

КОГЕРЕНТНАЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЙ КАПЛИ

С.Ф. Распопов, А.Т. Суходольский

УДК 535

Для исследования капиллярных колебаний капли предлагается использовать возбуждение в переменном электрическом поле с последующим зондированием когерентных колебаний с помощью оптического излучения. Показано, что в однородном поле возбуждается только основная мода с $l = 2$.

Ранее была показана возможность исследования капиллярных колебаний капли при возбуждении амплитудно-модулированным лазерным излучением [1]. В данном сообщении предлагается новый вариант когерентной активной спектроскопии [2], в котором капля возбуждается за счет электрострикционных сил в переменном электрическом поле с последующим зондированием вынужденных колебаний оптическим излучением.

Рассмотрим капиллярные колебания основного тона с $l = 2$ и $m = 0$, для которых координаты точек на поверхности капли не зависят от азимутального угла, а возмущение поверхности описывается выражением

$$R = R_0 + Q(t) (3 \cos 2\Theta + 1)/4,$$

где R_0 — радиус невозмущенной капли; $Q(t)$ — амплитуда парциального колебания [3]. Гамильтониан "возмущенной" капли имеет вид:

$$H = 2\gamma(Q^2 + \dot{Q}^2/\Omega^2). \quad (1)$$

Здесь γ — коэффициент поверхностного натяжения; Ω — частота колебаний, определяемая из соотношения

$$\Omega^2 = 8\gamma/\rho R_0^3, \quad (2)$$

где ρ — плотность жидкости.

Для рассмотрения движения поверхности капли в однородном электрическом поле с вектором $\vec{E}_0(t)$, направленным вдоль оси z , применим формализм Гамильтона, в котором роль обобщенной координаты играет амплитуда парциального колебания $Q(t)$. Для нахождения обобщенной силы

$\Phi(t)$ определим распределение зарядов и напряженности поля на поверхности металлической сферы. Воспользовавшись методами электростатики [4], можно показать, что распределения поверхностной плотности наведенных зарядов $\sigma(\Theta)$ и нормальной составляющей электрического поля описываются выражениями:

$$\sigma(\Theta) = (3E_0/4\pi)\cos \Theta, \quad E_r(\Theta) = 3E_0 \cos \Theta,$$

а сила dF , действующая на элемент поверхности dS , равна

$$dF = (9/4\pi)E_0^2 R_0^2 \cos^2 \Theta \sin \Theta d\Theta d\varphi. \quad (3)$$

Если под действием этих сил поверхность капли виртуально смещается на величину δQ , то работа сил dF , распределенных по поверхности, должна равняться виртуальной работе обобщенной силы

$$\delta A = \delta Q \Phi = \int dF \delta l(\Theta), \quad (4)$$

где $\delta l(\Theta) = R(\Theta) - R_0$. Из (4) после подстановки (3) и интегрирования следует

$$\Phi = (6/5)E_0^2 R_0^2. \quad (5)$$

Теперь можно записать уравнение движения поверхности капли в переменном электрическом поле $E_0(t) = \mathcal{E} \sin \omega t$, если воспользоваться выражениями (1) и (5) с учетом (2):

$$\ddot{Q} + 2\Gamma\dot{Q} + \Omega^2 Q \approx -(\mathcal{E}^2/\rho R_0) \cos 2\omega t, \quad (6)$$

где Γ — феноменологическая константа затухания. Уравнение (6) имеет решение:

$$Q(t) = a \cos 2\omega t + b \sin 2\omega t, \quad (7)$$

$$a = \frac{\mathcal{E}^2}{\rho R_0} \frac{\Omega^2 - (2\omega)^2}{(\Omega^2 - (2\omega)^2)^2 + (4\Gamma\omega)^2},$$

$$b = \frac{\mathcal{E}^2}{\rho R_0} \frac{4\Gamma\omega}{(\Omega^2 - (2\omega)^2)^2 + (4\Gamma\omega)^2}$$

Регистрацию капиллярных колебаний можно производить оптически по измерению коэффициента экстинкции пучка света интенсивностью I_0 и площадью сечения S_0 , падающего на каплю в направлении оси z . При этом интенсивность прошедшего света равна

$$I = I_0 (S_0 - \pi R_0^2 + \pi R_0 Q(t)).$$

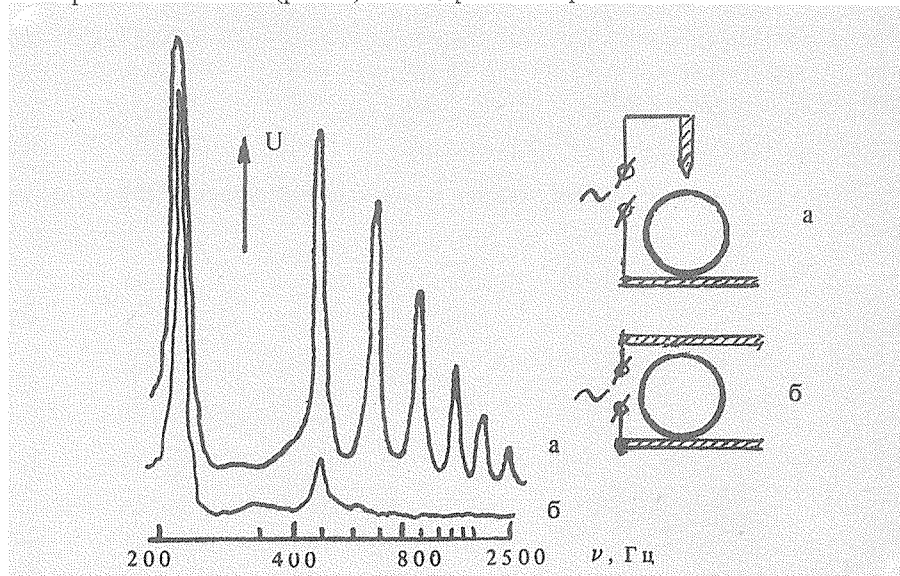
Измерение I производится фотоприемником, сигнал с которого посылается на синхронный детектор. Опорным сигналом служит модулирующее напряжение $E = \mathcal{E} \sin(\omega t + \varphi)$. Если синхронный детектор работает в режиме удвоения частоты, то напряжение на его выходе пропорционально корреляционной функции фототока и опорного напряжения на удвоенной частоте:

$$U = k \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \pi I_0 R_0 Q(t) \cos 2\omega t \, dt = \quad (8)$$

$$= (k/2) \pi I_0 R_0 (a \cos \varphi + b \sin \varphi).$$

Здесь k — константа, учитывающая квантовый выход фотоприемника, усиление прибора и т.п. Соотношение (8) описывает вид спектра, записываемого при сканировании частоты ω .

Эксперимент проводился на установке, аналогичной [1]. Капиллярные колебания возбуждались как в неоднородном (а), так и в однородном (б) электрических полях (рис. 1). Зондирование производилось с помощью из-



Р и с. 1. Спектр собственных колебаний ртутной капли, возбуждаемых неоднородным (а) и однородным (б) электрическим полем; ν — частота возбуждающего электрического поля; U — амплитуда напряжения синфазного сигнала на удвоенной частоте.

лучения HeNe-лазера, которое через фокусирующую линзу освещало по касательной вершину капли. Интенсивность прошедшего света, промодулированная колеблющейся каплей, регистрировалась фотодиодом, сигнал с которого посылался на синхронный детектор (Lock-in Amplifier-128A), работающий в режиме удвоения частоты. На рис. 1 приведены спектры, полученные при сканировании частоты переменного электрического поля для капли ртути $R_0 = 0,25$ мм. Сдвиг фаз φ был выбран равным $\pi/2$. В этом случае, как следует из (8), спектр описывается величиной b (7), которая не меняет знака. Полученные спектры свидетельствуют о том, что возбуждение капиллярных мод с $l > 2$ может быть эффективным только в сильно неоднородном поле (геометрия а). Небольшой максимум на частоте ~ 500 Гц в случае геометрии б можно отнести за счет слабой неоднородности поля, которая неизбежно существует из-за конечных размеров пластин модулирующего конденсатора.

Таким образом, на примере уединенной капли продемонстрирована возможность исследования оптическим способом капиллярных колебаний, возбужденных переменным электрическим полем. Тот факт, что в однородном поле возбуждается в основном мода с $l = 2$, может служить основой для исследования дисперсии частиц в эмульсиях и аэрозолях.

Поступила в редакцию 11 марта 1985 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распопов С. Ф., Суходольский А. Т. ДАН СССР, 278, № 3, 603 (1984).
2. Ахманов С.А., Коротеев Н.И. УФН, 123, в. 3, 405 (1977).
3. Flüge S. Ann. Phys., 39, 373 (1941).
4. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М., Наука, 1976.