

ОДНОРОДНОЕ ВРАЩЕНИЕ СМЕКТИЧЕСКИХ СЛОЕВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ АСИММЕТРИЧНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

С.В.Яблонский¹, К.Накаяма^{*1}), М.Озаки^{*1}), К.Йошино^{*1})

Институт кристаллографии РАН
117333 Москва, Россия

^{*}Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University
565 Osaka, Japan

Поступила в редакцию 30 апреля 1998 г.

Асимметричное переменное электрическое поле с амплитудой $E = 10$ В/мкм вызывает согласованное вращение нормали к смектическим слоям, а синусоидальное $E = 1$ В/мкм используется для его изучения в методе модуляционной эллипсометрии полного внутреннего отражения, который позволяет зондировать область сегнетоэлектрического жидкого кристалла (СЖК), непосредственно примыкающую к электроду ($h \approx 0.7$ мкм). Показано, что угол поворота нормали к смектическим слоям вблизи поверхности электрода, так же как и в объеме, обратимо меняется в зависимости от полярности и числа приложенных электрических импульсов. Динамические характеристики, характерные для тонких слоев нематических жидких кристаллов, такие как аномально большое время релаксации и высокочастотный релаксационный процесс, обнаружены в тонких слоях СЖК.

PACS: 61.30.Gd

1. Введение. Практически важные электрооптические эффекты в хиральных сегнетоэлектрических жидких кристаллах (СЖК) основаны на изменении ориентации директора СЖК по отношению к жестким²⁾ и неподвижным смектическим плоскостям. Статичность смектической слоевой структуры не подвергалась сомнению вплоть до появления работы [2], где наблюдается в S^* -фазе необратимый и ограниченный величиной полярного угла θ_0 поворот нормали к смектическим слоям под действием электрического поля. Дальнейшее развитие эти исследования получили в работах [3-7]. Их главным результатом явилось открытие однородного и обратимого вращения смектических слоев, индуцированного электрическим полем специальной формы и большой амплитуды. Вращение контролировалось наблюдением в поляризационный микроскоп текстурных дефектов и усредненной по толщине образца оптической индикатрисы. Эффект вращения смектических слоев был обнаружен в S^* и A фазах, как сегнетоэлектрических, так и антисегнетоэлектрических ЖК [3-4]. Показано, что он имеет пороговый характер [8], критичен к химическому составу ориентирующих покрытий и их механической обработке.

В настоящее время физический механизм данного явления до конца не ясен, но его зависимость от свойств поверхности стимулировало данную работу, в которой для исследования СЖК непосредственно вблизи границы раздела ЖК – электрод используется метод модуляционной эллипсометрии полного внутреннего отражения,

¹⁾ K.Nakayama, M.Ozaki, K.Yoshino.

²⁾ В принципе, по теоретическим соображениям, в смектиках A возможна волнообразная неустойчивость плоских смектических слоев [1]. Но для получения заметного эффекта требуются высокие напряженности поля. Видимо, поэтому он пока еще не обнаружен.

чувствительный, как будет показано ниже, к ориентации нормали к смектическим слоям, позволяющий зондировать тонкие приповерхностные слои ЖК и исследовать их динамические свойства [9, 10].

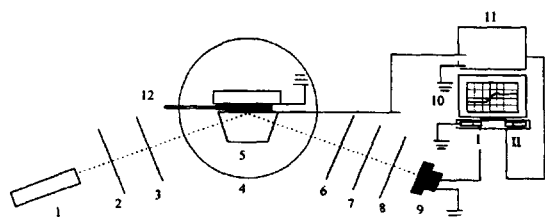


Рис.1. Экспериментальная установка: 1 – He-Ne-лазер; 2, 6 – пластинка $\lambda/4$, $\lambda = 632.8$ нм; 3 – поляризатор; 4 – вращающийся столик; 5 – призмный модуль с СЖК; 7 – анализатор; 8 – фильтр; 9 – кремниевый фотодиод; 10 – персональный компьютер; 11 – генератор специальных импульсов; 12 – термопара, I and II – входы звуковой карты Sound Blaster-16

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение. В случае нормальной ориентации смектических слоев по отношению к ограничивающим поверхностям в условиях полного внутреннего отражения глубина проникновения L затухающей поверхностной световой волны равна [11]: $L = \lambda(N^2 \sin^2 \varphi^2 - n_{эфф}^2)^{-1/2}$, где $\lambda = 0.6328$ мкм, $N = 1.803$ – показатель преломления призмы из тяжелого флинта ТФ-10, $\varphi = 80^\circ$ – угол падения световой волны, отсчитываемый от нормали к границе раздела призма – электрод, $n_{эфф} = (n_{\parallel}^2 \sin^2 \theta_0^2 + n_{\perp}^2 \cos^2 \theta_0^2)^{1/2}$, $\theta_0 = 25^\circ$ – угол наклона директора по отношению к нормали к смектическим слоям, $n_{\parallel} = 1.66$, $n_{\perp} = 1.49$, $n_{эфф} = 1.52$. (Показатели преломления n_{\parallel} и n_{\perp} , используемые для оценки глубины проникновения затухающей световой волны, измерялись на длине волны He-Ne-лазера $\lambda = 632.8$ нм в смектической А-фазе при температуре $T = 78^\circ\text{C}$). Таким образом, максимальная глубина проникновения световой волны равнялась $h \approx 0.7$ мкм, что было значительно меньше толщины образца $d = 10$ мкм. Модуляция показателя преломления, связанная с движением по конусу директора ЖК, симметричным по отношению к нормали к смектическим слоям, приводит к модуляции фазы отраженных световых волн, поляризованных в плоскости и перпендикулярно плоскости падения. (Отражение происходит в условиях полного внутреннего отражения, причем вектор поляризации световой волны составляет 45° с плоскостью падения). После преобразования компенсатором Сеннармона отраженный свет детектируется фотоприемником, соединенным с компьютером (рис.1). Для измерений сигнала использовался специальный программный пакет PhysLab, базирующийся на мультимедийных ресурсах персонального компьютера и реализующий ряд виртуальных приборов, необходимых для модуляционной эллипсометрии, таких как синхронный детектор, анализатор спектра и самописец.

В общем случае периодический эллипсометрический сигнал имеет сложную форму и содержит как четные, так и нечетные гармоники частоты возбуждающего электрического поля ω , как показано на рис.2. Отсутствие же нечетных гармоник в оптическом отклике из симметричных соображений соответствует частному случаю, когда нормаль к смектическим слоям лежит в плоскости падения световой волны.

Таким образом, в данной работе особое внимание уделяется синхронному детектированию X -компоненты оптического отклика на фундаментальной частоте возбуждающего электрического поля, где $X = A(\omega) \cos \varphi$, $A(\omega)$ – амплитуда эллипсометрического сигнала, а φ – разность фаз, детектируемая синхронным детектором.

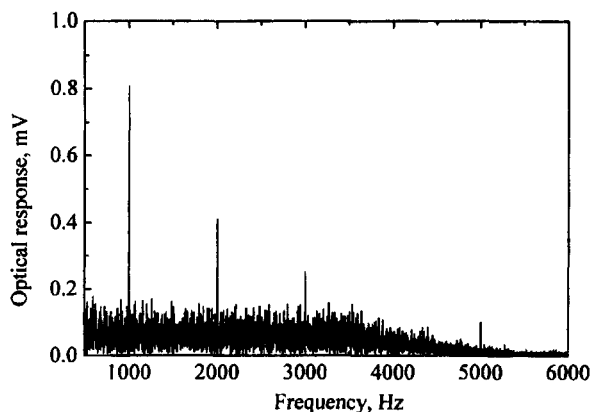


Рис.2. Фурье-спектр электрооптического отклика, полученный при температуре $T = 45^\circ\text{C}$. К образцу прикладывалось напряжение с амплитудой 10 В и частотой 1 кГц

Момент, когда X -компонента обращается в нуль, соответствует моменту прохождения нормали к смектическим слоям плоскости падения световой волны, а смена знака X -компоненты – смене знака угла между нормалью к смектическим слоям и плоскостью падения.

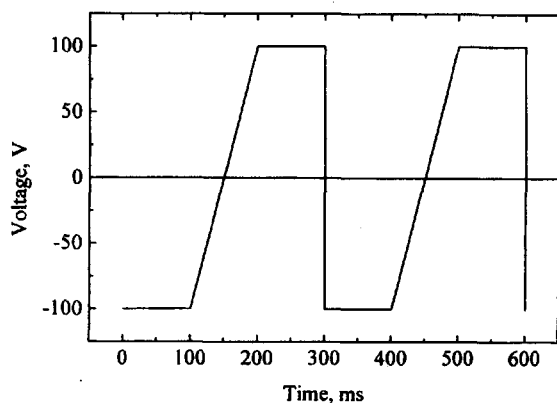


Рис.3. Форма и величина ассиметричного напряжения, вызывающего вращение нормали к смектическим слоям

Исследовался хиральный СЖК (CS-1029 Chisso Co.), имеющий следующую последовательность фаз и температур фазовых переходов в градусах Цельсия: Cr-18-SmC*-73-Sm A-85-N*-91-Iso. На полупрозрачные электроды (ITO), напыленные на поверхность призмы и плоского стекла, наносились ориентирующие покрытия на основе поливинилового спирта (ПВС). После отжига при температуре 120°C в течение 1 ч начальная ориентация СЖК формировалась с помощью механического натирания поверхности ПВС тканью из нейлона. Существенным моментом была процедура получения слабой азимутальной энергии сцепления ЖК с подложкой. Для этого нейлоновая ткань приводилась в контакт с подложкой, а затем деформировалась на глубину 0.5 мм. Далее подложку сдвигали по отношению к неподвижной ткани. Тридцати тактов было достаточно для формирования необходимого рельефа на поверхности подложки и наведения слабой анизотропии энергии связи с низким полевым порогом. Сегнетоэлектрический жидкий кристалл помещался в призмный модуль, показанный на рис.1, при температуре $T = 95^\circ\text{C}$, а затем охлаждался до комнатной температуры $T = 20^\circ\text{C}$. Начальное расположение смектических слоев

было перпендикулярно направлению натирания и поверхности подложки. Затем к образцу в течение 45 мин прикладывалось асимметричное электрическое поле, форма которого показана на рис.3. В результате оптическая текстура поворачивалась на угол 20° (рис.4 а). Через 45 мин действия инвертированного асимметричного напряжения (зеркально-симметричного по отношению к оси абсцисс) угол наклона составлял 0° , а через 90 мин -20° (рис.4 б). По определенному протоколу, как следует из рис.5, асимметричное напряжение выключалось и с помощью модуляционной эллипсометрии полного внутреннего отражения измерялась $X(\omega)$ -компонента оптического отклика на действие синусоидального напряжения $U = 10$ В с частотой $\omega = 2\pi \times 1000$ в зависимости от времени, как показано на рис.5. Из рис.5 оценивалось время релаксации СЖК $\tau_p \approx 10$ мин, которое значительно превышало его быстродействие – $\tau_\varphi \approx 400$ мкс. Интересно отметить, что такое поведение не является специфичным для СЖК, так как, например, время установления равновесия в приповерхностном слое 5ЦБ в случае слабой азимутальной энергии связи с подложкой также составляло $\tau_p \approx 10$ мин [12], то есть значительно превышало время релаксации нематического жидкого кристалла $\tau_p \approx 0.1$ с, вычисляемого из известного выражения $\tau_p = d^2 \gamma / \pi^2 K$, где $d = 10$ мкм, $\gamma = 1$ пуаз, $K = 10^{-6}$ дин. В момент совпадения нормали к смектическим слоям с плоскостью падения световой волны $X(\omega)$ -компонента оптического отклика обращалась в нуль, а преимущественное направление полосчатой дефектной структуры совпадало с осью легкого ориентирования. Дальнейшее воздействие асимметричного напряжения на СЖК приводило к смене знака $X(\omega)$ -компоненты оптического отклика и, соответственно, к смене знака угла поворота нормали к смектическим слоям, подтверждаемой наблюдением в поляризационный микроскоп.

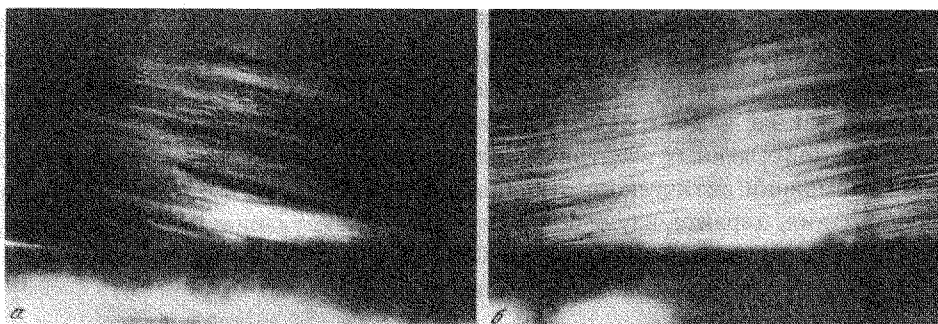


Рис.4. Фотографии, полученные с помощью поляризационного микроскопа: а – после 45-минутного действия асимметричного напряжения, б – после 90-минутного воздействия на текстуру, изображенную на предыдущей фотографии

Так как в условиях полного внутреннего отражения изменение разности фаз между перпендикулярными и параллельными компонентами поля световой волны не зависит от толщины слоя ЖК при $d < h$ [11], то для $\omega > 1/\tau_p$ легко реализуется ситуация, когда $\varphi(t) \sim A(\omega)e^{i\omega t}$, где $\varphi(t)$ – азимутальное возмущение директора СЖК, а $A(\omega)$ – амплитуда первой гармоники оптического отклика. Хорошее согласие с теоре-

тическими предсказаниями частотного поведения азимутального возмущения СЖК [13] показано на рис.6, где в промежуточной частотной области $A(\omega) \sim |\varphi(t)| \sim \omega^{-1}$. Дополнительное затухание в области высоких частот $\nu > 30$ кГц демонстрирует кривая 1, полученная при комнатной температуре $T = 20^\circ\text{C}$. (Для случая $T = 45^\circ\text{C}$, описываемого кривой 2, этот процесс, по-видимому, сдвинут в сторону высоких частот.) Аналогичный высокочастотный диссипативный процесс, связанный с влиянием поверхностной вязкости на динамику жидкого кристалла наблюдался в компенсированном нематическом жидком кристалле МББА [14].

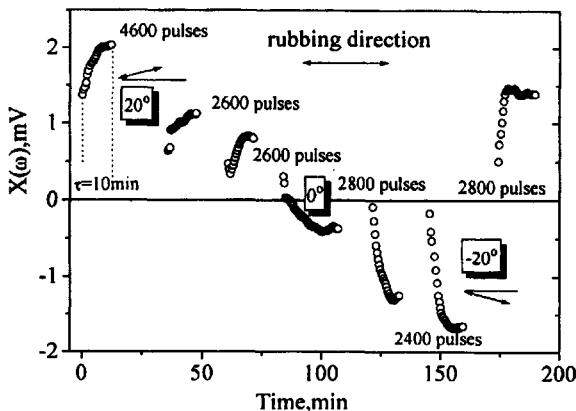


Рис.5. Зависимость $X(\omega)$ -компоненты оптического отклика от времени наблюдения. Амплитуда, частота синусоидального напряжения, а также температура, при которой проводились измерения, были равны $U = 10$ В, $\omega = 2\pi \times 1000$, $T = 45^\circ\text{C}$, соответственно. Во время пауз прикладывалось асимметричное напряжение (количество импульсов показано на рисунке)

3. Выводы. С помощью модуляционной эллипсометрии полного внутреннего отражения исследовалось динамическое поведение тонкого, порядка длины световой волны, приповерхностного слоя СЖК в эффекте однородного вращения нормали к смектическим слоям, индуцированного асимметричным электрическим полем. Показано, что угол поворота нормали к смектическим слоям вблизи поверхности электрода, так же как и в объеме, обратимо меняется в зависимости от полярности и числа приложенных электрических импульсов. Проводились также измерения первой гармоники оптического отклика в зависимости от частоты синусоидального напряжения, характеризующие азимутальное возмущение СЖК. Оказалось, что поверхностная динамика тонких слоев СЖК неспецифична и проявляет черты, присущие нематическим жидким кристаллам.

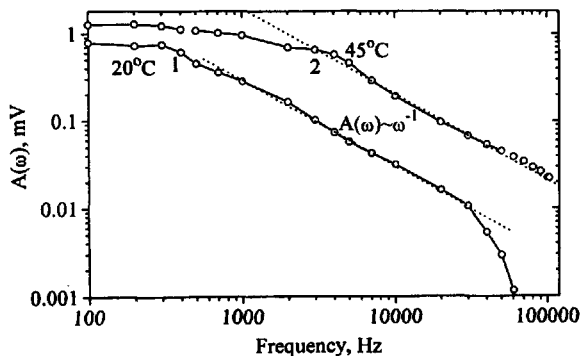


Рис.6. Частотная зависимость амплитуды оптического отклика $A(\omega)$: 1 - при температуре $T = 20^\circ\text{C}$, 2 - при температуре $T = 45^\circ\text{C}$

Данная работа поддержана грантами COPERNICUS (IC15-CT96-0744), INTAS 95-IN-RU-128, РФФИ 98-02-17071, а также грантом Японского министерства образования, науки, спорта и культуры. Авторы выражают признательность С.П.Палто за возможность использования программного пакета PhysLab и С.А.Пикину за ценные замечания.

-
1. П. Де Жен, *Физика жидких кристаллов*, М.: Мир, (1977).
 2. J.S.Patel and J.W.Goodby, *J.Appl.Phys.* **59**, 2355 (1986).
 3. M.Ozaki, H.Moritake, K.Nakayama and K.Yoshino, *Jpn.J.Phys.* **33**, L1620 (1994).
 4. K.Nakayama, H.Moritake, M.Ozaki and K.Yoshino, *Jpn.J.Phys.* **34**, L1599 (1995).
 5. K.Nakayama, M.Ozaki and K.Yoshino, *Jpn.J.Phys.* **35**, 6200 (1996).
 6. K.Nakayama, M.Ozaki and K.Yoshino, *Appl.Phys.Lett.* **70**, 2117 (1997).
 7. K.Nakayama, M.Ozaki and K.Yoshino, *Jpn.J.Phys.* **36**, 6122 (1997).
 8. K.Nakayama, M.Ozaki and K.Yoshino, *Mol.Cryst.Liq.Cryst.* **304**, 339 (1997).
 9. L.M.Blinov, D.B.Subachius, and S.V.Yablonskii, *J.Phys.II* **1**, 459 (1991).
 10. L.M.Blinov, S.V.Yablonskii, and G.Durand. *Dynamic properties of surface nematic layers studied by modulation ellipsometry*, British Liquid Crystal Society. Annual Conf. University of Bristol, 9-11 April 1990, p.IV.5.
 11. М.Борн, Э.Вольф, *Основы оптики*, М.: Наука, (1973).
 12. V.P.Vorflusev, H.-S.Kitzerov and V.G.Chigrinov, *Appl.Phys.Lett.* **70**, 3359 (1997).
 13. С.А.Пикин, *Структурные превращения в жидких кристаллах*, М.: Наука, 1981, с.168.
 14. S.Yablonskii, M.Rajteri, C.Oldano, and G.Durand, *SPIE* **2731**, 87 (1995).