

07

Оптически управляемая структура $As_{50}Se_{50}$ — жидкий кристалл с высокой чувствительностью к излучению гелий-неонового лазера

© Л.П. Амосова, А.Н. Чайка

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

E-mail: l_amosova@mail.ru

Поступило в Редакцию 28 сентября 2006 г.

Проведено исследование по голографической методике оптически управляемой структуры As_xSe_{1-x} — жидкий кристалл (ЖК) с отклонением состава фотопроводника от стехиометрии в сторону избытка мышьяка. Показано, что структура с максимально возможным содержанием мышьяка в фотопроводнике $As_{50}Se_{50}$ — ЖК обладает рекордно высокой чувствительностью ($2.2 \cdot 10^{-7} \text{ W/cm}^2$) на длине волны гелий-неонового лазера. Это дает возможность реализации нелинейных алгоритмов оптической обработки информации за счет использования для работы всей передаточной характеристики структуры, включая инверсный участок. Максимальная дифракционная эффективность структуры $As_{50}Se_{50}$ — ЖК составила 36.5%.

PACS: 42.70.Nq

Ранее нами сообщалось об использовании тонких аморфных пленок селенида мышьяка стехиометрического состава $As_{40}Se_{60}$ в качестве фоточувствительного слоя оптически управляемой структуры фотопроводник — жидкий кристалл (ФП — ЖК) [1]. В режиме реверсивной записи голограмм излучением гелий-неонового лазера эта структура показала высокую чувствительность $4 \cdot 10^{-6} \text{ W/cm}^2$ при дифракционной эффективности до 42% (в режиме формирования в слое ЖК решетки с несимметричным профилем штриха [2]) и наличием четко выраженного инверсного участка передаточной характеристики, позволяющего использовать структуру для реализации нелинейных алгоритмов обработки в схемах Фурье-голографии. Если говорить о наибольшей достигнутой чувствительности при реверсивной записи голограмм на

длине волны гелий-неонового лазера, то она была получена в той же работе на оптически управляемой структуре Sb_2S_3 –ЖК и составила $7.5 \cdot 10^{-7} \text{ W/cm}^2$ [1,3].

Настоящая работа является продолжением исследований по поиску оптически управляемых структур, пригодных для реверсивной записи и обладающих высокой чувствительностью на длине волны 633 нм. Проведенная нами сравнительная оценка продольной фотопроводимости слоев $As_{40}Se_{60}$ и $As_{50}Se_{50}$ толщиной $1 \mu\text{m}$ на этой длине волны показала более высокую продольную фотопроводимость состава $As_{50}Se_{50}$, что позволяло ожидать и повышения чувствительности всей структуры ФП–ЖК при использовании в ней такого фотопроводника. На основании этого был изготовлен экспериментальный образец структуры с новым фотопроводником $As_{50}Se_{50}$, в остальном идентичный исследованному ранее в работе [1] образцу структуры $As_{40}Se_{60}$ –ЖК: в качестве светомодулирующего слоя использовался тот же нематический жидкий кристалл ЖКМ-1630Б ($\Delta n = 0.13$) с *S*-ориентацией и толщиной слоя $10 \mu\text{m}$, в качестве ориентирующих слоев были использованы покрытия, полученные методом косоугольного напыления оксида GeO.

Были проведены исследования основных голографических характеристик изготовленного образца структуры в режиме реверсивной записи голограмм по методике, применявшейся ранее [1–3] при исследовании структур на основе фотополупроводников Sb_2S_3 и $As_{40}Se_{60}$. На фоточувствительном слое структуры формировалась картина интерференции двух когерентных пучков с плоскими волновыми фронтами. Для этой цели использовалось излучение гелий-неонового лазера. Считывание осуществлялось излучением полупроводникового лазерного диода ($\lambda_k = 814 \text{ nm}$) в режиме на просвет, причем направление вектора поляризации считывающего света совпадало с ориентацией директора ЖК исследуемой структуры. 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.

Экспериментально полученная зависимость чувствительности *S* оптически управляемой структуры $As_{50}Se_{50}$ –нематический ЖК от величины питающего напряжения *U* представлена на рис. 1. Измерения проводились в диапазоне рабочих напряжений, обеспечивающих получение наибольших значений дифракционной эффективности на пространственной частоте $\nu = 18 \text{ mm}^{-1}$. Отношение интенсивностей

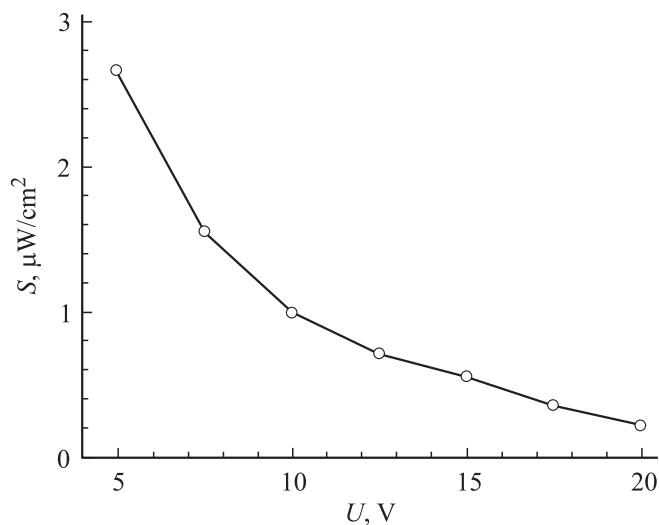


Рис. 1. Чувствительность оптически управляемой структуры $\text{As}_{50}\text{Se}_{50}$ –нематический ЖК по уровню $0.9\eta_{\text{max}}$ при записи на длине волны 633 nm (He–Ne лазер).

объектного и референтного пучков здесь и далее выбиралось равным 1. Чувствительность определялась как величина светового потока в одном из двух интерферирующих пучков по достижении дифракционной эффективностью значения $0.9\eta_{\text{max}}$. Чувствительность исследуемой структуры при записи на длине волны 633 nm в области изменения рабочего напряжения от 5 до 20 V лежит в диапазоне от $2.7 \cdot 10^{-6}$ до $2.2 \cdot 10^{-7} \text{ W}/\text{cm}^2$.

На рис. 2 приведены графики зависимости величины дифракционной эффективности записываемых в исследуемой структуре решеток от интенсивности записывающего излучения в одном из двух интерферирующих пучков при различных величинах питающего напряжения. Пространственная частота в данном случае также составляла 18 mm^{-1} . Как видно из приведенных зависимостей, полученная в эксперименте предельная величина дифракционной эффективности в плюс первом порядке для оптически управляемой структуры $\text{As}_{50}\text{Se}_{50}$ –нематический ЖК составила $\eta_{+1} = 36.5\%$ (при 10 и 15 V) и лишь немного меньше в об-

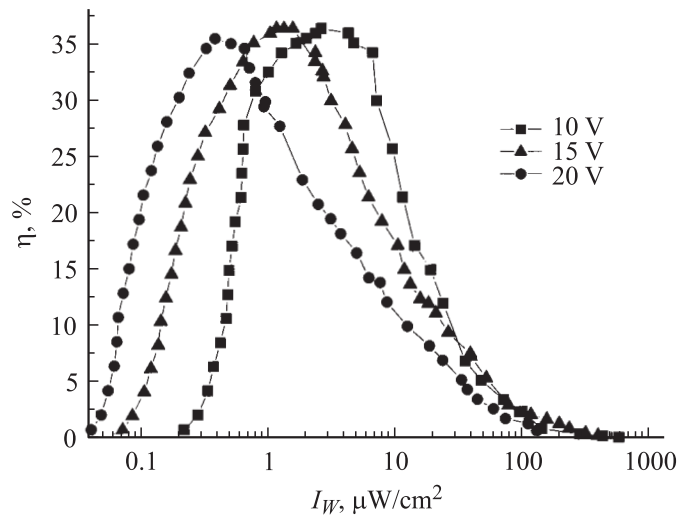


Рис. 2. Модуляционные характеристики структуры $As_{50}Se_{50}$ — нематический ЖК при различных величинах питающего напряжения.

ласти наибольшей чувствительности — 35.5% (при 20 В). Для данного образца наблюдались отклонение профиля штриха формируемой решетки от симметричного и неравенство смежных порядков Фурье-спектра дифракции, что и приводило к столь высокому значению дифракционной эффективности в одном из порядков. Возникающая асимметрия наблюдалась ранее и характерна для режима голографической записи на некоторых структурах типа фотополупроводник — нематический ЖК с планарной начальной ориентацией [1–4].

О разрешении исследуемой структуры можно судить по графику зависимости максимальной дифракционной эффективности от пространственной частоты записываемой на структуре голографической решетки (рис. 3). Кривая получена при величине питающего напряжения 20 В, соответствующего режиму работы с наибольшей чувствительностью. Спад дифракционной эффективности до уровня 0.5 наблюдался на пространственной частоте $\nu = 40 \text{ mm}^{-1}$.

Если в качестве модели для описания нашего бинарного соединения воспользоваться моделью полностью химически упорядоченной струк-

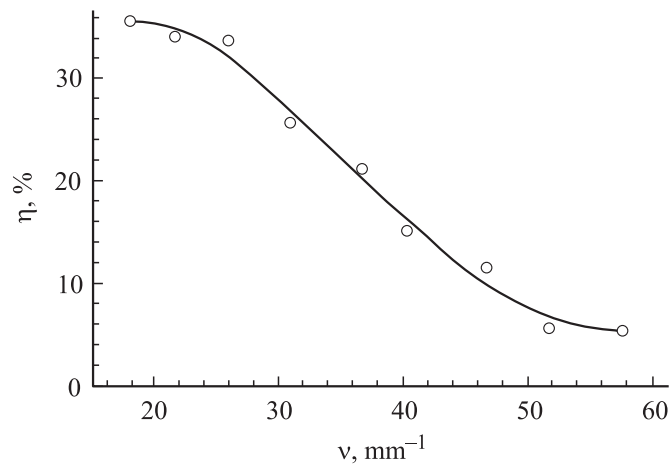


Рис. 3. Зависимость дифракционной эффективности от пространственной частоты решетки, записываемой на структуре $\text{As}_{50}\text{Se}_{50}$ – нематический ЖК (питающее напряжение 20 В).

турной сетки, где каждый атом мышьяка связывается только с атомами селена, число которых отвечает его нормальной химической валентности (трем), то избыток любого из элементов должен приводить к уменьшению проводимости и, следовательно, фоточувствительности [5]. В рамках таких представлений стехиометрический состав $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$ представляет собой трехмерное ковалентно-увязанное химическое соединение, обладающее максимальной симметрией областей перекрытия валентных орбит. Повышение содержания мышьяка сверх стехиометрии приводит к нарушению симметрии валентных связей и затрудняет движение фотоносителей. Уменьшение дрейфовой подвижности объясняется тем, что „лишние“ атомы мышьяка действуют как центры прилипания дырок. Таким образом, дрейфовая подвижность носителей в $\text{As}_{50}\text{Se}_{50}$ должна бы быть меньше, чем в $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$, что должно приводить к потере чувствительности.

Наблюдаемое нами увеличение чувствительности может быть связано с увеличением либо квантового выхода, либо подвижности, либо времени жизни носителей. Сильной зависимости квантового выхода от состава ожидать нет оснований, поскольку максимумы спектральной

чувствительности (а значит, и ширины запрещенных зон) обоих составов очень близки друг к другу [1,6]. Подвижности и времена жизни носителей должны быть максимальными для вещества с максимальной упорядоченностью структуры. Рост этих величин с увеличением содержания мышьяка сверх стехиометрии свидетельствует о том, что в напыленных на холодную подложку и неотожженных пленках состава $As_{40}Se_{60}$ при соблюдении атомной процентной концентрации исходного вещества, номинально соответствующей стехиометрическому составу, фаза полного химического упорядочения, в которой все связи являются гетерополярными, не реализуется. Подобное увеличение чувствительности фотопроводников ряда As_xSe_{x-1} с увеличением содержания мышьяка сверх стехиометрии наблюдалось также для закаленных в воде массивных образцов [6]. В соединении же $As_{50}Se_{50}$ из-за нехватки селена химическое упорядочение в любом случае не может быть полным. Существует определенное количество гомополярных связей As–As. Характерными координационными дефектами в соединениях $As_{40}Se_{60}$ и $As_{50}Se_{50}$ являются пары дефектов As_2^- и As_4^+ [7,8]. В составах с избытком мышьяка таких пар дефектов больше, чем дефектов Se_1^- и Se_3^+ , и при определенных условиях они могут проявлять себя как легирующие (или, как принято говорить о примесях в халькогенидных стеклообразных полупроводниках, модифицирующие) примеси, повышающие проводимость и чувствительность. Основное условие — не подвергать пленку отжигу, а при исследовании объемных образцов стекла — закаливать их в воде. Выполнение этих условий приводит к „замораживанию“ явно неравновесного состояния. Помимо координационных для системы As_xSe_{x-1} характерны дефекты, связанные с проявлением химическими элементами аномальной валентности [5]. При этом „неправильную“ валентность, равную 3, проявляет в основном селен [7–9]. Тогда дополнительные дефекты, создаваемые избытком мышьяка в соединении $As_{50}Se_{50}$, могут компенсировать собственные дефекты, повышая проводимость и фоточувствительность.

В заключение важно отметить наличие убывающего участка для модуляционных кривых (рис. 2), на котором спад дифракционной эффективности составляет более 200 крат по сравнению с максимальным значением. Такой участок необходим для реализации ряда практически значимых моделей обработки информации оптическими процессорами в задаче создания искусственного интеллекта [10]. Наклон кривых на возрастающем и убывающем участках зависит от управляющего

напряжения, что важно для оптической реализации таких алгоритмов обработки, когда задача требует возможности изменения параметров нелинейных характеристик в процессе работы.

Работа выполнена в рамках проекта РНП.2.1.1.1089.

Список литературы

- [1] Амосова Л.П., Плетнева Н.И., Чайка А.Н. // ОЖ. 2005. Т. 72. № 6. С. 57–62.
- [2] Иванова Н.Л., Онохов А.П., Чайка А.Н. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 16. С. 57–61.
- [3] Амосова Л.П., Моричев И.Е., Плетнева Н.И., Чайка А.Н. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 9. С. 1–5.
- [4] Berenberg V.A., Chaika A.N., Ivanova N.L. et al. // Proc. SPIE. 2002. V. 4493. P. 239–244.
- [5] Бродски М. Аморфные полупроводники. М.: Мир, 1982. С. 270–281. (Пер. с англ.: *Amorphous Semiconductors* / Ed. by M.H. Brodsky. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1979).
- [6] Seinosuke Onari, Kazuhiko Yamamoto, Tadashi Kitahara, Toshihiro Arai // Japanese Journal of Applied Physics. 1980. V. 19. N 6B. P. 1083–1088.
- [7] Gang Chen, Himanshu Jain, Syed Khalid, Jun Li, David A. Drabold, Stephen R. Elliott // Solid State Communication. 2001. V. 120. P. 149–153.
- [8] Shpotyuk O.I., Balitska V., Filipecky J. // Journal of Physics: Conference Series. 2005. V. 21. P. 81–86.
- [9] Shpotyuk O.I. // Opto-Electronics Review. 2003. V. 11. N 1. P. 19–25.
- [10] Павлов А.В. // Оптика и спектроскопия. 2005. Т. 98. В. 6. С. 1033–1037.