

Рис. 4.

непосредственной визуализации выводимой информации на пленку нанеслось термочувствительное покрытие.

В качестве материала для форм высокой печати применялся листовой прозрачный технический целлулоид толщиной 300—800 мкм. Рабочая сторона покрывалась тонким слоем красителя.

На рис. 4 приведены фотоформы для офсетной печати, полученные при обработке на ЭВМ одного и того же изображения. Программно выделялись полутоновые области, входящие в контур основного изображения. При этом размер растрового элемента 200 мкм.

Результаты испытания показали следующие технические характеристики устройства: размер квантованного шага изображения 50 ± 2 мкм; скорость записи (в зависимости от способа печати) 0,6 (0,3) м/с; размер растровой структуры для печатных форм: офсетной печати 200×200 мкм, высокой печати 50×50 мкм; количество передаваемых градаций > 16 ; количество копий с матрицы, изготовленной устройством, 10 000.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев В. С. и др. «Карат» — устройство вывода графической и буквенно-цифровой информации из ЭВМ на микрофильм. — Автометрия, 1976, № 1.
2. Браунт М. Новая быстродействующая система для дискретизации и записи изображений — Фотомейши: Брошюра фирмы «Оптроникс Интернешннал». N. Y., 1977.
3. Васильков С. Т. и др. Прецизионная система ввода-вывода изображений для ЭВМ. — Автометрия, 1977, № 2.
4. Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений/Под ред. Б. Исайапа. — М.: Мир, 1979, т. 2, с. 12—72.

Поступила в редакцию 24 июня 1980 г.

УДК 535.241.13 : 537.228

А. И. НАГАЕВ, В. Н. ПАРЫГИН, С. Ю. ПАШИН
(Москва)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА В СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Для решения различных задач оптической обработки информации необходимы быстродействующие устройства амплитудной и фазовой модуляции когерентного и некогерентного света. К таким устройствам относятся пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) на основе электрооптических кристаллов.

В настоящей работе исследуется электронно-лучевой ПВМС на основе кристалла DKDP, в частности, рассматриваются некоторые новые возможности, связанные с его применением в голографическом телевидении, что является экспериментальным продолжением [1], а также оценивается работа модулятора в качестве активного элемента в системах адаптивной оптики.

Фазовые маски и адаптивная оптика. Известно, что ПВМС на кристалле DKDP могут применяться не только для амплитудной, но и для фазовой модуляции света. Эта способность модулятора могла бы послужить основой для создания управляемых фазовых масок оптических вычислительных устройств и элементов адаптивной оптики, осуществляющих коррекцию волнового фронта в реальном масштабе времени. Такая оперативность обусловлена быстрым циклом записи и стирания информации в электронно-лучевом ПВМС. Запись в таком устройстве проводится электронным лучом, сканирующим по поверхности тонкой пластинки кристалла DKDP. Стирание производится при помощи дополнительной электронной пушки и происходит в моменты времени между циклами записи. Скорость сканирования электронного луча при записи стандартная телевизионная, поэтому за время одного кадра вся поверхность электрооптической мишени заряжается до требуемого потенциала. Так как для кристалла DKDP приращение показателя преломления линейно зависит от приложенного напряжения [2], свет, проходящий через модулятор, приобретает фазовую задержку в соответствии с картиной потенциального рельефа на поверхности мишени. Таким образом, описываемый ПВМС способен регулировать величину набега фазы света и тем самым корректировать волновой фронт по произвольному закону. Однако максимальная реализуемая разность фаз не может достигать больших значений. Это связано с тем, что максимальное напряжение на кристалле ограничивается напряжением диэлектрического пробоя кристалла. По данным работы [3] предельная напряженность электрического поля для кристаллов группы KDP составляет примерно 25 кВ/мм, поэтому диэлектрический пробой в кристалле DKDP толщиной в 200 мкм должен происходить при напряжении в 5 кВ. Однако из-за неоднородностей или дефектов обработки поверхности кристалла пробой наступает гораздо раньше: при напряжениях порядка 1 кВ. Таким образом, даже при работе ПВМС «на отражение» и охлаждении кристалла до температуры фазового перехода, когда полуволновое напряжение модулятора составляет всего 150 В [4], максимальная разность фаз не превышает 3π . Это ограничение можно обойти, если учесть, что сдвиг фаз в волновом фронте на 2π не меняет конечного результата. Поэтому всякую функцию разности фаз $\varphi(x)$ можно заменить эквивалентной (как это сделано на рис. 1 для линейной функции), максимальное значение которой достигает только 2π . Но такая замена является действительно эквивалентной, если скачок пилообразной функции от значения в 2π до 0 будет достаточно резким. В реальном устройстве резкость этого скачка определяется разрешающей способностью модулятора. Понятно, что минимальное расстояние между скачками должно в несколько раз превышать фронт скачка для того, чтобы ошибка коррекции была небольшой. Поэтому все же имеются ограничения на форму функции и динамический диапазон устройства.

Для оценки работы ПВМС как активного элемента адаптивной оптики были поставлены две задачи: отклонение луча света и исправление волнового фронта плоской световой волны, прошедшей через прямоугольную фазовую решетку. Обе задачи достаточно просты для экспериментального осуществления и позволяют определить перспективы использования ПВМС.

Для осуществления первой задачи достаточно записать на электрооптический кристалл линейно растущее или эквивалентное пилообразное (см. рис. 1) напряжение. Случай с пилообразным напряжением более

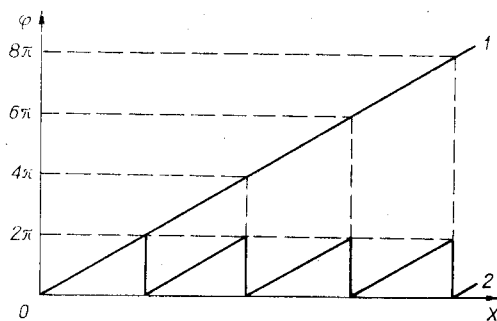


Рис. 1. Линейная функция разности фаз φ в зависимости от расстояния X (1) и функция, эквивалентная ей (2).

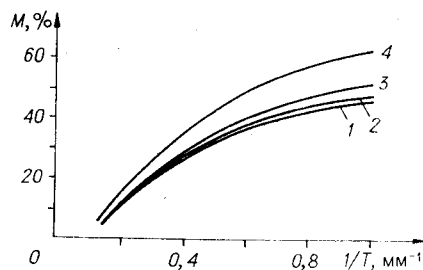


Рис. 2. Зависимость величины потерь света от периода пилообразного напряжения при диаметре электронного луча 0 (кривая 1), 20 (2), 40 (3) и 80 мкм (4).

интересен, так как позволяет оценить работу устройства в режиме исправления фазовых искажений, превышающих 2π . Такая оценка в данном случае может проводиться по критерию допустимого рассеивания света. Действительно, из-за конечного диаметра электронного луча и ограниченной передаточной характеристики самого кристалла потенциальный рельеф будет несколько отличаться от требуемого, даже если ток луча модулируется по идеальному пилообразному закону. Вследствие этого будет происходить не только отклонение света на заданный угол, но и его рассеивание в различные дифракционные порядки. Причем потери света должны возрастать по мере уменьшения периода пилообразного напряжения. Задавшись допустимой величиной этих потерь, можно найти предельный период T_{\min} и определить динамический диапазон устройства как $2\pi L/T_{\min}$, где L — поперечный размер кристалла.

Важно также, чтобы скачки напряжений на кристалле происходили в точках, где набег фазы имеет значение, кратное 2π , а амплитуда потенциального рельефа точно соответствовала разности хода в одну длину волны. Любое отклонение амплитуды от этого значения должно приводить к заметным искажениям волнового фронта. Кроме того, на точности воспроизведения волнового фронта сказываются и нелинейные искажения формы потенциального рельефа. Так как и отклонение амплитуды, и нелинейные искажения приводят к дополнительным потерям света, их влияние на работу модулятора также можно оценить по критерию рассеивания света.

Расчет всех характеристик ПВМС проводился на ЭВМ, а затем полученные результаты подвергались экспериментальной проверке. При расчетах задавалась форма тока луча в зависимости от времени. Зная форму тока и закон сканирования, можно определить записанный потенциальный рельеф. Потенциальный рельеф рассчитывался с учетом передаточной характеристики кристалла, полученной в работе [5], и диаметра электронного луча. Распределение плотности тока в сечении луча предполагалось гауссовым. Расчет проводился для кристалла толщиной 200 мкм при нескольких значениях диаметра луча (0, 20, 40 и 80 мкм). Конечным результатом вычислений было распределение интенсивности в картине дифракции Фраунгофера на фазовой решетке, которую представляет собой электрооптический кристалл после записи потенциального рельефа. Из этой картины уже легко оценить величину потерь света.

На рис. 2 представлена зависимость величины потерь света M от периода T пилообразного напряжения для нескольких диаметров электронного луча.

Видно, что потери света почти не зависят от размеров электронного пятна при диаметре луча менее 40 мкм и начинают резко возрастать при превышении этого значения. Такой факт легко объяснить, воспользо-

зовались выражением для пороговой разрешающей способности $Y_{0,12}$ электронно-лучевого ПВМС [1]:

$$Y_{0,12} \approx 1,13d + 0,45l\sqrt{\epsilon_{\perp}/\epsilon_{\parallel}},$$

где d — диаметр электронного луча, l — толщина электрооптического кристалла, ϵ_{\perp} и ϵ_{\parallel} — главные значения тензора диэлектрической проницаемости кристалла. Для кристалла DKDP, охлажденного до температуры фазового перехода, $\epsilon_{\perp} = 60$ и $\epsilon_{\parallel} = 600$. Сохраняя принятое ранее значение толщины кристалла, находим, что при $d \approx 40$ мкм и менее разрешающая способность и форма потенциального рельефа слабо зависят от диаметра электронного луча.

Кроме того, можно заметить, что уже при $d \approx 40$ мкм вариации размеров электронного пятна оказывают незначительное влияние на величину предельного периода. Так, например, если считать допустимыми потери света в 20 %, уменьшение размеров пятна с 80 до 40 мкм дает изменение предельного периода лишь с 4 до 3,5 мм, т. е. на 13 %. Таким образом, принимая во внимание большие технологические трудности, целесообразно в модуляторах с кристаллом толщиной в 200 мкм уменьшать диаметр луча менее 40 мкм.

Влияние отклонения амплитуды от оптимального значения и нелинейных искажений на ошибку коррекции волнового фронта рассчитывалось при тех же характеристиках кристалла, но при одном значении диаметра луча, равном 20 мкм. Оказалось, что вклад нелинейности незначителен. Так, искажения в 5 % практически не приводят к дополнительным потерям света. В то же время отличие амплитуды напряжения в точках скачка от значения, соответствующего сдвигу фаз на 2π , можно считать основным фактором, влияющим на качество коррекции. Например, уменьшение амплитуды пилообразного напряжения на 10 и 20 % от оптимального значения приводит к увеличению потерь на 8 и 18 % соответственно. Это накладывает особые требования на стабильность потенциального рельефа по амплитуде.

Для проверки полученных данных применялся экспериментальный макет электронно-лучевого ПВМС. В макете использован кристалл DKDP с размерами $16 \times 16 \times 0,22$ мм³. Кристалл охлаждался до температуры -52 °С. Электронный луч, которым производилась запись, имел диаметр 80 мкм. При этих параметрах разрешающая способность модулятора составляет примерно 8 мм⁻¹.

Результаты эксперимента представлены на рис. 3 и 4 и в таблице. На рис. 3 показано распределение интенсивности света в дальней зоне, образующееся в результате дифракции плоской волны на электрооптическом кристалле. Кривая на рис. 3, *a* получена при отсутствии какого-либо заряда на поверхности кристалла. При записи пилообразного потенциального рельефа с оптимальной амплитудой (см. рис. 3, *b—g*) происходит отклонение света в первый дифракционный порядок и частичное рассеивание света в другие порядки. При отклонении амплитуды от оптимального значения (см. рис. 3, *d, e*) потери значительно возрастают. Количественные данные, характеризующие величину всех потерь, сведены в таблицу.

Сравнение полученных результатов с расчетными показывает, что в области малых периодов ($T \lesssim 3$ мм) реальные потери немного превышают теоретическое значение. По-видимому, это расхождение связано с несколько худшим, чем предполагалось, разрешением модулятора. Тем не менее значение предельного пе-

Период, мм	2,6	3,8	8	8	8
Отклонение амплитуды, %	0	0	0	10	20
Потери света, %	55	20	12	23	31

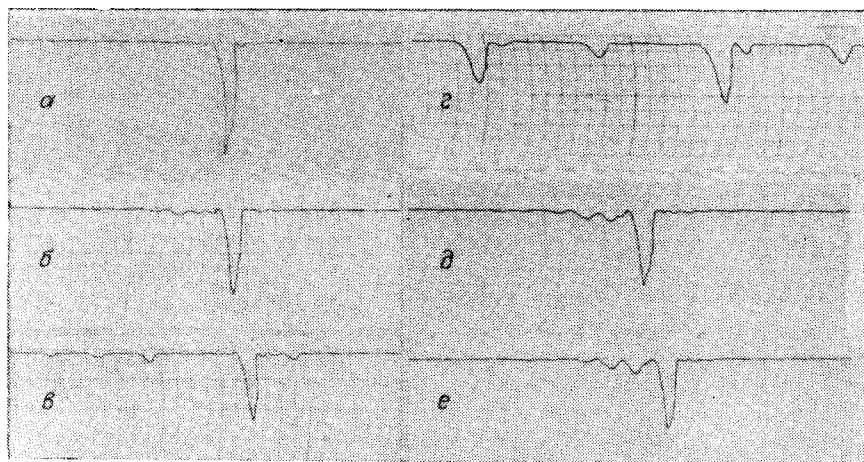


Рис. 3. Распределение интенсивности света в картине дифракции Фраунгофера на кристалле:

а — незаряженном; *б-г* — с пилообразным потенциальным рельефом с периодом 8, 3,8 и 2,6 мм соответственно; *д, е* — с пилообразным потенциальным рельефом с периодом 8 мм и амплитудой, отличающейся от оптимальной на 10 и 20% соответственно.

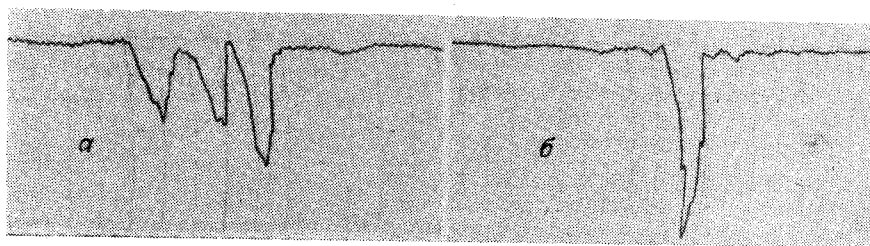


Рис. 4. Распределение интенсивности света в дифракционной картине от искаженной (*а*) и восстановленной волн (*б*).

риода при 20%-ных потерях совпадает с предсказанным и составляет 4 мм. Учитывая поперечные размеры кристалла, находим, что динамический диапазон коррекции фазы равен 8λ .

Дальнейшее представление о качестве работы устройства можно получить из рис. 4, *а, б*. Как и прежде, оба рисунка представляют собой распределение интенсивности в дифракционной картине. На них отражен результат коррекции волнового фронта, предварительно искаженного с помощью прямоугольной фазовой решетки. Дифракционная картина, соответствующая искаженному фронту, приведена на рис. 4, *а*. В эксперименте использовалась решетка с амплитудой, равной λ , и периодом 8 мм. Для того чтобы воссоздать первоначальный плоский фронт волны, на кристалл записывался прямоугольный потенциальный рельеф с тем же периодом и амплитудой. При этом удалось восстановить плоскую волну с точностью до 5%. Рис. 4, *б* дает наглядное представление о качестве осуществленной коррекции.

Передача голограмм по телевизионному каналу. В голографической телевизионной системе по видеотракту передается не изображение предмета, а интерференционная структура. Вначале формируется голограмма

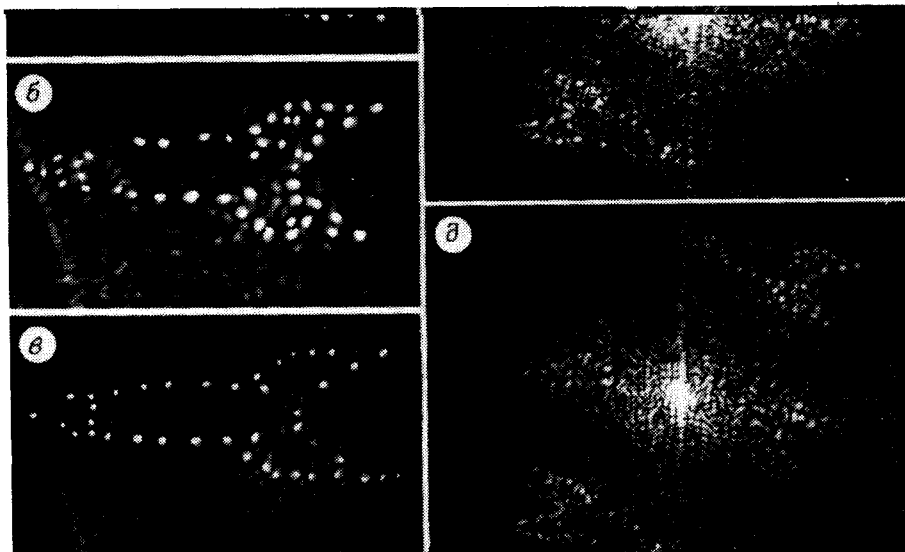


Рис. 5. Исходный объект (а) и изображения, восстановленные с голограмм: б, в — с несущей частотой 3 и 5 мм^{-1} соответственно, г — без использования оптического смещения, д — с оптическим смещением.

объекта передачи. Затем интерференционная структура, содержащая информацию об объекте, преобразуется телевизионной камерой в электрический сигнал, поступающий по ТВ-тракту на схему формирования голограммы. Эта схема обеспечивает пространственную модуляцию световой волны в соответствии с передаваемой голограммой. В описываемом эксперименте в качестве такого устройства формирования голограммы использовался электронно-лучевой ПВМС с кристаллом DKDP. В схеме голографирования формировалась фурье-голограмма объекта, представляющего собой плоское схематическое изображение какого-либо предмета, составленное из отдельных точечных источников света (рис. 5, а). Такой объект позволял легко проследить характер вносимых модулятором искажений при передаче отдельных точек изображения. Увеличенное во много раз изображение голограммы записывалось на поверхности электрооптического кристалла. Предварительное увеличение голограммы было необходимо для согласования пространственных частот голограммы с разрешающей способностью передающей телекамеры и модулятора света. Степень увеличения могла варьироваться. Оптимальное увеличение подбиралось опытным путем исходя из следующих компромиссных соображений: размер точки в восстановленном изображении определяется либо апертурой электрооптического кристалла, либо радиусом корреляции мультипликативных шумов [1]. Но и в том, и в другом случае этот размер является величиной постоянной для данного устройства. Размер же восстановленного изображения зависит от коэффициента увеличения голограммы. При сильном увеличении восстановленное изображение получается небольшим, и поэтому его отдельные точки могут слиться друг с другом (см. рис. 5, б). При уменьшении коэффициента увеличения размеры изображения и расстояние между точками увеличиваются, качество изображения улучшается (см. рис. 5, в). Вместе с тем наблюда-

ется постепенное падение яркости точек в восстановленном изображении. Эта потеря интенсивности связана со спадом передаточной характеристики ПВМС на высоких пространственных частотах. Экспериментально было обнаружено, что оптимальным является случай, когда несущая пространственная частота голограммы, записанной на электрическом кристалле, примерно равна 5 мм^{-1} . Эта цифра хорошо согласуется с теоретической оценкой.

В эксперименте по записи и восстановлению голограмм использовалась и амплитудная, и фазовая модуляции. При этом исследовалась величина паразитного фона засветки в восстановленном с голограммы изображении. Такой фон приводит к искажениям самого изображения и уменьшению его контрастности, поэтому величина фона во многом определяет восприятие всей картины в целом. Оказалось, что для получения минимального фона или максимального отношения сигнала к шуму нужна амплитудная модуляция светового потока с подавленной постоянной составляющей. Устранение нулевой составляющей в спектре достигается с помощью оптического смещения. Плавное регулируемое оптическое смещение может быть получено несколькими путями: например, с помощью соответственно ориентированной четвертьволновой пластинки [4], устанавливаемой перед модулятором, или путем заряда поверхности электрооптического кристалла перед записью до некоторого положительного потенциала. В эксперименте применялся второй способ. Оптимальное значение положительного потенциала оказалось равным 100 В. Фотография восстановленного изображения, соответствующая этому случаю, представлена на рис. 5, *д*. Отличие ее от фотографии, показанной на рис. 5, *г*, которая получена без предварительного заряда поверхности кристалла, проявляется в заметном падении яркости в центре картины и некотором уменьшении шумов.

Таким образом, при использовании ПВМС для восстановления голографического изображения необходимо согласовывать полосу пространственных частот голограммы с разрешающей способностью телевизионного канала и ПВМС и работать в режиме амплитудной модуляции с подавленной постоянной составляющей света.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мальшаков В. Г. и др. Применение электроно-лучевой трубки с электрооптическим кристаллом в голографическом ТВ.— Техника кино и телевидения, 1979, № 10.
2. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света.— М.: Наука, 1970.
3. Рябцев Н. Г. Материалы квантовой электроники.— М.: Сов. радио, 1972.
4. Мари Дж., Донжон Ж., Адан Ж.-П. Устройства воспроизведения изображений, основанные на эффекте Поккельса, и их применение.— В кн.: Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений. М.: Мир, 1978, т. 1, с. 253—327.
5. Мальшаков В. Г. и др. Разрешающая способность электроно-лучевого пространственного модулятора света на основе кристалла DKDP.— Квант. электроника, 1979, т. 6, № 11.

*Поступила в редакцию 8 февраля 1980 г.;
окончательный вариант — 26 марта 1981 г.*