

УДК: 621.315.612:546.62-31

Е.В. Саврук

## Получение периодических наноструктур $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ при воздействии лазерного излучения

Эффективным способом создания периодических наноструктур  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  на поверхности  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  является ее оплавление лазерным излучением с плотностью мощности  $10^5$ – $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> с помощью импульсного излучения или путем сканирования лазерным лучом по поверхности. Обработка поверхности керамики выполнена с использованием непрерывного и импульсного лазеров на ИАГ+Nd типа ЛТН-102 и Квант-12. Показано, что форма и размер образующихся периодических наноструктур зависят как от направления и скорости течения расплава, так и от ориентации отдельных зерен, по которым идет процесс затвердевания расплава.

**Ключевые слова:** алюмооксидная керамика, лазерная обработка, периодические наноструктуры.

Кристаллам светодиодов изначально присуща низкая светоотдача, связанная с высокими потерями излучаемого света из-за отражения и поглощения в конструкционных материалах. Большая часть излучаемого света отражается внутрь на границе раздела полупроводник–воздух, и только небольшая доля попадает наружу. Для преодоления данного недостатка было предложено много идей. Два основных подхода, применяемых сейчас в светодиодной индустрии, – это технология случайного текстурирования верхнего слоя р-GaN и технология отформованной сапфировой подложки, т.е. выращивание эпитаксиальных слоев GaN происходит на подвергнутой микрообработке подложке. Оба метода являются довольно дорогостоящими и трудоемкими и требуют применения специального технологического оборудования [1].

Наиболее перспективным и экономически выгодным является процесс создания периодических и квазипериодических светорассеивающих наноструктур на поверхности моно- и поликристаллических материалов с помощью мощного лазерного излучения. Создание периодических и квазипериодических наноструктур позволяет управлять оптическими свойствами поверхности материалов. Благодаря заданию определенных оптических свойств поверхности наблюдается повышение эффективности светоотдачи на 30–40%, т.к. формы границ раздела работают в качестве центров рассеивания или преломления, что снижает общее внутреннее отражение.

Эффективным способом создания периодических наноструктур на поверхности  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  является ее оплавление лазерным излучением с плотностью мощности  $10^5$ – $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> с помощью импульсного излучения или путем сканирования лазерным лучом по поверхности. Данные режимы обработки позволяют до минимума свести процессы испарения материала и рассматривать механизм оплавления поверхности как движение жидкой фазы за счет сил поверхностного натяжения.

В данной работе с помощью растровой электронной микроскопии исследовано влияние геометрии ванны расплава и направления течения жидкой фазы и движения фронта кристаллизации на наноструктуру образующихся на поверхности  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  новых фаз, в частности  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Для экспериментов были взяты образцы поликристаллической алюмооксидной керамики типа ВК-94-1 с содержанием примеси MgO 0,1–0,2 weight% в виде пластин размером 30×24×0,5 мм [2–3].

Обработка поверхности керамики выполнена с использованием непрерывного и импульсного лазеров на ИАГ+Nd типа ЛТН-102 и «Квант-12». Лазер ЛТН-102 работал в непрерывном режиме со средней мощностью излучения 10 Вт. Скорость движения луча лазера составила 10 см/с. Лазерный луч фокусировался в пятно диаметром 20 мкм. Лазер «Квант-12» работал в импульсном режиме с длительностью импульсов  $4 \cdot 10^{-3}$  с и энергией 4 Дж. Луч лазера фокусировался в пятно диаметром 50 мкм.

Исследование образовавшихся наноструктур на поверхности образцов проводилось на растровом электронном микроскопе Raith150<sup>TWO</sup> (Германия) с разрешающей способностью 2 нм.

Локальная скорость кристаллизации ванны расплава  $V_s$  определяется изменением угла ориентации наноструктуры в продольном сечении относительно вектора скорости движения луча лазера и вычисляется из выражения [4]

$$V_s = V_b \cdot \cos\theta, \quad (1)$$

где  $\theta$  – угол между направлениями роста структуры и скорости сканирования  $V_b$ , как показано на рис. 1.

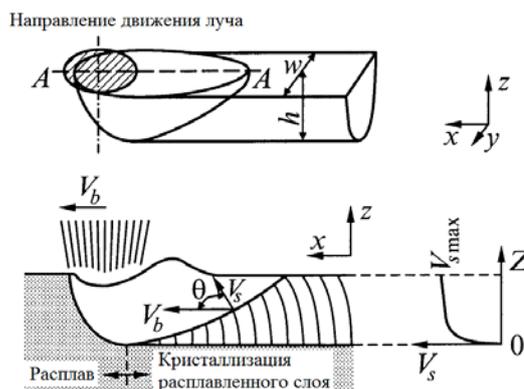


Рис. 1. Схема формы оплавленной ванны при лазерном нагреве [5]. В центральной плоскости  $XZ$  переоплавленной трассы скорость затвердевания  $V_s$  определяется скоростью движения луча лазера  $V_b$  и углом  $\theta$ ,  $w$  – ширина ванны,  $h$  – глубина ванны

Скорость  $V_s$  по оси  $OZ$  увеличивается от нуля (на дне зоны оплавления) до максимального значения (на поверхность), определяемого энергетическими характеристиками лазерного излучения. На дне ванны скорость  $V_s$  резко возрастает и затем переходит в состояние, когда  $V_s \approx \text{const}$  при значениях  $\theta = 60^\circ \dots 85^\circ$  [4].

Типичная форма оплавленной ванны во время лазерной термической обработки для большинства образцов, схематично показана на рис. 1, а внешний вид ванны расплава – на рис. 2 и 3.

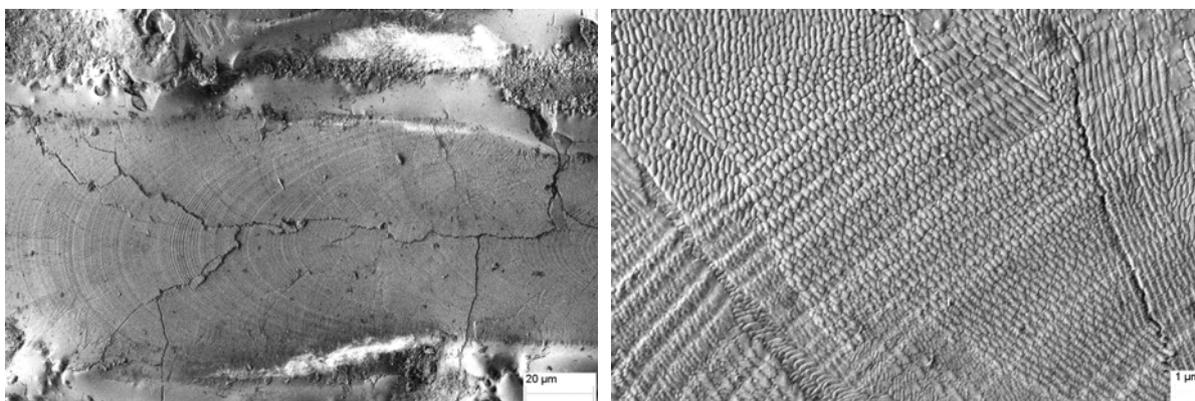


Рис. 2. Фотографии поверхности алюмооксидной керамики после сканирования лазерным лучом с плотностью мощности  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup> и скоростью сканирования 10 см/с

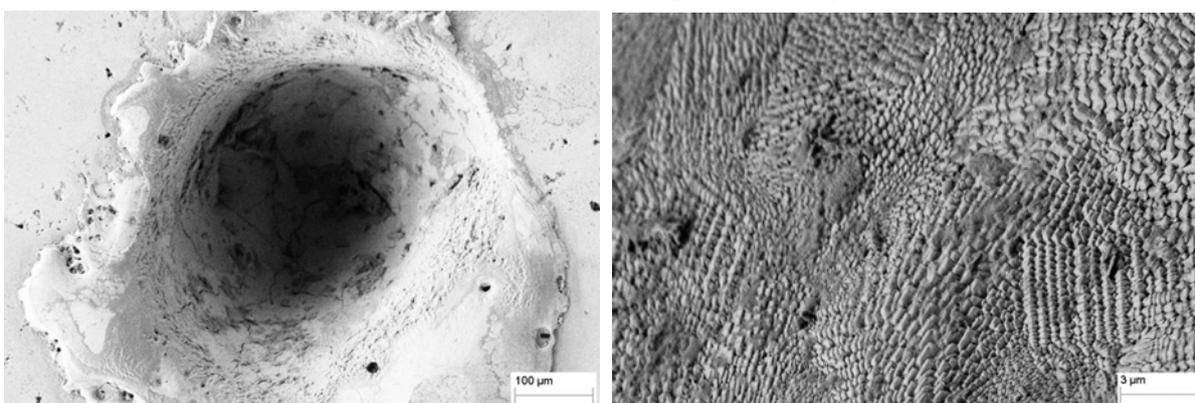


Рис. 3. Фотографии поверхности алюмооксидной керамики после импульсного воздействия с длительностью импульсов  $4 \cdot 10^{-3}$  с и энергией 4 Дж

Типичные размеры ванны при сканировании луча непрерывного лазера изменялись в пределах  $70 \text{ мкм} \geq w \geq 40 \text{ мкм}$  и  $50 \text{ мкм} \geq h \geq 30 \text{ мкм}$ . Поверхность ванны имела волнистую структуру с периодом порядка 1–2 мкм, обусловленную дискретностью перемещения образца с помощью линейного шагового двигателя (см. рис. 2).

При сканировании луча непрерывного лазера происходит кристаллизация расплавленного слоя вдоль поверхности материала. Характерный размер наноструктур составляет 200 нм. Отсутствие правильной огранки кристаллов указывает на неустойчивость процесса кристаллизации. В результате затвердевания расплава наблюдаются образования типа эпитаксиальных пленок  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ориен-

тация которых зависит от ориентации зерна, на поверхности которого они растут. Гипотеза об эпитаксиальном росте подтверждается ранее проведенным рентгенофазовым анализом [6].

При импульсной обработке ванна расплава имела коническую форму диаметром порядка 500 мкм и глубиной 250 мкм.

При импульсном воздействии излучения лазера на материал образующиеся структуры имеют правильную кубическую форму, что свидетельствует об образовании новой фазы –  $\gamma$ -фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Средний размер зерна составляет 150 нм. Кристаллизация материала зависит от ориентации зерен. Это также подтверждается результатами рентгенофазового анализа [6].

Показано, что с помощью лазерной обработки возможно образование наноструктуры на поверхности поликристаллических материалов. При этом форма и размер кристаллитов зависят как от направления и скорости течения расплава, так и от ориентации отдельных зерен. Таким образом, появляется возможность управления оптическими, механическими и электрическими свойствами поверхности за счет ориентированных определенным образом структурных образований.

Наноструктурирование может быть использовано при создании высокоэффективных полупроводниковых источников света и дифракционных оптических приборов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 73/10 от 15.07.2010 в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ и в рамках гранта «У.М.Н.И.К.» фонда Бортника (Госконтракт № 8725р/13139 от 14.01.2011).

#### *Литература*

1. Ли К.Д. Наноформовка увеличивает эффективность светодиодов / К.Д. Ли, Р. Сжодин, Т. Эрикссон // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 5. – С. 22–24.
2. Саврук Е.В. Структура поверхности алюмооксидной керамики после лазерной обработки / Е.В. Саврук, С.В. Смирнов, А.Н. Швайцер // Известия вузов. Физика. – 2008. – Т. 51, № 11/2. – С. 114–117.
3. Саврук Е.В. Наноструктурирование поверхности алюмооксидной керамики с помощью лазерных и электронных пучков // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22), ч. 1. – С. 204–206.
4. Галенко П.К. Высокоскоростная кристаллизация конструкционной стали при лазерной обработке поверхности / П.К. Голенко, Е.В. Харанжевский, Д.А. Данилов // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72, вып. 5. – С. 48–55.
5. Gremaud M. The Microstructure of Rapidly Solidified Al-Fe Alloys Subjected to Laser Surface Treatment / M. Gremaud, M. Carrard, W. Kurz // Acta Metall Mater. – 1990. – № 38 (12). – P. 2587–2599.
6. Саврук Е.В. Исследование структуры поверхности подложек ГИС СВЧ из алюмооксидной керамики после электронной и лазерной обработки / Е.В. Саврук, С.В. Смирнов // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 1 (21), ч. 2. – С. 123–127.

---

#### **Саврук Елена Владимировна**

Аспирант каф. физической электроники ТУСУРа

Тел.: 8-923-406-27-69

Эл. почта: savruk@mail.ru

Savruk E.V.

#### **Production of periodic $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ nanostructures using intense laser radiation**

Fusion is an effective method of creation periodic  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanostructures on  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  surface. For this purpose laser radiation is used with density of capacity  $10^5$ – $10^6$  W/cm<sup>2</sup> by means of pulse radiation or scanning by a laser beam on a surface. The ceramics surface treatment is made using both continuous and pulse lasers based on YAG+Nd type «LTN-102» and «Quantum-12». It is shown, that the form and the size of formed periodic nanostructures depends on both direction and speed of current melt, and grains orientation on which there is a process of melt solidification.

**Keywords:** aluminum oxide ceramics, laser processing, periodic surface nanotexturing.