

06; 07

© 1991 г.

ЗАВИСИМОСТЬ СИГНАЛЬНО-ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО
МОДУЛЯТОРА СВЕТА ОТ РЕЖИМА ПИТАНИЯВ. В. Беляев, Н. Н. Дзуличанская, А. В. Долгих,
А. Б. Кузнецов, Е. Н. Сальников

Для пространственных модуляторов света на основе структуры металл—диэлектрик—полупроводник—жидкий кристалл исследованы зависимости полезного сигнала и фонового шума от амплитуды и частоты напряжения питания и интенсивности входной засветки. Приведено математическое описание зависимости дифракционной эффективности ПМС от режима питания и засветки. Описаны оптимальные по отношению сигнал/фон режимы питания ПМС.

Пространственные модуляторы света (ПМС) на основе структуры металл—диэлектрик—полупроводник—жидкий кристалл (МДП—ЖК) в настоящее время широко применяются в системах оптической обработки изображений [1–3]. На качество преобразованных изображений и их пространственных спектров оказывают влияние шумы, обусловленные структурными неоднородностями слоев полупроводника и диэлектрика, ориентации ЖК, а также флуктуациями молекул ЖК, вызывающими рассеяние света [4]. В значительной степени шумовые характеристики ПМС зависят от режима питания и засветки. В литературе, за исключением [5, 6], отсутствуют сведения о связи шумовых или фоновых характеристик ПМС с этими факторами. Настоящая работа посвящена исследованию шумовых характеристик жидкокристаллических ПМС в зависимости от режима питания и засветки, сопоставлению их с аналогичными сигнальными характеристиками и выяснению физических механизмов, определяющих вид исследованных зависимостей.

Для ПМС на основе структуры МДП—ЖК с GaAs и планарно с ориентированным ЖК-654 (*S*-эффект) в пространственно-частотной плоскости были измерены величины дифракционной эффективности сигнала $\eta_1 = I_c/I_0$ (на входе ПМС — изображение дифракционной решетки с пространственной частотой 20 мм^{-1} , I_0 — интенсивность света в 1-м дифракционном порядке, I_c — интенсивность считывающего света) и фона $\eta_2 = I_\phi/I_0$ (I_ϕ — интенсивность света, измеренного на той же пространственной частоте при равномерной засветке), являющегося источником шума, от амплитуды U и частоты f напряжения питания ПМС и интенсивности J стационарной входной засветки.

Зависимость η_1 и η_2 от амплитуды напряжения питания ПМС представлена на рис. 1. Так как величина дифракционной эффективности определяется разностью фаз $\delta\Phi$, приобретаемой пучком считывающего света при прохождении участков НЖК с разной степенью деформации, соответствующей распределению интенсивности света на входе ПМС, то следует рассмотреть зависимость разности фаз $\delta\Phi$ от напряжения смещения на слое ЖК и напряжения питания ПМС.

Согласно [7], зависимость фазовой задержки при прохождении через $\Delta\Phi$ необыкновенного и обыкновенного лучей слой НЖК толщиной L от напряжения смещения $U_{\text{ЖК}}$ вблизи порогового напряжения U_n описывается выражением

$$\frac{\partial(\Delta\Phi)}{\partial U_{\text{ЖК}}} = \frac{2\pi \cdot 2L}{\lambda} \frac{\partial(\Delta n)}{\partial U_{\text{ЖК}}} = \frac{4\pi L}{\lambda} \frac{\partial n_e}{\partial U_{\text{ЖК}}} = \frac{4\pi L}{\lambda} \frac{n_e(n_e^2 - n_0^2)}{n_0^2} \frac{1}{U_{11}} \left(\frac{K_{33}}{K_{11}} + \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_{\perp}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где n_e , n_0 — показатели преломления для необыкновенного и обыкновенного лучей; λ — длина волны света считывания; K_{33} , K_{11} — коэффициенты упругости, $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$, ϵ_{\parallel} , ϵ_{\perp} — компоненты тензора диэлектрической проницаемости.

В (1) берется удвоенная толщина слоя ЖК вследствие двукратного прохождения через него считывающего луча при отражении, а также учтен факт, что при изменении напряжения $U_{\text{ЖК}}$ меняется только показатель преломления для необыкновенного луча n_e . На рис. 2 представлена зависимость $\Delta\Phi(U_{\text{ЖК}})$,

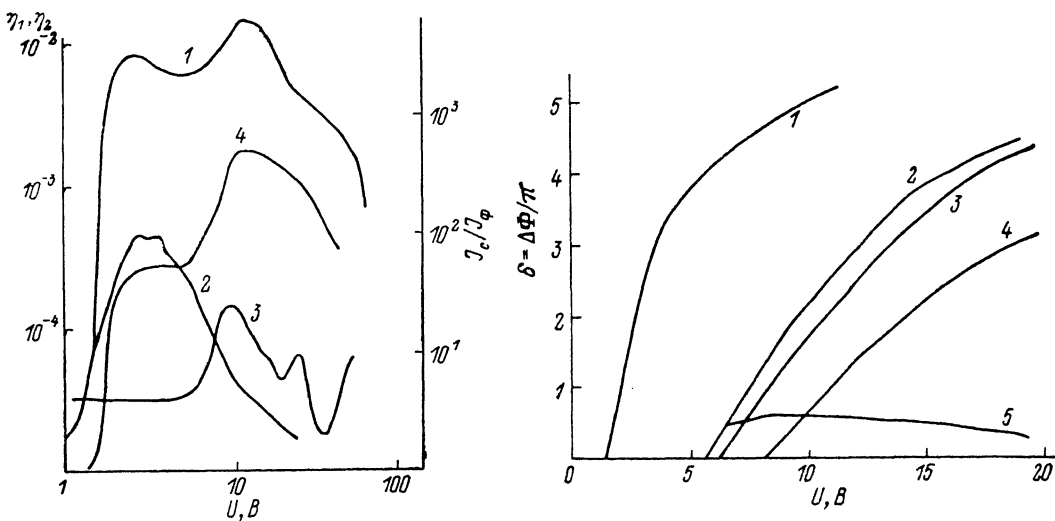


Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности сигнала η_1 (1) и фона η_2 (2, 3), а также отношения сигнал/фон $J_c/J_{\phi} \equiv \eta_1/\eta_2$ (4) (масштаб справа) от напряжения питания ПМС U . J , Вт/см²: 1, 2, 4 — $3 \cdot 10^{-2}$; 3 — $7 \cdot 10^{-3}$.

Рис. 2. Зависимость фазовой задержки $\Delta\Phi/\pi$, вносимой слоем ЖК в ячейке (1) и ПМС (2—4), и разности фаз $\delta\Phi/\pi$ (5), возникающей при разной деформации участков ЖК вследствие различной освещенности по апертуре фотопроводника, от напряжения смещения $U_{\text{ЖК}}$ (1) и напряжения питания ПМС U (2—5). $L_{\text{ЖК}} = 10$ мм, $f = 1$ кГц; J , Вт/см²: 1 — $3 \cdot 10^{-2}$, 3 — $8 \cdot 10^{-4}$, 4 — 0.

рассчитанная согласно [8, 9]. На этом же рисунке приведены зависимости $\delta\Phi$, вносимой слоем ЖК, от напряжения питания ПМС U при различных значениях J . Уменьшение порогового напряжения и увеличение крутизны кривой $\delta\Phi(U)$ с ростом J связаны с изменением перераспределения напряжения в слоях МДП структуры при различных засветках. При достаточно больших частотах ($f > 1$ кГц) распределение напряжения в слоях структуры осуществляется обратно пропорционально емкостям слоев [1—3]. Долю напряжения, падающего на слой ЖК, при этом можно описать приближительным эмпирическим соотношением

$$P = \frac{U_{\text{ЖК}}}{U} = a + b \ln J/J_{\text{н}}, \quad (2)$$

где a и b — подгоночные параметры, являющиеся функциями толщины и диэлектрической проницаемости слоев.

При заданной частоте напряжения питания f величина b связана с величиной $J_{\text{нас}}$ — интенсивности входной засветки, при которой модуляционные характеристики ПМС выходят на насыщение. Реальный наклон зависимости фазовой задержки от напряжения питания U при уменьшении засветки уменьшается по сравнению с (1) и описывается выражением

$$\frac{\partial(\Delta\Phi)}{\partial U} = \frac{4\pi L}{\lambda} \frac{\partial n_e}{\partial U_{\text{ЖК}}} \cdot P. \quad (3)$$

Для расчета зависимости дифракционной эффективности $\eta_1 = J_1(\delta\Phi)$ (J_1 — функция Бесселя первого рода, $\delta\Phi = (4\pi L \delta n)/\lambda$, $\delta n = n_T - n_c = n_e(J_T) - n_e(J_c)$, $J_c = J$ — интенсивность засветки на входе ПМС, $J_T = J_c/K$, K — контраст изображения (решетки) на входе ПМС) от напряжения U или засветки J достаточно вычесть зависимости фазовой задержки, снятые при равномерной входной засветке для значений интенсивности J_c и J_T . Это справедливо, если считать рельеф показателей преломления полностью соответствующим рельефу интенсивности света на входе ПМС. В противном случае надо сделать поправку на функцию передачи модуляции. Зависимость разности фаз $\delta\Phi$, определяющей величину дифракционной эффективности, от напряжения питания ПМС при условии линейной зависимости деформации слоя ЖК от напряжения смещения записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta\Phi &= \frac{4\pi L}{\lambda} [n_e(U, J_T) - n_e(U, J_c)] = \frac{4\pi L}{\lambda} \frac{\delta n_e}{\delta U_{\text{ЖК}}} [P(J_c) - P(J_T)] \cdot U = \\ &= \frac{4\pi L}{\lambda} \frac{\delta n_e}{\delta U_{\text{ЖК}}} \cdot \ln\left(\frac{J_c}{J_T}\right) \cdot b \cdot U = \frac{4\pi L}{\lambda} \frac{\delta n_e}{\delta u_{\text{ЖК}}} \cdot b \cdot \ln K \cdot U. \end{aligned} \quad (4)$$

Для малого контраста изображения на входе ($K-1 \ll 1$) выражение (4) упрощается

$$\delta\Phi = \frac{4\pi L}{\lambda} \frac{\delta n_e}{\delta U_{\text{ЖК}}} \cdot U \cdot b \cdot (K-1). \quad (5)$$

Рассмотрим экспериментальные зависимости $\eta_1(U)$. Разность фаз $\delta\Phi$ и соответственно величина η_1 равны нулю до тех напряжений U , пока не начинается переориентация молекул ЖК в области, соответствующей более освещенной части фотополупроводника. Для этого случая зависимость $\delta\Phi(U)$ описывается выражением

$$\delta\Phi = \frac{4\pi L}{\lambda} \frac{\delta n_e}{\delta U_{\text{ЖК}}} \cdot (a + b \ln J/J_n) [U - U_n / (a + b \ln J/J_n)], \quad (4a)$$

которое для малых значений входной интенсивности J ($J/J_n - 1 \ll 1$) приводится к виду

$$\delta\Phi = \frac{4\pi L}{\lambda} \frac{\delta n_e}{\delta U_{\text{ЖК}}} \left(c + b \frac{J}{J_n}\right) \left[U - U_n \left(c + b \frac{J}{J_n}\right)\right], \quad c = a - b. \quad (5a)$$

Выражения (4a) и (5a) означают, что наклон зависимости $\eta_1(U)$ и пороговое напряжение для этой зависимости определяются не только параметрами ЖК материала, но и конструкцией ПМС (толщиной и диэлектрическими характеристиками слоев) и величиной J . При напряжениях, когда переориентируется ЖК в местах, соответствующих меньшей освещенности фотополупроводника, уменьшается крутизна зависимости $\delta\Phi(U)$ на множитель, определяемый контрастом и интенсивностью входного изображения согласно выражению (4). Максимум зависимости $\delta\Phi(U)$ наблюдается, когда зависимость $n_e(U, J_c)$ перестает быть линейной. При больших напряжениях U ориентация ЖК по всей апертуре близка к гомеотропной, следовательно, уменьшаются глубина фазового рельефа и дифракционная эффективность. В этом диапазоне напряжений величины $\delta\Phi$ и соответственно η_1 могут быть рассчитаны численно с привлечением результатов [8, 9].

При равномерной входной засветке пространственный спектр считывающего пучка света дает информацию о фоновом-шумовых составляющих изображения, вносимых ПМС. Учитывая малую величину фазового набега на пространственных флуктуациях считываемого изображения по апертуре ПМС, немонокотный ход зависимости $\eta_2(U)$ не может быть объяснен так же, как и для сигнальной составляющей. При малых интенсивностях входной засветки ($J < 10^{-5}$ Втс/м²) на зависимости $\eta_2(U)$ имеется несколько максимумов. Первый максимум соответствует началу переориентации слоя ЖК при $U_{\text{ЖК}} \approx U_n$ (аналогичная картина наблюдается и в ячейках с ЖК). Его появление связано с рассеянием света, возникающим при неоднородной переориентации ЖК вследствие из-

менения по апертуре ПМС угла ориентации молекул жидкого кристалла на поверхности подложек. В условиях пространственно однородного продольного поля, силовые линии которого ортогональны плоскости подложек, величина светорассеяния должна монотонно уменьшаться вследствие уменьшения неоднородности переориентации ЖК. Появление второго максимума $\eta_2(U)$ небольшой амплитуды свидетельствует о нарушении однородности переориентации директора вследствие появления тангенциальной составляющей электрического поля на дефектах полупроводника, имеющих, вообще говоря, случайные величины размера и плотности заряда на них. Пространственные флуктуации заряда приводят к появлению составляющей переориентации, перпендикулярной направлению директора и параллельной плоскости подложек. Эта азимутальная составляющая переориентации существенно сказывается на величине светорассеяния при напряжениях, когда МДП структура переходит в обедненное состояние [10], и величина тангенциального электрического поля превышает пороговое поле для деформации ЖК в направлении, параллельном плоскости подложек. Вклад тангенциальной составляющей электрического поля становится также существенным, когда деформация ЖК, вызванная продольной составляющей поля, близка к насыщению. В этом случае наблюдается третий максимум на зависимости интенсивности фонового рассеяния от напряжения. При увеличении засветки увеличивается напряжение смещения на слое ЖК, что приводит к более быстрому насыщению деформации ЖК директора и к сближению величин напряжений, соответствующих максимумам интенсивности, вызванных неоднородностью переориентации ЖК, имеющей место как вследствие дефектов ориентации ориентирующих подложек, так и вследствие дефектов полупроводника.

Сопоставив зависимости $\eta_1(U)$ и $\eta_2(U)$, можно оценить число носителей заряда ΔN на дефектах фотополупроводника. Средняя разность напряжений смещения $U_{\text{ЖК}}$ на участках апертуры слоя ЖК, соответствующих дефектной и бездефектной частям фотополупроводника, эквивалентна разности напряжений смещения на участках апертуры слоя ЖК, соответствующих по-разному освещенным участкам фотополупроводника при наличии на входе ПМС дифракционной решетки со слабым контрастом. Это предположение основано на совпадении зависимостей $\eta_1(U)$ и $\eta_2(U)$ при напряжениях, близких к порогу деформации слоя ЖК. Зная из зависимости фазовой задержки, вносимой слоем ЖК, от напряжения смещения разность $\delta n = n_T - n_o$, при которой происходит изменение фазы считывающего света на 1π , и из этой же зависимости разность напряжений смещения на слое ЖК на участках, соответствующих участкам фотополупроводника с разной освещенностью на входе $\delta U_{\text{ЖК}} = U_c - U_T \approx 0.5$ В, по отношению η_2 и η_1 в максимумах их зависимостей от U можно оценить величину ΔN . При этом берется приближительно $\eta \sim \sin^2 \delta\Phi$ и считается, что напряжение в структуре ПМС распределяется обратно пропорционально емкостям слоев. Так, при $\eta_1/\eta_2 \approx 50$ (рис. 1) и толщинах слоев $L_{\text{ЖК}} = 10$ мкм, $L_{\text{ФП}} = 100$ мкм путем несложных вычислений получаем $\Delta N = 10^{12}$ см⁻², что соответствует плотности оборванных связей в монокристалле арсенида галлия [11] или числу атомов в дислокациях на единице площади с учетом длины дислокаций [12].

Зависимости η_1 и η_2 от частоты f , снятые при фиксированном напряжении U (рис. 3), интересно сопоставить с аналогичными зависимостями доли напряжения питания ПМС U , падающего на слое ЖК $U_{\text{ЖК}}/U$ (кривые 5, 5'). При равномерной засветке на входе по максимумам или минимумам интенсивности считываемого света в изображении определялась фазовая задержка $\Delta\Phi(U)$, которая затем сопоставлялась с измеренной в ЖК ячейке зависимостью $\Delta\Phi(U_{\text{ЖК}})$, и при заданных значениях U и $\Delta\Phi$ находилось значение $U_{\text{ЖК}}$. В отсутствие входной засветки зависимости η_2 и $U_{\text{ЖК}}/U$ от f ведут себя совершенно одинаково по закону $(2\pi f\tau)^2 / (1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)$, где τ — характерное время релаксации. Такая зависимость получается, если рассчитать $U_{\text{ЖК}}/U$, представив МДП и ЖК слои ПМС в виде схемы с эквивалентными сопротивлениями и емкостями [1, 2, 13]. Сопоставляя, например, кривые 1, 2 и 5' на рис. 3, можно качественно объяснить ход зависимостей η_1 и η_2 от f . При достаточно высоких частотах ($f > 100$ кГц) уровень сигнальных характеристик совпадает с уровнем

фоновых при всех засветках. С уменьшением f растет доля $U_{\text{ЖК}}/U$, а также значения η_2 и η_1 . Наличие двух максимумов на зависимости $\eta_1(f)$, так же как и на зависимости $\eta_2(U)$ (кривая 1 на рис. 1), объясняется тем, что в этом диапазоне напряжений разность $\delta n = n_T - n_c$ приводит к разности фаз $\delta > 1\pi$. Максимум $\eta_2(f)$ достигается при большей частоте f , чем максимум η_1 , т. е. при меньшей величине $U_{\text{ЖК}}/U$. Это соответствует меньшему напряжению для максимума $\eta_2(U)$ (ср. кривые 1 и 2 на рис. 1). При дальнейшем снижении частоты доля $U_{\text{ЖК}}/U$ растет, но дифракционная эффективность падает, так как при больших напряжениях на слое ЖК уменьшается разность показателей преломления $n_T - n_c$. Увеличение η_1 и η_2 в области частот $f < 100$ Гц связано

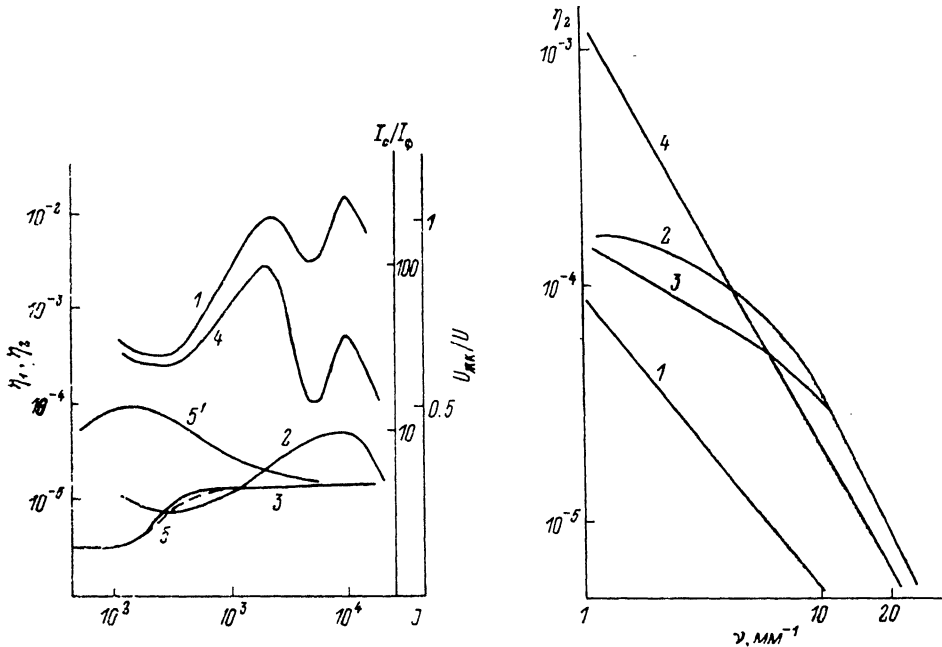


Рис. 3. Зависимость дифракционной эффективности сигнала η_1 (1) и фона η_2 (2, 3), отношения сигнал/фон (4) (масштаб справа), отношения $U_{\text{ЖК}}/U$ (5, 5') (масштаб справа) от частоты напряжения питания f .

1, 2, 4, 5' — $J = 3 \cdot 10^{-3}$ Вт/см²; 3, 5 — 0.

Рис. 4. Пространственные спектры света, рассеянного жидкокристаллическим слоем ПМС при равномерной засветке на входе.

J , Вт/см²: 1, 2 — 0; 3 — 10^{-4} , 4 — $3 \cdot 10^{-3}$; U , В: 1 — 0; 2, 4 — 8, 5; 3 — 15; f , кГц: 2, 4 — 3,8; 3 — 2,4.

с уменьшением доли $U_{\text{ЖК}}/U$ вследствие экранировки полупроводника [10]. При уменьшении внешней засветки J падает максимальная величина зависимостей $\eta_1(f)$ и $\eta_2(f)$, а положение максимума сдвигается в область более низких частот, что полностью согласуется с аналогичными зависимостями $\eta_1, \eta_2(U)$, если принять во внимание частотные зависимости $U_{\text{ЖК}}/U$.

На рис. 4 приведены пространственные спектры фонового рассеяния при различных входных засветках. Светорассеяние недеформированного слоя ЖК незначительно по сравнению со светорассеянием, вызванным пространственными флуктуациями заряда в диэлектрическом зеркале и фотополупроводнике (кривая 1). На высоких пространственных частотах величина светорассеяния практически не зависит от f и описывается соотношением $\eta_2 \sim \nu^{-2}$, что согласуется с выводами [14]. При $\nu \rightarrow 0$ величина η_2 возрастает с увеличением J . Это связано с более глубоким проникновением в объем слоя ЖК силовых линий электрического поля, замыкающихся на дефектах фотополупроводника, при большом числе фотогенерированных зарядов, а также с временными флуктуациями концентрации этих зарядов.

Таким образом, в настоящей работе описана физическая модель шумов жидкокристаллических модуляторов света с монокристаллическими полупро-

водниками, позволяющая выбрать оптимальный по отношению сигнал/фон режим питания ПМС, предложен способ математического описания зависимости дифракционной эффективности ПМС от напряжения питания, дается оценка числа дефектов фотополупроводника по интенсивности рассеянного слоем ЖК света.

В заключение авторы благодарят В. С. Купрейченко за помощь в работе, С. П. Берестнева, А. А. Васильева за полезное обсуждение результатов, Н. Ф. Ковтонюка за конструктивную критику работы.

Список литературы

- [1] *Васильев А. А., Касасент Д., Компанец И. Н., Парфенов А. В.* Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.
- [2] *Думаревский Ю. Д., Ковтонюк Н. Ф., Савин А. И.* Преобразование изображений в структурах полупроводник—диэлектрик. М.: Наука, 1987. 176 с.
- [3] *Владимиров Ф. Л., Моричев И. Е., Плетнева Н. И.* // ОМП. 1984. № 3. С. 54—63.
- [4] *Белая В. В., Анкин С. Н., Иванов С. А. и др.* // Тез. докл. I Всесоюз. конф. «Оптика жидких кристаллов». М., 1987. С. 179.
- [5] *Берестнев С. П., Бондур В. Г., Данилов Ю. И. и др.* // Ряз. 1985. Т. 30. № 6. С. 1212—1216.
- [6] *Новиков А. В.* Тез. докл. I Всесоюзн. конф. «Оптика жидких кристаллов». М., 1987. С. 194.
- [7] *Чигринов В. Г., Гребенкин М. Ф.* // Кристаллография. 1975. Т. 20. № 4. С. 1240—1244.
- [8] *Balzartni D. A., Dupuis D. A., Palffy-Muhoray P.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1984. Vol. 102. P. 35.
- [9] *Welford K. R., Sambles J. R.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1987. Vol. 147. P. 25—42.
- [10] *Ковтонюк Н. Ф.* Электронные элементы на основе структур полупроводник—диэлектрик. М.: Энергия, 1976. 183 с.
- [11] *Осинский В. И.* Интегральная оптоэлектроника. Минск: Наука и техника, 1977. 103 с.
- [12] *Марков А. В., Морозов А. Н.* // ФТП. 1986. Т. 20. Вып. 1. С. 154—156.
- [13] *Fraas L. M., Grinberg J., Vleha W. P., Jacobson A. D.* // J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47. N 2. P. 576—583.
- [14] *Гитина Б., Каретников А. А., Томилин М. Г.* // Тр. ГОИ. 1986. № 194. С. 48—56.

Поступило в Редакцию
19 сентября 1989 г.