 2 — 77.

На вставке к рис. 1, а представлена конструкция фотоэлемента на основе анизотропного полупроводника  $\text{ZnAs}_2$ , состоящая из двух областей I и II с областями пространственного заряда  $\alpha$  и  $\delta$ . В слое I ось расположена в плоскости чертежа, в слое II ось с перпендикулярна плоскости чертежа. Такая структура является двойником со строго заданной ориентацией кристаллографических осей с. Слои I и II могут быть разного типа проводимости: p—n или n—p соответственно. В последнем случае такая структура является фотоэлементом, чувствительным к поляризации света, а максимум чувствительности расположен в области 1.3 мкм. Такие структуры возможны и n—n- или p—p-типа.

Вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные (ВФХ) характеристики двойникового перехода  $\text{ZnAs}_2-\text{ZnAs}_2$  n—n-типа при 77 и 300 К представлены на рис. 2, а—б. Зависимость тока от приложенного напряжения при обеих полярностях нелинейна. Из ВФХ следует, что в обеих полярностях смещения емкость растет. Это характерно для двух встречно включенных барьеров. Анализ электрических и фотоэлектрических характеристик показывает, что на границе двойника реализуются два встречно включенных барьера разной высоты: 0.3 и 0.57 эВ. Такие двойники также обладают фоточувствительностью и могут использоваться в качестве активного элемента.

Спектральная характеристика рассматриваемых фотоэлементов представляет собой узкую полосу с максимумом в области энергии  $E$ , удовлетворяющей

условию  $E_g$  (для  $E \parallel c$ )  $< E < E_g$  (для  $E \perp c$ ) (рис. 2, б). Излучение с поляризацией  $E$  и частотой  $\nu$  падает на слой  $I$  фотоэлемента  $ZnAs_2^I - ZnAs_2^{II}$ . Вектор поляризации падающей волны ориентирован перпендикулярно оси  $c$  в слое  $I$ . Для этой поляризации краевое поглощение изменяется в соответствии с кривой поляризованного поглощения (рис. 1, а). Последнее определяется оптическими переходами в  $K=0$  из расщепленных кристаллическим полем валентных зон в зону проводимости (см. вставку на рис. 1). В этом случае поглощение в фотоэлементе в основном происходит в слое  $II$ . По мере увеличения энергии света  $E$  коэффициент поглощения для поляризации  $E \perp c$  растет и свет поглощается в слое  $I$ . При этом уменьшается фотоэдс. В таком фотоэлементе ширина полосы чувствительности определяется расщеплением краев поглощения, т. е. разностью величин ширины запрещенной зоны для поляризаций  $E \parallel c$  и  $E \perp c$ .

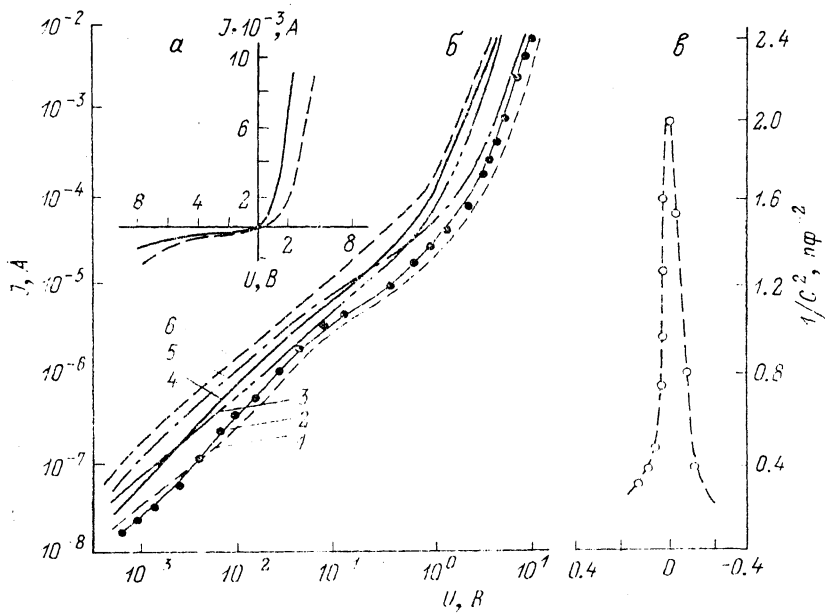


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика двойников  $ZnAs_2 - ZnAs_2$  (а) (сплошная — 300, штриховая — 77 К) для шести различных образцов 1—6 (б) и вольт-фарадная характеристика структуры  $ZnAs_2 - ZnAs_2$  (в).

Эта величина для большинства полупроводников составляет 0.1—0.020 эВ. Полуширина спектральной фоточувствительности элемента на  $ZnAs_2^I - ZnAs_2^{II}$  может быть порядка 30 мэВ и, как уже отмечалось, определяется разностью ширин запрещенной зоны  $ZnAs_2$  для поляризаций  $E \parallel c$  и  $E \perp c$  при 300 К. Спектральная характеристика фотоэлемента определяется также коэффициентом поглощения, совершенством структуры и другими параметрами (рис. 3, б).

Излучение с энергией  $E$ , удовлетворяющей условию  $E_g$  (для  $E \parallel c$ )  $< E < E_g$  (для  $E \perp c$ ), с электрическим вектором  $E$ , перпендикулярным к оси  $c$  в слое  $I$ , падает на переход слоя  $I$  и проходит в слой  $II$ . Это обусловлено тем, что  $E_g$  для  $E \perp c$  больше, чем  $E_g$  для  $E \parallel c$ . Для  $E \parallel c$  (слой  $I$ ) поглощенная энергия генерирует носители заряда, создавая фотоэдс положительного знака (к структуре подано смещение, имеющее обратный знак). С изменением величины угла плоскости поляризации по отношению к оси  $c$  в слое  $I$ , например электрического вектора падающей волны  $E \parallel c$  в слое  $II$  и  $E \perp c$  в слое  $I$ , изменяется знак фотоэдс. Сигнал равен нулю для направления ориентации вектора  $E$  под углом  $45^\circ$  к оси  $c$  в слоях  $I$  и  $II$ .

Таким образом, рассмотренный принцип позволяет получать более узкополосные приемники излучения путем подбора полупроводника с анизотропией краевого поглощения для  $E \parallel c$  и  $E \perp c$ . Рассмотренный фотоприемник при усилении сигнала фотоэдс обеих полярностей и выполнении условий  $E_g(E \parallel c) <$

$\langle E \ll E_g (E \perp c) \rangle$  и  $U_{\text{ф.з.с.}}$  (для  $E \parallel c_1$ ) =  $U_{\text{ф.з.с.}}$  (для  $E \parallel c_2, E \perp c_1$ ) позволяет определить ориентацию плоскости поляризации плоскополяризованного излучения.

Азимутальная зависимость фотоэдс при освещении светом с энергией фотона 0.94 эВ обнаруживает асимметрию ( $-\Delta J_I > \Delta J_{II}$ ) (рис. 3). Это обусловлено разной величиной высот барьеров в слоях фотоэлемента. Асимметричность характеристики удается устранить приложением внешнего смещения  $\sim 0.13$  В (для разных приборов это смещение различно).

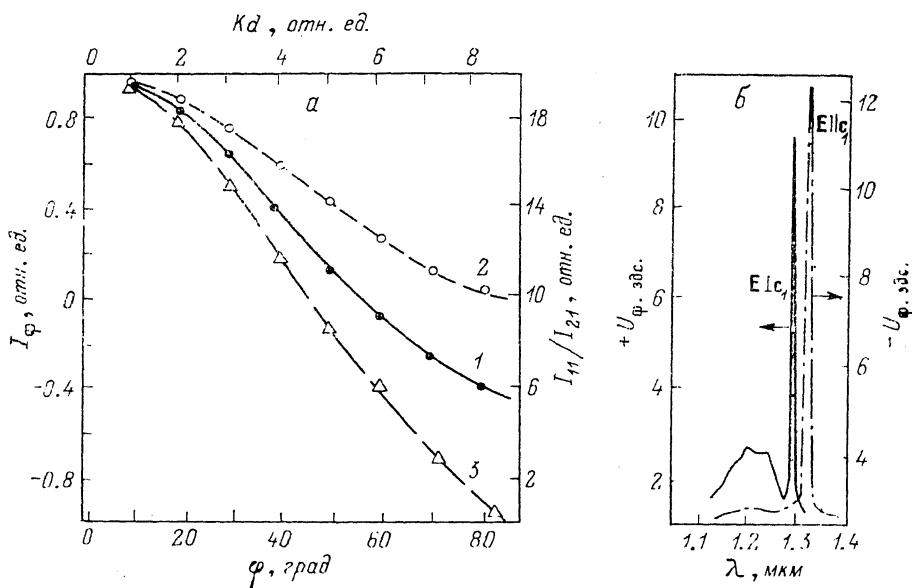


Рис. 3. Азимутальная зависимость поляризационно-чувствительного фотоэлемента на основе  $ZnAs_2$  (1), по закону Малюса (2) и при  $Kd=0.2$  (3), спектральная характеристика фотоприемника (б).

Сплошная —  $\lambda=1.305$ , штрихпунктирная —  $\lambda=1.330$  мкм.

Анализ работы фотоприемника линейно поляризованного излучения (ЛПИ) рассматриваемых конструкций для случая  $d > L > W$  дает следующее выражение для спектральной и азимутальной зависимостей фототока [ $d$  — толщина кристалла между контактами  $K_1$  и  $K_2$ ,  $L$  — диффузионная длина,  $W$  — толщина слоя области пространственного заряда (ОПЗ)  $\alpha-\delta$ ]:

$$J(\varphi, \hbar\omega) = \left\{ J_{11}(0, \hbar\omega) - J_{22}\left(\frac{\pi}{4}, \hbar\omega\right) \exp[-K(\varphi, \hbar\omega)d] \cos^2\left(\varphi + \frac{2\pi}{\eta}\right) + J_{12}\left(\frac{\pi}{4}, \hbar\omega\right) - J_{21}(0, \hbar\omega) \exp[-K(\varphi, \hbar\omega)d] \right\} \sin^2\left(\varphi + \frac{2\pi}{\eta}\right), \quad (1)$$

где  $J_{11}$  — фототок для  $E \parallel c$ ,  $J_{12}$  — для  $E \perp c_1$ ;  $J_{21}$  — для поляризации  $E \parallel c_2$ ;  $J_{22}$  — для  $E \perp c_2$ .

Точка инверсии знака фототока определяется из условия равенства нулю фототока, генерируемого светом в областях I и II:

$$\operatorname{tg}\left(\varphi_i - \frac{2\pi}{\eta}\right) = \left[ \frac{J_{11}(0, \hbar\omega) - J_{12}\left(\frac{\pi}{4}, \hbar\omega\right) \exp[-K(\varphi_i, \hbar\omega)d]}{J_{21}(0, \hbar\omega) \exp[-K(\varphi_i, \hbar\omega)d] - J_{22}\left(\frac{\pi}{4}, \hbar\omega\right)} \right]^{1/2}. \quad (2)$$

Как следует из этого выражения, угол ориентации вектора  $E \varphi_1$ , при котором происходит инверсия знака фототока, определяется не только соотношениями  $K''$ ,  $K^+$ ,  $d$ , но и  $\hbar\omega$  ( $K''$ ,  $K^+$  — коэффициенты поглощения для  $E \parallel c$  и  $E \perp c$ ,  $d$  — толщина образца слоя поглощения).

Для случая  $K'' > K^+$ ,  $J_{11} \gg J_{12}$ ,  $J_{21} \gg J_{22}$  и  $\frac{\pi}{2} > \varphi > 0$  зависимости  $\varphi_i$  при условии равенства амплитуд сигнала  $J_{11}$  и  $J_{21}$  и отношения амплитуд сигнала при  $\varphi_i = 45^\circ$  от  $K$  ( $0, \hbar\omega$ )  $d$  показаны на рис. 3, кривая 3.

Параметрами фотоприемника ЛПИ (углом инверсии и отношением амплитуд положительного и отрицательного сигнала) можно управлять приложенным внешним смещением. Для рабочих величин  $Kd$  фототок зависит от ширины области пространственного заряда, а следовательно, и от напряжения на приборе.

Приемники ЛПИ можно охарактеризовать азимутальной чувствительностью к поляризованному излучению:

$$S_\varphi = \frac{\partial^2 I_{ph}(\varphi, \hbar\omega)}{\partial p \partial \varphi}, \quad \text{А/Вт} \cdot \text{град.} \quad (3)$$

В этом случае для идеального приемника ЛПИ ( $Kd \rightarrow 0$ ) азимутальная чувствительность составляет 0.022 А/Вт. Для приемника ЛПИ на основе  $p-n$ -

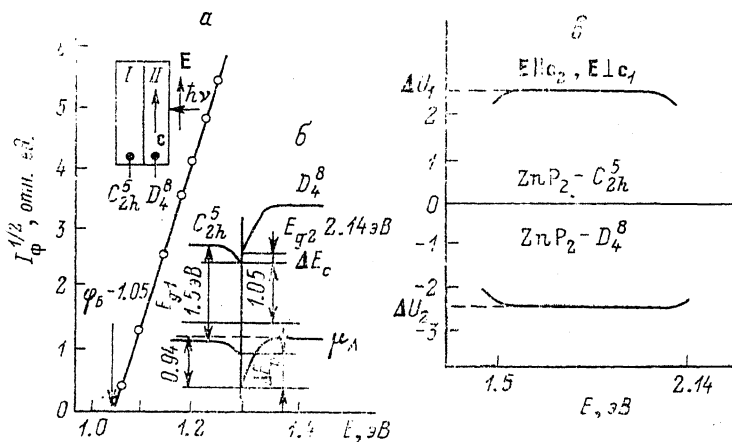


Рис. 4.

а — конструкция широкополосного фотоприемника ЛПИ на основе «гетероперехода»  $\text{ZnP}_2(D_4^5) - \text{ZnP}_2(C_{2h}^5)$ ; б — его структура зон; в — зависимость фототока от  $\hbar\omega$  при выравненных фотоотстаках обеих полярностей.

переходов или барьеров  $\text{Au} - \text{ZnP}_2(C_{2h}^5)$  (I) —  $\text{Au} - \text{ZnP}_2(D_4^5)$  (II) азимутальная чувствительность составляла 0.0067 А/Вт·град. Толщина области I составляла 10 мкм, пленок золота для ПБДШ 60—300 А. (ПБДШ — поверхностно-барьерный диод Шоттки).

### Широкополосные поляризационно-управляемые фотоприемники

Рассмотренные фотоприемники выполняют функции нуль-индикатора при условии  $E_g$  (для  $E \parallel c$ )  $< E < E_g$  (для  $E \perp c$ ).

Полоса чувствительности ограничивается величиной расщепления поляризованных краев поглощения. С целью расширения полосы чувствительности фотоприемник может быть изготовлен в виде гетероперехода на базе двух различных анизотропных или анизотропного и изотропного материалов. При этом полоса чувствительности определяется разностью величин ширины запрещенной зоны обоих материалов, формирующих слои I и II. Кроме обычных требований к материалам, формирующим гетеропереход, в данном случае возникают дополнительные условия.

1) Кристалл широкозонного материала (слой II), являющийся входным слоем, должен обладать анизотропией коэффициента поглощения в области прозрачности, т. е. в области  $E_{g1} < E < E_{g2}$ , где  $E_{g1}$  и  $E_{g2}$  — ширины запре-

щенной зоны материала, формирующего слой  $I$ , и материала, формирующего слой  $II$  соответственно.

2) В обеих поляризациях в указанном интервале энергий коэффициент поглощения материала входного слоя не должен содержать полосы поглощения.

На вставке к рис. 4 показан фотоприемник, состоящий из гетероперехода  $ZnP_2(C_{2h}^5 - \text{область } I) - ZnP_2(D_4^1 - \text{область } II)$ . В области  $I$  не обязательно ориентировать ось  $c$  в определенном направлении, в области  $II$  ось  $c$  лежит в плоскости чертежа и обозначена  $c_2$ . Толщина  $d_2$  монокристаллической области  $II$  не менее  $0.5 - 1$  мм, концентрация носителей заряда  $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Толщина слоя ОПЗ соответствует глубине поглощения света при  $E > E_g(ZnP_2 - C_{2h}^5)$ , т. е. ОПЗ не превышает  $10 \text{ мкм}$  при  $1.4 \text{ эВ}$ . К структуре выполнены омические контакты, которые соединены с источником ЭДС  $\epsilon_1$  и нагрузочным сопротивлением  $R_n$ .

Обе области фотоприемника могут быть  $n$ - или  $p$ -типа проводимости. В случае  $p$ -типа проводимости на границе широкозонной области  $II$  образуется запирающий слой, а в узкозонной области — антизапирающий слой. Излучение с ориентацией вектора  $E \parallel c_2$  проникает к границе раздела  $ZnP_2(C_{2h}^5) - ZnP_2(D_4^1)$  и генерирует электронно-дырочные пары. Носители заряда, возникающие в области  $I$ , разделяются полем, созданным внешним источником ЭДС  $\epsilon_1$ , что приводит к появлению тока в цепи. Для поляризации  $E \parallel c_2$  свет генерирует носители заряда в области  $II$ , так как в этой области коэффициент поглощения для  $E \parallel c_2$  на порядок выше, чем для  $E \perp c_2$ . В области  $II$  поглощение является примесным, поэтому количество генерированных носителей заряда будет меньше, чем в области  $I$ . Это приводит к тому, что величины положительной и отрицательной ЭДС различны. Приложенное внешнее смещение  $\epsilon_1$  имеет полярность, обратную полярности фотоэдс, генерированной в области  $I$ . Внешний источник ЭДС компенсирует величину разности фотоэдс, обусловленную генерацией носителей заряда в областях  $I$  и  $II$ , т. е. на нагрузочном сопротивлении  $R_n$  величина сигнала  $U_{\text{фэдс}}$  при  $E \parallel c_2$  ( $\Delta U_1$ ) должна быть равна и противоположна по направлению  $U_{\text{фэдс}}$  для  $E \perp c_2$  ( $\Delta U_2$ ). Спектральная зависимость  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_2$  показана на рис. 4, 6.

Разница в величине фотоэдс для  $E \parallel c$  и  $E \perp c$  устраняется также путем подбора толщины  $d_2$  слоя  $ZnP_2(D_4^1)$  диффузионной длины ( $1 - 5 \text{ мкм}$ ) и концентрации носителей заряда в этом слое ( $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ). При указанных параметрах величины фотоэдс для  $E \parallel c_2$  и  $E \perp c_2$  во всем интервале разности ширины запрещенной зоны  $ZnP_2(D_4^1)$  и  $ZnP_2(C_{2h}^5)$  были примерно равны и противоположны по знаку. Точное выравнивание величин фотоэдс (противоположных полярностей) для каждой длины волны осуществляется изменением приложенного напряжения смещения  $\epsilon_1$  при изменении характеристик. Рассматриваемый гетеропереход выполняет функции инвертора знака фототока, т. е. изменяет знак ЭДС при повороте угла поляризации от  $0$  до  $90^\circ$  относительно осей  $c_2$  во всем интервале энергий  $E_{g2} - E_{g1}$  ( $2.4 - 1.4 \text{ эВ}$ ), но при этом для каждой длины волны необходима коррекция величины фотоэдс противоположных полярностей.

Э л е к т р и ч е с к и е х а р а к т е р и с т и к и г е т е р о п е р е х о д о в  $ZnP_2(D_4^1) - ZnP_2(C_{2h}^5)$ .

Вольт-амперные характеристики структур типа  $p-n$  показаны на рис. 5, а. В полулогарифмическом масштабе на прямой ветви наблюдается ряд линейных участков с разными наклонами. До температур  $350 \text{ К}$  зависимость тока от напряжения описывается формулой, типичной для туннельно-рекомбинационного механизма токопереноса. При больших температурах наклон ВАХ увеличивается. Обратная ветвь ВАХ  $ZnP_2(\alpha) - ZnP_2(\beta)$  показана на рис. 5, б, а температурная зависимость плотности тока — на рис. 5, в.

Из анализа ВАХ (рис. 5, а—в) можно предположить, что при низких температурах имеют место туннельно-рекомбинационные процессы, а с ростом температуры существенный вклад в токоперенос вносят термоэлектронные или диффузионные процессы. Подобная картина токопереноса наблюдалась на

в всех партиях гетеропереходов  $p(\beta) - n(\alpha) - \text{ZnP}_2$ . Пробой в гетеропереходах носит туннельный характер, и напряжение его в разных структурах изменяется в интервале 5–40 В. До напряжения пробоя зависимость тока от напряжения

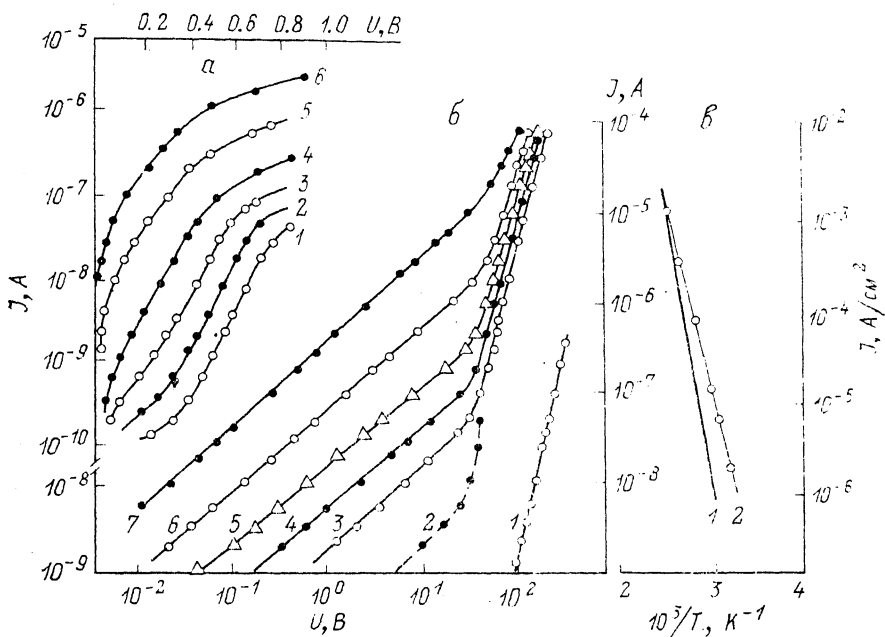


Рис. 5. ВАХ при  $T, K$ : 1 — 273, 2 — 300, 3 — 320, 4 — 360, 5 — 370, 6 — 410 (а); обратные ветви ВАХ гетероперехода  $\text{ZnP}_2(D_4^+) - \text{ZnP}_2(C_{3h}^-)$  при  $T, K$ : 1 — 77, 2 — 300, 3 — 320, 4 — 340, 5 — 370, 6 — 390, 7 — 410 (б) и зависимость  $J_0$  от  $T$  для гетеропереходов  $\text{ZnP}_2(D_4^+) - \text{ZnP}_2(C_{3h}^-)$  при условии: модель Андерсона (1) и  $U_3 = -1\text{В}$  (2) (в).

линейна для всех исследованных структур. Прямая ветвь ВАХ изотипного гетероперехода  $n(\alpha) - n(\beta) \text{ZnP}_2$  представлена на рис. 6. Гетеропереходы  $n(\alpha) - n(\beta)$  обладают выпрямляющими свойствами, пропускное направление

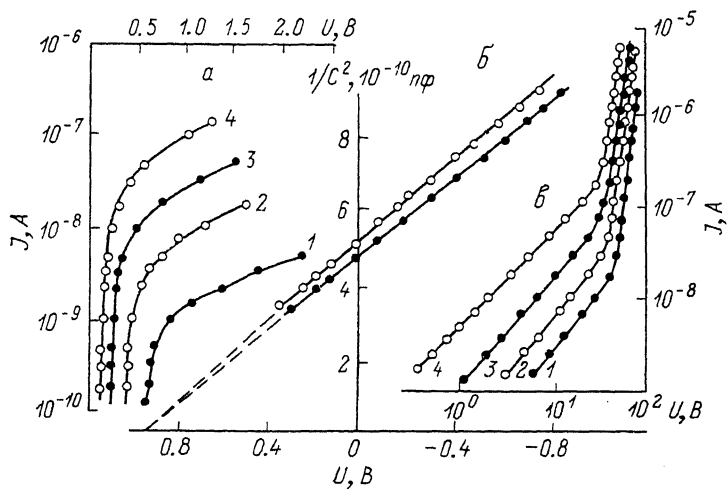


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики гетеропереходов [прямая (а) и обратная (в) ветви]  $n\text{-ZnP}_2(D_4^+) - n\text{-ZnP}_2(C_{3h}^-)$  при  $T, K$ : 1 — 295, 2 — 320, 3 — 369, 4 — 389; вольт-фарядные характеристики гетероперехода  $n\text{-ZnP}_2(D_4^+) - n\text{-ZnP}_2(C_{3h}^-)$  на частотах, кГц: 1 — 465, 2 — 1 (б).

соответствует положительному потенциалу на  $\alpha$ -области и отрицательному на  $\beta$ -области. При положительном потенциале на  $\alpha$ -области барьер  $eU_1$  понижается, увеличивается эмиссия электронов, что приводит к росту тока. Одновременно барьер  $eU_2$  запирается. Однако  $eU_1 \gg eU_2$ , и влияние запертого

барьера оказывается при напряжениях, больших 0.7 В. Линейный в полулогарифмическом масштабе участок ВАХ аппроксимируется выражением  $I = I_0 \exp(eU/\eta kT)$  с наклоном  $\eta = 1.6-1.9$  в интервале температур 273—400 К (рис. 6, в). Область пространственного заряда расположена в узкозонной области, и ее определяющая роль подтверждается ВФХ (рис. 6, б). Емкость в прямом направлении увеличивается до напряжений +0.3 В. Анализ ВАХ и их температурных зависимостей показывает, что процессы туннельно-рекомбинационного характера имеют место как в широкозонном материале, так и в узкозонном. Существенную роль в токопереносе играют поверхностные состояния, определяющие положение уровня Ферми на границе раздела обеих фаз.

### Широкополосные приемники на основе гомопереходов

Исследование анизотропии коэффициента пропускания моноклинных кристаллов  $ZnP_2$  и  $ZnAs_2$  при 77 и 300 К показывает резкое отличие коэффициентов пропускания в области прозрачности для поляризаций  $E \parallel c$  и  $E \perp c$  (рис. 1 и 7, а, б). Причем в кристаллах моноклинного  $ZnP_2$  в интервале энергий 0.9—1.5 мкм пропускание в поляризации  $E \parallel c$  изменяется в интервале 4—7 %, а в поляризации  $E \perp c$  — в пределах 30—40 %. В области 2.0—2.5 мкм пропускание для  $E \parallel c$  равно 7 %, а для  $E \perp c$  — 25—23 %. Для кристаллов диарсенида цинка в интервале длин волн 4.1—2.5 мкм коэффициент пропускания для  $E \parallel c$  (293 К) равен 20—22 %, а в поляризации  $E \perp c$  — 40—44 %, т. е. больше в 2 раза. Такое сильное различие коэффициентов пропускания рассмотренных кристаллов для обеих поляризаций в области прозрачности позволяет создать поляризационно-чувствительный приемник, конструкция которого представлена на вставке к рис. 7. Фотоприемник выполнен на основе

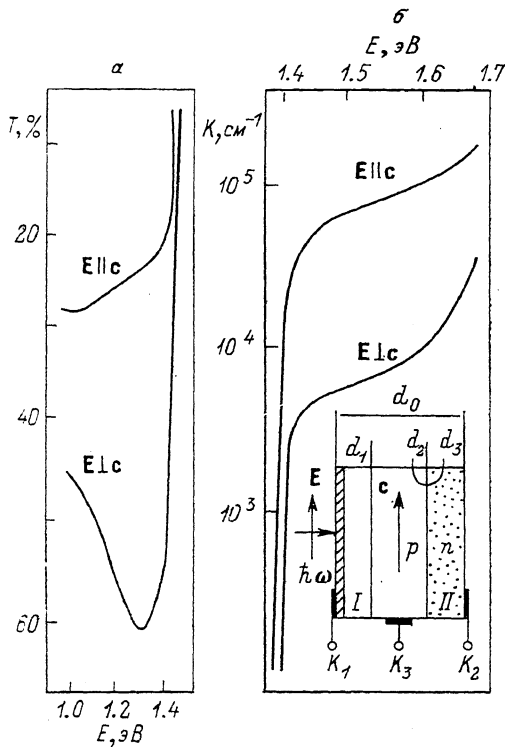


Рис. 7. Спектры пропускания  $ZnP_2-C_{54}^h$  для образца толщиной  $d=320$  мкм и краевое поглощение в области 1.4—1.7 эВ ( $d$ -образец=3 мкм).

одного соединения, например моноклинной модификации  $ZnP_2$  или  $ZnAs_2$ . Пусть регистрируемое излучение падает со стороны области I. Рассмотренный приемник работает в области энергий  $E < E_g$ , где наблюдается разная величина прозрачности кристалла. В поляризации  $E \parallel c$  свет поглощается в основном в области I и генерация носителей заряда происходит в переходе пространственного заряда слоя I. При смене поляризации с  $E \parallel c$  на  $E \perp c$  поглощение происходит преимущественно в слое II. Генерация и разделение носителей заряда осуществляются  $p-n$ -переходом области II. Оба диода (I диод — металл — слой I или  $n$  (слой I) —  $p$  (база), II диод —  $p-n$  область) через контакты  $k_1-k_3$  и  $k_3-k_2$  встречно включены, поэтому дают ЭДС разного знака (слой I также может быть в виде  $n$ -области). К металлическому контакту и к  $n$ -области сделаны токосъемные контакты  $K_1$  и  $K_2$ , к базовой области —  $K_3$ . Ширина активной монокристаллической области  $d_0 \sim 200-500$  мкм. Область пространственного заряда ПБДШ  $d_1 \ll d_0$ , ОПЗ  $p-n$ -перехода  $\ll d_0$ . При длине волны



в области 1—1.5 мкм и толщине  $d=500$  мкм в поляризации  $E \perp c$  основная доля падающего излучения генерирует носители заряда в ОПЗ  $p-n$ -перехода, создавая положительную фотоэдс (условно). Изменение поляризации на  $E \parallel c$  приводит к уменьшению пропускания на 30 % в соответствии с данными, представленными на рис. 7, а. Падающее излучение поглощается преимущественно в ОПЗ ПБДШ, создавая противоположно направленную фотоэдс. Подобные приемники поляризованного излучения могут быть созданы на любом полупроводниковом материале, на котором имеет место поляризованное примесное поглощение и существует возможность создания активных элементов с необходимыми параметрами. В интервале энергий 1.4—1.7 эВ коэффициент поглощения  $ZnP_2-C_{2h}$  для  $E \parallel c$  изменяется в пределах  $7 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$  см<sup>-1</sup>, а в поляризации  $E \perp c$  изменение начинается от  $(6 - \div 7) \cdot 10^3$  до  $7 \cdot 10^4$  см<sup>-1</sup>, т. е. величина коэффициента поглощения практически во всем указанном интервале отличается на порядок (рис. 7, б). Излучение, направленное на приемник со стороны диода Шоттки или со стороны  $p-n$ -перехода, в зависимости от поляризации света ( $E \parallel c$ ,  $E \perp c$ ) поглощается в слое I или II. Чтобы падающее излучение могло проникнуть в ОПЗ обоих переходов (ПБДШ и  $p-n$ ), толщина фотоприемника не превышала 15 мкм. Ширина области ОПЗ ПБДШ определяется концентрацией носителей заряда в кристалле ( $\sim 10^{16} - 10^{18}$  см<sup>-3</sup>,  $d_1 \sim 10^{-4} - 10^{-5}$  см). Глубина  $p-n$ -перехода  $d_3$  не превышала 1 мкм. Глубина слоя  $d_2$  определяется соотношением  $d_0/10$  из-за различия коэффициентов поглощения для  $E \parallel c$  и  $E \perp c$  в интервале 1.4—1.7 эВ. Таким образом, падающее со стороны  $p-n$ -перехода излучение в поляризации  $E \perp c$  поглощается преимущественно в области ОПЗ ПБДШ ( $+\Delta U$ ), а в поляризации  $E \parallel c$  — в ОПЗ  $p-n$ -перехода ( $-\Delta U$ ). Прикладывая небольшие смещения  $U_{13}$  и  $U_{23}$ , можно для каждой длины волны установить симметричную фотоэдс относительно нуля, т. е. величины смещения подберутся экспериментально такими, чтобы они удовлетворяли условию  $U_1$  (при  $E \parallel c$ ) =  $U_2$  (при  $E \perp c$ ). Изменение поляризации с  $E \parallel c$  на  $E \perp c$  для каждой длины волны приведет к изменению спектров пропускания и  $U_{\text{фэдс}}$ .

### Интерференционно-поляризационный фотоприемник

Обсужденный выше поляризационно-чувствительный фотоприемник обладает некоторыми особенностями при толщине элемента, удовлетворяющей условию интерференции  $2nd_0 = \lambda_2^{-1} - \lambda_1^{-1}$ .

На рис. 8, а представлены спектральные зависимости коэффициента пропускания для поляризаций  $E \perp c$  (сплошная кривая) и  $E \parallel c$  (штриховая кривая) в области 1.0—1.8 эВ для монокристалла  $ZnAs_2$ , полученного из газовой фазы, толщиной 1.4 мкм. Коэффициент пропускания для  $E \parallel c$  и  $E \perp c$  при  $E = 1.6$  эВ равен 10 и 2.3 % соответственно. Как видно из рисунка, в поляризации  $E \perp c$  при данных толщинах наблюдается интерференционная картина, а в поляризации  $E \parallel c$  она отсутствует. В поляризации  $E \parallel c$  для получения интерференционной картины при этих длинах волн необходимы меньшие толщины кристалла. На рис. 8, б представлены спектры фотоэдс структуры с двумя полупрозрачными металлическими контактами, формирующими ПБДШ на поверхностях пластины  $ZnAs_2$  толщиной 1.4 мкм. В поляризации  $E \parallel c$  световая энергия поглощается преимущественно в приповерхностной области (контакт к ней обозначен  $K_2$ ). Это обуславливает появление положительной  $U_{\text{фэдс}}$  с максимумом в области 1.2—1.3 мкм. Изменение ориентации электрического вектора на  $E \perp c$  приводит к изменению знака фотоэдс и смещению максимума спектральной чувствительности в область 0.8 мкм из-за того, что для поляризации  $E \perp c$  коэффициент поглощения меньше. При этом световая волна проникает в область ОПЗ ПБДШ ( $K_2$ ), генерируя носители заряда и создавая фотоэдс противоположного знака. В рассматриваемых спектрах заметны пики на кривых  $U_{\text{фэдс}}$ . Эти особенности обусловлены наложением на спектральную кривую  $U_{\text{фэдс}}$  интерференционной кривой коэффициента пропускания структур с толщиной  $d \sim 1.4$  мкм. В поляризации  $E \parallel c$  пики на общем фоне не обнаруживаются.

Модулирование по длине волны спектров фотответа рассматриваемого диода приводит к появлению осциллирующих кривых, представленных на

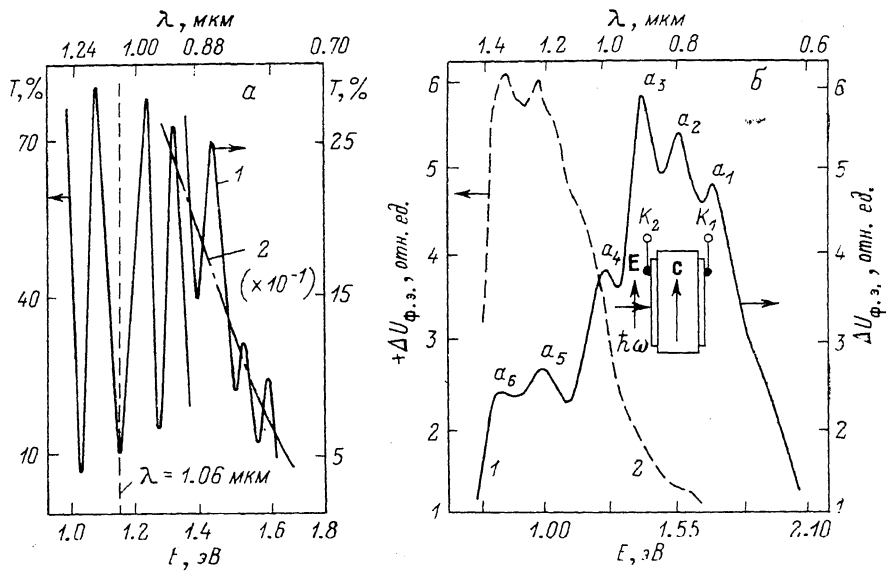


Рис. 8. Спектры пропускания монокристаллов ZnAs<sub>2</sub> толщиной  $d=1.4$  мкм (а) и спектральная зависимость фоточувствительности структуры Me-ZnAs<sub>2</sub> толщиной  $d=0.6$  мкм (б).  
 1 —  $E \perp c$ , 2 —  $E \parallel c$ .

рис. 9, а. Эти характеристики получены на фотодиоде Me-ZnAs<sub>2</sub> толщиной  $d=0.6$  мкм. Полосы а-д расположены на энергетическом расстоянии 28—

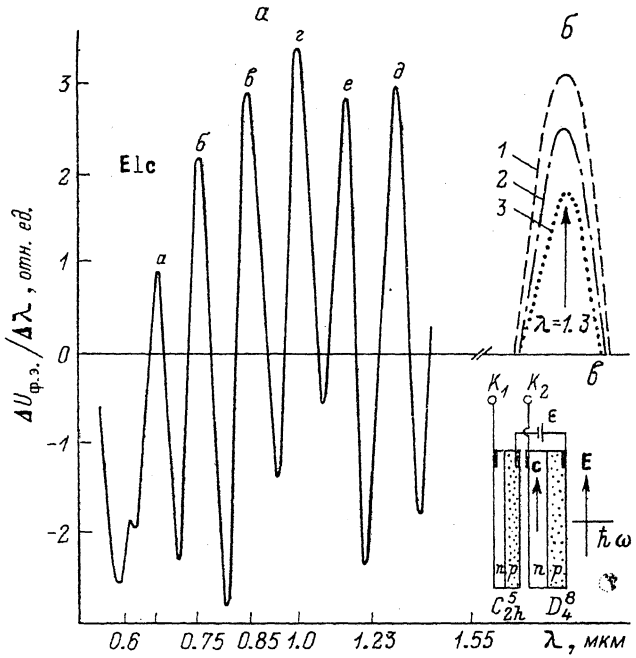


Рис. 9. Спектральная зависимость  $\lambda$ -модулированного фотответа структуры Me-ZnAs<sub>2</sub> (а), изменение спектров  $\lambda$ -модулированного фотответа при изменении угла поляризации  $\varphi$  (б) и конструкция дискретных фотоприемников ЛПД (в).  
 $d=0.6$  мкм;  $\varphi$ , град: 1 — 90, 2 — 89, 3 — 88.

93 мэВ друг от друга. Рассматриваемый приемник является нуль-индикатором поляризованного монохроматического излучения. Приемник инвертирует знак

2124

фотоэда при изменении длины волны в узкой спектральной области (энергетическое расстояние  $\delta - \delta'$  равно 28 мэВ). При достаточном усилении и развертке спектра изменение энергии на десятки (сотни) мэВ в точках нулей кривой приводит к изменению знака фотозда. Таким образом, рассматриваемый приемник можно использовать для контроля и поддержания частоты монохроматического излучения в широком диапазоне. При больших толщинах ( $\sim 1$  мкм) фотоприемника, когда интерференция наблюдается в поляризации  $E \perp c$ , приемник является анализатором поляризованного излучения. При этом можно рассмотреть три случая: активный элемент ПБДШ изготовлен на освещаемой поверхности, на тыльной поверхности и на обеих поверхностях. При расположении ПБДШ на освещаемой поверхности световое излучение в поляризации  $E \parallel c$  поглощается в ОПЗ ПБДШ и создает достаточно высокое значение фотозда. При этом интерференция отсутствует. Спектры содержат ряд максимумов, обусловленных зона-зонным механизмом поглощения. В поляризации  $E \perp c$  в коэффициенте пропускания наблюдается интерференционная картина. При расположении ПБДШ на тыльной стороне фотодиода картина аналогична, однако в поляризации  $E \parallel c$  сигнал значительно меньше и практически равен нулю в области  $E > E_g$ . В поляризации  $E \perp c$  световая волна достигает тыльной области, отражается и интерферирует в плоскопараллельной пластине, формируя чередующиеся максимумы. Следовательно, задавая строго ориентированное направление оси  $c$  кристалла, можно определять плоскость поляризации излучения по максимуму амплитуды фотозда. На рис. 9, б представлено изменение модулированного по длине волны фототовета приемника в зависимости от изменения поляризации излучения. Наши расчеты и экспериментальные результаты (рис. 9, б) показали, что такими приемниками удастся регистрировать поворот плоскости поляризации на несколько секунд.

Рассмотренные выше фотоприемники с двумя областями с надлежащими кристаллографическими осями могут изготавливаться и в дискретном варианте. В последнем случае каждая область должна представлять собой активный элемент ( $p-n$ ,  $n-p$  или ПБДШ) (рис. 9, в). Параметры обеих областей подгоняются в отдельности, и после ориентации осей  $c_1$  и  $c_2$  элементы скрепляются в единый блок.

Таким образом, явление анизотропии оптических свойств полупроводников позволяет создавать фотоприемники, чувствительные к поляризации света. Использование приемников ЛПИ с узкой полосой чувствительности позволяет повысить плотность оптического канала связи. Перспективными для таких устройств связи являются материалы  $ZnAs_2$ ,  $ZnP_2-C_{2h}^5$  и  $CdP_4$ , у которых прямые электронные переходы формируют  $E_g$ . Край поглощения поляризован. Максимум фоточувствительности наблюдается в области  $\lambda = 1.3$  мкм. Технологически на этих материалах удастся получить  $p-n$ -переходы и другие активные элементы.

#### Список литературы

- [1] Жевандров Н. Д. Применение поляризованного света. М., 1978. 170 с.
- [2] Медведкин Г. А., Рудь Ю. В. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 10. С. 1952—1958.
- [3] Медведкин Г. А., Рудь Ю. В. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 1. С. 133—138.
- [4] Радауцан С. И., Сырбу Н. Н., Стамов И. Г. // А. с. 76265. БИ. 1978. № 18/—10.
- [5] Сырбу Н. Н., Стамов И. Г. // А. с. 795352. БИ. 1979. № 9—4.
- [6] Сырбу Н. Н. Оптоэлектронные свойства соединения  $A^2B^5$ . Кишинев, 1983. 155 с.

Кишиневский политехнический  
институт им. С. Лазо

Получена 16.05.1991  
Принята к печати 17.06.1991