

Быстрые оптические регистрирующие среды на полупроводниковых наноструктурах для записи и обработки изображений

© П.Г. Кашерининов[¶], А.А. Томасов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 21 ноября 2007 г. Принята к печати 3 марта 2008 г.)

Разработаны быстрые оптические регистрирующие среды на полупроводниковых наноструктурах (на основе CdTe, GaAs) для записи и обработки изображений с быстродействием до 10^6 цикл/с, что на 2–3 порядка превышает быстродействие известных регистрирующих сред на структурах полупроводник–(жидкий кристалл) (MIS-LC) фоточувствительностью 10^{-2} В/см², пространственным разрешением 5–10 (пар лин.)/мм. Описываются принципы работы наноструктур в качестве быстрых оптических регистрирующих сред, методы считывания записанных изображений в таких средах. Реализованы быстрые оптические процессоры для записи изображений в некогерентном свете на базе наноструктур на кристаллах CdTe, показана возможность их использования для создания корреляторов изображений.

PACS: 42.79.Np, 42.70.Nq, 73.40.Gk, 73.40.Qv

1. Введение

Плотность транзисторов в интегральных схемах со сверхбольшой степенью интеграции (СБИС, SLIC) удваивается каждые полтора года в течение последних 20 лет. Это до сих пор обеспечивает увеличение производительности современных электронных компьютеров. Технология СБИС имеет определенные физические ограничения, по достижении которых рост плотность транзисторов в интегральных схемах застопорится. Современные СБИС подходят в своем развитии к теоретическому пределу. Нужны компьютеры с более высокими скоростными характеристиками, функционирующие на новых принципах. Существует несколько возможных путей замены современных компьютеров, один из которых — создание так называемых оптических компьютеров, носителем информации в которых является световой поток. Оптические вычисления включают цифровые оптические вычисления и аналоговые вычисления.

Цифровые оптические вычисления — использование световых сигналов для осуществления операций цифровой логики — нацелены на класс приложений, которые сейчас выполняются электронными компьютерами. Их преимущества: передача информации со скоростью света, замена проводных соединений оптическими связями.

Аналоговые вычисления включают в себя аналоговые операции над изображениями. Такой процессор способен за один такт обрабатывать двумерные картинки, причем машинная команда сама может представлять собой картинку. Разработка аналогового двумерного оптического процессора с быстрой оптической параллельной обработкой изображений 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 цикл/с. Такие процессоры в настоящее время не известны. Основным недостатком современных

оптических компьютеров, препятствующих их широкому использованию, является низкое быстродействие ($< 10^3$ цикл/с) используемых процессоров на структурах полупроводник–(жидкий кристалл) (MIS-LC) [1–3].

2. Оптические регистрирующие среды на MIS-структурах в современной оптоэлектронике

Современная элементная база оптической записи изображений базируется на регистрирующих средах, представляющих собой структуры металл–диэлектрик–полупроводник (MIS-структуры) с толстым слоем диэлектрика, непрозрачным для носителей тока (толщиной 1 мкм). К таким структурам прикладывается внешнее смещение U , на поверхность структуры проецируется записываемое изображение фотоактивно поглощаемым в кристалле световым потоком I_0 с фиксированным временем экспозиции t_{expos} (рис. 1, а). При освещении таких MIS-структур в кристалле структуры образуется двумерно-распределенный электрический заряд с плотностью, повторяющей распределение яркости изображения на поверхности MIS-структуры. После считывания записанной информации (на основе эффекта Поккельса) структура подготавливается для нового цикла записи информации. В таких MIS-структурах после выключения записывающего света с интенсивностью I_0 записанный заряд Q не может „вытечь“ из кристалла через блокирующий диэлектрический слой (I). Для перезаписи изображений необходима операция стирания этого заряда. Операция стирания занимает основное время цикла записи изображения ($t = 10^{-2}–10^{-3}$ с), в то время как операции записи и считывания изображений занимают единицы микросекунд. Таким образом, низкое быстродействие таких MIS-структур и приборов на их основе ($\nu = 10^2–10^3$ цикл/с) обусловлено необходимостью проведения в них операции стирания. На таких

[¶] E-mail: peter.kasherininov@mail.ioffe.ru

MIS-структурах работают основные современные светоуправляемые приборы: пространственно-временные модуляторы света типа ПРОМ (PROM), модуляторы света на жидких кристаллах МДП-ЖК (MIS-LC) и т.п. [1–3]. Наибольшее быстродействие при записи изображений в настоящее время достигнуто в структурах типа MIS-LC и составляет 10^3 цикл/с.

На протяжении многих лет в мире проводятся исследования по поиску способов быстрой оптической записи изображений, в том числе и на эффекте оптической бистабильности в полупроводниковых структурах. Однако эти исследования пока не увенчались успехом.

Для резкого увеличения скорости записи и обработки изображений могут быть использованы оптические регистрирующие среды, в которых отсутствует операция стирания записанного заряда при перезаписи изображения, что должно увеличить скорость записи изображений на 2–3 порядка (до 10^5 – 10^6 цикл/с).

3. Оптическая запись изображений в реальном времени на оптических регистрирующих средах, изготовленных на основе полупроводниковых наноструктур

3.1. Быстрые оптические регистрирующие среды на MIS-наноструктурах с тонким слоем диэлектрика

В качестве быстрых оптических регистрирующих сред авторами предложены среды на MIS-структурах с тонким наноразмерным слоем диэлектрика таллия (Tl) толщиной 2–5 нм, (M(Tl)S-наноструктуры, рис. 1, *b*). Изучение механизмов протекания фототоков в таких структурах с туннельно-тонкими слоями диэлектрика Tl на кристаллах Si, CdTe, GaAs проводится в мире в течение последних 30 лет. Показано [4–13], что в таких M(Tl)S-наноструктурах при освещении „собственным“ светом устанавливается сквозной фототок за время t_{st} порядка единиц микросекунд, при этом в кристалле на границе с диэлектрическим слоем Tl образуются двумерно-распределенные электрические заряды свободных фотоносителей Q_1 с плотностью, пропорциональной интенсивности освещения I_0 (рис. 1, *b*). Эти заряды по мере увеличения их плотности способствуют увеличению интенсивности процесса туннелирования фотоносителей через Tl-слои за счет увеличения частоты соударения со стенками потенциального барьера, а также за счет увеличения напряженности электрического поля в Tl-слое, способствующие увеличению их прозрачности для носителей тока. При некоторой определенной плотности электрического заряда, вследствие изменения проводимости диэлектрического слоя Tl, происходит выравнивание фототока, подходящего к диэлектрическому слою со стороны освещаемой поверхности кристалла J_{input} , и тока, протекающего через диэлектрический слой Tl J_{exit}

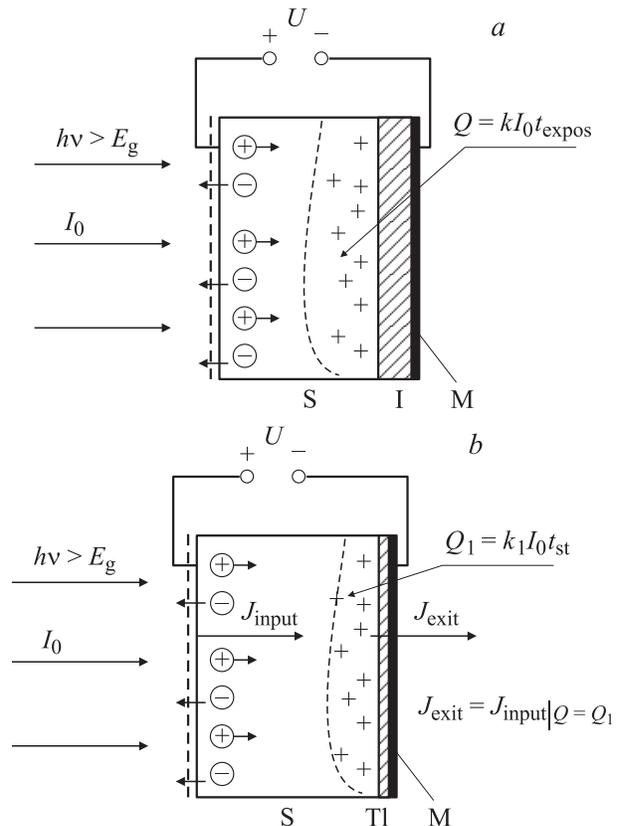


Рис. 1. Принципиальные схемы оптической записи информации в полупроводниковых структурах металл–диэлектрик–полупроводник: *a* — с толстым слоем диэлектрика (MIS-структуры); *b* — с тонким наноразмерным слоем диэлектрика Tl (M(Tl)S-структуры); k, k_1 — коэффициенты пропорциональности.

(рис. 1, *b*). После выравнивания этих токов плотность записанного заряда Q_1 перестает зависеть от времени экспозиции и определяется только интенсивностью записывающего света I_0 . Для каждой интенсивности освещения выравнивание фототоков происходит при различной плотности электрического заряда в кристалле за время единиц микросекунд. Этот заряд и фототок существуют в кристалле только при включенном записывающем световом потоке I_0 . После выключения записывающего светового потока записанный в кристалле заряд свободных фотоносителей Q_1 вытекает из кристалла через Tl-слой за время t_{st} порядка единиц микросекунд. За это же время уменьшается до нуля и фототок, т.е. для перезаписи изображений в таких структурах не требуется операции стирания предшествующего заряда. Такие структуры обладают всеми достоинствами обычных MIS-структур с толстым диэлектриком (высокая фоточувствительность, пространственное разрешение), но имеют высокое быстродействие (10^5 – 10^6 цикл/с), на 2–3 порядка превышающее быстродействие известных сред на жидких кристаллах (MIS-LC) [3]. Авторы предлагают использовать заряды фотоносителей в таких

M(Tl)S-наноструктурах для быстрой оптической записи изображений, а сами M(Tl)S-наноструктуры — в качестве быстрых оптических регистрирующих сред. Такие структуры ранее не использовались для записи изображений. Они могут быть реализованы на различного типа полупроводниковых кристаллах (GaAs, CdTe, Si) по стандартным технологиям микроэлектроники.

Исследование механизмов протекания фототоков в M(Tl)S-наноструктурах проводилось ранее на кристаллах Si с использованием электрических и фотоэлектрических методик [4–9]. За рамками исследований оставался вопрос пространственно-временного распределения плотности электрического заряда при освещении, а также возможности использования таких структур для оптической записи изображений. Для решения этих вопросов авторами были реализованы M(Tl)S-наноструктуры на электрооптических высокоомных кристаллах CdTe, GaAs. С помощью специально разработанных электрооптических методик и установок [10–13] были проведены исследования по изучению пространственно-временного распределения напряженности электрического поля в различных модификациях таких структур при освещении и возможности их использования для оптических цифровых и аналоговых процессоров [11–13].

3.2. Запись изображений на n-p(Tl)M-наноструктуры

Было обнаружено, что для реализации оптических процессоров для цифровых и аналоговых компьютеров удобно использовать модификацию M(Tl)S-наноструктур, представляющую собой n-p(Tl)M-наноструктуру в виде кристалла (CdTe, GaAs) с фоточувствительным обратным смещенным n-p-переходом на одной поверхности кристалла и тонким наноразмерным слоем диэлектрика (Tl) на его противоположной поверхности (рис. 2, a). Было обнаружено, что на n-p(Tl)M-наноструктурах можно считывать записанное изображение путем регистрации фототока от считывающего светового потока I₁, освещающего структуру со стороны Tl-слоя при одновременном освещении структуры записывающим светом I₀ со стороны n-p-перехода.

Исследовались n-p(Tl)M-наноструктуры на полупроводниковых электрооптических кристаллах p-CdTe с $\rho = 10^7 - 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, подвижностью электронов и дырок соответственно $\mu_n = 800 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_p = 80 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и временем жизни носителей $\tau \approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, с концентрацией глубоких примесных уровней $N < 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Образцы представляли собой плоскопараллельные пластинки площадью $S = 0.4 \times 0.8 \text{ см}^2$, толщиной $d = 0.1 - 0.3 \text{ см}$. Мелкий фоточувствительный n-p-переход на одной поверхности кристалла создавался термической диффузией индия, контакт к противоположной поверхности структуры содержал слой наноразмерного диэлектрика Tl, созданного химическим осаждением оптически прозрачного слоя золота на травленую поверхность кристалла, покрытую тонким слоем естественного

окисла. Толщина окисла 2–10 нм могла варьироваться специальным окислением поверхности. К структуре прикладывалось обратное смещение $U = 50 - 500 \text{ В}$. Запись информации производилась записывающим постоянным

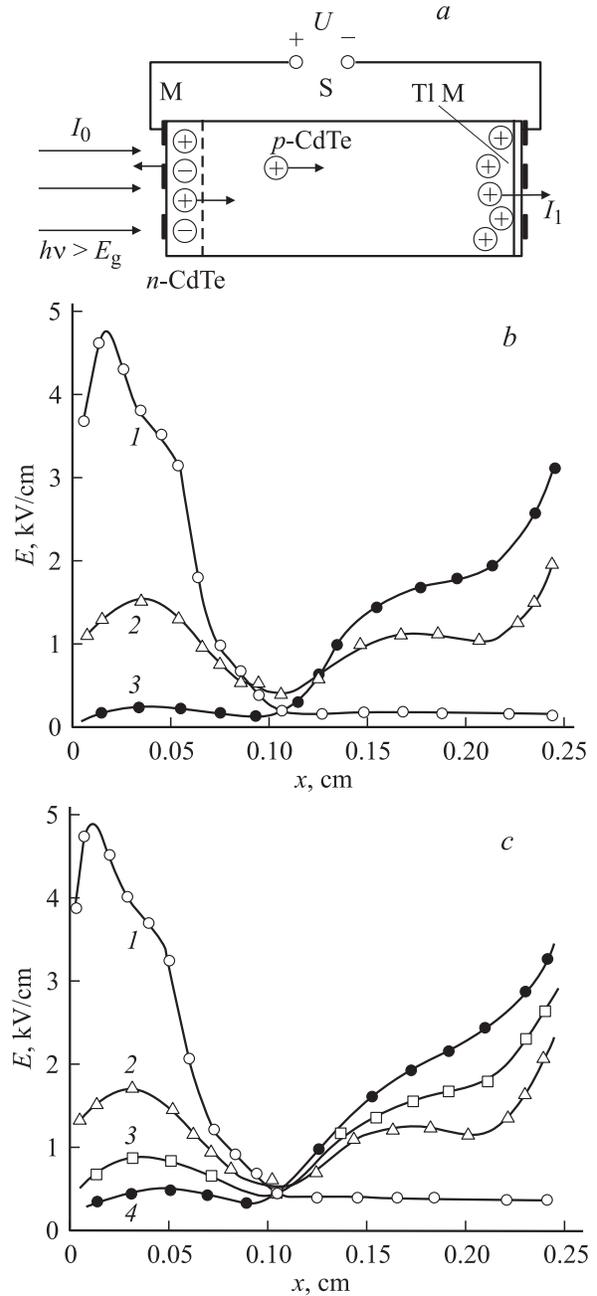


Рис. 2. Фотоиндуцированная перестройка напряженности электрического поля в n-p(Tl)M-наноструктуре при освещении записывающим светом со стороны n-p-перехода. Диаграмма структуры и геометрии освещения (a); b — стационарное распределение напряженности электрического поля E(x) в структуре при интенсивности светового потока I₁, мВт/см²: 1 — 0, 2 — 30, 3 — 70 ($\lambda = 0.82 \text{ мкм}$, U = 400 В), c — распределение напряженности электрического поля в структуре E(x, t) после включения освещения интенсивностью I₁ = 70 мВт/см² через время t, мкс: 1 — 0, 2 — 2, 3 — 4, 4 — 7 ($\lambda = 0.82 \text{ мкм}$, U = 400 В).

„собственным“ светом или прямоугольными световыми импульсами со стороны $n-p$ -перехода (рис. 2, *a*).

Изучение пространственно-временного распределения напряженности электрического поля $E = E(x, t)$ в $n-p(\text{TI})\text{M}$ -наноструктурах на электрооптических кристаллах CdTe при включении (выключении) записывающего светового потока производилось на основании измерения поперечного эффекта Поккельса [10–13]. Как видно из рис. 2, *b*, в отсутствие записывающего светового потока напряженность электрического поля $E = E(x, t)$ максимальная в области объемного заряда обратно смещенного $n-p$ -перехода и близка к нулю в базовой области кристалла. При включении записывающего светового потока фототок в структуре переносится дырками, и заряд в кристалле около TI-слоя определяется зарядом свободных дырок. В кристалле при этом наблюдается обратимое изменение напряженности электрического поля. Стационарное распределение напряженности электрического поля в $n-p(\text{TI})\text{M}$ -наноструктуре 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 TI-слоем. Степень деформации распределения напряженности электрического поля в кристалле увеличивается с увеличением интенсивности освещения. На рис. 2, *c* представлена кинетика установления напряженности электрического поля в этой структуре ($E = E(x, t)$) после включения записывающего света. Видно, что стационарное распределение напряженности электрического поля в этом образце устанавливается через $t \approx 5-10$ мкс после включения записывающего света.

3.3. Считывание записанных изображений в регистрирующих средах на $n-p(\text{TI})\text{M}$ -наноструктурах

Считывание записанной информации в процессоре на $n-p(\text{TI})\text{M}$ -наноструктуре не может производиться на продольном эффекте Поккельса как в модуляторах на MIS-структурах (модуляторы PROM, МДП-ЖК (PROM, MIS-LG)) [1–3]. Приложенное к $n-p(\text{TI})\text{M}$ -наноструктуре напряжение U при освещении остается целиком приложено к кристаллу толщиной d из-за тонкого наноразмерного диэлектрического слоя (TI). Перераспределение напряжения U между кристаллом и TI-слоем структуры при освещении практически отсутствует:

$$\int_0^d E(x) dx = U. \quad (1)$$

Считывания записанной информации в таком процессоре предложено производить путем регистрации величины фототока на выходе процессора от действия считывающего светового потока со стороны TI-слоя. Токовые

характеристики процессора от действия считывающего светового потока содержат информацию о величине и конфигурации записанного в кристалле процессора электрического заряда. Считывающий световой поток „собственного“ света освещает $n-p(\text{TI})\text{M}$ -наноструктуру со стороны TI-слоя при одновременном освещении процессора записывающим светом со стороны $n-p$ -перехода. Такие оптические процессоры, регистрирующие электрический сигнал на выходе процессора от действия считывающего светового потока, известные как гибридные процессоры, сочетают 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.

3.4. Методы расчета фототоков процессора на $n-p(\text{TI})\text{M}$ -наноструктурах при считывании записанных изображений

Записанный локальный электрический заряд в кристалле процессора создает локальное перераспределение напряженности электрического поля между электродами (рис. 2, *b, c*). В неосвещаемых записывающим светом участках кристалла записанный электрический заряд отсутствует, и перестройки электрического поля в этих участках кристалла не происходит. В настоящее время разработана методика расчета плотности протекающего фототока в $n-p(\text{TI})\text{M}$ -структуре при считывании записанной информации считывающим потоком „собственного“ света при известных:

- распределении напряженности электрического поля в кристалле $E(x, t)$;
- интенсивности освещения поверхности структуры считывающим световым потоком I ,
- функции генерации фотоносителей в кристалле от считывающего светового потока [14].

Рассчитаем плотность фототоков в процессоре на $n-p(\text{TI})\text{M}$ -наноструктуре от воздействия считывающего светового потока со стороны отрицательного электрода (TI-слоя), однородно распределенного по площади структуры:

- 1) в отсутствие записанного в кристалле заряда,
- 2) при наличии записанного заряда, однородно распределенного по площади кристалла.

В отсутствие записывающего света распределение напряженности электрического поля в кристалле процессора представлено на рис. 2, *b* кривая (1). При однородном записывающем световом потоке (интенсивностью $I_1 = 70$ мВт/см²) стационарное распределение напряженности $E(x)$ представлено на рис. 2, *b* (кривая 3).

Расчет плотности фототоков от считывающего светового потока проводится в дрейфовом приближении при следующих предположениях:

- 1) квант считывающего „собственного“ света $h\nu$ поглощается непосредственно около освещаемого отрица-

тельного электрода со стороны П-слоя ($x = 0$) и создает в кристалле заряд q_0 ;

2) параметры полупроводникового кристалла μ и τ (подвижности электронов и дырок, времена их жизни соответственно) известны и не изменяются при освещении;

3) освещение структуры считывающим световым потоком со стороны П-слоя не вызывает существенного изменения в распределении электрического поля в кристалле [10].

Заряд Q , собранный на электродах структуры при прохождении зарядом q , созданным в кристалле квантами поглощенного считывающего света, расстояния от x_1 до x_2 , описывается, согласно [10,14], выражением

$$Q(x) = \frac{q(x)}{d} dx, \quad Q(x_1 x_2) = \frac{1}{d} \int_{x_1}^{x_2} q(x) dx. \quad (2)$$

При освещении структуры считывающим светом со стороны отрицательного электрода заряд через кристалл переносится электронами, при этом его величина q_0 будет уменьшаться со временем согласно соотношению

$$q(x) = q_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (3)$$

где τ — время жизни носителей (электронов), t — время с момента генерации заряда.

Время t и координата x носителей заряда в кристалле связаны соотношением

$$dt = \frac{dx}{V_{dr}(x)} = \frac{dx}{\mu E(x)}, \quad (4)$$

где V_{dr} , μ — дрейфовая скорость и подвижность носителей заряда — электронов.

Из выражений (2)–(4) получаем выражение для величины заряда, собранного на электроды структуры от созданного одним квантом света заряда q_0 в точке $x = 0$ (катод),

$$\frac{Q}{q_0} = \frac{1}{d} \int_0^x \exp\left[-\frac{1}{\tau\mu} \int_0^x \frac{dx'}{E(x')}\right] dx. \quad (5)$$

Для каждой заданной интенсивности освещения плотность фототока имеет вид

$$J = e\beta(1 - R) \frac{Q}{Q_0} K_D \frac{I}{h\nu}, \quad (6)$$

где e — заряд электрона, β — внутренний квантовый выход, R — коэффициент отражения и нефотоактивного поглощения света, I — интенсивность освещения, K_D — коэффициент, учитывающий диффузию носителей против направления поля и рекомбинацию на поверхности [10].

Таким образом, зависимость плотности фототока от интенсивности освещения $J = f(I)$ описывается, согласно (5) и (6), через известное распределение напряженности электрического поля в кристалле $E(x) = f(I)$.

Так, считывание записанного заряда в процессоре на рис. 2, *b* может производиться путем измерения величины фототока процессора в зависимости от считывающего светового потока со стороны П-слоя при одновременном освещении процессора записывающим световым потоком со стороны $n-p$ -перехода.

Рассчитаем зависимости фототока J от считывающего светового потока $I = 4 \text{ мВт/см}^2$, при различной интенсивности записывающего света, однородно освещающего поверхность $n-p$ -перехода. Расчет проводился по экспериментально полученным распределениям напряженности электрического поля в кристалле процессора в отсутствие записывающего светового потока ($I_1 = 0$) и при интенсивности записывающего светового потока $I_1 = 70 \text{ мВт/см}^2$ (рис. 2, *b*, кривые 1, 3) для параметров кристалла $\mu\tau$.

Согласно проведенным расчетам отношение фототоков J при включенном записывающем свете (J_1) и выключенном записывающем свете (J_0) составляет:

- 1) $J_1/J_0 = 1.5$ при $\mu\tau = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{В}$,
- 2) $J_1/J_0 = 5.0$ при $\mu\tau = 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{В}$,
- 3) $J_1/J_0 = 12$ при $\mu\tau = 5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{В}$.

На рис. 3, *a* представлены экспериментальные фототоки $n-p(\text{П})\text{М}$ -наноструктуры на кристалле $p\text{-CdTe}$ с параметром (для электронов) $\mu\tau = 8 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{В}$ в зависимости от импульсов считывающего света, освещающего структуру со стороны П-слоя, в условиях одновременного освещения структуры постоянным записывающим светом различной интенсивности со стороны $n-p$ -перехода.

Видно (рис. 3, *a*, кривые 1, 2), что при включении записывающего светового потока амплитуда импульсов фотоотклика от считывающих световых импульсов увеличивается в 5 раз. Это значение J_1/J_0 близко к расчетному для кристалла с параметрами $\mu\tau = 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{В}$ (для электронов).

Таким образом, в таком процессоре записывающий световой поток (со стороны $n-p$ -перехода) вызывает интенсивную перестройку напряженности электрического поля в кристалле, а считывающий световой поток не изменяет распределение напряженности электрического поля в кристалле, созданного записывающим светом, но вызывает резкое увеличение фототока от считывающего света. Такое усиление фототока наиболее ярко выражено в $n-p(\text{П})\text{М}$ -наноструктурах на кристаллах с малым значением параметров $\mu\tau$, при $d/L_D \gg 1$, где L_D — диффузионная длина носителей $L_D = [(kT/e)(\mu\tau)]^{1/2}$. На рис. 3, *b* представлены зависимости фототока при считывающем модулированном световом потоке постоянной интенсивности как функция интенсивности записывающего светового потока I_0 . Видно, что при малой

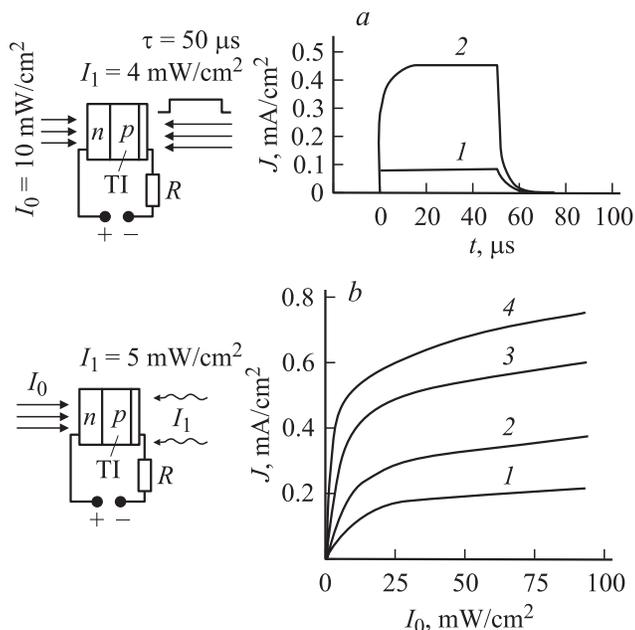


Рис. 3. Фототоки оптического процессора J в зависимости от считывающего светового потока в условиях одновременного освещения процессора записывающим светом со стороны $n-p$ -перехода: *a* — осциллограммы импульсов фототока, возникающие от импульсов считывающего светового потока при интенсивности записывающего постоянного света I_0 , мВт/см²: 1 — 0, 2 — 10 ($U = 300 \text{ В}$); параметры импульсов считывающего светового потока: $I_1 = 4 \text{ мВт/см}^2$, длительность импульса $\tau_1 = 50 \text{ мкс}$, $\lambda = 0.82 \text{ мкм}$; *b* — зависимости фотоотклика J от интенсивности записывающего света со стороны $n-p$ -перехода I_0 при приложенном к структуре напряжении U , В: 1 — 30, 2 — 50, 3 — 100, 4 — 150. Интенсивность считывающего потока $I_1 = 5 \text{ мВт/см}^2$, $\lambda = 0.82 \text{ мкм}$.

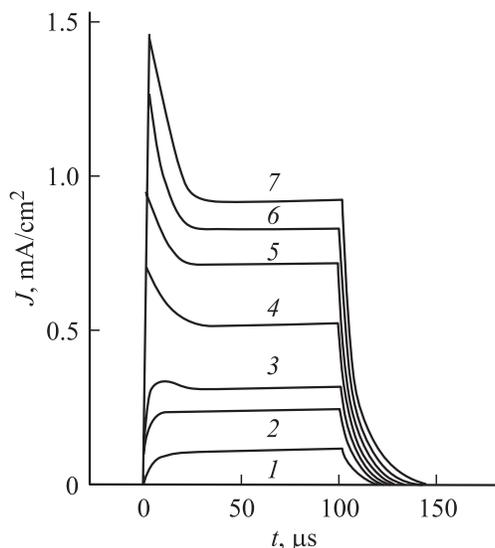


Рис. 4. Осциллограммы импульсов фототока оптического процессора на $n-p(\text{Ti})\text{M}$ -наноструктуре при освещении записывающим световым потоком со стороны $n-p$ -перехода при освещении процессора импульсами записывающего света интенсивности I_0 , мВт/см²: 1 — 5, 2 — 15, 3 — 25, 4 — 50, 5 — 100, 6 — 150, 7 — 200 ($U = 200 \text{ В}$, $\lambda = 0.82 \text{ мкм}$).

интенсивности записывающего потока плотность протекающего фототока пропорциональна интенсивности записывающего потока.

На рис. 4 представлена форма релаксации фототоков $n-p(\text{Ti})\text{M}$ -наноструктуры при освещении поверхности $n-p$ -перехода записывающими прямоугольными световыми импульсами. Видно, что фототоки уменьшаются со временем и достигают стационарных значений через $t \approx 10-15 \text{ мкс}$ после включения светового импульса в соответствии с изменением напряженности электрического поля со временем у освещаемой поверхности $n-p$ -перехода наноструктур (рис. 2, *c*).

Такой способ считывания записанных изображений эффективен только в $n-p(\text{Ti})\text{M}$ -наноструктурах и не эффективен в $\text{M}(\text{Ti})\text{S}$ -наноструктурах.

4. Фотодетекторы с оптически управляемой областью фоточувствительности на $n-p(\text{Ti})\text{M}$ -наноструктурах

На базе $n-p(\text{Ti})\text{M}$ -наноструктур реализован светоправляемый фотодетектор (СФД, LCP), в котором с помощью светового потока можно произвольно управлять размером и конфигурацией его фоточувствительной поверхности. Для этого на управляющую поверхность СФД со стороны $n-p$ -перехода проецируется изображение объекта. Под действием этого управляющего светового потока в кристалле образуется распределенный электрический заряд свободных фотоносителей (дырок) с плотностью, повторяющей яркость изображения объекта на поверхности $n-p$ -перехода. Под действием этого заряда происходит обратимая перестройка напряженности электрического поля в кристалле (рис. 2, *b*). При этом напряженность электрического поля в кристалле у Ti -слоя, расположенного против освещаемой поверхности $n-p$ -перехода, резко возрастает. Этот участок поверхности структуры становится фоточувствительным для светового потока, падающего на поверхность структуры со стороны Ti -слоя (6). Размеры и конфигурация фоточувствительной области на поверхности структуры со стороны Ti -слоя повторяют размеры и конфигурацию поверхности, освещаемой записывающим световым потоком со стороны $n-p$ -перехода, за время единиц микросекунд после включения записывающего светового потока.

На рис. 5 представлено пространственное распределение фотоответа $n-p(\text{Ti})\text{M}$ -наноструктуры на кристалле толщиной 2 мм от считывающего точечного модулированного светового потока как функция расстояния этого потока от записывающего светового потока в виде световой полоски на поверхности $n-p$ -перехода при различной толщине диэлектрического слоя (Ti). Освещение структуры со стороны $n-p$ -перехода производится полоской собственного света ($I_0 = 85 \text{ мВт/см}^2$,

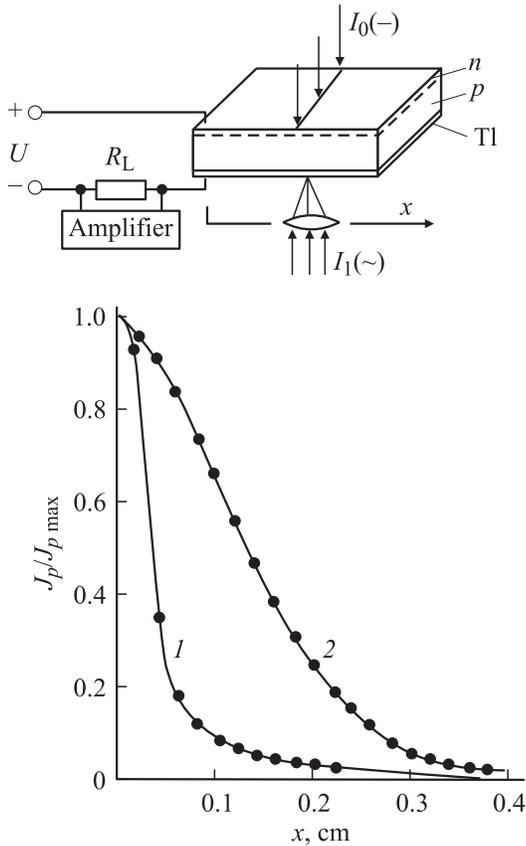


Рис. 5. Координатная зависимость фотоответа $n-p(Tl)M$ -наноструктуры на CdTe от считывающего точечного модулированного светового потока как функция расстояния этого потока от записывающего светового потока на поверхности $n-p$ -перехода в виде световой полоски при различной толщине диэлектрического слоя (Тl) ($U = 100$ В, $\lambda = 0.82$ мкм, толщина кристалла 2 мм): 1 — на $n-p(Tl)M$ -наноструктуре с диэлектрическим слоем Тl, образованным слоем естественного окисла 2–5 нм; 2 — на $n-p(Tl)M$ -наноструктуре с диэлектрическим слоем Тl, образованным специальным окислением поверхности кристалла, толщиной 10 нм.

$\lambda = 0.82$ мкм, $U = 500$ В), координата положения считывающего светового луча на поверхности кристалла (x) отсчитывается от края освещаемой полоски на противоположной поверхности кристалла (со стороны Тl-слоя).

Видно, что наибольшее пространственное разрешение имеют структуры с естественным окисным слоем на поверхности кристалла толщиной 2–5 нм. При увеличении толщины Тl-слоя до 10 нм пространственное разрешение структуры ухудшается. В пространственно-временных модуляторах света на MIS-структурах с толстым диэлектрическим слоем (MIS-LC) при толщине кристалла 300–400 мкм пространственное разрешение модуляторов составляет до 10^2 (пар линий)/мм [1–3]. В модуляторах с наноразмерным диэлектриком (Тl) в соответствии с данными (рис. 5) при толщине кристалла 300–400 мкм можно ожидать более высокое пространственное разрешение по сравнению со структурами

MIS-LC. Такой СФД можно использовать для создания нового типа оптоэлектронного коррелятора, предназначенного для распознавания изображений.

Для этого на управляющую поверхность СФД проецируется эталонное изображение распознаваемого объекта, а на противоположную поверхность — текущее изображение, а затем осуществляется взаимное смещение этих изображений по обеим координатам и их согласование по масштабу и угловой ориентации. Под действием эталонного света соответствующие области противоположной поверхности полупроводниковой структуры становятся фоточувствительными.

На рис. 6, а представлена схема оптического процессора $n-p(Tl)M$ -наноструктуре, предназначенного для сравнения сигналов изображения. На поверхность такого процессора со стороны $n-p$ -перехода проецируется прямоугольный импульс записывающего „собственного“ света I_0 , однородно распределенный по поверхности $n-p$ -перехода. На противоположную поверхность процессора проецируется импульс считывающего „собственного“ света I_1 , однородно распределенного по поверхности структуры.

Временные диаграммы световых импульсов и импульсов фотоответа от них представлены на рис. 6, б. Ча-

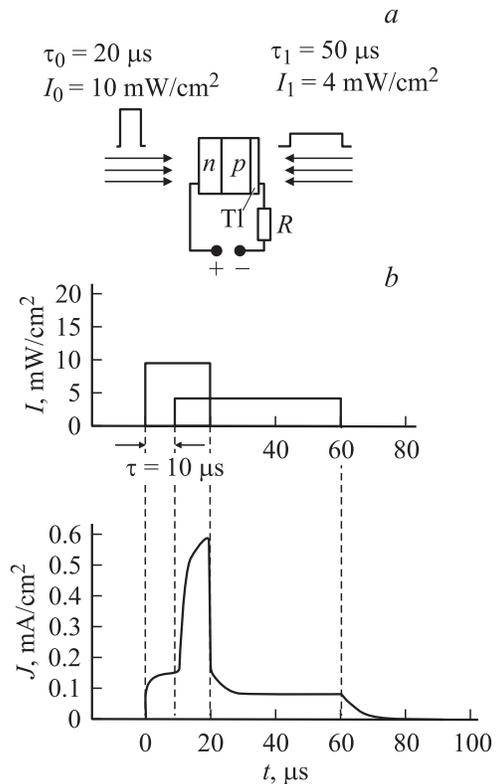


Рис. 6. Оптический процессор на $n-p(Tl)M$ -наноструктуре (на CdTe) для регистрации и обработки сигналов изображений: а — схема структуры и геометрии освещения, б — временная диаграмма записывающего и считывающего световых импульсов и импульсов фотоответа на выходе процессора ($\lambda = 0.82$ мкм) при времени сдвига между импульсами $r = 10$ мкс.

стота следования этих импульсов одинакова, импульсы сдвинуты друг относительно друга на время задержки $\tau = 10$ мкс.

В структуре за это время устанавливается стационарное распределение напряженности электрического поля, соответствующее записываемому изображению (рис. 2, *c*). Во время перекрытия записывающего и считывающего световых импульсов фотоответ от считывающего светового импульса достигает максимального значения (рис. 3, *a*, кривая 2). После окончания записывающего светового импульса фотоответ от считывающего импульса уменьшается до своего минимального значения (рис. 3, *a*, кривая 1).

5. Оптоэлектронные корреляторы изображений некогерентного света на $n-p$ (ТI)М-наноструктурах

Для решения задач обнаружения и распознавания объекта на сложном фоне наибольшее применение нашел корреляционный алгоритм. Распознавание объектов корреляционными ТВ-системами производится на основании сравнения видеосигналов от двух изображений одного и того же сюжета: эталонного изображения объекта, полученного заранее, и текущего изображения сравниваемого объекта.

Такой процессор (рис. 6) можно использовать для создания оптоэлектронного коррелятора, предназначенного для распознавания оптических изображений в системах технического зрения. Для этого эталонное изображение объекта $s(x, y)$, который должен быть опознан, проецируется на поверхность процессора со стороны $n-p$ -перехода импульсным светом. Текущее изображение $g(x, y)$, содержащее изображение объекта $s(x, y)$ и окружающего фона $n(x, y)$, проецируется на противоположную поверхность процессора со стороны ТI-слоя импульсами считывающего света.

При этом фотоответ на выходе процессора оказывается пропорционален интегралу от произведения интенсивностей световых потоков, инициированных эталонным и текущим изображениями на площадь их перекрытия. Фотоотклик на выходе процессора определяется корреляционным интегралом

$$i_c(u, v) = \iint_S S(x, y)G(x - u, y - v)dx dy, \quad (7)$$

где u, v — взаимное смещение изображений вдоль осей x, y соответственно, S — площадь перекрытия изображений.

Затем осуществляется взаимное смещение этих изображений по обеим координатам и их согласование по масштабу и угловой ориентации. Под действием эталонного изображения (со стороны $n-p$ -перехода) в кристалле процессора производится фотоиндуцированная локальная перестройка напряженности электрического

поля, изменяющая фотоответ процессора от считывающего светового потока (со стороны ТI-слоя). При этом сигнал на выходе процессора будет определяться интегралом перекрытия этих изображений, т. е. будет пропорционален функции взаимной корреляции (ВКФ, MCF) эталонного и входного изображений. При совпадении эталонного изображения распознаваемого объекта и его текущего изображения по размеру и угловой ориентации значение ВКФ достигает максимума. Решение о наличии распознаваемого объекта в поле зрения системы принимается при превышении значением ВКФ заданного порога. Время вычисления корреляционного интеграла в предлагаемом корреляторе будет определяться быстродействием процессора и составлять 1.0–10.0 мкс, а сам процесс вычисления реализуется за один такт независимо от размерности (информативности) изображений.

В настоящее время для распознавания изображений используется электронный коррелятор (на электронном процессоре). Основным недостаток электронного коррелятора состоит в сильной зависимости времени распознавания изображений от размерности (числа пикселей) распознаваемого и входного изображений, что затрудняет распознавание в реальном масштабе времени сложных информативных изображений.

Предлагаемый коррелятор изображений на полупроводниковых наноструктурах:

- 1) производит распознавание объектов путем параллельной обработки сигналов изображения в реальном времени (время сравнения изображений $t_c = 1-10$ мкс) независимо от их сложности;
- 2) позволяет производить распознавание изображений объектов в некогерентном свете;
- 3) может быть изготовлен на базе различного типа полупроводниковых кристаллов (GaAs, CdTe) по стандартным электронным технологиям;
- 4) обладает универсальностью и простотой смены эталонных изображений;
- 5) имеет малые габариты и энергопотребление.

Процедуры взаимного смещения эталонного и распознаваемых изображений, их масштабирования и поворота могут быть реализованы известными электронными методами, используемыми в телевизионных и оптических корреляторах изображений.

Предлагаемый коррелятор изображений ориентирован на использование в интеллектуальных системах технического зрения, функционирование которых связано с необходимостью распознавания образов. Коррелятор может быть использован для решения следующих задач: автоматизированная сборка на конвейере, распознавание лиц и отпечатков пальцев, идентификация кредитных карт по фотографии и отпечатку пальца владельца, предотвращение несанкционированного доступа в специальные помещения, навигация и астронавигация летательных аппаратов по наземным ориентирам и звездам, автоматическая стыковка космических аппаратов и др.

6. Заключение

Предложена и реализована быстрая оптическая регистрирующая среда нового типа на полупроводниковых наноструктурах на основе CdTe со временем цикла $t = 10^{-5} - 10^{-6}$ с, с пространственным разрешением 5–10 (пар линий)/мм, чувствительностью 10^{-2} Вт/см². Реализованы и исследованы быстрые оптические процессоры на ее основе, показана возможность их использования для оптических процессоров и корреляторов изображений.

Список литературы

- [1] А.Ф. Васильев, Д. Касасент, И.Н. Кампанец, А.В. Парфенов. *Пространственные модуляторы света* (М., Радио и связь, 1987).
- [2] М.П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко. *Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации* (Л., Наука, 1983).
- [3] А.В. Борошнев, Н.Ф. Ковтонюк. Прикл. физика. **6**, 5 (2000).
- [4] J. Sewchu, A. Waxman, G. Warfield. Sol. St. Electron., **10** (12), 1165 (1967).
- [5] W.E. Dahlke, S.M. Sze. Sol. St. Electron., **10** (8), 865 (1967).
- [6] M.A. Green, J. Shewchu. Sol. St. Electron., **17** (4), 349 (1974).
- [7] А.А. Гуткин, В.Е. Седов. ФТП, **9** (9), 1761 (1975).
- [8] А.Я. Вуль, С.В. Козырев, В.И. Федоров. ФТП, **15** (1), 142 (1981).
- [9] А.Я. Вуль, А.В. Саченко. ФТП, **17** (8), 1361 (1983).
- [10] П.Г. Кашерининов, А.В. Кичаев, А.А. Томасов. ФТП, **29**, (11), 2092 (1995).
- [11] P.G. Kasherininov, F.V. Kichaev, A.N. Lodygin, V.K. Sokolov. Proc. SPIE, **5381**, 292 (2004).
- [12] P.G. Kasherininov, A.N. Lodygin, V.K. Sokolov. Proc. SPIE., **5066**, 273 (2003).
- [13] P.G. Kasherininov, A.V. Kichaev, A.A. Tomasov, V.K. Sokolov. Proc. SPIE, **6594**, 65941G (2006).
- [14] G. Cavalleri, E. Gatti, G. Fabri, V. Svelto. Nucl. Instrum. Meth., **92**, 137 (1971).

Редактор Т.А. Полянская

Fast optical recording environments on semiconductor nanostructures for record and processing of images

P.G. Kasherininov, A.A. Tomasov

Ioffe Physicotechnical Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Fast optical recording environments on semiconductor nanostructures (CdTe, GaAs) for record and processing of images with speed up to 10^6 cycle/s have been developed, that on 2–3 order exceeds speed of known recording environments on structures semiconductor–(liquid crystals) (MIS-LG), photosensitivity of 10^{-2} W/cm², the spatial resolution of 5–10 (pairs lines)/mm. Principles of work nanostructures as fast optical recording environments and methods of reading of the written down images in such environments are described. Fast optical processors for record of images in incoherent light on base nanostructures on crystals CdTe are realized. Optoelectronic real-time image correlator is performed on a basis of such processor. Experimental results on studying parameters of correlator are presented.