

07; 12

© 1990 г.

КОГЕРЕНТНАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН

Б. М. Гризорова, С. Ф. Растопов, А. Т. Суходольский

Предложен и реализован метод измерения дисперсии капиллярных волн и коэффициента поверхностного натяжения, основанный на возбуждении поверхности амплитудно-модулированным лазерным излучением с последующим зондированием пробным пучком и выделением в рассеянном сигнале фотоотчетов коррелированных с синусоидальным (когерентным) опорным сигналом. Приведена блок-схема установки и результаты измерений.

Ранее сообщалось о применении метода когерентной спектроскопии оптического смещения для исследования вынужденных колебаний формы жидкой капли под действием лазерного излучения [1] и электрического поля [2]. Суть метода когерентной спектроскопии оптического смещения состоит в предварительной раскашке выбранного комбинационного перехода широкополосным по сравнению с шириной комбинационного перехода лазерным излучением, амплитудно-модулированным периодическим сигналом с последующим зондированием с помощью пробного лазерного излучения вынужденных колебаний. Детектирование рассеянного излучения осуществлялось при этом по методу оптического гомодинирования с обработкой аналогового сигнала синхронным детектором. Этот метод можно рассматривать как перенесение принципов «активной» спектроскопии [3] в спектроскопию оптического смещения [4].

Представляет интерес перенести принципы активной спектроскопии в ту область, где исследуются низкочастотные комбинационные переходы методом корреляционной спектроскопии [4], при котором измеряется не аналоговый сигнал с фотоприемника, а исследуется временная автокорреляционная функция одноэлектронных импульсов с ФЭУ. Хотя, как показано в [4], методы спектроскопии оптического смещения и корреляционной спектроскопии дают адекватные, связанные Фурье-преобразованием результаты, но цифровая обработка сигналов в корреляционной спектроскопии в ряде случаев может дать преимущества.

Цель данной работы состояла в создании экспериментальной установки, в которой реализовался «активный» вариант корреляционной спектроскопии, названный когерентной корреляционной спектроскопией (ККС). Применение метода ККС показано на примере измерения дисперсии капиллярных волн и поверхностного натяжения на границах раздела жидкость/пар и жидкость/жидкость.

Суть метода ККС капиллярных волн будет изложена при описании экспериментальной установки, блок-схема которой представлена на рис. 1. В качестве источника накачки использовалось излучение аргонового лазера 1 с длиной волны 0.488 нм и мощностью 0.5 Вт, которое модулировалось электрооптическим модулятором 2. В качестве зондирующего использовалось излучение HeNe лазера 3. Излучение накачки направлялось вертикально вниз через фокусирующую линзу на поверхность жидкости, залитую в чашку Петри 4. Кроме этого, на поверхность направлялось зондирующее излучение, которое после отражения от границы раздела проходило через красный светофильтр 5, монохроматор 6

и регистрировалось ФЭУ-797, работающем в режиме счета фотонов. Одноэлектронные импульсы с ФЭУ подавались на систему регистрации сигнала 8—15. На рис. 2 представлены диаграммы, иллюстрирующие суть ККС и способа обработки сигнала. Заметим, что регистрируемый оптический сигнал имеет

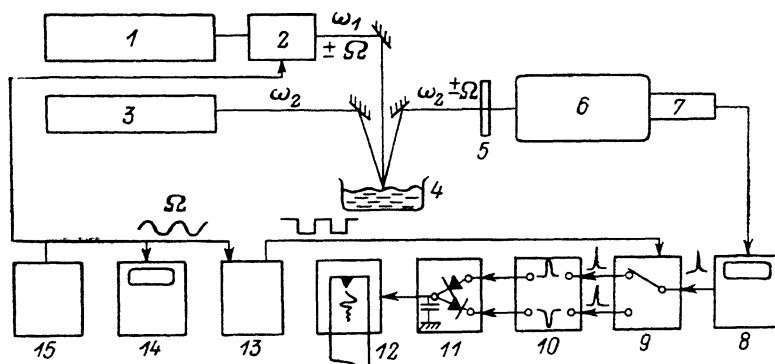


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для ККС капиллярных волн.

сильные флуктуации интенсивности I_p вблизи некоторого среднего значения I_0 , связанные как с шумами фотоприемника, так и с избыточными механическими шумами, обусловленными вибрациями элементов установки, колебаниями жидкости в чашке как целого и т. п.

Задача схемы регистрации состоит в выделении в спектре рассеянного сигнала составляющих, коррелированных с опорным синусоидальным (когерентным) сигналом задающего генератора 15, модулирующим излучение лазера накачки с частотой Ω . Эта выделенная когерентная корреляционная составляющая рассеянного света, пропорциональная амплитуде капиллярной волны, и есть регистрируемый сигнал в когерентном варианте корреляционной спектроскопии. Отметим, что в традиционной спектроскопии оптического смещения капиллярных волн [5] рассеяние происходит на тепловых флуктуационных возбуждениях среды, а в предлагаемом методе рассеяние происходит на сфазированных возбуждениях среды (в данном случае капиллярных волнах) и из распределения одноэлектронных импульсов выделяется когерентная корреляционная функция. Эта процедура подразумевает нахождение корреляции между сигналом и когерентным опорным сигналом. Таким образом, термин «когерентная» в названии данной работы относится как к способу возбуждения, так и к способу регистрации.

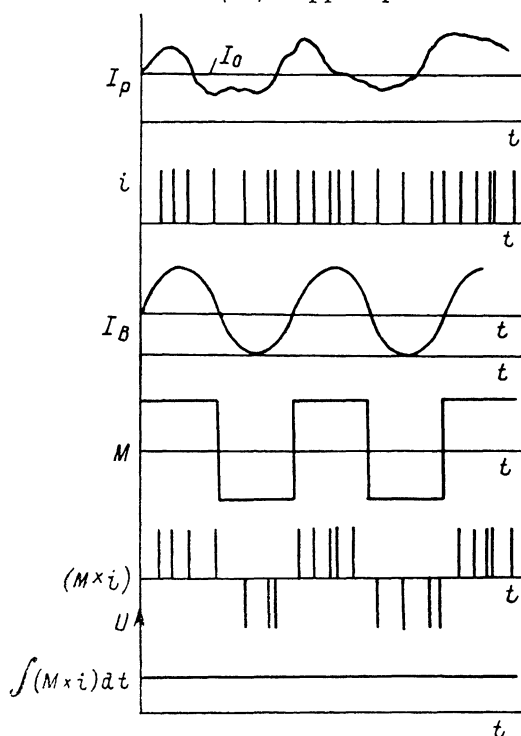


Рис. 2.

Отмеченная выше процедура обработки сигнала реализуется следующим образом. Сигнал с ФЭУ подавался на счетчик фотонов 8, в котором происходит дискриминация импульсов по амплитуде для выделения одноэлектронных импульсов. Временное разрешение счетчика фотонов составляло 1 мкс. Калиброванные по амплитуде одноэлектронные импульсы i посылаются на электронный комму-

гатор 9, разделяющий импульсы на два канала. Коммутатор управляется опорным сигналом, сформированным триггером 13, который из синусоидального управляющего сигнала I_B создает синфазный с ним меандр M опорного сигнала (рис. 2). Инвертор 10 служил для того, чтобы инвертировать по амплитуде импульсы одного из каналов во время отрицательного полупериода опорного сигнала, т. е. здесь фактически происходит перемножение сигналов $M \times i$. Для получения корреляционной функции служит интегратор 11, в котором происходит аналоговое суммирование калиброванных по амплитуде импульсов разной полярности $\int (M \times i) dt$. Сигнал U с интегратора поступал на самописец 12. Для контроля частоты Ω опорного сигнала служил частотомер 14.

Заметим, что если отсутствует когерентная составляющая в сигнале рассеяния, то среднее число одноэлектронных импульсов в положительном и отрицательном полупериодах опорного сигнала одинаково и напряжение U , подаваемое на самописец, равно нулю. При появлении когерентной составляющей в рассеянном свете среднее число положительных и отрицательных импульсов становится неодинаково и разность определяет искомую функцию когерентной корреляции.

Описанная экспериментальная установка применялась для исследования дисперсии капиллярных волн и измерения коэффициента поверхностного натяжения. Капиллярные волны на границе раздела флюидных фаз — это волны, в которых возвращающей силой служит лапласовское давление над искривленной поверхностью. Дисперсия капиллярных волн описывается выражением [6]

$$\Omega^2 = \frac{\sigma}{\rho_1 + \rho_2} k^3, \quad (1)$$

где Ω — частота; σ — поверхностное натяжение; ρ_1, ρ_2 — плотности соприкасающихся фаз, полученные в приближении, что волновой вектор $k \gg 1/a$, где a — капиллярная постоянная [7].

Из выражения (1) следует, что, измерив длину волны $\lambda = 2\pi/k$ и частоту Ω , можно найти коэффициент поверхностного натяжения. Заметим, что, как следует из расчетов, проведенных в приближениях микроскопической гидродинамики [8], закон $3/2$ в дисперсионном соотношении в зависимости от характера межмолекулярных взаимодействий может нарушаться. Поэтому процесс измерения поверхностного натяжения должен сопровождаться исследованием закона дисперсии капиллярных волн.

Эксперимент по исследованию дисперсии капиллярных волн и измерению поверхностного натяжения производился в двух модификациях. Во-первых, путем сканирования частоты модуляции Ω при фиксированном расстоянии Δl между точками падения зондирующего и опорного пучков на поверхности раздела фаз (ω -спектроскопия). Во-вторых, путем сканирования расстояния между зондирующим и опорным пучками при фиксированной частоте (k -спектроскопия). Здесь следует заметить, что, для того чтобы максимально приблизить условия эксперимента к условиям одномерного распространения капиллярных волн, для которых был получен закон дисперсии (1) [6], излучение накачки фокусировалось цилиндрической линзой на поверхность в виде полоски длиной 7 мм и шириной 0.05 мм. Юстировка зондирующего пучка, диаметр которого после фокусировки был порядка 0.05 мм на поверхности и 5 мм на щели монохроматора, осуществлялась таким образом, чтобы в монохроматор попадал край пучка вблизи точки перегиба его гауссового профиля.

На рис. 3 приведен пример ω -спектра, полученного на границе раздела этиловый спирт/воздух. Падение амплитуды сигнала с увеличением частоты носит экспоненциальный характер и связано с частотной зависимостью коэффициента затухания капиллярных волн и с падением эффективности лазерного возбуждения капиллярных волн, когда λ становится много меньше размера возбуждающего пучка. Заметим, что полученный спектр носит иллюстративный характер, поскольку для измерения коэффициентов поверхностного натяжения необходимо знать точно Δl и число длин капиллярных волн, которое укладывается на нем. Для измерения дисперсии капиллярных волн и коэффициента поверхностного натяжения нами применялся метод k -спектроскопии, в котором при фиксированной частоте Ω измерялся пространственный сдвиг Δl , при котором реги-

стрируемый сигнал U изменял свою фазу на 2π . Легко показать, что соседние точки с одинаковой фазой в k -спектре соответствуют соседним участкам капиллярной волны с одинаковым наклоном, следовательно, измерение Δl дает возможность прямого измерения длины волны λ . Если теперь проводить измерения λ

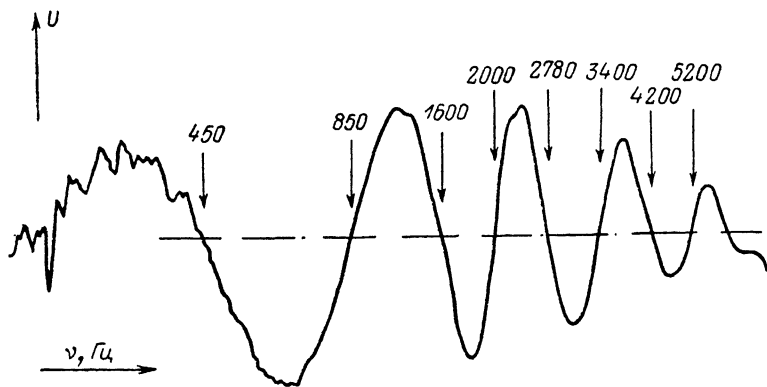


Рис. 3. ω -спектр ККС, полученный в этиловом спирте путем сканирования частоты модулирующего напряжения при фиксированном Δl .

при различных Ω , то можно измерить дисперсию капиллярных волн и установить справедливость формулы (1). Именно такой способ был положен в основу проведенных измерений.

На рис. 4 приведены дисперсионные кривые, полученные для двух различных поверхностей. Значение σ , приведенное на рисунке, получалось путем усред-

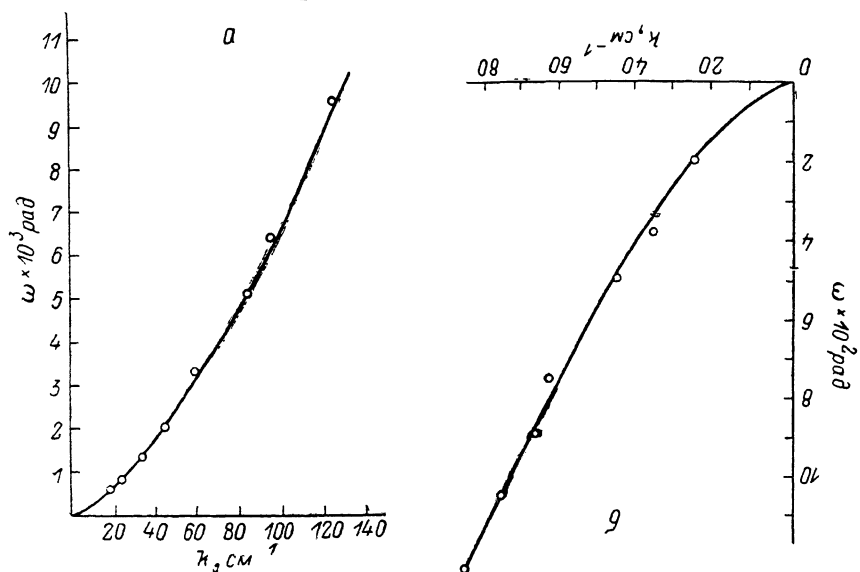


Рис. 4. Дисперсионные кривые и измеренные коэффициенты поверхностного анилин—воздух (а) и анилин—вода (б).

σ , эрг/см²: а — 47 ± 4 , б — 52 ± 0.6 .

нения σ_i , рассчитанных по формуле (1) для каждой экспериментальной точки (отмеченной кружками). Сплошная кривая — это дисперсионная кривая, рассчитанная по формуле (1) из среднего значения σ . Здесь следует отметить, что дисперсионная кривая на рис. 4, б также хорошо описывается законом $3/2$, что, согласно [8], говорит о преобладании в межмолекулярном взаимодействии анилин—вода дисперсионных сил.

Таким образом, нами предложен новый независимый способ исследования дисперсии капиллярных волн на поверхности раздела фаз и измерения поверх-

постного натяжения, который может найти применение наряду с традиционными методами [9]. На наш взгляд, он обладает преимуществами при исследовании поверхностей раздела жидкостей с низким коэффициентом межфазного натяжения, где такие методы, как метод висячей капли или отрыва кольца [9], малопригодны. Кроме этого, предложенным методом можно исследовать затухание капиллярных волн, т. е. получать дополнительную информацию о вязкости и структуре вещества вблизи поверхности раздела фаз. Отметим также, что предложенный метод отличается от теоретически рассмотренного в работе [10] тем, что здесь область воздействия лазерного излучения на поверхность и область зондирования разделены, поэтому возмущающее (например, за счет нагрева) воздействие света на измеряемые величины поверхностного натяжения минимально.

Список литературы

- [1] *Распопов С. Ф., Суходольский А. Т.* // ДАН СССР. 1984. Т. 278. № 3. С. 602—605.
- [2] *Распопов С. Ф., Суходольский А. Т.* // Кр. сообщ. по физике. 1985. № 6. С. 10—13.
- [3] *Ахманов С. А., Коротеев Н. И.* Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света. М.: Наука, 1981. 544 с.
- [4] Спектроскопия оптического смещения и корреляция фотонов / Под ред. Г. Камминса, Э. Пайка. М.: Мир, 1978.
- [5] *Hart S., Hamnerius Y., Nilsson O.* // J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47. N 6. P. 2433—2442.
- [6] *Ламб Г.* Гидродинамика. М.; Л., 1947. 928 с.
- [7] *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. Т. 6. 736 с.
- [8] *Jewsbury H., Mahanty J.* // Physica. 1982. Vol. A113. N 3. P. 596—606.
- [9] *Адамсон А.* Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979. 568 с.
- [10] *Божков А. И., Бункин Ф. В., Коломенский А. А.* // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4. Вып. 12. С. 723—726.

Институт общей физики АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
2 января 1989 г.