

УДК 621.317.737

М.П. Кухтин<sup>1</sup>, А.И. Кочержин<sup>2</sup>, Л.Н. Лисецкий<sup>2</sup>, Э.И. Черняков<sup>1</sup><sup>1</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина<sup>2</sup>Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина

## ИЗМЕРЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ НА СВЧ МЕТОДОМ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Рассматриваются вопросы определения анизотропии диэлектрической проницаемости нематических жидких кристаллов (НЖК) по измерению малых изменений резонансной частоты и добротности СВЧ резонатора, нагруженного НЖК, методом частотной модуляции. Данный метод основан на анализе спектра огибающей сигнала с резонатора при модуляции питающего генератора по гармоническому закону с девиацией частоты порядка полосы пропускания резонатора. Приводятся результаты измерений анизотропии диэлектрической проницаемости НЖК класса 5-СВ с помощью цилиндрического резонатора 3-см диапазона с колебаниями  $E_{101}$  от постоянного магнитного поля.

**Ключевые слова:** анизотропия диэлектрической проницаемости, нематический жидкий кристалл, СВЧ-резонатор, частотная модуляция, магнитное поле.

### Введение

Известно, что диэлектрическая проницаемость нематических жидких кристаллов (НЖК) может изменяться между двумя экстремальными значениями, соответствующими ориентации молекул параллельно либо перпендикулярно внешнему полю. Такая анизотропия  $\Delta\epsilon_r = \epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}$  связана с переориентацией длинных полярных молекул под действием внешних электрических и магнитных полей [1]. Соответственно в оптическом диапазоне наблюдается двойное лучепреломление ( $\Delta n = n_{||} - n_{\perp}$ ), широко используемое в LC-дисплеях. К сожалению, явление диэлектрической анизотропии для применения в перестраиваемых СВЧ устройствах до настоящего времени слабо изучено.

Так в работах [2 – 4] описываются первые перестраиваемые СВЧ варакторы, фильтры, фазовращатели, которые могут служить компонентами антенных фазированных решеток. Было отмечено, что изменение диэлектрической проницаемости  $\Delta\epsilon_r$  при изменении напряженности внешнего поля используется для изменения фазы, которое может составлять до 12<sup>0</sup>/дБ. Для известных ЖК (с анизотропией  $\Delta\epsilon_r \geq 0.2$ ) такой фазовый сдвиг может достигать 50<sup>0</sup>/дБ. Аналогичные результаты наблюдались и в случае волноводной структуры, заполненной НЖК [5]. Так на частотах 22-40 ГГц одномодовый волновод, заполненный по поперечному сечению ( $7.2 \times 3.4 \text{ мм}^2$ ) трех-миллиметровым слоем НЖК 5-СВ, обеспечивал фазовый сдвиг до 60<sup>0</sup> при приложении постоянного магнитного поля 4500 Э.

Одним из основных параметров ЖК, определяющих структуру его молекул, а, следовательно, и

его электрофизические характеристики, являются диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  и тангенс угла потерь  $\text{tg}\delta$ . Знание частотных зависимостей компонент  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  могут характеризовать структуру молекул ЖК и его межмолекулярные взаимодействия, а также может быть использовано при расчетах ВЧ и СВЧ устройств с ЖК. Измерение  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  НЖК на СВЧ основано на определении добротности  $Q$  и резонансной частоты  $f_{\text{рез}}$  микроволнового резонатора. Способы измерения данных параметров достаточно подробно рассмотрены в [6, 7]. Для измерения малых сдвигов  $f_{\text{рез}}$  и  $Q$  наиболее предпочтительным является метод частотной модуляции, при котором определение данных параметров сводится к оценке спектрального состава огибающей модулированного сигнала, прошедшего через СВЧ резонатор, нагруженного исследуемым НЖК. Данный метод позволяет существенно повысить разрешающую способность резонатора и тем самым расширить возможности оценки степени анизотропии ЖК на СВЧ.

**Целью данной работы** является исследование диэлектрической анизотропии НЖК в 3-см диапазоне методом частотной модуляции

### Результаты испытаний

В данной работе исследовался нематический ЖК класса 5СВ-, типичный представитель НЖК класса цианобифенилов ( $\epsilon_{||} = 19.9, \epsilon_{\perp} = 6.9, \Delta\epsilon = 13$  на частоте 1 МГц). Здесь использованы обозначения:  $\epsilon_{||}, \sigma_{||}$  – диэлектрическая проницаемость и проводимость ЖК в направлении преимущественной ориентации продольных осей молекул (в направлении директора),  $\epsilon_{\perp}, \sigma_{\perp}$  – в направлении, перпендикулярном директору,  $\Delta\epsilon = \epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}$  и  $\Delta\sigma = \sigma_{||} - \sigma_{\perp}$  (либо

$\sigma_{\parallel} / \sigma_{\perp}$ ) – мера анизотропии диэлектрической проницаемости и электропроводности.

При измерениях диэлектрической проницаемости в сантиметровом диапазоне волн наиболее эффективным является резонаторный метод, использующий цилиндрический резонатор, нагруженный жидким кристаллом (рис. 1). В работе применялся цилиндрический резонатор, возбуждаемый на колебаниях типа  $E_{010}$ . Диаметр резонатора  $2a = 22.3$  мм, длина  $L = 13$  мм. Кварцевый капилляр, заполненный исследуемым ЖК, располагался строго по оси резонатора по всей его длине. Наружный диаметр капилляра 0.5 мм, внутренний – 0.21 мм. Измерения резонансной частоты и добротности резонатора, включенного в волноводный тракт на проход, осуществлялись методом частотной модуляции.

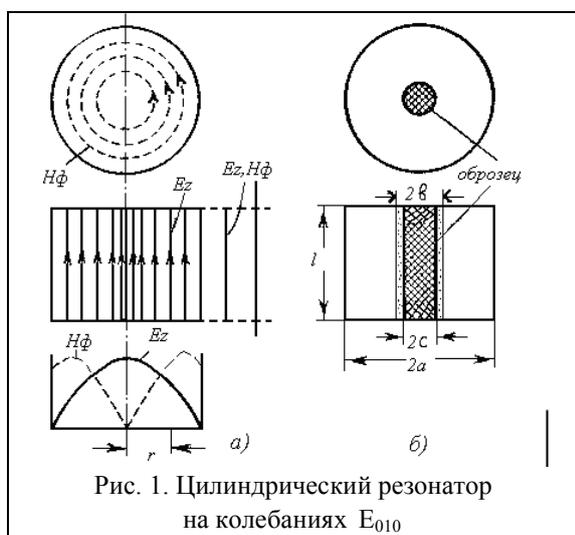


Рис. 1. Цилиндрический резонатор на колебаниях  $E_{010}$

Постоянное магнитное поле, прикладываемое параллельно и перпендикулярно оси капилляра, составляло 0.128 Тл. Расчет  $\epsilon$  исследуемого ЖК проводился методами возмущений и частичных областей (ЧО) с использованием программного пакета MathCad [5]. Функциональная схема измерительной установки приведена на рис. 2.

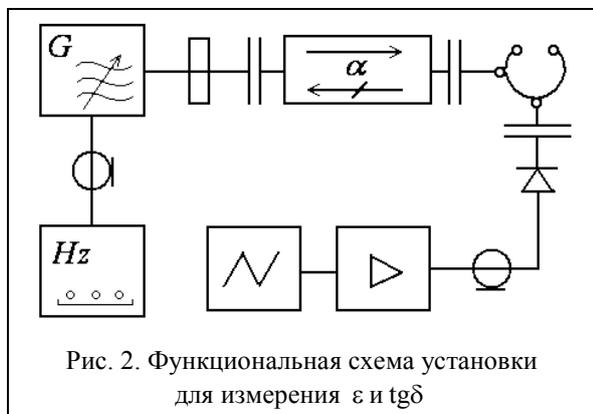


Рис. 2. Функциональная схема установки для измерения  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$

В измерительной установке перестраиваемый по частоте СВЧ генератор Г4-56 имеет встроенный калиброванный аттенюатор и два выхода. Один из

выходов подключен к измерительному резонатору, другой ко входу электронного частотомера ЧЗ-54 А. СВЧ сигнал, прошедший через резонатор, детектируется и подается на цифровой осциллограф DS1204В фирмы Rigol. СВЧ сигнал модулируется по частоте. Форма огибающей сигнала, прошедшего через резонатор, зависит от смещения резонансной частоты относительно средней частоты частотно-модулированного сигнала, его девиации и добротности. Было использовано обратное преобразование Фурье и построены семейства графиков, позволяющих определить изменение резонансной частоты и добротности по измеренным амплитудам первых гармоник модулирующей частоты. Определение изменений резонансной частоты, а следовательно, и изменений диэлектрической проницаемости, производилось по построенным зависимостям амплитуд первых двух гармоник от приведенных значений смещения и девиации.

Основными факторами, влияющими на погрешность проводимых измерений, является нестабильность измерительного генератора, нелинейность его частотной развертки, погрешность в определении амплитуд гармонических составляющих сигнала, флуктуации и переходные процессы в элементах измерительной схемы и управляющих цепях. Исходя из того, что значения частоты модуляции не превышают нескольких кГц, следует, что нестабильность частоты измерительного генератора за время проведения одного измерения должна быть не хуже  $10^{-8}$ .

Погрешность в определении спектральных составляющих сигнала может быть существенно снижена при преобразовании их в цифровой сигнал с использованием цифрового осциллографа DS1204В.

Влияние флуктуационных процессов снижается за счет проведения серии экспериментов и усреднения полученных результатов. Использование относительно медленной, по сравнению с временем переходных процессов частотной развертки позволяет уменьшить влияние последних. Результаты измерений диэлектрической проницаемости НЖК на частоте 10 ГГц приведены в таблице.

### Интерпретация результатов испытаний

Теоретически рассчитанная зависимость резонансной частоты  $f_p$  и  $Q$  имеет удовлетворительное (в пределах 10%) расхождение с экспериментальными данными. Величина  $\epsilon$  составила 3.37;  $\text{tg}\delta = 7.3 \cdot 10^{-4}$ . При приложении постоянного магнитного поля вдоль оси капилляра наблюдался уход резонансной частоты на 0.4 МГц. При этом происходит переориентация доменов и увеличение анизотропии диэлектрической проницаемости до  $\Delta\epsilon = 0.49$ . Значение диэлектрической проницаемости при этом значительно ниже, чем на частоте  $f=10^6$  Гц.

Это обусловлено возрастанием потерь в диапазоне ГГц, связанное с вязкостью ЖК.

Таблица

Результаты измерений диэлектрической проницаемости НЖК на 10 ГГц

Резонатор, $E_{010}$	$f_{рез}$ , МГц	Q	Метод ЧО, $\epsilon$	Метод возмущений	
				$\epsilon$	$tg\delta$
Резонатор с капилляром без НЖК	10270.2	832			
Капилляр с НЖК, магнитное поле отсутствует	10264.5	528	3.60	3.37	
Капилляр с НЖК, магнитное поле перпендикулярно оси капилляра	10263.9	318	3.25	3.15	0.0047
Капилляр с НЖК, магнитное поле параллельно оси капилляра	10264.9	474	3.71	3.70	0.0026

Представленный подход может быть распространен на ЖК-системы других типов, в частности, сегнетоэлектрические ЖК (смектики-С), а также ЖК с диспергированными в них микро- и наночастицами (нанотрубки, кристаллические сегнетоэлектрики, ферромагнетики и т.д.).

### Заключение

Проведены измерения дисперсионных характеристик  $\epsilon$ ,  $tg\delta$  СВЧ резонаторов с ЖК на частоте  $f = 10$  ГГц, даны оценки степени анизотропии ЖК, связанные с ориентационными эффектами. Измерения показали существенное изменение электродинамических свойств ЖК в зависимости от величины магнитного поля. Ход зависимостей качественно совпадает с аналогичными зависимостями, полученными по стандартным методикам.

Представленный подход может быть распространен на ЖК других типов, в частности, сегнетоэлектрики, смектики, а также ЖК с диспергированными в них микро- и наночастицами (нанотрубки, кристаллические сегнетоэлектрики, ферромагнетики и т.д.).

Таким образом, предлагаемый метод измерения резонансной частоты и добротности позволяет расширить границы области определения степени анизотропии диэлектрической проницаемости вещества и повысить точность измерений.

### ВИМІРЮВАННЯ АНІЗОТРОПІЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ РІДКИХ КРИСТАЛІВ НА НВЧ МЕТОДОМ ЧАСТОТНОЇ МОДУЛЯЦІЇ

М.П. Кухтін, А.І. Кочержин, Л.Н. Лісецький, Э.І. Черняков

Розглядається спосіб визначення анізотропії діелектричної проникності нематичних рідких кристалів (НРК) по вимірюванню малих змін резонансної частоти та добротності НВЧ резонатора навантаженого НРК, методом частотної модуляції. Метод заснований на аналізі спектра огибающей сигналу з резонатора при частотній модуляції генератора по гармонічному закону з девіацією частоти порядку половини пропускання резонатора. Наведені результати вимірювання анізотропії діелектричної проникності НРК класу 5-СВ за допомогою циліндричного резонатора 3-см діапазону з коливаннями  $E_{101}$  від постійного магнітного поля.

**Ключові слова:** анізотропія діелектричної проникності, нематичний рідкий кристал, НВЧ-резонатор, частотна модуляція, магнітне поле.

### MEASUREMENT OF ANISOTROPY OF DIELECTRIC PERMITTIVITY OF LIQUID CRYSTALS ON SHF BY FREQUENCY MODULATION METHOD

M.P. Kukhtin, A.I. Cocherzin, L.N. Lisetski, E.I. Chernyakov

Method for determination of nematic liquid crystals (NLC) anisotropy dielectric permittivity is reviewed in this article. Determination of this value is accessed by measuring small changes in resonance frequency and Q-factor of SHF cavity loaded with NLC with applied frequency modulation. This method is based on analysis of envelope signal spectrum obtained from cavity under frequency modulation. Frequency modulation of feeding generator is provided according to harmonic law with frequency deviation of the same order of magnitude as cavity transmission band. Results provided for anisotropy measurements of nematic liquid crystals (NLC class 5-CB) by means of cylindrical cavity with 3 cm range and  $E_{101}$  oscillations.

**Keywords:** anisotropy of dielectric permittivity, nematic liquid crystal, SHF-cavity, frequency modulation

### Список литературы

1. Гребенкин, М.Ф. Жидкокристаллические материалы [Текст] / М.Ф. Гребенкин, А.В. Иващенко. – М.: Химия, 1989. – 287 с.
2. Yeh, J.A. Microwave characteristics of liquid crystal tunable capacitors [Text] / J.A.Yeh, C.A.Chang, C.C.Cheng, J.-Y.Huang, S.S.H.Hsu // *Electron.Device Lett.* – 2005. – Vol. 26, No.7. – P. 451-453.
3. Dubois, F. Large microwave birefringence liquid crystal characterization for phase-shifter applications [Text] / F.Dubois, F.Krasinski, B.Splingart, N.Tentillier, C.Legrand, A.Spadlo, R.Dabrowski // *Jap.J.Appl.Phys.* – 2008. – Vol. 47, No. 11. – P. 3564-3567.
4. Kamei, T. Measurements of the dielectric properties of nematic liquid crystals at 10 kHz, to 40 GHz and application to a variable delay line [Text] / T. Kamei, Y. Utsumi, H. Moritake, K. Toda // *Electron. Commun. Jpn.* – 2003. – Pt. 2, vol. 86. – P. 452-457.
5. Брандт, А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах [Текст] / А.А. Брандт. – М.: Физматгиз, 1963. – 376 с.
6. Менде, Ф.Ф. Сверхпроводящие охлаждаемые резонансные системы [Текст] / Ф.Ф. Менде, И.Н. Бондаренко, А.В. Трубицин. – К.: Наук.думка, 1976. – 272 с.
7. Хайки, М.С. Метод частотной модуляции для исследования поверхностного сопротивления металлов [Текст] / М.С. Хайки // ПТЭ. – 1961. – № 3. – С. 95-99.

Поступила в редакцию 17.08.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.П. Мачехин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.