

06.3;07;12

©1994

ФАЗОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СТРУКТУРАХ С ПОВЕРХНОСТНЫМИ ПЛАЗМОНАМИ

В.Ф.Названов, А.О.Афонин

В последние годы поверхностные плазмоны (ПП) привлекают большое внимание исследователей. Это связано с их применением в спектроскопии поверхности, оптической микроскопии, с созданием оптических датчиков различных физических величин [1-3]. Использование ПП перспективно также при разработке электрически и оптически управляемых модуляторов света, в том числе жидкокристаллических [3-13]. В указанных работах режим модуляции света являлся чисто амплитудным, поскольку изменение фазы излучения, отраженного от структуры модулятора, не использовалось. В то же время в [1,14-16] показано, что при возбуждении ПП методом нарушенного полного внутреннего отражения фаза отраженного p -поляризованного излучения весьма чувствительна к поверхностным свойствам отражающей структуры, особенно при углах падения, близких к углу оптимального возбуждения плазмона.

В настоящей работе впервые сообщается о результатах исследования электрически управляемой модуляции фазы отраженного p -поляризованного монохроматического излучения жидкокристаллическими модуляторами света на поверхностных плазмонах и проводится сопоставление характеристик амплитудного и фазового режимов модуляции.

Для измерения фазы излучения, отраженного от исследованных структур, изготовленных в геометрии Кретчмана [17], использовался метод эллипсометрии. Как известно из [18], в эллипсометрии обычно измеряются два основных параметра: $\Psi = \text{arctg}(R_p/R_s)^{1/2}$ и разность фаз $\Delta = \delta_p - \delta_s$, где R_p и R_s — энергетические коэффициенты отражения для p - и s -линейно поляризованного света соответственно, а δ_p и δ_s — фазы p - и s -компонент. Поскольку в условиях возбуждения ПП R_s и δ_s практически постоянны [1], вся информация о них содержащаяся в величинах Ψ и Δ , связана с R_p и δ_p .

Исследованные образцы представляли собой структуры, состоявшие из тонкого слоя планарно ориентированно-

го нематического жидкого кристалла (ЖК), заключенного между стеклянной пластиной с проводящим слоем SnO_2 и одной из граней 60-градусной стеклянной призмы (коэффициент преломления стекла 1.74), на которую был нанесен слой серебра толщиной порядка 50 нм, выполнявший роль поверхностно-активной среды для ПП. Планарная ориентация ЖК марки ЖК-1242 с положительной диэлектрической анизотропией достигалась с помощью косонапыленных пленок SiO_x , нанесенных на сопряженные поверхности призмы и пластины. Толщина слоя ЖК, равная 10 мкм, задавалась тефлоновыми прокладками. Управляющее переменное напряжение величиной от 0 до 30 В частотой 10 кГц прикладывалось к слою ЖК посредством электродов, соединенных со слоями серебра и SnO_2 .

Экспериментальная установка для измерения разности фаз Δ была собрана на базе лазерного эллипсометра типа ЛЭМ-2 [18] по оптической схеме с компенсатором, установленным в плече поляризатора и ориентированным "быстрой осью" под углом $+45^\circ$ к плоскости падения света на образец (используется стандартная эллипсометрическая система отсчета азимутальных углов [18]). Источником монохроматического излучения служил He-Ne лазер ($\lambda = 0.6328$ мкм). Образцы структур закреплялись на столике прецизионного гониометра. Измерение Δ проводилось по традиционной методике [18]. Установка могла быть легко модифицирована для измерения зависимостей R_p и R_s от угла падения света θ путем удаления компенсатора и анализатора из оптической схемы.

Экспериментальные зависимости R_p , R_s и Δ от θ представлены на рис. 1 для двух значений управляющего напряжения: $U = 0$ и 30 В. Наблюдаются следующие основные закономерности:

1) С увеличением напряжения на слое ЖК кривая $\Delta(\theta)$, как и $R_p(\theta)$, сдвигается в область больших углов θ . При этом область наиболее резкого изменения зависимости $\Delta(\theta)$ коррелирует с областью резонанса ПП на соответствующих кривых $R_p(\theta)$.

2) Существует некоторый критический угол падения θ_c , при котором $\Delta = 0$. Он близок по величине к углу θ_{\min} , соответствующему минимуму кривой $R_p(\theta)$. Однако θ_c и θ_{\min} не совпадают друг с другом, что более выражено при $U > 0$.

Представленные результаты позволяют обосновать новый метод модуляции излучения, отраженного от структур с ПП. В этом режиме компенсатор должен быть удален из оптической схемы, а поляризатор ориентирован под углом 45° к плоскости падения излучения. Поскольку при $\theta = \theta_c$ $\Delta = 0$, то отраженный свет линейно поляризован и мо-

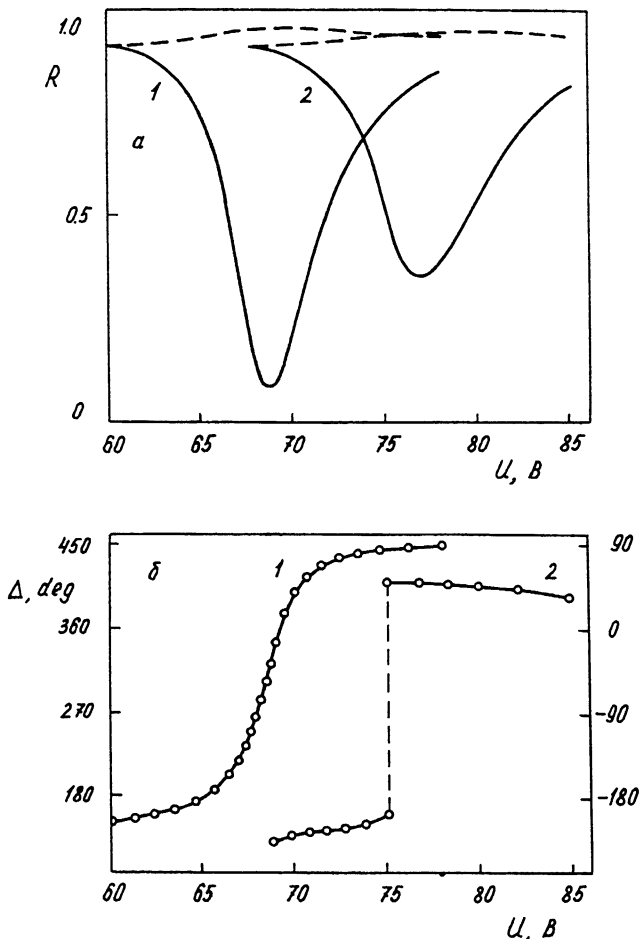


Рис. 1. а — зависимость энергетических коэффициентов отражения R_p (сплошные кривые), R_s (пунктирные кривые) и б — соответствующих фазовых сдвигов Δ между p - и s -компонентами отраженного излучения от угла падения θ для двух значений напряжения на слое ЖК: $U = 0$ В (кривые 1) и $U = 30$ В (кривые 2). Длина волны излучения $\lambda = 0.6328$ мкм. Две шкалы отсчета Δ эквивалентны.

жет быть полностью подавлен анализатором. Последующее увеличение управляющего напряжения на слое ЖК (равно как и любого другого электрооптического материала, граничащего с поверхностным слоем металла) при фиксированном угле θ_c изменяет эффективные значения его оптических констант по отношению к отражающей поверхности, что в свою очередь приводит в модуляции R_p и Δ . При этом со-

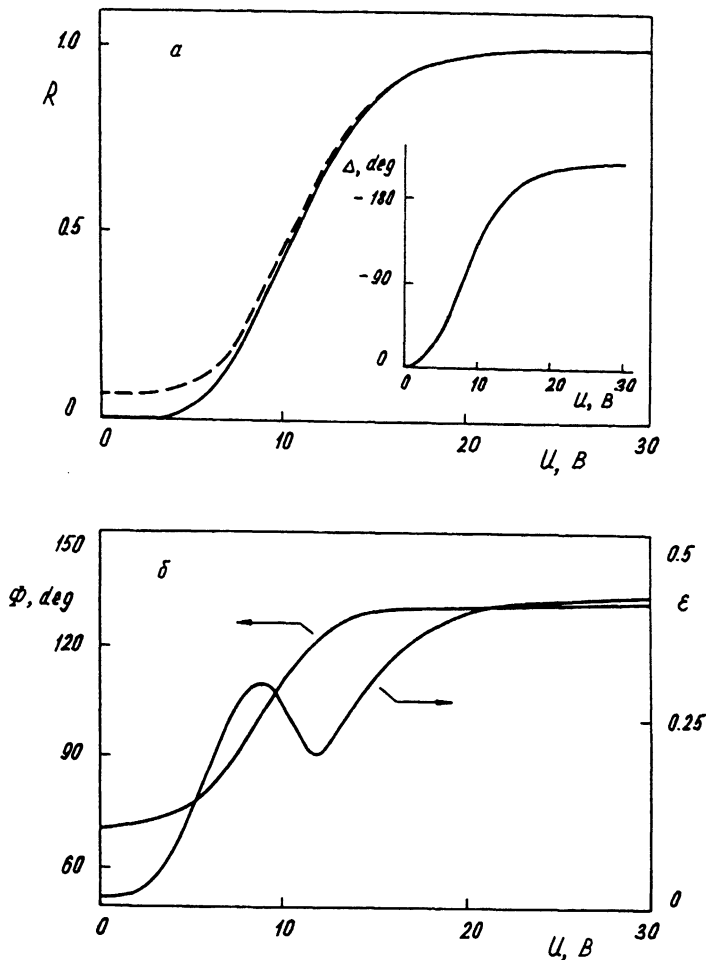


Рис. 2. а — зависимости относительных коэффициентов отражения R от напряжения на слое ЖК в режиме чисто амплитудной (R_p , пунктирная кривая) и амплитудно-фазовой (сплошная кривая) модуляции. На вставке показана зависимость $\Delta(U)$ в амплитудно-фазовом режиме модуляции. б — зависимость азимута эллипса поляризации отраженного излучения Φ и эллиптичности ϵ от напряжения U в амплитудно-фазовом режиме модуляции.

стояние поляризации отраженного света изменяется как за счет вариации азимута эллипса поляризации Φ , так и эллиптичности ϵ . В результате отраженное излучение будет проходить через зафиксированный ранее анализатор. Соответствующая этому режиму модуляции зависимость коэффициента отражения от структуры $R(U)$ показана на рис. 2.

Там же представлены кривые $R_p(U)$ (амплитудный режим), $\Delta(U)$, $\phi(U)$ и $\varepsilon(U)$, иллюстрирующие описанный выше механизм модуляции (ϕ и ε измерялись по стандартной методике [18]). Поскольку ϕ и ε являются функциями как величины ψ , зависящей от отношения R_p/R_s , так и Δ [18], то рассматриваемый режим модуляции является, строго говоря, амплитудно-фазовым.

Достигнутые контрастные отношения, определяемые как $R(U = 30 \text{ В})/R(U = 0 \text{ В})$, составили 5000:1 и выше, что более чем на два порядка превышает значение 13:1, полученное при чисто амплитудной модуляции (см. рис. 2). Интенсивность света, отраженного от структуры при $U = 30 \text{ В}$ и прошедшего через анализатор, составила около 50% по отношению к интенсивности падающего излучения (в случае амплитудной модуляции 90%). Времена включения и выключения электрооптического отклика на прямоугольный импульс напряжения величиной 30 В имели значения 1 и 18 мс соответственно и не зависели от выбора режима модуляции.

Таким образом, в данной работе показано, что в жидкокристаллических структурах на поверхностных плазмонах в геометрии Крентчмана, помимо чисто амплитудной модуляции, может быть реализована эффективная электрически управляемая амплитудно-фазовая модуляция отраженного излучения при использовании метода эллипсометрии. По нашему мнению, применение описанного метода позволит существенно улучшить основные параметры (чувствительность, контрастное отношение) устройств, исследованных в работах [3-13], а также устройств с ПП других типов (сенсоров, микроскопов и др.).

Авторы выражают благодарность А.И.Гребенникову и Г.А.Лебединой за помощь в изготовлении исследованных структур.

Список литературы

- [1] Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред / Под ред. В.М. Аграновича, Д.Л. Миллса. М.: Наука, 1985. 525 с.
- [2] Дмитрук Н.Л., Литовченко В.Г., Стрижевский В.Л. Поверхностные поляритоны в полупроводниках и диэлектриках. Киев: Наукова думка, 1989. 376 с.
- [3] Welford K.R. // Opt. and Quant. Electron. 1991. V. 23. N 1. P. 1-27.
- [4] Sincerbox G.T., Gordon J.C. // Appl. Opt. 1981. V. 20. N 8. P. 1491-1496.
- [5] Plumereau C., Bouchuz A.-M., Cachard A. // Proc. SPIE. 1987. V. 800. P. 79-83.
- [6] Prsegol D., Pic E., Plantier J. // Proc. SPIE. 1988. V. 864. P. 42-44.
- [7] Schildkraut J.S. // Apl.Opt. 1988. V. 27. N 21. P. 4587-4590.

- [8] *Rider C.B., Schildkraut J.S., Scozzafava M.* // J.Appl. Phys. 1991. V. 70. N 1. P. 29-32.
- [9] *Yeatman E.M., Caldwell M.E.* // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 55. N 7. P. 613-615.
- [10] *Yeatman E.M., Caldwell M.E.* // Proc. SPIE. 1989. V. 1151. P. 522-532.
- [11] *Caldwell M.E., Yeatman E.M.* // Electron. Lett. 1991. V. 27. N 16. P. 1471-1472.
- [12] *Caldwell M.E., Yeatman E.M.* // Appl. Opt. 1992. V. 31. N 20. P. 3880-3891.
- [13] *Sjolgaard O., Ho F., Thackara J.I., Bloom D.M.* // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 61. N 21. P. 2500-2502.
- [14] *Никитин А.К., Тущенко А.А.* // Поверхность. 1987. В. 9. С. 84-89.
- [15] *Simon J.M., Presa V.A.* // J.Mod. Opt. 1989. V. 36. N 5. p. 649-657.
- [16] *Никитин А.К., Тущенко А.А.* // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 11. С. 76-79.
- [17] *Kretschmann E.* // Z. Physik. 1971. В. 241. S. 313-324.
- [18] *Горшков М.М.* Эллипсометрия. М.: Сов. радио, 1974. 200 с.

Саратовский государственный
университет
им.Н.Г.Чернышевского

Поступило в Редакцию
24 января 1994 г.
