

Вопросы метрологии

УДК 621.372

Исследование диэлектрических свойств жидких кристаллов в миллиметровом диапазоне волн

В. В. Мериакри, И. П. Никитин, Си-Линг Пан, Ру-Пин Пан, М. П. Пархоменко, Е. Е. Чиграй

Предложен и реализован простой и эффективный метод измерения диэлектрических свойств жидких кристаллов в миллиметровом диапазоне волн; метод был применен для измерения характеристик жидких кристаллов 5СВ и 8СВ в диапазоне частот 52–118 ГГц.

Введение. Жидкие кристаллы (ЖК) являются важными объектами как физических, так и прикладных исследований. Они представляют собой комплексные гетерогенные среды, механизмы диэлектрических свойств которых еще недостаточно изучены, несмотря на многочисленные работы, посвященные их экспериментальному исследованию. При взаимодействии с электромагнитными волнами в ЖК, как в комплексных средах, присутствуют и конкурируют дебаевская релаксация с распределением времен релаксации и механизмы, связанные с неоднородной частично-упорядоченной фрактальной структурой ЖК [1]. Для ЖК-образцов существуют адекватные методы измерения их диэлектрических свойств как на низких и высоких частотах в микроволновом диапазоне (до 5 ГГц) [2], так и на частотах выше 400 ГГц, где используется временная диэлектрическая спектроскопия [3]. Однако практически нет работ и экспериментальных данных о диэлектрических свойствах ЖК в миллиметровом (ММ) диапазоне волн (частоты 30–300 ГГц). А эти данные чрезвычайно важны как для понимания механизмов взаимодействия ММ волн с ЖК, особенно вблизи фазовых переходов, так и для практического применения ЖК, например, в фазорращателях, линзах, поляризаторах [4, 5].

В работе описан достаточно простой метод измерения диэлектрических свойств ЖК, который состоит в использовании ячейки, состоящей из двух плоскопараллельных пластин плавленого кварца, между которыми помещается плоский (0,1…1 мм) слой ЖК.

Описание методики. Предложенная методика является развитием описанного в [6] метода измерения диэлектрических свойств сильно поглощающих пленок полупроводника, нанесенного на подложку из высокомного полупроводника. В данном случае измерительная ячейка имеет симметричную форму (рис. 1). Здесь 1 и 2 – пластинки толщиной $h_{1,3}$ и с известным комплексным коэффициентом преломления $n_{1,3}^* = n_{1,3} + ik_{1,3}$, $k_{1,3} \ll n_{1,3}$, между которыми помещен ЖК толщиной h_2 и с искомым $n_2^* = n_2 + ik_2$. Для структуры, изображенной на рис. 1, частотные спектры отражения r и прохождения t в соответствии с [7] описываются следующими выражениями:

$$r(f) = \frac{\left(\frac{1-n_1^*}{1+n_1^*}\right) + r_2(f)e^{2i\frac{2\pi f n_1^* h_3}{c}}}{1 + \left(\frac{1-n_1^*}{1+n_1^*}\right) + r_2(f)e^{-2i\frac{2\pi f n_1^* h_3}{c}}}, \quad (1)$$

$$t(f) = \frac{t_2(f)\left(\frac{2}{1+n_1^*}\right)e^{2i\frac{2\pi f n_1^* h_3}{c}}}{1 + \left(\frac{1-n_1^*}{1+n_1^*}\right)r_2(f)e^{-2i\frac{2\pi f n_1^* h_3}{c}}}, \quad (2)$$

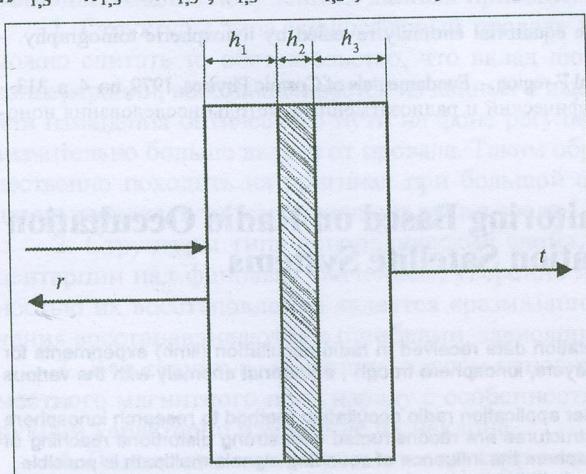


Рис. 1. Геометрия задачи

где

$$t_1(f) = \frac{\left(\frac{2n_2^*}{n_2^* + n_1^*}\right)\left(\frac{2n_1^*}{1+n_1^*}\right)e^{2i\frac{2\pi f n_1^* h_1}{c}}}{1+\left(\frac{n_2^*-n_1^*}{n_2^*+n_1^*}\right)\left(\frac{n_1^*-1}{n_1^*+1}\right)e^{2i\frac{2\pi f n_1^* h_1}{c}}}; \quad t_2(f) = \frac{t_1(f)\left(\frac{2n_1^*}{n_1^*+n_2^*}\right)e^{2i\frac{2\pi f n_2^* h_2}{c}}}{1+\left(\frac{n_1^*-n_2^*}{n_1^*+n_2^*}\right)r_1(f)e^{2i\frac{2\pi f n_2^* h_2}{c}}};$$

$$r_1(f) = \frac{\left(\frac{n_2^*-n_1^*}{n_2^*+n_1^*}\right)+\left(\frac{n_1^*-1}{n_1^*+1}\right)e^{2i\frac{2\pi f n_1^* h_1}{c}}}{1+\left(\frac{n_2^*-n_1^*}{n_2^*+n_1^*}\right)\left(\frac{n_1^*-1}{n_1^*+1}\right)e^{2i\frac{2\pi f n_1^* h_1}{c}}}; \quad r_2(f) = \frac{\left(\frac{n_1^*-n_2^*}{n_1^*+n_2^*}\right)+r_1(f)e^{2i\frac{2\pi f n_2^* h_2}{c}}}{1+\left(\frac{n_1^*-n_2^*}{n_1^*+n_2^*}\right)r_1(f)e^{2i\frac{2\pi f n_2^* h_2}{c}}}.$$

Здесь f – частота; i – мнимая единица; c – скорость света.

На рис. 2 представлена частотная зависимость коэффициента отражения по мощности ($R=20 \log(|r|)$) трехслойной структуры, изображенной на рис. 1, в которой два слоя (первый и третий) представляют собой пластины из плавленого кварца с показателем преломления $n_{1,3}^*=1,95+i \cdot 10^{-4}$, а средний слой – ЖК с показателем преломления $n_2^*=1,610+i \cdot 9,3 \cdot 10^{-4}$, что соответствует параметрам ЖК 5СВ на частоте 59 ГГц.

Толщины слоев равны соответственно $h_{1,3}=1,152$ и $h_2=0,533$ мм. Анализ приведенной частотной зависимости показал, что положение (f_m) и величина (R_m) четных минимумов определяются показателем преломления n_2^* среднего слоя, в то время как положение нечетных минимумов очень слабо зависит от показателя преломления среднего слоя. Физический смысл этого заключается в величине электрического поля E в среднем слое. Рассмотренное явление положено в основу методики определения параметров

жидких кристаллов. Дополнительные возможности повышения точности и достоверности нахождения параметров ЖК возникают при измерении прохождения через кювету на частоте f_m минимума отражения (T_{max}). Так как величина прохождения T_{max} достаточно большая ($-0,2 \dots -0,5$ дБ), влияние мешающих факторов (паразитные интерференции на участке рупор–образец) меньше, чем при измерении величины минимума отражения R_m , когда величина его весьма мала ($-30 \dots -40$ дБ).

На рис. 3 представлена зависимость величины прохождения ($T(f) = 20 \log(|t(f)|)$) от частоты для структуры рис. 1.

Методика измерения. Методика измерения отражения от кюветы реализуется в схеме с рупором, перед которым располагается кювета, а методика измерения прохождения через кювету – в схеме с двумя рупорами, между которыми располагается образец. Для проведения расчетов должны быть известными параметры окон (n_1^* и n_3^*), их толщины h_1 и h_3 , а также толщина ЖК h_2 . Показатель преломления кварца может быть измерен отдельно известными способами. Погрешность измерения толщины составляет ± 5 мкм. Для конкретной трехслойной структуры предварительно рассчитываются калибровочные зависимости в координатах f_m , n_2 и R_m , k_2 (или T_{max} , k_2), и по измеренным значениям f_m и R_m (или T_{max}) определяются n_2 и k_2 . Такие зависимости для первого четного минимума отражения и соответствующего максимума прохождения образца ЖК 5 СВ приведены на рис. 4–6.

Такие же калибровки можно сделать для второго четного минимума отражения (максимума прохождения) и определить n_2 и k_2 на его частоте. По предложенной методике были измерены комплексные коэффициенты преломления ЖК 5СВ и 8СВ в ячейках рис. 1, изготовленные в университете Синьчжу (Тайвань). Эти ЖК представляли собой при комнатной температуре одноосные кристаллы, затем при повышении температуры до T_h (для ЖК 5СВ $T_h = 24^\circ\text{C}$, для 8СВ $T_h = 31,5^\circ\text{C}$) эти вещества переходят в нематическую фазу, а при T_k (для ЖК 5СВ $T_k = 35,3^\circ\text{C}$, для 8СВ $T_k = 40,5^\circ\text{C}$) превращаются в жидкость.

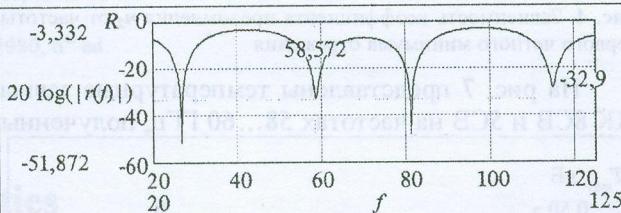


Рис. 2. Зависимость $R(f)$

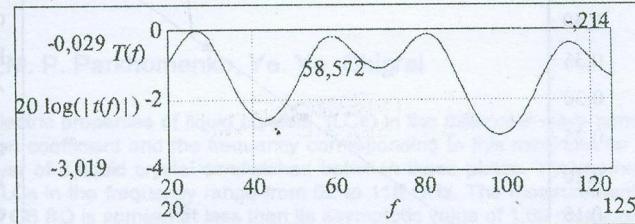


Рис. 3. Зависимость $T(f)$

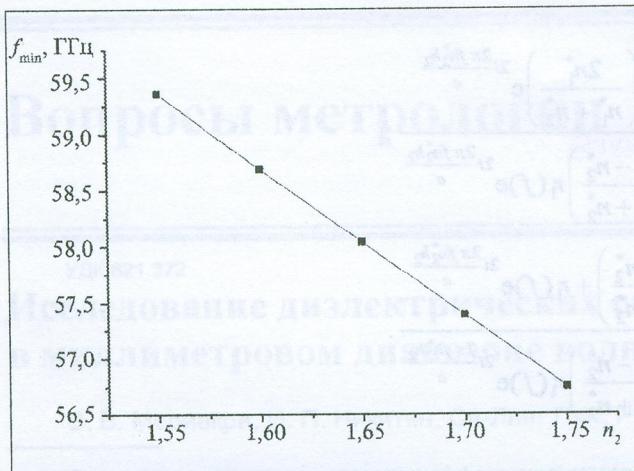


Рис. 4. Зависимость коэффициента преломления n_2 от частоты первого четного минимума отражения

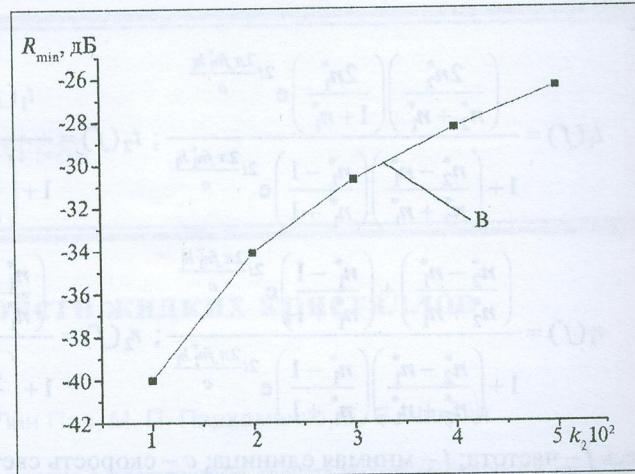


Рис. 5. Зависимость мнимой части k_2 коэффициента преломления от первого четного минимума отражения

На рис. 7 представлены температурные зависимости n_2 обыкновенной и необыкновенной волн для ЖК 8СВ и 5СВ на частотах 58...60 ГГц, полученные на основании зависимостей рис. 3 и 4. Для нахождения k_2 были использованы рис. 5 и 6

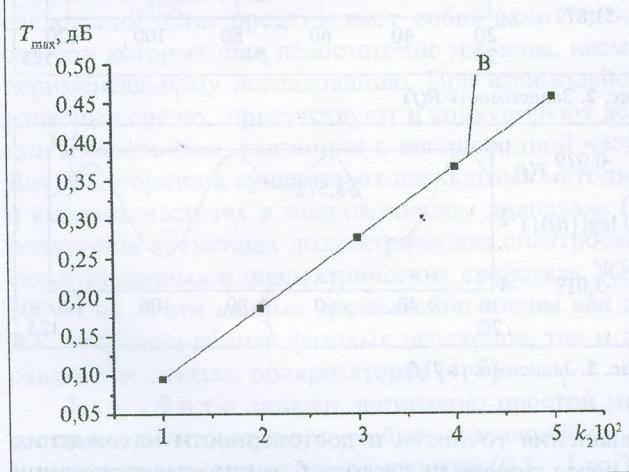


Рис. 6. Зависимость мнимой части k_2 коэффициента преломления от коэффициента пропускания ячейки

Значения мнимой части k_2 комплексного коэффициента преломления для обеих поляризаций в пределах точности измерений (порядка 0,002) было одинаковым, практически не зависели от температуры и на частоте 59 ГГц составили 0,010–0,015 для ЖК 5СВ и 0,040–0,045 для ЖК 8СВ.

ЖК 5СВ исследовался в [2, 3]. Сравнение данных показывает, что приведенные на рис. 7, б значения действительной части комплексного коэффициента преломления для ЖК 5СВ несколько меньше асимптотического значения 1,69, измеренного на частоте 5 ГГц [2] и близко к измеренному в [3] значению 1,65 на частоте 250 ГГц для 5СВ, содержащего 0,6% объемных частиц кварца размером 10 мкм. Что касается значения k_2 , то данные, приведенные в [2, 3], на частотах 0,65 и 250 ГГц в 3–4 раза больше полученных авторами. Это указывает на

возможность существования дополнительной области дисперсии в диапазоне частот 5...200 ГГц.

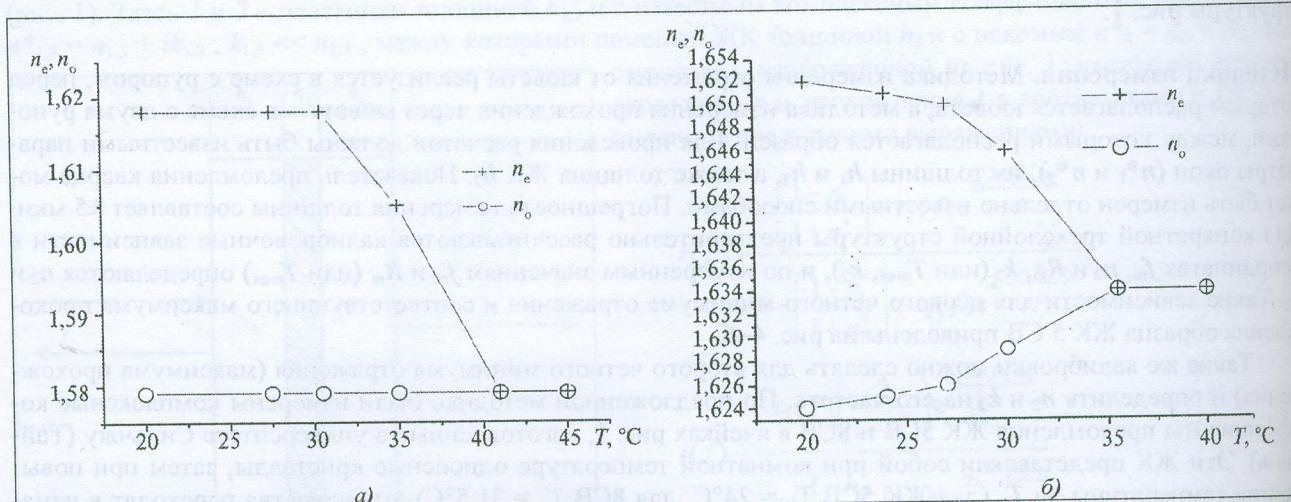


Рис. 7. Температурные зависимости n_e и n_o : а – ЖК 8СВ; б – ЖК 5СВ

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ–Тайвань № 06-02-89515.

Авторы признателны В. Н. Аппеталину, Р. Н. Денисюку и Н. А. Федосееву за полезные обсуждения и помощь в работе.

Литература

1. Gennes, P. G., de, and Prost, J., *The Physics of Liquid Crystals*. – London: Oxford Univ. Press, 1993.
2. Беляев Б. А., Дрожжин Н. А., Шабанов В. Ф. Температурные исследования диэлектрических характеристик жидкого кристалла 5 СВ в области релаксации. – Физика твердого тела, 2005, т. 4, № 4, с. 738–741.
3. Oh-e, M., Yokoyama, H., Kolberg, M. et al. High Frequency Dielectric Relaxation of Liquid Crystals: THz Time-domain Spectroscopy of Liquid Crystal Colloids. – Optics Express, 2006, vol. 14, no. 23.
4. Zhang, X. C., Jin, Y., and Ma, X. F., Coherent Measurement of THz Optical Rectification from Electro-optic Crystals. – Appl. Phys. Lett., 1992, vol. 61, pp. 2764–2766.
5. Jue de, W. H. *Physical Properties of Liquid Crystalline Materials*. – New York: Gordon & Breach, 1980.
6. Любченко В. Е., Мериакри В. В., Чиграй Е. Е. Методика измерения параметров тонких полупроводниковых пленок на подложках из высокоменного полупроводника с помощью миллиметровых волн. – Электромагнитные волны и электронные системы, 2006, т. 11, № 1, с. 63–65.
7. Born, M. and Wolf, E., *Principle of Optics*. – Oxford: Pergamon, 1980, 6th ed.

Поступила 18 сентября 2007 г.

The Investigation of Dielectric Properties of Liquid Crystals in Millimeter Waveband

V. V. Meriakri, I. P. Nikitin, Si-Ling Pan, Ru-Pin Pan, M. P. Parkhomenko, Ye. Ye. Chigrai

A simple and efficient method is proposed for measuring the dielectric properties of liquid crystals (LCs) in the millimeter-wave band. This method is based on measuring the minimum of the reflection coefficient and the frequency corresponding to this minimum for a structure consisting of two plane-parallel quartz plates and a layer of a liquid crystal sandwiched between these plates. The method was applied to measuring the characteristics of 5 CB and 8 CB LCs in the frequency range from 52 to 118 GHz. The measurements have shown that the real part of the complex refractive index of 5 CB SQ is somewhat less than its asymptotic value of 1.69 measured at frequency of 5 GHz and is close to the value of 1.65, which was measured at frequency of 250 GHz. As regards the imaginary part of the refractive index, the results obtained at frequencies of 0.65 and 250 GHz are greater than those obtained in our experiments by a factor of 3–4. We also measured the temperature dependence of the birefringence of both LCs.

Внимание!

В Издательстве «Радиотехника» вышла в свет книга

Обнаружение наземных объектов. Радиолокационные системы обнаружения и наведения воздушного базирования.

Автор В.С. Верба

Данная монография – первая книга из серии «Системы мониторинга воздушного, космического пространства и земной поверхности» – посвящена анализу современного состояния и развитию отечественных и зарубежных радиолокационных систем воздушного базирования; содержит результаты многолетних теоретических и экспериментальных исследований автора, посвященных различным аспектам изучения и разработки бортовых локационных систем.

Предназначена для специалистов в области радиолокации, а также аспирантов и студентов старших курсов высших учебных заведений радиотехнического профиля.

По вопросам заказа и приобретения книги обращаться в Издательство «Радиотехника» по адресу:

107031, г.Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6,
тел./факс: (495) 625-78-72, 621-48-37, 625-92-41
<http://www.radiotec.ru>, e-mail:info@radiotec.ru