

06;07;11

Влияние ориентирующей поверхности на характеристики оптически управляемых жидкокристаллических модуляторов

© Л.П. Амосова, А.Н. Чайка

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
197101 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: l_amosova@mail.ru; chaika@rbcm.ru

(Поступило в Редакцию 18 февраля 2010 г.)

Исследованы два оптически управляемых жидкокристаллических модулятора просветного типа на основе нематического жидкого кристалла и фотопроводника $a\text{-Si}:\text{C}:\text{H}$, отличающиеся начальным углом наклона директора ЖК и высотой барьера на границах раздела фаз. Показано влияние этих параметров на зависимость дифракционной эффективности (ДЭ) от режима питания, частоты записывающих импульсов и пространственной частоты записываемой решетки. Модуляторы обладали пространственным разрешением 75 nm^{-1} по полураспаду ДЭ. Высокая максимальная ДЭ, равная 69%, была получена благодаря формированию асимметричного профиля решетки при большом начальном угле наклона директора ЖК.

Введение

Оптически управляемые жидкокристаллические пространственные модуляторы света (ЖК ПМС) на основе структуры фотопроводник (ФП) — жидкий кристалл (ЖК) предназначены для преобразования излучения по спектру, когерентности и мощности. К наиболее важным параметрам этих устройств, определяющим их пригодность для использования в когерентно-оптических процессорах, адаптивной оптике и динамической голографии относятся чувствительность к записываемому свету, быстродействие, пространственное разрешение, а в случае голографической записи — и дифракционная эффективность.

Высокая ДЭ была получена на структурах с относительно хорошим пространственным разрешением, в которых блокировано растекание заряда в поперечном направлении на границе раздела ФП–ЖК [1,2]. Этот эффект может быть достигнут при использовании высокоомных ФП-слоев с собственным типом проводимости, обладающих темновым сопротивлением не менее $10^{13}\ \Omega\text{cm}$ (например, селенида мышьяка), или ФП, у которых на границе раздела сред образуются вакантные энергетические состояния (ловушки) с большим временем жизни, как в стибните [3,4], а также $p-i-n$ -структур, обладающих необходимым сопротивлением при обратном смещении, как в случае аморфного гидrogenизированного карбида кремния ($a\text{-Si}:\text{C}:\text{H}$) [1].

Существенному повышению дифракционной эффективности ЖК ПМС просветного типа способствует формирование в модулирующем ЖК-слое голографической решетки с асимметричным профилем штриха, отличающимся от исходного симметричного профиля интенсивности для световой решетки, поступающей на фоточувствительный слой модулятора [1]. При толщине модулирующих слоев порядка $10\ \mu\text{m}$, длине волны считывающего пучка менее $1\ \mu\text{m}$ и пространственных частот

тах записываемых решеток несколько десятков линий на миллиметр еще довольно далеко от случая брэгговской дифракции на решетке в модулирующем ЖК-слое [5]. Благодаря существенной асимметрии порядков дифракции считывающего светового пучка удалось получить в одном из первых порядков дифракции значения ДЭ до 50–56% [1,6]. Нелинейный режим реверсивной записи голограмм на таких структурах представлял интерес для устройств адаптивной оптики [7], а также для реализации нелинейных алгоритмов в голографических корреляционных системах [8].

Высокое пространственное разрешение, соответствующее 75 nm^{-1} по уровню 0.5 спада ДЭ, достигающей в максимуме 50% на частоте 32 nm^{-1} , было получено у ЖК ПМС на основе $a\text{-Si}:\text{C}:\text{H}$ в режиме питания прямоугольными биполярными симметричными импульсами напряжения [8,9], что превышает разрешение модуляторов с высокой ДЭ на основе $p-i-n$ -структур при питании прямоугольными однополярными импульсами. Как высокая ДЭ, так и наблюдаемое в [9,10] сравнительно высокое пространственное разрешение модулятора связаны с формированием несимметричного профиля штриха решетки.

В настоящей работе проводится сравнение голографических характеристик двух оптически управляемых модуляторов просветного типа на основе фотопроводника $a\text{-Si}:\text{C}:\text{H}$ с собственным типом проводимости и нематического жидкого кристалла, различающихся наличием в одном из модуляторов двух тонких слоев аморфного углерода. Введение этих дополнительных слоев позволило сгладить рельеф GeO и привело к уменьшению начального угла наклона директора ЖК, что вызвало увеличение эффективного двулучепреломления. Помимо этого, введение высокоомных слоев аморфного углерода привело к увеличению высоты потенциальных барьеров на межфазных границах.

1. Особенности конструкции и принципы работы модуляторов

Оптически управляемый ЖК модулятор света представляет собой плоскую ячейку, состоящую из двух параллельных подложек, на одну из которых последовательно нанесены слой прозрачного проводящего электрода на основе окислов индия и олова (indium tin oxide — ИТО), слой ФП и ориентирующий слой. На противоположной подложке, ограничивающей слой ЖК, присутствуют только ориентирующий и ИТО слои.

Фоточувствительный слой $a\text{-Si}:\text{C}:\text{H}$ с собственным типом проводимости толщиной $1,8\ \mu\text{m}$ получали методом химического осаждения в ВЧ-разряде. При напряжении до $8\ \text{V}$ темновое сопротивление слоя было порядка $10^{12}\ \Omega\text{cm}$, а отношение фототока к темновому току составляло 10^3 .

В качестве модулирующей среды был использован ЖК-1001 (НИОПИК) с оптической анизотропией $\Delta n = 0,26$ на длине волны $0,63\ \mu\text{m}$ [11] и толщиной слоя ЖК около $13,6\ \mu\text{m}$. В ПМС-1 слой ЖК ориентировали с помощью монооксида германия (GeO), которую осаждали напылением под скользящим углом (5°) к поверхности подложек. Такой слой обеспечивал начальную ориентацию директора ЖК под углом 46° . В ПМС-2 на поверхность монооксида германия осаждали тонкий слой аморфного гидrogenизированного углерода ($a\text{-C}:\text{H}$), что привело к уменьшению начального угла наклона директора ЖК до 30° . Слой $a\text{-C}:\text{H}$ получали методом химического осаждения паров ацетона в плазме тлеющего разряда на постоянном токе на поверхность слоя GeO [12]. Начальные углы наклона измерялись в электроуправляемом режиме по методике, описанной в [13].

В основе работы оптически управляемого ПМС лежит следующий механизм. Записывающий свет создает в слое ФП пространственное распределение фотогенерированных свободных носителей заряда, которое формирует рельеф сопротивления структуры, соответствующий входному изображению. На освещенных участках сопротивление слоя фотопроводника уменьшается, что приводит к повышению напряжения, приложенного к слою ЖК. В жидком кристалле при приложении напряжения выше порогового происходит переориентация молекул с изменением угла наклона директора θ относительно плоскости подложки. Это приводит к изменению показателя преломления необыкновенного луча в ЖК. С увеличением напряжения, приложенного к слою ЖК, коэффициент преломления для обыкновенного луча остается неизменным, а для необыкновенного луча уменьшается, в результате чего двулучепреломление, наблюдаемое по изменению фазы светового потока, распространяющегося перпендикулярно слою, изменяется. Обычно поляризация считывающего луча выбирается таким образом, чтобы интенсивность обыкновенного луча равнялась нулю.

2. Методы исследования характеристик ЖК ПМС

Исследования ЖК ПМС проводились на голографическом стенде в режиме реверсивной записи голограмм, описанном в [1]. Физическая (без учета потерь в элементах структуры) дифракционная эффективность η_n определялась как отношение максимальной во времени интенсивности излучения в n -м порядке дифракции I_n к интенсивности излучения I_0 , прошедшего через исследуемую структуру в отсутствие световой решетки на входе. Измерение величины ДЭ решеток проводилось при вариации пространственной частоты формируемой решетки и параметров управляющего напряжения. Особенностью метода является возможность измерения ДЭ в $+1$ - и -1 -м порядках дифракции (η_{+1} и η_{-1}), что позволило исследовать режим голографической записи с несимметричным профилем штриха, приводящий к асимметрии смежных порядков дифракции.

В случае реверсивной записи голограмм при увеличении частоты перезаписи процесс релаксационного стирания предыдущей голограммы не успевает реализоваться полностью и сохраняется некоторая остаточная ДЭ (η_{\min}), при этом величина предельной ДЭ (η_{\max}), реализуемой в цикле записи, может снижаться.

Формальная оценка времени цикла при работе в частотном режиме реверсивной записи голограмм как суммы времени включения и выключения дает завышенные значения, так как при этом игнорируются процессы неполного стирания в модулирующих структурах. Поэтому при определении быстродействия исследуемых ЖК ПМС в режимах реверсивной записи голограмм применяли методику, основанную на записи последовательности голограмм плоских волн с синхронной модуляцией во времени интенсивности опорного и объектного пучков. При изменении частоты модуляции производилась оценка величин η_{\min} и η_{\max} , что позволило судить о скорости процессов формирования и разрушения голограмм в структурах.

В результате проведенных исследований ЖК ПМС были получены: зависимости величины максимальной ДЭ от величины питающего напряжения U (рис. 1), позволяющие определить предельное ее значение; зависимости максимальной за период дифракционной эффективности η от пространственной частоты ν записываемой голографической решетки (рис. 2), характеризующие разрешение; зависимости коэффициента асимметрии $K = \eta_{+1}/\eta_{-1}$ от пространственной частоты регистрируемой решетки (рис. 3); зависимости максимальной дифракционной эффективности и отношения ДЭ остаточной решетки к максимальной ДЭ, достигаемой в цикле записи, от периода следования импульсов записи, характеризующие быстродействие устройств (рис. 4 и 5).

Управление модуляторов осуществлялось биполярными симметричными прямоугольными импульсами напряжения. Отношение периода следования импульсов

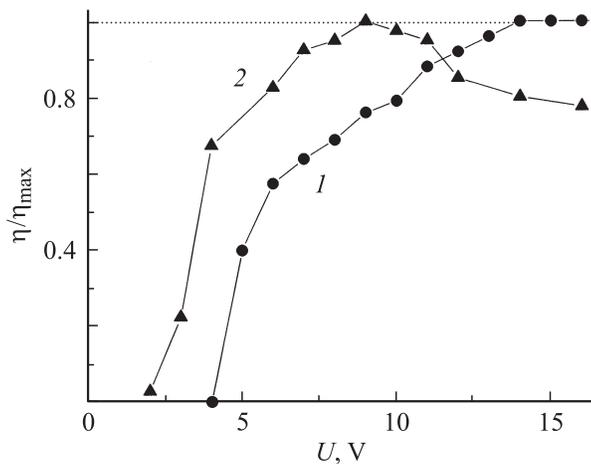


Рис. 1. Нормированные зависимости величины дифракционной эффективности в +1-м порядке дифракции от величины питающего напряжения для ПМС-1 с ориентирующим слоем GeO (1) и ПМС-2 с двойным ориентирующим слоем GeO/a-C:H (2).

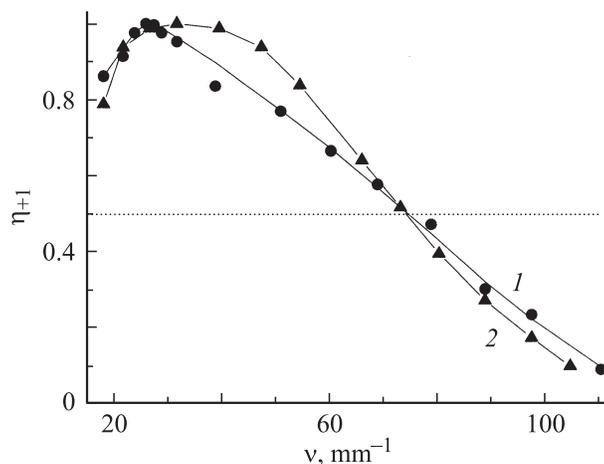


Рис. 2. Нормированные зависимости величины дифракционной эффективности в +1-м порядке дифракции от пространственной частоты записываемых решеток для ПМС-1 (1) и ПМС-2 (2).

питания T к их продолжительности τ было равно двум (меандр). Интенсивности интерферирующих пучков He-Ne-лазера были равны и модулировались синхронно с импульсами питающего напряжения, длительность и период следования световых импульсов совпадали соответственно с T и τ . В первом полупериоде цикла происходит запись голограммы, а во втором полупериоде в структуре протекают процессы, связанные с разрушением записанной голограммы. Направление поляризации считывающего пучка совпадает с ориентацией директора ЖК, что позволяет получать только фазовую модуляцию проходящего считывающего пучка. Угол считывания был постоянный и составлял 18° .

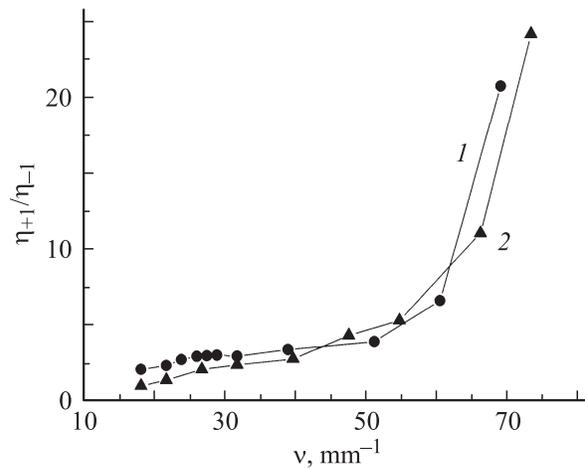


Рис. 3. Зависимости коэффициента асимметрии $K = \eta_{+1}/\eta_{-1}$ от пространственной частоты регистрируемой решетки для ПМС-1 (1) и ПМС-2 (2).

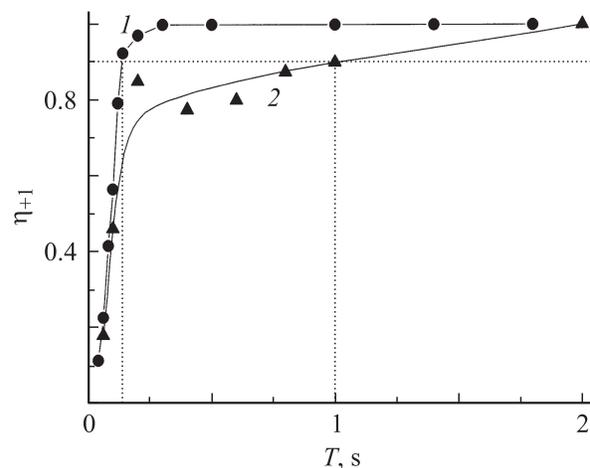


Рис. 4. Нормированные зависимости величин дифракционной эффективности в +1-м порядке дифракции от периода следования импульсов для ПМС-1 (1) и ПМС-2 (2).

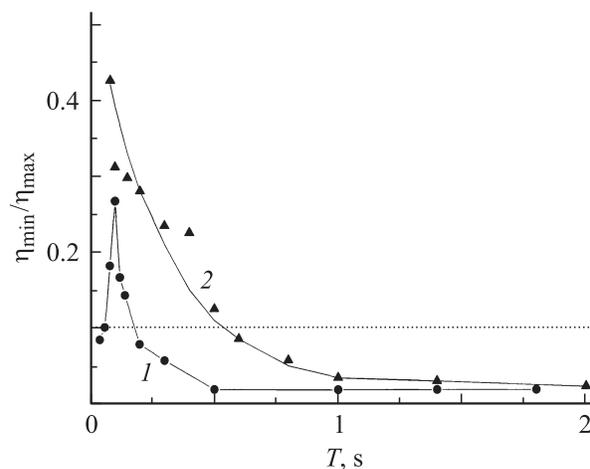


Рис. 5. Зависимости отношения величины ДЭ остаточной решетки к величине ДЭ формируемой основной решетки от периода следования импульсов для ПМС-1 (1) и ПМС-2 (2).

3. Результаты сравнительного исследования структур

Выбор оптимального режима питания ЖК ПМС про-изводился на основании зависимости ДЭ от питающего напряжения. Нормированные зависимости ДЭ в +1-м порядке дифракции для двух исследуемых образцов от величины питающего напряжения приведены на рис. 1. Измерения проводились в диапазоне изменения напряжения U от 0 до 16 В, период следования импульсов питания и синхронизированных с ними световых импульсов в плечах интерферометра составлял $T = 1$ с. Видно, что решетка в ЖК-слое образца с двойным ориентирующим слоем GeO/a-C : H начинает формироваться при более низких напряжениях (кривая 2 для ПМС-2), в то время как решетку в структуре с ориентирующим слоем GeO (кривая 1 для ПМС-1) удавалось регистрировать только начиная с $U = 4$ В.

Максимумы $\eta_{\max}(U)$ также сдвинуты относительно друг друга по оси напряжений. Максимальная величина ДЭ для образца с двойным ориентирующим слоем GeO/a-C : H достигается при более низком напряжении $U = 9$ В (± 4.5 В), чем для ПМС-1, для которого потребовалось увеличение напряжения питания структуры до $U = 14$ В (± 7 В) для выхода дифракционной эффективности на насыщение. Именно эти величины напряжений питания и были выбраны при получении кривых разрешения исследуемых модуляторов.

Разрешение ЖК ПМС оценивалось по зависимости ДЭ от пространственной частоты решетки. Экспериментальные кривые зависимостей величин ДЭ в +1-м порядке дифракции для ПМС с ориентирующим слоем GeO (кривая 1) и с двойным ориентирующим слоем GeO/a-C : H (кривая 2) от пространственной частоты записываемых голографических решеток приведены на рис. 2. Нормированные кривые близки друг к другу, но они существенно отличаются максимальной величиной ДЭ — для образца с ориентирующим слоем GeO зависимость ДЭ в +1-м порядке достигает максимума, соответствующего 69%, при $\nu = 26$ мм⁻¹ (чувствительность модулятора к записываемому свету при этом составила 28 мВт/см²), в то время как для образца с двойным ориентирующим слоем GeO/a-C : H максимум ДЭ составил 50.5% при $\nu = 32$ мм⁻¹ (чувствительность модулятора соответственно была 5 мВт/см²). Столь высокие значения дифракционной эффективности объясняются тем, что на оптически управляемой структуре фоточувствительный слой—ЖК реализуется режим голографической записи с несимметричным профилем штриха. В работе [1] был введен коэффициент асимметрии как отношение величин дифракционной эффективности в смежных порядках $K = \eta_{+1}/\eta_{-1}$.

Интересны экспериментально полученные зависимости K от пространственной частоты регистрируемой решетки (рис. 3). Видно, что эти кривые также близки друг к другу. На начальном участке пространственных частот до 50 мм⁻¹ происходит равномерный, но сравнитель-

но незначительный рост коэффициента асимметрии — приблизительно в 4.5 раза. Затем начинается участок резко возрастающего роста коэффициента (более чем в 20 раз) за счет падения ДЭ в -1-м порядке, что говорит о сильном возрастании асимметрии в распределении фазы промодулированного считывающего пучка в выходной плоскости ЖК ПМС.

О разрешении ЖК ПМС можно судить по пространственной частоте, соответствующей половине максимального значения ДЭ (рис. 2). Спад ДЭ до уровня $0.5\eta_{+1\max}$ наблюдается для каждого из двух исследованных модуляторов на пространственной частоте 75 мм⁻¹, и это является рекордным разрешением для класса ЖК ПМС с высокой дифракционной эффективностью, получаемой за счет возникающей в структурах асимметрии. Это связано с тем, что перераспределение падающего на структуру считывающего светового потока между двумя смежными порядками (рис. 3) приводит, по сравнению со случаем симметричного штриха, к относительно высокому подъему величины ДЭ в +1-м порядке дифракции и смещению кривой разрешения в область более высоких пространственных частот.

Быстродействие модуляторов исследовалось в режиме реверсивной перезаписи. Сравнимые модуляторы существенно различались скоростью формирования решетки в течение периода записи. Нормированные зависимости наибольшей за период величины ДЭ η_{\max} от периода следования импульсов T , приведенные на рис. 4, позволяют сравнить динамические возможности ПМС-1 с ориентирующим слоем GeO (кривая 1) и ПМС-2 с двойным ориентирующим слоем GeO/a-C : H (кривая 2). Если для первой структуры величина ДЭ формируемой решетки выходит на уровень $0.9\eta_{\max}$ при $T = 0.14$ с, то для второй структуры с двойным ориентирующим слоем, являющейся, как видно из этих графиков, более инерционной, уровень $0.9\eta_{\max}$ достигается только при $T = 1$ с.

Другой важной особенностью динамики реверсивного режима работы ЖК ПМС является появление остаточной решетки при увеличении частоты перезаписи голограмм — записанная решетка к концу второго полупериода цикла не успевает полностью разрушиться. Для регистрации остаточной решетки в эксперименте использовалась следующая методика: световые импульсы записи подавались не на каждый импульс питающего напряжения, а через один. Такой режим перезаписи голограмм позволяет во время отсутствия светового импульса, наблюдать „эхо“ импульса записи предыдущего периода в виде паразитной остаточной решетки с дифракционной эффективностью η_{\min} .

О быстродействии исследуемых структур в режиме реверсивной записи голограмм можно судить по зависимостям отношения η_{\min}/η_{\max} от периода следования импульсов T (рис. 5). Для модулятора с ориентирующим слоем GeO наименьший период следования импульсов записи по уровню остаточной решетки $\eta_{\min}/\eta_{\max} = 0.1$ при величине питающего напряжения 14 В был равен

$T = 0.17$ s, при этом относительный спад ДЭ формируемой основной решетки η_{\max} в этой точке относительно невелик — всего лишь до уровня 0.95 (по кривой 1 на рис. 4). Для модулятора с двойным ориентирующим слоем GeO/a-C:H при величине питающего напряжения 9 V уровень $\eta_{\min}/\eta_{\max} = 0.1$ достигался только при $T = 0.5$ s. Таким образом видно, что быстроедействие ПМС-2 в режиме реверсивной записи голограмм по критерию остаточной решетки $\eta_{\min}/\eta_{\max} = 0.1$ в три раза ниже по сравнению с ПМС-1.

4. Обсуждение результатов

Высокая ДЭ исследуемых модуляторов формировалась под влиянием двух факторов — фазового фактора и фактора асимметрии. Если говорить о первом факторе, то фазовая задержка теоретически может обеспечить рост ДЭ до уровня 33.9%, хотя в реальных ПМС со сравнительно толстым ЖК-слоем этот уровень недостижим по причине некоторой расфокусировки рельефа электрического поля в толще ЖК. Остальную часть прироста ДЭ обеспечивает фактор асимметрии.

Существенно различаются зоны действия этих двух факторов. Поскольку функция зависимости фазового набега от интенсивности записывающего потока и функция зависимости ДЭ от фазового набега имеют монотонно убывающие производные, вклад фазового фактора в прирост ДЭ наибольший в зоне слабых записывающих потоков и монотонно убывает с увеличением их интенсивности. Влияние фактора асимметрии имеет характер противоположный — асимметрия появляется и растет с увеличением интенсивности записывающих пучков [6].

В обоих случаях ДЭ зависит от угла наклона директора ЖК $\theta(z)$ в заданном электрическом поле и соответствующего ему эффективного показателя преломления n_{eff} . Однако если в случае симметричной решетки эта зависимость относительно проста и выражается функцией Бесселя соответствующего порядка от фазовой задержки необыкновенного луча, то при формировании фазовой решетки с асимметричным профилем зависимость ДЭ от $\theta(z)$ и n_{eff} носит значительно более сложный характер.

Сравнительное исследование модуляторов показало, что введение дополнительных слоев аморфного углерода в структуру ПМС-2 практически не изменяло чувствительность модулятора к излучению записи в области интенсивности записывающих потоков, не вызывающих насыщения фототока в ФП. Экспериментально полученные интенсивности записывающих пучков, требуемые для выхода на уровень 33%, составили 1 и $0.9 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ для ПМС-1 и ПМС-2 соответственно. А для формирования оптимальной асимметрии в каждом из двух исследованных модуляторов и выхода на предельные значения дифракционной эффективности пришлось значительно увеличить световые потоки — в ПМС-1 потребовалась

интенсивность записывающих пучков $28 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, для ПМС-2 эта величина составила $5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Введение в структуру слоев a-C:H привело к смещению кривой зависимости $\eta_{\max}(U)$ для ПМС-2 в область более низких питающих напряжений. Различие в питающих напряжениях связано с различной чувствительностью исследованных структур по напряжению, определяемой крутизной зависимости коэффициентов преломления от напряжения, которая, в свою очередь, зависит от начального угла наклона директора ЖК θ_0 .

Точная зависимость угла наклона главной оси молекул ЖК (его директора) $\theta_0(z)$ от напряжения питания довольно сложна и не может быть записана в элементарных функциях, но в первом приближении можно считать, что при нормальном падении считывающего луча и нулевом начальном угле наклона эффективное двулучепреломление (текущее значение разности показателей преломления необыкновенного и обыкновенного лучей) $\Delta n = n_{\text{eff}} - n_0$ определяется разностью полуосей эллиптического сечения оптической индикатрисы и описывается выражением:

$$\Delta n \approx \frac{2\pi d}{\lambda} n_e \frac{n_e^2 - n_0^2}{n_e^2} \frac{1}{(K_{33}/K_{11}) - (\Delta\varepsilon/\varepsilon_{\perp})} \left(\frac{U}{U_{th}} - 1 \right), \quad (1)$$

где n_0 и n_e — коэффициенты преломления обыкновенного и необыкновенного лучей, U_{th} — пороговое напряжение Фредерикса (напряжение порога S-эффекта), K_{11} и K_{33} — константы упругости кристалла, ε — диэлектрическая проницаемость, d — толщина слоя ЖК [14]. Выражение перед скобками не зависит от напряжения, обозначим его A , тогда получается

$$\Delta n = A \left(\frac{U}{U_{th}} - 1 \right) = \frac{A}{U_{th}} U - A. \quad (2)$$

Поскольку в нашем случае начальный угол наклона директора θ_0 для обоих модуляторов не равен нулю, вместо n_e следует подставить его проекцию на плоскость сечения эллипсоида оптической индикатрисы кристалла, параллельную плоскостям подложек, т.е. $n_e \cos \theta_0$, а вместо n_0 — произведение $n_0 \sin \theta_0$. С другой стороны, пороговое напряжение U_{th} также зависит от θ_0 . Величина A/U_{th} для каждого модулятора постоянна, соответствует углу наклона зависимости коэффициента двулучепреломления от напряжения на линейном участке и, в конечном счете, отражает чувствительность структуры по напряжению. Значения A и U_{th} одновременно уменьшаются с увеличением начального угла наклона θ_0 .

Пороговые напряжения были измерены экспериментально в режиме электроуправления при подаче прямоугольного импульса постоянного тока и составили 0.8 V для ЖК ПМС-1 и 1.8 V — для ПМС-2. Отношение коэффициентов A_1/A_2 для наших модуляторов определяется отношением синусов и косинусов их начальных углов наклона и составляет около 4. С учетом различия порогов разница в чувствительности уменьшается до 1.8 раз. Таким образом, эффективное двулучепреломление будет

больше в той структуре, в которой меньше начальный угол наклона директора. Уменьшение начального угла наклона директора приводит к сдвигу кривой зависимости ДЭ от напряжения для ПМС-2 в сторону меньших напряжений.

Введение высокоомных слоев аморфного углерода вызывает увеличение высоты потенциальных барьеров на межфазных границах и порогового напряжения Фредерикса. Однако наблюдаемая в эксперименте величина порога ДЭ по напряжению в частотном режиме реверсивной перезаписи голограмм составила 4 V для ПМС-1 и 1.7 V — для ПМС-2. Поскольку пороги ДЭ по напряжению измерялись при достаточно больших интенсивностях записывающего излучения, снижение порога ДЭ для ПМС-2 по сравнению с порогом Фредерикса объясняется, во-первых, различным распределением прикладываемого к структуре напряжения между ФП и ЖК в темноте и при засветке, а во-вторых, наличием неучтенного объемного заряда. Повышение порога для ПМС-1 может оказаться следствием его недостаточной чувствительности по напряжению. Данные предположения в дальнейшем подлежат проверке. Многопараметричность задачи не позволяет также на данном этапе исследований с определенностью связать напряжения достижения абсолютных максимумов ДЭ исследованных ПМС с фазовым фактором либо фактором асимметрии и требует проведения дальнейших исследований фазовых характеристик структур и дополнительных голографических экспериментов.

Экспериментально полученные напряжения достижения абсолютных максимумов ДЭ были выбраны в качестве рабочих.

Выбор рабочих напряжений повлиял на быстрдействие структур — время включения ПМС-2 с меньшей величиной питающего напряжения было больше, чем для ПМС-1, и решетка в нем формировалась медленней. Высокая инерционность более чувствительной структуры ПМС-2 может быть обусловлена, во-первых, меньшим напряжением питания (время включения обратно пропорционально квадрату напряженности электрического поля, прикладываемому к ЖК), во-вторых, механическими причинами, связанными со степенью деформации ЖК, т.е. необходимой разностью конечного и начального состояния директора, обеспечивающей заданное изменение Δl в слое ЖК определенной толщины, и наконец, увеличившимися за счет введения высокоомного слоя высотами потенциальных барьеров на межфазных границах, что приводит к замедлению процессов образования и стекания объемного заряда и генерации остаточного напряжения, влияющего на коэффициент преломления. Первый из перечисленных факторов влияет в основном на время включения ПМС, поэтому скорости формирования решетки различаются в 7 раз. На время выключения ПМС напряжение питания влияет только через величину объемного заряда, причем в сторону увеличения, поэтому разница в скоростях распада решетки — в 3 раза.

Нанесение на поверхность GeO дополнительных слоев аморфного углерода практически не сказалось на асимметрии, возникающей в процессе формирования решеток с максимальной ДЭ в широком диапазоне пространственных частот. Экспериментально полученные кривые коэффициента асимметрии K для двух сравниваемых образцов практически совпадают, имея две точки пересечения (рис. 3). То же можно сказать о нормированных кривых разрешения — они также практически совпадают (рис. 2) и описанные изменения структуры модулятора совершенно не сказываются на таком важном параметре ПМС, как разрешение, одинаковым для сравниваемых модуляторов — 75 nm^{-1} по уровню $0.5\eta_{+1 \text{ max}}$. Такое совпадение нормированных кривых разрешения и близость кривых коэффициентов асимметрии картины дифракции говорят о том, что введение в одном из ПМС дополнительных слоев аморфного углерода практически не повлияло на характер формирования решетки в широком диапазоне пространственных частот.

Наиболее простым объяснением уменьшения максимальной ДЭ (с 69 до 50.5%) и коэффициентов асимметрии в этой области (от $K_1 = 3$ до $K_2 = 2.4$) при введении дополнительных слоев аморфного углерода было бы появление большей размытости штриха решетки при введении дополнительных слоев аморфного углерода, связанной с преобладающей для ПМС-2 степенью накопления пространственного заряда в пограничной области ФП–ЖК. Может также вноситься свой вклад экспериментально наблюдаемое смещение максимума ДЭ для ПМС-1 в область более низких пространственных частот, где несколько больше глубина модуляции рельефа сопротивления в ФП-слое и глубина модуляции рельефа решетки электрического поля в ЖК-слое. Следует также отметить, что выбранная для сравнения модуляторов частота возбуждающего напряжения 1 Hz для ПМС-2 не является оптимальной — только уменьшение ее в 2 раза позволяет поднять максимальную ДЭ этого модулятора до 56% (см. рис. 4).

В фотопроводнике на границе раздела с ориентирующим слоем на освещаемых участках и вблизи их может накапливаться объемный заряд, который с течением времени приводит к спаду максимальной величины дифракционной эффективности структуры ФП–ЖК. Если при однополярном питании без смещения реакция ПМС-1 на записывающий сигнал через 10–15 минут работы изменялась незначительно, то существенное влияние отрицательного смещения на работу ПМС-2 с введенными в его структуру дополнительными слоями аморфного углерода иллюстрирует рис. 6. Световые импульсы были равны по длительности импульсам питающего напряжения (период следования $T = 1 \text{ s}$) и подавались синхронно с ними, а интенсивность световых пучков поддерживалась постоянной. Положительное питающее напряжение $U = +5 \text{ V}$, а напряжение смещения U_b (bias) варьировалось от -0.5 до -5 V (при изменении U_b от -1 до -5 V кривые совпадали друг с другом). В отсутствие отрицательного смещения ДЭ падала до 0.6

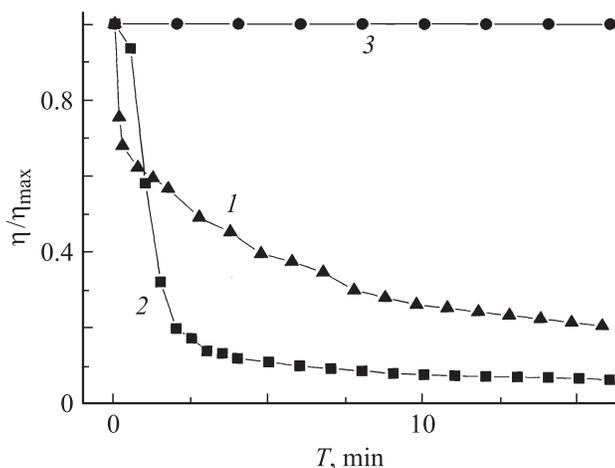


Рис. 6. Поведение дифракционной эффективности в +1-м порядке дифракции для ПМС-2 при различных величинах напряжения смещения U_b . 1 — $U_b = 0$, 2 — 0.5, 3 — 1 V.

от максимального значения на первой минуте работы ПМС-2 и затем плавно уменьшалась до 0.2 за 16 минут работы. При подаче $U_b = -0.5$ В ДЭ уменьшалась до $0.9\eta_{\max}$ за минуту и затем резко падала за 4 минуты до $0.1\eta_{\max}$. При подаче отрицательного смещения $|U_b| \geq 1$ В изменения ДЭ со временем экспериментально не наблюдались.

Накоплению заряда способствует введенный дополнительный ориентирующий слой a -C:H, который имеет более высокое удельное сопротивление (около 10^{13} Ωcm) по сравнению со слоем GeO, и, возможно, образует на границе раздела с ЖК какие-то дополнительные вакантные энергетические состояния с достаточно большим временем жизни на них носителей заряда. Появившийся объемный заряд вызывает уменьшение глубины модуляции рельефа решетки электрического поля в ЖК-слое, что и является основной причиной наблюдаемого на рис. 6 спада ДЭ. Кроме того, растущий объемный заряд уменьшает диапазон изменения угла наклона молекул ЖК между включенным и выключенным состояниями. При однополярном питании ПМС-2 реакция на записывающий сигнал через 10–15 минут работы существенно снижалась из-за накопления на межфазной границе объемного заряда, который, по-видимому, самостоятельно не успевал полностью стекать. Снизить эффекты, связанные с накоплением на межфазной границе объемного заряда, позволило использование режима питания биполярными импульсами напряжения. Подача импульса напряжения отрицательной полярности в полупериод, когда отсутствует записывающий свет, разрушает решетку в ЖК-слое, оказывая различное воздействие на участки с различной ориентацией директора ЖК, а также способствует рекомбинационным процессам в фотопроводнике и рассасыванию объемного заряда.

Сравнивая ПМС-1 и ПМС-2, следует также отметить, что введение в структуру последнего дополнительного

слоя аморфного углерода должно приводить к появлению в полупериод записи большего по величине объемного заряда. Поскольку растекшийся в неосвещаемую область заряд пропорционален величине заряда, накапливающегося на освещаемых участках, увеличение последнего вызывает уменьшение глубины модуляции рельефа решетки электрического поля в ЖК-слое в полупериод записи. Это может оказаться дополнительным фактором некоторого размытия решетки в ЖК, влияющим на наблюдаемую разницу в предельных величинах ДЭ сравниваемых структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № РНП 2.1.1/2166.

Список литературы

- [1] Беренберг В.А., Иванова Н.Л., Феоктистов Н.А., Чайка А.Н. // ЖТФ. 2008. Т. 7. Вып. 4. С. 99.
- [2] Амосова Л.П., Плетнева Н.И., Чайка А.Н. // Оптич. журн. 2005. Т. 72. Вып. 6. С. 57.
- [3] Амосова Л.П., Моричев И.Е., Плетнева Н.И., Чайка А.Н. // Оптич. журн. 2004. Т. 71. Вып. 4. С. 16.
- [4] Амосова Л.П., Моричев И.Е., Плетнева Н.И., Чайка А.Н. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 9. С. 1.
- [5] Кольтер Р., Беркхарт К., Лиин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 626 с.
- [6] Иванова Н.Л., Онохов А.П., Чайка А.Н. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 16. С. 57.
- [7] Berenberg V.A., Chaika A.N., Ivanova N.L., Onokhov A.P. // Conf. on High-Resolution Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications III. Proc. SPIE. 2002. Vol. 4493. P. 239.
- [8] Pavlov A.V. // Advances in Information Optics and Photonics. SPIE Press Book. SPIE Press. 2008. P. 263.
- [9] Чайка А.Н., Амосова Л.П., Коншина Е.А. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 9. С. 25.
- [10] Коншина Е.А., Амосова Л.П., Чайка А.Н. Патент RU 83143. Оптически управляемый жидкокристаллический модулятор просветного типа. 20.05.09.
- [11] Kirby A.K., Love G.D. // Optics express. 2004. Vol. 12. N 7. P. 1470.
- [12] Коншина Е.А. // ЖТФ. 2002. Т. 22. Вып. 6. С. 35.
- [13] Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П. // Оптич. журн. 2006. Т. 73. Вып. 12. С. 9.
- [14] Сонин А.С. Введение в физику жидких кристаллов. М.: Наука, 1983, С. 200–201.