

УДК 535.89

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНЫХ
И ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА
НА ОСНОВЕ ПОПЕРЕЧНОГО ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА
В КРИСТАЛЛАХ СИЛИКАТА ВИСМУТА

*Бережной А. А., Бужинский А. А., Грознов М. А.,
Попов Ю. В., Сомс Л. Н., Степанов А. И.*

Проведены результаты исследований частотно-контрастных и временных характеристик пространственных модуляторов света (ПМС) на основе поперечного электрооптического эффекта в кристаллах силиката висмута. Показано, что применение ПМС такого типа наиболее целесообразно при оптической обработке простых высококонтрастных изображений.

Прогресс в области систем оптической обработки информации непосредственно связан с созданием устройств записи и оперативного преобразования двумерных оптических сигналов. Одними из перспективных устройств считаются пространственные модуляторы света (ПМС) на основе поперечного электрооптического эффекта в кристаллах силиката висмута [1-4].

Особенностью ПМС этого типа является преобразование пространственно-частотных характеристик: оконтуривание, угловая селекция пространственных частот и другие, что дало основание авторам работы [3] назвать эти устройства «преобразователями изображения» (ПРИЗ).

Изображение на ПМС данного типа записывается в виде пространственного распределения изменения показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн и визуализируется выделением одной из ортогонально поляризованных компонент прошедшего сквозь ПМС считывающего света. На практике обычно устанавливается такую ориентацию поляризатора, при которой подавляется нулевой порядок дифракции считывающего света. В настоящей работе приведены результаты исследований зависимости отношения интенсивности компоненты волны, прошедшей через таким образом ориентированный поляризатор, к полной интенсивности I_0 считывающего света (эта величина, обозначаемая далее $\eta_{вн}$, где n — номер дифракционного порядка, по смыслу подобна дифракционной эффективности η и отвечает за качество воспроизведения изображения) от пространственной частоты Δ и мощности P записывающего света при различных значениях контраста K .

Схема установки

Схема установки для определения частотно-контрастных (ЧКХ) и временных характеристик ПМС представлена на рис. 1.

В качестве источника записывающего света использовался лазер (1) с длиной волны $\lambda=0,44$ мкм и максимальной мощностью 20 мВт. Интенсивность сигнала записи изменялась с помощью калиброванных светофильтров (2). При исследовании ЧКХ на модулятор проектировалась синусоидальная интерференционная решетка, создаваемая с помощью лазерного интерференционного резольвометра (ЛИР) (3) [5]. Угол поворота ЛИР относительно оптической оси определял пространственную частоту Δ , которую можно было варьировать в пределах $0,1 \div 50$ лин/мм. Диапазон изменения пространствен-

ной частоты ЛИР ограничивался со стороны больших Λ виньетированием при большом развороте устройства относительно оси записываемого излучения, со стороны малых Λ — наблюдавшимся заметным искажением формы интерференционных полос за счет нерегулируемых aberrаций, определяемых неоднородностью материала (исландский шпат) и ограниченной точностью изготовления оптических компонентов ЛИР.

Как известно [6], для поперечного электрооптического эффекта величина модуляции считывающего света зависит от взаимной ориентации вектора электрического поля, приложенного к ПМС, кристаллографических осей, плоскости поляризации считывающего света и направления вектора записываемой решетки. В нашей работе волновой вектор k пространственной решетки, характеризующий направление интерференционных полос, не менял своего положения при изменении Λ . Фазовая пластинка (2) осуществляла поворот

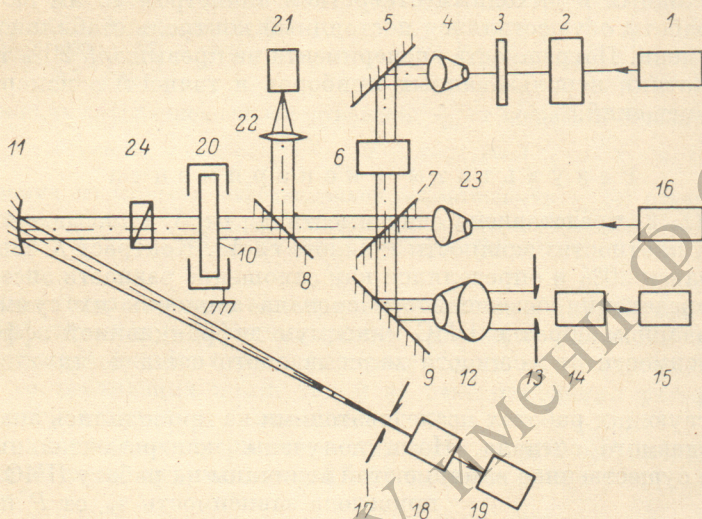


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — лазер ЛПМ-11 ($\lambda=0.44$ мкм); 2 — фазовая пластинка; 3 — набор калиброванных светофильтров; 4, 12, 23 — расширитель пучка; 5, 7, 8, 9, 11 — зеркала; 6 — ЛИР; 10 — ПРИЗ; 13 — щель; 14, 18, 21 — фотоприемник; 15 — самописец; 16 — лазер ЛГ-38 ($\lambda=0.63$ мкм); 17 — диафрагма, 19 — осциллограф С8-13; 20 — экран, 22 — линза; 24 — поляризатор.

плоскости поляризации излучения лазера относительно ориентации кристаллографических осей ПРИЗ для получения максимального контраста записываемой решетки.

С помощью поляризатора (24) осуществлялось уменьшение величины фоновой засветки от нулевого порядка дифракции при измерениях интенсивности высших дифракционных порядков (особенно существенной для малых Λ) в фокальной плоскости (17) зеркала (11). Поляризатор (24) был поставлен скрещенно по отношению к линейной поляризации непродифрагировавшего луча, вышедшего из ПМС.

Величина сигнала, поступающего на ПМС, регистрировалась с помощью фотоприемника (21), на который излучение подавалось выдвижным зеркалом (8). Для контроля контраста K записываемой на ПМС решетки часть излучения с помощью системы зеркал (7), (9) и расширителя пучка (12) попадала на щель (13) фотоприемника (14). При этом фотоприемник можно было перемещать в плоскости фронта записываемой волны. Величина полученного сигнала регистрировалась на самописце (15). Считывание информации с ПМС осуществлялось лазером (16) на длине волны $\lambda=0.63$ мкм с максимальной мощностью 10 мВт.

Фокусное расстояние зеркала (11) было выбрано равным 3 м исходя из необходимости пространственного разрешения дифракционных максимумов, соответствующих малым Λ , и минимизации влияния искажений, вносимых aberrациями зеркала для больших Λ . Сфокусированный дифрагированный сигнал

попадал в отверстие диафрагмы (17) фотоприемника (18). Временные характеристики дифрагированного сигнала регистрировались с помощью запоминающего осциллографа (19).

Исследуемый образец ПМС представлял собой пластину силиката висмута размерами $20 \times 20 \times 0.7$ мм. Управляющее напряжение подводилось к прозрачным электродам из In_2O_3 , напыленным на обе плоские поверхности ПМС, с помощью серебряных контактов.

Это напряжение можно было изменять в пределах от 0 до 3 кВ. Толщина (700 мкм) кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ была близка к оптимальной (при уменьшении толщины ПМС, как это было показано в работе [7], η увеличивается, однако при этом напряженность поперечного электрического поля в объеме модулятора возрастает и может приблизиться к пробивной). Для защиты от внешних электромагнитных полей и фоновой засветки ПМС был помещен в заземленный экран (20) с входным и выходным отверстием диаметром 15 мм каждое.

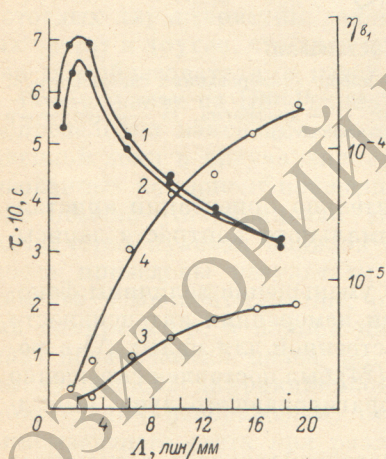
Во время работы осуществлялся постоянный контроль стабильности работы лазеров от времени. Погрешность эксперимента не превышала 20% и определялась погрешностями использованных приборов и точностью измерений механических перемещений.

Результаты эксперимента

На рис. 2 (1, 2) представлена зависимость η_{B_1} от Δ записываемой решетки при различных плотностях мощности P синего света. Контраст K записываемой решетки был равен 90% и определялся как отношение разности экстремальных значений распределения освещенности сигнала записи к их сумме.

На исследованном образце ПМС максимум дифракционной эффективности $\eta_{B_1, \text{max}}$ вне зависимости от мощности записываемого света достигался при $\Delta \approx 2$ лин/мм.

В предшествующих работах исследователями не приводились значения контраста записываемого сигнала. Нами получены экспериментальные данные, показывающие существенное влияние этой величины на работу ПМС. На рис. 3



приведена зависимость η_{B_1} от P при различных K и Δ . Кривые 1 и 2 соответствуют одной пространственной частоте $\Delta = 1.1$ лин/мм, но разным контрастам записываемой синусоидальной решетки (70 и 90% соответственно). При этом величины дифракционной эффективности η_{B_1} различались почти на 30%. Кривая 3 на этом рисунке соответствует зависимости максимальной $\eta_{B_1, \text{max}}$ от P .

Рис. 2. Зависимость дифракционной эффективности η_{B_1} (1, 2) и времени подъема $\tau_{\text{под}}$ (3) и спада ($\tau_{\text{сп}}$) 4 от записываемой пространственной частоты Δ при контрасте $K=90\%$.

P , мкВт/см²: 1, 3, 4 — 250, 2 — 50.

При всех значениях записываемых пространственных частот в наших экспериментах наблюдалось несколько дифракционных максимумов различных порядков. На рис. 4, а представлена диаграмма зависимости η_{B_n} от номера дифракционного максимума n . Наблюдается резкое уменьшение доли энергии в дифракционных максимумах по мере увеличения n .

Весьма важной особенностью ПМС является наличие зависимости η от времени [1]. На рис. 2 (3, 4) приведены зависимости времени подъема $\tau_{\text{под}}$ и времени спада $\tau_{\text{сп}}$ (до уровня 50% от максимального значения $\eta_{B_1, \text{max}}$) дифракционной эффективности η_{B_1} от пространственной частоты Δ . Величины $\tau_{\text{под}}$ и $\tau_{\text{сп}}$ монотонно растут по мере увеличения Δ , причем время спада почти в 3 раза больше, чем время подъема во всем диапазоне записываемых пространственных частот.

На рис. 4, б показана диаграмма зависимости времени спада от номера дифракционного максимума. Виден почти линейный рост $\tau_{\text{сп}}$ по мере увеличения номера n от 1 до 3 (максимальный номер наблюдавшегося дифракционного порядка определялся чувствительностью фотоприемника).

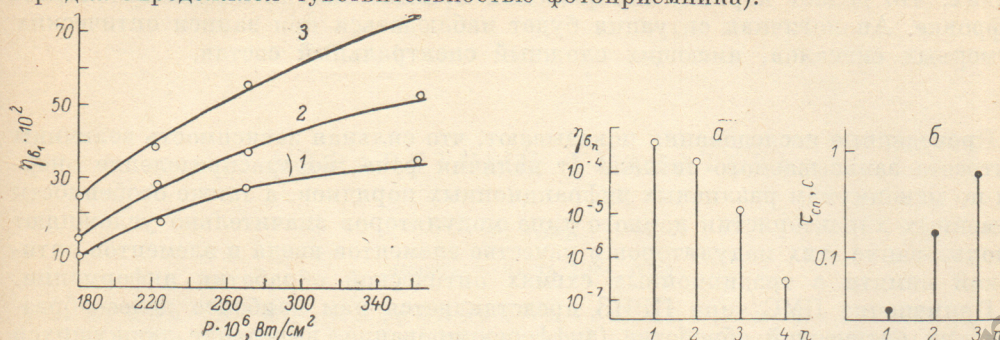


Рис. 3. Зависимость дифракционной эффективности η_{β} от мощности записываемого света P .

$K, \%$: Λ , лин/мм: 1 — $K=70, \Lambda=1.1$, 2 — $K=90, \Lambda=1.1$, 3 — $K=90, \Lambda=21.1$.

Рис. 4. Диаграмма зависимости дифракционной эффективности $\eta_{\beta n}$ (а) различных порядков дифракции и времени спада $\tau_{\text{сп}}$ (б) от номера дифракционного максимума n при $K=90\%$, $\Lambda=1.1$ лин/мм, $P=250$ мкВт/см².

Поперечная составляющая электрического поля в модуляторе определяется напряжением питания ПМС и толщиной кристалла селената висмута. Рост приложенного напряжения приводит к увеличению η_{β} , как за счет возрастания поперечных составляющих поля, так и за счет изменения распределения их в объеме электрооптического элемента.

В наших экспериментах при изменении поля с 1 до 3 кВ наблюдалось почти линейное увеличение дифракционной эффективности η_{β} .

Обсуждение результатов

Возрастание, а затем уменьшение η_{β} по мере увеличения Λ (рис. 2) является результатом конкуренции двух основных факторов: рост Λ приводит к созданию все возрастающих локальных напряженностей поперечных электрических полей, что ведет к увеличению степени модуляции показателя преломления, но при этом уменьшается глубина проникновения этих полей в объем кристалла, уменьшая длину области наведенного двулучепреломления. Совместное действие этих факторов приводит к появлению точки, где дифракционная эффективность η_{β} максимальна (в нашем случае при $\Lambda \approx 2$ лин/мм независимо от мощности и контраста записываемого света).

Объяснить зависимость η_{β} от контраста K сигнала записи можно, по нашему мнению, следующим образом: при уменьшении значения K отличие в освещенности различных точек на поверхности модулятора света становится незначительным, что вызывает соответственно уменьшение локальной концентрации зарядов и обусловленных ими поперечных электрических полей и как следствие этого — спад дифракционной эффективности η_{β} .

Наблюдаемое на рис. 4, а перераспределение энергии по различным дифракционным максимумам несколько уменьшает значение η_{β} , так как I_0 является константой.

Переходя к анализу временных характеристик данного типа модуляторов, отметим, что $\tau_{\text{под}}$ гораздо меньше, чем $\tau_{\text{сп}}$ для всех записываемых частот Λ (рис. 2). Качественный анализ временных характеристик этого типа ПМС приведен в работе [8]. Принимая модель эффективных RC-цепочек, изложенную в данной работе, одним из возможных объяснений роста как $\tau_{\text{под}}$, так и $\tau_{\text{сп}}$ с увеличением Λ может быть возрастание эффективной емкости локальных областей концентрации фотозарядов в приповерхностном слое ПМС с ростом Λ .

К важному следствию приводит тот наблюдавшийся факт, что убывание интенсивности света, продифрагировавшего в первый и более высокие порядки

дифракции, происходит с разной скоростью (рис. 4, б). Увеличение $\tau_{\text{сп}}$ с возрастанием номеров максимумов приводит к тому, что через какое-то время происходит выравнивание величин энергий в различных дифракционных порядках, что делает картину изображений практически не поддающейся расшифровке. Аналогичная ситуация будет наблюдаться при записи оптических двумерных сигналов, имеющих сложный спектральный состав.

Проведенные исследования показывают, что сильная зависимость величины контраста записываемого сигнала от наличия фона, перераспределение энергии по максимумам различных дифракционных порядков, а также особенности временных характеристик данного типа модуляторов значительно усложняют использование этих модуляторов в качестве элементов ввода и элементов оптической памяти в традиционных схемах оптической обработки информации.

Применение ПМС типа ПРИЗ представляется нам наиболее целесообразным при оптической обработке (дифференцирование, выделение движущихся деталей и т. п.) простых высококонтрастных изображений.

Литература

- [1] Петров Л. П., Хоменко А. В., Шлягин М. П., Марахонов В. И. — В кн.: Оптическая обработка информации, 1979, с. 143.
- [2] Бережной А. А., Попов Ю. В. — Изв. АН СССР, сер. физ., 1980, т. 44, с. 1608.
- [3] Петров М. П., Марахонов В. И., Шлягин М. Г., Хоменко А. В., Красильников Ш. В. — ЖТФ, 1980, т. 50, с. 1311.
- [4] Бережной А. А., Королев Ю. Г., Попов Ю. В. — Квант. электрон., 1981, т. 8, № 10, с. 2251.
- [5] Барсуков К. А., Осипов Ю. В., Попов В. Н. — Опт. и спектр., 1980, т. 48, в. 3, с. 605.
- [6] Хоменко А. В., Шлягин М. Г., Марахонов В. И. — В кн.: Применение методов оптической обработки информации и голографии, 1980, с. 243.
- [7] Березкин В. И., Хоменко А. В. — Письма ЖТФ, 1980, т. 4, в. 20, с. 1265.
- [8] Петров М. П. — В кн.: Применение методов оптической обработки информации и голографии, 1980, с. 223.

Поступило в Редакцию 25 октября 1982 г.