

7. Петров М. П., Степанов С. И., Хоменко А. В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации.— Л.: Наука, 1983.
8. Smith R. T., Welsh F. S. Temperature dependence of elastic, piezoelectric, and dielectric constants of lithium tantalate and lithium niobate.— J. Appl. Phys., 1971, v. 42, p. 2219.
9. Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. Т. 2.— М.: Сов. радио, 1978.
10. Пенчева Т. Г., Петров М. П., Степанов С. И. Дифракционная эффективность анизотропных голограмм в  $\text{LiNbO}_3$ .— Автометрия, 1980, № 1.

Поступила в редакцию 19 декабря 1984 г.

УДК 535.783.087

И. М. ЕФИМЕНКО, И. С. ЗАХАРОВ, Ю. Ф. КАРГИН,  
К. М. КИЧУТКИН, В. М. СКОРИКОВ

(Москва)

### ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУР МДП — ЖК НА ОСНОВЕ СИЛИКАТА ВИСМУТА В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Применение структур МДП — жидкий кристалл (ЖК) перспективно для обработки оптической информации из-за низких рабочих напряжений и высокой чувствительности [1, 2], но разрешающая способность их при использовании Si и GaAs не превышает 10—15 лин./мм. Использование нелегированных  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  и  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  позволило резко увеличить разрешение [3]. Однако такие структуры в статическом режиме работы имели низкую чувствительность к записываемому излучению, которая уменьшается в динамическом режиме.

В данной статье приведены результаты исследований модуляционных характеристик структур МДП — ЖК с повышенной по сравнению с нелегированным материалом чувствительностью за счет использования  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , легированного алюминием и фосфором и подвергнутого отжигу в атмосфере азота, при приложении импульсного и синусоидального напряжения. Характеристикой чувствительности служила величина контраста регистрируемого изображения тест-объекта в виде черно-белой картины.

В качестве фотополупроводника использовался  $\text{Bi}_{12}\text{Si}_{1-x}(\text{AlP})_x\text{O}_{20}$ , легированный в процессе выращивания, а также силикат висмута, подвергнутый отжигу при температуре 700°C в течение 2 ч; толщина фоточувствительных материалов составляла 300—350 мкм. Такая обработка кристаллов, как показано в [4, 5], приводила к повышению фотопроводимости кристаллов по сравнению с нелегированным образцом при одинаковом уровне освещения. Толщина жидкого кристалла с твист-эффектом (марка ЖК-807) задавалась изолирующими прокладками калиброванной толщины и составляла 7—17 мкм, поэтому соотношение между емкостями слоев ЖК  $C_{\text{ж}}$  и полупроводника  $C_{\text{п}}$  — 2—5 ( $C_{\text{ж}} > C_{\text{п}}$ ). Для такой конструкции структуры выбор напряжений питания осуществлялся в соответствии с [6]. Диэлектриком служила окись кремния  $\text{SiO}_2$ , а ориентирующим покрытием — слой полиимидного лака.

В статическом режиме на зависимости относительного контраста (ОК) от частоты синусоидального напряжения в диапазоне  $10^1$ — $3 \cdot 10^3$  Гц наблюдался максимум, сдвигавшийся в область более низких частот с повышением амплитуды приложенного напряжения  $U_0$ . Эта зависящая от режима работы частота  $f_{\text{кр}}$  принималась за оптимальную, и в дальнейшем к структуре МДП — ЖК прикладывались рабочие напряжения с частотой сигнала  $f_{\text{кр}}$ .

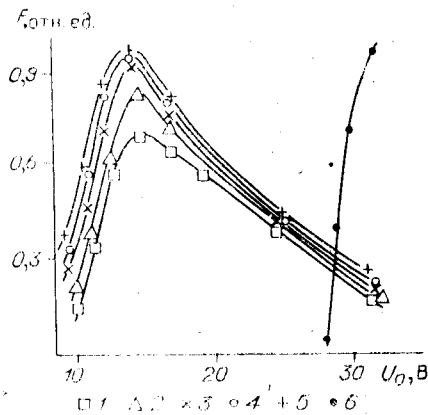


Рис. 1. Зависимость относительного контраста от амплитуды синусоидального напряжения для структуры на основе  $\text{Bi}_{12}\text{Si}_{1-x}\text{X}(\text{AlP})_x\text{O}_{20}$  при разных значениях  $P$  ( $f_0 = 2$  Гц,  $f = 100$  Гц): 1—50, 2—100, 3—150, 4—300, 5—430 мкВт/см<sup>2</sup>, 6 — нелегированный материал ( $f=20$  Гц,  $P=300$  мкВт/см<sup>2</sup>).

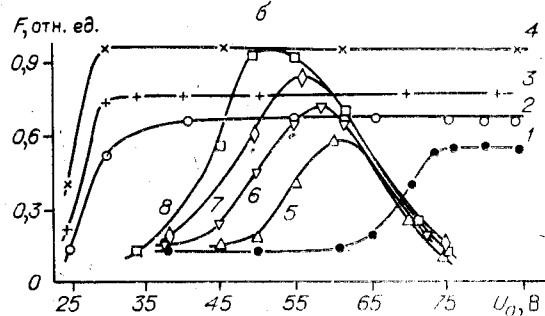
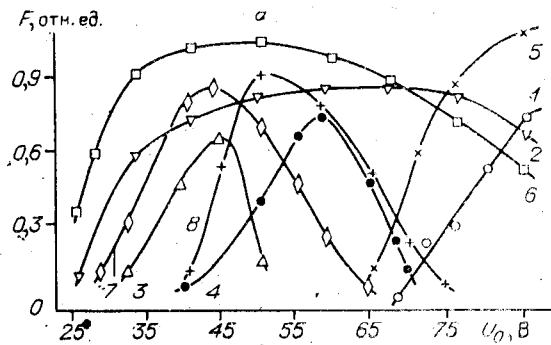


Рис. 2. Зависимость ОК от амплитуды импульсного напряжения для разных  $P$  и  $t_{\text{п}}$  ( $f_0 = 1$  Гц): а—1, 5— $P=10$ ; 2, 6—50; 3, 7—100; 4, 8—300 мкВт/см<sup>2</sup> (1—4— $t_{\text{п}}=0,75$ ; 5—8—1 мс); б—1, 5— $t_{\text{п}}=0,5$ ; 2, 6—0,75; 3, 7—1,0; 4, 8—3 мс (1—4— $P=50$ , 5—8—300 мкВт/см<sup>2</sup>).

В области низких частот ( $f < f_{\text{кр}}$ ), когда длительность полупериода напряжения значительно превышает время жизни обедненного состояния из-за инерционности процесса спада фотопроводимости, накопление носителей заряда, как в [2], успевает компенсировать увеличение электрического поля в объеме полупроводника и приводит к низкому значению ОК. При повышении частоты питающего напряжения  $f$  структура МДП—ЖК находится в обедненном состоянии большую часть полупериода и величина ОК растет. Время жизни обедненного состояния повышается также за счет приложения напряжения с большей  $U_0$ , что приводит к снижению  $f_{\text{кр}}$ .

На рис. 1 показана зависимость контраста (в отн. ед.)  $F$  от  $U_0$  в структуре на основе  $\text{Bi}_{12}\text{Si}_{1-x}(\text{AlP})_x\text{O}_{20}$  для разных плотностей мощности подсветки  $P$ , которая характеризуется наличием максимума. В диапазоне используемых величин  $P = 50\text{--}450$  мкВт/см<sup>2</sup> (кривые 1—5) максимальное значение  $F$  получено при  $U_0 = 12\text{--}14$  В, однако значение  $U_0$  увеличивается при снижении  $P$  до 10 мкВт/см<sup>2</sup>. Такое поведение ОК связано с резким уменьшением сопротивления полупроводника  $R_{\text{п}}$  уже при малых  $P$  и перераспределением падения напряжения со слоя  $\text{Bi}_{12}\text{Si}_{1-x}(\text{AlP})_x\text{O}_{20}$  на жидкий кристалл. Для  $P > 150$  мкВт/см<sup>2</sup> (кривые 4 и 5) величина  $R_{\text{п}}$  становится меньше сопротивления слоя жидкого кристалла  $R_{\text{ж}}$  ( $R_{\text{п}} \ll R_{\text{ж}}$ ), поэтому рост уровня освещения не изменяет  $F$ . Дальнейшее повышение  $U_0 > 15$  В приводит к снижению ОК, поскольку для данной конструкции структуры в соответствии с [6] начальное падение напряжения на слое жидкого кристалла уже превышает пороговое.

Для сравнения влияния обработки материала на рис. 1 дана характеристика  $F = f(U_0)$  для структуры МДП—ЖК при использовании нелегированного  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (кривая 6). Видно, что в структуре на основе  $\text{Bi}_{12}\text{Si}_{1-x}(\text{AlP})_x\text{O}_{20}$  значение  $U_0$  для достижения максимального ОК при одинаковой плотности мощности засветки (кривые 4 и 6) ниже, что свидетельствует о более высокой ее фоточувствительности.

Зависимости ОК от амплитуды импульсного напряжения при разных длительностях импульсов  $t_n$  и плотностях мощности засветки  $P$  носят более сложный характер (рис. 2). В структурах с использованием нелегированного материала модуляция считывающего излучения в диапазоне  $U_0$  до 90 В и  $t_n = 0,5-3$  мс с частотой повторения импульсов  $f_0 = 1-50$  Гц отсутствовала при  $P$  до 430 мкВт/см<sup>2</sup>. В то же время применение легированного и подвергнутого отжигу в атмосфере азота  $Bi_{12}SiO_{20}$  позволило проводить регистрацию картин в указанных режимах. Из рис. 2, а видно что существует некоторое оптимальное значение  $t_n = 0,75$  мс, которое при выбранном  $P$  характеризуется максимальным значением относительного контраста и минимальной величиной  $U_0$  (кривые 2 и 6). Изменение  $t_n$  как в меньшую, так и в большую сторону способствовало увеличению рабочего напряжения, необходимого для получения максимального значения  $F$  (кривые 1, 3-5, 7-8). Снижение ОК с ростом  $U_0$  для заданного значения  $P$  вызвано увеличением падения напряжения на ЖК-слое (кривые 2-4, 6-8), которое становится больше порогового и приводит к повышению фонового потемнения жидкого кристалла. При увеличении длительности импульса структура существует в обедненном состоянии лишь часть  $t_n$ , так как тепловая генерация носителей заряда успевает компенсировать рост поля в объеме кристалла.

Для оптимального значения  $t_n = 0,75$  мс относительный контраст в диапазоне используемых величин  $P$  возрастает при изменении  $U_0$  до 85 В (рис. 2, б, кривые — 1-4). При заданном уровне освещения повышение  $U_0$  ведет к росту  $F$ , а затем начиная с некоторого значения приложенного напряжения ОК стремится к насыщению. Эта критическая величина  $U_0$  снижается с ростом уровня освещения и хорошо описывается эмпирической зависимостью вида  $U_0 = kP^{-\gamma}$ , где  $k = 0,14$  В · см<sup>2</sup>/мкВт, а  $\gamma = 0,7$ . Если длительность импульса записи превышает оптимальное значение ( $t_n = 1$  мс, кривые 5-8), то зависимость  $F = f(U_0)$  характеризуется кривой с максимумом. Максимальное значение  $F$  при одинаковом уровне освещения в этом случае достигается при больших значениях  $U_0$  (кривые 2 и 6), что также вызвано уменьшением времени жизни обедненного состояния в кристалле по сравнению с полной длительностью импульса записи. После достижения максимальной величины ОК при дальнейшем повышении  $U_0$  резко снижается (кривые 5-8).

На основании полученных результатов определена энергетическая чувствительность структуры МДП-ЖК на основе  $Bi_{12}Si_{1-x}(AlP)_xO_{20}$ , превышающая  $10^{-8}$  Дж/см<sup>2</sup> при абсолютном контрасте изображения 3 : 1. Следует отметить, что высокие модуляционные свойства для данных структур наблюдались лишь при низких частотах регистрации  $f_0$  (несколько кадров в секунду). Повышение скорости регистрации изображения приводило к резкому снижению контраста даже в оптимальном режиме за счет накопления носителей заряда в полупроводнике, поскольку в этом материале наблюдалась медленная релаксация фотопроводимости. Увеличение скорости регистрации при снижении контраста до уровня 0,5 от максимального получено при использовании в структурах МДП-ЖК нелегированных кристаллов  $Bi_{12}SiO_{20}$  и  $Bi_{12}GeO_{20}$ , подвергнутых отжигу в атмосфере азота. Так, при приложенном напряжении  $U_0 = 68$  В длительности импульса записи  $t_n = 7,4$  мс и  $P = 30$  мкВт/см<sup>2</sup> скорость регистрации была больше 30 кадр/с. При этом переключающая энергия не превышала  $10^{-7}$  Дж/см<sup>2</sup>.

Таким образом, чувствительность структур МДП-ЖК на основе  $Bi_{12}SiO_{20}$ , легированного алюминием и фосфором, значительно выше таковой для образцов с применением нелегированного материала. Однако такие структуры имеют низкое быстродействие. Повышение скорости регистрации достигнуто за счет использования  $Bi_{12}SiO_{20}$ , подвергнутого отжигу в атмосфере азота.

2. Думаревский Ю. Д., Ковтолюк Н. Ф., Компанец И. Н. и др. Структуры металл — диэлектрик — полупроводник — жидкий кристалл: влияние параметров управляющих сигналов на характеристики пространственной модуляции света.— Квант. электроника, 1984, т. 11, № 4, с. 730—735.
3. Компанец И. Н., Парфенов А. В., Попов Ю. М. Пространственная модуляция света в фоточувствительных высококонтрастных структурах МДП с жидким кристаллом.— Квант. электроника, 1980, т. 7, № 2, с. 290—298.
4. Захаров И. С. Стационарные характеристики фототока легированных кристаллов типа силленита.— ФТТ, 1985, т. 27, № 4, с. 1062—1068.
5. Захаров И. С., Кичуткин К. М., Леонов Е. И. и др. Спектральные характеристики пропускания, поглощения и фотопроводимости кристаллов типа силленита, подвергнутых различным обработкам.— М., 1985, рукопись деп. в ВИНТИ, № 3577-85 Деп.
6. Кичуткин К. М., Захаров И. С. Анализ эквивалентной схемы структуры МДП — ЖК как носителя оптической информации.— М., 1985, рукопись деп. в ВИНТИ, № 3217—85 Деп.

*Поступила в редакцию 8 июля 1985 г.*

УДК 681.3 : 535

Е. А. КУЗИН, М. П. ПЕТРОВ

(Ленинград)

## ОПТИЧЕСКИЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ СВЕТОВОЛОКНА

Развитие электронной вычислительной техники, несмотря на колоссальный прогресс, сталкивается с определенными трудностями при создании вычислительных систем сверхбольшой мощности. Проблема заключается, в частности, в том, что с повышением быстродействия и увеличением степени интеграции электронных вентилях возрастают трудности с отводом тепла от электронных схем и взаимные помехи. С увеличением быстродействия вентилях усложняется также синхронизация схемы в целом из-за разброса времен задержек импульсов вследствие различия длин межэлементных связей.

Все эти трудности заставляют обращаться к альтернативным методам обработки информации, в частности оптическим. Основным элементом цифровых оптических вычислительных устройств является оптический логический элемент. Наибольший интерес до последнего времени вызывали логические элементы на основе полупроводниковых бистабильных устройств [1].

В настоящей работе рассматриваются принципиальные возможности использования механизмов вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) и вынужденного рассеяния Мандельштама — Бриллюэна (ВРМБ) в оптическом волокне для выполнения логических операций. При этом, как будет показано ниже, открываются возможности обеспечить энергопотребление на уровне  $10^{-10}$ — $10^{-12}$  Дж/опер., производительность до  $10^{12}$  Гц, что находится на уровне или даже превосходит предельные теоретические возможности бистабильных полупроводниковых элементов. Кроме того, использование механизмов ВКР и ВРМБ в оптическом волокне обладает рядом преимуществ, связанных с практически полной нечувствительностью к внешним воздействиям, в том числе температурным, возможностью работы в широком спектральном диапазоне, хорошей согласованностью с волоконно-оптическими линиями связи.