

- [4] Куцаенко В. В., Потапов В. Т., Шпилевский Р. В. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 7. С. 1370—1376.
[5] Kuwata J., Onoda M., Uchino K., Nomura S. // Jap. J. Appl. Phys. 1981. Vol. 20. N 8. P. 1608—1610.

Институт радиотехники и электроники АН СССР
Фрязинская часть
Московская область

Поступило в Редакцию
8 января 1990 г.

06; 07

Журнал технической физики, т. 61, в. 3, 1991

© 1991 г.

ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ МОДУЛЯТОРЫ СВЕТА НА ОСНОВЕ ТОНКИХ СЛОЕВ СЕЛЕНИДА ЦИНКА

С. И. Годя, С. А. Данилюк, А. С. Ермаков, И. И. Кузьмина, В. В. Никитин,
А. П. Онохов

Введение

Эффективность систем когерентно-оптической обработки информации в значительной степени определяется характеристиками устройства ввода информации — пространственно-временного модулятора света (ПВМС). Среди различных типов ПВМС модуляторы на основе структуры фотопроводник—жидкий кристалл (ФП—ЖК) выделяются своей компактностью, технологичностью, малым потреблением энергии, высокой чувствительностью [1]. В настоящее время созданы ПВМС, работающие как в проходящем, так и в отраженном свете [2]. В ряде когерентно-оптических схем, например в схемах с твердотельными ОКГ, необходимо применять ПВМС с фотослоями, обладающими высокой прозрачностью для длин волны более 0.5 мкм. В связи с этим представляется перспективным использование в модуляторе света в качестве фотополупроводника тонких слоев и монокристаллов селенида цинка. Существующие типы структур селенид цинка—ЖК [3] по основным параметрам уступают наиболее совершенным жидкокристаллическим ПВМС, созданным на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников и высокоомного арсенида галлия [2, 4]. В силу ряда причин в них не удалось полностью реализовать такие уникальные свойства селенида цинка, как большое темновое удельное сопротивление (10^{12} Ом·см), малую подвижность носителей заряда, а также возможность создания гетеропереходов с другими полупроводниковыми соединениями, в частности ZnTe—CdTe.

При разработке данного типа ПВМС мы исходили из того, что попытки создания универсального ПВМС обычно наталкиваются на принципиальные ограничения, поэтому обычно идут по пути принятия компромиссных решений. Так, стремление достичь высокой разрешающей способности и малого уровня пространственных шумов обуславливает необходимость применения в структуре модулятора света аморфных высокоомных фотополупроводников и его питания постоянным напряжением. Однако значительные постоянные времена таких приборов на практике ограничивают их быстродействие [5].

Высокое быстродействие реализовано в ЖК ПВМС на МДП структурах. В то же время их разрешающая способность и уровень пространственных шумов уступают системам фотополупроводник—ЖК.

Экспериментальные образцы ПВМС

Исследованные образцы представляют собой сэндвич-структуру, слой которой находится между двумя стеклянными подложками диаметром 35 мм с прозрачным проводящим покрытием. Необходимым условием нормальной работы ПВМС такой конструкции является нечувствительность используемого ФП к потоку модулируемого излучения.

В качестве фоточувствительного слоя использовались тонкие (2...4 мкм) слои селенида цинка, изготовленные по специальной методике осаждения в квазивамкнутом объеме, позволяющей получать слои высокой степени однородности по толщине образца. Последнее

Достигалось за счет использования преимуществ метода «горячих» стенок, когда между стенками испарительной камеры и подложкой обеспечивается минимальный градиент температур, а также вследствие значительного удаления источника от подложек и непрерывного их вращения в процессе осаждения слоя. Изменяя температуру источника и подложки и управляя таким образом скоростью нанесения покрытия, нами были установлены оптимальные режимы для получения двух типов фоточувствительных слоев, отличающихся размерами поликристаллов и, как следствие, фотоэлектрическими и оптическими свойствами.

Для улучшения оптической прозрачности и уменьшения рассеяния света в фоточувствительном слое перед осаждением селенида цинка на подложку поверх проводящего покрытия термическим испарением в вакууме наносился тонкий слой алюминия (пропускание около 70 %). Были опробованы два способа осаждения селенида цинка на подложки с алюминиевой прослойкой: предварительное напыление слоя селенида цинка при сравнительно невысокой температуре с последующей термообработкой в вакууме и осаждение слоя при

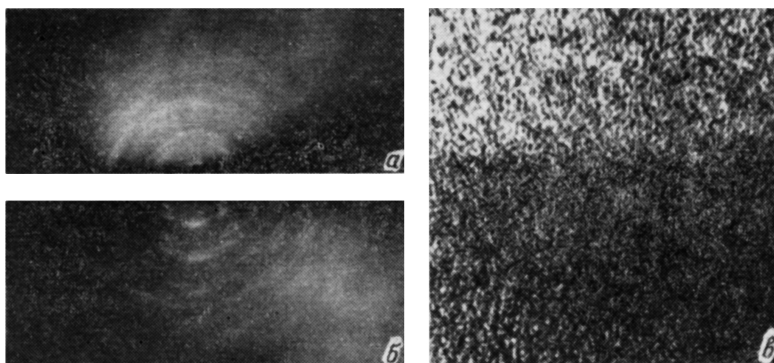


Рис. 1. Микрофотографии и электронограммы слоев селенида цинка, выращенных на аморфном слое ИТО (а), на слое ИТО, покрытом тонким слоем алюминия (б).

более высоких температурах без последующей термообработки. Длительность процесса термообработки зависела от его температуры и толщины слоев. При низких температурах термообработка оказывалась неэффективной. Электронографические исследования показали, что в обоих случаях происходит легирование алюминием слоя селенида цинка, вследствие чего улучшается его кристалличность и увеличивается оптическая прозрачность. Необходимо отметить, что на используемых обычно в качестве проводящих покрытий аморфных слоях ИТО при указанных температурах растут поликристаллические слои фотополупроводника со слабо выраженной текстурой (рис. 1, а). Те же слои, выращенные с использованием прослойки из алюминия, представляют собой хорошо ориентированную текстуру с разориентацией кристаллов порядка 20° (рис. 1, б). На рис. 1, в представлена микрофотография рельефа поверхности слоя селенида цинка с ярко выраженной границей между легированной и нелегированной областями. Следует отметить, что алюминий, по-видимому, также улучшает условия конденсации паров на подложку, особенно в начальной фазе.

Характеристики ПВМС

Определение основных характеристик ПВМС проводилось на экспериментальной установке, в которой запись изображения на модулятор света производилась при помощи диапроектора с установленным в нем светофильтром СЗС-7 ($\lambda = 480$ нм). Источником считывающего излучения служил гелий-неоновый ОКГ ЛГ-79-2 ($\lambda = 633$ нм). Для устранения пространственных микроструктурных неоднородностей лазерного излучения использовался узел пространственной фильтрации, состоявший из микрообъектива АПО 40 и точечной диафрагмы диаметром 50 мкм. В качестве коллимирующей линзы был применен объектив И-51 с фокусным расстоянием 210 мм; аналогичный объектив использовался для переноса изображения с ПВМС на фотокатод телевизионной камеры, используемой для визуализации изображения и определения основных характеристик модулятора света по видеосигналу выделенной строки. Измерения проводились на линейном участке свет-сигнальной характеристики видикона. Для последующей нормировки результатов измерений мощность излучения квантового генератора контролировалась с помощью радиационного элемента РТН-20С.

В ходе исследований на ПВМС записывались изображения телевизионных испытательных таблиц ИТ-72 и 0774 размером 25×19 мм; перенос изображения на фоточувствительный слой телевизионной камеры в зависимости от условий эксперимента осуществлялся как в масштабе 1 : 1, так и с увеличением 5*.

Сенситометрические (модуляционные) характеристики ПВМС определялись по соотношению интенсивностей записываемого света и интенсивности света считываемого изображения в крупной детали (ширина 500 мкм) таблицы 0774. Эти характеристики находятся в сильной зависимости от величины напряжения питания модулятора света. Видно (рис. 2), что уменьшение напряжения питания существенно снижает чувствительность прибора к записываемому излучению, но расширяет его динамический диапазон, что важно для передачи полутонных изображений. При увеличении питающего напряжения с 10 до 30 В чувствитель-

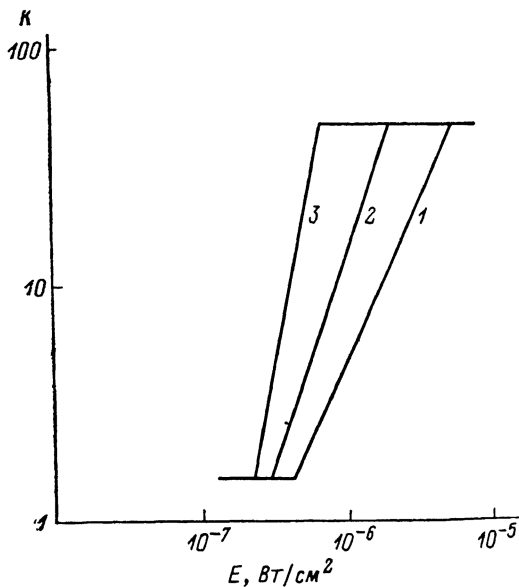


Рис. 2. Кусочно-линейная аппроксимация сенситометрической характеристики ПВМС с фотослоем селенида цинка.

$U_{раб}$, В: 1 — 12, 2 — 20, 3 — 30.

ность ПВМС возрастает примерно на порядок, однако диапазон неискаженной передачи входных освещенностей при этом сокращается примерно в два раза. При напряжении питания 12 В модулятор света хорошо передает градации испытательной таблицы ИТ-72 (рис. 3),

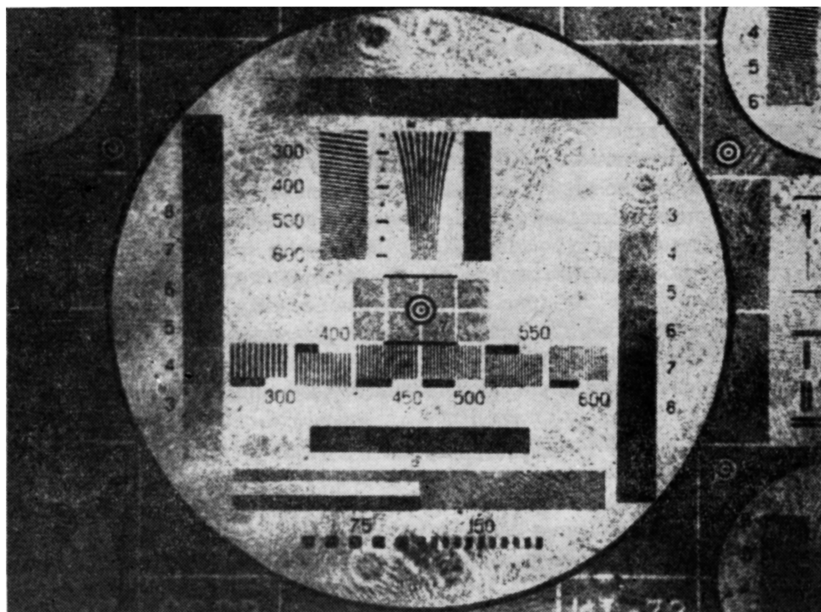


Рис. 3. Изображение испытательной таблицы ИТ-72, записанное на ПВМС, при считывании когерентным светом.

причем высокая однородность его фотоэлектрических и оптических свойств обеспечивает низкий уровень пространственных шумов в выходном изображении.

Максимальный выходной контраст (примерно 40 : 1) достигался при интенсивности регистрируемого излучения $2 \cdot 10^{-6}$ Вт/см²; пороговая чувствительность прибора при контрасте 2 : 1 составляла $5 \cdot 10^{-7}$ Вт/см².

Измерение функции передачи модуляции ПВМС по интенсивности на низких пространственных частотах осуществлялось по проекционной методике; в качестве испытательного сигнала использовались изображения двухштриховых миры максимального контраста испытательной таблицы 0774. Измерялся размах сигнала I_0 от крупной детали шириной 500 мкм на фоточувствительном слое исследуемого образца ПВМС. Размах сигнала I_c принимался равным глубине провала между сигналами от двух штрихов, находящихся на расстоянии друг от друга, равном толщине штриха. Исследования показали, что разрешающая способность ПВМС, оцениваемая по величине спада глубины модуляции интенсивности считываемого света $m_I = I_c/I_0$ до 0.5 от ее первоначального значения, составила примерно 20 мм^{-1} и лимитировалась несовершенством оптической системы записи и считывания изображения (рис. 4, кривая 1). Снижение контраста изображения на фоточувствительном слое ПВМС приводило к пропорциональному уменьшению разрешающей способности прибора (рис. 4, кривые 2 и 3); пороговый входной контраст, эффективно воспроизводимый модулятором

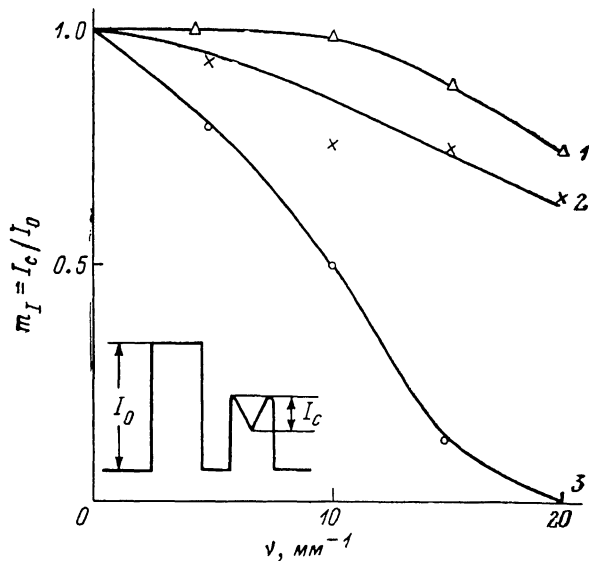


Рис. 4. Функция передачи модуляции ПВМС, работающего на постоянном токе при воспроизведении двухштриховой миры с контрастом 100 (1), 48 (2), 28 % (3).

света для большинства образцов лежал в пределах 17 %—25 %. Разрешающая способность ПВМС, оцениваемая по интерферометрической методике, значительно выше: дифракционная эффективность прибора на частоте 100 мм^{-1} при записи синусоидальной решетки второй гармоникой ИАГ—Nd³⁺ лазера, работающего в режиме модулированной добротности, составила 10 %, а на частоте 1000 мм^{-1} — 0.1 %.

Времена включения ПВМС в зависимости от управляющих напряжений составили 20... 200 мс, времена выключения при питании постоянным напряжением — от 0.5 до нескольких секунд. Использование двухполярного импульсного питания позволило уменьшить времена выключения до 200 мс, а применение межкадровой стирающей засветки белым светом уменьшало время выключения до 100 мс.

Заключение

Разработаны эффективные оптически управляемые жидкокристаллические ПВМС, обладающие высокими параметрами модуляции проходящего света.

Анализ методов улучшения характеристик исследованных ПВМС показывает, что они не исчерпали всех своих возможностей. Инерционность модуляторов света может быть значительно снижена подбором формы импульса питающего напряжения. Дальнейшее повышение быстродействия структуры мы связываем с легированием слоя ZnSe и применением нового класса жидких кристаллов. Имеются также конкретные пути повышения чувствительности ПВМС при оптимизации разработанной методики осаждения тонких слоев фотопроводника в квазизамкнутом объеме.

Отметим в заключение перспективность использования описанных ПВМС в когерентно-оптических схемах спектрального и корреляционного анализа, а также для коррекции волнового фронта в устройствах адаптивной оптики.

Список литературы

- [1] Васильев А. А., Касасент Д., Компанец И. Н., Парфенов А. В. // Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987. 20 с.
- [2] Владимиров Ф. Л., Моричев И. Е., Плетнева Н. И. // ОМП. 1984. № 3. С. 54.

- [3] Кирьяшкина З. И., Названов В. Ф., Елистратов В. А. // Тез. докл. IV Междунар. конф. социалистических стран по жидким кристаллам. Тбилиси, 1981. Т. 2. С. 289.
 [4] Думаревский Ю. Д., Костюк Н. Ф., Савин А. И. Преобразование изображений в структурах полупроводник—диэлектрик. М.: Наука, 1987. 176 с.
 [5] Владимиров Ф. Л., Моричев И. Е., Плетнева Н. И. // ОМП. 1985. № 5. С. 1.

Поступило в Редакцию
6 февраля 1990 г.

03

Журнал технической физики, т. 61, в. 3, 1991

© 1991 г.

ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕВЕРС ДАВЛЕНИЯ ПРИ ЛУЧЕВОМ НАГРЕВЕ ЖИДКОСТИ И ВОЗМОЖНОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ ПРИРОДЫ ЛОКАЛЬНОГО ВЫПУЧИВАНИЯ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ

Ю. В. Саночкин, С. С. Филиппов

Поверхность жидкости под воздействием лазерного луча прогибается, и наблюдается самофокусировка отраженного излучения (термокапиллярное зеркало) [1-3]. При облучении сильно летучей жидкости обнаружено, что рельеф межфазной поверхности может быть немонотонным [4]. На оплавленных коллекторах электронных пучков или местах контакта плазмы с металлической стенкой наблюдается рельеф, характеризующийся наличием выпученных участков в виде пиков [5]. В литературе их связывают с неустойчивостью поверхности жидкого металла в электрическом поле и возбуждением капиллярных волн, хотя нет уверенности, что указанные неустойчивости приведут на нелинейной стадии к образованию описанных поверхностных структур. Можно предположить альтернативный механизм появления пиков на межфазной границе, являющийся следствием нагрева лучевого типа. Покажем, что с увеличением мощности теплового источника поле давлений в жидкости перестраивается и под центром нагрева развивается повышенное локальное давление. Оно обусловлено торможением термокапиллярного течения и приводит в отсутствие внешнего давления к выпучиванию границы.

Перейдем от пространственной задачи к плоской с сечением симметрии $x=0$. Слой жидкости на горизонтальном твердом изотермическом основании $y=-h$ ($T(x, -h)=T_w$) ограничен равновесной динамической границей $y=\zeta(x)$. Ее невозможное статическое положение $y=0$. Достаточно рассмотреть центральную область $x \leq l$, в которой температура границы спадает по параболическому закону $T(x, \zeta) - T_w = \Delta T t_0(x/l)$, где $t_0 = 1 - ax^2$, $\Delta T = T(0, \zeta) - T_w$. Полагая $h \ll l$, исходим из уравнений пограничного слоя и граничных условий. [6]

$$\begin{aligned} u_x + v_y &= 0, & R^*(uu_x + vv_y) &= -(uB)^{-1} p_x + u_y y, & p_y &= -B, \\ u_y &= -T_x, & v &= \zeta' u, & p &= -(1 - \beta t_0) \zeta'', & y &= \zeta; \\ u &= v = 0, & y &= -1; & u &= p_x = 0, & x &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

При обезразмеривании используются длины l, h в качестве единиц измерения x, y и характерные масштабы $u_* = \alpha' \Delta T h / \rho \nu l$, $v_* = h u_* / l$, $p_* = \alpha(T_w) h / l^2$, где $\alpha(T)$ — коэффициент поверхностного натяжения, $\alpha' = -d\alpha/dT$, ν — кинематическая вязкость. В (1) $R^* = (h^2/l^2) u_* l / \nu$ — приведенное число Рейнольдса, $\beta = \alpha' \Delta T / \alpha(T_w)$ — капиллярный параметр, $B = \rho g l^2 / \alpha(T_w)$ — число Бонда, $\mu = \alpha' \Delta T / \rho g h^2$ — термокапиллярный параметр (g — ускорение силы тяжести).

Решение (1) можно построить в замкнутом виде для малых (конечных) деформаций свободной границы. Согласно (1), при $\mu \rightarrow 0$ $p_x \rightarrow 0$, поэтому $p = -By + \mu B$ ($c_0(x) + \mu c_1(x) + \dots$) и, следовательно, $\zeta \sim \mu$. Полагая $\zeta = \mu \zeta_1 + \mu^2 \zeta_2 + \dots$, $u = u_0 + \mu u_1 + \dots$, $v = v_0 + \mu v_1 + \dots$ и разлагая по μ граничные условия, находим, что решение в нулевом приближении имеет вид

$$u_0 = t_0'(x) f'(y), \quad v_0 = -t_0'' f, \quad c_0' = -\gamma t_0', \quad (2)$$

где f — решение краевой задачи

$$f'' + 2\alpha R^*(f'^2 - f f'') + \gamma = 0, \quad f''(0) = -1, \quad f(0) = f(-1) = f'(-1) = 0. \quad (3)$$