

ОПТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НА ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ

Н.В. Волков, И.Н. Компанец, В.В. Козенков, А.В. Парфенов, В.Г. Чигринов

Показано, что флексоэлектрический эффект в жидкокристаллической фото-чувствительной структуре приводит к резонансным пикам в оптическом отклике структуры на периодическое возбуждение.

Наличие особенностей флексоэлектрического эффекта в жидкокристаллическом преобразователе изображений /1/ позволяет реализовать селекцию объектов с периодически изменяющейся яркостью. В преобразователе изображений /1/ использовалась структура полупроводник — жидкий кристалл (далее — структура) с монокристаллом силиката висмута толщиной 200 — 300 мкм в качестве полупроводника. В качестве жидкого кристалла (ЖК) использовалась смесь азоксисоединений с бифенилами, обладающая близкой к нулевой диэлектрической анизотропией $\epsilon_a \approx 0$ и флексоэлектрическими коэффициентами $e_{11} = -e_{33} \approx 10^{-4}$ дин/см. Толщина слоя ЖК составляла 10 — 20 мкм. Молекулы в нем ориентировались гомеотропно одним из трех методов: добавкой в ЖК поверхностно-активного вещества (лецитина), нанесением лецитина на подложки, а также спонтанно /2/. Несмотря на различие в энергии связи /3/ молекул с подложками при различных методах ориентации, характер наблюдаемых явлений повторялся.

На преобразователь проецировалось регистрируемое изображение, содержащее среди прочих периодически мерцающие объекты. Одновременно к электродам структуры прикладывалось синусоидальное питающее напряжение. На границах деталей изображения в плоскости слоя ЖК возникает знакопеременное (с частотой питающего напряжения) поперечное электрическое поле, направленное перпендикулярно исходной гомеотропной ориентации. Флексоэлектрический эффект /4/ в этом поле приводит к деформации распределения директора молекул в слое, а значит к модуляции считываемого света в результате изменения его фазы. Поскольку напряжение знакопеременно, молекулы ЖК в такт с питающим напряжением отклоняются от исходного положения ($\theta = 0^\circ$) в обе стороны в плоскости, образованной продольной и поперечной компонентами электрического поля, т.е. в пределах $-\theta_m \leq \theta \leq \theta_m$, где θ — угол, отсчитываемый от нормали (рис. 1а), θ_m — максимальный (амплитудный) угол отклонения. Оптический отклик при этом относительно невелик, поскольку набег фазы света (φ), пропорциональный квадрату угла наклона молекул ($\varphi \propto \theta^2$), при среднем значении $\theta = 0^\circ$ пропорционален самому этому углу, т.е. $\Delta\varphi \propto \theta\Delta\theta \rightarrow 0$.

При совпадении частоты питающего напряжения с частотой изменения яркости выделяемого объекта, тем более при совпадении во времени максимума яркости с максимумом амплитуды питающего напряжения, оптический отклик структуры многократно возрастает. Происходит это по той причине, что при синфазном освещении на границе полупроводник — жидкий кристалл появляется не знакопеременное, а пульсирующее (однополярное) напряжение. Движение молекул в поле такого потенциала (геометрия поля не меняется) носит асимметричный характер: $\theta''_m \leq \theta \leq \theta'_m$ (рис. 1б). Таким образом, структура интегрирует воздействие электрического поля. Благодаря полярной природе флексоэлектрического эффекта, импульсы потенциала, возникающие при освещении полупроводника, суммируются каждый со своим знаком. Но если эта сумма близка к нулю при разнополярных импульсах (например, при стационарной засветке полупроводника, когда оба полупериода напряжения воздействуют на ЖК одинаково), то при однополярных импульсах, реализуемых при совпадении частоты питающего напряжения и частоты следования световых импульсов, она резко возрастает. Одновременно возрастает оптический отклик.

Таким образом, эффект возрастания набег фазы при равенстве частоты питающего напряжения F частоте изменения яркости объекта F_c носит резонансный характер. Ширина этого резонанса $\Delta F \propto \tau^{-1}$, где τ — эффективное время интегрирования структуры, основной вклад в которое дает время упругой релаксации слоя ЖК. При различии частот, т.е. при $\delta F = F - F_c \neq 0$ изменение поперечной составляющей

поля в слое жидкого кристалла носит характер биений, т.е. уже знакопеременных колебаний с частотой δF . Если частота этих биений велика, т.е. $\delta F > T^{-1}$, где T — характерное время упругой релаксации ЖК, то директор ЖК не успевает отклониться на сколь-нибудь значительный угол θ от нормали к поверхности полупроводника. Резонансы наблюдаются также при частотах питания, кратных частоте изменения яркости, т.е. при $F = nF_c$, где $n = 2, 3, 4, \dots$. Амплитуда отклика при этом постепенно уменьшается вследствие ухудшения фоточувствительности структуры (для частот питания больших 500 Гц отклик практически отсутствует /5/).

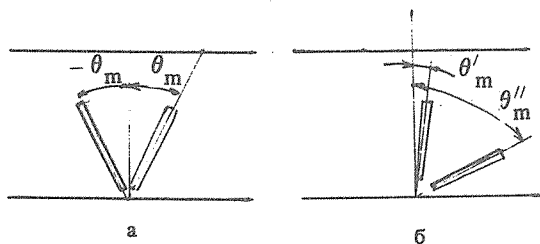
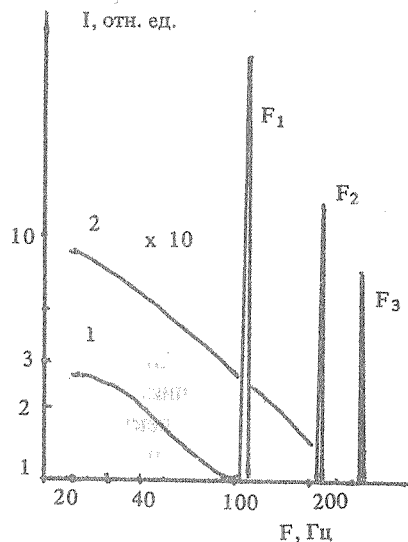


Рис. 1. Конфигурации колебаний директора молекул ЖК в случае пространственно-неоднородно знакопеременного (а) и пульсирующего (б) поля: θ_m, θ'_m и θ''_m — пределы углового отклонения молекул.

Рис. 2. Экспериментальная зависимость сигнала отклика от частоты питающего напряжения для случаев: 1 — периодического ($F_c = 108$ Гц) светового сигнала; 2 — стационарного сигнала.



Появление резонанса в частотной зависимости интенсивности отклика структуры, использующей флексоэлектрический эффект, рассчитаем, используя простейшую модель временного интегрирования структурой периодического возбуждения. Оптический отклик структуры может быть представлен рядом:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\infty} A \sin(2\pi t T_2^{-1} + \varphi) \delta(t - nT_1) \exp(-t/\tau) dt,$$

где фактор $\delta(t - nT_1)$ соответствует периодической (с периодом T_1) временной последовательности возбуждающих импульсов света; $A \sin(2\pi t T_2^{-1} + \varphi)$ — питающему напряжению (период T_2). Эти воздействия суммируются во времени (накапливаются от импульса к импульсу света). Интегрирующие свойства структуры отражены фактором $\exp(-t/\tau)$.

Резкая зависимость суммы ряда от отношения T_2/T_1 , т.е. от соотношения частот питающего напряжения и освещения, напоминает зависимость пропускания эталона Фабри — Перо. Пики пропускания соответствуют значениям $T_2/T_1 = k$, где $k = 1, 2, 3, \dots$, т.е. кратным частотам. Полуширина пика в предположении $\tau \gg T_2$ составляет $\Delta F/F = (2\pi\sqrt{2}\tau/T_1)^{-1}$, что при $T_1 = 0,01$ с, $\tau \approx 0,4$ с дает значение 0,01, т.е. избирательность по частоте следования при $F_c \approx 100$ Гц составляет $\Delta F = 1$ Гц. При оптимальном значении $\varphi = \pi/2$, когда пики напряжения совпадают во времени со световыми импульсами, отношение максимума оптического отклика к минимуму равно $2\tau/T_2 \approx 50$.

Результаты экспериментов дают гл. дкую зависимость чувствительности структуры от частоты питающего напряжения при стационарном регистрируемом изображении (рис. 2). Однако, при наличии периодически изменяющихся по яркости объектов в изображении (световые импульсы длительностью $1 \div 3$ мс) такая картина нарушается: при совпадении частоты питающего напряжения (в экспериментах она сканировалась от 20 до 500 Гц) с частотой пульсаций яркости какого-либо объекта происходит резонансное увеличение в $40 \div 50$ раз амплитуды оптического отклика на данный объект (на рис. 2 — при 108 Гц). Полная ширина резонанса, характеризующая селективность метода, составила $2 \div 3$ Гц.

Приведенные выше результаты получены в структуре, время реакции которой на возбуждающий световой импульс составляло 300 — 500 мс и определялось вязко-упругой релаксацией ЖК (время установления и релаксации фототока было менее 10 мс). При использовании структуры, время интегрирования которой определялось временем установления фототока и составляло 800 мс, ширина пика частотной зависимости отклика составила уже величину около 1 Гц. Таким образом, параметры отклика достаточно точно описываются оценками по приведенной модели.

Контрольные эксперименты со структурами, использующими ЖК с $\epsilon_a = 3 \div 15$, когда реализуется переход Фредерикса, показали, что подобный резонанс отсутствует, хотя и происходят немонотонные изменения (в $2 \div 5$ раз) сигнала отклика при перестройке частоты, связанные с изменением действующего значения напряжения на ЖК при изменении соотношения фаз и частот питающего напряжения и возбуждающих световых импульсов. При этом сигнал отклика при переходе Фредерикса максимален для стационарного сигнала.

Наблюдаемое явление может быть использовано практически. Во-первых, жидкокристаллические преобразователи изображений с флексоэлектрическим эффектом, по- существу, являются оптическим аналогом синхронного детектора, и могут из всей совокупности объектов в изображении выделять только объект с данной частотой и фазой периодического изменения яркости. Кроме того, если на преобразователь изображений в течение положительного и отрицательного полупериодов питающего напряжения проецируются разные изображения, то различия в их деталях будут выявлены и подчеркнуты резонансом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А. А., Компанец И. Н., Парфенов А. В. Квантовая электроника, 10, 1074 (1983).
2. Чувывров А. Н., Лачинов А. Н. ЖЭТФ, 74, 1431 (1978).
3. Чигринов В. Г. и др. Препринт ФИАН № 112, М., 1986.
4. Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М., Наука, 1976.
5. Компанец И. Н., Парфенов А. В., Попов Ю. М. Квантовая электроника, 7, 290 (1980).

Поступила в редакцию 13 мая 1987 г.