

УДК 621.375.826

НАНОВИСКЕРОГРАФИЯ – НОВЫЙ МЕТОД ЗАЩИЩЁННОЙ ПЕЧАТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СКАНИРУЮЩЕГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С. Н. Максимовский^{1,2}, В. Н. Иванова², А. Ю. Ставцев²

На основании фундаментальных исследований лазерного излучения надпороговой мощности, выполненных Ч. Таунсом (деление лазерного луча) и Г. А. Аскарьяном (самофокусировка и сублимационное испарение), разработана новая высокопроизводительная технология выращивания на открытом воздухе нановискеров металлов и их окислов, полудрагоценных кристаллов, а также композитных материалов на основе поликарбоната и показаны некоторые возможности её практического применения.

Ключевые слова: кристаллизация, дисперсия и дифракция света, когерентность, самофокусировка, сканирование надпороговой мощности, нановискер.

Введение.

1. Нановискеры играют все более заметную роль при создании прорывных технологий в различных областях техники, в том числе в электронике, полупроводниковой технике, полиграфии. На основе нановискеров создаются полевые транзисторы, световые излучающие устройства, сверхбыстрые интегральные схемы с разрешением 20–60 нм, оптоэлектронные компоненты на едином чипе. Современный технологический прогресс основывается на работах по выращиванию вискеров Гарвардского университета (Ч. Либбор), Университета г. Лунда Швеция (Л. Самуэльсон) и Института кристаллографии им. А. В. Шубникова (Е. И. Гиваргизов), по механизму пар–жидкость–кристалл [1]. При этом рост нановискеров происходит с низкой скоростью, требует специального оборудования и исключает возможность их роста на открытом воздухе. В Московском государственном университете им. К. Г. Разумовского, совместно с ФИАН им. П. Н. Лебедева, разработана новая технология выращивания нановискеров на открытом воздухе

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: maximovsky.sergej@yandex.ru.

² Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского, 119049 Россия, Москва, ул. Шаболовка, 14, стр. 9.

при использовании мощного импульсного лазерного излучения (средняя мощность 25–30 Вт с частотой повторения импульсов 3–30 кГц, длительностью импульса 10 нс – 1 мкс, длина волны лазерного излучения 1.06 мкм, при температурах 3000–4000 °С и скоростях кристаллизации 80–100 м/сек). Технология основывается на фундаментальных исследованиях, выполненных лауреатами Нобелевской премии Ч. Таунсом (США), А. М. Прохоровым (ФИАН) и Г. А. Аскарьяном. Расчеты и прямые измерения мощностей импульсного лазерного излучения показывают, что в экспериментах используется надпороговое излучение. По расчётам Г. А. Аскарьяна: “Пороговая мощность – это мощность, при которой нелинейная рефракция соизмерима с дифракционной расходимостью и может компенсировать её” [2].

2. Лазерный луч при надпороговых мощностях, как показал Ч. Таунс, делится на множество составляющих его лучей пороговой мощности [3].

3. Согласно открытию Г. А. Аскарьяна самофокусировка происходит не только в жидкостях на протяжённых размерах, но и в пластиках, поскольку их показатели нелинейности близки. При этом происходит сильный выброс электронов из луча, который приводит к появлению пространственного заряда, вызывающего уход ионов в случае жидкой фазы или расплава. Одновременно происходит и выталкивание атомов из луча [4].

4. Эффект сублимационного испарения, открытый Г. А. Аскарьяном и Е. М. Морозом, показывает, что давление отдачи при испарении вещества под действием импульсов лазерного излучения превосходит световое давление в тысячи и десятки тысяч раз [5].

Разработанная технология позволила выращивать металлические нановискеры на основе чистых металлов и их сплавов [6], окислов металлов и металлоидов, полудрагоценных камней, которые невозможно кристаллизовать в обычных земных условиях (шаттукит) [7]. Технология позволяет создавать изображения в композитных материалах.

Удалось вырастить при помощи этой технологии уникальные изображения в денежных купюрах, паспортах и других ценных бумагах с хорошими защитными свойствами от фальсификации [8].

Эксперимент. Для описания технологии сначала покажем справедливость идеи Ч. Таунса и А. М. Прохорова о делении лазерного луча надпороговой мощности на лучи пороговой мощности.

Для подтверждения вышеуказанных утверждений были проведены следующие эксперименты: на поверхность пластика толщиной 1.2 мм наклеивалась тонкая алюминиевая фольга толщиной ~ 5 мкм. Такой образец облучался импульсами волоконного лазера с указанными выше характеристиками при средней мощности порядка 26 Вт.

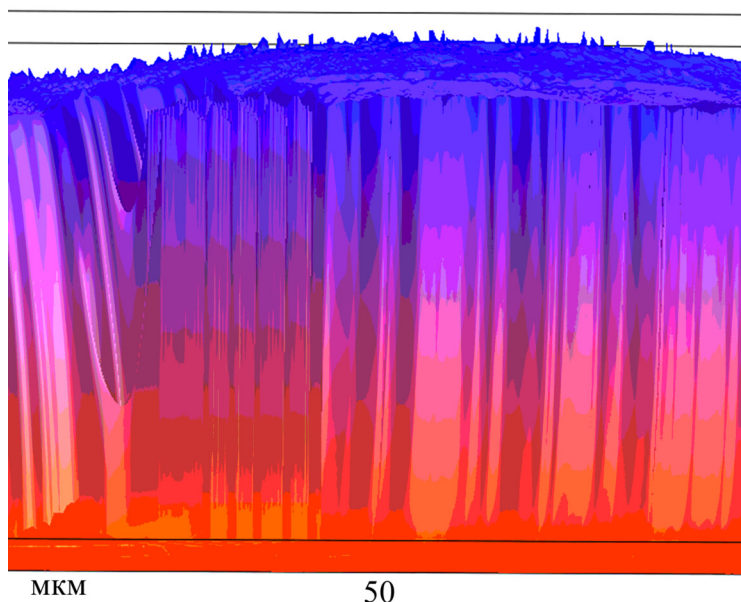


Рис. 1: Результат деления лазерного луча надпороговой мощности.

Результаты воздействия лазерного луча надпороговой мощности, разделённого на множество лучей пороговой мощности, проникающих в нижний слой пластика в таком образце, показаны на рис. 1. Картина получена при помощи атомно-силового микроскопа.

Облучённые образцы исследовали методами оптической микроскопии и на сканирующем зондовом микроскопе (АСМ) Certus Light V фирмы “Nano Scan Tech”.

В оптическом микроскопе наблюдалось удвоение точек от лазерных выстрелов (рис. 2). Судя по картине, эти точки представляют собой упорядоченные, воспроизводимые образования в зоне облучения в виде сдвоенных углублений, каждое из которых имеет размеры 0.2–0.3 мм в поперечнике и глубину около 5 мкм. Структуры на дне этих углублений и между ними состоят из сплава металла и пластика. Впервые процессы удвоения упорядоченных структур наблюдались в работе [9]. Важно отметить, что углубления имеют одинаковую форму и одинаковую по размерам граничную зону между ними. Для более детального исследования поверхности облучённых образцов и строения углублений они были изучены методом атомно-силовой микроскопии. Иссле-

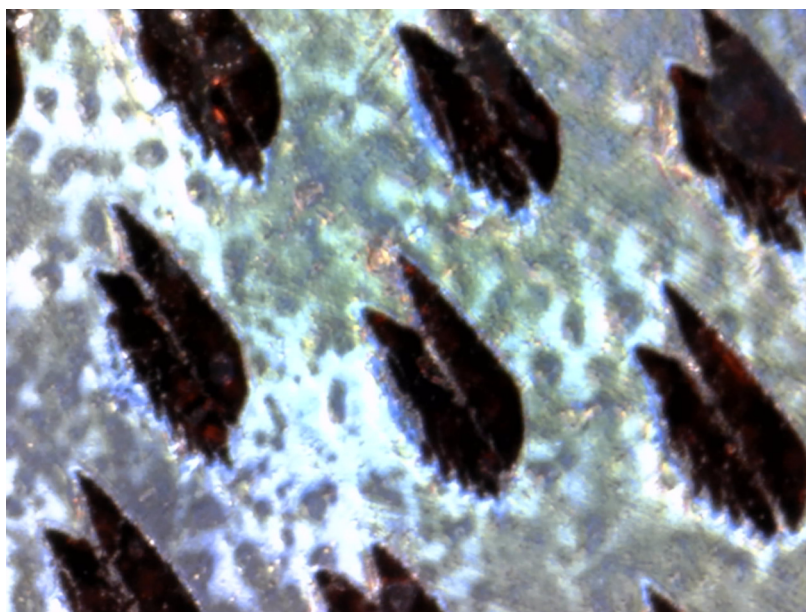


Рис. 2: Поверхность образца после лазерного облучения (оптический микроскоп).

довался рельеф как на дне точек от выстрелов, так и пространство между точками. Результаты представлены на рис. 3.

Из данных атомно-силовой микроскопии (рис. 3) следует, что граничная зона “а” между кристаллами представляет собой своеобразный массив с “частоклом” пиков высотой около 0.5–1 мкм с наноразмерными остриями. Наиболее крупные образования достигают размеров 3 мкм.

Для получения воспроизводимых изображений в более тонких образцах с толщинами 20–80 мкм был использован другой тип образцов, состоящий из алюминиевой фольги толщиной ~ 5 мкм и стеклянных линз диаметром ~ 20 мкм с различными люминофорами, вплавленных в пластик. Такие образцы были подвергнуты воздействию сканирующего лазерного излучения со скоростями ~ 2 м/с, и на них был получен результат, аналогичный рис. 3.

Обсуждение результатов. На основании проведённых экспериментов мы приходим к выводу, что при воздействии лазерного излучения на специально подготовленных подложках мы наблюдаем два явления: одновременно могут образовываться как монокристаллы – медь, шаттукит, так и нановискеры. Расчётные оценки показывают, что в экспериментах использовалась надпороговая импульсная мощность излучения, а прямые измерения и расчет показывают, что кристаллизация происходила в диапазоне температур 3000–4000 °C [10] при давлениях от 10000 до 100000 атм. в импульсе.

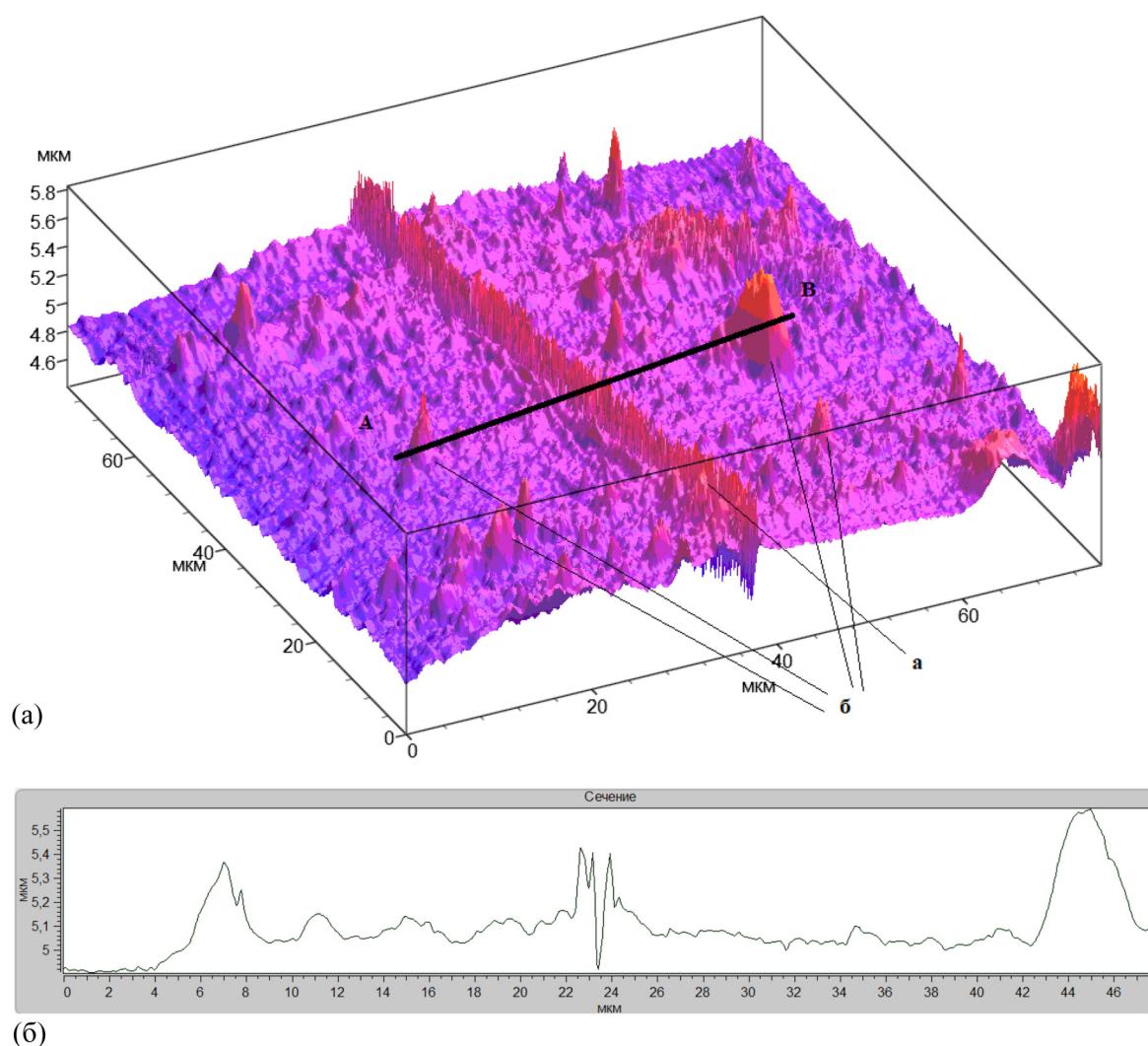


Рис. 3: (а) Строение поверхности (атомно-силовой микроскоп): “а” – частоток пиков граничной зоны между углублениями; “б” – симметричная зона на дне углублений. (б) Сечение вдоль линии АВ перпендикулярно граничной зоне.

Таким образом, на основе фундаментальных исследований, выполненных Таунсом, Прохоровым и Аскарьяном, нам удалось создать новую технологию кристаллизации.

Световое давление лазерного луча осуществляет внедрение испаряемого металла во внутрь пластика. При этом возникает эффект сублимационного испарения, при котором давление отдачи при испарении вещества под действием импульсов лазерного излучения превосходит световое давление в тысячи и десятки тысяч раз. Это сублимационное давление и приводит к образованию нановискеров (рис. 3).

Новый эффект роста нановискеров в лазерной плазме на открытом воздухе был подтверждён большим количеством воспроизводимых экспериментов, которые позволили выращивать нановискеры, состоящие из металлов и их сплавов, различных окислов, полудрагоценных камней, стёкол, композитных материалов.

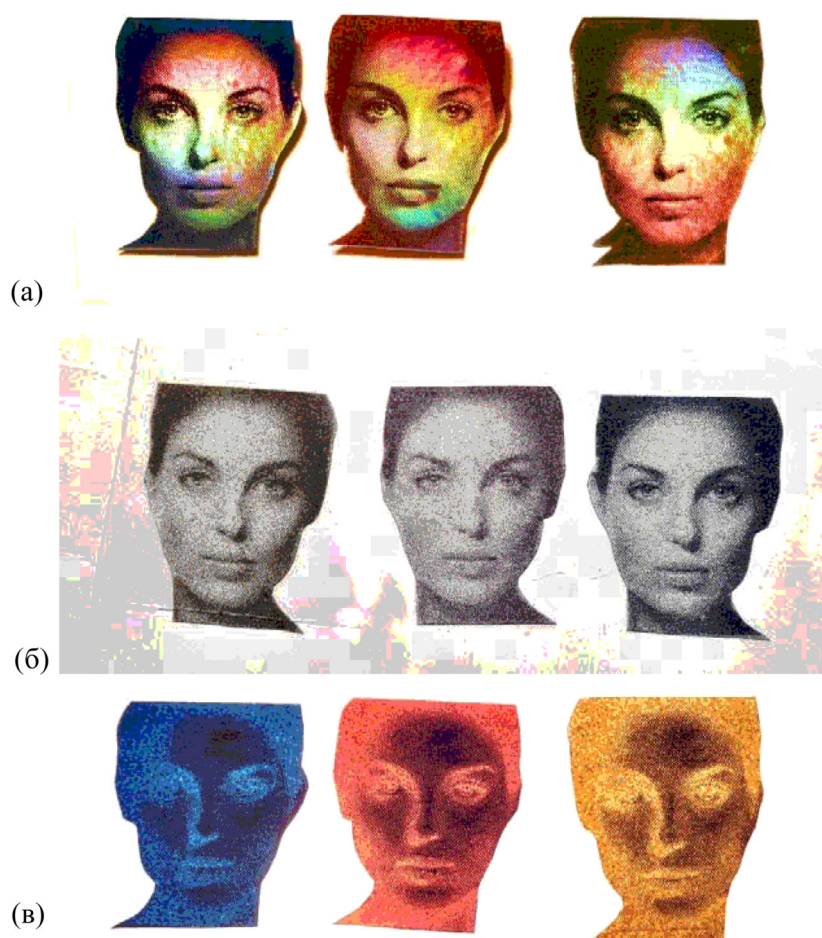


Рис. 4: Секретные изображения в тонких пленках, полученные при помощи стеклянных бикристаллов и нановискеров с тремя видимыми признаками: (а) цветное изменяющее цвет изображение в отражённом свете; (б) чёрно-белое с обратной стороны; (в) изображения в проходящем свете (в трех изображениях использованы разные люминофоры).

Выращенные нановискеры позволяют в сотни тысяч раз увеличить химическую активность поверхности материала, при этом на концах нановискеров один или несколько атомов с неспаренными электронами кардинально меняют физико-химические свойства

материала, что позволяет создавать высокоэффективные катализаторы, солнечные батареи, новый вид аккумуляторов.

Впервые в работе [11] В. В. Осико высказывает мысль о когерентном сращивании кристаллов, а также утверждение о том, что нановискеры предпочитают кристаллизоваться в виде двойниковых кристаллов. Образование двойниковых кристаллов является отличительным признаком роста нанокристаллов по механизму ориентированного сращивания. Имеются публикации, что сращивания ориентированных наночастиц наблюдались даже в стёклах [11].

Основываясь на этих экспериментах, мы предложили новую технологию выращивания наночастиц в тонких плёнках, используя вышеупомянутые эффекты деления лазерных лучей надпороговой мощности, эффекта самофокусировки, сублимационного испарения. Используя эти положения, нам впервые удалось создать изображения с тремя отличительными признаками (рис. 4).

Открытие этого эффекта позволяет надеяться на создание в России нового направления в технике и технологии по изготовлению химических катализаторов, литиевых батарей и аккумуляторов, солнечных батарей, систем квантовой связи и других специальных применений.

Одним из практических применений выращивания нановискеров в лазерной плазме явилась технология по защите ценных бумаг от фальсификации [6, 8, 12–14]. Технология позволяет создавать уникальные изображения со скоростями, близкими к скоростям печатных процессов. Эти изображения визуализируются при освещении белым светом, обладают ярко выраженной дисперсией и близки по восприятию к голографическим. Однако такая фотография (рис. 4) может быть создана в течение 20 секунд в единственном экземпляре для защиты паспортов и других идентификационных документов от подделки.

Все вышеперечисленное позволяет говорить о возникновении нового направления в науке и технологии: НАНОВИСКЕРОГРАФИИ.

Работа выполнена в рамках Госзадания на выполнение НИР 16.9298.2017/5.1 по теме “Изучение процессов кристаллизации пластмасс и композитов под воздействием мощного лазерного излучения” Министерства образования и науки РФ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Е. И. Гиваргизов, А. А. Чернов, Кристаллография **18**(1), 147 (1973).

- [2] Г. А. Аскарьян, УФН **111**(2), 249 (1973).
- [3] С. Н. Townes, Phys. Letter **13**, 479 (1964).
- [4] К. А. Богоносов, С. Н. Максимовский, ДАН **439**(5), 605 (2011).
- [5] Г. А. Аскарьян, Е. М. Мороз, ЖЭТФ **43**(6), 2319 (1962).
- [6] С. Н. Максимовский, Г. А. Радущкий, Патент РФ № 2532154, приоритет от 25.06.2013.
- [7] S. Maximovskii, A. Turyanskiy, K. Bogonosov, et al., Tecnol. Metal. Material Miner, Sao Paulo **13**(3), 248 (2016).
- [8] С. Н. Максимовский, Г. А. Радущкий, Патент РФ № 2279400, приоритет от 26.10.2004.
- [9] С. Н. Максимовский, А. Ю. Ставцев, В. И. Неделькин, Краткие сообщения по физике ФИАН **34**(12), 47 (2007).
- [10] К. А. Богоносов, Высокоскоростная кристаллизация меди в низкотемпературной лазерной плазме. Канд. диссертация в области физико-математических наук (МИ-СиС, Москва, 2015).
- [11] В. К. Иванов, П. П. Федоров, А. Е. Баранчиков, В. В. Осико, Успехи химии **83**(12), 1204 (2014).
- [12] С. Н. Максимовский, Г. А. Радущкий, Заявка на патент РФ № 2017119780, приоритет от 07.06.2017.
- [13] С. Н. Максимовский, Г. А. Радущкий, Патент РФ № 2537837, приоритет от 10.12.2013.
- [14] К. А. Bogonosov, A. Yu. Stavtsev and S. N. Maximovsky, International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET) **9**(1), 774 (2018). URL: <http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp?JType=IJMET&VType=9&IType=1>.

Поступила в редакцию 31 мая 2018 г.