УДК 532.783.087:778.38

НЕЛИНЕЙНЫЙ РЕЖИМ РЕВЕРСИВНОЙ ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ НА СТРУКТУРАХ ФОТОПРОВОДНИК–ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ С ВЫСОКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ К ИЗЛУЧЕНИЮ He–Ne-ЛАЗЕРА

© 2005 г. **Л. П. Амосова**, канд. физ.-мат. наук; **Н. И. Плетнева**, канд. техн. наук; **А. Н. Чайка**

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

E-mail: chaika@soi.spb.ru

Проведено сравнительное исследование двух типов оптически управляемых структур с модулирующим жидкокристаллическим слоем и стибнитом (Sb_2S_3) или селенидом мышьяка ($As_{40}Se_{60}$) в качестве фотопроводника. Показано, что в режиме реверсивной записи тонких голограмм удалось получить дифракционную эффективность до 42%, а использование фотопроводникового слоя с максимумом спектральной чувствительности, близким к длине волны излучения He–Ne-лазера, обеспечило чувствительность от 0,75 мкВт/см^2 на длине волны записи $\lambda = 633$ нм. Для рассмотренных структур характерно наличие убывающего участка модуляционной характеристики со спадом дифракционной эффективности до уровня $0{,}05\eta_{max}$ (фотопроводниковый слой Sb_2S_3) и $0{,}01\eta_{max}$ (фотопроводниковый слой $As_{40}Se_{60}$), благодаря чему они могут быть использованы в голографических корреляционных системах для реализации нелинейных алгоритмов обработки информации.

Коды OCIS: 090.0090, 090.2900.

Поступила в редакцию 22.12.2004.

Обычно к средам для реверсивной записи голограмм предъявляются следующие традиционные требования: высокая дифракционная эффективность, достаточные для решения поставленных задач быстродействие и разрешающая способность, а также высокая чувствительность к записывающему излучению. Кроме того, до сих пор при создании новых сред усилия обычно направлялись на расширение квазилинейного диапазона модуляционных характеристик. Однако для решения ряда задач по биоинформатике и созданию искусственного интеллекта потребовались среды, пригодные для реверсивной записи фурье-голограмм и обладающие нелинейными модуляционными характеристиками [1]. При этом было желательно обеспечить простоту управления нелинейностью, а также приблизить максимум спектральной чувствительности к длине волны излучения гелий-неонового лазера. Нелинейность модуляционной характеристики может быть реализована на структурах типа фотопроводник–нематический жидкий кристалл (ЖК) с планарной начальной ориентацией, в которых зависимость дифракционной эффективности в первом порядке дифракции от интенсивности записывающего излучения описывается функцией Бесселя и обладает возрастающим и убывающим участками, причем угол наклона и положение максимума регулируются величиной питающего напряжения [2, 3]. Однако в указанной работе был использован фотопроводник $As_{10}Se_{90}$, адаптированный к синей области спектра и, соответственно, не являющийся оптимальным для записи голограмм He–Ne-лазером. Настоящая работа является логическим продолжением начатых в [2, 3] исследований. В данном случае основное внимание было уделено выбору фотопроводника. Исследовалась возможность использования двух полупроводниковых материалов: стибнита (Sb_2S_3) и селенида мышьяка с большим содержанием мышьяка (As_xSe_{1-x}). Стибнит ранее для этой цели не использовался по причине большей инерционности и более низкого удельного сопротивления, чем у соединений As_xSe_{1-x} (сопротивление стибнита составляет 10^{12} Ом см, в то время как соединения As_xSe_{1-x} обладают сопротивлением порядка 10^{13} Ом см). Однако благодаря наличию вакантных состояний (ловушек) в стибните процесс растекания рельефа изображения сильно заторможен. Таким образом, разрешающая способность структур на стибните оказывается выше, чем можно было бы ожидать от материала со столь относительно низким сопротивлением, хотя она и уступает разрешающей способности As_xSe_{1-x}. Кроме того, максимум спектральной чувствительности стибнита приходится на длину волны 630 нм, практически совпадающую с длиной волны гелий-неонового лазера (633 нм). Что касается соединений As_xSe_{1-x}, то обычно в качестве фотопроводника применялось вещество $As_{10}Se_{90}$. Увеличить процентное содержание мышьяка нас заставило желание приблизить максимум спектральной чувствительности фотопроводника к длине волны гелий-неонового лазера. Нами исследовались слои с содержанием мышьяка 10, 20, 40 и 50%. Слои изготавливались резистивным испарением в вакууме порядка 2×10^{-6} мм рт. ст. Толщина исследуемых слоев составляла около 2 мкм и контролировалась в процессе изготовления фотометрическим методом. Образцы изготавливались в виде "сэндвича".

Фотоэлектрические характеристики системы As_xSe_{1-x}

Вещество	Полярность освещаемого электрода	Темновое сопротивление, Ом см	λ_{max}, нм	Преобладающие носители	Времена нарастания t_1 и спада t_2 фототока, мс
$As_{10}Se_{90}$	+	$1{,}1\times10^{13}$	500	*n*	$t_1 = 3$
	–	$3{,}3\times10^{13}$	400		$t_2 = 5$
$As_{20}Se_{80}$	+	$2{,}4\times10^{13}$	550	*n*	$t_1 = 20$
	–	$3{,}4\times10^{13}$	600		$t_2 = 30$
$As_{40}Se_{60}$	+	$5{,}4\times10^{12}$	620	*p*	$t_1 = 60$
	–	$1{,}1\times10^{14}$	650		$t_2 = 80$
$As_{50}Se_{50}$	+	8×10^{13}	550	*p*	$t_1 = 80$
	–	2×10^{13}	600		$t_2 = 80$

Исследовалась продольная фотопроводимость. Одним из электродов служил прозрачный проводящий слой, другим – алюминиевая полоска. Были проведены исследования спектральной фоточувствительности, люкс-амперных и временных характеристик тонких слоев халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) различного состава. В таблице приведены фотоэлектрические характеристики системы As_xSe_{1-x}. Спектральная фоточувствительность измерялась при постоянной интенсивности падающего света в интервале длин волн 400–1100 нм. Исследованные составы имели максимум фоточувствительности в области от 400 до 650 нм. Положение максимума и абсолютная величина фоточувствительности зависят от процентного содержания мышьяка и полярности освещаемого электрода. С увеличением содержания мышьяка максимум фоточувствительности смещается в сторону длинных волн при обеих полярностях на освещаемом электроде. При смене полярности на освещаемом электроде изменяется фоточувствительность, что обусловлено монополярным характером фотопроводимости. С увеличением содержания мышьяка изменяется знак доминирующих носителей: в составах, содержащих 10 и 20% мышьяка, доминируют электроны, а 40 и 50% – дырки. Это, в свою очередь, приводит к увеличению времен нарастания и спада фототока, поскольку дырки обладают меньшей подвижностью по сравнению с электронами. Максимальной фоточувствительностью обладает состав $As_{40}Se_{60}$ при длине волны 620 нм и положительной полярности на освещаемом электроде.

С другой стороны, увеличение содержания мышьяка приводит не только к смещению максимума чувствительности в длинноволновую область, но одновременно и к ухудшению как однородности, так и стабильности пленок. Максимальное содержание мышьяка в стабильных пленках не может превышать 50%.

Были изготовлены структуры типа "сэндвич", включающие в себя следующие нанесенные на стеклянные подложки слои: фоточувствительный полупроводник ($As_{40}Se_{60}$), прозрачные электроды (ITO), ориентирующие покрытия (GeO, нанесенный методом косого напыления) и, в качестве светомодулирующего слоя, нематический жидкий кристалл ЖКМ-1630Б ($\Delta n = 0{,}13$, $\gamma = +4{,}4$, $t = -20\ldots+90$ °C) с начальной планарной ориентацией и толщиной слоя 10 мкм.

Созданные экспериментальные образцы оптически управляемых структур были исследованы на голографическом стенде. Используя He–Ne-лазер ($\lambda = 633$ нм), мы формировали картину интерференции двух пучков с плоскими волновыми фронтами непосредственно на фоточувствительном слое структуры. Для считывания в режиме на просвет использовался полупроводниковый лазерный диод с длиной волны излучения 814 нм, причем исследуемая структура устанавливалась в оптической схеме таким образом, чтобы ориентация директора ЖК совпадала с направлением вектора поляризации считывающего света. Полученные экспериментально зависимости дифракционной эффективности η от интенсивности записывающего излучения в одном из двух интерферирующих пучков I_w приведены на рис. 1. Кривые *1*, *2* получены для структуры с фотопроводниковым слоем Sb_2S_3, кривые *3*, *4* – для структуры с фотопроводниковым слоем $As_{40}Se_{60}$. Решетки формировались с помощью непрерывного излучения на пространственной частоте $\nu = 22$ мм$^{-1}$. ФотоЭДС полупроводника в сумме с внешним приложенным напряжением дают эффективное напряжение, действующее на ЖК, поэтому чем меньше напряжение питания, тем позже достигается максимум дифракционной эффективности. Из приведенных зависимостей видно, что исследуемые структуры в широком диапазоне питающих напряжений обладают ярко выраженной нелинейностью модуляционных характеристик: они имеют помимо возрастающего также и убывающий участок, причем на последнем участке для структуры с фотопроводниковым слоем Sb_2S_3

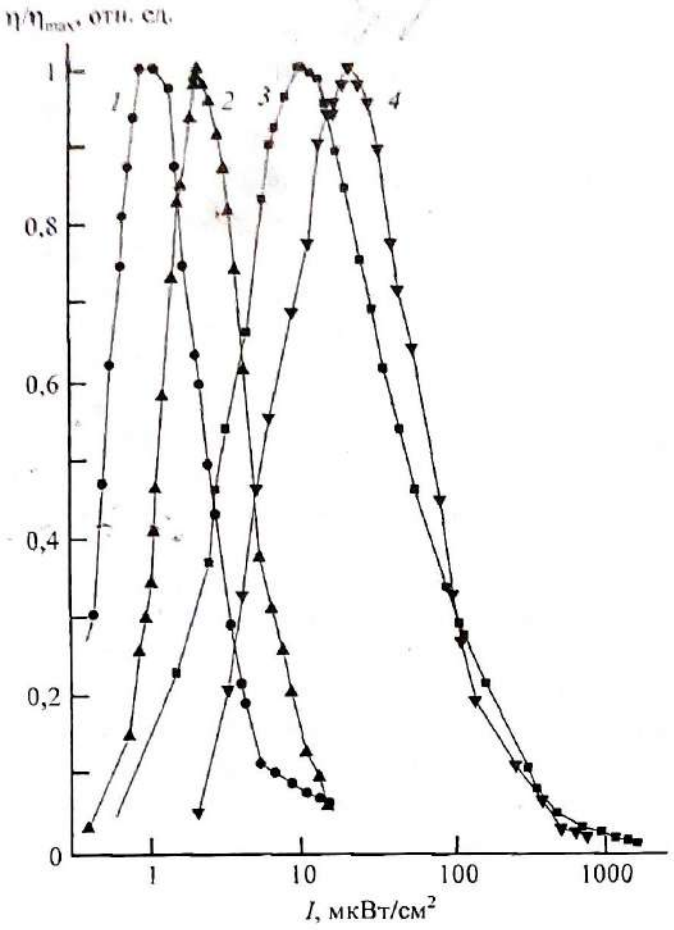

Рис. 1. Зависимости относительной дифракционной эффективности от интенсивности записывающего излучения для оптически управляемых структур Sb_2S_3–ЖК (*1* – $U = 16$ В, *2* – $U = 8$ В) и $As_{40}Se_{60}$–ЖК (*3* – $U = 12$ В, *4* – $U = 8$ В).

имел место спад дифракционной эффективности до уровня $0{,}05\eta_{max}$ и соответственно $0{,}01\eta_{max}$ для структуры с фотопроводниковым слоем $As_{40}Se_{60}$. При этом следует отметить, что наклон кривых на возрастающем и убывающем участках зависит от управляющего напряжения, что также важно для оптической реализации алгоритмов нечеткой алгебры в голографических корреляционных системах.

Другим важным достоинством предложенных структур явилась их высокая чувствительность к излучению He–Ne-лазера. Графики зависимости чувствительности структур от питающего напряжения приведены на рис. 2. Чувствительность определялась как величина светового потока в одном из двух равных интерферирующих пучков по достижении дифракционной эффективностью значения $0{,}9\eta_{max}$. Пространственная частота записываемой решетки также составляла $\nu = 22$ мм$^{-1}$. Как видно из приведенных зависимостей, чувствительность исследуемых структур в области изменения рабочего напряжения от 5 до 16 В лежит в диапазоне от 2,5 до 0,75 мкВт/см^2 для структуры с фотопроводниковым слоем Sb_2S_3 и в диапазоне от 20 до 4 мкВт/см^2 для структуры с фотопроводниковым слоем $As_{40}Se_{60}$. Следует отметить, что в указанном диапазоне изменения рабочего напряжения дифракционная эффективность исследуемых структур изменялась незначительно и практически не спадала более чем до уровня 0,8 от своего наибольшего значения η_{max}. Измерения проводились на пространственной частоте $\nu = 22$ мм$^{-1}$ (рис. 3).

Разрешение созданных структур характеризуется зависимостью дифракционной эффективности η от пространственной частоты записываемой голографической решетки ν. Графики этих зависимостей, полученные в диапазоне пространственных частот от 12 до 80 мм$^{-1}$ при рабочем напряжении питания $U = 8$ В, обеспечивающем предельную дифракционную эффективность исследуемых структур, приведены на рис. 4. Дифракционная эффективность определялась как $\eta = I_1/I_0$, где I_1 – интенсивность све-

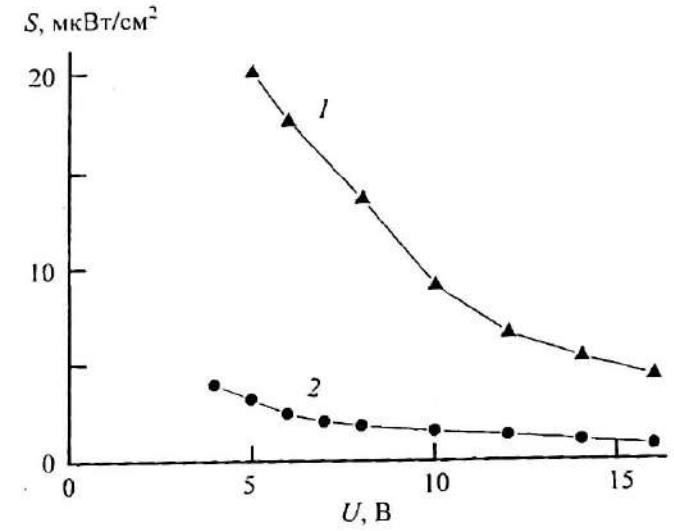

Рис. 2. Зависимость чувствительности оптически управляемых структур $As_{40}Se_{60}$–ЖК (*1*) и Sb_2S_3–ЖК (*2*) от питающего напряжения.

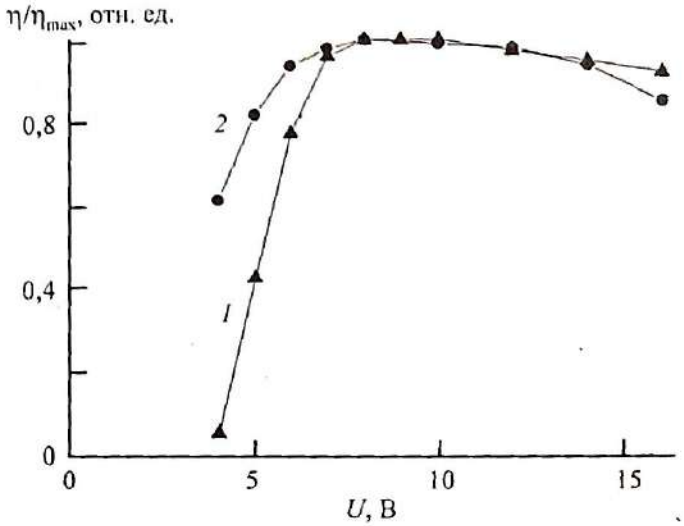

Рис. 3. Зависимость дифракционной эффективности оптически управляемых структур типа $As_{40}Se_{60}$–ЖК (*1*) и Sb_2S_3–ЖК (*2*) от питающего напряжения.

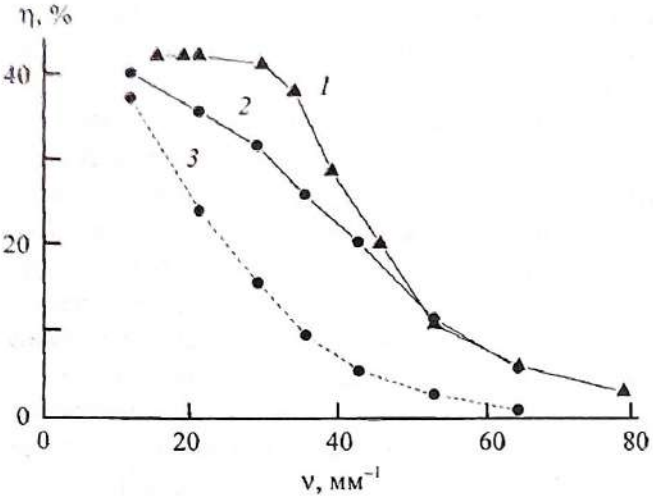

Рис. 4. Разрешение оптически управляемых структур типа $As_{40}Se_{60}$–ЖК (*1* – немодулированные записывающие пучки) и Sb_2S_3–ЖК (*2* – модулированные записывающие пучки T_w/τ_w = 10 с/5 с, *3* – немодулированные записывающие пучки).

та в первом порядке дифракции, а I_0 – интенсивность света, прошедшего через структуру в отсутствие записывающего светового потока (так называемая физическая дифракционная эффективность). Кривая *1* получена для структуры с фотопроводниковым слоем $As_{40}Se_{60}$, решетка формировалась с помощью непрерывного записывающего излучения. Она имеет типичный для структур ХСП–ЖК вид. Основной интерес представляет полученная нами предельная величина дифракционной эффективности, которая в плюс первом порядке составила $\eta_{max(+1)} = 42\%$. В данном случае регистрирующая среда вполне отвечает критерию тонких голограмм, а столь высокая дифракционная эффективность, превышающая теоретический предел для случая тонких голограмм, связана с отклонением профиля штриха формируемой в слое ЖК решетки от симметричного, что приводит к асимметрии порядков дифракции. Действительно, измеренная нами предельная дифракционная эффективность в минус первом порядке составила только $\eta_{max(-1)} = 11\%$. Возникновение несимметричного профиля штриха при голографической записи мы наблюдали ранее при исследовании структур типа фотополупроводник–ЖК с фоточувствительным слоем в виде *p–i–n*-диода из аморфного гидрогенизированного кремния и нематического ЖК с планарной начальной ориентацией [4, 5]. Кривая *3*, характеризующая разрешение оптически управляемой структуры с фотопроводниковым слоем Sb_2S_3, получена также при формировании решетки с помощью непрерывного записывающего излучения. И в этом случае наблюдается асимметрия порядков дифракции: предельная дифракционная эффективность в плюс первом порядке составила $\eta_{max(+1)} = 37\%$, в то время как предельная дифракционная эффективность в минус первом порядке составила лишь $\eta_{max(-1)} = 20\%$. Однако нам удалось поднять предельную величину дифракционной эффективности в плюс первом порядке до $\eta_{max(+1)} = 40\%$ путем осуществления временной модуляции записывающих пучков (меандр с длительностью светового импульса $\tau_w = 5$ с и периодом следования $T_w = 10$ с – кривая *2* на рис. 4). При этом разрешение структуры существенно улучшилось – дифракционная эффективность увеличилась во всем диапазоне пространственных частот, а в диапазоне от 50 до 80 мм$^{-1}$ кривые *1* и *2* практически совпали. В случае $As_{40}Se_{60}$ временная модуляция записывающих пучков эффекта увеличения дифракционной эффективности, наблюдаемого на стибните, не дала.

Для лучшего понимания влияния динамики засветки на величину дифракционной эффективности было исследовано быстродействие структуры $As_{40}Se_{60}$–нематический ЖК. Оно определяется временами электрооптического отклика нематического ЖК и постоянной времени структуры фотопроводник–ЖК. Голограмма в структуре $As_{40}Se_{60}$–нематический ЖК при постоянном напряжении питания $U_{SLM} = 8$ В и оптимальном записывающем потоке формируется за время $t_{вкл} = 350$ мс (по уровню $0{,}9\eta_{max}$), релаксационное разрушение голограммы при отключении потока записи происходит за $t_{выкл} = 450$ мс (по уровню $0{,}1\eta_{max}$). Эти же характерные параметры при напряжении питания $U_{SLM} = 10$ В составляют $t_{вкл} = 300$ мс, $t_{выкл} = 500$ мс соответственно. В случае использования в качестве фотопроводника стибнита несколько бо́льшая (по сравнению с селенидом мышьяка) постоянная времени структуры обусловлена наличием на границе стибнит–ЖК большого количества вакантных состояний (ловушек) с длительным временем релаксации. Экспериментально полученное время включения такой структуры при питании постоянным напряжением 8 В составило 120 мс при времени выключения 800 мс.

Определенные по такой методике параметры описывают фактически воздействие на оптически управляемую структуру только одиночного записывающего светового импульса. На практике же существует множество режимов работы модулирующих структур, когда на них воздействует последовательность импульсов записи. В случае реверсивной записи голограмм при увеличении частоты перезаписи процесс релаксационного стирания предыдущей голограммы не успевает реализоваться полностью и остается некоторая остаточная дифракционная эффективность η_{min}, в то время как величина реализуемой в цикле записи предельной дифракционной эффективности η_{max} может и снижаться. Формальное использование традиционной методики исследования быстродействия в таких случаях

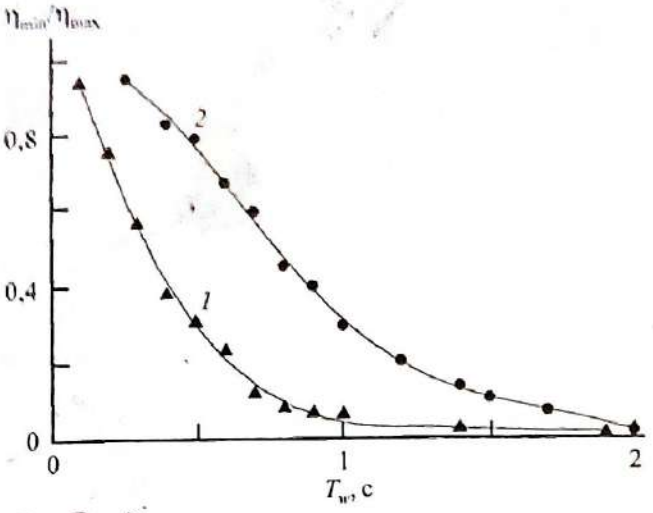

Рис. 5. Зависимость отношения дифракционной эффективности остаточной решетки к максимальной дифракционной эффективности, достигаемой в цикле записи, от периода следования импульсов записи T_w для оптически управляемых структур типа $As_{40}Se_{60}$–ЖК (*1*) и Sb_2S_3–ЖК (*2*).

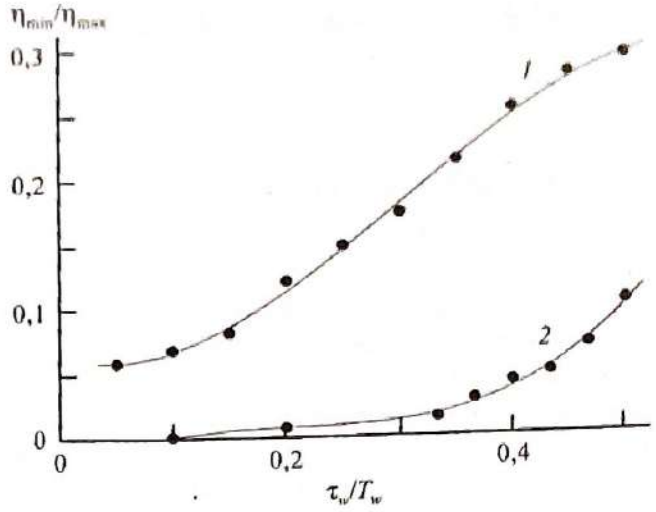

Рис. 6. Зависимость отношения дифракционной эффективности остаточной решетки к максимальной дифракционной эффективности, достигаемой в цикле записи, от отношения длительности импульса записи τ_w к периоду следования импульсов записи T_w для оптически управляемой структуры типа Sb_2S_3–ЖК (*1* – T_w = 1 с, *2* – T_w = 1,5 с).

равносильно игнорированию процессов неполного стирания и накопления в модулирующих структурах, а оценка времени цикла $t_{цикл}$ при работе в частотном режиме реверсивной записи голограмм как суммы времени включения и времени выключения часто дает необоснованно завышенный результат. Поэтому для исследования быстродействия оптически управляемых структур, используемых в режимах реверсивной записи голограмм, мы применяем методику, основанную на записи голограмм плоских волн с синхронной модуляцией во времени интенсивности опорного и объектного пучков, причем при изменении частоты модуляции проводится оценка величин η_{min} и η_{max}, что позволяет судить о скорости процессов формирования и разрушения голограмм в структурах.

На рис. 5 для исследуемых структур представлена зависимость отношения дифракционной эффективности остаточной решетки к максимальной дифракционной эффективности, достигаемой в цикле записи, от периода следования световых импульсов записи T_w. Отношение периода следования световых импульсов к их длительности составляло $T_w/\tau_w = 2$. Питание осуществлялось постоянным напряжением 8 В. Для структуры с фотопроводниковым слоем $As_{40}Se_{60}$ (кривая *1*, пространственная частота записываемой решетки составляла 22 мм$^{-1}$) для периода следования импульсов записи T_w = 1,4 с отношение η_{min}/η_{max} = 0,019, т. е. остаточная решетка практически отсутствует. При T_w = 0,7 с это отношение η_{min}/η_{max} = 0,11. Для структуры с фотопроводниковым слоем Sb_2S_3 (кривая *2*, пространственная частота записываемой решетки составляла 12 мм$^{-1}$) видно, что при периоде следования импульсов записи T_w = 2 с (частота следования импульсов f_w = 0,5 Гц) отношение η_{min}/η_{max} = 0,013, т. е. остаточная решетка практически отсутствует. При T_w = 1,5 с это отношение η_{min}/η_{max} = 0,1.

Однако при детальном исследовании структуры с фотопроводниковым слоем Sb_2S_3 удалось обнаружить влияние скважности импульсов записи на отношение дифракционной эффективности остаточной решетки к максимальной дифракционной эффективности, достигаемой в цикле записи. Из зависимости отношения η_{min}/η_{max} от отношения длительности импульса записи τ_w к периоду следования импульсов записи T_w (рис. 6), полученной при тех же условиях (напряжение питания структуры U = 8 В, ν = 12 мм$^{-1}$), видно, что, уменьшая длительность импульса записи τ_w, можно существенно уменьшить остаточную решетку. Влияния изменения скважности импульсов записи на отношение дифракционной эффективности остаточной решетки к максимальной дифракционной эффективности, достигаемой в цикле записи для структуры $As_{40}Se_{60}$–нематический ЖК, обнаружить не удалось. Это объясняется тем, что, как правило, возможность улучшения характеристик за счет изменения способа засветки существует для веществ, обладающих несовершенной структурой с большим количеством вакантных состояний. Поэтому при сжатии импульса и увеличении временного интервала между импульсами возможен выход на режим, когда за время длительности импульса (время измерения) основная часть возбужденных носителей не успевает быть захвачена ловушками. За время же между им-

пульсами (когда измерения не проводятся) успевает произойти не только захват носителей, но и спонтанная релаксация.

Основные результаты и выводы

На основании проведенных исследований спектральных характеристик фотопроводников As_xSe_{1-x} и Sb_2S_3 оптимальными для записи решетки излучением He–Ne-лазера были признаны слои $As_{40}Se_{60}$ и Sb_2S_3.

С использованием этих слоев были созданы и исследованы по голографической методике оптически управляемые структуры типа фотопроводник–жидкий кристалл. Исследования показали, что эти структуры обладают дифракционной эффективностью до 42%, чувствительностью до 0,75 мкВт/см^2 и возможностью реализации нелинейных модуляционных характеристик.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования разработанных и исследованных оптически управляемых структур для моделирования нелинейных алгоритмов обработки информации.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ (проект № 03-01-00825-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Павлов А.В.* Об алгебраических основаниях Фурье-голографии // Опт. и спектр. 2001. Т. 90. В. 3. С. 515–520.

2. *Чайка А.Н., Владимиров Ф.Л.* Нелинейная запись голограмм на оптически управляемом транспаранте типа халькогенидный стеклообразный полупроводник–жидкий кристалл // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 4. С. 9–13.

3. *Владимиров Ф.Л., Чайка А.Н., Моричев И.Е., Плетнева Н.И., Наумов А.Ф., Локтев М.И.* Исследование модуляционных характеристик оптически управляемых транспарантов на основе структур фотопроводник–жидкий кристалл // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 8. С. 14–19.

4. *Иванова Н.Л., Онохов А.П., Чайка А.Н.* Реверсивная запись интерференционных решеток с дифракционной эффективностью свыше 50% на структурах "аморфный гидрогенизированный кремний–нематический жидкий кристалл" // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 16. С. 57–61.

5. *Berenberg V.A., Chaika A.N., Ivanova N.L. and Onokhov A.P.* Phase OA LC SLMs for record of thin dynamic holographic correctors with diffraction efficiency over 50% // Proc. SPIE. 2002. V. 4493. P. 239–244.