

## ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫЕ МОДУЛЯТОРЫ СВЕТА С БОЛЬШИМ ФОТОИНДУЦИРОВАННЫМ ФАЗОВЫМ НАБЕГОМ

© 2011 г. Л. П. Амосова, канд. физ.-мат. наук; М. Н. Волкова

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: l\_amosova@mail.ru

Изготовлены и исследованы оптически управляемые жидкокристаллические пространственные модуляторы света с высокой чувствительностью к записываемому излучению и максимальным фазовым набегом до  $7\pi$ . Этот набег полностью реализуется при управлении пропусканием структур как светом, так и электрическим полем.

**Ключевые слова:** оптически управляемый<sup>1</sup> жидкокристаллический пространственный модулятор света, сенситометрическая характеристика, фазовый набег, аморфный фотопроводник, халькогенидный стеклообразный фотопроводник.

Коды OCIS: 230.3720, 160.3710.

Поступила в редакцию 04.03.2011.

### Введение

Многие экспериментаторы, работающие с оптически управляемыми жидкокристаллическими пространственными модуляторами света (ОУ ЖК ПМС) с чисто фазовой модуляцией, сталкивались с ситуацией, когда полный возможный фазовый набег, который определяется оптической толщиной слоя нематического жидкого кристалла (ЖК), не может быть получен посредством только светового управления при фиксированном напряжении смещения. Тем не менее, практический интерес представляет величина именно фотоиндуцированного, а не электрически индуцированного фазового набег, который можно легко получить, взяв достаточно большую оптическую толщину ( $d\Delta n$ ) ЖК и подав на него соответствующее напряжение. Фотоиндуцированный фазовый набег – это разница между фазовым набегом на освещенных и темных участках рабочего поля модулятора в параллельно ориентированных структурах.

Принципы работы ОУ ЖК ПМС подробно описаны в ранних публикациях по этой тематике [1, 2]. Собственно на молекулы ЖК в любом случае воздействует электрическое поле. Управление светом заключается в перераспределении внешнего управляющего напряжения между слоями фотопроводника (ФП) и ЖК, так

<sup>1</sup> В англоязычной научно-технической литературе используется термин *optical addressed*.

как сопротивление ФП при освещении падает на 2–3 порядка по сравнению с темновым. Может вносить свой вклад и фотоэдс, возникающая при засветке ФП на межфазной границе ФП–ЖК. Оптимальный режим питания зависит от свойств каждой конкретной структуры, однако управляющие напряжения существенно ниже, чем для электроуправляемых ячеек. При подаче на ОУ ЖК ПМС напряжения в несколько десятков вольт молекулы ЖК под действием управляющего электрического поля будут поворачиваться одновременно на светлых и на темных участках рабочего поля и структура будет работать как электроуправляемая.

Поскольку параллельно ориентированные (фазовые) ОУ ЖК ПМС изготавливались главным образом для записи на них динамических голограмм, исследование их оптических характеристик проводилось по голографической методике. Основной модуляционной характеристикой ОУ ЖК ПМС является сенситометрическая кривая, представляющая собой зависимость модулируемого параметра от интенсивности или энергии экспозиции записывающего света [1]. Аналогом этой характеристики при голографическом исследовании является зависимость дифракционной эффективности записываемой синусоидальной решетки от мощности одного из двух интерферирующих записывающих пучков.

Однако в общем случае сенситометрическая кривая для модуляторов с достаточно большой оптической толщиной представляет собой лишь кусочек полной модуляционной кривой, снятый при каком-то фиксированном напряжении питания. Чтобы получить полную картину, приходилось изменять одновременно два параметра – интенсивность записывающего света и напряжение, т. е. снимать семейство сенситометрических кривых (или зависимостей дифракционной эффективности от мощности записи), каждая из которых соответствовала определенному напряжению. При этом изменение дифракционной эффективности на каждой конкретной кривой соответствовало фазовому набегу не более  $3\pi$  на длине волны считывания 814 нм [3, 4]. Увеличение толщины ЖК только усиливало разрыв между фотоиндуцированным фазовым набегом и набегом, создаваемым в этих же структурах внешним напряжением. Была поставлена задача изготовления структуры, в которой весь возможный фазовый набег мог бы быть реализован посредством светового управления.

Хорошо известен вид зависимости пропускания от напряжения, приложенного к структуре при фиксированной мощности записывающего излучения, представляющей собой осциллирующую функцию (рис. 1). При изменении мощности записывающего излучения от вызывающей фототок насыщения в ФП и выше вид зависимости не меняется. С уменьшением мощности записывающего излучения ниже уровня насыщения фототока в ФП экстремумы будут сдвигаться в сторону больших напряжений, не меняя своей амплитуды вплоть до мощности записи, соответствующей чувствительности структуры по максимальному контрасту. Эквивалентная электрическая схема ОУ ЖК ПМС в первом приближении может быть представлена последовательно соединенными сопротивлениями ФП и ЖК, зашунтированными соответствующими емкостями [1, 5]. В наиболее простом случае, при питании ОУ ЖК ПМС постоянным напряжением, эту схему можно свести к двум последовательным сопротивлениям. Тогда напряжение на слое ЖК в стационарном режиме можно записать следующим образом [6]:

$$U_{\text{ЖК}} = \frac{U}{1 + \frac{d_{\text{ФП}}\sigma_{\text{ЖК}}}{d_{\text{ЖК}}\sigma_{\text{ФП}}}}, \quad (1)$$

где  $d_{\text{ФП}}$  и  $d_{\text{ЖК}}$  – толщины слоев ФП и ЖК, а  $\sigma_{\text{ФП}}$  и  $\sigma_{\text{ЖК}}$  – их проводимости. Изменение про-

водимости ФП под действием записывающего излучения обычно описывается степенной зависимостью [7]

$$\sigma_{\text{ФП}} = \sigma_{\text{ФП, темн}} + aI^\alpha, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{ФП, темн}}$  – темновая проводимость ФП,  $I$  – интенсивность записывающего излучения,  $a, \alpha$  – параметры ФП.

В соответствии с (1) и (2) напряжение на слое ЖК будет зависеть от интенсивности записывающего излучения следующим образом:

$$U_{\text{ЖК}}(I) = \frac{U}{1 + p \frac{\sigma_{\text{ЖК}}}{\sigma_{\text{ФП, темн}} + aI^\alpha}}, \quad (3)$$

где  $p = d_{\text{ФП}}/d_{\text{ЖК}}$ .

Чтобы сенситометрическая кривая структуры (зависимость пропускания от мощности записывающего излучения при фиксированном напряжении, соответствующем последнему экстремуму на кривой пропускания на рис. 1) по форме повторяла зависимость пропускания

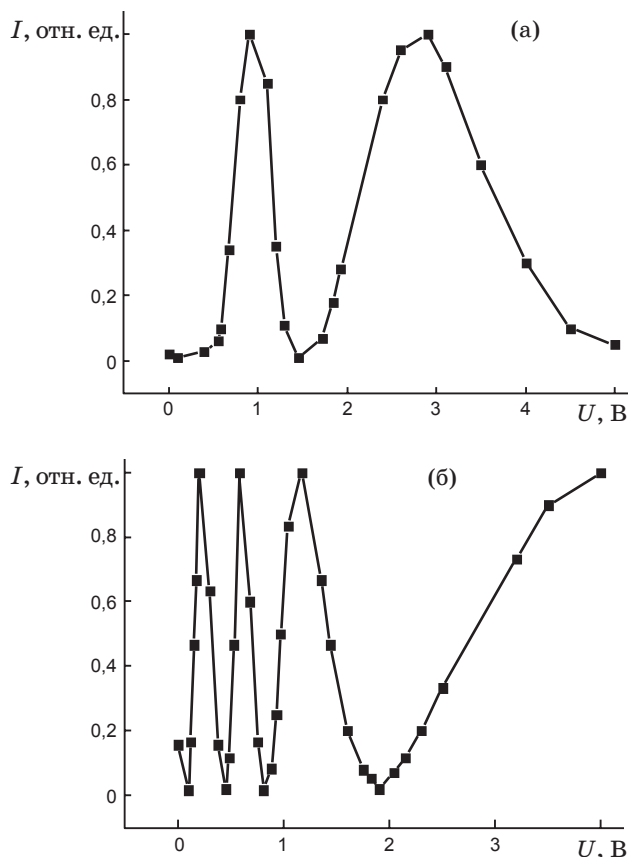


Рис. 1. Зависимость пропускания считывающего излучения от прикладываемого напряжения для модуляторов с толщиной слоя ЖК 13 (а) и 23 мкм (б). Мощность записывающего излучения 80 мкВт/см<sup>2</sup>.

от напряжения, необходимо, чтобы при уменьшении освещенности все “лишнее” напряжение падало на ФП, а при полном выключении засветки на слой ЖК приходилось лишь напряжение, не превышающее порог Фредерикса. Если слои ФП рыхлые и непрочные, ориентировать ЖК можно только косым напылением окисла, что в любом случае обеспечивает достаточно большой начальный угол наклона директора ЖК. Тогда порог Фредерикса отсутствует – ориентация молекул начинает меняться при любом отличном от нуля значении напряжения. В этом случае “порог чувствительности” фактически является порогом чувствительности измерительного прибора. “Чувствительность по максимальному контрасту” соответствует мощности записи, при которой достигается первый максимум сенситометрической кривой. При более низкой мощности ухудшается контрастное отношение записываемого изображения (отношение минимального пропускания к максимальному). Отсюда вытекают основные требования к ФП: очень высокое темновое сопротивление и высокая чувствительность к записываемому излучению (отношение темнового тока к фототоку насыщения должно составлять не менее трех порядков). С другой стороны, слой ЖК должен обладать высокой чувствительностью по напряжению, т. е. его полная переориентация должна наступать при сравнительно небольших напряжениях, при которых сохраняются малый темновой ток и, соответственно, высокая чувствительность ФП. В данной работе мы попытались количественно оценить параметры слоев модуляторов, отвечающих выдвинутым требованиям, и изготовить такие структуры.

## Результаты и обсуждения

Для исследования были изготовлены ОУ ЖК ПМС просветного типа с фотослоем из халькогенидного стеклообразного фотопроводника системы мышьяк – селен  $As_{10}Se_{90}$ , имеющим максимум спектральной чувствительности на длине волны 460 нм [7]. Данный фотопроводник обладает очень высоким удельным сопротивлением, достигающим  $10^{14}$  Ом см, что сочетается с рекордно высокой чувствительностью к излучению записи. Высокой чувствительности модуляторов способствует отсутствие емкостных токов при постоянном питании. В этом случае фототок используется с максимальной эффективностью и вызывает максимальное

приращение напряжения на слое ЖК. Толщина слоя ФП составляла 1 мкм. При этом чувствительность к красному свету у данного ФП на два порядка ниже, чем к синему. Это позволяет все измерения проводить в видимом диапазоне спектра при условии, что мощность считывающего излучения существенно ниже мощности записи. В нашем случае мощность красного считывающего света не превосходила  $10$  мкВт/см<sup>2</sup>. В принципе, небольшое превышение порога чувствительности ФП считывающим излучением не приводит к существенной погрешности. Эта мощность просто будет суммироваться с мощностью записывающего света с поправочным коэффициентом, отражающим спектральную чувствительность ФП. Таким образом, все наши кривые, сохраняя свою форму, будут незначительно сдвигаться по оси абсцисс влево: на рис. 1 – в сторону меньших питающих напряжений, на рис. 2 – в сторону меньших мощностей излучения записи.

Для измерения модуляционных характеристик ОУ ЖК ПМС проекционным методом использовалась стандартная оптическая схема, включающая в себя источники и приемники записывающего и считывающего излучения, селективное полупрозрачное диэлектрическое зеркало для разделения записывающего и считывающего лучей, поляризаторы, источник питания модулятора. Модуляторы с халькогенидными фотослоями питались постоянным напряжением, что упрощало процедуру измерения, позволяя использовать для контроля слабого прошедшего сигнала селективное усиление. Для этого считывающий сигнал модулировался механическим прерывателем с заданной частотой и регистрировался фотоэлектронным умножителем, на выходе которого стоял селективный вольтметр, настроенный на данную частоту. В качестве источника записывающего излучения использовалась лампа накаливания, снабженная конденсором и синим фильтром СС-8. Накал лампы в процессе измерений изменялся, а мощность записывающего излучения контролировалась. Диаметр пятна записывающего излучения составлял 2 см. Считывание проводилось полупроводниковым красным лазером ( $\lambda = 0,65$  мкм, диаметр пятна 2 мм), излучение которого ослаблялось до нужного уровня нейтральными фильтрами. Стенд находился в темной комнате, а исследуемый модулятор дополнительно помещался в светозащитный кожух.

Были изготовлены и исследованы модуляторы с толщиной ЖК-слоя 13 и 23 мкм. Использовался ЖК 1282, обладающий сравнительно небольшим коэффициентом двулучепреломления ( $\Delta n = 1,7$ ), но надежно ориентирующийся методом косоугольного напыления окислов. Начальные углы наклона директора оценивались методом, описанным в [8], и составляли около  $40^\circ$ . Несмотря на большие начальные углы наклона директора, чувствительность модуляторов по напряжению была довольно высокой из-за слабого сцепления ЖК с ориентирующим слоем. Последнее в нашем случае очень важно, поскольку не существует таких ФП, в которых увеличение напряжения не приводило бы к росту темнового тока ФП и, соответственно, к потере чувствительности. Желательно, чтобы полная переориентация ЖК наступала при как можно более низких напряжениях. При этом падение напряжения на слое ЖК при полной засветке должно составлять не менее 90% от полного напряжения, прикладываемого к структуре. Для халькогенидов это условие выполняется, если учесть, что толщина слоя ЖК в 10–20 раз превышает толщину ФП, а удельное сопротивление используемого нами ЖК находится в пределах  $10^{10}$ – $10^{11}$  Ом см.

На рис. 1 представлены зависимости относительного пропускания модуляторами считывающего света от напряжения при фиксированной мощности записывающего излучения, заведомо обеспечивающей фототок насыщения в ФП. В этом случае большая часть прикладываемого напряжения падает на слое ЖК и модулятор ведет себя как электроуправляемая ячейка. Интенсивность света  $I$ , прошедшего через модулятор, расположенный между поляризатором и скрещенным с ним анализатором, зависит от фазовой задержки  $\Delta\Phi$  и угла  $\beta$  между вектором поляризации падающего луча и исходным направлением директора ЖК [9] и может быть выражена как

$$I = I_0 \sin^2 2\beta \sin^2(\Delta\Phi/2), \quad (4)$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего излучения. Максимальное пропускание излучения, падающего нормально к плоскости ЖК-ячейки, можно получить, когда угол между вектором поляризации падающего луча и исходным направлением директора ЖК согласно формуле (4) соответствует  $\beta = 45^\circ$ . При подаче на электроды ЖК-ячейки напряжения происходит переориентация молекулярных диполей в

электрическом поле. Угол наклона директора  $\theta(U, z)$  относительно нормали к поверхности подложки уменьшается с ростом напряжения. Это приводит к изменению двулучепреломления от максимального значения для S-эффекта в отсутствие электрического поля до минимума в результате переориентации молекул нормально относительно поверхности подложки. Зависимости пропускания от напряжения для ЖК-ячеек представляют собой осциллирующие кривые с постоянной амплитудой колебания, где разность фаз между соседними максимумом и минимумом составляет  $\pi$ .

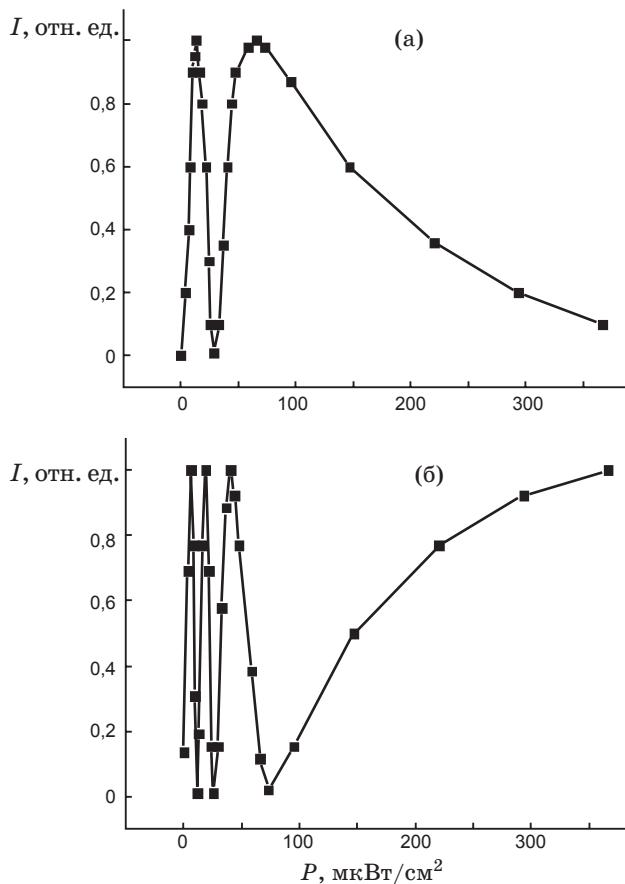
Разность фаз  $\Delta\Phi$  для монохроматического света с длиной волны  $\lambda$  связана с изменением показателя преломления соотношением [9]

$$\Delta\Phi = 2\pi d \Delta n / \lambda. \quad (5)$$

В (5) текущее значение разности показателей преломления необыкновенного и обыкновенного лучей  $\Delta n = n(z) - n_0$  зависит от напряжения через изменение угла наклона директора. С увеличением напряжения наблюдается замедленное уменьшение эффективного значения коэффициента  $n(z)$ , в пределе стремящегося к  $n_0$ . Последние осцилляции пропускания сильно растянуты вдоль оси напряжений, поскольку силы сцепления молекул ЖК с ориентирующим слоем превосходят силы их сцепления друг с другом. Кроме того, при повороте диполей рычаг воздействия электрического поля уменьшается. Поэтому условно принято считать положением последнего максимума напряжение, при котором пропускание достигает 90% максимального значения.

Представленные на рис. 1 зависимости снижались при положительной полярности напряжения питания на ФП. При перемене полярности сразу начинается рост пропускания, т. е. начальный участок зависимости отсутствует и график начинается с третьей точки. Реально минимум пропускания наблюдается в отсутствие засветки и напряжения (вторая точка – это фактический ноль на ЖК, соответствующий минимуму пропускания). Первый минимум пропускания может наблюдаться или не наблюдаться в зависимости от полярности прикладываемого напряжения. Таким образом, можно оценить величину фотоэдс – она составляет около 0,1 В. Тот факт, что фотоэдс возникает на границе раздела ФП – ЖК и приложена только к слою ЖК, а внешнее напряжение прикладывается ко всей структуре в целом, не вносит значительной погрешности,





**Рис. 2.** Зависимость пропускания считывающего излучения от мощности записывающего излучения для модуляторов. а – толщина ЖК 13 мкм,  $U = 4,5$  В; б – толщина ЖК 23 мкм,  $U = 3,5$  В.

потому что при полной засветке свыше 95% напряжения падает на слое ЖК. Данное утверждение следует из анализа сенситометрических кривых, изображенных на рис. 2.

Напряжения питания, при которых снимались кривые, изображенные на рис. 2, близки к последним экстремумам пропускания на кривых на рис. 1 и составляют 3,5 и 4,5 В для толщин ЖК 23 и 13 мкм соответственно. То, что в отсутствие засветки не всегда наблюдается минимум пропускания, связано с падением части напряжения на ЖК: темновое сопротивление ФП не бесконечно. По начальному пропусканию в отсутствие засветки можно оценить отношение сопротивлений слоев ЖК и неосвещенного ФП. Для ЖК-слоя толщиной 23 мкм начальное пропускание 13% от максимального наблюдается, когда на ЖК приходится напряжение порядка 0,11 В, что в 30 раз меньше всего напряжения, приложенного к структуре (3,5 В). С учетом разницы толщин слоев ЖК и ФП отношение их удельных сопро-

тивлений будет около 1:700 (3). Что касается тонкого модулятора, то пропускание в отсутствие засветки имеет минимум. Это значит, что приходящаяся на ЖК доля внешнего приложенного напряжения (4,5 В) приблизительно равна фотоэдс, т. е. чуть менее 0,1 В. Таким образом, напряжения на ФП и ЖК различаются примерно в 50 раз, что с учетом толщины слоев опять дает отношение удельных проводимостей, близкое к 1:700.

По предварительным оценкам с использованием пленочных поляризаторов исследованные структуры обладали контрастом не хуже, чем 100:1, что является вполне удовлетворительным результатом для параллельно ориентированных оптически управляемых модуляторов. Контрастное отношение было одинаковым для сенситометрической зависимости и для зависимости пропускания от напряжения.

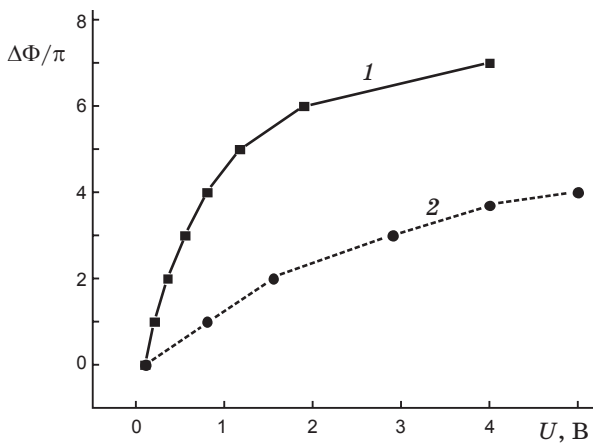
Что касается зависимости параметров модуляторов от толщины слоев ЖК, то, помимо прямой пропорциональности фазового набегу геометрической толщине (5), следует отметить следующие особенности:

1) положения первых минимумов на зависимостях пропускания от напряжения (рис. 1) для структур с одинаковыми ФП совпадают, так как величина фотоэдс не зависит от толщины слоя ЖК;

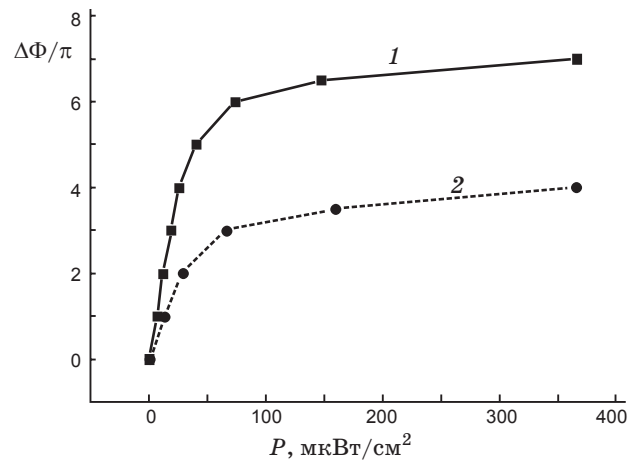
2) при подаче близкого по значению напряжения в отсутствие засветки структуры с более тонкими слоями ЖК демонстрируют меньшее пропускание, поскольку на них приходится меньшая доля внешнего напряжения (рис. 2);

3) напряжения, при которых в исследованных структурах достигается последний экстремум, не зависят от толщины ЖК-слоя, при этом положения экстремумов более низких порядков для тонких ячеек сдвинуты в сторону больших напряжений (рис. 1) либо мощностей записывающего излучения (рис. 2) и кривые пропускания оказываются растянутыми вдоль оси абсцисс.

Кривые зависимости фазового набегу от напряжения и засветки (рис. 3 и 4) для модуляторов с различной толщиной слоя ЖК наглядно демонстрируют зависимость чувствительности структур от толщины. Чем толще слой, тем на меньший угол нужно повернуть молекулы ЖК, чтобы получить тот же самый фазовый набег, тем меньшее электрическое поле или засветка для этого требуются. Таким образом, чувствительность по максимальному контрасту, соответствующая фиксированному фазовому набегу



**Рис. 3.** Зависимость фазового набега от напряжения питания модуляторов при интенсивности засветки, вызывающей ток насыщения. 1 – толщина ЖК 23 мкм; 2 – толщина ЖК 13 мкм.



**Рис. 4.** Зависимость фазового набега от мощности записывающего излучения. 1 – толщина ЖК 23 мкм,  $U = 3,5$  В; 2 – толщина ЖК 13 мкм,  $U = 4,5$  В.

гу  $\pi$ , у толстых ячеек выше, чем у тонких: она составляет 6,6 и 13,2 мкВт/см<sup>2</sup> для структур с толщиной слоя ЖК, равной 23 и 13 мкм соответственно.

Что касается пороговой чувствительности к записываемому излучению, она определяется главным образом свойствами ФП-слоя и межфазной границы ФП-ЖК и от толщины ЖК практически не зависит. Пороговая чувствительность обеих структур составляла около 1 мкВт/см<sup>2</sup>.

### Заключение

Проведенные исследования доказывают принципиальную возможность изготовления ОУ ЖК ПМС с фотоиндуцированным фазовым набегом  $7\pi$  и более. Вопрос заключается в подборе фотопроводника с достаточными темновым сопротивлением и чувствительностью к записываемому излучению. Изготовленные нами модуляторы имели фоточувствительные слои из селенида мышьяка. Свойства этого материала делают его удобным для лабораторных исследований, но в силу малой механической прочности и высокой инерционности он не получил практического применения. С другой стороны, существуют технологии, позволяющие получать не только низкоомный аморфный гидрогенизированный кремний, широко используемый для солнечных батарей, но и очень высокоомные (вплоть до  $10^{15}$  Ом см) аморфные гидрогенизированные кремний и карбид кремния, выгодно отличающиеся от халькогенидов большей механической прочно-

\* \* \* \* \*

стью и бóльшим быстродействием, позволяющим работать на переменном напряжении. Поскольку под переменным напряжением здесь подразумевается низкочастотный меандр, то емкостное сопротивление структур с такими фотослоями должно оставаться достаточно большим. Что касается чувствительности, аморфные полупроводники IV группы обладают еще и тем преимуществом перед халькогенидами, что имеют достаточно чистую запрещенную зону, допускающую легирование и, соответственно, создание фотодиодных структур, чувствительность которых всегда выше по сравнению с чувствительностью фотосопротивления.

Кроме того, на практике обычно не ставится задача реализации непременно всего потенциала какой-то конкретной структуры. Если требуется получить с помощью светового управления фазовый сдвиг  $7\pi$ , вполне возможно изготовить структуру с максимальным  $\Delta\Phi = 9\pi$  и выбрать рабочую точку таким образом, чтобы отбросить два последних экстремума. Это даст существенный выигрыш и по чувствительности, и по рабочему напряжению. Чтобы избежать сильного увеличения инерционности при увеличении геометрической толщины слоя ЖК, можно увеличить  $\Delta\Phi$  за счет использования кристалла с бóльшим  $\Delta n$  и ориентирующего слоя, обеспечивающего малый начальный угол наклона директора. Это может явиться предметом дальнейших исследований после того, как будет решена основная задача выбора параметров ФП-слоя будущего модулятора.

Работа выполнена при финансовой поддержке РПН 2.1.1/2166.

1. *Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.Н., Парфенов А.В.* Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.
2. *Владимиров Ф.Л., Моричев И.Е., Плетнева Н.И.* Влияние параметров элементов на основные характеристики оптически управляемых транспарантов типа фотопроводник–жидкий кристалл // ОМП. 1985. № 5. С. 1–3.
3. *Berenberg V.A., Venediktov V.Yu., Ivanova N.L., Isaev M.V., Konshina E.A., Onokhov A.P., Fedorov M.A., Chaika A.N., Feoktistov N.A.* Large-aperture optically addressed spatial light modulator development // Proc. SPIE. 2005. V. 5777. P. 711–715.
4. *Амосова Л.П., Чайка А.Н.* Оптически управляемая структура  $As_{10}Se_{90}$ –жидкий кристалл с высокой чувствительностью к излучению гелий-неонового лазера // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 6. С. 56–62.
5. *Каманина Н.В.* Применение операционного метода Лапласа к оценке быстродействия пространственно-временных модуляторов света // ЖТФ. 1994. Т. 64. № 1. С. 146–151.
6. *Владимиров Ф.Л., Чайка А.Н., Моричев И.Е., Плетнева Н.И., Наумов А.Ф., Локтев М.Ю.* Исследование модуляционных характеристик оптически управляемых транспарантов на основе структуры фотопроводник–жидкий кристалл // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 8. С. 14–19.
7. *Владимиров Ф.Л., Моричев И.Е., Плетнева Н.И., Решетникова Т.О.* Фотоэлектрические характеристики халькогенидного стеклообразного полупроводника  $As_{10}Se_{90}$  // ОМП. 1985. № 6. С. 6–7.
8. *Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П.* Определение угла наклона директора и фазовой задержки характеристик жидкокристаллических ячеек оптическими методами // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 12. С. 9–13.
9. *Blinov L.M., Chigrinov V.G.* Electrooptic effects in liquid crystal materials. New York: Springer, 1994. 464 p.