

06; 07

ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА В ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ТРАНСПАРАНТАХ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ МДП—ЖК

*С. Н. Аннин, В. В. Беляев, Н. Ф. Ковтонюк,
В. С. Курейченко, А. Н. Лапшин, С. Б. Одиноков*

Исследованы режимы работы оптически управляемых транспарантов (ОУТ) на основе структуры МДП—ЖК при условии совпадения частот напряжения питания ОУТ и внешней засветки и при их рассогласовании. При рассогласовании частот питающего напряжения $f_{\text{ОУТ}}$ и импульсов внешней засветки $f_{\text{СВ}}$ обнаружен эффект биения дифракционной эффективности с частотой $\Delta f = f_{\text{ОУТ}} - f_{\text{СВ}}$. Показано, что амплитуда биений зависит от времени переключения слоя жидкого кристалла. Установлены зависимости времени памяти ОУТ от напряжения смещения на слое ЖК. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации энергетических соотношений в преобразователях изображений на основе ОУТ, для временной селекции объектов с периодически изменяемой интенсивностью, для регулировки времени памяти ОУТ.

Оптически управляемые транспаранты на основе структур металл—диэлектрик—полупроводник—жидкий кристалл (ОУТ МДП—ЖК) широко используются в устройствах оптической обработки информации, например в когерентно-оптических системах обработки изображений [1, 2].

Для преобразования изображений в МДП—ЖК ОУТ используется переменное напряжение питания и непрерывная или импульсная засветка, не синхронизированная с напряжением питания ОУТ [3]. В [4] показано, что при синхронизации пакета световых импульсов с одним из полупериодов синусоидального напряжения питания в структуре МДПДМ могут происходить накопление носителей и увеличение амплитуды сигнала фототока. Целью настоящей работы является исследование физических принципов формирования электрооптического отклика ОУТ на основе структуры МДП—ЖК с различными фоточувствительными материалами при синхронизации частоты питающего напряжения и импульсной внешней засветки, а также при слабом их рассогласовании.

Применявшаяся методика позволяла исследовать зависимости величины дифракционной эффективности от сдвига фаз между питающим ОУТ напряжением и импульсной засветкой от амплитуды напряжения питания и величины рассогласования между частотами при одновременном контроле фототока, протекающего через структуру. На входную апертуру ОУТ проецировалось изображение тестовой дифракционной решетки (миры абсолютного контраста с пространственной частотой 15 лин/мм). При этом интенсивность входной засветки составляла 10^{-4} Вт/см² (предельная чувствительность ОУТ 10^{-6} Вт/см²). Питание ОУТ осуществлялось синусоидальным или импульсным напряжением.

Конструкция ОУТ подробно описана в [1, 2]. В качестве фоточувствительного слоя ОУТ использовались пластины монокристаллического полужизолирующего арсенида галлия толщиной 100 и 50 мкм (образцы 1, 2) или пленки

гидрогенизированного кремния толщиной 2 и 5 мкм (образцы 3, 4). Вопросы перспектив применения указанных полупроводниковых материалов в ОУТ рассмотрены в [1-3]. В качестве модулирующей среды применялся нематический ЖК-654 с толщиной слоя 5 и 10 мкм.

При совпадении частот питания и входной засветки $f_{\text{ОУТ}} = f_{\text{СВ}}$ (длительность импульса записи $\tau \ll 1/2f_{\text{ОУТ}}$) величины дифракционной эффективности η и фототока зависят от фазовой задержки светового импульса относительно напряжения питания ОУТ. Значение η имеет в течение одного периода синусоидального напряжения питания два минимума и два максимума. Положение максимума η соответствует совпадению положения импульса записи с максимумом абсолютного значения синусоидального напряжения питания. Положение минимумов η соответствует совпадению положения импульса записи с моментом изменения полярности потенциала на электроде со стороны ЖК. Абсолютное значение η зависит от вида фотопроводника и от частоты $f_{\text{ОУТ}}$.

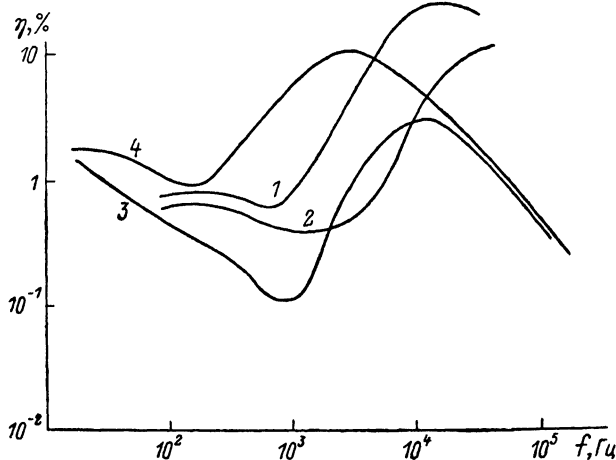


Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности η от частоты напряжения питания $f_{\text{ОУТ}}$. 1, 2 — образец 1; 3, 4 — образец 4. 1, 3 — положение импульса засветки соответствует положительному полупериоду напряжения питания; 2, 4 — отрицательному.

(рис. 1) и определяется как концентрациями фотогенерированных носителей, накопленных на границе раздела фотопроводник—ЖК, так и свойствами самой границы.

Для образцов [1, 2] величина η больше при совпадении положения импульса засветки с положительным полупериодом синусоидального напряжения, т. е. в случае формирования зарядового рельефа на границе раздела фотопроводник—ЖК электронами. В то же время для образцов [3, 4] с гидрогенизированным кремнием наблюдаются обратные зависимости, т. е. преобладает дырочная проводимость. Аналогичные результаты получаются и при питании структуры импульсным напряжением, синхронизованным с засветкой, а также при прямом измерении фототока. При питании структуры импульсами разной полярности величины η отличались приблизительно в 10 раз при частоте 100 Гц и длительности импульсов питания 5 мс, а импульса засветки 1 мс. Максимальное значение η и максимальный фототок наблюдались при нулевой фазовой задержке между передними фронтами импульсов питания и засветки, что хорошо согласуется с теорией переходных процессов в структурах МДПДМ [6]. Если импульс напряжения питания опережает импульс засветки, то η и фототок уменьшаются, так как внешнее электрическое поле частично экранируется темновыми носителями и глубина модуляции зарядового рельефа, сформированного фотогенерированными носителями, уменьшается. Время хранения зарядового рельефа на границе слоев (время памяти) определялось по величине фототока при увеличении фазовой задержки между задним фронтом импульса напряжения и передним фронтом светового импульса. Для исследуемых образцов время хранения зарядов зависело от полярности питающего напряжения и изменялось в пределах 4—16 мс.

На рис. 2 приведены измеренные для образца 4 зависимости η от амплитуды синусоидального напряжения питания ОУТ при частотах 20 Гц (кривая 1) и 2 кГц (кривая 2). Положение импульса засветки соответствовало отрицательному полупериоду напряжения питания. Эти зависимости имеют пороговый характер, причем значение пороговых напряжений в зависимости $\eta(U)$ для ОУТ и S -эффекта для ячейки с ЖК-654 совпадают. Различие вида зависимости $\eta(U)$ для разных частот связано с тем, что при низких частотах успевает произойти насыщение полупроводника в освещенных местах фотоносителями за полупериод напряжения питания, что подтверждается осциллограммами мгновенного фототока. Каждая из зависимостей $\eta(U)$ имеет один абсолютный максимум, положение которого на низких частотах очень близко к пороговому напряжению, что, как мы сейчас увидим, приводит к специфической форме зависимости дифракционной эффективности от частоты расстройки между питающим напряжением и засветкой.

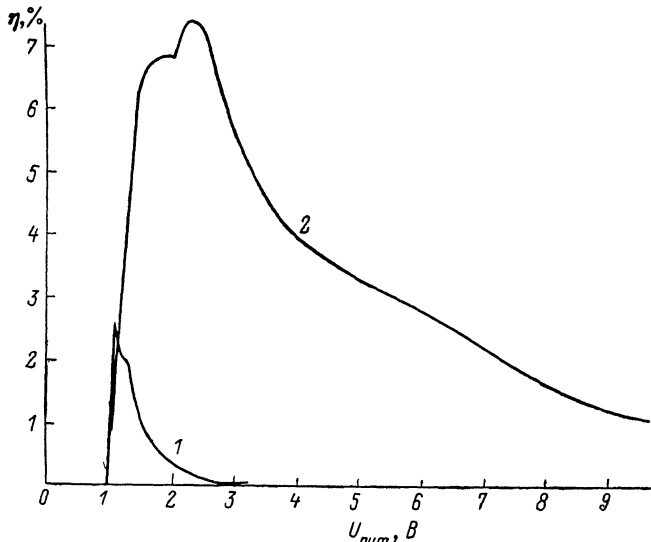


Рис. 2.

При условии, когда $f_{св} \approx f_{оут}$ и $|\Delta f|/f_{оут} \ll 1$, где $\Delta f = f_{св} - f_{оут}$, изменение η носит характер биений, частота которых определяется разностью частот изменения напряжения питания ОУТ и импульсной входной засветки $|\Delta f|$. Амплитуда биений определяется как напряжением питания ОУТ, так и частотой расстройки Δf . На рис. 3 приведены зависимости амплитуды биений η , нормированной к ее максимальному значению при фиксированном значении $f_{оут}$, от величины $|\Delta f|/f_{оут}$. Нижние ветви кривых соответствуют изменению минимума амплитуды биений, верхние — изменению максимума. Амплитуда биений при $\Delta f \rightarrow 0$ соответствует дифракционной эффективности в статическом режиме (рис. 1) и уменьшается при увеличении Δf . При рассогласовании $|\Delta f|/f_{оут} > 10^{-2}$ и напряжении питания 1.4 В дифракционная эффективность принимает постоянное значение. Важным параметром, влияющим на вид зависимости $\eta(\Delta f)$, является амплитуда напряжения питания ОУТ. Ее увеличение приводит к значительному уширению зависимости $\eta(\Delta f)$, а при сравнительно больших напряжениях питания амплитуда биений η практически не зависит от расстройки частоты Δf (рис. 3, кривые 1—4). От напряжения питания также зависит и его время памяти, которое изменяется более чем в 300 раз (с 600 до 2 мс) при изменении напряжения с 1.15 до 9 В.

Возникновение биений электрооптического отклика с частотой Δf можно понять из рассмотрения емкости МДП структуры [5, 6]. Согласно этим работам, емкость МДП структуры пропорциональна произведению скорости генерации носителей заряда на функцию, меняющуюся с периодом, равным периоду синусоидального напряжения питания, и имеющую сугубо нелинейный

характер, вследствие чего в ее спектре присутствует набор частот f , $2f$, $3f$ и т. д. Если скорость генерации носителей заряда изменяется также периодическим образом, то возникают колебания емкости МДП структуры, носящие характер биений. Такое изменение емкости с частотой Δf вызывает перераспределение напряжения на ЖК слое ОУТ с той же частотой, а следовательно, и адекватное изменение электрооптического отклика.

Хотя зависимость амплитуды биений величины η от частоты расстройки и имеют резонансный вид (рис. 3), электрический резонанс в структуре не наблюдается, что подтверждается измерениями фототока. «Резонансный» вид зависимости $\eta(\Delta f)$ в данном случае связан с тем, что слой ЖК при определенных условиях не успевает следовать даже за очень медленными (с частотой Δf до долей Герца) изменениями напряжения. При частичной переориентации в присутствии стационарного напряжения смещения $U_{см}$ времена переключе-

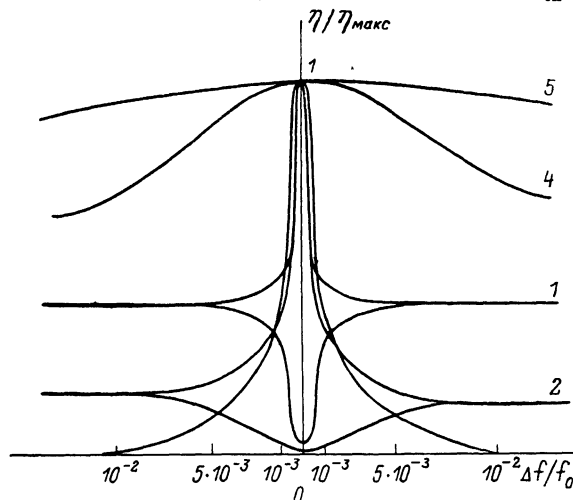


Рис. 3. Зависимость приведенной дифракционной эффективности η/η_{\max} от относительной частоты расстройки $\Delta f/f_{\text{ОУТ}}$ напряжения питания ОУТ и импульсов внешней засветки. 1 — образец 1 ($f_{\text{ОУТ}} = 5$ кГц), 2 — образец 4 ($f_{\text{ОУТ}} = 2$ кГц), 3—5 — образец 4 ($f_{\text{ОУТ}} = 20$ Гц). $U_{\text{в}}$ 3 — 1.15, 4 — 1.5, 5 — 2.

чения слоя ЖК очень сильно зависят от $U_{см}$ и могут изменяться на 3—4 порядка при изменении напряжения всего на несколько вольт, достигая 10 с и более при приближении к пороговому напряжению S-эффекта [7]. На частоте 20 Гц напряжение питания ОУТ, соответствующее максимуму η , равно 1.15 В (пороговое напряжение 1.01 В, см. рис. 2). Вследствие этого время отклика слоя ЖК возрастает, амплитуда биений даже на очень малых частотах расстройки падает, так как директор ЖК не успевает полностью переориентироваться (рис. 3, кривая 3). Увеличение напряжения питания ОУТ, хотя и способствует уменьшению величины η_{\max} при $\Delta f=0$, но в то же время приводит к уменьшению времен переключения ЖК слоя и к уширению зависимости $\eta(\Delta f)$ (рис. 3, кривая 4). При величине $U_{\text{ОУТ}} > 2$ В быстроедействие слоя ЖК становится достаточным для того, чтобы он успевал отслеживать напряжение с довольно большой частотой расстройки (порядка 20 Гц, рис. 3, кривая 5). Изменением напряжения смещения, падающего на слое ЖК, объясняется и уменьшение времени памяти при увеличении напряжения питания.

При низких частотах ($f \approx 20$ Гц для структур на основе пленок аморфного кремния) и постоянной входной засветке или значениях $|\Delta f|/f_{\text{ОУТ}} > 10^{-1}$ дифракционная эффективность стремится к нулю. Время хранения зарядов на границе раздела фотопроводник—диэлектрическое зеркало в таком режиме значительно меньше полупериода напряжения питания, поэтому эффектом экранирования фотогенерируемых зарядов на границе раздела (зарядовым вычитанием) можно пренебречь, хотя количество накапливаемых в разные полупериоды носителей приблизительно одинаково (рис. 1). Электрические

поля в жидком кристалле, сформированные на поверхности раздела фотопроводник—диэлектрик фотогенерированными носителями, за период синусоидального напряжения питания противоположны по знаку, и, следовательно, при усреднении за период питания ОУТ напряжение смещения на слое ЖК близко к нулю. Усреднение за период проводится потому, что для пространственно неоднородного поля переориентация слоя ЖК определяется не только величиной, но и направлением электрического поля [8], так как при малых углах отклонения директора (вблизи порогового напряжения) и низких частотах питания проявляется флексоэлектрический эффект, что приводит к реакции директора не только на амплитуду, но и на знак приложенного поля. Время переключения поля вблизи порогового напряжения (~ 600 мс) значительно превышает период напряжения питания, поэтому линейные составляющие приложенного поля полностью усредняются и полное напряжение смещения становится меньше порогового.

Выводы

При совпадении частот напряжения питания ОУТ и импульсов внешней засветки дифракционная эффективность увеличивается в 1.5—100 раз, но имеет различные значения при совпадении импульса засветки с положительным и отрицательным полупериодами синусоидального напряжения питания, что указывает на тип основных носителей заряда в фотопроводнике. При рассогласовании частот напряжения питания ОУТ и импульсов внешней засветки обнаружен эффект биения электрооптического отклика. Зависимость амплитуды биений от частоты рассогласования имеет квазирезонансный вид, что объясняется инерционностью слоя ЖК при данном режиме работы ОУТ. Полное рассогласование частот приводит к уменьшению отклика в 1.5—100 раз. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации энергетических соотношений в преобразователях изображений на основе ОУТ, а также для выделения (временной селекции) объектов с периодически изменяемой интенсивностью.

Литература

- [1] Думаревский Ю. Д., Ковтонюк Н. Ф., Савин А. И. Преобразование изображений в структурах полупроводник—диэлектрик. М.: Наука, 1987. 176 с.
- [2] Васильев А. А., Касасент Д., Компанец И. Н., Парфенов А. В. Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.
- [3] Компанец И. Н., Парфенов А. В., Попов Ю. М. // Квант. электр. 1980. Т. 7. № 2. С. 290—298.
- [4] Хожанов В. В., Думаревский Ю. Д., Ковтонюк Н. Ф. // Микроэлектроника. 1980. Т. 11. С. 455—457.
- [5] Ковтонюк Н. Ф. Электронные элементы на основе структур полупроводник—диэлектрик. М.: Энергия, 1976. 183 с.
- [6] Ковтонюк Н. Ф., Вдовина Т. В., Абрамов А. А. // Сб. рефератов ВИМИ. М., 1973. № 3. С. 1—54.
- [7] Чигринов В. Г., Беляев В. В. // Кристаллография. 1979. Т. 22. С. 603—607.
- [8] Chigrinov V. G., Vasiliev A. A., Kompanets I. N. // Molecular Cryst. Liquid Cryst. 1979. Vol. 55. N 2. P. 193—208.

Поступило в Редакцию
12 августа 1987 г.
В окончательной редакции
1 апреля 1988 г.