

Голографическое и люминесцентное проявление микроскопического движения наночастиц и молекул

Л. Н. Бородина, А. О. Орлова, А. В. Вениаминов

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Иницированное светом диффузионное движение молекул и наночастиц приводит к проявлению высокоэффективных дифракционных структур или, напротив, к их разрушению. Отслеживание изменений дифракционных свойств голограммы позволяет судить о порождающих их диффузионных процессах, пространственный масштаб которых задаётся периодом голограммы. Альтернативно информация о микромасштабном движении может быть получена из динамики пространственно неоднородной картины люминесценции, при этом могут использоваться как периодические, так и непериодические распределения. Как голографический, так и люминесцентный подходы способны выявлять свойства диффундирующих частиц как в исходном, так и в фототрансформированном состояниях, проявляющиеся в эффектах дополнительных решёток и противонаправленных профилях люминесценции. Обзор двух подходов дополнен полученными с их помощью данными сравнительных экспериментов.

Ключевые слова: Голограммная решётка, Релаксация, Восстановление люминесценции, Конфокальная микроскопия, Диффузия.

Цитирование: Бородина, Л. Н. Голографическое и люминесцентное проявление микроскопического движения наночастиц и молекул / Л. Н. Бородина, А. О. Орлова, А. В. Вениаминов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 435–438.

Движение молекул и наночастиц в высоковязких средах, таких как стеклообразные полимеры, почти не проявляется на макроскопическом уровне, но оказывает заметное влияние на свойства таких структур с микроскопическими характерными размерами, как голографические решётки. Наблюдение и анализ изменений дифракционной эффективности решёток, вызванных снижением модуляции концентрации составляющих их элементов, и следовательно модуляции показателя преломления или коэффициента поглощения, вызванных размыванием структуры решётки вследствие диффузии, даёт возможность судить об изменении размеров молекул или частиц, микровязкости сред, изучать чрезвычайно медленные релаксационные процессы в стеклообразных средах, почти недоступные иным методам. Характерная особенность голографического релаксационного метода состоит в том, что, в отличие от, например, голографической же интерферометрии, решётка записывается в объекте исследования, а не на стороннем носителе. Пространственная неоднородность материалов на субмикронном уровне порождает на первый взгляд парадоксальную зависимость эффективного коэффициента диффузии нанозонда от пространственного

масштаба эксперимента, задаваемого пространственным периодом решётки, но не равного ему. Благодаря этому появилась возможность определения микровязкости различных микродоменов как в таких очевидно неоднородных материалах, как латексные плёнки, так и в стеклообразных оптических полимерах, даже когда их неоднородность не проявляется в рассеянии света. Динамика дифракционной эффективности, в простейшем варианте экспоненциальная, в более общем случае приобретает немонотонную форму (рис. 1) и несёт информацию о диффузии нанозондов как в исходном, так и в фототрансформированном состоянии. Ситуация, в которой диффузионная подвижность наночастицы или молекулы меняется при экспонировании особенно сильно, может быть использована не только для одновременного исследования подвижности малых зондов и, например, макромолекул с присоединёнными к ним метками, но и для формирования в полимерных средах высокоэффективных голограммных оптических элементов с самопроизвольным проявлением [1].

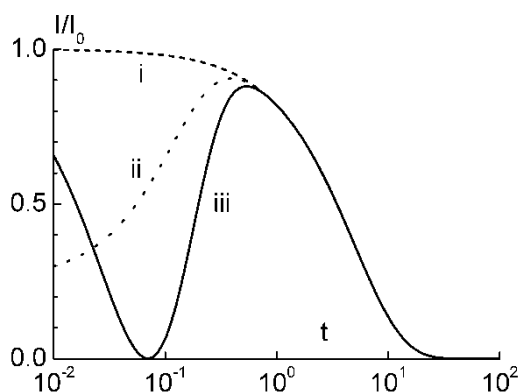
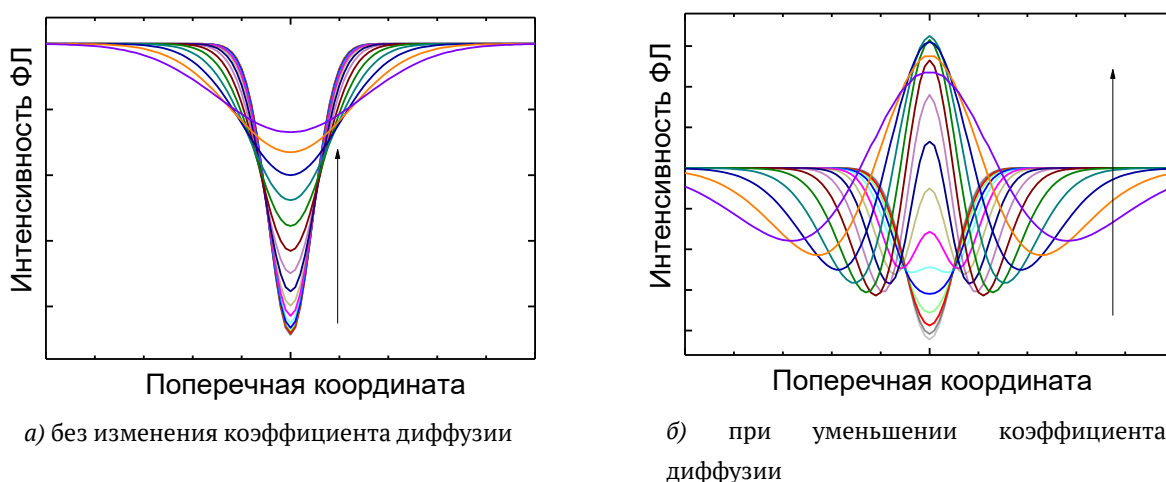


Рис. 1. Возможные формы динамики дифракционной эффективности, наблюдаемые без изменения (i) и при изменении коэффициента диффузии (ii, iii)

Дополнительный к голографическому способ изучения микроскопической подвижности молекул и наночастиц, также использующий наблюдение фотоиндуцированных неоднородностей в содержащей их среде, однако не обязательно периодических, основан на лазерной сканирующей микроскопии люминесцирующих сред. Он является дальнейшим развитием метода восстановления флуоресценции после фотообесцвечивания и состоит в экспонировании узкой полоски материала сфокусированным лазерным лучом сканирующего микроскопа, вызывающим изменение квантового выхода люминесценции материала, с последующим анализом формы поперечного профиля интенсивности люминесценции, расширяющегося вследствие диффузионного взаимопроникновения компонент материала в исходном и фотоиндуцированном состояниях. Характерные гидродинамические размеры наночастиц, проявляющиеся в измерениях, как правило, соответствуют результатам измерения методом динамического рассеяния света, а в измерении молекул красителей люминесцентный метод имеет очевидное преимущество перед рассеянием. Если экспонирование приводит к изменению не только квантового выхода люминесценции, но и

коэффициента диффузии компонент системы, то профиль усложняется (примеры приведены на рис. 2), перестаёт быть гауссовым, и его отслеживание позволяет получить информацию о свойствах и исходной, и трансформированной форм, подобно динамике дифракционной эффективности в голографическом методе.

Оба рассмотренных метода позволяют обращаться к микромасштабному движению наночастиц и молекул в различных средах, используя простой математический аппарат, в широких пределах варьируя пространственный и временной масштабы измерений и получая сопоставимые результаты по гидродинамическим размерам частиц, микровязкости и микронеоднородности окружения, но тот факт, что люминесцентный подход базируется на микроскопической технике, обеспечивает ей преимущество в визуализации и отнесении к исходной и фототрансформированной формам, в то время как голография свободна от ограничения своей применимости люминесцирующими объектами и более естественно обращается к меньшим пространственным масштабам.



а) без изменения коэффициента диффузии

б) при уменьшении коэффициента диффузии

Рис. 2. Примеры последовательностей поперечных профилей интенсивности фотолюминесценции при уменьшении квантового выхода без изменения коэффициента диффузии (а) и при одновременном уменьшении квантового выхода и коэффициента диффузии (б)

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, госзадание 2019-1080, и гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО (Л.Н.Б.).

Список источников

- [1] **Вениаминов, А.В.** Голографические полимерные материалы с диффузионным проявлением: принципы, компоновка, исследования и применения / А. В. Вениаминов, В.В. Могильный // Оптика и спектроскопия. — 2013. — Том 115. — № 6. — С. 1014–1038.

Holographic and luminescence response of nanoparticles' and molecules' micromotion

L. N. Borodina, A. O. Orlova, A. V. Veniaminov

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Light-induced diffusion of molecules and nanoparticles leads to the development of efficient diffraction structures or to their destruction. Tracking changes in the diffraction properties of a hologram allows for judging on the diffusion, the scale of which is determined by the spatial period. Alternatively, information on the micro-scale movement can be obtained from the dynamics of the spatially heterogeneous luminescence pattern, either periodic or non-periodic. Both holographic and luminescence approaches reveal the properties of intact and phototransformed diffusing species, manifested in the complementary gratings and opposite luminescence profiles. A review of the two approaches is complemented by comparative experimental data.

Keywords: Holographic grating, Relaxation, Fluorescence recovery, Confocal microscopy, Diffusion.