

07;12

## Реверсивная запись интерференционных решеток с дифракционной эффективностью свыше 50% на структуре "аморфный гидрогенизированный кремний–нематический жидкий кристалл"

© Н.Л. Иванова, А.П. Онохов, А.Н. Чайка

ГУП ВНЦ "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова",  
С.-Петербург

Поступило в Редакцию 5 марта 2001 г.

При исследовании с использованием голографической методики характеристик пространственно-временного модулятора света, состоящего из  $p-i-n$ -диода  $a\text{-Si:H}$  и слоя нематического жидкого кристалла, обнаружено, что при определенных условиях возникает асимметрия дифракционных эффективностей в  $+1$  и  $-1$  порядках. При этом максимальное значение дифракционной эффективности в одном из этих порядков может достигать значения 52%, рекордного для приборов данного типа.

Оптически адресуемые пространственно-временные модуляторы света (ОАПВМС) типа фотополупроводник–жидкий кристалл (ФП–ЖК) широко используются в системах оптической обработки информации [1], и в частности для записи голографических решеток в реальном масштабе времени [2]. Так как толщина модулирующего свет ЖК слоя обычно меньше ( $5\text{--}10\ \mu\text{m}$ ), в ПВМС формируется тонкая голограмма [3]. По теоретическим оценкам максимальное значение дифракционной эффективности (ДЭ) тонких фазовых решеток не превышает 33.9% для синусоидального и 40% для прямоугольного профиля решетки.

В данной работе сообщается о возможности записи в реальном масштабе времени в ОАПВМС интерференционных решеток с ДЭ, значительно превышающей теоретический предел.

Исследуемый ОАПВМС представляет собой сэндвич-структуру, состоящую из  $p-i-n$ -диода на основе аморфного гидрогенизированного кремния ( $p-i-n\ a\text{-Si:H}$ ) толщиной  $1.2\ \mu\text{m}$  и слоя нематического

ЖК (НЖК) толщиной  $5 \mu\text{m}$ , заключенную между двумя стеклянными подложками с прозрачными проводящими электродами. Близкая к планарной ориентация НЖК ( $S$ -эффект) осуществлялась косонапыленными пленками двуокиси церия.

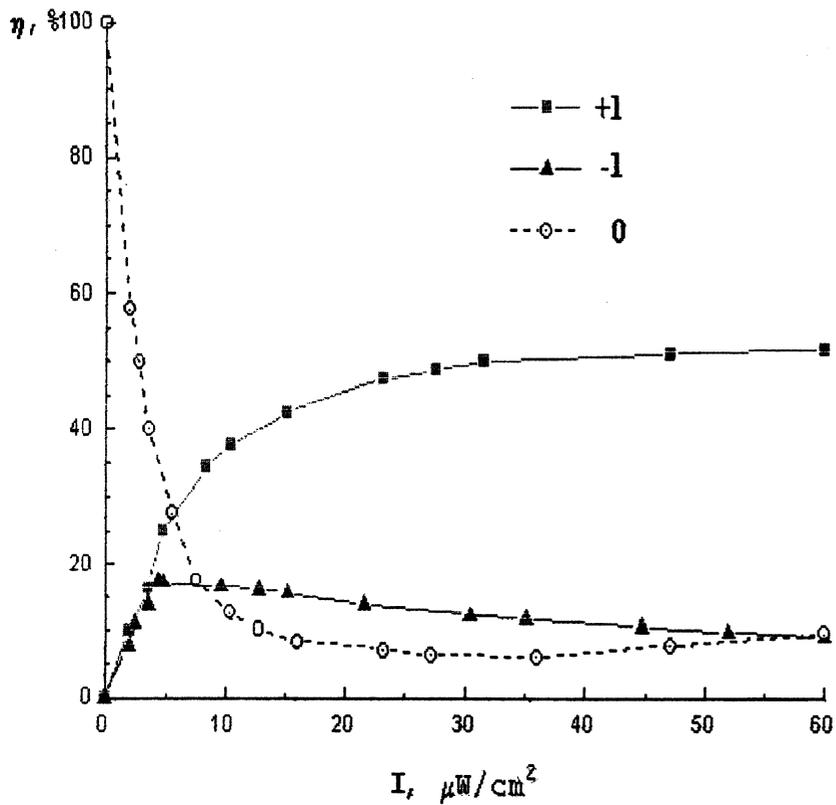
Питание такой структуры производилось импульсами напряжения прямоугольной формы одной полярности так, чтобы  $p-i-n$ -диод находился в режиме обратного смещения.

Запись решетки производилась промодулированным излучением He-Ne лазера ( $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ ), синхронизированным во времени с импульсами управляющего напряжения. С этой целью использовался электроуправляемый модулятор с ферроэлектрическим ЖК [4]. Импульсная картина интерференции двух плоских волновых фронтов равной интенсивности проецировалась на ФП. При этом происходит пространственная модуляция проводимости ФП, что в свою очередь приводит к пространственной модуляции электрического поля в НЖК и соответствующей переориентации директора НЖК. Формируется двулучепреломляющая фазовая решетка, дифракционные свойства которой зависят от интенсивности записывающего света и параметров управляющего напряжения. Максимальное изменение фазы для данного слоя НЖК (НИОПИК, 1282) толщиной  $5 \mu\text{m}$  и  $\Delta n = 0.164$  равно  $2.6 \pi$ .

Считывание осуществлялось в режиме просветной моды линейно-поляризованным светом с длиной волны  $\lambda = 0.814 \mu\text{m}$  под углом  $18^\circ$  относительно нормали к входному окну ПВМС.

ДЭ решетки определялась как  $\eta_i = I_i^R/I_0$ , где  $I_i^R$  — интенсивность светового потока в  $i$ -том порядке,  $I_0$  — интенсивность светового потока, прошедшего через модулятор в отсутствие записывающего света. Регистрация световых потоков осуществлялась ФЭУ.

При исследовании дифракционных характеристик решеток, формируемых в ОАПВМС при описанных выше условиях, мы обнаружили, что, когда вектор решетки параллелен директору НЖК и направлению поляризации считывающего излучения, а интенсивность записывающего света превышает  $5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , наблюдается асимметрия в интенсивностях световых потоков, дифрагировавших в  $+1$  и  $-1$  порядки. При этом если частота импульсов записывающего света была меньше  $10 \text{Hz}$ , то для решеток с пространственной частотой  $\nu = 20 \text{mm}^{-1}$  ДЭ в одном из порядков значительно превышает теоретический предел для тонкой фазовой решетки с синусоидальной формой штриха.



Зависимость ДЭ 0, +1, -1 порядков для интерференционной решетки с  $\nu = 20 \text{ mm}^{-1}$  от интенсивности записывающего света при  $U = 32.5 \text{ V}$ ,  $\tau = 200 \text{ ms}$  и  $T = 600 \text{ ms}$ .

На рис. 1 представлены зависимости ДЭ формируемой в слое НЖК решетки с  $\nu = 20 \text{ mm}^{-1}$  в 0, +1 и -1 порядках от интенсивности света в одном из плеч интерферометра при амплитуде импульсов питающего напряжения  $U = 32.5 \text{ V}$ , длительности импульсов  $\tau = 200 \text{ ms}$  и периоде следования  $T = 600 \text{ ms}$ . Из рисунка видно, что асимметрия в ДЭ +1 и -1 порядках дифракции возникает, когда интенсивность записывающего света в одном из плеч интерферометра ( $I^{1W} = I^{2W}$ ) больше

$5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  и нарастает с увеличением интенсивности записывающего света. Асимметрия  $K = \eta_{+1}/\eta_{-1}$  достигает максимальной величины 5.5 при интенсивности светового потока  $60 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Одновременно происходит уменьшение в 10.5 раза интенсивности светового потока в 0 порядке дифракции. За счет процесса перераспределения света между 0, +1 и -1 порядками ДЭ в +1 порядке достигает максимального значения 52%. Эффект асимметрии дифракционных порядков наблюдался также при записи непрерывным излучением, а также при более высоких пространственных частотах вплоть до  $85 \text{mm}^{-1}$  (предельная для нашей измерительной схемы). Однако мы намеренно использовали в нашем эксперименте возможно низкую пространственную частоту  $\nu = 20 \text{mm}^{-1}$ , чтобы реализовать предельный вариант модели плоской голограммы и исключить влияние фактора толщины модулирующего слоя.

Возникновение асимметрии в  $\pm 1$  порядках дифракции и увеличение ДЭ в одном из них до 52% можно объяснить, если предположить, что при данных условиях записи и управления ОАПВМС типа  $p-i-n$   $a\text{-Si:H-NЖК}$ , в слое НЖК формируется решетка с несимметричным фазовым профилем. В пользу этого предположения говорит тот факт, что в нашем эксперименте величина асимметрии ДЭ зависит также от угла падения считывающего излучения на входное окно ОАПВМС.

В работе [5], в которой по голографической методике исследовались характеристики отражательного ОАПВМС типа  $i-a\text{-Si:H-NЖК}$ , показано, что процесс формирования решеток носит нелинейный характер, приводящий к искажению синусоидального фазового профиля, но он остается симметричным. В работе [6] также утверждается, что при дифракции линейно-поляризованного света на бинарной фазовой решетке световые потоки в +1 и -1 порядках одинаковы, а асимметричны направления поляризации света в этих порядках. Однако недавно появились публикации, авторы которых наблюдали асимметрию ДЭ  $\pm 1$  порядков как в случае дифракции линейно-поляризованного света в электроадресуемом матричном ( $640 \times 480$  пикселей) ЖК модуляторе [7], так и при дифракции света на электроадресуемой бинарной фазовой решетке с планарно-ориентированным НЖК [8]. В последней работе показано, что если направление поляризации считывающего излучения параллельно директору НЖК, а вектор решетки перпендикулярен директору (натирка ориентирующего слоя производилась вдоль электродов), то интенсивности световых потоков в +1 и -1 порядках одинаковы.

Если направление поляризации считывающего света, директор НЖК и вектор решетки взаимно параллельны (натирка ориентирующего слоя производилась перпендикулярно электродам), наблюдается асимметрия в интенсивностях света в  $+1$  и  $-1$  порядках. В такой конфигурации велико влияние угла подвеса молекул НЖК на характер их взаимодействия с неоднородным электрическим полем на краях электродов, приводящее к неодинаковой переориентации директора на противоположных концах электродов и возникновению асимметрии фазового профиля. Эффект зависит не только от величины угла подвеса, но также и от отношения периода решетки (ширины электрода) к толщине слоя ЖК.

В случае нашего эксперимента при планарной ориентации косо-напыленными пленками двуокиси церия молекулы НЖК имеют угол подвеса  $(4-6)^\circ$ , а взаимная ориентация директора, вектора решетки и направления поляризации считывающего света аналогична описанной в работе [8]. Следовательно, аналогичной может быть и причина возникновения асимметрии фазового профиля формируемой в слое НЖК решетки.

В заключение следует отметить, что при записи световых интерференционных решеток в ОАПВМС эффект асимметрии ДЭ  $\pm 1$  порядков наблюдается впервые, а достигнутая величина ДЭ  $\eta = 52\%$  является рекордной для данного типа устройств.

## 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] Fukushima S., Kurokawa T. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. N 8. P. 787–789.
- [3] Gaylord T.K., Moharan M.G. // Appl. Opt. 1981. V. 20. P. 3271–3273.
- [4] Чайка А.Н., Иванова Н.Л., Онохов А.П. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 3. В. 8. С. 20–25.
- [5] Mukohraka N., Yohida N., Toyoda H., Kobayashi Y., Hara T. // Appl. Opt. 1994. V. 33. N 14. P. 2804–2811.
- [6] He Z., Nose T., Sato S. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1997. V. 301. P. 295–300.
- [7] Davis J.A., Tsai P., Cottrell D.M., Sonohara T., Amako J. // Opt. Eng. 1999. V. 38. N 6. P. 1051–1057.
- [8] Bowler M., Scharf T. // Opt. Eng. 2000. V. 39. N 8. P. 2129–2137.