

в которой на шаге j ($1 \leq j \leq 9$) ТПЯ Λ_j определяется характеристическим оператором $L_j v = (0, \dots, 0, b_j[\text{dec}(v)])$, а координаты вектора сдвига такие же, как в процедуре упаковки.

В заключение отметим возможные модификации алгоритма. Во-первых, простое изменение элементарных признаков (см. рис. 1 и 2) позволяет с той же скоростью находить любые бинарные геометрические структуры в скользящем окне 3×3 (точки, стыки, пересечения и др.). Во-вторых, поиски структур в окнах большего размера можно производить многоступенчатой классификацией в окнах 3×3 . Таким образом, открывается возможность для поиска сложных геометрических структур на аэрокосмических изображениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Proceedings of the 7-th Conference on Pattern Recognition.**— North Holland Press, 1984.— P. 42.
2. **Прэтт У.** Цифровая обработка изображений.— М.: Мир, 1982.
3. **Чесалин Л. С., Лубман С. В., Борисенко В. И.** и др. Самостоятельный видеотерминал СВИТ.— М., 1982.— (Препр./ИКИ АН СССР; 721).
4. **Adams I., Wallis R.** New concepts in display technology // *Computer.*— 1977.— 10, N 8.— P. 61.

Поступила в редакцию 20 июня 1988 г.

УДК 778.38 : 621.373

А. И. ЗАВАЛИН, В. Ф. ЛАМЕКИН, В. Л. СМИРНОВ
(Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПИКОСЕКУНДНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАММ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ $A^{III}B^V$

Для сверхскоростной обработки информации, представленной в виде двумерных изображений, перспективным является применение динамических голограмм, сформированных на основе светоиндуцированных неравновесных носителей заряда (ННЗ) в полупроводниках. В [1] исследовалась запись динамических голограмм двумерных изображений на светоиндуцированных ННЗ в кристаллическом кремнии, однако используемая длительность записывающих лазерных импульсов (7 нс) и большая величина коэффициента амбиполярной диффузии кремния (~ 10 см²/с) существенно ограничивали разрешающую способность регистрирующей среды (до 100 мм⁻¹) и частоту циклов записи до 20 МГц. В то же время, как показывают результаты записи динамических дифракционных решеток с помощью ультракоротких импульсов (УКИ) [2, 3], в полупроводниках состава $GaAs_xP_{1-x}$ диффузия вносит малый вклад в распад решеток и слабо ограничивает разрешающую способность ($\leq 2-3 \times 10^3$ мм⁻¹). Кроме обычных динамических голограмм, перспективными являются поляризационные динамические голограммы, позволяющие записывать и восстанавливать поляризацию предметной волны. В [4, 5] показана возможность записи поляризационных динамических дифракционных решеток в кристаллическом кремнии с помощью УКИ и в сульфиде кадмия с помощью наносекундных импульсов.

Цель данной работы — исследование возможности записи динамических (в том числе поляризационных) голограмм двумерных изображений с помощью индуцированных пикосекундными световыми импульса-

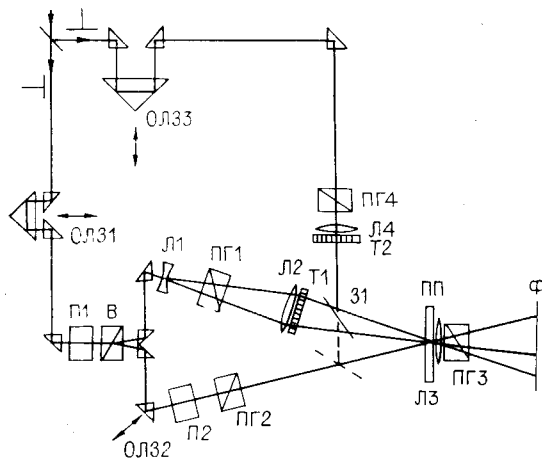


Рис. 1

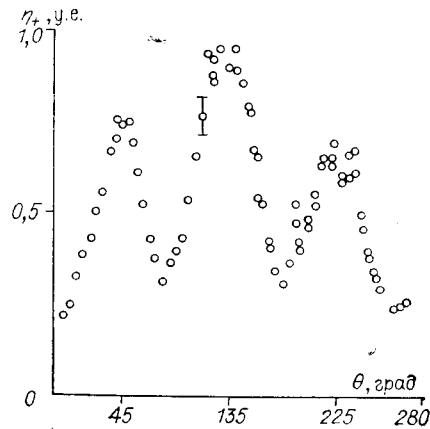


Рис. 2

ми ННЗ в полупроводниковых структурах состава $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$, а также проведения корреляционного анализа изображений на их основе.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Для записи и считывания динамических голограмм использовалась вторая гармоника ($\lambda = 0,54$ мкм) излучения неодимового лазера с длительностью УКИ $\tau_k = 20$ пс и энергией $E_k \approx 10$ мДж [6]. Записывающий УКИ проходил через линзу задержки ОЛЗ1, затем с помощью призмы Волластона (В) и системы призм полного внутреннего отражения разделялся на две части, образуя предметный и опорный УКИ, которые попадали на поверхность полупроводниковой структуры. Призмы Глана ПГ1 и ПГ2, установленные на прецизионных угломерных устройствах, и полуволновая пластинка П2 формировали предметный и опорный УКИ с параллельными или взаимно перпендикулярными направлениями плоскостей поляризации. Исследовалась запись голограмм на схеме Фурье — Фраунгофера, при этом линзы Л2 и Л1 формировали в плоскости ПП фурье-образ транспаранта Т1, а линза Л3 — перевернутое его изображение в плоскости Ф. При уравнивании длин оптических путей опорного и предметного УКИ происходила их самодифракция на решетке ННЗ в полупроводниковой структуре. Оптической линией задержки ОЛЗ2 и полуволновой пластинкой П1 сигнал самодифракции настраивался на максимум. Затем измерялась зависимость сигнала самодифракции от положения ОЛЗ2. Из этой зависимости определялась длина временной когерентности УКИ, которая составила величину около 4 мм. Часть энергии основного УКИ применялась для считывания динамической голограммы, причем использовалось также и излучение основной частоты лазера ($\lambda = 1,08$ мкм). Затем считывающий УКИ проходил линзу задержки ОЛЗ3 и зеркалом З1 направлялся на голограмму. Для получения сигнала корреляции транспарантов Т1 и Т2 использовалась линза Л4, фокусное расстояние которой (190 мм) равно фокусному расстоянию системы линз Л1 — Л2. При этом восстанавливающий УКИ проходил под предметным (на рис. 1 показан вид сверху, поэтому они сливаются) и в плоскости Ф располагался над предметным. Для обычного восстановления голограммы считывающий УКИ проходил под опорным, при этом линза Л4 и транспарант Т2 не использовались. Изображение, восстановленное с голограммы, или сигнал корреляции располагался в плоскости Ф над предметным или над опорным УКИ соответственно. При восстановлении поляризационной голограммы в считывающий канал вводились дополнительные призмы Глана ПГ4 и ПГ3 для улучшения степени линейной поляризации УКИ и отношения сигнал/шум. В качестве транспарантов Т1 и Т2 применялись стандартные штриховые миры 4 и 5.

В экспериментах использовались монокристаллические эпитаксиаль-

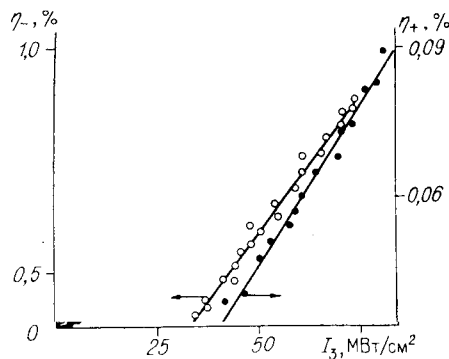


Рис. 3

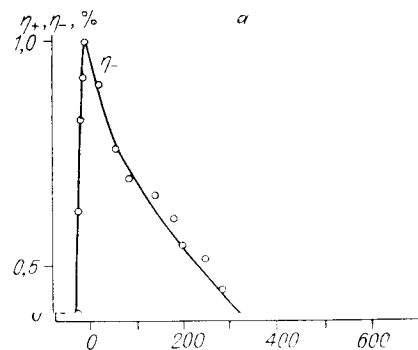


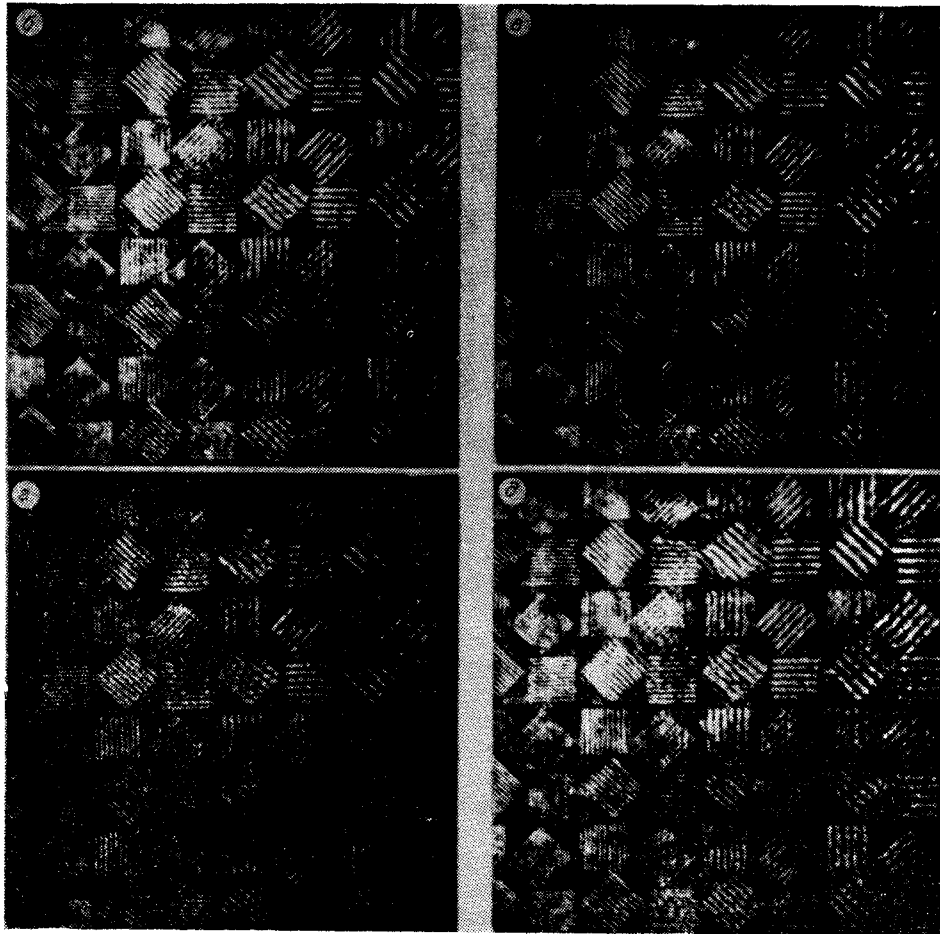
Рис. 4

ные полупроводниковые пленки состава $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$ ($x = 0,03-0,3$) толщиной 2—8 мкм, выращенные на подложке GaP. При этом максимальная дифракционная эффективность голограмм для УКИ с параллельными поляризациями $\eta_- \approx 1\%$ и для УКИ с взаимно перпендикулярными поляризациями $\eta_+ \approx 0,09\%$ была получена при $x = 0,3$ и толщине пленки 3 мкм.

В процессе записи поляризационных динамических голограмм было обнаружено, что их дифракционная эффективность η_+ существенно зависит от угла Θ между плоскостью поляризации одного из записывающих УКИ и плоскостями кристаллической решетки полупроводниковой структуры. На рис. 2 показана эта зависимость, из которой видно, что максимальная эффективность достигается при угле 45° . Это согласуется с результатом работы [5]. При этом дифракционные максимумы ± 1 -го порядка линейно поляризованы, причем ориентация их плоскости поляризации соответствует восстанавливаемому предметному УКИ, т. е. перпендикулярна плоскости поляризации максимума нулевого порядка.

На рис. 3 показана измеренная зависимость дифракционной эффективности голограммы с параллельными η_- и взаимно перпендикулярными η_+ плоскостями поляризации записывающих УКИ от их суммарной интенсивности I_3 . Ориентация кристаллических плоскостей полупроводниковой структуры соответствовала максимальной эффективности дифракции. Видно, что линейный участок для голограмм, записанных при параллельных плоскостях поляризации УКИ, находится в области их суммарных интенсивностей 0,3—90 МВт/см², а при взаимно перпендикулярных — 22—90 МВт/см². Верхний предел этих участков определяется пробоем поверхности и сильно зависит от ее качества, нижний — рассеянием на неоднородностях полупроводника и селективностью системы регистрации.

На рис. 4 показана экспериментальная кривая зависимости дифракционной эффективности голограмм η_+ и η_- от временной задержки τ_3 считывающего УКИ при фиксированной интенсивности записывающих УКИ (а), а также фотографии фрагментов восстановленных голограмм штриховой миры для задержек τ_3 , равных 40 (б), 240 (в), 440 пс (г), и нулевой задержки для поляризационной голограммы (д). При этом суммарная интенсивность записывающих УКИ составила около 60 МВт/см². Устанавливая критерий различимости штрихов миры на уровне 3 дБ, определяем максимальную пространственную частоту транспаранта, фиксируемую голограммой, равную 20 мм⁻¹, что соответствует записанной плотности информации свыше 10^4 бит/мм² (при площади транспаранта 840 мм² и площади голограммы 3,1 мм²). Видно, что с течением времени



не происходит размывания изображения, лишь уменьшается его яркость и контраст. Отметим, что в интервале несущих пространственных частот голограммы $200\text{--}2000\text{ мм}^{-1}$ не обнаружено ухудшения контраста в зависимости от величины несущей пространственной частоты (в отличие от [1]). Для голограмм, записанных УКИ с параллельными поляризациями, время сохранения записанной информации составляет (по уровню $1/e$) около 300 пс, в то время как для поляризационных голограмм эта величина на 2—3 порядка меньше [4]. При сравнении кривой $\eta_+(\tau_3)$ с зависимостью интенсивности сигнала самодифракции от положения ОЛЗ2 получено, что в пределах ошибки эксперимента ($\pm 5\%$, т. е. ± 1 пс) они совпадают. Отсюда можно сделать вывод, что «время жизни» поляризационной голограммы не более 2 пс, а в наших экспериментах время сохранения записанной информации определяется длительностью лазерного импульса. После стирания поляризационной голограммы полупроводник остается однородно возбужденным и полная релаксация ННЗ происходит за время 500—600 пс. Поскольку полупроводник состава $\text{GaAs}_{0,3}\text{P}_{0,7}$ не является прямозонным, основными механизмами релаксации будут различные виды безызлучательной рекомбинации ННЗ, приводящие к нагреву тонкопленочной структуры. При рекомбинации каждой пары ННЗ выделяется 2,2 эВ тепловой энергии. Нагрев полупроводниковой пленки площадью 1 мм^2 и толщиной 3 мкм при концентрации ННЗ $\sim 10^{18}\text{ см}^{-3}$, т. е. при выделении тепла $\sim 10^{-6}$ Дж, составляет $\approx 0,2\text{ К}$ (теплоемкость материала 0,43 Дж/(г · К), плотность $4,13\text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$). Диффузия выделившегося за 1 цикл записи тепла при такой разности температур между пленкой с теплопроводностью $0,3\text{ Вт}/(\text{см} \cdot \text{К})$ [7] и подложкой из пленки толщиной 3 мкм происходит за времена $\Delta t \sim 10^{-7}$ с. Таким образом, при частотах следования записывающих УКИ $> 10\text{ МГц}$

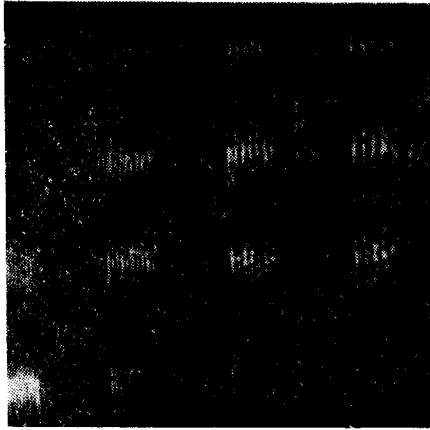


Рис. 5

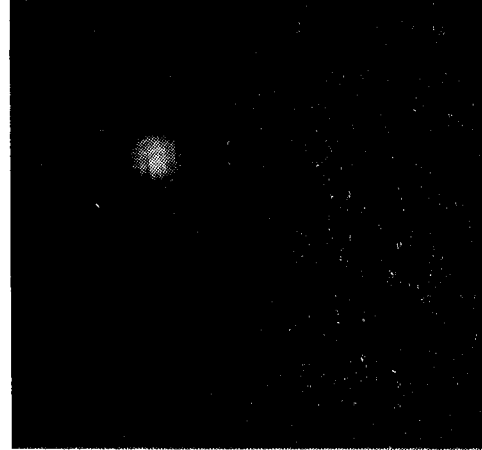


Рис. 6

будет происходить накопление тепла в пленке. При термостатировании подложки разность температур пленки и подложки будет возрастать, и после достижения величины 20—40 К время Δt уменьшится до $\Delta t \leq 10^{-9}$ с. Таким образом, при термостатировании подложки возможно увеличение частоты циклов записи свыше 1 ГГц.

Для решения многих задач прикладного характера необходим анализ изображений по направлению их штрихов, получение диаграммы направленности. Такой анализ может быть проведен с помощью измерения функции корреляции данного изображения и изображения с непрерывным спектром пространственных частот вдоль радиуса-вектора заданного направления в фурье-плоскости. Для экспериментального измерения функции корреляции в фурье-плоскости ПП формировался спектр пространственных частот считывающего излучения в виде прямой линии, сформированный с помощью цилиндрической линзы, установленной вместо транспаранта Т2 и линзы Л4. При совпадении части спектра пространственных частот исследуемого изображения со сформированным спектром в плоскости Ф регистрировался сигнал корреляции (рис. 5). Для используемых транспарантов в виде штриховой миры форма сигнала корреляции с небольшими искажениями соответствовала восстановленным изображениям отдельных элементов миры с одинаковым направлением штрихов. Путем вращения цилиндрической линзы определялась селективность анализа по направлению, которая для данной схемы эксперимента составляла около 1° .

Для проведения корреляционного анализа изображений как по направлению их штрихов, так и по дискретному спектру пространственных частот использовалась традиционная схема согласованной фильтрации, в которой транспарантами Т1 и Т2 служили идентичные штриховые миры, а в качестве линзы Л4 использовалась сферическая линза, при этом не происходило изменения масштаба. С помощью взаимного перемещения линз Л2 и Л4 и поворота миры Т2 осуществлялось точное совмещение фурье-спектров мир Т1 и Т2 в плоскости ПП. Затем при выборочном освещении элемента миры Т2 зондирующим УКИ путем линейного перемещения миры поперек луча, апертура которого равнялась размеру элемента миры Т2, в плоскости Ф регистрировался сигнал (рис. 6), соответствующий корреляционной функции заданного элемента миры Т2 и аналогичного элемента миры Т1, а координата центра корреляционного отклика в плоскости Ф соответствовала координате элемента миры Т1 в плоскости миры [8]. Как видно из фотографии на рис. 6, соседние элементы практически не дают корреляционного сигнала. Задержка считывающего УКИ относительно момента записи голограммы при параллель-

ных плоскостях поляризации записывающих УКИ плавно увеличивалась до 600 пс, при этом сигнал корреляции уверенно регистрировался до времени задержки 300 пс.

Таким образом, в данной работе показана возможность записи динамических голограмм (в том числе поляризационных) двумерных изображений с помощью УКИ на ННЗ в полупроводниковых эпитаксиальных структурах на основе тройных соединений $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$. Определен динамический диапазон при записи УКИ с длиной волны 0,54 мкм и длительностью 20 пс, составивший 25 дБ в случае параллельных плоскостей поляризации записывающих УКИ и 6 дБ в случае взаимно перпендикулярных плоскостей поляризации. Определено также «время жизни» голограмм (по уровню $1/e$), равное около 300 пс в первом случае и менее 2 пс — во втором. Получено, что для несущих частот голограммы 200—2000 мм^{-1} не происходит ухудшения контраста изображения. На основе записанных голографических согласованных фильтров показана возможность проведения корреляционного анализа изображений по направлению их штрихов с точностью 1° и по дискретному спектру пространственных частот с точностью выше 1 мм^{-1} . При этом длительность цикла анализа, включающего запись голограммы и ее зондирование с определенной задержкой, может составлять от 20 до 400 пс, а максимальная частота таких циклов — 1,5—2 ГГц. Таким образом может обрабатываться поток информации около 10^4 Гбит/с при площади голограммы 1 мм^2 .

В заключение авторы выражают признательность Ю. А. Ершову за помощь в проведении эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Woerdman J. P. Formation of a transient free carrier hologram in Si // Opt. Commun.— 1970.— 2, N 5.— P. 212.
2. Вайткус Ю., Пятраускас М., Ярашюнас К. Определение субнаносекундных времен жизни в монокристаллах GaAs:Cr и CdTe методом динамических пикосекундных решеток // ФТП.— 1982.— 16, вып. 6.
3. Завалин А. И., Караванский В. А., Ламекин В. Ф. и др. Преобразование мод под воздействием лазерных УКИ в полупроводниковых планарных волноводах // Квантовая электрон.— 1988.— 15, № 7.
4. Васильева М. А., Вищакас Ю., Дерингас А. и др. Решетки анизотропии в кремнии, введенные пикосекундными световыми импульсами // Квантовая электрон.— 1984.— 11, № 12.
5. Борщ А. А., Кухтарев Н. В., Семиошко В. Н. Обращение волнового фронта при векторной самодифракции на поляризационных голограммах // Изв. АН СССР. Сер. физ.— 1987.— 51, № 2.
6. Данелюс Р., Пискаускас А., Сируткайтис В. и др. Параметрические генераторы света и пикосекундная спектроскопия.— Вильнюс: Мокслас, 1983.
7. Handbook of Electronic Materials.— N. Y.:IFI-Plenum, 1971—1972.— V. 7.
8. Оптическая голография/Под ред. Г. Колфилда.— М.: Мир, 1982.— Т. 2.

Поступила в редакцию 23 августа 1988 г.

УДК 681.3

А. В. БРОННИКОВ, Ю. Е. ВОСКОВОЙНИКОВ

(Новосибирск)

КОМБИНИРОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ЗАШУМЛЕННЫХ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

Методы линейной фильтрации, основанные на быстрых алгоритмах свертки, получили широкое распространение в цифровой обработке сигналов [1]. Однако в ряде случаев линейная фильтрация (как правило,

© 1990 Бронников А. В., Воскобойников Ю. Е.