

И. В. СМОЛЕНЦЕВ, П. М. ШИПОВ

(Новосибирск)

### ПВМС НА ОСНОВЕ $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , РАБОТАЮЩИЙ НА ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОМ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ

К настоящему времени на основе фотопроводящих электрооптических монокристаллов  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (или  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ) разработано два типа оптически управляемых ПВМС: ПРОМ и ПРИЗ. Принцип работы и функциональные возможности этих устройств подробно изучены в работах [1—3]. Отличительной особенностью ПРОМа является то, что в этом устройстве в качестве активного элемента используется пластина монокристалла, вырезанная в плоскости (100), при этом модуляция считывающего пучка осуществляется за счет продольного электрооптического эффекта. В ПРИЗе слой монокристалла вырезается в плоскости (111), что обеспечивает модуляцию считывающего излучения за счет поперечного электрооптического эффекта. Передаточная характеристика ПРОМа, имея подъем в области низких пространственных частот, резко снижается при увеличении данного параметра. ПРИЗ, наоборот, хорошо передает высокие пространственные частоты и подавляет низкие. Естественно предположить, что гибридное устройство, работающее на продольно-поперечном электрооптическом эффекте, будет передавать более широкую полосу пространственных частот, чем ПРОМ или ПРИЗ в отдельности. В качестве возможной конструкции такого устройства можно предложить в общем случае структуру типа МДПДМ, содержащую два слоя  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (или  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ), вырезанных в плоскостях (100) и (111).

Настоящая работа посвящена исследованию передаточной характеристики ПВМС на основе структуры МДПДМ, включающей две пластины  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , вырезанные в указанных выше плоскостях (рис. 1). Назовем такое устройство ПРИМ (преобразователь изображений многослойный). Рассмотрим работу модулятора. Пусть в процессе записи в слоях  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  создано пространственно неоднородное распределение электрического заряда, модулирующее преломляющие свойства кристалла.

Считывающая плоская волна падает на ПРИМ нормально к его поверхности со стороны слоя кристалла, вырезанного в плоскости (100). Считая модулятор достаточно тонким (можно пренебречь дифракционными эффектами внутри устройства), связь между векторами поля входной и выходной волны можно выразить соотношением [4]

$$A_{\text{вых}} = \hat{T} A_{\text{вх}} = \hat{T}_2 \hat{T}_1 A_{\text{вх}}, \quad (1)$$

где  $\hat{T}$  — матрица Джонса устройства в целом;  $\hat{T}_1$  — матрица Джонса 1-го слоя  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , вырезанного в плоскости (100);  $\hat{T}_2$  — матрица Джонса 2-го слоя кристалла, имеющего срез (111). Для матриц  $\hat{T}_1$  и  $\hat{T}_2$  с точностью до постоянного фазового множителя можно написать:

$$\hat{T}_n = \begin{pmatrix} \cos \psi_n & -\sin \psi_n \\ \sin \psi_n & \cos \psi_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{\frac{i\Delta\varphi_n}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-\frac{i\Delta\varphi_n}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \psi_n & \sin \psi_n \\ -\sin \psi_n & \cos \psi_n \end{pmatrix}, \quad n = 1, 2, \quad (2)$$

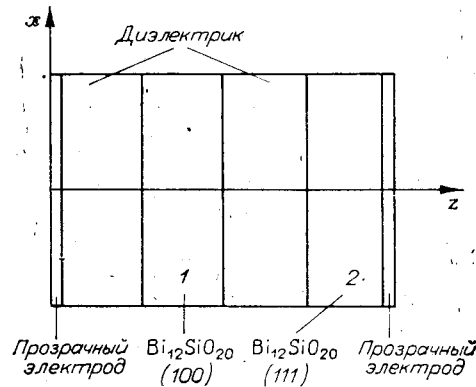


Рис. 1. Конструкция ПВМС, работающего на продольно-поперечном электрооптическом эффекте

где  $\psi_1$  и  $\psi_2$  — углы поворота главных осей сечения оптической индикатрисы относительно координатных осей  $OX$  и  $OY$  для слоев кристалла 1 и 2 соответственно;  $\Delta\varphi_1$  и  $\Delta\varphi_2$  — разности фаз обыкновенной и необыкновенной волн, набегающие на слоях  $Bi_{12}SiO_{20}$  1 и 2 соответственно. Будем считать, что кристаллографические оси  $[010]$  слоя 1 и  $[\bar{1}10]$  слоя 2 параллельны координатной оси  $OX$ . Тогда согласно [3] имеем

$$\psi_1 = \pi/4; \quad (3)$$

$$\psi_2 = \pi/4 - \gamma/2, \quad (4)$$

где  $\gamma$  — угол между проекцией напряженности электрического поля на плоскость  $(111)$  во 2-м слое кристалла и осью  $[\bar{1}10]$ . Подставляя  $\hat{T}_1$  и  $\hat{T}_2$  из (2) в (1) и учитывая (3), (4), получим для элементов матрицы Джонса модулятора

$$T_{11} = \sin^2 \frac{\gamma}{2} \cos \left( \frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2}{2} \right) + \cos^2 \frac{\gamma}{2} \cos \left( \frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2}{2} \right) + \\ + \frac{i}{2} \sin \gamma \left[ \sin \left( \frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2}{2} \right) - \sin \left( \frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2}{2} \right) \right]; \quad (5)$$

$$T_{12} = \frac{\sin \gamma}{2} \left[ \cos \left( \frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2}{2} \right) - \cos \left( \frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2}{2} \right) \right] - \\ - i \left[ \sin^2 \frac{\gamma}{2} \sin \left( \frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2}{2} \right) + \cos^2 \frac{\gamma}{2} \sin \left( \frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2}{2} \right) \right]; \quad (6)$$

$$T_{21} = \frac{\sin \gamma}{2} \left[ \cos \left( \frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2}{2} \right) - \cos \left( \frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2}{2} \right) \right] - \\ - i \left[ \sin^2 \frac{\gamma}{2} \sin \left( \frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2}{2} \right) + \cos^2 \frac{\gamma}{2} \sin \left( \frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2}{2} \right) \right]; \quad (7)$$

$$T_{22} = \sin^2 \frac{\gamma}{2} \cos \left( \frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2}{2} \right) + \cos^2 \frac{\gamma}{2} \cos \left( \frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2}{2} \right) - \\ - \frac{i}{2} \sin \gamma \left[ \sin \left( \frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2}{2} \right) - \sin \left( \frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2}{2} \right) \right]. \quad (8)$$

Пусть распределение интенсивности света в записывающем пучке имеет вид

$$I(x) = I_0 (1 + m \sin kx). \quad (9)$$

Согласно [3] разности фаз  $\Delta\varphi_1$  и  $\Delta\varphi_2$  можно представить в виде

$$\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_0 + \Phi_1(k) \sin kx; \quad (10)$$

$$\Delta\varphi_2 = \Phi_2(k) \cos kx. \quad (11)$$

Исследуем передаточную характеристику ПВМС типа ПРИМ. Под передаточной характеристикой ПВМС в данной работе будем понимать зависимость дифракционной эффективности от пространственной частоты. Подставляя (10) и (11) в (5)–(8) и воспользовавшись формулой [5]

$$e^{\pm z \sin t} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(z) e^{\pm i n t}, \quad (12)$$

где  $J_n$  — функция Бесселя первого рода  $n$ -порядка, находим для  $+1$ -го порядка дифракции

$$T_{11}^{(1)} = \frac{J_1(R)}{R} \left[ \Phi_2(k) \cos \gamma \sin \frac{\Delta\varphi_0}{2} + i \left( \Phi_1(k) \sin \frac{\Delta\varphi_0}{2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \Phi_2(k) \sin \gamma \cos \frac{\Delta\varphi_0}{2} \right) \right]; \quad (13)$$

$$T_{12}^{(1)} = \frac{J_1(R)}{R} \left[ \Phi_2(k) \sin \gamma \sin \frac{\Delta\varphi_0}{2} - \right. \\ \left. - \Phi_1(k) \cos \frac{\Delta\varphi_0}{2} + i \Phi_2(k) \cos \gamma \cos \frac{\Delta\varphi_0}{2} \right]; \quad (14)$$

$$T_{21}^{(1)} = \frac{J_1(R)}{R} \left[ -\Phi_2(k) \sin \gamma \sin \frac{\Delta\varphi_0}{2} - \Phi_1(k) \cos \frac{\Delta\varphi_0}{2} + i\Phi_2(k) \cos \gamma \cos \frac{\Delta\varphi_0}{2} \right]; \quad (15)$$

$$T_{22}^{(1)} = \frac{J_1(R)}{R} \left[ \Phi_2(k) \cos \gamma \sin \frac{\Delta\varphi_0}{2} + i \left( \Phi_1(k) \sin \frac{\Delta\varphi_0}{2} - \Phi_2(k) \sin \gamma \cos \frac{\Delta\varphi_0}{2} \right) \right]. \quad (16)$$

Здесь

$$R = \sqrt{\Phi_1^2(k) + \Phi_2^2(k)}. \quad (17)$$

Если считывающий пучок на входе имеет линейную поляризацию (например, вдоль оси  $OY$ ), а за ПВМС установлен анализатор, ось которого параллельна  $OX$ , то из (1) и (13)–(16) получим для дифракционной эффективности ПРИМа

$$\eta = \frac{J_1^2(R)}{R^2} \left[ \Phi_1^2(k) \cos^2 \frac{\Delta\varphi_0}{2} + \Phi_2^2(k) \left( \cos^2 \gamma \cos^2 \frac{\Delta\varphi_0}{2} + \sin^2 \gamma \sin^2 \frac{\Delta\varphi_0}{2} \right) - \Phi_1(k) \Phi_2(k) \sin \gamma \sin \Delta\varphi_0 \right]. \quad (18)$$

Функции модуляции разности фаз для продольного и поперечного электрооптического эффекта  $\Phi_1(k)$  и  $\Phi_2(k)$  подробно изучены в [3]. При низких пространственных частотах  $\Phi_2(k) \sim 0$ , а  $\Phi_1(k)$  принимает максимальные значения. В этом случае вкладом слоя кристалла 2 в модуляцию считывающего излучения можно пренебречь, и, следовательно, на низких пространственных частотах ПРИМ эквивалентен ПВМС типа ПРОМ. Имеем из (17) и (18) для дифракционной эффективности

$$\eta \approx \eta_{\text{пром}} = J_1^2(\Phi_1) \cos^2 \frac{\Delta\varphi_0}{2}. \quad (19)$$

На высоких пространственных частотах  $\Phi_1(k) \ll \Phi_2(k)$ . Найдем при этом из (17) и (18)

$$\eta \approx J_1^2(\Phi_2) \left( \cos^2 \gamma \cos^2 \frac{\Delta\varphi_0}{2} + \sin^2 \gamma \sin^2 \frac{\Delta\varphi_0}{2} \right). \quad (20)$$

Если учесть, что дифракционная эффективность ПВМС типа ПРИЗ  $\eta_{\text{приз}}$  равна  $J_1^2(\Phi_2) \cos^2 \gamma$  (получается из (17) и (18) при  $\Delta\varphi_0 = \Phi_1(k) = 0$ ), то выражение (20) можно записать в виде

$$\eta \approx \eta_{\text{приз}} \left( \cos^2 \frac{\Delta\varphi_0}{2} + \text{tg}^2 \gamma \sin^2 \frac{\Delta\varphi_0}{2} \right). \quad (21)$$

Таким образом, из формул (19) и (21) следует, что рассматриваемый модулятор при низких пространственных частотах работает как ПВМС типа ПРОМ, а на высоких пространственных частотах его передаточная характеристика пропорциональна передаточной характеристике ПРИЗа. Следовательно, ПРИМ сочетает в себе достоинства ПВМС типа ПРИЗ и ПРОМ: высокую разрешающую способность первого и способность второго эффективно передавать низкие пространственные частоты.

Из формулы (18) видно, что дифракционная эффективность рассматриваемого устройства зависит от угла  $\gamma$ , характеризующего ориентацию волнового вектора записываемой решетки относительно кристаллографических осей второго слоя кристалла. Следовательно, передаточная характеристика ПРИМа анизотропна. Определим коэффициент анизотропии передаточной характеристики выражением

$$K = (\eta_{\text{max}} - \eta_{\text{min}}) / (\eta_{\text{max}} + \eta_{\text{min}}). \quad (22)$$

Подставляя в (22) экстремальные значения дифракционной эффективности из выражения (18), найдем для коэффициента анизотропии:

$$\text{при } \operatorname{arctg} \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \leq \Delta\varphi_0 \leq \frac{\pi}{2}$$

$$K = \frac{\Phi_1(k) \Phi_2(k) \sin \Delta\varphi_0}{\Phi_1^2(k) \cos^2 \frac{\Delta\varphi_0}{2} + \Phi_2^2(k) \sin^2 \frac{\Delta\varphi_0}{2}}; \quad (23)$$

$$\text{при } \Delta\varphi_0 \leq \operatorname{arctg} \frac{\Phi_2}{\Phi_1}, \frac{\pi}{2}$$

$$K = \frac{\Phi_2^2(k) \cos \Delta\varphi_0 + \Phi_1(k) \Phi_2(k) \sin \Delta\varphi_0}{2\Phi_1^2(k) \cos^2 \frac{\Delta\varphi_0}{2} + \Phi_2^2(k) - \Phi_1(k) \Phi_2(k) \sin \Delta\varphi_0}. \quad (24)$$

Для низких пространственных частот, когда выполнено условие  $\Phi_2(k) \ll \Phi_1(k)$ , из (23) получаем для коэффициента анизотропии передаточной характеристики

$$K \approx 2 \frac{\Phi_2(k)}{\Phi_1(k)} \operatorname{tg} \frac{\Delta\varphi_0}{2}. \quad (25)$$

Как видно из выражения (25), при низких пространственных частотах анизотропия передаточной характеристики мала.

Для высоких пространственных частот ( $\Phi_1(k) \ll \Phi_2(k)$ ) из (24) имеем

$$K \approx \cos \Delta\varphi_0 + (\Phi_1(k)/\Phi_2(k)) \sin \Delta\varphi_0 (1 + \cos \Delta\varphi_0). \quad (26)$$

Если при записи входного изображения экспозицию подобрать таким образом, чтобы  $\Delta\varphi_0 \sim \pi/2$ , то в этом случае, как видно из формулы (26), высокие пространственные частоты передаются модулятором практически изотропно.

Анализ выражений (23) и (24) для диапазона пространственных частот, где выполнено условие  $\Phi_1(k) \sim \Phi_2(k)$ , показывает, что при  $0 \leq \Delta\varphi_0 \leq \pi/2$  коэффициент анизотропии передаточной характеристики варьируется в пределах 0,33—1,0.

Проведено экспериментальное исследование передаточной характеристики ПРИМа. Модулятор выполнялся в виде структуры типа МДПДМ на основе монокристалла  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ . Толщины обоих слоев кристалла составляли 100 мкм. Пластина  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , на которую прозрачный электрод наносится непосредственно, имела срез (111), второй слой кристалла вырезался в плоскости (100). Диэлектрическая прослойка между пластинами  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  представляла собой слой оптического клея толщиной 20 мкм. В качестве диэлектрического слоя между пластиной монокристалла, вырезанной в плоскости (100), и прозрачным электродом использовалась стеклянная пластина толщиной 100 мкм. Рабочая апертура исследованных образцов составляла 38 мм. Напряжение, прикладываемое к прозрачным электродам модулятора, в процессе записи не превышало 8 кВ. На рис. 2, а в качестве иллюстрации возможностей предлагаемого устройства дано тестовое изображение, считываемое с ПВМС типа ПРИМ в некогерентном пучке излучения. На рис. 2, б, в для сравнения показано то же изображение, считываемое с ПВМС типа ПРОМ и ПРИЗ соответственно.

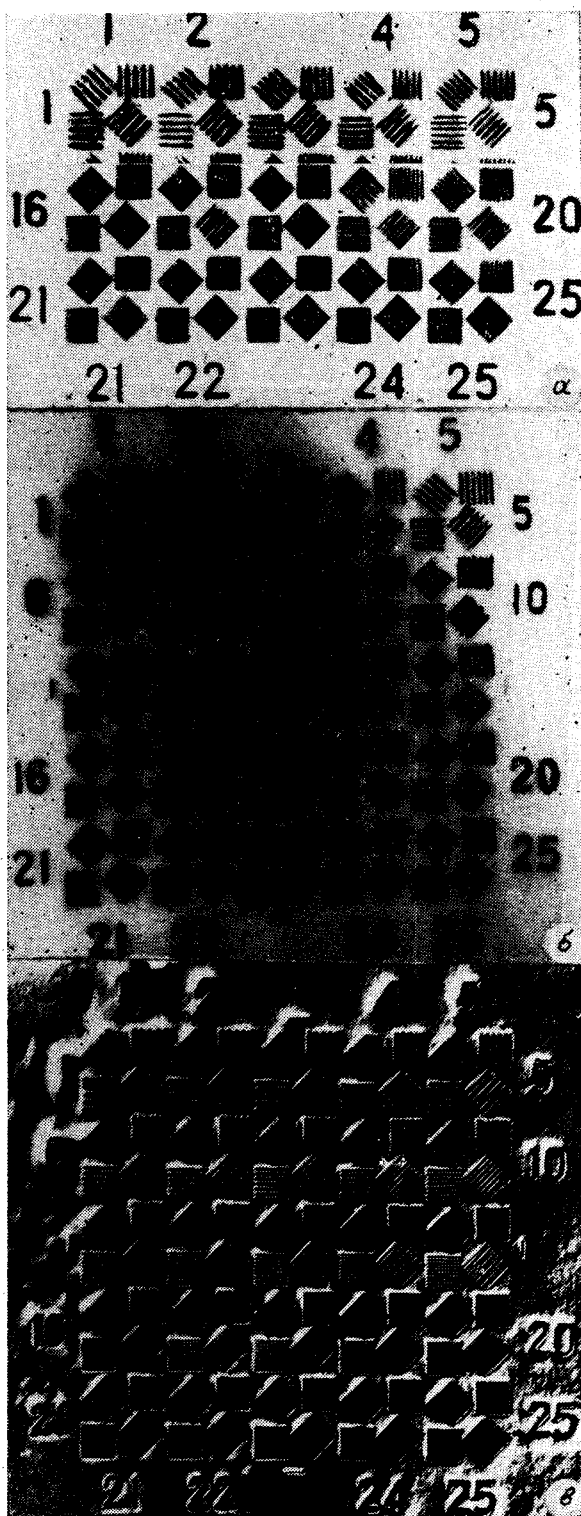
При исследовании передаточной характеристики модулятора в качестве входного изображения использовались транспаранты, коэффициент пропускания которых менялся по синусоидальному закону с разной частотой. Контраст синусоидальных решеток, записываемых на ПРИМ, составлял 0,9. Входное изображение с большой глубиной резкости проецировалось на модулятор со стороны слоя  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , вырезанного в плоскости (100). Полярность напряжения записи выбиралась так, чтобы прозрачный электрод со стороны входного изображения имел отрица-

Рис. 2. Считываемое с ПВМС тестовое изображение (с ПРИМа — а, ПРОМа — б, ПРИЗа — в)

ге-не-лазера. Для измерения интенсивности считываемого пучка на входе и в 1-м порядке дифракции использовался ФЭУ.

На рис. 3 (кривая 1) показана зависимость дифракционной эффективности модулятора от пространственной частоты. Кривая 1 соответствует экспозиции, при которой анизотропия передаточной характеристики на высоких пространственных частотах минимальна (данная экспозиция подобиралась экспериментально на пространственной частоте  $20 \text{ мм}^{-1}$ ). Для сравнения на том же экспериментальном стенде и по той же методике проведено измерение передаточных характеристик ПВМС типа ПРОМ, ПРИЗ (см. рис. 3, кривые 2 и 3 соответственно). Сравнение представленных кривых показывает, что передаточная характеристика ПВМС, работающего на продольно-поперечном электрооптическом эффекте, спадает в области высоких пространственных частот значительно медленнее, чем аналогичная характеристика ПВМС типа ПРОМ.

Проведено исследование анизотропии передаточной характеристики ПВМС типа ПРИМ. В результате перебора ориентаций записываемой синусоидальной решетки относительно мо-



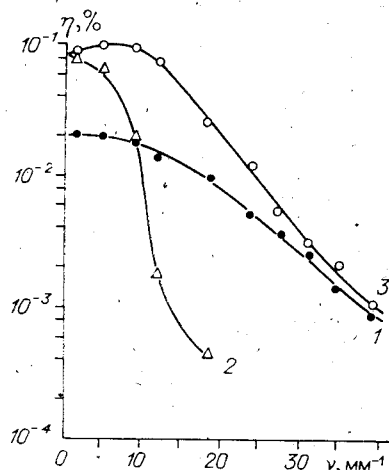


Рис. 3. Зависимости дифракционной эффективности от пространственной частоты для ПВМС типа ПРИМ (1), ПРОМ (2) и ПРИЗ (3)

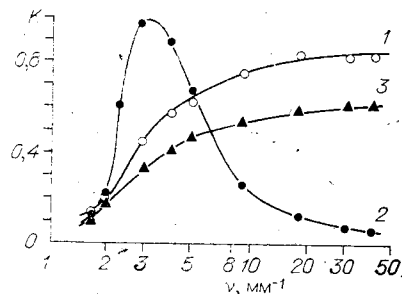


Рис. 4. Зависимость коэффициента анизотропии передаточной характеристики от пространственной частоты для трех значений экспозиции: 1 —  $2,9 \times 10^{-5}$ ; 2 —  $9,3 \times 10^{-5}$ ; 3 —  $18,7 \times 10^{-5}$  Дж/см

дуплятора определены экстремальные значения дифракционной эффективности для десяти пространственных частот. Данная процедура выполнена при трех значениях экспозиции  $W$ . По экспериментальным данным строилась кривая зависимости коэффициента передаточной характеристики (определенного по формуле (22)) от пространственной частоты (рис. 4). Видно, что для пространственных частот  $\nu \geq 2 \text{ мм}^{-1}$  коэффициент анизотропии существенно зависит от экспозиции. При экспозициях  $W \sim 9,3 \times 10^{-5} \text{ Дж/см}^2$  реализуется максимально широкий диапазон изотропности передаточной характеристики устройства.

Таким образом, предложен и реализован ПВМС на основе  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , работающий на продольно-поперечном электрооптическом эффекте. Проведено теоретическое исследование модуляционных свойств устройства. Результаты теоретического исследования подтверждаются экспериментальными данными. Установлено:

1. Для низких пространственных частот гибридное устройство эквивалентно ПВМС типа ПРОМ. На высоких пространственных частотах его передаточная характеристика приближается к передаточной характеристике ПВМС типа ПРИЗ.

2. Передаточная характеристика модулятора для пространственных частот  $\nu \geq 2 \text{ мм}^{-1}$  существенно анизотропна, причем степень анизотропии зависит от экспозиции. При экспозициях  $W \sim 9,3 \times 10^{-5} \text{ Дж/см}^2$  высокие пространственные частоты ( $\nu \geq 10 \text{ мм}^{-1}$ ) передаются устройством практически изотропно.

ПРИМ, сочетающий в себе достоинства ПВМС типа ПРИЗ и ПРОМ (высокую разрешающую способность первого и способность второго эффективно передавать низкие пространственные частоты), представляет весьма перспективным элементом для оптической обработки информации.

В заключение авторы считают своим долгом выразить благодарность И. С. Гибину за внимание к работе и ценные замечания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Lipson S., Nisenson P. Imaging characteristics of the ITEK PROM.— *Apl. Opt.*, 1974, v. 13, N 9.
2. Petrov M. P., Khomenko A. V. et al. Optical information recording in  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ .— *Ferroelectrics*, 1978, v. 22, p. 651—653.
3. Петров М. П., Степанов С. И., Хоменко А. В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации.— Л.: Наука, 1983.
4. Джеррард А., Берч Дж. М. Введение в матричную оптику.— М.: Мир, 1978.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике.— М.: Наука, 1968.

Поступила в редакцию 27 августа 1985 г.