УДК 548.732

# ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ В ОБЛАСТИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЧАСТОТ

## Л.Г. ГАСПАРЯН<sup>\*</sup>, В.П. МКРТЧЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

\*e-mail: laura@ysu.am

(Поступила в редакцию 29 апреля 2015 г.)

Рентгено-интерферометрическим методом исследована анизотропия нематических жидких кристаллов типа 5СВ. Определены показатели преломления  $n_0$  и  $n_e$  и установлено, что нематический жидкий кристалл типа 5СВ является рентгено-оптически положительной анизотропной средой.

#### 1. Введение

Известно, что диэлектрическая проницаемость анизотропных сред — тензорная величина [1], вследствие чего показатель преломления электромагнитных волн в такой среде зависит от их поляризации. Рассмотрим распространение электромагнитных волн в оптически анизотропной одноосной среде. Плоскость, проходящая через нормаль к волновому фронту и оптическую ось, называется главным сечением. Вектор поляризации волны разложим на две составляющие перпендикулярную и параллельную к главному сечению. Для составляющей вектора поляризации, перпендикулярной к главному сечению, показатель преломления не зависит от угла, образованного нормалью к волновому фронту волны и оптической осью. Однако для составляющей вектора поляризации, лежащей в плоскости главного сечения, показатель преломления является функцией угла, образованного нормалью к волновому фронту и оптической осью. Луч с поляризацией, перпендикулярной главному сечению, называется обыкновенным, а луч с поляризацией, лежащей в плоскости главного сечения, называется необыкновенным лучом.

Для излучения с поляризацией, перпендикулярной главному сечению, показатель преломления обозначается  $n_0$ , а для излучения с поляризацией, лежащей в плоскости главного сечения и параллельной оптической оси, показатель преломления обозначается через  $n_e$ . Если  $n_0 > n_e$ , то среда называется оптически отрицательной, а при  $n_0 < n_e -$  положительной.

В оптике проведено множество исследований, связанных с изучением оп-

тической анизотропии. Однако рентгено-оптическая анизотропия сред, в основном, исследована в условиях брэгговского отражения, когда диэлектрическая проницаемость отражающего кристалла рассматривается как тензор. Эти явления существенны для частот в непосредственной близости к краю поглощения кристалла [2–4]. В работах [5,6] описана рентгено-оптическая искусственная анизотропия монокристалла кремния, когда отражающий рентгено-оптически изотропный кристалл под влиянием температурного градиента или ультразвука приобретал рентгено-оптическую анизотропию. Это выражалось в расщеплении максимума кривой отражения на два максимума для  $\sigma$ - и  $\pi$ -поляризации неполяризованного падающего излучения, так как показатели преломления для этих составляющих в искусственно анизотропном кристалле различались.

Целью настоящей работы является исследование рентгено-оптической анизотропии в отсутствие брэгговского отражения для некристаллических сред. В качестве такой среды был выбран нематический жидкий кристалл (НЖК) типа 5CB.

#### 2. Схема эксперимента

Для исследования рентгено-оптической анизотропии среды необходимо каким-то образом регистрировать разность фаз, возникающую при прохождении через такую среду рентгеновских волн с различными поляризациями. В качестве такого чувствительного прибора можно использовать трехблочный рентгеновский Лауэ интерферометр (LLL интерферометр) [7], состоящий из трех кристаллических блоков (рис.1), отражающие плоскости которых перпендикулярны их поверхностям. Толщина блоков выбрана так, чтобы они удовлетворяли условию



Рис.1. Ход лучей в LLL интерферометре. RP – отражающие плоскости блоков, SP – исследуемый образец, PF – фотографическая пленка.

бормановского прохождения  $\mu t \gg 1$ , где  $\mu$  – линейный коэффициент поглощения материала интерферометра и t – толщина блока. В случае бормановского прохождения при неполяризованном падающем пучке после прохождения через блоки интерферометра остаются только волны σ-поляризации, вектор поляризации которых перпендикулярен плоскости дифракции. Известно, что в рентгеновском интерферометре интерферируют пучки, накладывающиеся на третьем блоке – анализаторе, вследствие чего в двух пучках, выходящих из блока анализатора наблюдаются интерференционные муаровые полосы. Когда нарушается идеальность структур кристаллических блоков, образуются интерференционные картины разного типа, период и расположение которых зависят от типа искажений кристаллической структуры. Обычно различают два типа интерференционных картин: дилатационный и ротационный муары. Линии дилатационного муара параллельны отражающим плоскостям и образуются, когда различаются межплоскостные расстояния интерферометрических блоков. Линии ротационного муара перпендикулярны отражающим плоскостям и наблюдаются при существовании взаимных поворотов отражающих плоскостей в интерферометрических блоках.

Если на пути одного из интерферирующих пучков поставить исследуемый образец (рис.1), то, измеряя смещение линий муара относительно исходного положения, можно определить показатель преломления образца. Этот метод в рентгеновской области частот применялся при исследовании рентгено-оптически изотропных сред [8,9].

Основная суть предложенного метода заключается в том, что между блоками интерферометра помещается образец, направление оптической оси которого известно, и рентгено-интерферометрическим способом проверяется рентгено-оптическая анизотропия исследуемого образца, а также оценивается разность показателей преломления  $(n_0 - n_e)$  в области рентгеновских частот. В этом случае наблюдаемое смещение муаровых полос зависит от взаимного расположения вектора σ-поляризации и оптической оси исследуемого образца. Если оптическая ось исследуемого образца перпендикулярна плоскости дифракции и нормали к волновому фронту К рентгеновской волны, проходящей через образец, то вектор поляризации  $\sigma$ -поляризованной волны будет параллелен оптической оси и волна будет себя вести как необыкновенная волна с показателем преломления  $n_e$  (рис.2а). Если образец повернуть на 90° относительно нормали к волновому фронту волны, то оптическая ось образца будет находиться в плоскости дифракции и будет перпендикулярна нормали к волновому фронту, а вектор  $\sigma$ поляризации будет перпендикулярен главному сечению (рис.2б). Волна будет вести себя как обыкновенная волна с показателем преломления  $n_0$ . Следовательно, этим двум случаям будут соответствовать разные смещения муаровых полос по отношению к муару, полученному без образца. По разности этих смещений можно наблюдать рентгено-оптическую анизотропию данного образца и оценивать разность  $(n_0 - n_e)$ .



Рис.2. (а) Ось анизотропии перпендикулярна плоскости дифракции, (б) ось анизотропии лежит в плоскости дифракции.

Рассмотрим случай начального ротационного муара. Пусть ось ОУ перпендикулярна плоскости дифракции. В этом случае после третьего блока выражение для интенсивности *I* в каждом из пучков будет:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(ay + b), \qquad (1)$$

где *а* и *b* – постоянные, *y* – значение координаты вдоль оси О*Y*,  $I_1$ ,  $I_2$  – интенсивности интерферирующих пучков после третьего блока интерферометра. Для периода муара из уравнения (1) можно получить

$$\Lambda = 2\pi/\alpha . \tag{2}$$

Если теперь после второго блока на пути одного из интерферирующих пучков поставить однородный плоскопараллельный образец с показателем преломления  $n = 1 - \delta$  (для рентгеновских частот значения декрементов  $\delta > 0$ ), то в формуле (1)  $\cos(ay + b)$  заменится на  $\cos(ay + b - k\delta t)$ , где  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda - д$ лина волны рентгеновского излучения и t – толщина образца. Возникающая разность фаз  $\Delta \Phi = -k\delta t$ , обусловленная присутствием образца, приведет к смещению муаровых полос на величину

$$y_i - y_{ip} = -(\Delta \Phi / 2\pi)\Lambda, \qquad (3)$$

где  $y_{ip}$  – координата *i*-го максимума без образца, а  $y_i$  – с образцом. Если образец рентгено-оптически анизотропный и оптическая ось перпендикулярна плоскости дифракции, то

$$\Delta \Phi_{\rm e} = -k \delta_{\rm e} t \tag{4}$$

с соответствующим смещением

$$y_{ie} - y_{ip} = -(\Delta \Phi_e / 2\pi)\Lambda.$$
<sup>(5)</sup>

Волна в образце в этом случае ведет себя как аномальная. Если оптическая ось

лежит в плоскости дифракции, оставаясь перпендикулярной к нормали волнового фронта, то волна в образце является нормальной, и для возникающей дополнительной разности фаз имеем

$$\Delta \Phi_{\rm o} = -k \delta_{\rm o} t \,, \tag{6}$$

$$y_{io} - y_{ip} = -(\Delta \Phi_o / 2\pi)\Lambda.$$
<sup>(7)</sup>

Сравнивая полученные муары в перечисленных трех вариантах (без образца и с образцом для двух случаев ориентации его оптической оси), можно определить, является ли образец рентгено-оптически анизотропным или нет. Если образец рентгено-оптически анизотропен, то смещения максимумов муаровых полос при разной ориентации предполагаемой оптической оси будут различными. Измеряя смещение максимумов муаровых полос для двух разных ориентаций оптической оси по отношению к максимумам муаровой картины без образца, можно определить значения показателей преломления  $n_0$  и  $n_e$ , а также их разность  $n_0 - n_e$ . Используя этот подход, авторы работы [10] исследовали рентгено-оптическую анизотропию целлофана.

### 3. Результаты эксперимента

В качестве исследуемого образца мы использовали НЖК типа 5CB, который в области оптических частот является одноосной анизотропной средой. Для проведения эксперимента был изготовлен планарный капилляр, состоящий из двух стеклянных прозрачных пластин (подложек) толщиной 150 мкм, расстояние между которыми, с учетом прокладок, составляло 40 мкм. Затем это пространство заполнялось НЖК типа 5CB. Поверхности стеклянных подложек заранее



Рис.3. (а) Молекулы НЖК, имеющие форму стержня длиной 20 Å и шириной 5 Å и (б) схема образца.

очищали и обрабатывали методом натирки, что обеспечивало равномерную планарную ориентацию молекул НЖК. Длинная ось молекул параллельна поверхности подложек, то есть направление директора **n** совпадало с оптической осью (рис.3).

В эксперименте использовался рентгеновский трехблочный LLL интерферометр, изготовленный из бездислокационного кристалла кремния с отражающими плоскостями (110) для МоК<sub>α</sub> излучения, с помощью которого получены муаровые полосы с образцом и без образца.

Сначала от интерферометра получены муары с планарным капилляром без жидкого кристалла (рис.4б), далее – с исследуемым образцом (жидким кристаллом) при двух различных ориентациях оптических осей: перпендикулярной (рис.4а) и параллельной (рис.4в) главному сечению. Сопоставляя полученные муары, наблюдаем смещение муаровых полос.



Рис.4. Муаровые картины: (а) ось анизотропии перпендикулярна плоскости дифракции, показатель преломления  $n_{\rm e}$ , (б) в отсутствие образца, (в) ось анизотропии лежит в плоскости дифракции, показатель преломления  $n_{\rm o}$ .

Для оценки анизотропии жидкого кристалла были получены муаровые картины для трех случаев – без образца (рис.4б) и с образцом для двух ориентаций его оптической оси (рис.4а и 4в). Сравнивая относительное смещение максимумов на каждой из муаровых картин, можно утверждать, что жидкий кристалл является рентгено-оптически анизотропной средой. Левая картина (рис.4а) содержит муар от образца с оптической осью, перпендикулярной плоскости дифракции (муар необыкновенной волны с показателем преломления  $n_e$ ). Правая картина (рис.4в) содержит муаровые полосы обыкновенной волны (оптическая ось жидкого кристалла лежит в плоскости дифракции, показатель преломления  $n_o$ ).

Среднее значение периода муаровых полос равно 750 мкм. Периоды муаровых полос после внесения образцов почти не изменялись, что свидетельствует об однородности используемых образцов. Средняя толщина образца t = 40 мкм. Видно, что муаровые полосы на рис.4а и рис.4в сместились относительно муаровых полос на рис.4б (без образца) вверх на разные величины (например, линия 4). Это означает, что НЖК типа 5CB оптически анизотропен в области рентгеновских частот. На рис.4б линия 1 почти не видна, а на рис.4а муаровые полосы сместились вверх и линия 1 стала просматриваться. На рис.4в муаровые полосы также сместились вверх и в результате линия 1 видна еще лучше. По фотометрическим кривым были измерены расстояния между максимумами с точностью до 10 мкм.



Рис.5. Компьютерные фотометрические кривые муаровых полос, полученные от фотопленок, приведенных на рис.4: (а) муар, полученный от образца, оптическая ось которого перпендикулярна плоскости дифракции (показатель преломления  $n_e$ ); (б) муар без образца; (в) муар, полученный от образца, оптическая ось которого лежит в плоскости дифракции (показатель преломления  $n_o$ ). В каждой картинке за единицу интенсивности принято максимальное значение интенсивности  $I_{max}$  на фотометрической кривой данной картины.

Для муаровых полос, полученных от образца с оптической осю, перпендикулярной плоскости дифракции (фотометрическая кривая на рис.5а), смещение максимумов относительно исходных муаровых полос (фотометрическая кривая на рис.5в) составляло 0.35 мм. Для муаровых полос, соответствующих снимку с оптической осью, лежащей в плоскости дифракции (фотометрическая кривая на рис.5б), смещение составляло 0.57 мм.

С помощью формул (5) и (7) вычислены фазовые смещения  $\Delta \Phi_e$  и  $\Delta \Phi_o$ , равные 2.93 и 4.77, соответственно. Используя формулы (4) и (6), можно определить средние значения декрементов  $\overline{\delta}_e = 8.16 \times 10^{-7}$  и  $\overline{\delta}_o = 1.33 \times 10^{-6}$ . Таким образом,  $\overline{\delta}_o - \overline{\delta}_e = 5.14 \times 10^{-7}$ , а разность средних значений показателей преломления  $\overline{n}_o - \overline{n}_e = -5.14 \times 10^{-7}$ . Следовательно, НЖК типа 5CB является рентгено-оптически положительной одноосной анизотропной средой.

### 4. Заключение

Таким образом, в основе рентгено-интерферометрического способа изучения рентгено-оптических анизотропных свойств материалов лежит определение показателя преломления исследуемого образца, установленного на пути интерферирующих в интерферометре пучков, при различных ориентациях его оптической оси. В зависимости от ориентации оптической оси смещения муаровых полос по отношению к положению этих полос без исследуемого образца различны. Следовательно, измеряя смещение полос для данной ориентации оптической оси образца, можно определить соответствующие показатели преломления  $n_0$  и  $n_e$ . Измерение значений показателей преломления  $n_0$  и  $n_e$  по полученной муаровой картине для НЖК типа 5СВ в области рентгеновских частот (излучение МоК<sub>α</sub>) показало, что  $n_0 - n_e < 0$ , т.е. жидкий кристалл является рентгено-оптически одноосной положительной анизотропной средой.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. М. Борн, Э. Вольф. Основы Оптики. Москва, Наука, 1970.
- 2. Ш. Чжан. Многоволновая дифракция рентгеновских лучей в кристаллах. Москва, Мир, 1984.
- 3. V.E. Dmitrienko. Acta Cryst., A40, 89 (1984).
- 4. V.E. Dmitrienko, K. Ishida, A. Kirfel, E.N. Ovchinnikova. Acta Cryst., A61, 481 (2005).
- 5. Л.Г. Гаспарян, В.П. Мкртчян, М.К. Балян, А.Г. Григорян. Известия НАН РА, Физика, 41, 374 (2006).
- 6. Л.Г. Гаспарян, В.П. Мкртчян, М.К. Балян, А.С. Мелконян. Известия НАН РА, Физика, 42, 242 (2007).
- 7. U. Bonse, M. Hart. Z. Physik, 190, 455 (1966).
- 8. З.Г. Пинскер. Рентгеновская кристаллооптика. Москва, Наука, 1982.
- 9. A. Momose. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., A352, 622 (1995).
- 10. В.П. Мкртчян, Л.Г. Гаспарян, М.К. Балян. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 76(11), 27 (2010).

## ՆԵՄԱՏԻԿ ՀԵՂՈՒԿ ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐԻ ԱՆԻՉՈՏՐՈՊՈՒԹՅԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՀԱՃԱԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՏԻՐՈՒՅԹՈՒՄ

### Լ.Գ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ, Վ.Պ. ՄԿՐՏՉՅԱՆ

Ռենտգենաինտերֆերաչափական եղանակով հետազոտված է 5CB տիպի նեմատիկ հեղուկ բյուրեղների անիզոտրոպությունը։ Որոշված են n<sub>0</sub> և n<sub>0</sub> բեկման ցուցիչները։ Հաստատված է, որ 5CB տիպի նեմատիկ հեղուկ բյուրեղը ռենտգենաօպտիկական անիզոտրոպ դրական միջավայր է։

## INVESTIGATION OF NEMATIC LIQUID CRYSTALS ANISOTROPY IN X-RAY FREQUENCY RANGE L.G. GASPARYAN, V.P. MKRTCHYAN

The anisotropy of 5CB type liquid crystals has been investigated by the X-ray interferometry method. The  $n_0$  and  $n_e$  refractive indices for this specimen were measured. It was found that 5CB type nematic liquid crystal is X-ray optical anisotropic positive medium.