

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА
С КОГЕРЕНТНЫМ КОРРЕЛЯТОРОМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ НАНОСТРУКТУР ЖИДКИХ СРЕД**

**А.В. Воробьева, Т.В. Ефимова, В.В. Камакин,
С.А. Красников, А.Е. Краснов, В.В. Маклаков (МГУТУ)**

Рассматривается когерентный метод исследования динамики наноструктур жидких сред. Приводятся структура, принцип работы и применения автоматизированной оптоэлектронной системы.

Качество технологического сырья и готовых, в том числе пищевых, продуктов во многом зависит от молекулярного состава используемых жидких сред и характера межмолекулярных взаимодействий. Данные взаимодействия приводят к образованию характерных наноструктур жидких сред, которые наряду с их молекулярным составом определяют многие свойства сред. Контроль наноструктур жидких сред является сложнейшей технической задачей ввиду того, что характерные размеры наноструктур составляют порядка 10^{-3} мкм, а минимальное время их перестройки – порядка 10^{-9} с. Следовательно, такие структуры занимают промежуточное положение между молекулярными структурами, исследуемыми методами инфракрасной и Рамановской спектроскопии и микро-структурами, исследуемыми с помощью оптической микроскопии.

Разработка технических средств для исследования наноструктур жидких сред, в том числе авторами настоящей работы, началась с 80-х гг. В частности, были разработаны когерентные оптические корреляторы и проведено исследование наноструктур молекулярных ассоциатов воды и водно-спиртовых смесей.

В настоящей работе рассматривается новый метод контроля наноструктур жидких сред, основанный на использовании когерентного оптического излучения с частотой модуляции 10...60 ГГц.

Автоматизированная оптоэлектронная система с когерентным коррелятором для контроля наноструктур жидких сред показана на рис. 1.

Жидкая среда, находящаяся в кювете 1, освещается плоской волной, формируемой источником когерентного оптического излучения 2 и проходящей через модулятор амплитуды когерентного излучения 3 и светоделитель 4. Светоделитель 4 формирует волну гетеродина, направляемую в сторону модулятора фазы когерентного излучения 5. Рассеянное на исследуемой жидкой среде и собранное Фурье-объективом 6 нестационарное оптическое поле $E_S^-(r, t)$ регистрируется в момент времени t_0 с помощью стационарной плоской опорной волны гетеродина $E_H^-(r, t)$ ($|E_H^-|^2 \gg |E_S^-|^2$) в объеме фотосреды 7 для высокоскоростной оперативной регистрации динамических голограмм в течение времени $\tau_R < \tau_S$, где τ_S – время изме-

нения "наноструктурных" характеристик исследуемой среды (время наноструктурной "квазистационарности" среды). Нерассеянная компонента света блокируется с помощью поглощающего экрана – режекторного оптического фильтра 8, размещенного в плоскости перед Фурье-объективом. Время τ_R регистрации задается модулятором амплитуды 3. Гетеродинная опорная волна отражается от зеркала модулятора фазы когерентного излучения 5 и, проходя через фотосреду 7, попадает на фоторегистрирующий детектор 9.

Управление амплитудным и фазовым модуляторами 3 и 5 осуществляется цифровой системой 10 по каналу 11.

Характеристики модулятора амплитуды когерентного излучения.

Активный кристалл	LiN ₆ O ₃
Ориентация кристалла	z
Резонансная частота, ГГц	8,58... 60
Полоса пропускания, МГц	180
Добротность	~50
КСВ на входе модулятора	~2,0
Глубина модуляции в пересчете на линейный участок (при $P_M = 6$ Вт), %	31
Апертура, мм	Ø 1,1
Вес, г	~800
Размеры, мм ³	80×80×60
Гарантийное время наработки (при плотности мощности лазерного излучения 0,1 Вт/см ² и непрерывной 8 ч работе), ч	500
Поляризация лазерного излучения на входе	0°
Остаточный световой поток, %	< 11
Длина волны лазерного излучения, мкм	0,63
Максимальная плотность мощности лазерного излучения, Вт/см ²	0,5

Динамические характеристики модулятора приведены на рис. 2.

В качестве фотосреды 7 в системе использовался биохром, позволяющий записывать голограммы за время $\tau_R = 10^{-9}$ с.

Принципы работы системы

Фоторегистрирующий детектор регистрирует сигнал

$$F(t) \cong \langle \text{Re} \iint E_S^+(r, t_0 + \tau_R) E_S^-(r, t) d^{(2)}r \rangle \cong \langle \text{Re} \iint \Delta \epsilon^*(r, t_0 + \tau_R) \Delta \epsilon(r, t) d^{(2)}r \rangle, \quad (1)$$

где $\Delta \epsilon(r, t)$ – пространственно-временное распределение неоднородностей диэлектрической проницаемос-

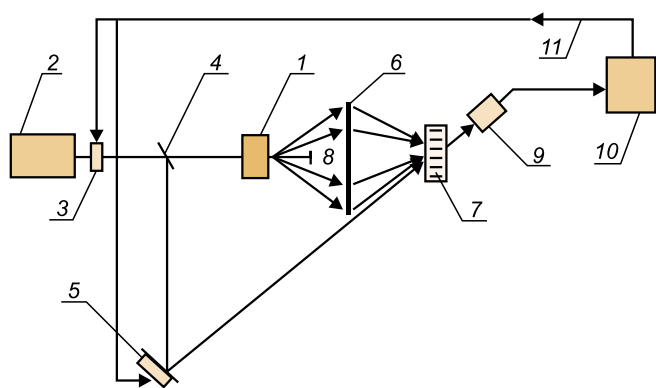


Рис. 1. Блок-схема автоматизированной высокочастотной системы контроля наноструктур жидких сред, где 1 – кювета с исследуемой средой; 2 – источник когерентного оптического излучения (лазер); 3 – модулятор амплитуды когерентного излучения; 4 – светоделитель; 5 – модулятор фазы когерентного излучения; 6 – Фурье-объектив; 7 – фотосреда для высокоскоростной оперативной регистрации динамических голограмм; 8 – режекторный оптический фильтр; 9 – фоторегистрирующий детектор; 10 – цифровая система (микропроцессор, устройства связи с объектом – ЦАП и АЦП, монитор, принтер); 11 – канал управления модуляторами

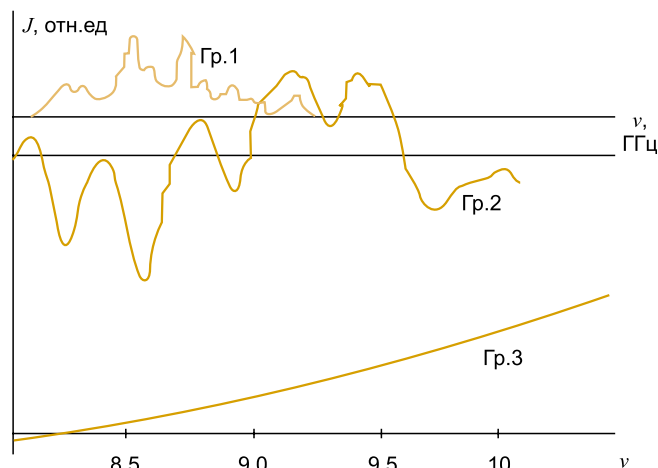


Рис. 2. Динамические характеристики модулятора 3, где показаны: график 1 – резонансная характеристика модулятора при минимальном положении регулятора перестройки; график 2 – модуляционная характеристика модулятора при настройке на рабочую частоту минимальным положением регулятора ($P = 6 \text{ Вт}$); график 3 – зависимость перестройки рабочей частоты от положения регулятора перестройки

ти исследуемой среды. Если представить данное распределение как $\Delta\epsilon(r, t) = a(r, t)\exp[j\varphi(r, t)]$, где $a(r, t)$ и $\varphi(r, t)$ – амплитуда и фаза распределения неоднородности диэлектрической проницаемости среды соответственно, то:

$$F(t) \cong \langle \iint a(r, t_3) a(r, t) \cos[\varphi(r, t_3) - \varphi(r, t)] d^2r \rangle, \quad (2)$$

где $t_3 = t_0 + \tau_R$ – некоторое эффективное время записи голограммы.

Сигнал $F(t)$ пропорционален пространственной корреляции распределений неоднородной среды в различные моменты времени. Для сред с низкой плотностью, межмолекулярное взаимодействие которых (обусловленное столкновениями при броуновском движении) осуществляется на субатомных рас-

стояниях (расстояния \ll длины волны электромагнитного излучения), справедливо длинноволновое приближение функции корреляции флуктуации диэлектрической проницаемости

$$F(t) \cong \langle \text{Re} \iint \Delta\epsilon^*(r, t_3) \Delta\epsilon(r, t) d^2r \rangle d^{(2)}r \cong \overline{|\Delta\epsilon|^2} \exp[-(t - t_3) / \tau_D], \quad (3)$$

где $\tau_D = MD/kT$ – характерное время трансляционной релаксации скоростей движения молекул с коэффициентом диффузии D при конечной температуре T (k – постоянная Больцмана), $\overline{|\Delta\epsilon|^2}$ – интенсивность флуктуаций диэлектрической проницаемости жидкой среды. Из экспериментов известно, что $\tau_D \cong 10^{-9} \text{ с}$. Поэтому для масштабов времен, характерных для длительных взаимодействий наноструктур ($> 10^{-9} \text{ с}$), можно считать, что

$$F(t) \cong \overline{|\Delta\epsilon|^2} \exp[-(t - t_3) / \tau_D] \cong \overline{|\Delta\epsilon|^2} \delta(t) \text{ для } t \gg \tau_D. \quad (4)$$

Для сред с высокой плотностью межмолекулярное взаимодействие связано не только с соударениями при броуновском движении, но и с более дальнедействующими силами, приводящими к перестройке наноструктур или пространственному распределению молекулярных ассоциатов и частично связывающих броуновское движение. В этом случае функцию корреляции нельзя представить в виде (4), и для нее необходимо использовать общие выражения (1, 2).

Для более тонкого исследования поведения корреляционной функции наноструктур с помощью модулятора фазы 5 (сдвиг фазы на $\pi/2$) формируется дополнительный сигнал, являющийся Гильберт-образом сигнала (1)

$$G(t) \cong \langle \iint a(r, t_0) a(r, t) \sin[\varphi(r, t_3) - \varphi(r, t)] d^2r \rangle. \quad (5)$$

Два сигнала (2 и 5) несут информацию о независимом изменении амплитуды $a(r, t)$ и фазы $\varphi(r, t)$ наноструктур. Для регистрации статистики совместной амплитудно-фазовой динамики наноструктур на основании сигналов $F(t)$ и $G(t)$ с помощью цифровой системы 10 формируется так называемый фазовый портрет $w[G, F]$ – двумерная гистограмма взаимных значений амплитуд F и G наблюдаемых сигналов.

Применение системы

Рассмотренный корреляционный детектор был использован для исследования динамики взаимодействий макромолекулярных ассоциатов водно-спиртовых (этаноловых) растворов. В качестве фотосреды 7 использовался биохром, чувствительный к красному свету и обладающий толщиной 100 мкм и временем регистрации $\tau_R = 10^{-9} \text{ с}$. На рис. 3 показаны сигналы $F(t)$, наблюдаемые с высоким временным разрешением (порядка 10^{-8} с) при разных соотношениях концентраций водной и спиртовой компонент. В диапазоне изменений концентраций (0,5:0,3...0,5:0,5) отчетливо наблюдался квазипериодический характер колебаний корреляционных функций. При дальнейшем повышении концентрации спиртовой компонен-

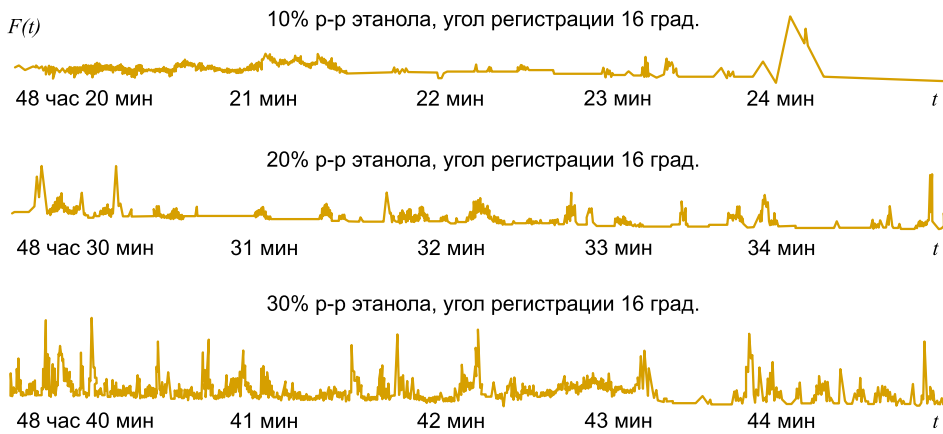


Рис. 3. Сигналы корреляции наноструктур водно-спиртовых (этаноловых) растворов

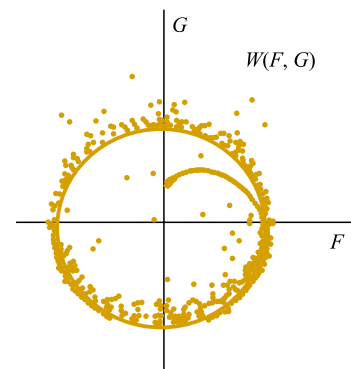


Рис. 4. Проекция фазового портрета $w[F, G]$ на плоскость $[F, G]$

ты (более 0,5) амплитуда корреляционной функции заметно снижается и ее периодичность нарушается.

Для исследования длительной динамики межмолекулярных взаимодействий с помощью цифровой системы 10 формировались фазовые портреты $w[F, G]$. Проекция одного из таких фазовых портретов на плоскость $[F, G]$ для концентраций (0,5;0,4) водной и спиртовой компонент показана на рис. 4.

Рисунок фазового портрета подчеркивает квазигармонический характер пространственно-временной динамики наноструктур, исследуемых водно-спиртовых растворов. Тем самым, можно сделать вывод о том, что перестройка пространственного распределения молекулярных ассоциатов водно-спиртовых растворов осуществляется не хаотически, а имеет определенные закономерности. Однако связь данных закономерностей (характерных частот колебаний наноструктур) с контролируруемыми макроскопическими параметрами жидкой среды (например, температурой, рН и др.) пока не исследована.

Заключение

Впервые предложен метод исследования наноструктурной динамики жидких сред. Показана зависимость изменения частоты колебаний наноструктур (пространственного распределения молекулярных ассоциатов) водно-спиртовых растворов от процентного состава компонентов. Данный метод относится к неразрушающим методам контроля жидких сред, поскольку не изменяет их химического состава, и наряду с инфракрасной и Рамановской спектроскопией

дает уникальную информацию об их свойствах. Рассмотренная автоматизированная оптоэлектронная система с когерентным коррелятором для контроля наноструктур жидких сред предоставляет широкие возможности при определении качества продукции, так как может быть использована практически для любых жидких сред. В дальнейшем предстоит выявить связь наноструктурной динамики жидких сред с их макроскопическими характеристиками.

Список литературы

1. Краснов А.Е., Маклаков В.В. Об описании признаков состояния пространственных структур сложнопорядоченных систем. Сб. мат. 2-ой Всесоюзной науч.-техн. конф. по функциональной оптоэлектронике: "Оптоэлектронные методы и средства обработки изображений". (Винница, 29 сент. – 2 окт. 1987). Тбилиси: Гр. ПИ, 1987.
2. Краснов А.Е., Лунин А.Ф., Маклаков В.В. Способ контроля изменений структуры фазового объекта // Авт. свид. № 148063, БИ № 5, 1988.
3. Краснов А.Е. Statistical causal description of space-time structure of quasi-coherent optical fields. Proc. SPIE, (Coherent Measuring and Data Processing. Methods and Devices), v.1978, 1993.
4. Маклаков В.В., Маклакова Н.Н., Камакин В.В., Краснов А.Е. Устройство для контроля изменения фазовой структуры объекта. Авт. свид. № 98106770/20, RU 8472 U1, 6 G 01 H 1/16, 1998.
5. Киселев Б.С., Котов В.Б., Салахутдинов В.К. Особенности использования фоточувствительных материалов типа биохром в качестве реверсивной голографической среды. М.: 1991.

Воробьева Алла Викторовна — канд. техн. наук, начальник отдела маркетинга, рекламы и корпоративной компьютерной сети, доцент,

Ефимова Татьяна Викторовна — аспирант,

Камакин Владислав Владимирович — соискатель кафедры "Систем управления",

Красников Степан Альбертович — канд. техн. наук, доцент,

начальник учебно-вычислительного центра кафедры "Информационных технологий",

Краснов Андрей Евгеньевич — д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой Информационных технологий,

Маклаков Владимир Васильевич — д-р техн. наук, проф., декан факультета "Управления и информатизации", зав. кафедрой "Систем управления" Московского государственного университета технологий и управления (МГУТУ).

Контактные телефоны: (095) 270-91-90, 270-66-00, 915-08-64, 921-42-56.

E-mail: kit@msta.ru