

07; 12

© 1990 г.

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ ТРАНСПАРАНТЫ В СОСТАВЕ КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРА

*А. А. Балахонский, Н. Н. Кирюхин, В. А. Никеров, Ю. А. Полякова,
А. Я. Червоненкис*

Представлены результаты разработки когерентно-оптического спектроанализатора на основе матричного магнитооптического управляемого транспаранта с электрической адресацией. Получены и проанализированы характерные спектры пространственно-периодических и аperiodических изображений. Проведена оптимизация режимов работы матричных МОУТ с учетом неоднозначности введенной информации и некоторого разброса параметров переключения, позволившая добиться надежной работы МОУТ и в ряде случаев существенно снизить энергопотребление.

В настоящее время возникли предпосылки для принципиального улучшения параметров систем оптической обработки информации, связанного с разработкой магнитооптических управляемых транспарантов (МОУТ) на основе Vi -содержащих монокристаллических пленок феррит-гранатов (Vi МПФГ) [1]. Речь в первую очередь идет о системах спектрального и корреляционного анализа, а также о системах со структурой нейронной сети.

Важнейшими достоинствами МОУТ являются повышенное быстродействие, контрастность, стойкость к внешним воздействиям, возможность хранения информации при отключенном питании. МОУТ с электрической адресацией отличаются высокой геометрической точностью формирования изображений, обеспечивают возможность работы в когерентном свете, формирование не только бинарных, но и многоградационных изображений, допускают последовательный и параллельный ввод информации [2].

В настоящей работе представлены результаты разработки когерентно-оптического спектроанализатора на основе МОУТ, получены и проанализированы характерные спектры. В отличие от ранних отечественных макетов МОУТ на высококоэрцитивных пластинах ортоферритов и Vi МПФГ [3] и выпускаемых за рубежом транспарантов на базе гранатовых мезаструктур с локальной ионной имплантацией [2] использованные нами МОУТ базировались на матричных ячеистых структурах, сформированных в Vi МПФГ с помощью локального диффузионного отжига, результатом чего служило периодическое распределение намагниченности по площади структуры [4]. В типичных носителях на основе пленок системы $(\text{Y, Lu, Vi})_3(\text{Fe, Ga})_5\text{O}_{12}$ с ориентацией (111) либо (210) намагниченность насыщения $\mu_0 M_0$ в монокристаллических информационных ячейках составляла 30—50 Гс, а в межъячейном пространстве с лабиринтной доменной структурой — 150—190 Гс. При толщине пленок ~ 10 мкм удельное фарадеевское вращение на длине волны 0.63 мкм составляло 1.7—1.8 град/мкм, а коэффициент поглощения — 0.4 дБ/мкм. Характерной особенностью носителей такого типа являются относительно низкие управляющие импульсные токи (~ 100 мА против ~ 1 А в [3] и ~ 300 мА в [2]), значение которых может быть дополнительно снижено в присутствии однородного поля смещения.

Другой (негативной) особенностью является конечная (порядка 1 %) вероятность сбоев при вводе информации, носящих в основном случайный (зависящий от магнитной предыстории) характер.

Использованные матричные МОУТ имели информационную емкость 128×128 элементов с шагом матрицы 200 мкм, размером ячеек 120 мкм и шириной токовых управляющих шин 80 мкм. Типичные времена переключения элементов 0.1—10 мкс (в зависимости от скорости насыщения и подвижности доменных стенок материала). Адресация проводилась с помощью автономного блока электронного управления.

Схема спектроанализатора приведена на рис. 1. В основу многих его оптических приложений положено фундаментальное свойство сферической линзы выполнять двумерное преобразование Фурье. Действительно, если в соответствии с теорией в переднюю фокальную плоскость сферической линзы (фурье-процессора) поместить МОУТ с введенным на него обрабатываемым изображением $f(x, y)$ и осветить его пучком когерентного излучения, то в задней фокальной плоскости формируется двумерное преобразование Фурье $F(\xi, \eta)$ исходного изображения.

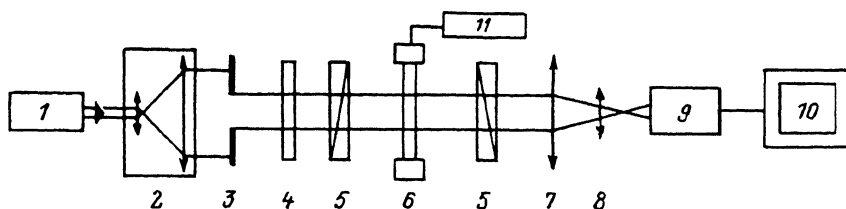


Рис. 1. Когерентно-оптический спектроанализатор на основе магнитооптического управляемого транспаранта.

1 — лазер, 2 — коллиматор, 3 — диафрагма, 4 — ослабитель интенсивности, 5 — поляризатор, 6 — МОУТ, 7 — фурье-процессор, 8 — дополнительный съемный объектив, 9 — фотоприемное устройство, 10 — монитор, 11 — блок управления.

При этом если на матричный МОУТ, состоящий из $M \times N$ прямоугольных ячеек размером $a \times b$ и имеющих размеры $Mc \times Nd$, записан двумерный массив информации $S(m, n)$, то имеем

$$f(x, y) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M S(m, n) \text{rect} \left[\frac{x - \frac{(M+1-2m)c}{2}}{a} \right] \times \text{rect} \left[\frac{y - \frac{(N+1-2n)d}{2}}{b} \right], \quad (1)$$

где $\text{rect } z=1$ для $|z| \leq 1/2$, $\text{rect } z=0$ для остальных z .

Существенно, что лимитирующей по времени стадией является формирование изображения на управляемом транспаранте, а эта процедура выполняется с помощью МОУТ сравнительно быстро. Преобразование Фурье является базовой операцией корреляции, свертки, преобразования Меллина (последнее позволяет сравнивать изображения, выполненные в разном масштабе).

В схеме, приведенной на рис. 1, пучок когерентного излучения от лазера расширяется с помощью коллиматора, далее диафрагмируется с целью получения плоского фронта рабочей апертуры, ослабляется до требуемой интенсивности, далее приобретает линейную поляризацию на первом поляризаторе, модулируется по фазе с помощью МОУТ по пространственно-временным зависимостям, задаваемым блоком управления МОУТ, проходит через второй поляризатор, где фазовая модуляция преобразуется в амплитудную, и поступает на фурье-процессор. На фокусном удалении (295 мм) от последнего помещается фотоприемное устройство, регистрирующее и обрабатывающее спектр изображения. Юстировка системы проводится по картине, отображающейся на мониторе. Для получения в процессе юстировки на фотоприемном устройстве и мониторе исходного изображения в оптическую систему между фурье-процессором и фотоприемным устройством вводится дополнительный съемный объектив.

Основные выводы по результатам спектрального анализа удобно сформулировать на модельных экспериментах с упрощенными изображениями информационной емкостью 16×16 элементов. Сформированные изображения и их спектры представлены на рис. 2 (1—12).

В соответствии с особенностями преобразования Фурье и распознавания объектов по спектрам целесообразным оказалось провести классификацию

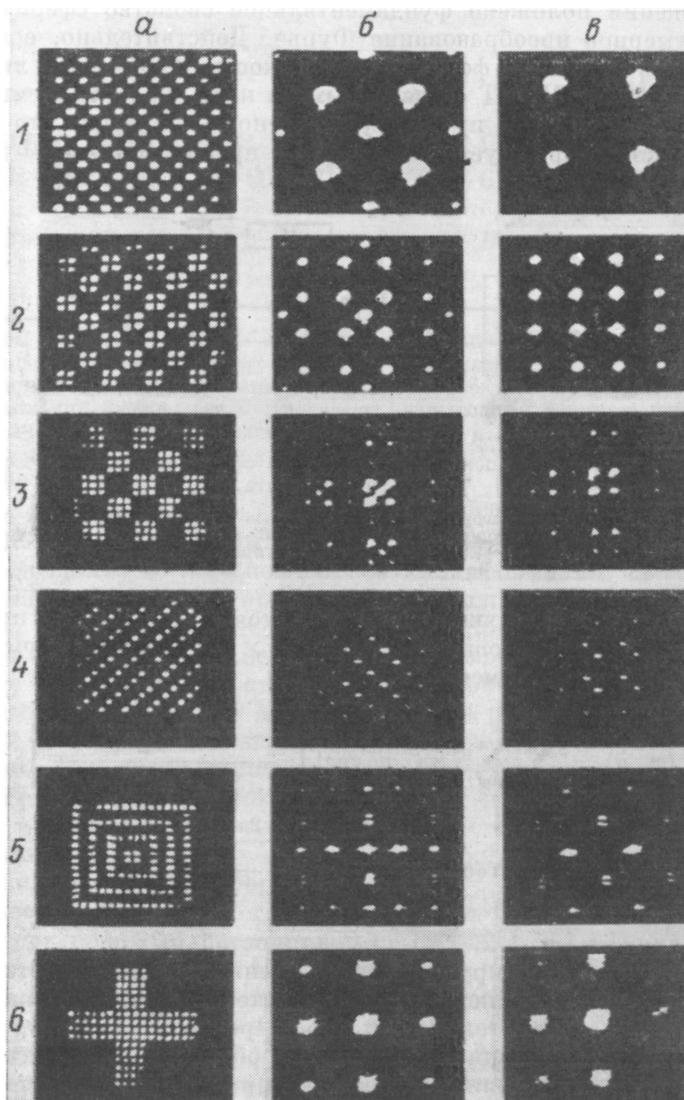


Рис. 2. Двенадцать характерных изображений, введенных на МОУТ, и их спектры (преобразования Фурье).

а — исходные изображения; б — спектры, включающие дифракционные максимумы от шин и центральный максимум; в — спектры, в которых погашены дифракционные максимумы от шин и центральный максимум.

изображений. Выделены предельные случаи пространственно-периодических изображений (с количеством одинаковых повторяющихся элементов вплоть до числа элементов в строке МОУТ) и пространственно-аперриодических изображений (без повторяющихся элементов и с нерегулярной структурой). В первом предельном случае спектральные компоненты более четко локализованы и изображения легко различимы по спектру. Во втором предельном случае спектры размыты и различимость несколько хуже, особенно в случае, когда изображение состоит из низких пространственных частот и спектр может мас-

кироваться центральным максимумом и спектром токовых шин МОУТ. В соответствии с предельными случаями все характерные изображения можно разбить на 2 класса: периодические и аperiodические изображения. Можно также отметить особенность спектров буквенных изображений, состоящих в основном из вертикальных и горизонтальных полос: их спектральные компоненты сосредоточены преимущественно вблизи осей координат спектральной плоскости.

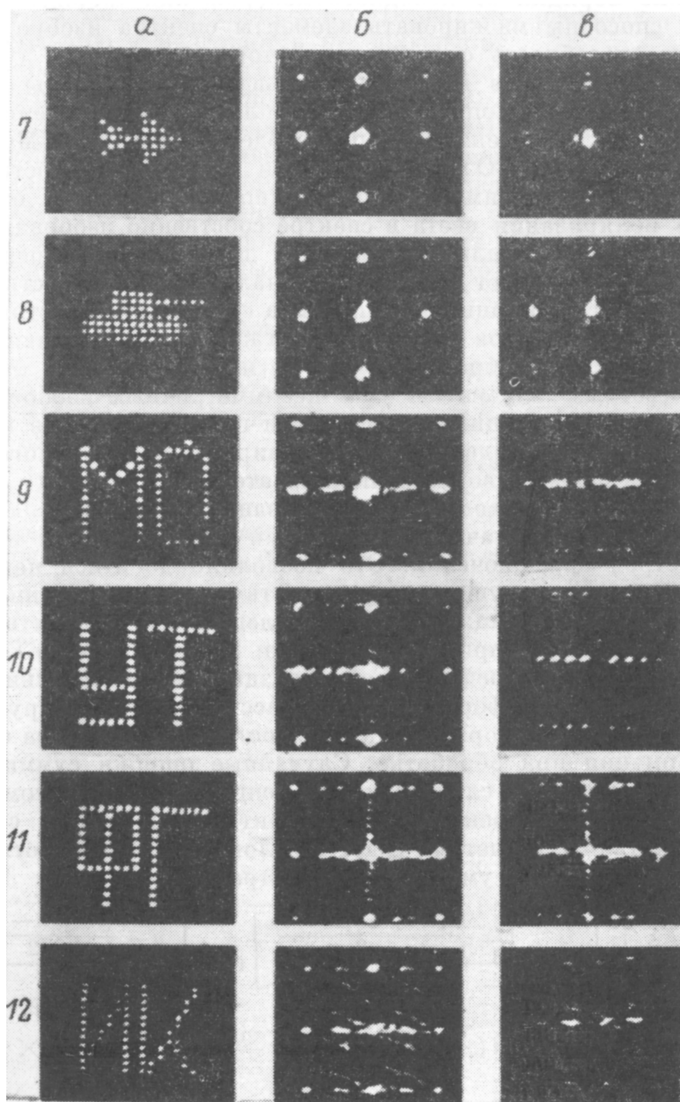


Рис. 2 (продолжение).

Анализ спектра изображений, выполненный в соответствии с проведенной классификацией, показывает, что разработанный спектроанализатор даже на упрощенных изображениях информационной емкостью 16×16 элементов позволяет различить десятки аperiodических и сотни периодических изображений в реальном масштабе времени.

Динамический диапазон разработанного спектроанализатора по интенсивности излучения составляет в плоскости изображения 30 дБ, в фурье-плоскости (в зависимости от характера задачи) — 10—40 дБ.

Следует выделить две особенности МОУТ при их работе в составе когерентно-оптического спектроанализатора. Первая заключается в существенном вкладе в спектры дифракции света на непрозрачных управляющих токовых шинах.

Этот вклад проявляется в формировании в спектре интенсивных дифракционных максимумов от шин и сопряженных с ними высших дифракционных порядков от исходного изображения (рис. 2, в), не несущих дополнительной полезной информации об объекте. Другими словами, система токовых шин помимо непосредственного затенения падающего света ведет к дополнительным потерям за счет дифракции, тем большим, чем больше ширина шин относительно шага матрицы. Кроме того, дифракционные максимумы от шин и сопряженные с ними высшие порядки от исходного изображения (наряду с центральным максимумом) способны маскировать элементы спектра изображения, снижая разрешающую способность спектроанализатора. Очевидным путем смягчения этих негативных факторов является уменьшение относительной ширины токовых шин до размеров, определяемых тепловыми ограничениями (с учетом выделения в шинах джоулева тепла при вводе информации в МОУТ).

Другая особенность МОУТ заключается в ортогональности поляризации света в центральном максимуме и дифракционных порядках от токовых шин относительно поляризации света в спектре собственно изображения. Это фундаментальное свойство амплитудно-фазовой дифракционной решетки, каковой является МОУТ, позволяет с помощью анализатора полностью погасить не несущие полезной информации максимумы в спектре и тем устранить маскирование полезных максимумов (рис. 2, б, в). Сказанное относится в первую очередь к симметричным изображениям, т. е. изображениям с равным объемом «темных» и «светлых» элементов. Для несимметричных изображений строгая ортогональность поляризаций нарушается и полного гашения не несущих информации максимумов добиваются либо нормированием исходного изображения, либо соответствующим доворотом поляризатора.

В рамках работы проводилась оптимизация режимов работы матричных МОУТ с учетом неоднозначности введенной информации и некоторого разброса параметров переключения. Это позволило добиться надежной работы МОУТ и в ряде случаев существенно снизить энергопотребление.

Ошибки ввода информации на МОУТ следует подразделить на систематические, определяемые, например, дефектами кристалла МОУТ, и случайные, связанные с магнитной предисторией образца. Систематические ошибки поддаются вычленению из информационного массива и компенсируются путем небольшого уменьшения информационной емкости МОУТ либо за счет небольших потерь информации при обработке. Случайные ошибки суммируются хаотическим образом и в ряде случаев имеют тенденцию к самокомпенсированию. Например, случайное переключение элемента изображения с координатами m, n в соответствии с расчетами ведет к делокализованному отклику в фурье-плоскости — небольшому уменьшению контраста

$$F(\xi, \eta) = \iint_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \left[\frac{x - \frac{(M+1-2m)c}{2}}{a} \right] \text{rect} \left[\frac{y - \frac{(N+1-2n)d}{2}}{b} \right] \times \\ \times \exp[-2\pi i(x\xi + y\eta)] dx dy = \frac{\sin(\pi a \xi)}{\pi \xi} \frac{\sin(\pi b \eta)}{\pi \eta} \times \\ \times \exp[-\pi i \xi c (M+1-2m) - \pi i \eta d (N+1-2n)]. \quad (2)$$

При этом суммарный отклик от набора случайных сбоев накапливается сравнительно медленно за счет некогерентного (вследствие случайного набегу фаз) сложения отдельных откликов.

В статистической модели вероятность переключения элемента МОУТ нарастающим магнитным полем H задается распределением Гаусса

$$P(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp \left[- \left(\frac{H - H_0}{\sqrt{2} \sigma} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где приняты характерные значения $\sigma = 1.0 \dots 1.5$ Э; H_0 (поле переключения) = $= 10 \dots 40$ Э в зависимости от варианта технологии.

В такой ситуации, когда дисперсия невелика и $\sigma \ll H_0$, энергетически выгоден режим, в котором основной вклад в поле переключения обеспечивается

постоянным полем смещения $H_{см}$, а переключение конкретного элемента производится относительно небольшой импульсной добавкой, обеспечиваемой электрическим током в шинах I_n . Случайные сбои возникают как при ошибочном переключении непереключаемого элемента, так и при ошибочном переключении переключаемого элемента. В результате вероятность сбоев дается суммой интегралов вероятности, причем для рабочих режимов МОУТ эти интегралы с хорошей точностью задаются аналитически первым членом разложения в асимптотический ряд, что упрощает оптимизацию режимов работы МОУТ по энергопотреблению и надежности переключения.

Приняв, исходя из сказанного, что при работе МОУТ в составе спектроанализатора допускаемая вероятность сбоев любого типа может достигать 5 %, легко увидеть, что область устойчивой работы МОУТ в координатах $H_{см} - I_n$ существенно расширяется по сравнению с ситуацией, когда сбой недопустимы. В результате надежная работа МОУТ за счет увеличения $H_{см}$ возможна при существенно более низких управляющих токах ($I_n \leq 50$ мА), т. е. при существенно меньшем энергопотреблении, что открывает возможность смягчить тепловые ограничения на предельные тактовые частоты перезаписи информации в МОУТ.

Список литературы

- [1] *Hoss W. E., Cox D. L., Snapp K. M.* // Proc. SPIE. 1983. Vol. 386. P. 99—106.
- [2] *Psaltis D., Paek E., Venkantesh S.* // Opt. Engineering. 1984. Vol. 23. N 6. P. 698—704.
- [3] *Подпалый Е. А., Шлядов С. А., Котыс А. А.* и др. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. Вып. 9. С. 530—533.
- [4] *Губарев А. П., Рандошкин В. В., Сизачев В. Б., Червоненкис А. Я.* // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 7. С. 1393—1399.

Научно-исследовательский центр физики
и технологии НПО «Физика»
Москва

Поступило в Редакцию
8 июня 1989 г.
В окончательной редакции
25 декабря 1989 г.