

07;12

## **Высокопроизводительные оптические процессоры для оптических аналоговых компьютеров некогерентного света с параллельной обработкой изображений на полупроводниковых наноструктурах**

© П.Г. Кашерининов, А.А. Томасов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: peter.kasherininov@mail.ioffe.ru

*В окончательной редакции 31 октября 2007 г.*

Разработаны быстрые оптические регистрирующие среды для записи и обработки изображений на полупроводниковых наноструктурах (CdTe, GaAs) с быстродействием до  $10^6$  cycle/s, что на 2–3 порядка превышает быстродействие известных регистрирующих сред на жидких кристаллах (MIS-LG). Такие среды обладают фоточувствительностью  $10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ , пространственным разрешением 5–10 пар линий на миллиметр. Разработаны методы считывания записанных изображений в таких наноструктурах, реализованы быстрые оптические процессоры некогерентного света на их основе, показана возможность их использования для создания оптических аналоговых компьютеров и корреляторов изображений.

PACS: 42.79.Nr, 42.70.Nq, 71.20.Nr

Оптические аналоговые процессоры производят аналоговые операции над изображениями и способны за один такт обрабатывать двумерные изображения, причем машинная команда сама может представлять собой изображение. Разработка аналогового двумерного оптического процессора с быстрой параллельной обработкой информации представляет в настоящее время наибольший интерес и обещает реализацию компьютеров с производительностью более  $10^{12}$  операций в секунду при тактовой частоте такого процессора  $10^6$  cycle/s. Основным недостатком современных оптических компьютеров, препятствующим их широкому использованию, является низкое быстродействие процессоров ( $< 10^3$  cycle/s), обусловленное особенностью оптических регистрирующих сред, используемых для реализации процессоров. Современная эле-

ментная база оптической обработки изображений основывается на регистрирующих средах, представляющих собой структуры металл (М)–диэлектрик (I)–полупроводник (S) (MIS-структуры) с толстым слоем диэлектрика, непрозрачным для носителей тока (толщиной  $1\ \mu\text{m}$ ). В таких MIS-структурах для перезаписи изображений необходима операция стирания заряда [1–3], которая занимает основное время цикла ( $t \sim 10^{-2}–10^{-3}\ \text{s}$ ), например путем смены полярности приложенного напряжения в структурах на жидких кристаллах (MIS-LC). Для резкого увеличения скорости обработки изображений необходимы оптические регистрирующие среды, в которых отсутствует операция стирания записанного заряда при перезаписи изображения, что должно увеличить скорость обработки изображения на 2–3 порядка (до  $10^5–10^6\ \text{cycle/s}$ ).

В качестве таких быстрых оптических регистрирующих сред авторами предложены MIS-структуры большой площади с тонким наноразмерным слоем диэлектрика (TI) толщиной 2–5 nm, расположенным на поверхности структуры (M(TI)S-наноструктуры). Изучение механизмов протекания фототоков в таких M(TI)S-наноструктурах на кристаллах (Si, CdTe, GaAs) интенсивно проводится в мире в течение последних 30 лет [4–13].

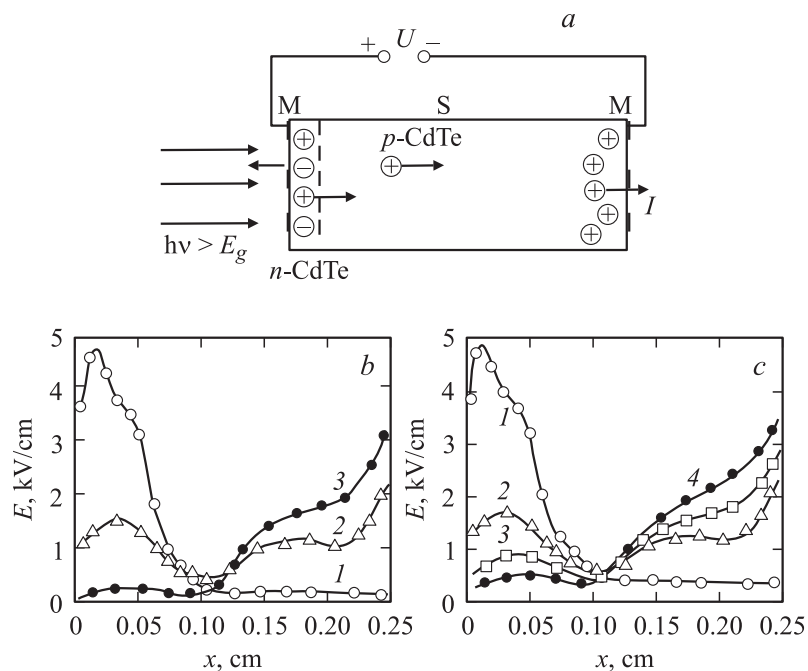
Показано, что при освещении в таких структурах с наноразмерным диэлектриком протекает сквозной фототок, который преодолевает диэлектрические слои (TI) за счет механизмов туннелирования. При этом в кристалле на границе с TI образуются электрические заряды свободных фотоносителей с плотностью, пропорциональной интенсивности светового потока. При проецировании изображений на поверхность M(TI)S-наноструктуры в кристалле образуется двумерный электрический заряд с плотностью, повторяющей распределение яркости изображения. Время установления этих зарядов в кристалле структуры при включении (выключении) света составляет единицы микросекунд. При оптической записи изображений в таких структурах не требуется операция стирания записанного заряда при перезаписи изображений, что увеличивает скорость записи на 2–3 порядка по сравнению с используемыми в настоящее время способами записи на структурах (MIS-LC). Запись изображений в таких наноструктурах может осуществляться „собственным“ светом, что определяет их высокую фоточувствительность ( $I \ll 1\ \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ). Такие структуры до сих пор не использовались для записи изображений.

Авторы предлагают использовать заряды фотоносителей в таких M(TI)S-наноструктурах для быстрой оптической записи изображений,

а сами М(Тl)S-наноструктуры в качестве быстрых оптических регистрирующих сред. Такого типа структуры могут быть реализованы на различного типа полупроводниковых кристаллах (GaAs, CdTe, Si) по стандартным технологиям микроэлектроники. Запись изображений в таком процессоре может производиться путем освещения одной из его поверхностей записывающим световым потоком „собственного“ света, а считывание записанного изображения производится путем освещения противоположной поверхности процессора считывающим потоком „собственного“ света. Регистрация сигнала от считывающего светового потока в таком процессоре может производиться путем измерения величины фототока, вызванного этим потоком (при одновременном освещении процессора записывающим светом). Такого типа оптические процессоры, регистрирующие электрический сигнал от считывающего светового потока, известны как гибридные процессоры, сочетающие достоинства оптики и электроники. Считывание записанного изображения в таких процессорах производится за один такт, причем машинная команда (считывающий световой поток) сама может представлять собой картинку.

Для реализации такого процессора на структурах с наноразмерными диэлектрическими слоями авторами предложено использовать  $n-p$ (Тl)M-наноструктуры, представляющие собой кристалл большой площади с фоточувствительным обратномещенным  $n-p$ -переходом на одной поверхности кристалла и тонким наноразмерным слоем диэлектрика (Тl) на его противоположной поверхности (рис. 1, а).

Исследовались процессоры на  $n-p$ (Тl)M-наноструктурах на полупроводниковых электрооптических кристаллах  $p$ -CdTe ( $\rho = 10^7 - 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ ), с малой концентрацией глубоких примесных уровней ( $N < 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ). Образцы представляли собой плоскопараллельные пластинки площадью  $0.4 \times 0.8 \text{ cm}^2$  и толщиной  $0.1 - 0.3 \text{ cm}$ . Мелкий фоточувствительный  $n-p$ -переход на одной поверхности кристалла создавался термической диффузией индия, контакт к противоположной поверхности структуры содержал слой наноразмерного диэлектрика (Тl), созданного химическим осаждением оптически прозрачного слоя золота на травленую поверхность кристалла, покрытую тонким слоем естественного окисла, толщина которого ( $2 - 5 \text{ nm}$ ) могла варьироваться специальным окислением поверхности. К структуре прикладывалось обратное смещение  $U = 50 - 500 \text{ V}$ . Запись информации производилась записывающим постоянным „собственным“ светом или прямоугольными световыми импульсами со стороны  $n-p$ -перехода



**Рис. 1.** Фотоиндуцированная перестройка напряженности электрического поля в  $n-p(\text{П})\text{M}$ -наноструктуре при освещении структуры записывающим светом со стороны  $n-p$ -перехода:  $a$  — диаграмма структуры и геометрии освещения;  $b$  — стационарное распределение напряженности электрического поля  $E = E(x)$  в структуре при интенсивности светового потока  $I_1$  ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ): 1 — 0; 2 — 30; 3 — 70 ( $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$ ,  $U = 400 \text{ V}$ );  $c$  — распределение напряженности электрического поля в структуре  $E = E(x, t)$  после включения освещения интенсивностью  $I_1 = 70 \text{ mW}/\text{cm}^2$  через время  $t$ ,  $\mu\text{s}$ : 1 — 0; 2 — 2; 3 — 4; 4 — 7 ( $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$ ,  $U = 400 \text{ V}$ ).

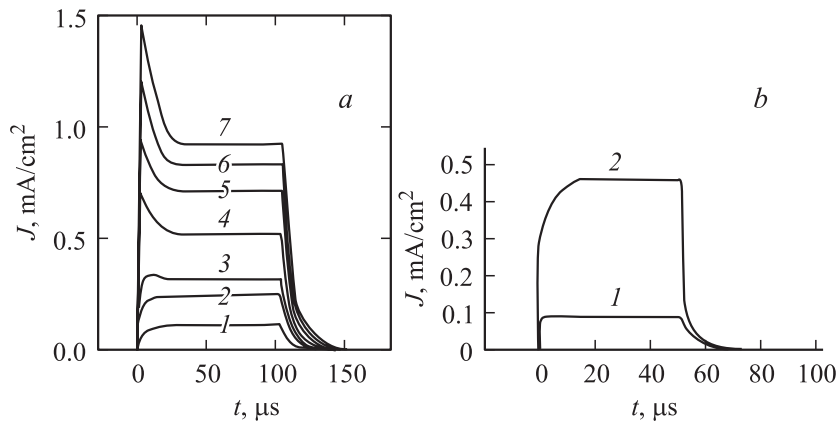
(рис. 1). Изучалось пространственно-временное распределение напряженности электрического поля ( $E = E(x, t)$ ) в кристалле  $n-p(\text{П})\text{M}$ -структуры, после включения (выключения) записывающего светового потока, на основе поперечного эффекта Поккельса [9–12]. Как видно из рис. 1,  $b$ , в отсутствие записывающего светового потока напряженность электрического поля максимальна в области объемного заряда обратномещенного  $n-p$ -перехода и близка к

нулю в базовой области кристалла. При включении записывающего светового потока наблюдается обратимое изменение напряженности электрического поля в кристалле. Стационарное распределение напряженности электрического поля в кристалле структуры обладает следующими особенностями: при включении освещения напряженность электрического поля в области объемного заряда  $n-p$ -перехода уменьшается, напряженность электрического поля в базовой области существенно возрастает, особенно около границы с П-слоем, степень деформации распределения напряженности электрического поля в кристалле увеличивается с увеличением интенсивности освещения. На рис. 1, *c* представлена кинетика установления напряженности электрического поля в этой структуре после включения записывающего света ( $E = E(x, t)$ ); видно, что стационарное распределение напряженности электрического поля в этом образце устанавливается через  $t \sim 10 \mu s$  после включения записывающего света.

На рис. 2, *a* приведена форма релаксации фототоков, протекающих в таком процессоре, при освещении поверхности  $n-p$ -перехода записывающими прямоугольными световыми импульсами. Видно, что фототоки уменьшаются со временем и достигают стационарных значений через  $t \sim (10-15) \mu s$  после включения освещения, в соответствии с изменением напряженности электрического поля у освещаемой поверхности структуры (рис. 1, *c*).

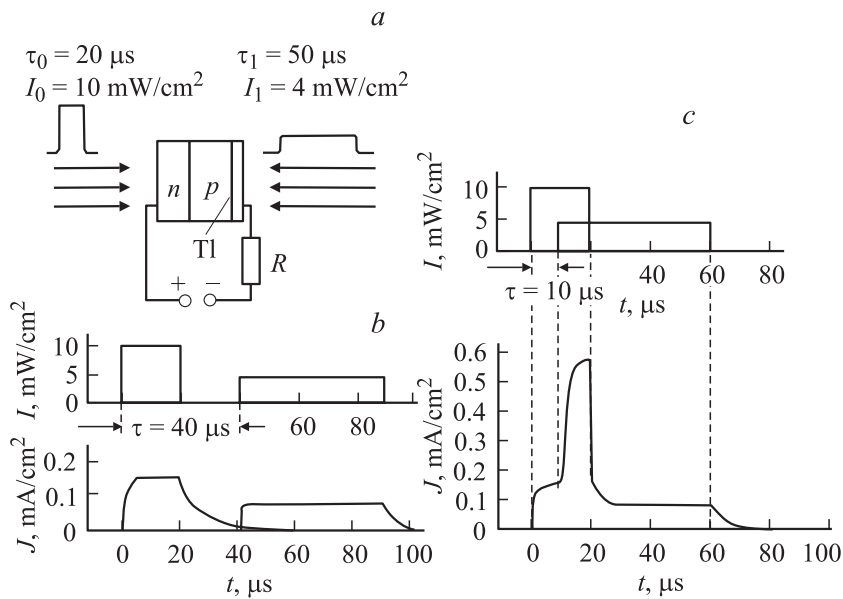
На рис. 2, *b* представлены фототоки оптического процессора от импульсов считывающего светового потока (со стороны, противоположной  $n-p$ -переходу) в условиях одновременного освещения процессора постоянным записывающим световым потоком. Видно, что при включении записывающего светового потока амплитуда импульсов фотоотклика от считывающих световых импульсов увеличивается в 5 раз из-за перестройки напряженности электрического поля в структуре процессора от действия записывающего света (рис. 1, *b*).

Таким образом, в таком процессоре записывающий световой поток (со стороны  $n-p$ -перехода) вызывает интенсивную перестройку напряженности электрического поля в кристалле и малую величину токового импульса в цепи процессора, а считывающий световой поток не изменяет распределения напряженности электрического поля в кристалле, созданного записывающим светом, но вызывает резкое увеличение токового импульса от считывающего света. Пространственное разрешение процессора на  $n-p$  (П)М-структуре с толщиной П-слоя, равной 2–5 нм, составляло 5–10 пар линий на миллиметр.



**Рис. 2.** Фототоки в  $n-p(\text{TI})\text{M}$ -наноструктуре при освещении записывающим и считывающим световыми потоками: *a* — осциллограммы импульсов фототока  $J$  при освещении структуры импульсами записывающего света со стороны  $n-p$ -перехода интенсивности  $I$  ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ): 1 — 5, 2 — 15, 3 — 25, 4 — 50, 5 — 100, 6 — 150, 7 — 200 ( $U = 200 \text{ V}$ ,  $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$ ); *b* — осциллограммы импульсов фототока от импульсов считывающего светового потока при интенсивности записывающего постоянного „собственного“ света  $I$  ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ): 1 — 0, 2 — 10 ( $U = 300 \text{ V}$ ). Параметры импульсов считывающего светового потока ( $I = 4 \text{ mW}/\text{cm}^2$ , длительность импульса  $\tau_1 = 50 \mu\text{s}$ ,  $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$ ).

На рис. 3 представлен оптический процессор, предназначенный для обработки и сравнения сигналов изображения, причем считывающий световой поток может сам представлять собой картинку, и в этом случае такой процессор может использоваться для создания коррелятора изображений. На поверхность такого процессора со стороны  $n-p$ -перехода проецируется импульс записывающего „собственного“ света, несущий записываемое изображение. На противоположную поверхность процессора проецируется импульс считывающего „собственного“ света, однородно распределенного или несущего изображение сравниваемого объекта. Временная диаграмма этих импульсов представлена на рис. 3, *b, c*. Частота следования этих импульсов одинакова, импульсы сдвинуты относительно друг друга на время задержки  $\tau = 40 \mu\text{s}$  и  $\tau = 10 \mu\text{s}$  (рис. 3, *b, c*). За время  $\tau = 10 \mu\text{s}$  фототок от записывающего импульса уменьшается до своего малого стационарного значения



**Рис. 3.** Оптический процессор на  $n-p(\text{Tl})M$ -наноструктуре (CdTe) для регистрации и обработки сигналов изображений: *a* — диаграмма структуры и геометрии освещения,  $\tau_0$  — длительность записывающего импульса,  $I_0$  — интенсивность записывающего импульса; *b* — временная диаграмма записывающего и считывающего световых импульсов ( $I$ ) ( $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$ ) и импульсов фототоков ( $J$ ) от этих импульсов в цепи структуры при времени задержки между импульсами  $\tau = 40 \mu\text{s}$ ; *c* — то же при  $\tau = 10 \mu\text{s}$ .

(рис. 2, *a*), а в структуре за это время устанавливается стационарное распределение напряженности электрического поля, соответствующее записываемому изображению (рис. 1, *b*). Во время перекрытия записывающего и считывающего световых импульсов фотоответ от считывающего светового импульса достигает максимального значения (рис. 2, *b*). После окончания записывающего светового импульса фотоответ от считывающего импульса уменьшается до своего минимального значения (рис. 2).

Когда записывающий световой импульс содержит записываемое изображение, а интенсивность света в считывающем импульсе однород-

на по площади образца, импульс фототока на выходе процессора от записываемого светового изображения оказывается пропорционален площади записываемого изображения (рис. 3, *с*). Когда считывающий световой импульс содержит сравнимое изображение, согласованное по координатам, масштабу и угловой ориентации с записываемым изображением, сигнал (импульс фототока) на выходе процессора оказывается пропорционален функции взаимной корреляции этих изображений (MSF) и будет максимален при тождественности изображений.

По значению этой функции и принимается решение о наличии распознаваемого объекта в поле зрения системы. Время вычисления MSF в предлагаемом корреляторе будет определяться быстродействием процессора, а сам процесс вычисления реализуется за один такт независимо от размерности (информативности) изображений. Таким образом, быстродействие данного коррелятора будет ограничиваться временем ввода изображений, а не временем вычисления MSF. В результате коррелятор будет работать в темпе поступления изображений на поверхность процессора, т. е. в реальном времени.

Таким образом, предложена и реализована быстрая оптическая регистрирующая среда нового типа на полупроводниковых наноструктурах (CdTe) с быстродействием до  $10^6$  циклов в секунду, превышающим быстродействие известных регистрирующих сред на жидких кристаллах (MIS-LC) на 2–3 порядка, пространственным разрешением 5–10 пар линий на миллиметр, чувствительностью  $10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Реализованы и исследованы быстрые оптические процессоры на ее основе, показана возможность их использования для оптических аналоговых компьютеров и корреляторов изображения.

## Список литературы

- [1] *Васильев А.Ф., Касасент Д., Кампанец И.Н., Парфенов А.В.* Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.
- [2] *Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В.* Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. Л.: Наука, 1983. 269 с.
- [3] *Борошнев А.В., Ковтонок Н.Ф.* // Прикладная физика. 2000. Т. 6. С. 5–10.
- [4] *Sewchun J., Waxman A., Warfield G.* // Solid State Electronics. 1967. V. 10. N 12. P. 1165–1186.
- [5] *Dahlke W.E., Sze S.M.* // Solid State Electronics. 1967. V. 10. N 8. P. 865–873.
- [6] *Green M.A., Shewchun J.* // Solid State Electronics. 1974. V. 17. N 4. P. 349–365.



- [7] Гуткин А.А., Седов В.Е. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 9. С. 1761–1765.
- [8] Вуль А.Я., Козырев С.В., Федоров В.И. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 1. С. 142–148.
- [9] Вуль А.Я., Саченко А.В. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 8. С. 1361–1376.
- [10] Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Томасов А.А. // ФТП. 1995. Т. 29. В. 11. С. 2092–2107.
- [11] Kasherininov P.G., Kichaev F.V., Lodygin A.N., Sokolov V.K. // Proc. of SPIE. 2004. V. 5381. P. 292–301.
- [12] Kasherininov P.G., Lodygin A.N., Sokolov V.K. // Proc. of SPIE. 2003. V. 5066. P. 273–280.
- [13] Kasherininov P.G., Kichaev A.V., Tomasov A.A., Sokolov V.K. // Proc. of SPIE. 2007. V. 5066. P. 273–280.