$$K_\mu = -\frac{1}{2} - \frac{1}{\delta_\mu} + \frac{1}{2\delta_\mu}\ln\delta_\mu + \frac{3\pi}{4\delta_\mu^{3/2}} + \left(\frac{29}{6} - \ln\delta_\mu\right)\chi_\mu^2 =$$

$$= -0{,}50 - 3{,}45\chi_\mu^2 + O(\chi_\mu^4). \qquad (3)$$

Для электрона при $\chi_e \ll 35{,}26$ (в этом случае $x \gg 1$):

$$K_e = -0{,}17 - 1{,}35\cdot 10^{-4}\chi_e^2 + O(\chi_e^4). \qquad (4)$$

В работе [2] на основе расчета $K_f(\chi_f=0)$ были оценены верхние границы для констант α_f: $\alpha_e < 1{,}6\cdot 10^{-8}$; $\alpha_\mu < 1\cdot 10^{-7}$ (использовалось максимальное расхождение между теорией и экспериментом: $\Delta a_e < 3\cdot 10^{-10}$, $\Delta a_\mu < 9\cdot 10^{-9}$).

В случае $\chi_\mu \gg 1$, $\chi_e \gg \delta_e^{-3/2} = 35{,}26$ получаем

$$K_f = -\frac{5\pi}{9\sqrt{3}}\Gamma(1/3)(3\chi_f)^{-2/3} + O(\chi_f^{-4/3}); \quad a_\varphi = -0{,}21\alpha_f\chi_f^{-2/3}. \qquad (5)$$

Для оценок использовано значение массы $m_\varphi = 1{,}68$ МэВ [2].

При $\chi_\mu = 10^2$ с хорошей степенью точности можно пользоваться асимптотической формулой (5). Тогда вклад в мюонный g-фактор $a_\varphi \lesssim 9{,}8\cdot 10^{-10}$, что, однако, более чем на порядок меньше Δa_μ. Отметим, что вклад псевдоскалярного бозона в АММ лептона сравним с вкладом за счет слабых взаимодействий [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Clemente M. et al.//Phys. Lett. 1984. **137B**. P. 41. [2] Shafer A., Reinhardt J. et al.//J. Phys. G. 1985. **11**. P. L69; Balantekin A. B. et al.//Phys. Rev. Lett. 1985. **55**. P. 461. [3] Donnelly W., Fredman S. J. et al.//Phys. Rev. 1978. **D18**. P. 1607; Barroso A., Branco G. C.//Phys. Lett. 1982. **116B**. P. 247. [4] CERN Cour. 1987. 27, N 5. P. 17. [5] Соколов А. А., Тернов И. М. Релятивистский электрон. М., 1983. [6] Ритус В. И.//Тр. ФИАН СССР. М., 1979. Т. 111. [7] Fujikawa K., Lee B. W., Sanda A. I.//Phys. Rev. 1972. **D6**. P. 2923.

Поступила в редакцию
18.02.88

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1988. Т. 29, № 5

РАДИОФИЗИКА

УДК 537.226.3

НЕЛИНЕЙНОСТЬ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 1÷33 МГц

Ф. В. Булыгин

(кафедра молекулярной физики и физических измерений)

Измерена нелинейность диэлектрической проницаемости α нематических жидких кристаллов в ВЧ-диапазоне частот 1÷33 МГц: $\alpha = 1{,}5\cdot 10^{-3}$ см³/эрг. Определены зависимости величины α и $\mathrm{tg}\,\delta$ от частоты, а также зависимости α и ε от температуры.

Одним из направлений работ по реализации квантовых невозмущающих измерений энергии в ВЧ- и СВЧ-диапазонах частот является поиск вещества, обладающего большой квадратичной нелинейностью α диэлектрической проницаемости и малыми потерями [1].

Величина α характеризует зависимость диэлектрической проницаемости ε от квадрата напряженности электрического поля E:

$$\varepsilon = \varepsilon_0(1 + \alpha E^2) \qquad (1)$$

и связана с нелинейной кубичной восприимчивостью χ_3 следующим образом:

$$\alpha = 4\pi\chi_3/\varepsilon_0. \qquad (2)$$

Величина χ_3 связана со структурой вещества и в общем случае является функцией трех частот, значения которых определяются условиями эксперимента.

В настоящее время из всех исследованных веществ жидкие кристаллы (ЖК) обладают наибольшей величиной α. Так, например, в работе [2] теоретически предсказана и экспериментально получена величина α нематического ЖК (НЖК) в мезофазе: $\alpha \simeq 1{,}1 \cdot 10^{-2}$ см^3/эрг на длине волны $\lambda \simeq 630$ нм. Эта величина почти на девять порядков превышает нелинейность такой известной керровской жидкости, как сероуглерод.

Исследования нелинейности α ЖК, а также ε и $\operatorname{tg}\delta$ в широких температурных интервалах и частотных диапазонах могут дать ценную информацию о структуре молекул исследуемого ЖК и межмолекулярных взаимодействиях. Температурные зависимости электрических характеристик ЖК, по всей вероятности, могут дать ту же информацию, что и криометрические измерения. Несмотря на то что подобные измерения имеют большое практическое значение, они проводятся несистематически [3]. Кроме того, данные о нелинейности α большинства веществ, в том числе и ЖК, в настоящее время отсутствуют.

Целью данной работы было измерение величин α и $\operatorname{tg}\delta$ ЖК в диапазоне частот $1 \div 33$ МГц в температурном интервале $20 \div 60°$ С. Исследовались нематические ЖК, представляющие собой смесь 80% МББА и 20% ЭББА. Температурный интервал мезоморфности для данной смеси составлял $10 \div 51°$ С [4]. Анизотропия поляризуемости данной смеси отрицательная, поэтому для удобства работы в измерительной ячейке была создана начальная гомеотропная ориентация ЖК. При этом внешнее электрическое поле стремится ориентировать ЖК планарно.

Данный ЖК является оптически одноосным кристаллом. Его оптическая ось направлена вдоль директора. Если положить ось z декартовой системы координат, направленной вдоль директора, то при гомеотропной ориентации ЖК ось z будет совпадать с направлением электрического поля и будет измеряться компонента тензора диэлектрической проницаемости ε_{zz}. После переориентации директора под действием внешнего электрического поля ось z становится перпендикулярной направлению поля и измеряется компонента тензора $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}$.

Нелинейность α определялась по изменению ΔC средней емкости конденсатора, заполненного ЖК, при изменении амплитуды электрического поля. При измерениях на частоте 1 МГц величина ΔC и $\operatorname{tg}\delta$ фиксировалась с помощью измерителя емкости Е7-12. При измерениях на других частотах измерительный конденсатор был включен в колебательный контур, который мог иметь резонансные частоты 2,4, 15 и 33 МГц. В этом случае фиксировалось изменение резонансной частоты контура Δf при изменении амплитуды электрического поля (величина поля в ячейке не превышала $4 \cdot 10^5$ В/м). Из величины Δf несложно получить ΔC.

Погрешности измерений складываются из погрешностей определения резонансной частоты контура и параметров установки. Основную роль играют погрешности определения параметров измерительной ячейки. Погрешность определения α не превышала 20%. Величина $\operatorname{tg}\delta$ определялась из добротности контура. Погрешность $\operatorname{tg}\delta$ определялась собственной добротностью контура и не превышала 10%.

Измерительная ячейка представляла собой отрезок стеклянной трубки, в который помещались латунные полированные электроды. Полировка поверхности электродов осуществлялась во взаимно перпендикулярных направлениях для того, чтобы микрорельеф поверхности был одинаков в обоих направлениях. При этом молекулы имели тенденцию ориентироваться гомеотропно [5]. Зазор между электродами формировался с помощью кварцевых нитей и составлял 25 мкм. Емкость пустой ячейки составляла 4 пФ.

Одним из основных эффектов, имитирующих квадратичную диэлектрическую нелинейность, является эффект притяжения электродов за счет пондеромоторных сил. Эквивалентная величина α, вызванная пондеромоторным эффектом, для данной ячейки не превышала $1 \cdot 10^{-10}$ см^3/эрг.

Для проведения измерений при различных температурах измерительная ячейка помещалась в специально изготовленный термостат. Температура ячейки в термостате могла принимать значение от 20 до 60° С с погрешностью $\pm 0{,}1°$.

В результате измерений впервые была получена величина α НЖК в ВЧ диапазоне частот: $\alpha \simeq 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ см³/эрг. Величина tg δ составляла 0,02. Расхождение с величиной α, полученной в работе [2], может быть объяснено различием типов НЖК,

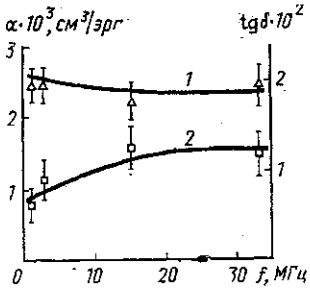

Рис. 1. Зависимость tg δ (*1*) и α (*2*) от частоты

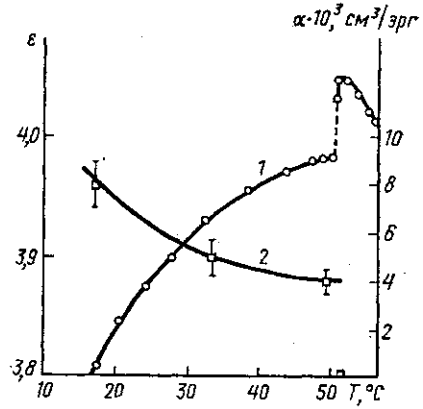

Рис. 2. Зависимость ε (*1*) и α (*2*) от температуры ($f=1$ МГц)

а также зависимостью α от величины зазора [2] (в работе [2] величина зазора составляла 60 мкм).

Зависимость α и tg δ от частоты при $T=20°$ С приведена на рис. 1. Зависимость tg δ от частоты незначительна. Это может быть объяснено тем, что данный диапазон частот лежит далеко от линий поглощения ЖК, находящихся, как правило, в ИК диапазоне [6].

Получена зависимость α от температуры на частоте 1 МГц (рис. 2). Значение α уменьшается с ростом температуры. В изотропной фазе $\alpha=2 \cdot 10^{-7}$ см³/эрг. На этом же рисунке приведена зависимость ε от температуры. Измерения проводились на частоте 1 МГц. При переходе из мезофазы в изотропную фазу наблюдается скачок ε. Зависимости ε от напряжения смещения при различных температурах на частоте 1 МГц приведены на рис. 3.

Таким образом, проведенные исследования показали, что величина квадратичной нелинейности α НЖК намного превосходит величину нелинейности всех веществ, данные по которым имеются в литературе, для ВЧ-диапазона частот.

Автор пользуется случаем выразить благодарность В. Б. Брагинскому и В. В. Колесову за ценные советы и практическую помощь.

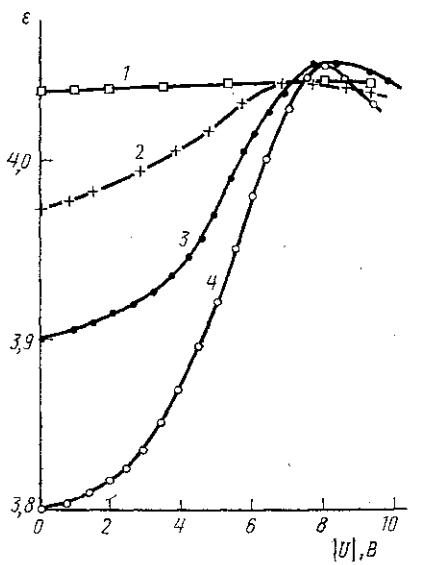

Рис. 3. Зависимость ε от $|U|$ при $T=52$ (*1*), 49 (*2*), 33 (*3*) и 18°С (*4*)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Брагинский В. Б., Вятчанин С. П.//ДАН СССР. 1982. **264**. С. 1136. [2] Зельдович Б. Я., Пилипецкий Н. Ф., Сухов А. В., Табирян Н. В.// //Письма в ЖЭТФ. 1981. **31**. С. 287. [3] Жидкие кристаллы/Под ред. С. И. Жданова. М., 1979. С. 85. [4] Капустин А. П. Экспериментальные исследования жидких кристаллов. М., 1978. С. 85. [5] Чандрасекар С. Жидкие кристаллы. М., 1980. [6] Либов В. С., Перова Т. С.//Оптика жидких кристаллов. Тр. ГОИ. Л., 1986. **60**. С. 19.

Поступила в редакцию
28.10.87