

Ю. Д. ДУМАРЕВСКИЙ, Н. Ф. КОВТОНЮК, Г. А. ПЕТРОВИЧЕВА,
А. И. САВИН
(Москва)

ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО ВРЕМЕНИ ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫМИ ТРАНСПАРАНТАМИ СО СТРУКТУРОЙ МДП — ЖК

Одним из наиболее перспективных элементов систем оптической обработки информации является оптически управляемый транспарант (ОУТ) на базе фоточувствительных структур МДП — ЖК. Такие устройства обладают рядом интересных функциональных возможностей, позволяющих значительно расширить область их применения. В частности, экспериментально обнаружено, что жидкокристаллические ОУТ при выборе соответствующего режима питания осуществляют операцию дифференцирования исходного изображения по времени, т. е. в выходной плоскости формируется изображение только подвижных или «мигающих» деталей исходной картины.

Качественно эффект дифференцирования по времени состоит в следующем. При наличии во входном изображении подвижных фрагментов в формируемой посредством ОУТ картине наблюдаются только границы этих фрагментов (кроме тех их участков, которые совпадают с направлением движения). При считывании монохроматическим светом в скрещенных поляризаторах эффект может быть «положительным» или «отрицательным» (соответственно светлые границы на темном поле или наоборот) и отношение яркости границы к фону в формируемом ОУТ изображении (контраст) зависит от скорости движения фрагмента. За передним и задним фронтами подвижного фрагмента в его изображении наблюдается траекторный след, длина которого увеличивается с возрастанием скорости перемещения фрагмента.

В работе использовались ОУТ на базе полуизолирующего арсенида галлия толщиной до 100 мкм и удельным сопротивлением $\sim 10^7$ Ом·см [1]. Одним диэлектриком структуры служил планарно ориентированный слой нематической жидкокристаллической смеси с положительной диэлектрической анизотропией толщиной 10 мкм.

При экспериментальных исследованиях работы ОУТ в режиме временного дифференцирования на вход модулятора проецировалось изображение непрозрачной преграды с отверстиями, скорость перемещения которой (приведенная к плоскости рабочей апертуры ОУТ) изменялась от 0,015 до 300 мм/с. Плотность мощности оптического сигнала, поступающего на вход ОУТ, варьировалась от 0,05 до 2 мВт/см². Считывание осуществлялось в поляризованном свете на отражение со стороны слоя ЖК. В качестве источника считывающего излучения использовался лазер типа ЛГ-38 или лампа накаливания мощностью 70 Вт.

Измерения проводились как в отсутствие дополнительной засветки на входе ОУТ, так и в случае ее наличия. Для имитации стационарной засветки применялась дополнительная лампа накаливания с плотностью мощности излучения 2 мВт/см².

На ОУТ подавалось переменное напряжение питания, подобранное по амплитуде и частоте таким образом, чтобы наиболее четко проявлялся эффект дифференцирования. При этом частота напряжения питания, как правило, оказывалась на порядок больше, чем в режиме воспроизведения изображения.

На рис. 1 представлены: изображение исходной испытательной решетки, воспроизведенное ОУТ в обычном режиме преобразования (рис. 1, а); картина, формируемая ОУТ в режиме дифференцирования при стационарном входном оптическом сигнале (рис. 1, б); изображения,

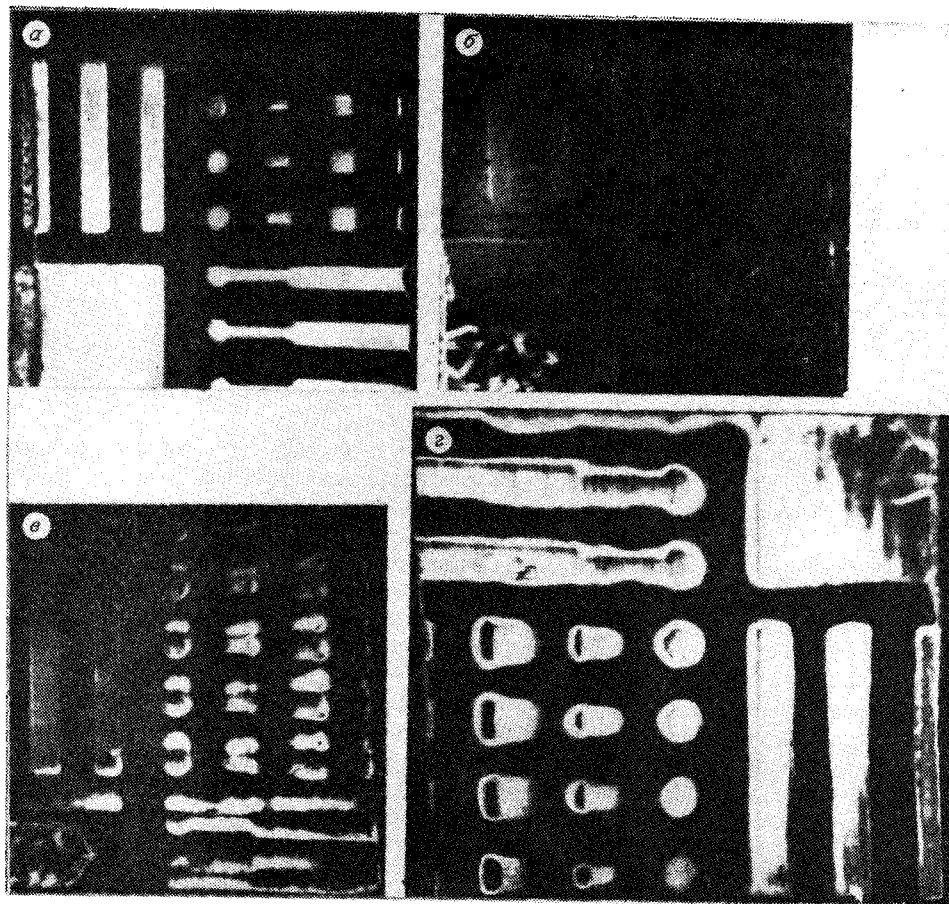


Рис. 1. Изображения испытательной решетки, формируемые ОУТ:
а — при стационарном освещении с интенсивностью 1 мВт/см^2 , амплитуде напряжения питания (\sim) 70 В , частоте 20 кГц ; *б* — при стационарном освещении с интенсивностью 1 мВт/см^2 , амплитуде напряжения питания (\sim) 70 В , частоте 200 кГц ; *в* — при перемещении решетки по апертуре ОУТ со скоростью 1 мм/с ; *г* — при модуляции освещения с частотой (\sim) 10 Гц .

полученные с ОУТ при движении испытательной решетки по одной из координат (рис. 1, *в*) и модуляции яркости входной картины с частотой $\sim 1 \text{ Гц}$ (рис. 1, *г*).

Зависимости контраста формируемого изображения границ движущегося фрагмента исходной картины от скорости его перемещения при различной яркости I входного изображения в отсутствие дополнительной стационарной засветки приведены на рис. 2. Экспериментальные данные получены для случая совпадения траекторий движения фрагментов входной картины, проходящих по апертуре ОУТ, что приводит к формированию изображения последующего объекта на фоне «траекторного следа» от предыдущего при соответствующей периодичности их следования. Этим объясняется существенное уменьшение значения контраста при скорости движения входного изображения, равной $200\text{--}300 \text{ мм/с}$ (см. зависимость I на рис. 2).

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости контраста (K) формируемого изображения от отношения яркости стационарной засветки к яркости входного изображения (I_3/I_k) для различных значений скорости движения входной картины. Из полученных данных следует, что наличие дополнительной засветки вызовет снижение контраста, но существует реальная возможность выделения движущихся фрагментов входного изображения на фоне постоянной засветки, яркость которой в несколько десятков раз превышает яркость входной

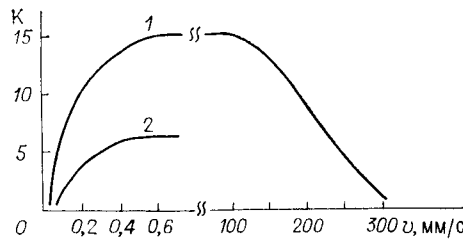


Рис. 2. Зависимость контраста изображения тестовой решетки от скорости ее перемещения:

кривая 1 — яркость входного изображения ~ 1 мВт/см²; 2 — яркость входного изображения ~ 50 мВт/см²

картины. Это эквивалентно эффекту усиления контраста. В данном конкретном случае при исходном контрасте изображения $K' = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) = 0,012$, определенном при $I_{\text{к}} = 0,05$ и $I_{\text{з}} = 2$ мВт/см², формируемый посредством ОУТ контраст подвижного фрагмента составляет 0,5, т. е. обеспечивается усиление контраста в 40 раз.

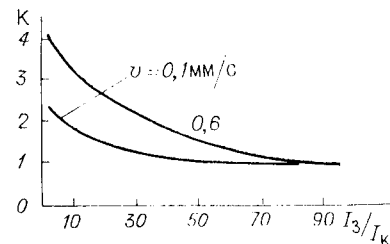
Механизм наблюдаемого эффекта временного дифференцирования может быть объяснен с привлечением представлений о захвате фотопосителей глубокими центрами («ловушками»), локализованными на границах раздела полупроводник — диэлектрик и сформированными соответствующими условиями на этих границах.

В общем случае, как следует из кинетики электронных процессов в МДПДМ-структурах [2], при подаче на такую структуру импульса напряжения и при одновременной ее засветке носители (Δn , Δp), образованные в объеме полупроводника в результате оптической генерации, разносятся электрическим полем к границам полупроводник — диэлектрик. Часть из них захватывается на глубокие уровни — «ловушки», находящиеся на границах разделов. При этом формируемый поверхностный заряд определяется как плотностью соответствующих поверхностных состояний N , так и концентрацией неравновесных носителей (Δn , Δp). Плотность поверхностных состояний обуславливается физико-технологическими факторами и постоянна для конкретной структуры. Концентрация неравновесных носителей пропорциональна интенсивности входного оптического сигнала ($\Delta n \sim I$). В результате после окончания импульса напряжения и выключения освещения свободные носители рекомбинируют (со временем жизни), а захваченные носители формируют поляризационное поле, обратное по знаку полю, создаваемому внешним источником напряжения. Релаксация поляризационного поля происходит в результате процессов термической ионизации ловушек, и соответствующее время определяется природой центров (их энергетическими характеристиками), воздействующими факторами (температурой) и механизмом взаимодействия центров с тепловыми колеблющимися кристаллической решетки полупроводника (фононами).

Время релаксации поверхностного заряда, как правило, значительно превышает время рекомбинации свободных носителей и может составлять от 10^{-3} с до десятков часов в зависимости от конкретной МДПДМ-структуры.

При подаче на структуру очередного импульса напряжения через время, меньшее времени релаксации поверхностного заряда, внутреннее поляризационное поле компенсирует в определенной степени внешнее поле.

Рис. 3. Зависимость контраста от отношения яркости стационарной засветки к яркости входного изображения при различных скоростях движения входной картины v



В случае питания ОУТ импульсным монопольным напряжением при выборе периода следования импульсов меньше времени релаксации поверхностного заряда и стационарном воздействии оптического сигнала динамика зарядового состояния структуры может быть представлена следующим образом.

За время действия импульса напряжения генерируемые светом носители разносятся полем к границам полупроводник — диэлектрик и часть из них ($\Delta n'$, $\Delta p'$) захватывается на ловушки, формируя электрический заряд $q_{\text{з}} = [e(\Delta n', \Delta p')]$. Общий заряд на границе при этом $q_{\text{г}} \sim e\Delta n$. Это приводит к появлению поляризационного поля в объеме полупроводника, обратного по знаку внешнему полю и пропорционального $q_{\text{з}}$. После окончания импульса напряжения поляризационное поле воздействует на генерируемые светом носители и перераспределяет их таким образом, что у заряженных границ формируется слой свободных носителей «противоположного знака, компенсирующий заряд на «ловушках» и экранирующий действие поляризационного поля на полупроводник и структуру в целом.

При подаче очередного импульса напряжения происходит обратное перераспределение свободных носителей, заряд на «ловушках оголяется» и внутреннее поляризационное поле компенсирует внешнее. При выборе соответствующего режима питания ОУТ (периода следования импульсов, их длительности и амплитуды) при условии, что заряд на «ловушках» пропорционален концентрации генерируемых светом носителей, можно добиться полной компенсации внешнего поля внутренним по всей площади ОУТ независимо от локальной яркости отдельных фрагментов исходного стационарного изображения. В этом случае какие-либо детали в формируемом посредством ОУТ изображении отсутствуют. При локальном изменении интенсивности входного оптического сигнала в слое полупроводника нарушается динамическое равновесие между свободными и связанными зарядами (например, в случае уменьшения яркости свободные носители уже не экранируют поляризационное поле во время отсутствия импульса, а при увеличении яркости нарушается условие компенсации внешнего поля внутренним). Это приводит к формированию соответствующего локального поля на слое ЖК и как результат к формированию в выходной плоскости оптической схемы движущихся или «мигающих» деталей входного изображения.

Через отрезок времени, задаваемый процессом изменения зарядового состояния «ловушек», локальное равновесие восстанавливается и изображение пропадает. Этим и объясняется наличие экспериментально наблюдаемого траекторного следа.

При питании ОУТ синусоидальным напряжением часть периода синусоиды, прилегающая к точке перехода амплитуды напряжения через нуль, эквивалентна времени между импульсами в рассмотренном выше случае и ей соответствует аналогичный процесс. Исследование воздействия на структуру положительного и отрицательного полупериодов синусоидального напряжения можно провести с учетом несимметричности зарядовых состояний на границах раздела полупроводник — диэлектрик (одна граница заряжена положительно, другая — отрицательно). Случай подачи на положительно заряженную границу отрицательного потенциала также эквивалентен рассмотренному выше. Подача на эту границу положительного потенциала, если он не создает поля, большего, чем поляризационное поле в полупроводнике, не приводит к изменению зарядового состояния (эквивалентная схема — параллельное включение двух источников напряжения). Таким образом, и в этом случае соответствующий выбор режима питания ОУТ по частоте и амплитуде приводит к реализации операции дифференцирования изображения по времени.

Помимо рассмотренных случаев осуществлялось дифференцирование телевизионных изображений ОУТ со структурой МДП — ЖК.

Реализация режима временного дифференцирования телевизионных изображений, направленного на выделение в кадре фрагментов, изме-

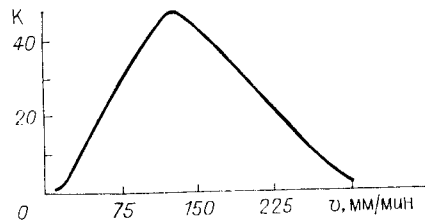


Рис. 4. Зависимость контраста от скорости перемещения входного телевизионного изображения

пояющих со временем свои координаты или яркость, также имеет свои специфические особенности, состоящие в том, что сам процесс формирования кадра является нестационарным. При этом характерное время включения каждого из элементов разложения изображения $\sim 10^{-7}$ с, время релаксации $\sim 10^{-3}$ с. Понятие подвижного фрагмента относится к тем деталям изображения, координатное положение которых смещается как минимум через время одного кадра (40 мс), при этом скорость их перемещения определяется числом элементов разложения изображения, на которое они смещаются за один кадр. Изменение яркости также привязывается ко времени, соответствующему одному кадру.

Таким образом, реализация указанной операции предполагает выбор такого режима питания ОУТ, при котором транспарант не реагирует на быстрые изменения в кадре, связанные с процессами строчной развертки, но имеет отклик на медленные изменения, сравнимые с кадровой частотой, т. е. предполагается осуществление временного дифференцирования, селективного по времени.

Экспериментально скорость движения фрагмента кадра варьровалась в диапазоне от 10 до 300 мм/мин, что при размере кадра, равном 20 мм, и разрешающей способности ОУТ в 30 мм^{-1} соответствовало перемещению фрагмента на расстояние от 0,2 до 6 элементов разложения за один кадр (40 мс).

Исследования проводились с телевизионным изображением тестовой решетки, перемещаемой по кадру в направлении, перпендикулярном ее штрихам. Путем увеличения частоты напряжения питания режим работы ОУТ выбирался таким, чтобы при нулевой скорости перемещения контраст формируемого транспарантом изображения был минимальным и изображение формировалось бы только при движении тестовой решетки в плоскости апертуры ОУТ. В этом случае получается изображение границ деталей решетки, направление которых не совпадает с направлением ее движения, причем за каждой границей наблюдается траекторный след, длина которого увеличивается с возрастанием скорости движения.

Экспериментально полученные результаты по измерению зависимости контраста от скорости перемещения входного телевизионного изображения представлены на рис. 4. Максимальное значение контраста ($K = 45$) реализуется при скорости движения, равной 120 мм/мин. Такая скорость соответствует смещению входного изображения за время одного кадра примерно на два элемента разложения изображения, т. е. достигается максимальное локальное изменение яркости входной картины (ΔI). Дальнейшее увеличение скорости движения, несмотря на постоянство значения ΔI , приводит к возрастающему вкладу в процесс формирования изображения релаксационных процессов в структуре МДП — ЖК, компенсирующих воздействие ΔI , что и способствует снижению контраста.

В заключение следует отметить, что реализованный на ОУТ со структурой МДП — ЖК эффект дифференцирования изображения по времени подобен аналогичному эффекту в устройствах типа ПРИЗ [3] и может иметь самостоятельное значение при решении ряда практических задач, что расширяет область применения оптически управляемых транспарантов данного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грибов Б. Г., Думаревский Ю. Д., Ковтонюк Н. Ф. и др. Оптически управляемые транспаранты на структурах МДПДМ из высокоомного арсенида галлия и жидкого кристалла // Электрон. техника, сер. 3.— 1981.— Т. 5.— С. 82.
2. Ковтонюк Н. Ф. Электронные элементы на основе структур полупроводник — диэлектрик.— М.: Энергия, 1976.
3. Петров М. П., Степанов С. И., Хоменко А. В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации.— Л.: Наука, 1983.

Поступила в редакцию 5 августа 1985 г.

УДК 519.233.22

А. Г. БУЙМОВ, Н. А. БУЙМОВА

(Томск)

ФУНКЦИИ ПРАВДОПОДОБИЯ ПРИ КВАДРАТИЧНОМ СРАВНЕНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОГО ОКРАШЕННОГО ШУМА

Введение. Современные системы автоматического сравнения изображений земной поверхности для автономного определения своих координат наблюдателем или дистанционного зондирования природных ресурсов проектируются и исследуются в предположении, что сравнение изображений происходит в условиях аддитивного статистически однородного белого гауссова шума. Такая ситуация имеет место в теории навигационных корреляционно-экстремальных систем [1—3], в стереофотограмметрии [4] и в других близких по математической формулировке задачах [5]. В то же время хорошо известно, что флуктуации интенсивности как оптических, так и радиолокационных сигналов в ряде случаев могут занимать промежуточное положение между флуктуациями с экспоненциальным и нормальным распределением вероятностей и иметь радиусы корреляции порядка сотен и тысяч длин волн [6, 7]. В [8—10], посвященных статистическому анализу изображений, полученных с экрана радиолокатора, сообщается о пространственной неоднородности временных флуктуаций яркости.

Цель данной работы — синтез функций правдоподобия и анализ характеристик распознавания изображений при их квадратичном сравнении в условиях неоднородного негауссова окрашенного шума.

Распределение квадратичной меры близости. Пусть

$$u(\lambda) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{T_1} \sum_{j=1}^{T_2} (y_{ij}(\lambda) + \varepsilon_{ij})^2 \quad (1)$$

— квадратичная мера близости двух матричных изображений $x_{ij}(0) + \varepsilon_{ij}$ и $x_{ij}(\lambda)$, отличающихся аддитивным шумом ε_{ij} и вектором геометрических рассогласований λ ; $y_{ij}(\lambda) = x_{ij}(0) - x_{ij}(\lambda)$, $n = T_1 \times T_2$.

Обозначим через $\psi = \frac{1}{n} \sum x_{ij}^2(0)$ выборочную дисперсию, через $\varphi(\lambda) = \frac{1}{\psi n} \sum \overset{\circ}{x}_{ij}(0) \overset{\circ}{x}_{ij}(\lambda)$ выборочную корреляционную функцию изображения $\left(\overset{\circ}{x}_{ij} = x_{ij} - \frac{1}{n} \sum x_{ij} \right)$ и потребуем, чтобы при любых λ

$$\sum x_{ij}(\lambda) = \sum x_{ij}(0); \quad \sum x_{ij}^2(\lambda) = \sum x_{ij}^2(0). \quad (2)$$

При этом (1) преобразуется к виду

$$u(\lambda) = 2\psi(1 - \varphi(\lambda)) + \frac{1}{n} \sum \varepsilon_{ij}^2 + \frac{2}{n} \sum \varepsilon_{ij} y_{ij}(\lambda). \quad (3)$$