

01;07

©1994 г.

ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО МЕТОДА ЛАПЛАСА К ОЦЕНКЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА

Н.В.Каманина

Макроскопический подход к описанию динамических свойств процессов, происходящих в нематических жидких кристаллах (НЖК), был развит Эриксоном [1] и Лесли [2]. Согласно [1-3], временные характеристики НЖК считаются определенными полностью, если известны пространственные распределения направления преимущественной ориентации молекул \mathbf{n} (директора) и скорости нематической жидкости \mathbf{v} в каждый момент времени t . Влияние электрического и магнитного полей на разворот директора в жидком кристалле детально рассмотрено де Женом [4] и Чандрасекаром [5].

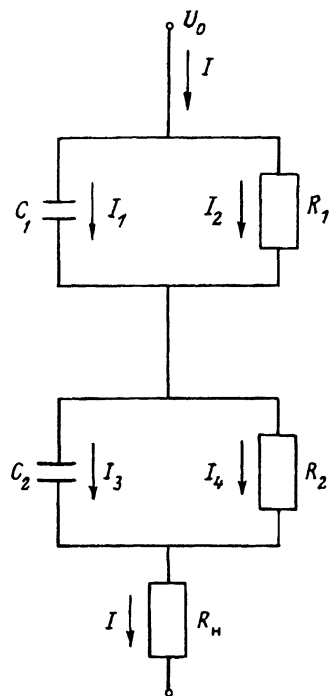
Однако теория существенно усложняется, если рассматривается слоистая структура, состоящая из элементов с различной величиной удельного сопротивления ρ . В этом случае наличие границы раздела слоев с различным ρ ведет к накоплению зарядов и как следствие к изменению временных параметров структуры в целом.

Проблема распределения поля в слоистой структуре рассматривалась рядом авторов [6-9]. Изменение во времени распределения внешнего поля в многослойной структуре определяет динамические характеристики процесса пространственной модуляции лазерного излучения в пространственно-временном модуляторе света (ПВМС) [6,10].

В данной работе предлагается использовать операционные преобразования Лапласа для решения переходных процессов, происходящих на границе раздела фотопроводник-жидкий кристалл (ФП-ЖК)-структур с разным значением ρ .

На рисунке представлена эквивалентная электрическая схема, соответствующая структуре ФП-ЖК с модуляцией проходящего света [10]. Рассмотрим поведение системы в моменты времени $t < 0$ и $t \geq 0$.

Случай $t < 0$ реализуется в отсутствие воздействия на фотослой записывающего излучения. Перераспределение напряжения на слоях



Эквивалентная электрическая схема ПВМС, работающего на просвет.

происходит следующим образом:

$$U_1 = \frac{U_0 R_1}{R_1 + R_{20} + R_n}; \quad U_2 = \frac{U_0 R_{20}}{R_1 + R_{20} + R_n}, \quad (1)$$

где U_0 — амплитуда импульса напряжения питания ПВМС; U_1, U_2 — напряжения на ЖК и ФК соответственно; R_1 — сопротивление ЖК слоя; R_{20} — темновое сопротивление фотослоя; R_n — сопротивление нагрузки.

В момент $t \geq 0$ воздействие освещения ведет к фотогенерации носителей в полупроводнике, что вызывает изменение его ρ . Это приводит к изменению сопротивления фотослоя на величину $\delta R = R_{20} - R_2$, т.е.

$$R_2 = \begin{cases} R_{20}, & t < 0, \\ R_2 < R_{20}, & t \geq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Тогда система уравнений для токов и напряжений будет иметь вид

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 = I_3 + I_4; \\ U_0 &= I_2 R_1 + I_4 R_2 + I R_n; \\ I_2 R_1 &= U_1 + \frac{1}{C_1} \int_0^t I_1 dt; \end{aligned}$$

$$I_4 R_2 = U_2 + \frac{1}{C_2} \int_0^t I_3 dt, \quad (3)$$

где $I_1 - I_4$ — токи, введенные на рисунке; C_1 и C_2 — емкости слоев ЖК и ФП соответственно.

После преобразования по Лапласу [11] система уравнений (3) примет вид

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = \bar{I}_3 + \bar{I}_4; \\ \frac{U_0}{p} &= \bar{I}_2 R_1 + \bar{I}_4 R_2 + \bar{I} R_n; \\ \bar{I}_2 R_1 &= \frac{U_1}{p} + \frac{1}{p C_1} \bar{I}_1; \\ \bar{I}_4 R_2 &= \frac{U_2}{p} + \frac{1}{p C_2} \bar{I}_3. \end{aligned} \quad (4)$$

Выражая величину тока \bar{I} через параметры системы (4) и учитывая выражения (1), после упрощений получим

$$\bar{I} = \frac{U_0 (ap^2 + b_0 p + c)}{p (ap^2 + bp + c)}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} a &= R_n R_1 R_2 C_1 C_2; \\ b_0 &= R_1 (R_{20} C_1 + R_2 C_2) + R_n (R_1 C_1 + R_2 C_2); \\ b &= R_1 R_2 (C_1 + C_2) + R_n (R_1 C_1 + R_2 C_2); \\ c &= R_1 + R_2 + R_n. \end{aligned} \quad (6)$$

Применяя теорему разложения Хевисайда в виде

$$I(t) = \frac{V(0)}{W(0)} + \sum_{i=1}^n \frac{V(p_i)}{p_i W'(p_i)} e^{p_i t}, \quad (7)$$

где

$$W'(p_i) = \left. \frac{dW}{dp} \right|_{p=p_i},$$

а p_i — корни уравнения $W(p) = 0$, и принимая во внимание, что $R_n \ll R_1$ и R_2 , получим

$$I(t) = \frac{U_0}{c} + \frac{1}{m c_0} U_0 \delta R \left[R_1 C_1 e^{-\frac{m}{c} t} - \frac{m}{R_1 + R_2} e^{\frac{R_1 + R_2}{m} t} \right], \quad (8)$$

где $c_0 = R_1 + R_{20} + R_n$, $m = R_1 R_2 (C_1 + C_2) + R_n (R_1 C_1 + R_2 C_2)$.

Величины, обратные в показателях экспонент перед множителем t , определяют времена включения $t_{\text{вкл}}$ и выключения $t_{\text{выкл}}$ фотоотклика слоистой структуры.

Тип ФП	Экспериментальные данные					Расчетные данные	
	Режим питания	Режим засветки		Время включения, мс	Литература	Время включения, мс	Время выключения, мс
		длина волны записи, мкм	длина волны считывания, мкм				
ХСП	Постоянный	Непрерывный		140	[12]	100	700
ZnSe (поликристалл)	То же	0.45-0.5	0.632	20	[13]	3	100
ZnSe (поликристалл)	Импульсный	0.48	0.63	7-10	*		
ZnSe (монокристалл)	То же	0.53	0.63	3-5	**		
Полиимид (полимер)	Постоянный	Белый свет	0.63	20	[14]	5	1000
Полиимид (полимер)	Импульсный	0.53	0.63	5	[15]	300	
		0.53	0.63				

* Данные получены автором. Запись голографической решетки проводилась излучением второй гармоники мономпульсного одностороннего лазера на КГВ с длительностью импульса 10^{-8} с с энергией 2 мДж при диаметре пятна на фотослое 5 мм. Пространственная частота 70 мм^{-1} .

** Данные получены автором. Динамические характеристики ПВМС исследовались по соотношению первого и нулевого порядков интенсивности света в дифракционных максимумах в частотной плоскости оптического фурье-спектроанализатора. Толщина монокристалла ZnSe 80 мкм.

Для сравнения теоретических и экспериментальных данных были выполнены соответствующие оценки быстродействия ПВМС с разными фотослоями. Результаты представлены в таблице.

При расчете с использованием операционного метода было сделано допущение, что емкости слоев примерно одинаковы и составляют (по значению $C_{ЖК}$) 10^{-7} Ф при апертуре ПВМС ~ 10 см² и толщинах слоев ЖК 3...5 мкм, ФП 1...2 мкм. Удельное сопротивление $\rho_{ЖК} = 10^{11}$ Ом·см в зависимости от типа полупроводника. Сопротивление нагрузки $R_n = 10^4$ Ом.

Из таблицы следует, что применение импульсного напряжения питания позволяет получить оптимальные времена нарастания и спада фотоотклика структуры ФП-ЖК, близкие к расчетным значениям. Это связано с тем, что при постоянном напряжении питания возможно диссоциация молекул ЖК, что приводит к образованию дополнительных уровней прилипания и связанному с этим ухудшению быстродействия.

Некоторое несоответствие $t_{вкл}$ [14] в случае полимерного фотослоя, сенсibilизированного полиимидом, с расчетным значением объясняется тем, что из-за малых значений подвижности в полиимидах замедляется процесс формирования и растекания заряда на границе раздела ФП-ЖК, что ведет к необходимости более точного определения эффективного значения диэлектрической проницаемости, изменяющейся под действием электрического поля.

Использование понятия "кажущегося" значения диэлектрической проницаемости [16], связанного с тем, что в области накопления зарядов диэлектрическая проницаемость может возрасти до значения 10^3 , позволяет получить удовлетворительное соответствие значений временных параметров фотоотклика, полученных методом Лапласа, с экспериментом.

Таким образом, предложенная методика определения временных параметров слоистой структуры дает хорошее соответствие с экспериментальными результатами. Она удобна в обращении и позволяет быстро оценить возможное быстродействие новых создаваемых приборов.

Методика применима и для численных расчетов на ЭВМ в автоматизированных системах обработки оптических сигналов в реальном масштабе времени.

Автор выражает благодарность Н.А. Василенко за предоставленные ПВМС с полимерным фотослоем и А.П. Оныхову за ПВМС с фотослоем на основе селенида цинка.

Список литературы

- [1] *Ericksen J.L.* // Arch. Rat. Mech. Anal. 1962. Vol. 9. P. 371-378.
- [2] *Leslie F.M.* // Arch. Rat. Mech. Anal. 1968. Vol. 28. P. 265-283.
- [3] *Чигринов В.Г.* // Кристаллография. 1982. Т. 27. № 2. С. 404-430.
- [4] *Де Жен П.* Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. 400 с.
- [5] *Чандрасекар С.* Жидкие кристаллы. М.: Мир, 1980. 344 с.
- [6] *Бережной А.А.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1982. Т. 46. № 10. С. 1915-1924.
- [7] *Ситарулдизе Д.Г., Чилая Г.С., Бродзели М.И.* // Квантовая электрон. 1979. Т. 6. № 6. С. 1271-1277.
- [8] *Закревская В.А., Сударь Н.Т.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 2. С. 66-71.
- [9] *Греков Е.В., Сугорукоев О.Г.* // Микроэлектроника. 1986. Т. 15. Вып. 2. С. 135-141.
- [10] *Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.Н., Парфенов А.В.* Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.

- [11] *Конторович М.И.* Операционное исчисление и процессы в электрических цепях. М.: Сов. радио, 1975. 320 с.
- [12] *Владимиров Ф.Л., Моричев И.Е., Плетнева Н.И.* // Опт.-мех. пром-сть. 1985. № 5. С. 1-3.
- [13] *Годя С.И., Данилюк С.А., Ермаков А.С.* и др. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 3. С. 164-168.
- [14] *Слюсарь А.И., Мыльников В.С.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 11. С. 201-203.
- [15] *Василенко Н.А., Каманина Н.В., Онозов А.П.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 13. С. 27-30.
- [16] *Грищенко Н.И., Мошель Н.В.* // УФЖ. 1980. Т. 25. № 11. С. 1830-1835.

Всероссийский научный центр
(ГОИ им. С.И. Вавилова)
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
13 октября 1992 г.
В окончательной редакции
28 мая 1993 г.