

РАДИОФИЗИКА

УДК 535.345.6

ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ЖИДКОСТЯХ МЕТОДОМ ПОГРУЖЕННОГО СФЕРИЧЕСКОГО МИКРОРЕЗОНАТОРА

Э. Н. Алырзаев, М. Л. Городецкий, В. С. Ильченко, А. А. Савченков

(кафедра молекулярной физики и физических измерений)

Продемонстрировано, что малые оптические потери в жидкостях вблизи границы раздела жидкость — твердое тело могут быть измерены методом погруженного оптического микрорезонатора с модами типа «шепчущей галереи». Разработанный метод опробован на некоторых чистых жидкостях и растворах. Обнаружено, что зависимость оптического затухания от концентрации этанола в воде имеет ярко выраженный пороговый характер.

Оптические методы исследований широко применяются для изучения процессов, протекающих на границе раздела диэлектриков и жидкостей. С помощью таких методов получают информацию о молекулярной структуре и фазовых переходах в приповерхностном слое. Наиболее развитым является эллипсометрический метод, который позволяет с высокой точностью измерять профили коэффициентов преломления в пограничном слое, исследовать процессы смачивания, химической и физической адсорбции. Однако нередко данные измерений мнимой части диэлектрической постоянной более информативны для понимания внутренней структуры и термодинамического поведения сорбированного вещества. В частности, результаты измерений потерь электромагнитного излучения в водных растворах неэлектролитов в микроволновом диапазоне [1] показывают, что вклады воды и алифатических спиртов в поглощение растворов неаддитивны при превышении некоторой пороговой концентрации компонентов.

Нами предложен новый метод определения оптических потерь в жидкости посредством измерения добротности оптических мод типа «шепчущей галереи» микрорезонатора из плавленого кварца, погруженного в изучаемый раствор. Ранее с помощью высокодобротных мод в сферических телах изучались оптические свойства жидкости посредством измерения поглощения и рассеяния света в каплях и аэрозолях. Наша методика измерений может быть представлена в некотором приближении как обратная. Здесь жидкость занимает вблизи поверхности резонатора лишь небольшую часть эффективного объема, т. е. объема, в котором циркулирует электромагнитное поле резонатора. Это позволяет измерять потери в тонком пограничном слое исследуемой жидкости с большой точностью и проводить долговременные измерения с одним резонатором при изменении внешних условий.

Микрорезонаторы представляют собой сферы диаметром D от десятков до тысяч микрометров, изготавливаемые из оптически высокопрозрачного диэлектрика, в которых свет оказывается захвачен-

ным вследствие эффекта полного внутреннего отражения. Моды микрорезонатора возбуждаются с помощью призмного элемента связи, аналогичного тем, которые используются для связи с планарными волноводами в интегральной оптике. Если диаметр резонатора превышает несколько десятков длин волн, то добротность мод «шепчущей галереи» будет ограничена только потерями в материале диэлектрика, из которого изготовлен резонатор, потерями в веществе, окружающем резонатор, и рассеянием на поверхностных неоднородностях. Ранее была достигнута добротность $Q \simeq 10^{10}$ [2] в микросферах, изготовленных из высокочистого плавленого кварца, что соответствует фундаментальным потерям. Высокая добротность и большая концентрация электромагнитного поля в микрорезонаторах делает их удобным инструментом для изучения как свойств материала, из которого они изготовлены, так и свойств вещества, непосредственно прилегающего к их поверхности. В случае, когда размеры резонатора велики по сравнению с длиной волны, а его поверхность настолько гладкая, что вклад поверхностного рассеяния в общие потери пренебрежимо мал, обратная добротность определяется выражением [3]

$$Q^{-1} = (1 - K) \frac{\alpha_r \lambda}{2\pi n_r} + K \frac{\alpha_m \lambda}{2\pi n_m}. \quad (1)$$

Здесь α_r , α_m и n_r , n_m — коэффициенты затухания и преломления соответственно в резонаторе и в окружающей его среде, K — коэффициент включения, показывающий, какая часть общей запасенной оптической энергии моды циркулирует вне резонатора в слое толщиной $d \simeq \lambda / (2\pi \sqrt{n_r^2 - n_m^2})$. Первое слагаемое в выражении (1) может быть определено экспериментальным путем, из измеренной добротности сухого резонатора. Коэффициент включения K может быть вычислен по известным геометрическим параметрам резонатора и коэффициентам преломления вещества в резонаторе и в окружающей среде. Таким образом, из выражения (1) однозначно определяются линейные потери в среде α_m . Для высокодобротных резонаторов из плавленого кварца

ситуация еще больше упрощается, поскольку вкладом собственных потерь (и соответственно первым слагаемым) в (1) можно пренебречь.

Решение электродинамической задачи об электромагнитных колебаниях диэлектрической сферы приводит к следующей величине K для использованных нами мод типа TE [3]:

$$K = \frac{n_m^2 \lambda}{\pi D n_r^2 (n_r^2 - n_m^2)^{3/2}},$$

где D — диаметр резонатора.

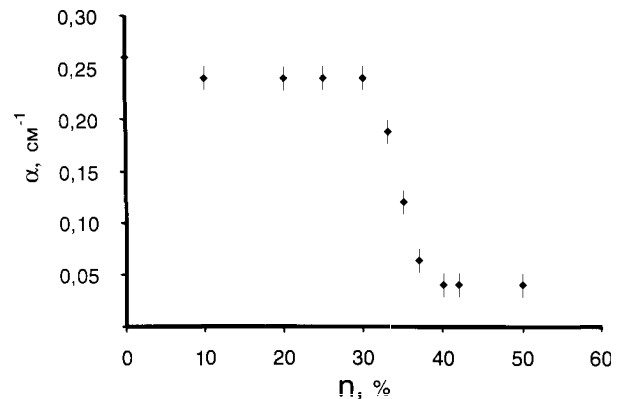
Точность определения потерь в среде определяется точностью определения объемных потерь в кварце и коэффициентов преломления внутри и вне микросферы.

Для изготовления резонаторов использовалась кислородно-водородная горелка. Свежеприготовленные резонаторы погружались в специальную ячейку. Сначала для контроля измерялась добротность сухого резонатора, которая в наших экспериментах составляла $2 \cdot 10^8 \div 1 \cdot 10^9$, а затем в ячейку заливался исследуемый раствор. Добротность измерялась динамическим способом, который предусматривает непосредственное наблюдение резонансной кривой на экране осциллографа с помощью ФЭУ при свипировании частоты измерительного генератора. В качестве генератора использовался гелий-неоновый лазер ЛГ-52-3, который мог перестраиваться (путем пьезотрансляции одного из зеркал) в пределах доплеровской линии усиления газовой смеси на величину до 300 МГц. Луч лазера вводился через объектив в призму-ячейку под углом, большим угла полного внутреннего отражения. Измеренная ширина резонансной кривой использовалась для расчета величины оптических потерь в среде. Мы измерили оптические потери в приповерхностном слое в чистых жидкостях (вода, этанол и ацетон) и определили зависимость их от концентрации в водных растворах этанола и карбамида.

Потери в приповерхностном слое оказались существенно выше (таблица), чем известные из литературы объемные потери [4], что, по-видимому, обусловлено химико-физическими процессами в растворе на поверхности плавленого кварца.

Вещество	n_m (633 нм)	D , мкм	Q , 10^8	K , %	d , см^{-1}
Ацетон	1,354	475	4,0	0,54	$2,1 \cdot 10^{-2}$
Этанол	1,358	475	2,1	0,54	$4,0 \cdot 10^{-2}$
Вода	1,331	500	0,5	0,35	0,26

Интересно, что зависимость оптических приповерхностных потерь α от объемной концентрации этанола n в бинарном водно-спиртовом растворе имеет четкий порог, обусловленный процессами сольватации (рисунок).



Таким образом, метод погруженного сферического микрорезонатора открывает новые возможности для исследования тонких физических эффектов вблизи поверхности раздела жидкость — твердое тело.

Литература

1. Хургин Ю.А., Завизион В.А., Кудряшова В.А. Препринт Ин-та радиотехники и электроники АН СССР. 1987. № 15(474).
2. Gorodetsky M.L., Savchenkov A.A., Ilchenko V.S. // Opt. Lett. 1996. **21**. P. 453.
3. Gorodetsky M.L., Pryamikov A.D., Ilchenko V.S. // J. Opt. Soc. Am. **B17**, No. 6. P. 1051.
4. Физические величины. / Под ред. И.С. Григорьева и Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Поступила в редакцию
10.04.00