

УДК 621.375.826

ВЫРАЩИВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИКАРБОНАТА МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ НАНОКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Максимовский С.Н., Ставцев А.Ю.

ФГБОУ ВО «МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ)»

Технология высокоскоростной нанокристаллизации композитных пластиков в высокотемпературной лазерной плазме вносит существенный вклад в решение проблемы создания перспективных материалов и оптических элементов. В частности, данная технология предусматривает создание композитных материалов из сплавов металла и пластика с новыми физико-химическими свойствами.

Ключевые слова: кристаллизация, нанокристаллы, бикристаллы, лазерная плазма, интерференция, когерентность, дифракционная решётка.

Впервые показано, что в низкотемпературной плазме (~3500 градусов Цельсия) происходит высокоскоростная нанокристаллизация металлов и их сплавов, полимерных и металлополимерных материалов со скоростью 80–100 м/с [1 - 2], которые обладают принципиально новыми физическими и химическими свойствами.

Выращенные наноструктуры на основе полимерных композитов исследовались методами атомно-силовой и оптической микроскопии, рентгеноструктурного анализа.

При воздействии лазерными импульсами на подложку с нанесённым на неё слоем поглощающего состава возможно высокоскоростное выращивание микро- и наноструктур. Данное явление было названо *высокоскоростной нанокристаллизацией*. Явление основано на использовании эффектов, открытых в Физическом институте академии наук им. П.Н. Лебедева РАН в 1963 году: светогидравлического эффекта и эффекта самофокусировки [3-6]:

1. *Светогидравлический эффект* – достижение высокого увеличения давления в жидкости от лазерного луча.
2. *Самофокусировка лазерного луча в жидкости*. Лазерный луч благодаря высокой напряжённости электрического поля сам меняет оптические свойства среды.
3. *Ускорение частиц в лазерном луче*. Заряженные частицы и ионы ускоряются под действием колебаний электрического поля мощной световой волны.

На пластиковую подложку (Рис. 1) наносилась композиция из нескольких слоёв пластика, содержащего в своей толще одну или две дифракционные решётки. Также проводились эксперименты с подготовленными таким образом подложками с нанесением металлического слоя на поверхности образца.

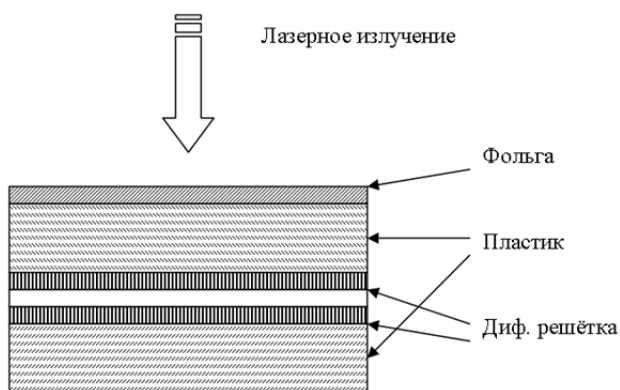


Рис. 1. Схематическое устройство образца (масштаб не соблюден)

После этого на подложку с нанесённой многослойной композицией фокусируется импульсное лазерное излучение твердотельного лазера Nd:YAG с длиной волны 1,064 мкм.

Полученные по вышеуказанной методике образцы исследовались на сканирующем зондовом микроскопе

(ACM) Certus Light V фирмы “Nano Scan Tech”.

В случае образцов с двумя дифракционными решётками наблюдается удвоение точек от лазерных выстрелов (Рис. 4). Исследовался рельеф как на дне кратеров точек от выстрелов, так и пространство между точками (Рис. 4). На границе сдвоенных кратеров обнаружены наиболее интересные результаты.

На Рис. 2 показан массив кристаллов с расположенными кристаллами (бикристаллами).

Предполагается, что сфокусированный лазерный луч, достигший двух дифракционных решёток, образует продукты разложения, которые “когерентны” друг относительно друга.

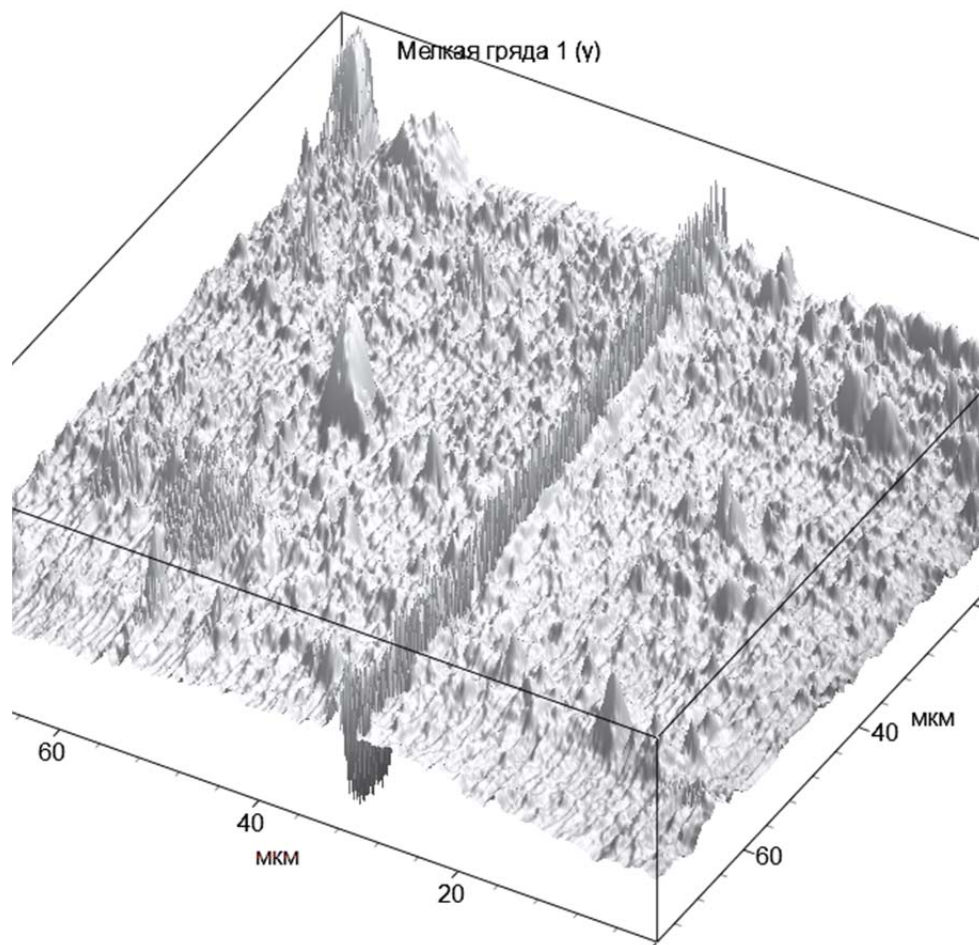


Рис. 2. Гряда и симметрично расположенные бикристаллы (атомно-силовой микроскоп)

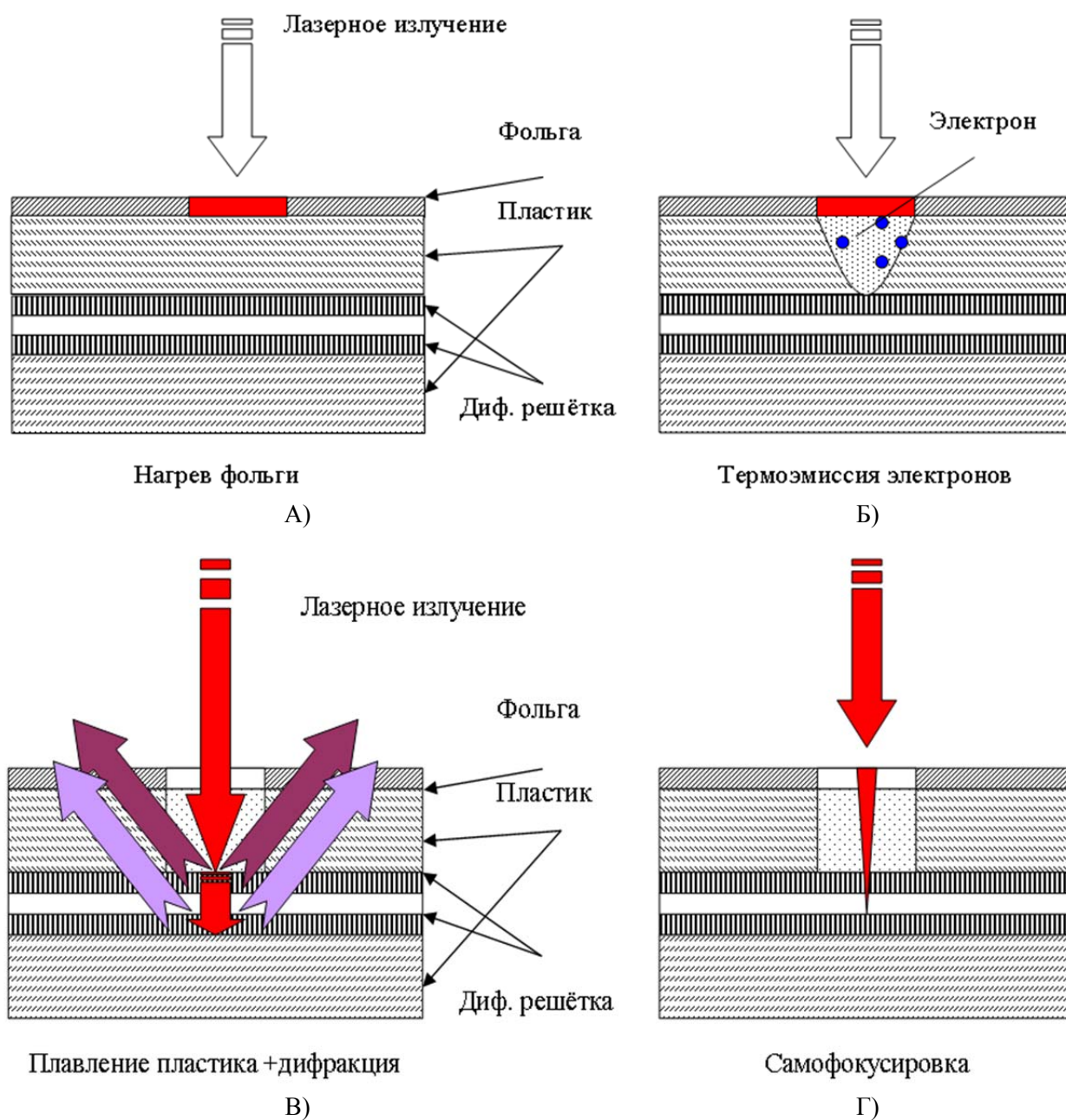
За время действия лазерного импульса нагревается металлический слой на поверхности образца. Поглощение света происходит в тонком слое $d = \alpha^{-1} \cong 0,1 \div 1$ мкм, что соответствует глубине проникновения света в металл. При поглощении света фотон передаёт при столкновении свою энергию свободным электронам. Вследствие этого кинетическая энергия электронов скачкообразно возрастает на величину энергии кванта света $h\nu$.

Релаксация энергии возбуждения к равновесному состоянию происходит по каналам электрон–электронного и электрон–фононного взаимодействий. Это приводит к увеличению температуры электронного газа, а в конечном итоге и всей решётки.

Таким образом, свободные электроны металла приобретают кинетическую энергию от электромагнитного поля, что вызывает сначала разогрев электронов, а затем кристаллической решётки [7] с последующим плавлением (Рис. 3 а). Под действием светового давления частицы металла проникают и плавят

пластик (Рис. 3 б). В жидкости происходит самофокусировка луча, что приводит к ещё большему увеличению плотности потока энергии (Рис. 3 г).

Когда луч доходит до первой из двух дифракционных решёток (верхней, ближайшей к облучаемой поверхности), он частично дифрагирует (Рис. 3 в), частично прожигает решётку и проходит до второй решётки (нижней). Там происходят аналогичные явления. Следовательно, можно предположить, что рост кристалла от нижней решётки будет запаздывать относительно растущего от верхней решётки (Рис. 3 е).



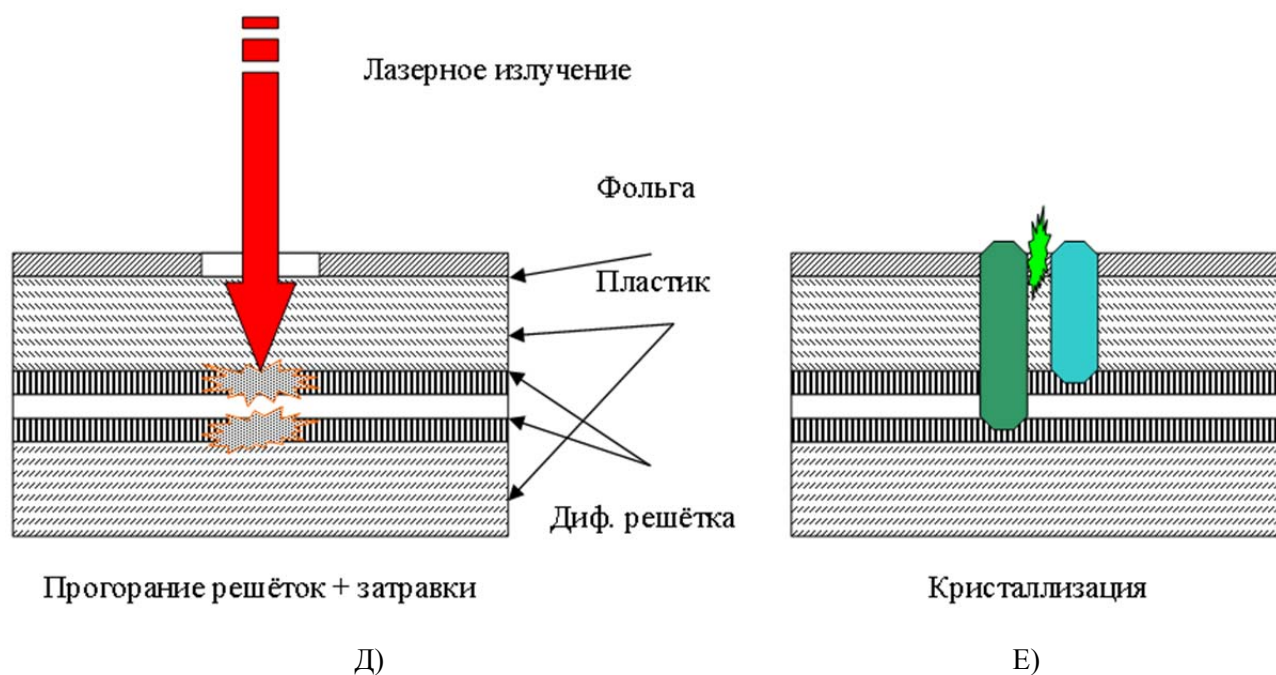


Рис. 3. Схема механизма кристаллизации в пластике

Вследствие интерференционных эффектов из-за дифракционной решётки на неоднородностях электромагнитного поля световой волны происходит образование зародышей кристаллов, которые, как предполагается, прорастают по всей толщине образца от решётки к облучаемой поверхности. В результате воздействия ожидается изменение структуры пластика с образованием продуктов термической деструкции в областях, образованных лазерным каналом. В случае двух дифракционных решёток таких каналов образуется два от одного лазерного выстрела (Рис. 4).

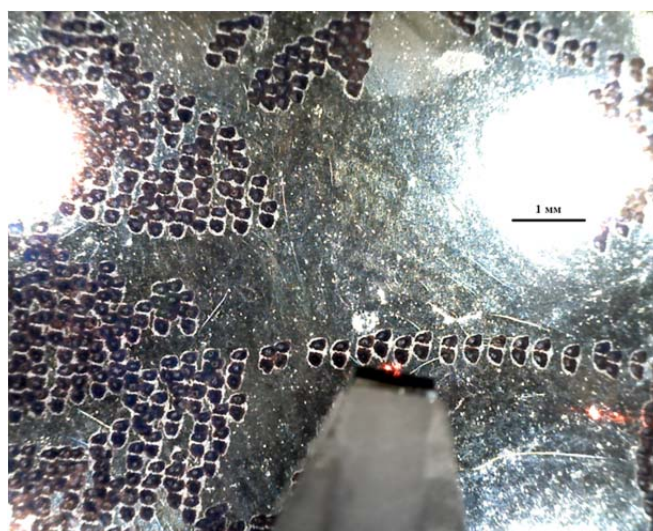


Рис. 4. Удвоенные точки от выстрелов на образце (оптический микроскоп). На фото виден зонд атомно-силового микроскопа

В результате появляется возможность кристаллизовать материалы с уникальными физико-химическими свойствами, обладающими *видимыми признаками*. Как и в работе [8] данные изделия с защитными изображениями ожидается применять для систем защиты продукции от подделок: алкогольной продукции, банковских карт, документов, паспортов. Эти исследования также позволят создавать уникальные структуры, которые обеспечат надёжную защиту против фальсификации банкнот и ценных бумаг.

Литература

1. Богоносков К.А., Максимовский С.Н. Высокоскоростная нанокристаллизация меди в низкотемпературной лазерной плазме. Доклады академии наук, 2011. Том 439, № 5. С. 605–608.
2. Богоносков К.А., Максимовский С.Н. Высокоскоростная кристаллизация меди на собственной жидкой подложке. Краткие сообщения по физике. ФИАН, 2013. №5. С. 18–22.
3. Аскарьян Г.А. Эффект самофокусировки. // Успехи физических наук, 1973. Том 111, выпуск 2. С. 249–260.
4. Аскарьян Г.А., Студенов В.Б., Чистый И.Л. Тепловая самофокусировка в луче с уменьшенной интенсивностью вблизи оси (“банановая” самофокусировка). // Успехи физических наук, 1970. Том 100, выпуск 3, С. 519–520.
5. Аскарьян Г.А. Юркин А.В. Новое в светоакустике. // Успехи физических наук, 1989. Том 157, выпуск 4. С. 667–681.
6. Эшкин А. Давление лазерного излучения. // Успехи физических наук, 1973. Том 110, выпуск 1. С. 101–116.
7. Менушенков А.П., Неволин В.Н., Петровский В.Н. Физические основы лазерной технологии. Москва. Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”. 2010. – 212 с.
8. Кунце Т., Роч Т., Гофман Т., Федына Е., Коновалов В., Ульянов Д., Лазани А. Прецизионная прямая лазерная интерференционная гравировка с помощью высокоэнергетических лазеров с модуляцией добротности. Photonics № 37 5/53/2015. С. 34–41.