

РЕГИСТРАЦИЯ СУБГЕРЦОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ АНИЗОТРОПИИ ПРИ МАЛОУГЛОВОМ РАССЕЯНИИ СВЕТА

*В.П.Тычинский, В.Л.Панков, А.Г.Даугель-Дауге,
А.В.Карпунькин*

Предложен новый способ изучения флуктуаций анизотропии при малоугловом рассеянии света. В НЖК и ряде биообъектов новым методом обнаружены флуктуации со спектральной плотностью мощности $10^{-3} \div 10^{-2} \text{ Гц}^{-1}$ в диапазоне частот $0,1 \div 1 \text{ Гц}$.

Как известно ¹, для критических и кооперативных процессов характерными являются флуктуации параметра порядка с большими радиусами корреляции ($r_K \gg \lambda$), которым соответствует рассеяние под малыми углами ($\alpha \sim \lambda/r_K$). Поэтому обусловленные ими флуктуации интенсивности света практически невозможно обнаружить на фоне нерассеянной компоненты. С другой стороны, эта задача сравнительно легко решается поляризационными методами, если объект является анизотропным. Использование таких методов перспективно прежде всего при изучении жидких кристаллов, в которых флуктуации ориентации являются определяющими ². Кроме того, естественно ожидать наличия сильного анизотропного рассеяния и в биологических объектах, поскольку они содержат жидкокристаллические и подобные им структуры ³.

Нами проведено исследование флуктуаций анизотропии новым методом, подтверждено существование сильных равновесных флуктуаций ориентации в НЖК в герцовом и субгерцовом диапазонах спектра и впервые обнаружены аномальные низкочастотные флуктуации в биообъектах.

На рис. 1 показана блок-схема лазерного динамического поляриметра, позволяющего в реальном времени измерять абсолютные значения дисперсии, спектральной плотности мощности и других параметров флуктуаций.

Прибор создан по схеме: модулятор – объект – компенсатор – анализатор. Луч лазера (1) ($\lambda = 0,63 \text{ мкм}$, $P = 0,1 \text{ мВт}$) после поляризатора (2) проходит через компенсатор (4) (пластинку $\lambda/4$), электрооптический модулятор (5) и попадает на объект (6). Рассеянное излучение после второго компенсатора и анализатора (7) регистрируется фотоприемником (8). Выделение информации о флуктуациях из переменной составляющей фототока производится в электронном блоке (9) методом временных интервалов ⁴, для чего используется модуляция поляризации зондирующего луча. Статистическая обработка результатов производится в микро-ЭВМ "электроника-60" (10).

В приближении модели тонкого анизотропного экрана ⁵, измеряемая величина – фаза Φ переменной составляющей фототока и ее флуктуации связаны с ориентацией оптической оси ϑ и двулучепреломлением δ соотношением: $\text{tg } \Phi = -\cos 2\theta \text{ tg } \delta$, $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e)h$, где h – толщина образца.

Спектры рассеяния на равновесных флуктуациях ориентации в планарной ячейке (МБА, $h = 30$ мкм) для напряжений $U = 0$ (а), $U = 5,3$ В (б) показаны на рис. 2. Здесь σ – уровень собственных шумов установки, пунктир – аппроксимация лоренцианом:

$$S_{\Phi}(F) = \frac{\sigma_{\Phi}^2 \Gamma / 2\pi}{(2\pi F)^2 + \Gamma^2}$$

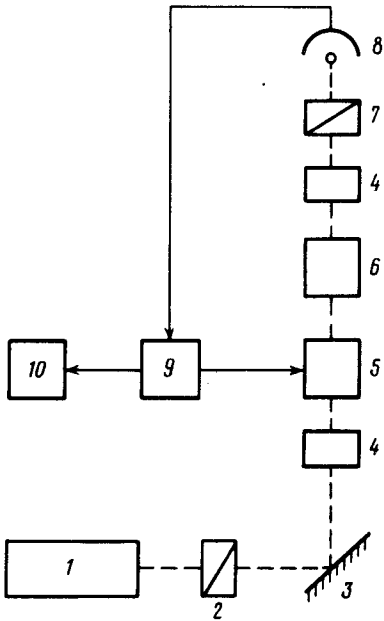


Рис. 1. Схема лазерного динамического поляриметра: 1 – лазер, 2 – поляризатор, 3 – поворотное зеркало, 4 – пластинки $\lambda/4$, 5 – объект, 6 – электрооптический модулятор, 7 – анализатор, 8 – фотоприемник, 9 – электронный блок обработки сигнала, 10 – ЭВМ

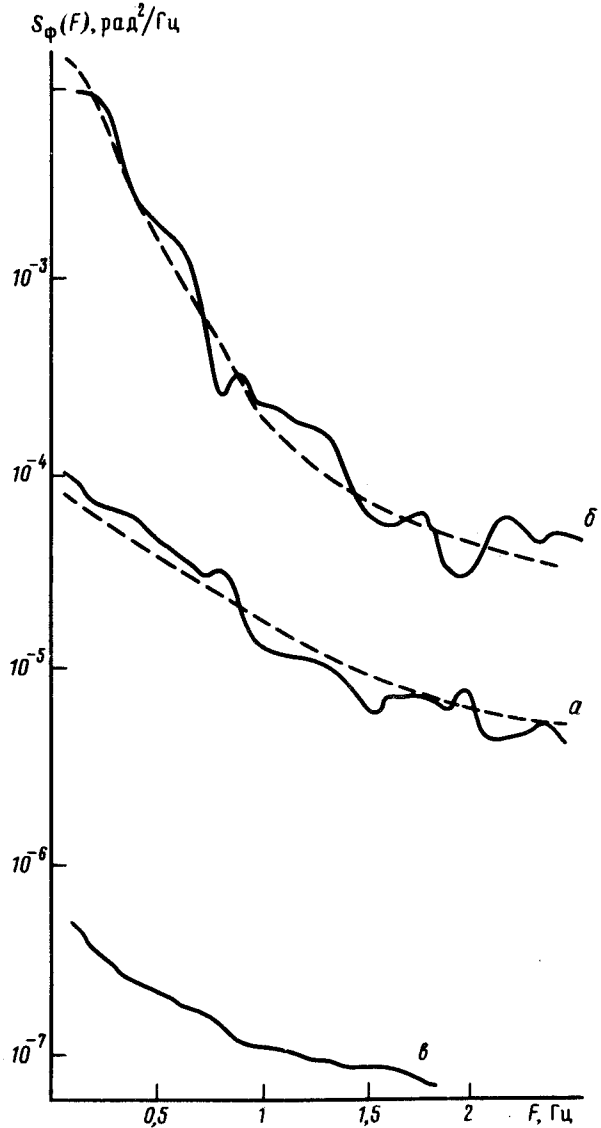


Рис. 2. Спектры $S_{\Phi}(F)$ флуктуаций анизотропии в ячейке НЖК при напряжениях: а – $U = 0$ В, б – $U = 5,3$ В, σ – уровень собственных шумов. Пунктир – аппроксимация лоренцианом. Значения дисперсии σ_{Φ}^2 и ширины $\Gamma/2\pi$ соответственно: а – $\sigma_{\Phi}^2 = 4 \cdot 10^{-5}$; $\Gamma/2\pi = 0,76$ Гц, б – $\sigma_{\Phi}^2 = 3,4 \cdot 10^{-3}$, $\Gamma/2\pi = 0,14$ Гц, $\sigma - \sigma_{\Phi}^2 = 6 \cdot 10^{-7}$

Ширина спектра $\Gamma/2\pi$ для кривой 2, а находится в удовлетворительном согласии с временем релаксации $\tau = \eta/Kq^2$ для $q = 10^3$ см $^{-1}$, $\eta = 10$ Пз, $K = 10^{-6}$ дин.

Дисперсия $\sigma_{\Phi}^2 = \int S_{\Phi}(F) dF$ пропорциональна интенсивности равновесных флуктуаций, которая согласно ², определяется выражением:

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{k_B T}{VKq^2}$$

где: V – корреляционный объем, K – константа упругости, q – вектор рассеяния. Основной вклад в σ_Φ^2 дают длинноволновые флуктуации с $q \lesssim \pi/h$.

Сужение спектра и рост интенсивности флуктуаций ⁶ при переходе Фредерикса ($U_{II} = 5,3$ В) качественно согласуется с теорией фазовых переходов.

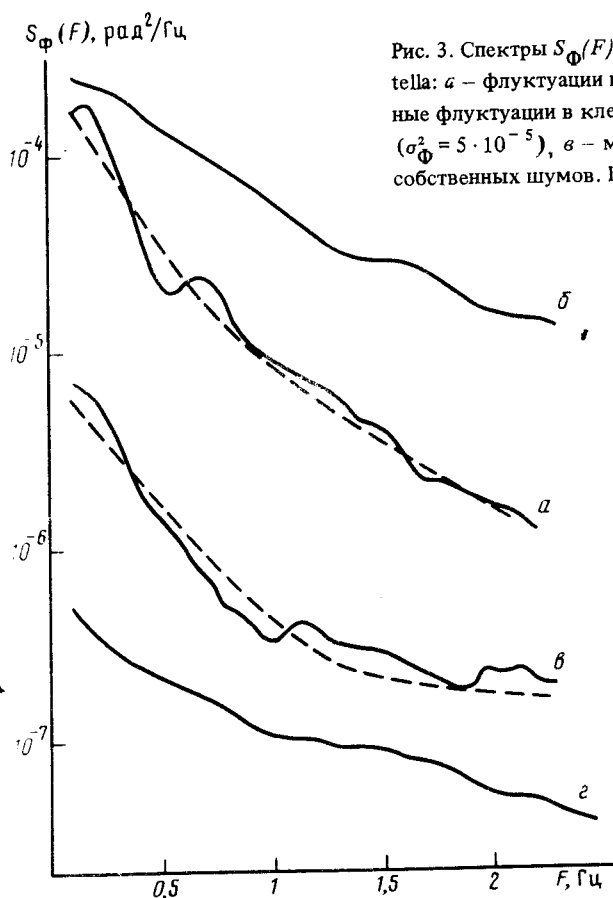


Рис. 3. Спектры $S_\Phi(F)$ флуктуаций анизотропии для водоросли *Nitella*: *а* – флуктуации в живой клетке ($\sigma_\Phi^2 = 1,2 \cdot 10^{-4}$), *б* – биогенные флуктуации в клетке с подавленным течением протоплазмы ($\sigma_\Phi^2 = 5 \cdot 10^{-5}$), *в* – мертвой клетке ($\sigma_\Phi^2 = 2 \cdot 10^{-6}$), *г* – уровень собственных шумов. Пунктир – аппроксимация лоренцианом

На рис. 3 показаны спектры $S_\Phi(F)$ для клетки водоросли *Nitella*, которая является пространственным объектом в биофизическом эксперименте ^{7, 8}. Здесь *а* – живая клетка, *б* – живая, но с подавленным электрическим импульсом движением протоплазмы, *в* – мертвая клетка, *г* – уровень шума. Пунктир – аппроксимация лоренцианом. Из сравнения спектров *а, б, в* следует превышение интенсивности флуктуаций в живой клетке в ~ 15 раз при сохранении времени корреляции и четырехкратное уширение спектра с заметным ростом дисперсии при включении трансляционного движения протоплазмы в нормальной клетке. Снижение времени корреляции до $\sim 0,2$ с связано, по-видимому, со сменой реализаций в зондируемом объеме и для известной скорости $v = 50 - 70$ мкм/с ^{7, 8} дает оценку корреляционной длины $\sim 10 - 15$ мкм.

Обусловленный движением протоплазмы вклад равен разности спектров *а, в* и *б, в*. Для него, по-видимому, более адекватна модель стационарного случайного процесса в виде случайно приходящих ограниченных импульсов, в том числе с пуассоновым распределением длительности ^{9, 10}, которая дает фликкерные $\sim F^{-2}$ или лоренцевы спектры ⁹ с интенсивностью на крыльях, пропорциональной дисперсии σ_Φ^2 и средней частоте импульсов Γ . Фликкерный характер спектров согласуется с результатами измерений на более низких частотах.

Подтверждением того, что флуктуации, обусловленные процессами жизнедеятельности в биообъектах, могут быть зарегистрированы и в объектах с клетками малых размеров без видимого течения протоплазмы, являются результаты измерений, проведенных на листьях

растений. Флуктуации в живом листе примерно на порядок выше, чем в листе после действия ингибитора или нагрева, останавливающих биогенные процессы.

Насколько нам известно, полученные результаты впервые указывают на существование интенсивных низкочастотных флуктуаций анизотропии биогенного происхождения.

Приведенные выше результаты свидетельствуют о высокой эффективности метода динамической лазерной поляриметрии при исследованиях низкочастотных флуктуаций анизотропии с большими радиусами корреляции при малоугловом рассеянии света.

Литература

1. Синергетика. Сб. под ред. Кадомцева Б.Б. М.: Мир, 1984.
2. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977.
3. Браун Г., Уолкен Дж. Жидкие кристаллы и биологические структуры. М.: Мир, 1982.
4. Захаров В.П., Снежко Ю.А., Евтихийев Н.Н. и др. Измерительная техника, 1977, № 12, 39.
5. Джерард А., Берч Дж.М. Введение в матричную оптику. М.: Мир, 1978.
6. Тычинский В.П., Жерновой С.А. Письма в ЖТФ, 1985, 11, 740.
7. Mustacich R. V., Ware V.R. Phys. Rev. Lett., 1974, 33, 617.
8. Черняева Е.Б. Вестник МГУ, серия физика, астрономия, 1984, 25, 48.
9. Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах. М.: Наука, 1968.
10. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: ГИФМЛ, 1962.

Московский институт радиотехники,
электроники и автоматики

Поступила в редакцию
1 июля 1986 г.