

## ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ CdSe(Ag), ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ В ОБЛАСТИ ДЛИН ВОЛН $\lambda = 2-6$ МКМ

Г.И. Березина, И.В. Василищева, Н.А. Довгалева, И.Н. Компанец,  
А.В. Парфенов, И.В. Пиркулов, Ю.М. Попов, Н.А. Прокопов

*Исследованы фотоэлектрические параметры и характеристики пространственно-временной модуляции света структуры типа МДП-ЖК на основе CdSe(Ag) и нематического жидкого кристалла, чувствительной в диапазоне  $\lambda = 2-6$  мкм.*

Известные преобразователи изображений на основе пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) чувствительны в видимом и ближнем (до 1,5 мкм) инфракрасном диапазонах длин волн регистрируемого (управляющего) излучения [1]. Несомненный интерес вызывает поиск новых материалов для создания ПВМС ИК диапазона, работоспособных при комнатной температуре.

В работах [2, 3] были проведены измерения индуцированной примесной фотопроводимости (ИПФ) в кристаллах CdSe, легированных серебром, в среднем диапазоне ИК излучения ( $\lambda = 2-6$  мкм). ИПФ возникает в результате освобождения носителей с ловушек, уровень энергии которых ниже на 0,2 эВ дна зоны проводимости. Результаты исследования спектров ИПФ служат предпосылкой для использования кристаллов CdSe(Ag) в качестве фоточувствительного слоя ПВМС в области излучений от 2 до 6 мкм.

Такой ПВМС со структурой МДП-ЖК [1] реализован в данной работе. Основными элементами структуры являлись слой CdSe(Ag) толщиной  $L_s \sim 500$  мкм и слой нематического жидкого кристалла толщиной  $L_{jc} \sim 10$  мкм. Исходный образец селенида кадмия, имевший удельное сопротивление 1 Ом-см, был компенсирован серебром. В результате его удельное сопротивление возросло до  $10^7 - 10^8$  Ом-см. Соответствующая оценка концентрации примесных уровней дает значение  $N \sim 10^{15} - 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. В качестве входного окна использовалась подложка из фтористого бария с проводящим слоем  $In_2O_3$ . Пропускание окна в указанном ИК диапазоне составляло около 20%. Для ориентации ЖК использовался метод Шатлена. Модуляция считывающего пучка света осуществлялась за счет электрооптического S-эффекта в ЖК.

Использовалась традиционная схема электрических и оптических измерений фотоотклика ПВМС. ИК излучение от лампы накаливания проходило через германиевый фильтр и попадало на структуру, вызывая ИПФ в слое полупроводника. Считывание осуществлялось видимым светом от лампы накаливания на отражение. Для питания использовался источник переменного напряжения.

На рис. 1 (кривая а) приведена измеренная с помощью осциллографа зависимость изменения напряжения  $\Delta V$  непосредственно на слое ЖК от амплитуды напряжения питания  $V$  при возбуждении структуры ИК светом. Насыщение наступает, когда практически все освобожденные с ловушек носители достигают границы полупроводника с жидким кристаллом. Отметим, что зависимость  $\Delta V(V)$  для структуры на основе CdSe(Ag) имеет тот же вид, что и зависимость для структуры на основе полупроводящего GaAs [4], чувствительной в ближней ИК области спектра ( $\lambda = 0,8-1,5$  мкм).

Зависимость электрического отклика структуры от частоты напряжения питания  $f$  имеет вид, характерный для всех преобразователей данного класса и объясняется работой структуры в режиме фотоварактора [5, 6]. Чувствительность фотоварактора максимальна в диапазоне частот питания, при которых длительность полупериода напряжения сравнима со временем существования обедненного слоя, т.е. на частотах 20-50 Гц.

Были определены зависимости электрического отклика структуры от интенсивности фоновой подсветки  $I$  (т.е. от интенсивности считывающего света) и интенсивности  $I_{IR}$  записывающего ИК излучения. Спад  $\Delta V$  с ростом подсветки на малых частотах питания (рис. 2) объясняется экранированием поля в полупроводнике за счет собственной проводимости, связанной с подсветкой и приводящей к сокращению

времени чувствительности структуры. В итоге при питании синусоидальным напряжением и достаточно большом значении  $I$  (в данном случае для  $I = 20 \text{ мВт/см}^2$ ) носители заряда не успевают при положительном полупериоде достичь границы полупроводника и изменить поверхностную плотность заряда на границе с жидким кристаллом. Во время отрицательного полупериода они снова захватываются на ловушки, не внося вклада в изменение  $\Delta V$ . При больших частотах напряжения питания длительность полупериода  $t$  недостаточна для экранирования поля в полупроводнике фототоком, обусловленным воздействием подсветки. В результате зависимость  $\Delta V$  от  $I$  исчезает.

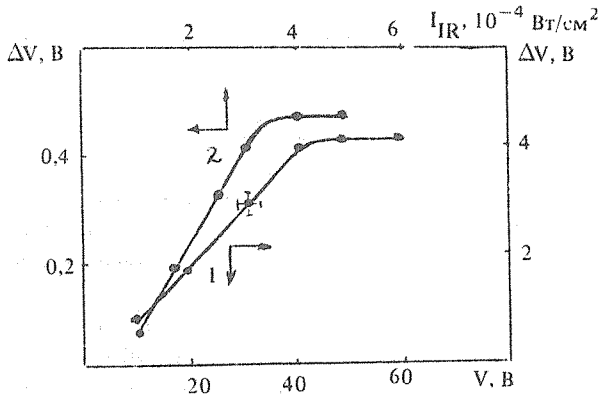


Рис. 1

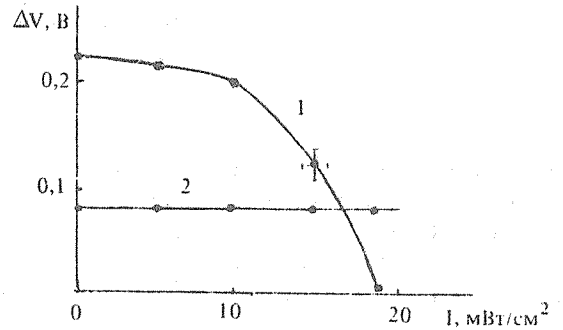


Рис. 2

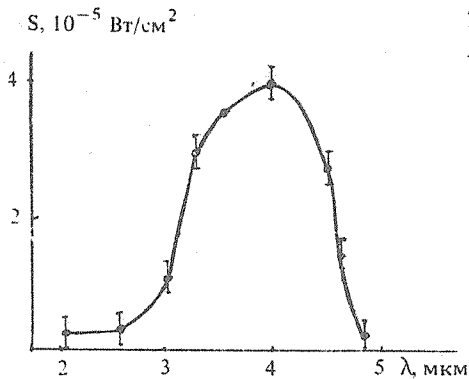


Рис. 3

Рис. 1. Зависимость фотоотклика  $\Delta V$  1) от амплитуды напряжения питания  $V$  при  $f = 25 \text{ Гц}$ ; 2) от интенсивности управляющего ИК излучения  $I_{IR}$  при  $V = 10 \text{ В}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ .

Рис. 2. Зависимость фотоотклика  $\Delta V$  от интенсивности подсветки  $I$  при  $V = 10 \text{ В}$ ,  $f = 25 \text{ Гц}$  (1),  $1,8 \text{ кГц}$  (2).

Рис. 3. Спектральная чувствительность образца S.

Исследование зависимости ИФФ от интенсивности записывающего ИК излучения показало (рис. 1, кривая 2), что  $\Delta V$  линейно растет с увеличением  $I_{IR}$ . Вероятно, режим насыщения достигается при значительном опустошении примесных центров. Оценим число носителей, рождаемых ИК светом в режиме насыщения, т.е. при  $I_{IR} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/см}^2$  (рис. 1, кривая 2). Фототок в полупроводнике описывается выражением

$$i_{ph} = qn_{ph}vA, \quad (1)$$

где  $q$  — заряд электрона,  $n_{ph}$  — число фотоносителей,  $v = \mu E_s$  — скорость электронов в полупроводнике,  $A$  — площадь рабочей поверхности полупроводника. Учитывая, что  $i_{ph} = C_{IC} \Delta V/t$ ,  $E_s = V/L_s$ , получим число носителей

$$n_{ph} = \epsilon_0 \epsilon_{IC} \Delta V L_s / q \mu V A t L_{IC}. \quad (2)$$

При  $\epsilon_{ic} = 6.5$ ;  $\Delta V = 0.5$  В;  $t = 2 \cdot 10^{-2}$  с;  $V = 10$  В;  $A = 3$  см<sup>2</sup> имеем  $n_{ph} = 10^9$  см<sup>-3</sup>. Поскольку  $n_{ph} < N$ , можно сказать, что в условиях эксперимента не все примесные уровни заполнены электронами.

На рис. 3 приведен график спектральной чувствительности структуры на основе CdSe (Ag). Для выделения нужного диапазона длин волн записывающего излучения использовался набор интерференционных фильтров и откалиброванный монохроматор. Измерения производились при комнатной температуре в условиях стационарного фотовозбуждения полупроводника светом одновременно в области собственного (для неравновесного заполнения ловушек) и примесного (для получения ИПФ) поглощения. На спектре ИПФ выделяется полоса в районе  $\lambda = 4$  мкм ( $h\nu = 0.3$  эВ). Электронные уровни, ответственные за ИПФ в этой области, связаны с межузельными донорами  $Ag_i^0$  и их ассоциатами, которые характеризуются огромным сечением захвата электронов порядка  $10^{-12} - 10^{-14}$  см<sup>2</sup> /2/. Полуширина полосы составляет около 0.1 эВ.

При оптических измерениях параметров ПВМС ИК излучение от источника проходило сквозь амплитудный транспарант с отверстиями и попадало на входное окно структуры. Считывающее излучение через разделительный кубик и скрещенные поляризаторы направлялось в микроскоп для наблюдения.

Минимальная интенсивность записывающего излучения в диапазоне  $\lambda = 2-6$  мкм, при которой наблюдался электрооптический отклик в слое ЖК, составила  $10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>. Она измерялась при помощи калиброванного фотоприемника МГ-30, представляющего собой пирозлектрический датчик и микросхему, объединенные в одном корпусе.

Результаты, полученные при измерении разрешающей способности структуры, соответствуют случаю слабого поглощения. Размер разрешаемого элемента в преобразованном изображении составляет  $8-10$  мм<sup>-1</sup> и совпадает с расчетным значением, полученным с учетом того факта, что отсутствует плоскость точной фокусировки изображения /7/.

Таким образом, в работе исследованы фотоэлектрические параметры чувствительной в диапазоне  $\lambda = 2-6$  мкм структуры типа МДП-ЖК на основе CdSe (Ag) и параметры пространственно-временной модуляции света в этой структуре. Достигнуто пороговое значение чувствительности  $10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup> в диапазоне длин волн 2-6 мкм (интегральная чувствительность). Разрешающая способность составила  $8-10$  мм<sup>-1</sup>, что, по-видимому, обусловлено значительной толщиной полупроводника. Эти результаты могут быть улучшены при дальнейшей оптимизации структур и ПВМС на их основе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А. А. и др. Пространственные модуляторы света. М., Радио и связь, 1987.
2. Ризаханов М. А., Зобов Е. М. ФТП, 14, 2407 (1980).
3. Зобов Е. М., Гарядыев Г. Г., Ризаханов М. А. ФТП, 21, 1637 (1987).
4. Вашурин П. В. и др. Препринт ФИАН № 232, М., 1987.
5. Ковтюк Н. Ф. Электронные элементы на основе структур полупроводник-диэлектрик. М., Энергия, 1976.
6. Акопян Р. М. и др. ФТП, 12, 1254 (1978).
7. Васильев А. А. и др. Препринт ФИАН № 1, М., 1986.

Поступила в редакцию 17 июня 1988 г.