

ного окна модулятора в диапазоне спектра $\lambda = 1,0 \div 2,0$ мкм. Максимально достижимый контраст составил 12,4:1 при напряжении питания ПВМС 5,5 кВ, $\lambda_{сч} = 632,8$ нм.

При записи оптической информации на больших пространственных частотах, при которых длина диффузии неравновесных электронов сравнима с шагом записываемой решетки (~ 1 мкм), величина РС прибора существенно зависит от расплывания пространственного заряда. Заселенность центров $E = 1,3 \div 0,8$ эВ в силленитах германия и кремния влияет на время жизни носителей заряда τ в зоне проводимости [10]. Опустошение этих уровней приводит к уменьшению величины τ , что изменяет длину диффузии возбужденного электрона L , которая в полупроводниках имеет корневую зависимость от τ :

$$L = \sqrt{(\mu\tau/e)kT},$$

где μ — подвижность электронов, e — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, T — температура по шкале Кельвина. Таким образом, предварительная подсветка модулятора ($\lambda = 550 \div 1000$ нм) при записи оптической информации уменьшает длину диффузии электронов из освещенных областей кристалла в неосвещенные, в результате происходит снижение расплывания записываемых изображений.

Таким образом, обнаружено, что при стирании оптической информации в многослойных структурах на основе кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ светом с $\lambda = 550 \div 1000$ нм видность изображений увеличивается в 1,5—2 раза, а разрешающая способность (определяемая по уровню $m = 0,05$) возрастает более чем в 2 раза. В этих же условиях максимально достижимый контраст повышается со 160:1 до 220:1.

На структурах МД($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$)ДМ, предварительно экспонированных синим светом, осуществлена запись оптической информации в диапазоне спектра $\lambda = 1,0 \div 2,0$ мкм с максимальным контрастом 12,4:1.

Авторы выражают благодарность В. К. Малиновскому за предложение темы, постоянный интерес к работе и всестороннее обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. How S. L., Oliver D. S. Pockels readout optical memory using $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$.— Appl. Phys. Lett., 1974, vol. 18, N 8.
2. Грехов Ю. Н. и др. Пространственно-временной модулятор света на монокристалле $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$.— Письма в ЖТФ, 1976, т. 2, вып. 10.
3. Клико А. Т. и др. Пространственно-временные модуляторы света на монокристаллах $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$.— Автометрия, 1976, № 4.
4. Хоменко А. В., Ковалев Н. Н., Петров М. П. Оптическая запись информации в ПРОМ-структуре на основе $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$.— Письма в ЖТФ, 1976, т. 2, вып. 23.
5. Бережной А. А., Гуревич В. З., Морозов С. В., Попов Ю. В. Запись оптической информации в кристаллах силиката висмута.— Письма в ЖТФ, 1976, т. 2, вып. 5.
6. Lipson S. G., Nisenso P. Imaging characteristics of the Itek PROM.— Appl. Opt., 1974, vol. 13, N 9.
7. Гусев В. А., Гудаев О. А., Деменко С. И. Влияние света на время жизни неравновесных носителей заряда в силленитах германия и кремния.— Автометрия, 1983, № 5.
8. Кейсесент Д. Пространственные модуляторы света.— ТИИЭР, 1977, т. 65, № 1.
9. Камшилин А. А., Петров М. П. Инфракрасное гашение фотопроводимости и голографическая запись в силикате висмута.— ФТТ, 1981, т. 23, вып. 10.
10. Гудаев О. А. и др. Уровни энергии в запрещенной зоне кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$.— Автометрия, 1981, № 5.
11. Гусев В. А., Детиненко В. А., Соколов А. П. О природе фотохромного эффекта в силленитах германия, кремния и титана.— Автометрия, 1983, № 5.

Поступило в редакцию 17 марта 1983 г.

УДК 535.8 : 535.241.13

В. В. АЗАРОВА, В. А. СЫЧЕВ, В. Ф. ТРУХИН
(Москва)

ФОТОПОЛЯРИЗАЦИЯ СИЛИКАТА ВИСМУТА В МОДУЛЯТОРЕ ПРОМ

Сочетание высокой светочувствительности с электрооптическими свойствами в силикате висмута позволяет создавать на его основе эффективные пространственные модуляторы света типа ПРОМ и ПРИЗ [1]. К настоящему времени установлено, что поле в кристалле формируется объемным распределением отрицательных и положительных зарядов [2, 3], что связано с наличием у кристалла глубоких ловушечных уровней при одновременном отсутствии мелких [4]. Однако вопрос о распределении заряда и поля в кристалле в настоящее время остается открытым.

В данной работе рассматривается одномерная модель фотополяризации кристалла силиката висмута, позволяющая найти эти распределения, и приводятся результаты расчетов для конкретного образца модулятора при заданных условиях записи.

• При создании модели записи использовались следующие приближения и допущения, вытекающие из анализа физических характеристик силиката висмута:

поглощение записывающего излучения со спектральной характеристикой $I(\lambda)$ происходит с примесных уровней, что позволяет считать положительно ионизированные центры неподвижными;

вероятность захвата электрона на ловушку характеризуется обратной величиной феноменологического времени жизни электрона в зоне проводимости τ , причем число центров захвата велико по сравнению с числом фотоиндуцируемых носителей;

электроны, дошедшие до границы раздела полупроводник — диэлектрик, захватываются на поверхностные состояния и не рекомбинируют.

Распределения плотностей положительного заряда $\rho^+(x)$ и рожденных электронов $\rho_p^-(x)$ по толщине кристалла определяются согласно закону Бугера и предположению о неподвижности ионизированных центров:

$$\rho^+(x) = -\rho_p^-(x) = -\int_{\lambda} e\alpha(\lambda)\eta(\lambda)\lambda\frac{I(\lambda)\tau_0}{hc}\exp(-x\alpha(\lambda))d\lambda. \quad (1)$$

Здесь e — заряд электрона, λ — длина волны, τ_0 — время экспозиции, $I(\lambda)$ — спектральное распределение плотности мощности излучения, $\alpha(\lambda)$ — спектральный коэффициент поглощения, $\eta(\lambda)$ — квантовый выход, h — постоянная Планка, c — скорость света.

Под действием поля электроны дрейфуют через кристалл, перераспределяются по его толщине за счет захвата на ловушки, образуя неподвижный заряд с плотностью $\rho^-(x)$. Вероятность $P(x', x)$ перехода электроном из точки x' в точку x равна

$$P(x', x) = \exp(-t/\tau) = \exp\left(-\int_{x'}^x \frac{dx''}{\mu\tau E(x'')}\right),$$

где t — время дрейфа, μ — подвижность электрона, $E(x)$ — напряженность электрического поля.

Величина заряда, захваченного на ловушки в интервале $x \div x + dx$, пропорциональна изменению вероятности $dP(x', x)$ на этом же интервале, а следовательно, и плотность захваченных зарядов пропорциональна производной $dP(x', x)/dx$. Таким образом, распределение плотности отрицательных зарядов в объеме кристалла описывается выражением

$$\rho^-(x) = \frac{1}{\mu\tau E(x)} \int_0^x \rho_p^-(x') \exp\left[-\int_{x'}^x \frac{dx''}{\mu\tau E(x'')}\right] dx'. \quad (2)$$

Электрическое поле в кристалле является суперпозицией полей, создаваемых внешним источником и распределением зарядов $\rho(x)$. Собственное поле объемного заряда $\rho(x)$ определяется из уравнения Пуассона:

$$E_s(x) = \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_{\Pi}} \int_0^x \left\{ \rho^+(x) - \frac{1}{\mu\tau E(x)} \int_0^x \rho_p^-(x') \exp\left(-\int_{x'}^x \frac{dx''}{\mu\tau E(x'')}\right) dx' \right\} dx. \quad (3)$$

Из условия замкнутости электрической цепи, подключенной к источнику с напряжением, находим выражение для суммарного поля:

$$E(x) = \frac{\varepsilon_{\Pi}}{2\varepsilon_{\Pi}d_{\Pi} + \varepsilon_{\Pi}d_{\Pi}} \left(V_0 + \int_0^{d_{\Pi}} E_s(x) dx \right) - E_s(x). \quad (4)$$

Здесь ε_{Π} , ε_{Π} , d_{Π} , d_{Π} — диэлектрические проницаемости и толщины полупроводника и диэлектрика. Таким образом, система уравнений (1) — (4) позволяет рассчитать поля и заряды в объеме полупроводника итерационным методом.

На рис. 1 представлены характерные результаты расчета поля и заряда в кристалле силиката висмута толщиной 100 мкм модулятора ПРОМ. Запись изображения на него производится при разных полярностях освещаемого электрода излучением люминофора марки К-71, спектральная характеристика люминесценции которого имеет максимум при $\lambda = 460$ нм и ширину около 60 нм (по уровню 0,5). Из рисунка видно, что независимо от полярности со стороны отрицательного электрода в кристалле образуется слой положительного заряда. Толщина этого слоя уменьшается до $15 \div 20$ мкм с увеличением экспозиции от 10 до 420 мкДж/см². Отрицательный

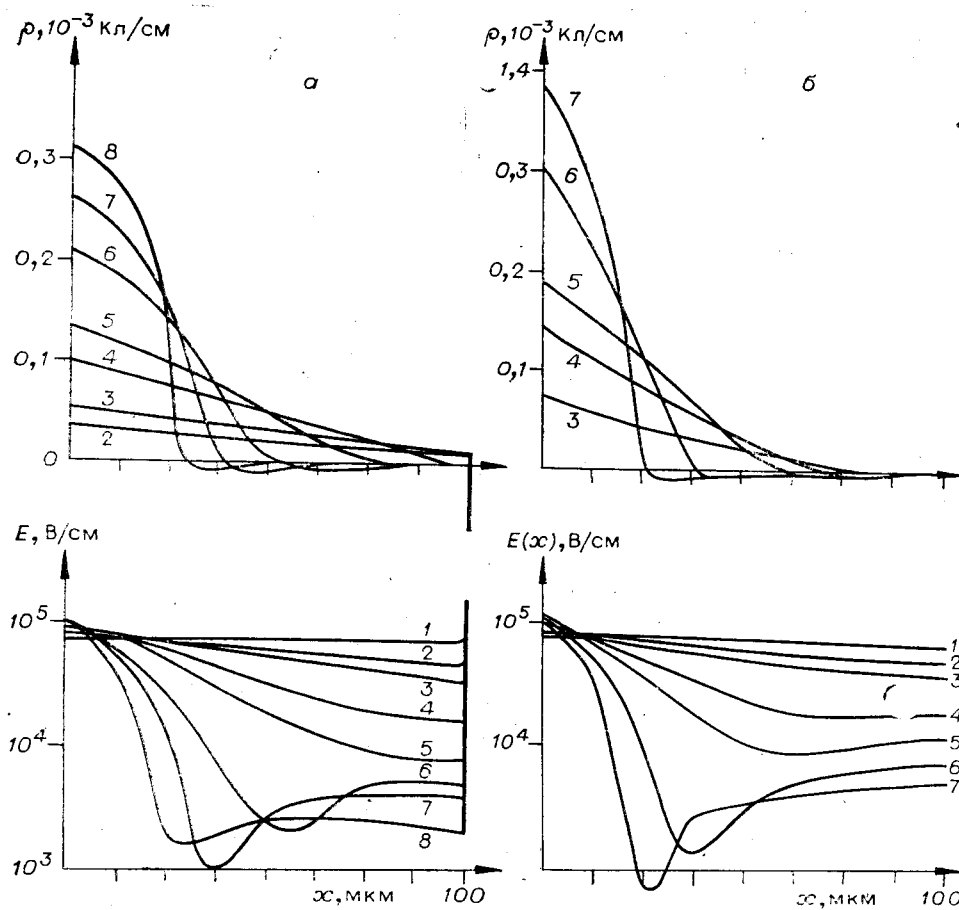


Рис. 1. Распределение заряда и поля в силикате висмута:
 а — освещаемый положительный электрод, б — отрицательный. Толщина силиката висмута 100 мкм, напряжение на модуляторе $V_0 = 2000$ В, $\mu_t = 10^{-7}$ см²/В. Энергия записи: 1 — 10, 2 — 50, 3 — 80, 4 — 150, 5 — 200, 6 — 320, 7 — 400, 8 — 420 мкДж.

заряд уходит на границу кристалла. При экспозициях, больших 150 мкДж, в объеме кристалла накапливается небольшой отрицательный заряд плотностью $\sim 10^{-5}$ Кл/см, что приводит к «провисанию» поля, выраженного более ярко при засветке модулятора со стороны отрицательного электрода. Незначительное различие в распределении поля для случаев разной полярности освещаемых электродов, представленных на рис. 1, а, б, объясняется широким спектром записывающего излучения, вызывающего почти однородную по толщине скорость генерации электронно-дырочных пар. В случае использования монохроматического излучения распределение полей становится существенно различным; «провисание» потенциала возникает только при записи на модулятор со стороны отрицательного электрода.

На рис. 2 приведены зависимости напряжения на кристалле от экспозиции, найденные теоретически для двух полярностей освещаемого электрода. Здесь же точками показаны значения напряжения, полученные в эксперименте на образце модулятора ПРОМ с толщиной кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 100 мкм, облучаемого электронно-лучевой трубкой с люминофором К-71. Совпадение результатов свидетельствует о правильности описания предложенной математической моделью физических процессов в приборе.

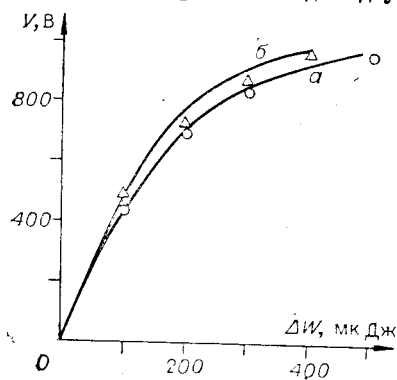


Рис. 2. Зависимость напряжения на кристалле от экспозиции.

Кривые, обозначенные кружками (а) и треугольниками (б), — экспериментальные результаты, сплошные кривые — расчетные; а — освещение со стороны положительного электрода, б — отрицательного.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров М. П. Обработка информации с помощью модуляторов света на основе электрооптических кристаллов.— В кн.: Применение методов оптической обработки информации и голографии. Л.: ЛИЯФ, 1980.
2. Бережной А. А., Заказнов П. Н., Попов Ю. В. Исследование новой возможности записи изображения в кристаллах силиката висмута.— Письма в ЖТФ, 1978, т. 4, вып. 9.
3. Петров М. П., Хоменко А. В., Березкин В. И., Красинькова М. В. Предельная разрешающая способность транспаранта на основе $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$.— Микроэлектроника, 1979, т. 8, вып. 1.
4. Гудаев О. А. и др. Уровни энергии в запрещенной зоне кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GgO}_{20}$.— Автометрия, 1981, № 5.

Поступило в редакцию 17 марта 1983 г.
