

Б. У. АЙТБАЕВ, В. Ю. ИБРАГИМОВ, В. М. РУБИНОВ

(Ташкент)

ФОТОРЕЗИСТИВНОЕ МНОЖИТЕЛЬНО-ИНТЕГРИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОРРЕЛЯТОРА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Развитие методов обработки оптической информации вызывает значительный интерес к устройствам, предназначенным для определения функции взаимной корреляции двух изображений. Такие устройства необходимы для создания устройств, способных обрабатывать фоточувствительную полупроводниковую многослойную структуру. Формирование выходного сигнала, содержащего корреляционный интеграл, происходит путем поэлементного перемножения скрытых изображений и пространственного интегрирования элементарных токов по всей площади МИБ. Настоящая работа посвящена изучению характеристик фоторезистивного МИБ, выполненного в виде тонкопленочной сэндвич-структуры, содержащей два фоторезистивных слоя (ФРС) фосфида галлия толщиной 1 мкм, разделенных экранным слоем из арсенида галлия и заключенных между двумя пленочными прозрачными электродами (рис. 1). Ввод обрабатываемого и опорного сигналов (изображений) осуществляется путем проецирования их сквозь прозрачные электроды 3 и 4 на ФРС1 и ФРС2. Одно из изображений неподвижно, а второе перемещается по соответствующему ФРС с заданной скоростью. Экранный слой 5 предотвращает паразитную оптическую и в то же время обеспечивает гальваническую связь между прилегающими участками фоторезистивных слоев 1 и 2. Удельное сопротивление экранного слоя составляло $0,7 \cdot 10^{12}$ Ом·см, толщина 1 мкм, при этом коэффициент поглощения в спектральной области чувствительности ФРС был равен 10^5 см⁻¹, что привело к ослаблению перекрестной засветки ФРС в 10^3 раз.

Скрытое изображение образуется в форме пространственного рельефа неравновесной проводимости, а время хранения записанной информации соответствует релаксации фотопроводимости. Границы пространственного интегрирования, определяемые функциональным назначением прибора, задаются конфигурацией электродов.

Исследование вольт-амперной характеристики (ВАХ) отдельно взятых ФРС показало, что она линейна до напряженности поля $3 \cdot 10^5$ В/см. Люкс-амперная характеристика (ЛАХ) ФРС линейна вплоть до световых потоков 10^{-2} Вт/см².

Анализ идеальной модели фотоэлектрического коррелятора выявил [2], что линеаризация передаточной характеристики (роль которой для фоторезистивного МИБ играет ЛАХ) достигается в том случае, когда одно из изображений является бинарным. Однако проведенные нами экспериментальные исследования показали, что передаточная характеристика имеет нелинейные участки (см. рис. 1). Для исключения возможного влияния релаксационных процессов фотопроводимости ФРС измерения ЛАХ проводились в стационарных условиях, а для исключения процессов растекания токов на границе свет — тень фоторезистивные слои освещались равномерными недифференцированными световыми потоками.

Как видно из рис. 1, линейный участок ЛАХ при максимальных освещенностях «опорного» ФРС (кривая 1) ограничен как сверху, так и снизу участками сублинейной зависимости. При снижении уровня за-

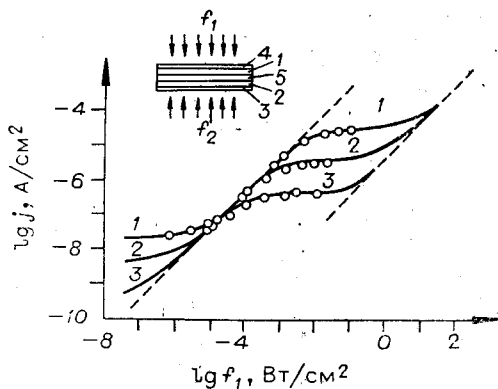


Рис. 1. Люкс-амперная характеристика МИБ:

f_2 — плотность светового потока опорного изображения, сплошная линия — расчетные данные, точки — экспериментальные; 1 — $f_2 = 8 \cdot 10^{-3}$ Вт/см², 2 — $f_2 = 1 \cdot 10^{-3}$ Вт/см², 3 — $f_2 = 1 \cdot 10^{-4}$ Вт/см². В углу — структура МИБ: 1, 2 — фоторезистивные слои, 3, 4 — прозрачные электроды, 5 — экраный слой.

выполнялся по модели МИБ, учитывающей наличие слабой паразитной оптической связи между ФРС через экраный слой. Выходной сигнал МИБ можно представить [2] в виде

$$J(t) = \int_S j(x, y, t) ds = V \int_S \frac{\sigma_1(x, y, t) \sigma_2(x, y, t)}{\sigma_1(x, y, t) + \sigma_2(x, y, t)} ds, \quad (1)$$

где j — локальная плотность тока МИБ, S — область интегрирования, соответствующая конфигурации электродов, V — межэлектродное напряжение, σ_1, σ_2 — проводимости ФРС1 и ФРС2 соответственно.

Анализ проводился в условиях стационарной плотности тока и линейности ЛАХ отдельных взятых ФРС. Тогда из (1) получается

$$J(t) = kV(f_1 f_2 + \alpha(f_1^2 + f_2^2))/(f_1 + f_2). \quad (2)$$

Здесь k — коэффициент фоточувствительности ФРС; V — напряжение на МИБ; f_1, f_2 — световые потоки, падающие на соответствующие ФРС; α — коэффициент ослабления света экраным слоем. Результаты расчета ЛАХ МИБ представлены на рис. 1; согласие экспериментальных данных с расчетными свидетельствует о справедливости допущений, положенных в основу модели.

При малости светового потока f_1 , когда $f_1 \ll \alpha f_2$, (2) принимает вид $J \approx kV\alpha f_2$, т. е. ЛАХ структуры не зависит от f_1 (нижние горизонтальные участки кривых). С ростом f_1 на характеристике появляется линейный участок $J \approx kVf_1$, который соответствует условию $\alpha f_2 < f_1 < f_2$. Дальнейшее увеличение f_1 приводит к росту проводимости ФРС1. При $\alpha f_1 < f_2 < f_1$ ток МИБ снова контролируется слоем ФРС2, т. е. потоком f_2 , и характеристика выходит на верхний горизонтальный участок $J = kVf_2$. При еще больших потоках f_1 , когда $f_2 < \alpha f_1$, ЛАХ МИБ выходит на второй линейный участок $J \approx kV\alpha f_1$, так как в этом случае паразитная часть светового потока f_1 , проникающая сквозь экраный слой, модулирует ФРС2 сильнее, чем падающий на него непосредственно поток f_2 .

Как видно из рис. 1, на передаточной характеристике МИБ имеется протяженный линейный участок, простирающийся на три порядка величины интенсивности сигнала f_1 , что обеспечивает возможность обработки информации без нелинейных искажений в широком диапазоне амплитуд сигнала. Таким образом, расчет и эксперимент показывают, что уровень выходного сигнала J на нижней и верхней границах линейного

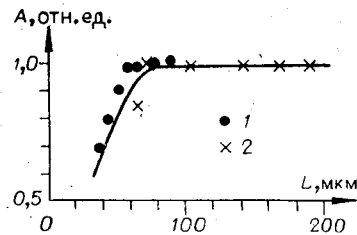


Рис. 2. Частотно-контрастная характеристика МИБ:

1 — база сигнала $N=63$, 2 — база сигнала $N=31$.

светки МИБ по опорному каналу линейный участок ЛАХ быстро уменьшается (кривые 2 и 3).

Для выяснения причин, приводящих к такому ходу передаточной характеристики МИБ, были рассчитаны зависимости тока через структуру от интенсивности света. Расчет

проводился по модели МИБ, учитывающей наличие слабой паразитной оптической связи между ФРС через экраный слой. Выходной сигнал МИБ можно представить [2] в виде

$$J(t) = \int_S j(x, y, t) ds = V \int_S \frac{\sigma_1(x, y, t) \sigma_2(x, y, t)}{\sigma_1(x, y, t) + \sigma_2(x, y, t)} ds, \quad (1)$$

где j — локальная плотность тока МИБ, S — область интегрирования, соответствующая конфигурации электродов, V — межэлектродное напряжение, σ_1, σ_2 — проводимости ФРС1 и ФРС2 соответственно.

Анализ проводился в условиях стационарной плотности тока и линейности ЛАХ отдельных взятых ФРС. Тогда из (1) получается

$$J(t) = kV(f_1 f_2 + \alpha(f_1^2 + f_2^2))/(f_1 + f_2). \quad (2)$$

Здесь k — коэффициент фоточувствительности ФРС; V — напряжение на МИБ; f_1, f_2 — световые потоки, падающие на соответствующие ФРС; α — коэффициент ослабления света экраным слоем. Результаты расчета ЛАХ МИБ представлены на рис. 1; согласие экспериментальных данных с расчетными свидетельствует о справедливости допущений, положенных в основу модели.

При малости светового потока f_1 , когда $f_1 \ll \alpha f_2$, (2) принимает вид $J \approx kV\alpha f_2$, т. е. ЛАХ структуры не зависит от f_1 (нижние горизонтальные участки кривых). С ростом f_1 на характеристике появляется линейный участок $J \approx kVf_1$, который соответствует условию $\alpha f_2 < f_1 < f_2$. Дальнейшее увеличение f_1 приводит к росту проводимости ФРС1. При $\alpha f_1 < f_2 < f_1$ ток МИБ снова контролируется слоем ФРС2, т. е. потоком f_2 , и характеристика выходит на верхний горизонтальный участок $J = kVf_2$. При еще больших потоках f_1 , когда $f_2 < \alpha f_1$, ЛАХ МИБ выходит на второй линейный участок $J \approx kV\alpha f_1$, так как в этом случае паразитная часть светового потока f_1 , проникающая сквозь экраный слой, модулирует ФРС2 сильнее, чем падающий на него непосредственно поток f_2 .

Как видно из рис. 1, на передаточной характеристике МИБ имеется протяженный линейный участок, простирающийся на три порядка величины интенсивности сигнала f_1 , что обеспечивает возможность обработки информации без нелинейных искажений в широком диапазоне амплитуд сигнала. Таким образом, расчет и эксперимент показывают, что уровень выходного сигнала J на нижней и верхней границах линейного

участка передаточной характеристики МИБ пропорционален величине опорного сигнала f_2 . Поэтому рабочий диапазон амплитуд обрабатываемого сигнала будет смещаться при переходе от одного значения f_2 к другому, динамический диапазон МИБ $D = f_{\text{imax}}/f_{\text{imin}}$ останется постоянным и численно равным $1/\alpha$.

Важным параметром МИБ является величина его пространственной разрешающей способности. Для определения этого параметра проводились измерения автокорреляционной функции бинарных широкобазных сигналов типа M -последовательностей [4], вводимых в качестве тестовых изображений по обоим оптическим входам МИБ.

На рис. 2 представлена зависимость амплитуды главного максимума автокорреляционной функции от размеров одного элемента изображения при плотности световых потоков $f = 1 \cdot 10^{-3}$ Вт/см². Полученная кривая представляет собой частотно-контрастную характеристику МИБ. Размер элемента, соответствующий спаду этой характеристики до уровня 0,7 от максимального значения, можно принять за меру пространственной разрешающей способности δ . Как видно из графика, для исследованного МИБ $\delta = 50 \pm 10$ мкм и практически не зависит от базы сигнала. Однако при уменьшении плотности световых потоков пространственное разрешение резко ухудшается. Можно предположить, что это обусловлено сильным влиянием растекания тока вдоль структуры на разрешающую способность МИБ. Растекание тока приводит к размытию рельефа фотопроводимости на границах свет — тень, т. е. к потере резкости скрытого изображения ФРС и соответственно к ухудшению пространственного разрешения МИБ.

Для экспериментального определения размеров областей размытия скрытого изображения на границах свет — тень были проведены измерения фототока, протекающего через МИБ, при проецировании на него с обеих сторон узких световых зондов. Измерялся ток в зависимости от расстояния между зондами при разной интенсивности света одного (сканирующего) зонда. Полученные результаты приведены на рис. 3. Там же показаны результаты расчета этой зависимости, проведенного по формуле (3), полученной из анализа эквивалентной схемы МИБ в предположении, что имеется утечка тока вдоль экранного слоя:

$$V(1/J) \simeq R_1 + R_2 + (\rho/S)L. \quad (3)$$

Здесь V — напряжение на электродах МИБ, J — выходной ток структуры, S — площадь поперечного сечения экранного слоя, L — расстояние между зондами, ρ — удельное сопротивление материала экранного слоя, R_1, R_2 — сопротивления участков фоторезистивных слоев 1 и 2 под световыми зондами.

Как видно из рисунка, экспериментальная зависимость тока от расстояния между зондами хорошо согласуется с расчетной. Из прямолинейности

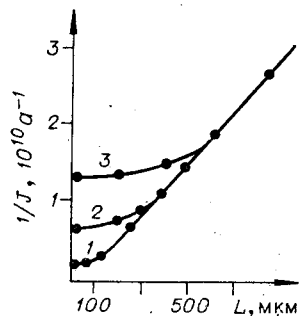


Рис. 3. Зависимость тока, протекающего через МИБ, от расстояния между световыми зондами:

1 — $f_2 = 1 \cdot 10^{-3}$ Вт/см², 2 — $f_2 = 4 \cdot 10^{-4}$ Вт/см²,
3 — $f_2 = 1 \cdot 10^{-4}$ Вт/см².

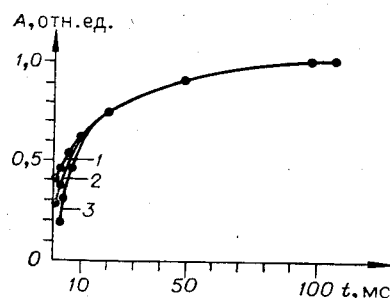


Рис. 4. Динамическая характеристика МИБ:

1 — $N=63$, 2 — $N=31$, 3 — $N=15$.

нейной части графика была определена величина $\rho = (0,9 \pm 0,1)10^{12}$ Ом·см, которая близка величине удельного сопротивления экранного слоя $0,7 \cdot 10^{12}$ Ом·см, найденной из независимых измерений. Согласие экспериментальных данных с расчетом подтверждает предположение о сильном влиянии утечек тока вдоль экранного слоя на пространственное разрешение МИБ.

Слабая зависимость выходного тока от взаимного сдвига зондов, наблюдающаяся в области малых межзондовых расстояний, обусловлена, по существу, размытием рельефа фотопроводимости и определяет величину пространственной разрешающей способности МИБ. Как видно из (3), размеры этой области увеличиваются с ростом величин R_1 и R_2 , которые зависят от интенсивности света на освещенных участках МИБ. Это подтверждается экспериментальными данными рис. 3, где размеры указанной области меняются от 500 до 50 мкм при изменении освещенности от 10^{-4} до 10^{-3} Вт/см².

Для определения временного разрешения МИБ было проведено исследование зависимости амплитуды A главного максимума автокорреляционной функции бинарных сигналов типа M -последовательностей от скорости сканирования v . В результате установлено, что величина A падает с уменьшением времени $t = l/v$ смещения изображения на длину единичного элемента l и практически не зависит от базы сигнала N . Соответствующие данные представлены на рис. 4. Из приведенных данных видно, что при некотором критическом значении $t = t_{кр}$ амплитуда максимума резко падает, т. е. наступает разрушение автокорреляционной функции. Эта величина оказалась близкой к величине времени релаксации фотопроводимости ФРС: $t_{кр} \approx \tau_{\phi}$. Отсюда следует, что критическую скорость сканирования $v_{кр} = l/t_{кр}$ можно представить в виде

$$v_{кр} \approx L/N\tau_{\phi}, \quad (4)$$

где L — длина апертуры изображения в направлении сканирования, N — база изображения, $l = L/N$.

Таким образом, исследования показывают, что пространственное разрешение фоторезистивного коррелятора ограничивается утечками тока через экранный слой МИБ, область линейности передаточной характеристики — оптическим поглощением экранного слоя, а предельная скорость сканирования — релаксацией неравновесной проводимости в фоторезистивных слоях множительно-интегрирующего блока.

Использование современной пленочной технологии при изготовлении фоторезистивного коррелятора дает возможность получать МИБ с рабочей площадью $S \sim 10^{-2}$ м², в пределах которой достижимо получение однородных по параметрам фоторезистивных и экранных слоев и пленочных электродов. Информационная емкость таких МИБ с параметрами, близкими к полученным в данной работе, может достигать величины $C = (S/\delta^2) \log_2 D \approx 4 \cdot 10^7$ бит, а его вычислительная производительность при этом будет $W = C/\tau_{min} \approx 4 \cdot 10^9$ бит/с. Следовательно, коррелятор изображений рассмотренного типа позволяет реализовать скорости корреляционной обработки информации, существенно большие, чем в системах с современными ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жовинский В. Н., Арховский В. Ф. Корреляционные устройства.— М.: Энергия, 1974.
2. Рубинов В. М., Цибулин Э. В. Пространственно-временная обработка информации оптико-электронными системами.— Ташкент: ФАН, 1977.
3. Айтбаев Б. У., Ибрагимов В. Ю., Рубинов В. М. Фоторезистивное устройство обработки информации.— В кн.: Тез. докл. Седьмого Всесоюз. семинара по оптическим и электрооптическим методам и средствам передачи, переработки, хранения информации. М.: изд. Ин-та проблем управления, 1981.
4. Петрович Г. Н., Размахин М. К. Системы связи с шумоподобными сигналами.— М.: Сов. радио, 1968.

Поступила в редакцию 10 марта 1982 г.;
окончательный вариант — 12 июля 1982 г.