

07

Оптически управляемый жидкокристаллический модулятор с дифракционной эффективностью 50% и высоким разрешением

© А.Н. Чайка, Л.П. Амосова, Е.А. Коншина

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики
E-mail: chaika@rbcmail.ru

Поступило в Редакцию 8 августа 2008 г.

По голографической методике исследован оптически управляемый жидкокристаллический пространственный модулятор света с фоточувствительным слоем a -Si:C:H. Наибольшая величина дифракционной эффективности (ДЭ) составила 50.5%. Спад ДЭ до уровня $0.5\eta_{\max}$ наблюдался на пространственной частоте 75 mm^{-1} . Высокое разрешение и ДЭ модулятора связаны с особенностями формирования несимметричного профиля штриха решетки в исследуемой структуре.

PACS: 42.40.Lx, 42.40.Ht, 42.70.Dt

Исследование ряда оптически управляемых структур типа фотопроводник–жидкий кристалл (ФП–ЖК) в режиме реверсивной записи голограмм показало, что в модулирующем ЖК-слое возможно формирование решеток с профилем штриха, отличающимся от исходного симметричного профиля интенсивности для световой решетки, поступающей на входной светочувствительный ФП-слой модулятора [1–6]. Для некоторых из исследованных структур степень асимметрии была весьма значительна и способна вызывать существенную асимметрию в смежных порядках дифракции считывающего светового пучка. Это позволило получить в одном из двух порядков значения ДЭ свыше 40%, т.е. превышающие теоретический предел для тонких фазовых голограмм с симметричным профилем штриха. Наибольшее экспериментально полученное значение ДЭ составило 56%. Дальнейшие исследования вновь создаваемых структур показали, что возникающая

асимметрия может также оказывать воздействие на кривую разрешения оптически управляемого модулятора света.

В данной работе по голографической методике мы исследовали оптический модулятор на основе структуры ФП–ЖК, в котором в качестве фоточувствительного слоя использовали слой аморфного гидрогенизированного карбида кремния $a\text{-Si:C:H}$. В качестве модулирующей среды использовали ЖК-1001 (НИОПИК) с оптической анизотропией $\Delta n = 0.26$ на длине волны 633 нм. Толщина слоев ФП и ЖК составляла 1.8 и 13 μm соответственно. Параллельную ориентацию ЖК осуществляли с помощью комбинации слоев монооксида германия, нанесенных методом косоугольного напыления на поверхность подложек в вакууме, и тонкого слоя аморфного гидрогенизированного углерода [7].

В режиме реверсивной записи голограмм были исследованы основные голографические характеристики экспериментальной структуры по методике, применявшейся ранее для структур ФП–ЖК просветного типа. Подробная оптическая схема эксперимента дана в работе [1]. Картина интерференции двух равных по интенсивности пучков с плоскими волновыми фронтами формировалась непосредственно на фоточувствительном слое с помощью He–Ne-лазера с длиной волны 633 нм. Диаметр голограммы в модулирующем ЖК-слое был 12 мм. Питание исследуемой структуры осуществлялось прямоугольными биполярными симметричными импульсами напряжения. Отношение периода следования импульсов питания T к их продолжительности τ было равно двум. Интенсивность интерферирующих пучков He–Ne-лазера модулировалась синхронно с импульсами питающего напряжения; длительность и период следования световых импульсов совпадали соответственно с τ и T .

Считывание при работе модулятора в просветной моде осуществляли непрерывным когерентным излучением полупроводникового лазерного диода с длиной волны излучения 814 нм, обеспечивающего интенсивность считывающего потока до 0.4 мВт/см². Направление поляризации считывающего пучка было параллельно вектору записываемой решетки и совпадало с ориентацией директора ЖК. Дифракционная эффективность определялась как $\eta = I_1/I_0$, где I_1 — интенсивность света в первом порядке дифракции, I_0 — интенсивность света, прошедшего через структуру при отсутствии записывающего светового потока. Измерительная часть голографического стенда позволяла делать измерения ДЭ в +1 и –1 порядках дифракции.

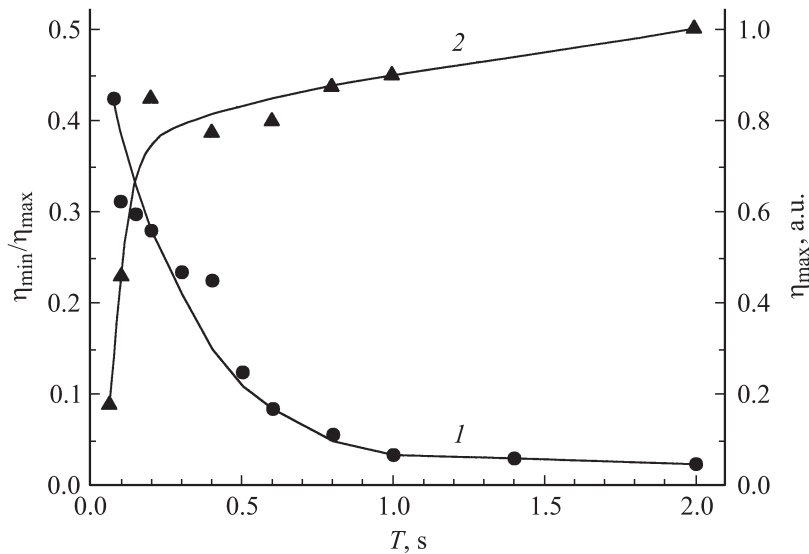


Рис. 1. Зависимость отношения величины ДЭ остаточной решетки (η_{\min}) к величине максимальной ДЭ, достигаемой в цикле записи (η_{\max}), (1) и зависимость максимальной ДЭ (2) от периода перезаписи голограмм T .

Быстродействие структуры типа ФП–ЖК в режиме реверсивной записи голограмм зависит от скорости стирания предыдущей голограммы, обусловленной релаксационным процессом в ЖК. На рис. 1 (кривая 1) приведена зависимость отношения величины ДЭ остаточной решетки (η_{\min}) к максимальной ДЭ, достигаемой в цикле записи (η_{\max}), от периода T , по которой можно судить о быстродействии исследуемой структуры $a\text{-Si}:\text{C}:\text{H}$ –ЖК. Измерения проводились на пространственной частоте 18 mm^{-1} при питании структуры импульсами напряжения, равными $\pm 4.5\text{ V}$. Быстродействие, определенное по уровню остаточной решетки $\eta_{\min}/\eta_{\max} = 0.1$, составляет для исследуемого модулятора $T = 0.55\text{ s}$. На рис. 1 также приведен график зависимости максимальной ДЭ от периода перезаписи голограмм T (кривая 2), из которого видно, что в области низкого уровня остаточной решетки ДЭ наибольшая и слабо зависит от T .

На рис. 2 показаны зависимости величины ДЭ записываемых на исследуемой структуре решеток от интенсивности записывающего из-

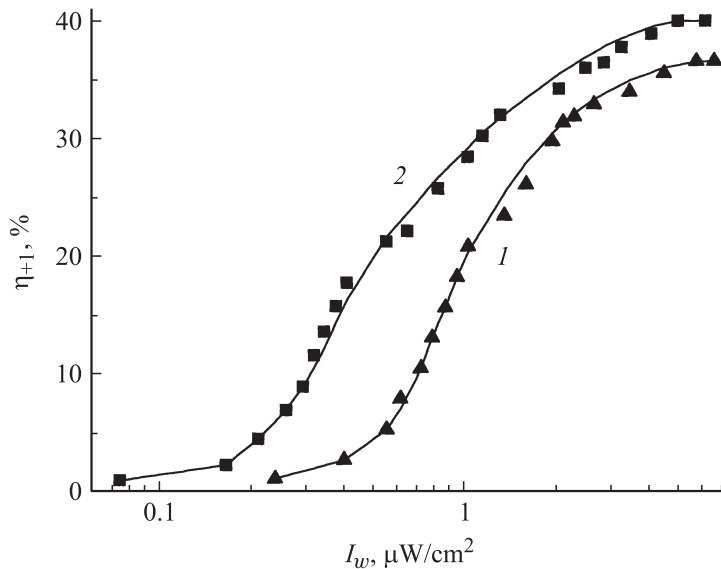


Рис. 2. Зависимость ДЭ структуры от интенсивности записывающего излучения I_w при $T = 0.5$ s (1) и $T = 1$ s (2).

лучения в одном из двух интерферирующих пучков при различных значениях периода T на пространственной частоте 18 mm^{-1} . Предельная величина ДЭ в первом порядке η_{+1} равна 40% при напряжении $\pm 4.5 \text{ V}$ и $T = 1$ s. Чувствительность исследуемой оптически управляемой структуры, определенная как величина светового потока в одном из двух равных интерферирующих пучков по достижении ДЭ значения $0.9\eta_{\text{max}}$, в диапазоне $R = 0.5 - 1$ s была постоянной и составила $2.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Динамический диапазон по интенсивности записывающего излучения соответствовал двум порядкам.

На рис. 3 (кривая 1) приведена экспериментальная зависимость отношения величин ДЭ в смежных порядках дифракции $K = \eta_{+1}/\eta_{-1}$ от пространственной частоты решетки ($U = \pm 4.5 \text{ V}$, $T = 1$ s). Коэффициент асимметрии K растет с увеличением пространственной частоты. На начальном участке кривой асимметрия смежных порядков дифракции практически отсутствует ($K = 1$ при $\nu = 18 \text{ mm}^{-1}$), и в области низких пространственных частот асимметрия сравнительно невелика. Вместе с тем изменение коэффициента асимметрии имеет возрастающий ха-

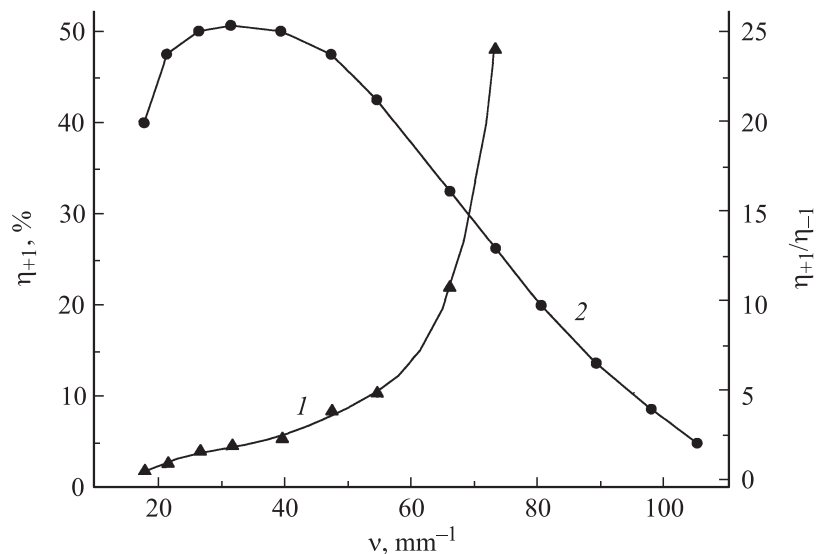


Рис. 3. Экспериментальная зависимость коэффициента асимметрии $K = \eta_{+1}/\eta_{-1}$ (1) и зависимость ДЭ в +1 порядке дифракции (2) от пространственной частоты записываемой решетки.

рактически (при $\nu = 75 \text{ mm}^{-1}$ $K = 25$), вызванный перераспределением световых потоков в смежных порядках дифракции вследствие отклонения профиля штриха формируемой в ЖК-слое решетки от симметричной формы, что сказывается на кривой разрешения исследуемого модулятора (кривая 2 на рис. 3). На начальном участке зависимости ДЭ в +1 порядке (η_{+1}) от пространственной частоты, записываемой на структуре голографической решетки (кривая 2), наблюдается подъем. Максимум ДЭ, равный 50.5%, наблюдается при $\nu = 32 \text{ mm}^{-1}$. Спад дифракционной эффективности до уровня $0.5\eta_{+1 \text{ max}}$ наблюдается на пространственной частоте 75 mm^{-1} , что является рекордным разрешением для класса оптически управляемых модуляторов с высокой ДЭ на базе структур типа ФП–ЖК. Разрешение по уровню $0.5\eta_{+1 \text{ max}}$ для структур типа $p-i-n$ $a\text{-Si} : \text{C} : \text{H}$ –ЖК [8], Sb_2S_3 –ЖК [5] и $\text{As}_x\text{Se}_{1-x}$ –ЖК [5,6], ранее исследованных, находилось в интервале от 40 до 45 mm^{-1} .

Повышение разрешения и ДЭ в одном из смежных порядков дифракции связаны с особенностями формирования несимметричного профиля

штриха решетки в исследуемой структуре [1]. Понимание природы наблюдаемых особенностей изменений этих параметров у оптически управляемых ЖК-модуляторов требует дальнейших исследований.

В результате проведенных экспериментальных исследований оптически управляемого ЖК-модулятора на основе $a\text{-Si}:\text{C}:\text{H}$ с режимом питания прямоугольными биполярными симметричными импульсами напряжения было получено разрешение 75 nm^{-1} по уровню 0.5 спада дифракционной эффективности, которое превышает разрешение подобных структур с высокой ДЭ как на основе слоев аморфного гидрогенизированного кремния с питанием прямоугольными однополярными импульсами, так и структур на основе стибнита или высокоомных систем $\text{As}_x\text{Se}_{1-x}$ при постоянном питании. При этом величина максимальной дифракционной эффективности превышала теоретический предел для тонких фазовых голограмм с симметричным профилем штриха и была равна 50.5% на частоте 32 nm^{-1} . Полученные результаты представляют интерес для практического использования подобных структур ФП–ЖК на пути создания систем искусственного интеллекта методами Фурье-голографии [9].

Работа выполнена при поддержке гранта РНП.2.1.1.1089 Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

- [1] Беренберг В.А., Иванова Н.Л., Феоктистов Н.А., Чайка А.Н. // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 4. С. 99–103.
- [2] Иванова Н.Л., Онохов А.П., Чайка А.Н. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 16. С. 57–61.
- [3] Berenberg V.A., Chaika A.N., Ivanova N.L. et al. // Proc. SPIE. 2002. V. 4493. P. 239–244.
- [4] Амосова Л.П., Моричев И.Е., Плетнева Н.И., Чайка А.Н. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 9. С. 1–5.
- [5] Амосова Л.П., Плетнева Н.И., Чайка А.Н. // ОЖ. 2005. Т. 72. № 6. С. 57–62.
- [6] Амосова Л.П., Чайка А.Н. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 6. С. 56–62.
- [7] Коншина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П., Воронин Ю.М. // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 2. С. 71–76.
- [8] Иванова Н.Л., Чайка А.Н., Онохов А.П. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 3. С. 1–5.
- [9] Pavlov A.V. *Advances in Information Optics and Photonics* (SPIE Press Book). SPIE Press. 2008. P. 263.