

УСИЛЕНИЕ СИНЕРГИЗМА АКУСТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ КРИСТАЛЛОВ

¹Классен Н.В., ¹Классен Е.Н., ^{1,2}Мышляев М.М., ¹Покидов А.П., ³Клубович В.В.,

⁴Кулак М.М., ³Хрущев Е.В., ⁵Хина Б.Б.

¹ИФТТ РАН, г. Черноголовка, Россия

²ИМЕТ РАН, г. Москва, Россия

³БНТУ, г. Минск, Беларусь

⁴ИТА НАН Беларуси, г. Витебск, Беларусь

⁵Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

Под синергизмом того или иного рода систем или процессов обычно понимается такое взаимодействие, когда его результат оказывается намного существеннее взятого в отдельности результата каждого из участвующих воздействий. Например, ярким примером синергетического процесса является существенное изменение пластических характеристик деформируемых полупроводниковых кристаллов при освещении слабыми световыми потоками [1,2]. В этом случае изменение энергозатрат на деформирование кристалла оказывается во много раз больше, чем вводимая в деформируемый кристалл энергия освещения. Объяснение этого изыщного явления связано с перезарядкой структурных элементов, участвующих в деформационном массопереносе, при оптическом возбуждении кристалла. Широко известным примером синергизма является химический катализ, когда косвенное участие в химической реакции дополнительного вещества, которое напрямую в химических превращениях не участвует, радикальным образом изменяет и скорость реакции, и состав получаемых продуктов[3].

Использование синергетических принципов при пластическом деформировании материалов имеет особое значение, т.к. процессы такого рода имеют массовое применение при формировании различного рода конструкционных элементов, модифицировании механических, электрических, химических и прочих свойств материалов. Имеется достаточно много публикаций о существенном влиянии на процессы деформирования твердых тел, помимо указанных выше световых, еще и акустических, электрических, магнитных воздействий (см., например, [4]). Наибольшее распространение на практике получили акустические методы, используемые при упрочнении поверхностных слоев и объема материалов, экструдировании изделий различных профилей и т.д. [5]. В данной работе на примере формирования нового класса материалов с рекордными характеристиками – композиционных сцинтилляторов для детектирования ионизирующих излучений[6] –демонстрируется плодотворность синергетического сочетания нескольких видов воздействия (акустического, механического, оптического, рентгеновского и др.). Композиционные сцинтилляторы, о которых в данном случае идет речь, образованы из полимерных люминофоров с наполнителями из определенного вида тяжелых наночастиц. Благодаря сочетанию высокой эффективности и скорости высвечивания органических люминофоров с высокой поглотительной способностью наночастиц в этих материалах достигается уникальное сочетание высокого световыхода и наносекундного быстрогодействия, позволяющих изготавливать радиационные детекторы с рекордными характеристиками для работы в режиме счета одиночных фотонов, обеспечивая высокое временное и пространственное разрешения при регистрации ионизирующих излучений в установках медицинском, ядерного, антитеррористического и ряда других назначений. Сочетание макроскопического деформирования в режиме сжатия или растяжения с вибрационными микровоздействиями позволили в данном случае обеспечить эффективную атомарно–электронную связь между такими разнородными материалами, которыми являются органические полимеры типа полистирола и неорганические наночастицы типа сульфата цезия, фторида лютетия и некоторых других. За счет эффективности сформированных связей электронные возбуждения, образованные в тяжелых наночастицах при поглощении ими гамма –квантов, за пикосекундные времена перебрасываются в органические люминофоры, обеспечивая высокую чувствительность детектора. В дополнение к уникальным детекторным

характеристикам мы обнаружили, что формирование такого рода композитов с комбинированным применением макро- и микро-деформаций позволяет в несколько раз повысить радиационную прочность этих материалов по сравнению с исходными органическими люминофорами (рис. 1). [7].

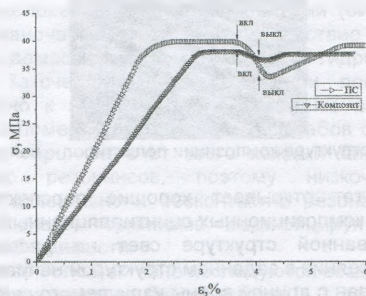


Рисунок 1 – Влияние ультрафиолетового облучения на деформирующее напряжение чистого полистирола (верхняя кривая) и его композита с наночастицами сульфата цезия. Более чем трехкратное ослабление разрушения композита ультрафиолетом объясняется закреплением разорванных связей наночастицами и многократным ускорением их восстановления

При исследованиях свойств рассматриваемых в данной работе композиционных скintилляторов было установлено существенное влияние еще одного фактора синергетического характера. Это связано с тем, что используемые в данных композитах материалы обладают существенно различающимися оптическими характеристиками (и прежде всего – показателем преломления). Поэтому при стохастическом распределении органических и неорганических компонентов возникали сильные оптические неоднородности, которые были причиной заметного рассеяния излучаемого при скintилляции света. Этот фактор приводил к определенным ухудшениям параметров скintиллятора: снижению прозрачности (за счет чего реально можно было использовать скintилляционные композиты толщиной не более 1 мм), ухудшению пространственного и временного разрешения детектора. Дальнейшие исследования показали, что те самые различия в оптических свойствах органических и неорганических компонентов, которые приводят к сильному рассеянию света и ухудшению характеристик прибора, могут при надлежащем подходе выполнить противоположную функцию – т.е. значительно улучшить детекторные характеристики. Это достигается периодической регуляризацией распределения органических и неорганических компонентов композита, которая становится возможной, если в процессе его формирования созданы условия синергетической самоорганизации. Как было установлено экспериментально, при образовании композиций из раствора полистирола в толуоле и наночастиц сульфата цезия или фторида лютеция образуется вещество с более прочным характером связи, чем просто в механической смеси используемых в композиции компонентов. Это проявляется в том, что формируемая в начальной фазе приготовления композита однородная смесь по мере отверждения расслаивается, что означает понижение ее энтропии. А это, в свою очередь, показывает, что внутренняя энергия в конечной фазе композита ниже, чем в начале процесса. То есть система в начальном состоянии может настолько сильно отклониться от равновесия, что в соответствии с известными положениями синергетики [7] могут инициироваться процессы упорядочивающей самоорганизации. И это было подтверждено экспериментально. При выполнении ряда условий процесса отверждения композиция из полистирола, толуола и наночастиц фторида лютеция

приобрела периодическую слоистую структуру, причем, как показал Фурье–анализ, степень отклонения ее от средней величины периода (который в данном случае составил 20 микрометров) не превысила 5 %. Микрофотография этой структуры показана на рисунке 2.

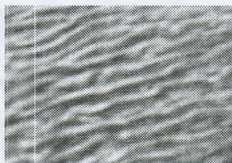


Рисунок 2 – Слоистая микроструктура композиции полистирола – наночастицы фторида лютеция

Полученный результат открывает хорошие перспективы для дальнейшего улучшения характеристик композиционных скинтилляционных детекторов. Во–первых, в хорошо регуляризированной структуре свет не рассеивается, а, наоборот, распространяется без рассеяния в заданном структурой направлении. Во–вторых, если период структуры согласован с длиной волны излучаемого света так, что формируется строго определенное направление разрешенного распространения света по типу фотонного кристалла, происходит усиление общей вероятности излучения света, т.е. усиление чувствительности детектора. Дальнейшее изучение процессов самоорганизации композиционных скинтилляторов создают определенные перспективы для достижения этих целей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 16058–00132 Бел_а

Список литературы:

1. Ю.А. Осипьян, И.Б. Савченко. Экспериментальное наблюдение влияния света на пластическую деформацию сульфида кадмия. Письма в ЖЭТФ. – 1968. – т. 7. – с. 130
2. Н.В. Классен, Ю.А. Осипьян, М.Ш. Шихсаидов. Одновременные исследования фотопроводимости и фотопластического эффекта на монокристаллах CdS и ZnSe, ФТТ. – 1976. – т.18. – с. 1587.
3. Боресков Г. К. Катализ. Вопросы теории и практики. – Новосибирск, 1987.
4. Г.А. Малыгин, Прочность и пластичность нанокристаллических материалов и наноразмерных кристаллов. Успехи физических наук . – 2011, 181:11, 1129–1156
5. В.В. Клубович, А.В. Степаненко. Ультразвуковая обработка материалов. Наука и техника. 1981. – 294 стр.
6. Шмурак С.З., Кедров В.В., Классен Н.В., Шахрай О.А., «Спектроскопия композитных скинтилляторов», ФТТ. – 2012. – т.54, в. 11. – с. 2128 – 2137.
7. Покидов А.П., Классен Н.В., Кедров В.В, Шмытько И.М., «Особенности деформационного поведения композита полистирола с наполнителем из сульфата цезия при ультрафиолетовом и рентгеновском облучении», Материаловедение. – 2015. – №7. – стр.43–51.
8. И. Пригожин, Д. Кондепуди. Современная термодинамика. Мир, 2002. – 462 стр.