

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было осуществлено исследование влияния морфологии на решеточную составляющую теплопроводности тонких пленок Si/Ge. Было установлено, что на коэффициент решеточной составляющей теплопроводности влияют такие параметры, как толщина пленки и ориентация свободной поверхности. Для разных кристаллографических ориентаций теплопроводность отличается в несколько раз. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшем поиске полупроводниковых структур с минимальной решеточной теплопроводностью для термоэлектрических приложений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Иоффе, Ф. Полупроводниковые термоэлементы / Ф. Иоффе. – Изд. АН СССР, М. – Л., 1956, 103 с.
2. G. A. Slack. New materials and performance limits for thermoelectric cooling / CRC handbook of thermoelectric, Edited by Rowe, D. M. CRC Press, Boca Raton, 1995, pp. 407–440.
3. A. Stukowski, Model. Simul. Mater. Sci. Eng. 18 (2010) 015012. <https://ovito.org>.
4. JMol: an open-source Java viewer for chemical structures in 3D. <https://jmol.org>.
5. Steve Plimpton. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics / J. of Computational Physics, Volume 117, Issue 1, 1 March 1995, Pages 1–19.
6. Yuping He. Lattice Thermal Conductivity of Semiconducting Bulk Materials: Atomistic Simulations / Yuping He, Ivana Savić, Davide Donadio, Giulia Galli // Phys Chem Chem Phys. 2012 Dec 21;14(47):16209–22.
7. Prediction of the thermal conductivity anisotropy of Si nanofilms. Results of several numerical methods / Damian Terris [et al.] // International Journal of Thermal Sciences. – 2009. – V. 48. – P. – 1467-1476.
8. Xinjiang Wang. Computational Study of In-Plane Phonon Transport in Si Thin Films / Xinjiang Wang, Baoling Huang // Scientific reports. – 4(1):6399 – 2014.
9. Hossein Karamitaheri. Ballistic phonon transport in ultra-thin silicon layers: Effects of confinement and orientation / Hossein Karamitaheri, Neophytos Neophytou, Hans Kosina // Journal of Applied Physics 113, 204305 (2013).
10. Z. Aksamija. Anisotropy and boundary scattering in the lattice thermal conductivity of silicon nanomembranes / Z. Aksamija, I. Knezevic // Phys. Rev. B 82, 045319. – 2010.
11. P. Heino. Dispersion and thermal resistivity in silicon nanofilms by molecular dynamics / The European Physical Journal B., 60, 171-179, – 2007.

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ НА ОКСИД АЛЮМИНИЯ

**Н. Н. Черенда<sup>1</sup>, В. В. Углов<sup>1</sup>, В. М. Асташинский<sup>2</sup>, А. М. Кузьмицкий<sup>2</sup>,  
Ж. З. Шерматов<sup>3</sup>, М. Х. Арипова<sup>4</sup>**

---

<sup>1</sup>) Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, 220030 г. Минск, Республика Беларусь, [cherenda@bsu.by](mailto:cherenda@bsu.by), [uglov@bsu.by](mailto:uglov@bsu.by)

<sup>2</sup>) Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, ул. П. Бровки 15, 220072 г. Минск, Республика Беларусь, [ast@hmti.ac.by](mailto:ast@hmti.ac.by), [antey@hmti.ac.by](mailto:antey@hmti.ac.by)

<sup>3</sup>) Институт материаловедения НПО «Физика-Солнце» АН РУз, Ташкентская обл., Паркентский р-н, 102226 п. «Солнце», Республика Узбекистан, [shermatov-82@bk.ru](mailto:shermatov-82@bk.ru)

<sup>4</sup>) Ташкентский химико-технологический институт, ул. Навоий 32, 100011 г. Ташкент, Республика Узбекистан, [aripova1957@yandex.ru](mailto:aripova1957@yandex.ru)

В данной работе было исследовано влияние воздействия компрессионных плазменных потоков на поверхностный слой оксида алюминия. Рентгеноструктурный анализ, растровая электронная микроскопия и профилометрия были использованы для проведения исследований. Установлено, что плазменное воздействие сопровождается процессами эрозии, плавления, развитием гидродинамических неустойчивостей на границе плазма-расплав и кристаллизации поверхностного слоя в условиях сверхбыстрого охлаждения. Увеличение энергии, поглощаемой поверхностным слоем, ведет к увеличению интенсивности эрозии. Поверхностный слой после воздействия характеризуется развитой шероховатостью и волнистостью, параметры которых зависят от режимов воздействия. Наблюдается формирование ячеисто-дендритной структуры, а также поверхностных пор и трещин. После плазменного воздействия в анализируемом слое наблюдается уменьшение содержания  $\beta$ ,  $\sigma$ ,  $\delta$  и  $\kappa$  полиморфных модификаций  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , и появление низкотемпературной модификации  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

**Ключевые слова:** оксид алюминия; полиморфные превращения; рентгеноструктурный анализ; растровая электронная микроскопия; компрессионные плазменные потоки.

## DYNAMIC PHENOMENA DURING HIGH TEMPERATURE PLASMA FLOWS IMPACT WITH ALUMINIUM OXIDE

N. N. Cherenda<sup>1</sup>, V. V. Uglov<sup>1</sup>, V. M. Astashynski<sup>2</sup>, A. M. Kuzmitski<sup>2</sup>,  
J. Z. Shermatov<sup>3</sup>, M. H. Aripova<sup>4</sup>

---

<sup>1)</sup> *Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus*

<sup>2)</sup> *A.V.Lykov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of sciences of Belarus, P. Brovka str. 15, 220072 Minsk, Belarus*

<sup>3)</sup> *Institute of Material Science of SPA «Physics-Sun» AS RUz, Tashkent region, Parkent district, 102226 “Sun” settlement*

<sup>4)</sup> *Tashkent chemical-technological institute, Navoiy str. 32, 100011 Tashkent, Uzbekistan*  
*Corresponding author: N.N. Cherenda (cherenda@bsu.by)*

The effect of compression plasma flow impact on alumina surface layer was investigated in this work. X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy and profilometry were used for surface layer characterization. The findings showed that erosion, melting, development of hydrodynamic instabilities on the plasma-melt border and crystallization in conditions of high cooling rate accompanied the plasma impact with the surface. Increase of the energy absorbed by the surface layer led to the growth of erosion intensity. Surface layer was characterized by developed roughness and waviness the parameters of which were depended on plasma treatment regimes. Cell-dendritic structure as well as pores and cracks were observed on the surface. Decrease of  $\beta$ ,  $\sigma$ ,  $\delta$  and  $\kappa$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  polymorphic modifications content and appearance of  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  was found in the analyzed layer after plasma impact.

**Key words:** alumina; polymorphic transformations; X-ray diffraction analysis; scanning electron microscopy; compression plasma flows.

## ВВЕДЕНИЕ

Оксид алюминия – один из основных материалов, используемых для создания прочных керамических изделий, подложек микросхем, материалов окон в установках термоядерного синтеза и космических аппаратов, способных эксплуатироваться в условиях повышенных термических и радиационных нагрузок [1, 2]. Активно проводятся исследования по созданию композитов на основе оксида алюминия с включениями металлов, с целью создания слоев с заданными электрическими и магнитными свойствами в керамической матрице. Такие композиты могут быть созданы в поверхностном слое оксида путем воздействия на систему металлическое покрытие/оксид высокотемпературными плазменными потоками. При воздействии на такую систему в режиме плавления происходит легирование поверхностного слоя материала элементами покрытия за счет конвективного перемешивания расплава иницированного гидродинамическими неустойчивостями. Последующая кристаллизация в условиях сверхбыстрого охлаждения ведет к формированию поверхностного композита, микроструктура которого определяется условиями плазменного воздействия. Вместе с тем, первоначально необходимо изучить физические процессы, возникающие при воздействии высокотемпературных плазменных потоков на оксид алюминия.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлись цилиндрические образцы диаметром 14 мм и толщиной 3 мм, полученные прессованием и последующим спеканием при температуре до 1700°C с выдержкой до 2 часов. В состав порошка оксида алюминия были добавлены 5 масс.% каолина АКС-30 и 5 масс.% доломита Дехканабадского, основными составляющими которых, помимо  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , были  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{CaO}$ . Полученные образцы обрабатывались тремя импульсами компрессионных плазменных потоков, генерируемых магнитоплазменным компрессором компактной геометрии [3]. Начальное напряжение на конденсаторной батарее было 4 кВ. Расстояние между образцом и срезом катода электроразрядной системы изменялось в диапазоне 8–12 см. Уменьшение этого расстояния ведет к увеличению энергии, поглощаемой поверхностным слоем при воздействии плазмы. Эксперименты проводили в режиме “остаточного газа”, при котором предварительно откачанную вакуумную камеру заполняли рабочим газом – азотом до

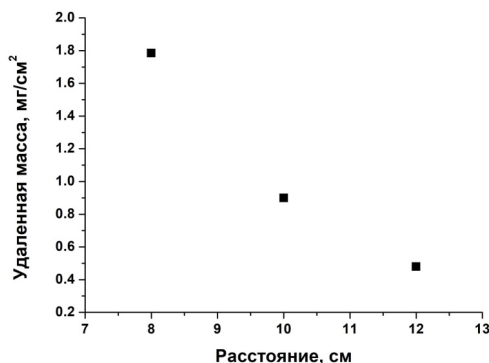


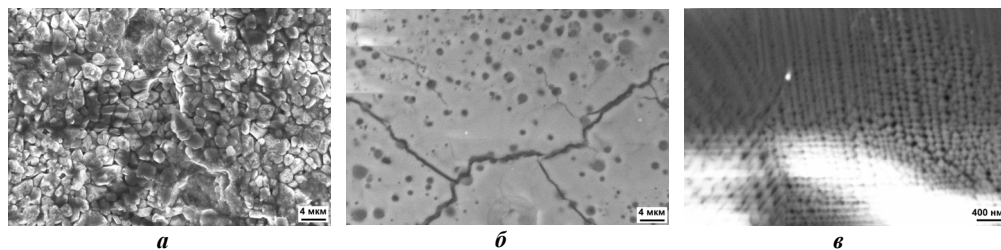
Рисунок 1. – Зависимость удаленной массы от расстояния между образцом и срезом катода

давления 400 Па. Фазовый состав исследовался методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV в излучении  $\text{CuK}\alpha$  в фокусировке параллельных пучков. Морфология поверхности и поперечного сечения образцов изучалась с использованием растрового электронного микроскопа LEO1455VP. Для определения параметров шероховатости поверхности использовался профилометр MarSufSD 26. Измерение массы образцов, для исследования эрозии поверхности, проводились на аналитических весах RADWAG AS/60/220/C/2/N (абсолютная погрешность не превосходила 0,05 мг).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из процессов, протекающих при воздействии высокотемпературных плазменных потоков на поверхность материалов, является эрозия. На рисунке 1 представлены результаты измерения потери массы образцов при воздействии. Как видно из рисунка, уменьшение расстояния между образцом и срезом катода ведет к увеличению потери массы, что связано с увеличением энергии, поглощаемой поверхностным слоем и увеличением интенсивности эрозии. Основным механизмом эрозии, вероятно, является испарение [2]. Для образца оксида алюминия, обработанного на расстоянии 10 см, величина удаленной массы  $0.3 \text{ мг/см}^2/\text{импульс}$  является ожидаемо меньшей, чем для металлических материалов в аналогичных условиях воздействия:  $2.6 \text{ мг/см}^2/\text{импульс}$  для аустенитной нержавеющей стали X18H10T и  $0.7 \text{ мг/см}^2/\text{импульс}$  для технически чистого железа.

Воздействие компрессионных плазменных потоков приводит к существенному изменению морфологии поверхности (рисунок 2). После прессования на поверхности видны частицы порошка размером несколько микрометров (рисунок 2, а). После плазменного воздействия поверхностный слой представляет собой сплошной материал, сформированный в результате плавления и последующей кристаллизации (рисунок 2, б). В поверхностном слое после воздействия также наблюдаются поры и трещины. Возникновение пор может быть связано с наличием в расплаве материала газообразующего элемента – кислорода [2]. Появлением термоупругих напряжений на стадии охлаждения расплава приводит к формированию трещин [4]. При большем увеличении (рисунок 2, в) в поверхностном слое также наблюдается формирование ячеисто-дендритной структуры, характерной для кристаллизации в условиях сверхбыстрого охлаждения.



**Рисунок 2. – Морфология поверхности образца до (а) и после (б, в) воздействия компрессионными плазменными потоками на расстоянии 10 см от среза катода**

Развитие гидродинамических неустойчивостей на границе плазма-расплав обуславливает изменение шероховатости и волнистости поверхности (Таблица). В частности плазменное воздействие, в результате плавления ведет к уменьшению параметров шероховатости, по сравнению с исходным образцом, но в то же время – к увеличению волнистости поверхности, что характерно для воздействия высокотемпературных плазменных потоков на металлы [5]. Однако, в отличие от металлических материалов [5], где с увеличением поглощенной энергии наблюдается уменьшение параметров шероховатости, и рост волнистости, в данном случае при увеличении поглощенной энергии наблюдается рост как параметров шероховатости, так и волнистости. Вместе с тем, образование пор и раковин (рисунок 2) также может оказывать влияние на результирующее значение параметров морфологии поверхности.

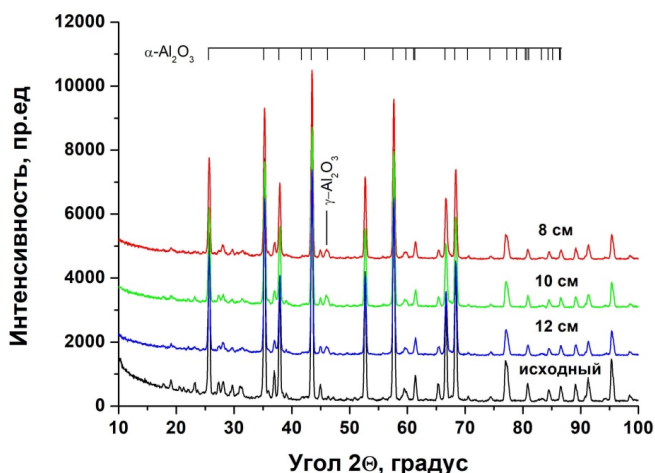
Анализ фазового состава исходного образца показал, что основной фазой после спекания является корунд  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (рисунок 3). Кроме того, на дифрактограмме присутствовали пики малой интенсивности, которые соответствовали полиморфным модификациям  $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\sigma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$  и  $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Присутствие оксидов кремния, кальция и магния обнаружено не было.

Таблица

**Параметры шероховатости ( $R_a$ ,  $R_{max}$ ) и волнистости ( $W_a$ ) поверхности исходного образца и образцов, обработанных компрессионными плазменными потоками на различном расстоянии от среза катода**

Параметр	Исходный	12 см	10 см	8 см
$R_a$ , мкм	2,05	1,88	1,94	1,97
$R_{max}$ , мкм	28,99	16,22	21,40	23,31
$W_a$ , мкм	1,87	1,94	1,91	3,78

После плазменного воздействия наблюдается уменьшение интенсивности дифракционных линий, соответствующих  $\beta$ ,  $\sigma$ ,  $\delta$  и  $\kappa$  полиморфным модификациям  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Кроме того, обнаружено появление дифракционной линии, которая может быть идентифицирована как  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Следует отметить, что аналогичный эффект наблюдался и при воздействии компрессионных плазменных потоков на анодный оксид алюминия [6]. Известно, что  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  является первой кристаллической фазой,



**Рисунок 3. – Дифрактограммы образцов до и после воздействия компрессионными плазменными потоками на различном расстоянии от среза катода**

формирующейся при отжиге аморфного оксида алюминия [7]. Таким образом, при кристаллизации расплава поверхностного слоя в условиях быстрого охлаждения наиболее стабильной оказывается низкотемпературная фаза  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , которая согласно данным, представленным в [6] формируется на поверхности кристаллизовавшегося слоя. В свою очередь, это приводит к уменьшению объемной доли других полиморфных модификаций в анализируемом рентгеновском пучком слое.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, воздействие компрессионных плазменных потоков на оксид алюминия, полученный прессованием и спеканием, приводит к формированию перекристаллизованного слоя, характеризующегося присутствием трещин и пор на поверхности, а также уменьшением параметров шероховатости и увеличением параметра волнистости поверхности.  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  является основной фазовой составляющей до и после воздействия.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Использование установок “Плазменный Фокус” в испытаниях керамических материалов, перспективных для элементов внутренних стенок камер токамаков / В. А. Грибков, Е. В. Дёмина, В. Н. Пименов // Перспективные материалы.– 2011.– № S13.– С.263–272.
2. Повреждаемость оксида алюминия мощными импульсными потоками ионов, плазмы и лазерного излучения / С.А. Масляев, Е.В. Морозов, П.А. Ромахин // Физика и химия обработки материалов.– 2015.– №3.– С.5–17.
3. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками / В.В. Углов [и др.].- Минск: БГУ, 2013.– 248 с.
4. Damages on pure tungsten irradiated by compression plasma flows / M.Qu, F.Kong, S.Yan // Nuclear Inst. and Meth. Phys. Res. B.– 2019.– Vol. 444.– P. 33–37.
5. Формирование рельефа поверхности металлической мишени при воздействии компрессионных плазменных потоков / В. М. Асташинский, А. Я. Лейви, В. В. Углов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.– 2014.– № 6.– С. 12–17.
6. Модификация структуры и фазового состава поверхностного слоя анодного оксида алюминия под действием компрессионных плазменных потоков / Н.Н. Черенда, В.В. Углов, С.В. Гусакова // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 13-й Междунар. конф. (Минск, Беларусь, 30 сент. – 3 окт. 2019 г. ) / БГУ; редкол.: В. В. Углов (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2019. – С. 501–504.
7. Исследование полиморфных превращений в оксиде алюминия / В.В. Сторож, Г.Я. Якимов, И.В. Горелик // Журнал технической физики.– 1996.– Т.66, № 9.– С. 86–97.

## АЛЛОТРОПИЯ МОЛЕКУЛ, ВХОДЯЩИХ В КЛАСТЕР ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ

Ю. Шмермбекк

---

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. Петруся Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь,  
e-mail: julia.schmerbeck@mail.ru*

С помощью разработанной модели формирования молекулярных и кластерных структур с учетом ковалентной, ионной, наведенной, электрон-дипольной и диполь-дипольной связи удалось расчетным методом получить результаты, которые согласуются с экспериментальными. В конденсированном состоянии кластеры кремния формируются трехатомными молекулами (или тримерами). Теоретически и экспериментально обоснована конструкция поверхности кристаллического кремния и осажденного на него индия. Благодаря такой модели стало возможным объяснение динамики осаждения индия на кремний и отличные друг от друга свойства отдельных структурных ячеек на поверхности кристаллического кремния.

**Ключевые слова:** кремний; поверхность кремния; кластеры; взаимодействие частиц в кластере; межкластерное взаимодействие; индий; кластеры индия; аллотропия молекул.