

06.3;07;12

О разрешающей способности оптически адресуемых жидкокристаллических пространственных модуляторов света

© В.Ф. Названов, Д.И. Коваленко

Саратовский государственный университет

*Поступило в Редакцию 18 апреля 1997 г.**В окончательной редакции 25 февраля 1998 г.*

Представлены результаты расчета модуляционной передаточной функции оптически адресуемых жидкокристаллических пространственных модуляторов света на основе слоистых структур фотопроводник–жидкий кристалл, включая и модуляторы света на поверхностных плазмонах, с учетом диффузионного растекания носителей в фотопроводнике и длины распространения поверхностных плазмонов в слоистых структурах.

Для понимания ограничений разрешающей способности с оптически адресуемых пространственных модуляторов света было предложено несколько моделей [1–11]. Было показано, что в оптически адресуемых пространственных модуляторах света на основе слоистых структур фотоприемник–жидкий кристалл разрешающая способность определяется прежде всего толщинами и диэлектрическими постоянными слоев фотопроводника и жидкого кристалла. Кроме того, теоретические и экспериментальные исследования [1,4–6,10,13] показали влияние на величину разрешающей способности, кроме толщины слоя жидкого кристалла, характера ориентации молекул в слое жидкого кристалла и его диэлектрической анизотропии. Следует учитывать также процессы диффузионного растекания (и/или дрейфа) фотовозбужденных носителей в фотопроводнике, что существенно уменьшает величину разрешающей способности пространственных модуляторов света. Прямой учет длины диффузии носителей заряда в фотопроводнике при расчете разрешающей способности жидкокристаллических оптически адресуемых пространственных модуляторов света был, по-видимому, впервые предложен одним из авторов в докладе [7].

В настоящей работе нами представлена расширенная версия [7] при вычислении модуляционной передаточной функции жидкокристаллических оптически адресуемых пространственных модуляторов света. Кроме того, при ее расчете на основе поверхностных плазмонов [14,15] учтена также длина распространения поверхностных плазмонов. Следует заметить, что в работе [11] была предложена подобная [7], но несколько иная версия для учета длины диффузионного растекания носителей заряда в фотосенсорной части жидкокристаллических оптически адресуемых пространственных модуляторов света.

В работе [12] получено выражение для модуляционной передаточной функции модулятора света на двухслойной структуре, состоящей из слоя изотропного диэлектрика (фотопроводника) и слоя диэлектрически анизотропного материала, при предположении синусоидального распределения заряда на границе двух слоев. В случае структуры фотопроводник–жидкий кристалл модуляционная передаточная функция в основном зависит от соотношения S_N/S_0 , определяемого выражением [8,12,16]:

$$\frac{S_N}{S_0} = \frac{1}{\pi\nu} \frac{\varepsilon_{PS}/d_{PS} + \varepsilon_1/d_{LC}}{\varepsilon_{PS} \coth(\pi\nu d_{PS}) + \sqrt{\varepsilon_1\varepsilon_2} \coth(\pi\nu \sqrt{\varepsilon_2/\varepsilon_1} d_{LC})}, \quad (1)$$

где d_{PS} — толщина фотопроводника, ε_{PS} — диэлектрическая проницаемость фотопроводника, d_{LC} — толщина жидкого кристалла, ε_1 — параллельная диэлектрическая проницаемость жидкого кристалла, ε_2 — перпендикулярная диэлектрическая проницаемость жидкого кристалла.

При выводе формулы (1) авторами [8,12,16] не учитывалось диффузионное растекание носителей заряда в слое фотопроводника, хотя важность этого явления ими не отрицалась.

Диффузионное растекание (и/или дрейф в случае наличия электрического поля) фотоносителей в фотопроводнике при расчете модуляционной передаточной функции можно непосредственно учесть [7] умножением величины S_N/S_0 на частотно-контрастную характеристику фотопроводника [17,18].

Действительно, использование слоя фотопроводника в качестве одного из основных элементов в оптически адресуемых пространственных модуляторах света в значительной мере определяется способностью фотопроводника с той или иной контрастностью отображать изображение возбуждающего излучения, как это имеет место в иконике для фотографических материалов [17]. Расчет [18] показывает, что

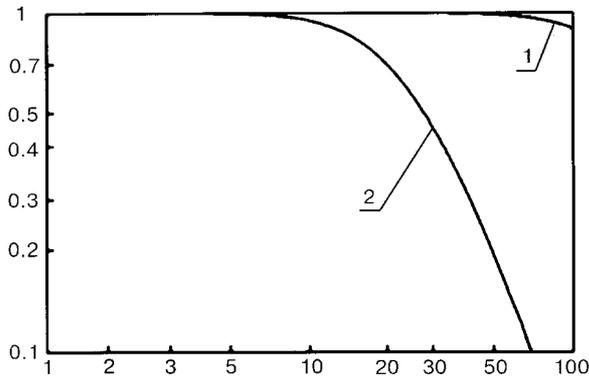


Рис. 1. Зависимость модуляционной передаточной функции оптически адресуемого пространственного модулятора света на основе структуры силикат висмута–жидкий кристалл [16] при коэффициенте модуляции 1: 1 — $L_D = 0$; 2 — $L_D = 8 \mu\text{m}$.

распределение концентрации неравновесных носителей заряда в фотопроводнике подчиняется тому же косинусоидальному закону, что и функция возбуждения. Однако амплитуда изменения концентрации отличается от таковой функции возбуждения множителем $T(\nu, L_D)$, зависящим от пространственной частоты ν и длины волны диффузии L_D . Следовательно, в фотопроводнике функция возбуждения преобразуется в функцию пространственного распределения концентрации с частотно-контрастной характеристикой вида

$$T(\nu, L_D) = 1/(1 + 4\pi^2\nu^2 L_D^2). \quad (2)$$

В случае наличия электрического поля в фотопроводнике вместо L_D следует выбирать длину смещения носителей в поле [19]. В общем случае для слоя фотопроводника в оптически адресуемом пространственном модуляторе света она зависит от величины напряжения V на слое фотопроводника, интенсивности записывающего света, глубины модуляции m , а также пространственной частоты [7].

На рис. 1 представлены результаты расчета модуляционной передаточной функции оптически адресуемого пространственного модулятора света на основе структуры силикат висмута–жидкий кристалл из [16] как без учета длины диффузии, так и с учетом ее (кривые 1 и 2

соответственно). Отсюда нетрудно видеть влияние L_D на величину разрешающей способности оптически адресуемого пространственного модулятора света. По экспериментальным данным работы [16] нами была оценена длина растекания носителей заряда в силикате висмута, которая оказалась равной $13.6 \mu\text{m}$ что соответствует реальной величине [20].

Весьма интересен также вопрос о разрешающей способности жидкокристаллических модуляторов света на поверхностных плазмонах [14,15,21]. В данном типе пространственного модулятора света кроме учета диффузионного растекания носителей в фотопроводнике (соответственно частотно-контрастной характеристикой фотосенсора оптически адресуемого пространственного модулятора света) необходимо учесть [21] также эффект размытия записанной в фотопроводнике "картины" вследствие конечной длины распространения плазмонов L_{SP} в слоистой структуре фотопроводник-жидкий кристалл. Нетрудно представить, что система считывания изображения с оптически адресуемого пространственного модулятора света на основе структуры фотопроводник-жидкий кристалл с возбуждением поверхностных плазмонов [14,15] является второй составляющей общей системы воспроизведения объекта, а первой является система записи объекта в фотопроводнике и, следовательно, структуре фотопроводник-жидкий кристалл. Тогда, согласно иконике [17], для всей системы жидкокристаллического оптически адресуемого пространственного модулятора света на поверхностных плазмонах можно ввести частотно-контрастную характеристику, определяемую простым перемножением частотно-контрастных характеристик составляющих системы, а именно частотно-контрастной характеристикой вида

$$T_0(\nu) = T(\nu, L_D)T(\nu, L_{SP}), \quad (3)$$

где $T(\nu, L_{SP})$ имеет вид, аналогичный виду (2), где вместо длины диффузии L_D (или растекания) следует подставить длину распространения поверхностных плазмонов. Таким образом, для одновременного и непосредственного учета как длины диффузионного растекания, так и длины распространения поверхностных плазмонов в расчете модуляционной передаточной функции жидкокристаллического оптически адресуемого пространственного модулятора света на поверхностных плазмонах необходимо выражение (1) для S_N/S_0 умножить на $T_0(\nu)$ по (3).

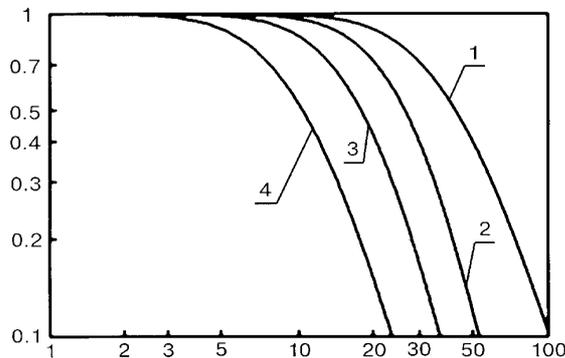


Рис. 2. Зависимость модуляционной передаточной функции оптически адресуемого пространственного модулятора света на основе структуры аморфный кремний-жидкий кристалл [14] при $L_D = 5 \mu\text{m}$ и коэффициенте модуляции 1. 1 — $L_{SP} = 0$; 2 — $L_{SP} = 5 \mu\text{m}$; 3 — $L_{SP} = 10 \mu\text{m}$; 4 — $L_{SP} = 20 \mu\text{m}$.

На рис. 2 представлены результаты расчета модуляционной передаточной функции жидкокристаллического оптически адресуемого пространственного модулятора света на поверхностных плазмонах с параметрами слоев, взятых нами из работы [14], с учетом не только длины диффузии, но и длины распространения поверхностных плазмонов. Нетрудно видеть из рисунка, что величина L_{SP} ограничивает разрешающую способность пространственного модулятора света на поверхностных плазмонах. По экспериментальным кривым модуляционной передаточной функции [14] нами рассчитаны длины L_{SP} для двух направлений распространения поверхностных плазмонов, исследованных в [14], и найдены равными (при предполагаемой нами длине растекания носителей в слое аморфного кремния $2 \mu\text{m}$) соответственно $8.2 \mu\text{m}$ (для $\nu = 25 \text{ line/mm}$) и $16.9 \mu\text{m}$ (для $\nu = 13 \text{ line/mm}$).

Таким образом, непосредственный учет эффекта диффузионного растекания носителей в фотосенсорной части жидкокристаллического оптически адресуемого пространственного модулятора света может быть выполнен при введении величины частотно-контрастной характеристики фотопроводника в выражение для модуляционной передаточной функции пространственного модулятора света. В случае жидкокристаллических оптически адресуемых пространственных модуляторов света на поверхностных плазмонах учет длины распространения поверхност-

ных плазмонов выполняется введением частотно-контрастной характеристики системы считывания изображения плазмонами одновременно с частотно-контрастной характеристикой фотосенсора.

Список литературы

- [1] *Васильев А.А.* // Труды ФИАН. 1981. Т. 126. С. 3–27.
- [2] *Efron U. et al.* // Opt. Eng. 1983. V. 22. N 6. P. 682–686.
- [3] *Игнатосян С.С., Симонов В.П., Степанов Б.М.* // ОМП. 1986. № 1. С. 7–9.
- [4] *Васильев А.А., Грузевич Ю.К., Левов С.Н.* и др. Препринт ФИАН. 1986. № 1.
- [5] *Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.Н., Парфенов А.В.* Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.
- [6] *Думаревский Ю.Д., Ковтонюк Н.Ф., Савин А.И.* Преобразование изображений в структурах полупроводник–диэлектрик. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит-ры, 1987. 176 с.
- [7] *Названов В.Ф., Новиков А.В.* // Тез. докл. I Всес. семинара "Оптика жидких кристаллов". Л., 1987. С. 189.
- [8] *Игнатосян С.С.* // ОМП. 1988. № 4. С. 4–6.
- [9] *Федоров И.В., Златов В.Ю., Радкевич А.О., Хлестов А.В.* // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общ. вопр. радиоэлектроники. 1990. № 10. С. 51–59.
- [10] *Ковтонюк Н.Ф., Сальников Е.Н.* Фоточувствительные МДП-приборы для преобразования изображений. М.: Радио и связь, 1990. 160 с.
- [11] *Barbier P.R., Wang L., Moddel G.* // Opt. Eng. 1994. V. 33. N 4. P. 1322–1329.
- [12] *Roach W.R., Frans E.D.* // IEEE. 1974. V. 21. N 8. P. 453–459.
- [13] *Chigrinov V.G. et al.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1979. V. 55. N 2. P. 193.
- [14] *Gardwell M.E., Yeatman E.M.* // Appl. Optics. 1992. V. 31. N 20. P. 3880–3891.
- [15] *Nazvanov V.F., Afonin O.A., Grebennikov A.I.* // Quantum Electronics. 1995. V. 25. N 10. P. 1028–1029.
- [16] *Aubourg P. et al.* // Appl. Optics. 1982. V. 21. N 20. P. 3706–3712.
- [17] *Вендровский К.В., Вейцман А.И.* // Иконика. М.: Наука, 1968. С. 97.
- [18] *Абаньшин Н.П., Биленко Д.И., Лодгауз В.А.* // Изв. вузов СССР. Физика. 1971. № 10. С. 143–145.
- [19] *Рывкин С.М.* Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Физматгиз, 1963. С. 338.
- [20] *Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В.* Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. Л.: Наука, 1983. С. 88.
- [21] Науч.-техн. отчет по НИР "Плазмон–Поляритон" № 01.9.10.03393. Рук. Названов В.Ф. Саратов: НИИМФ при СГУ, 1992.