

УДК 539.534.9

## СИНТЕЗ ОКСИДА ГАЛЛИЯ В ТРЕКОВЫХ ТЕМПЛЭЙТАХ

**Джунисбекова Диана Алтаевна**

[1991.11.15@mail.ru](mailto:1991.11.15@mail.ru)

Докторант 1 курса по специальности «8D05323 – Техническая физика»  
Евразийский Национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан  
Научный руководитель – Даулетбекова А.К.

Целью данного исследования является обоснование синтеза нанопроволок оксида галлия ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) в трековых темплэйттах  $\text{SiO}_2$ нанопоп/ $\text{Si}$ .

В настоящее время возрос интерес к трековым технологиям и особый интерес для микроэлектроники представляют треки быстрых ионов в диоксиде кремния на кремнии, так как легко встраиваются в кремниевые технологии.

Структура  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  формируется термическим оксидированием кристаллов кремния в атмосфере влажного кислорода при  $T=900^\circ\text{C}$ . Облучение приводит к созданию треков. В работе Ф.Ф. Комарова [1] описывается трекообразование неорганических изоляторов. Трекообразование происходит за счет ионизационного торможения быстрых ионов. Наличие пороговой величины  $(dE/dx)_{e,th}$  и ее значение является важным для трекообразования. Треки могут быть непрерывными и прерывистыми. Непрерывные треки регистрируются в  $\text{SiO}_2$  для диапазонов потерь энергии тяжелых ионов 1 – 5 кэВ/нм. Трековые области в нем находятся в аморфном состоянии. Пороговые потери энергии  $(dE/dx)_{e,th}$  для образования треков в  $\text{SiO}_2$  принимает значения  $(dE/dx)_{e,th} = 2 \text{ кэВ нм}^{-1}$  [2].

Энергетические потери  $(dE/dx)$  ионов делятся на два типа: электронные (ионизационные)  $(dE/dx)_e$  и ядерные (упругие)  $(dE/dx)_n$ . Зависимость удельных ионизационных потерь энергии и упругих потерь энергии от глубины приведена на рисунке 1, они были рассчитаны с использованием кода SRIM 2008 [3].

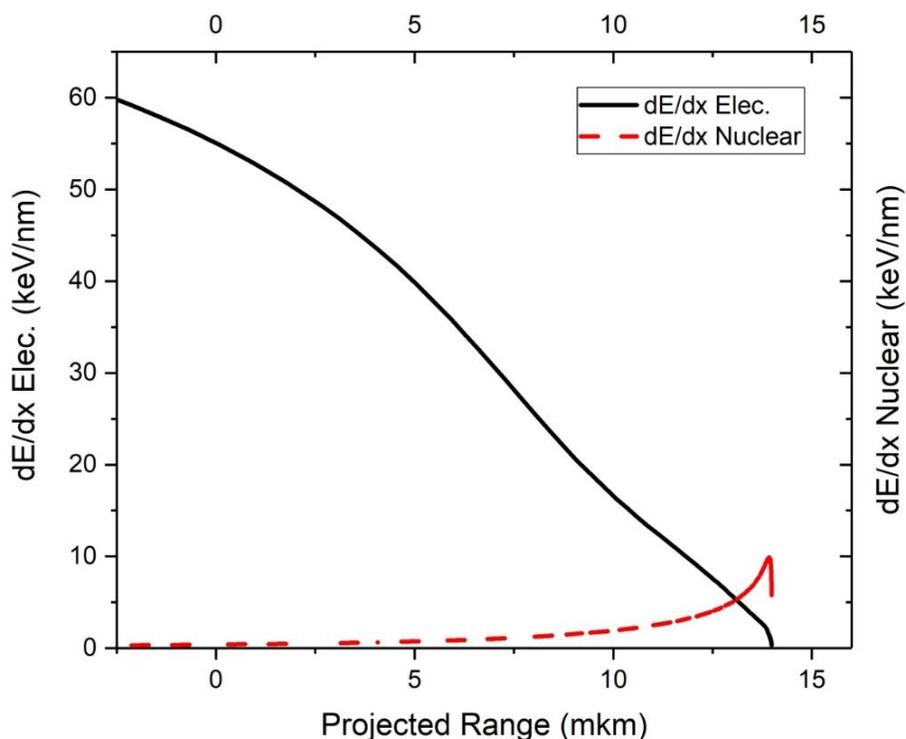


Рисунок 1 - График зависимости электронных и ядерных потерь энергии для диоксида кремния SiO<sub>2</sub> облученного ионами 200 МэВ Хе, рассчитанные с помощью SRIM-2008 [3]

В таблице 1 приведены параметры облучения ионом 200 МэВ Хе в диоксиде кремния.

Таблица 1 - Параметры облучения

Ион	Энергия, МэВ	Флюенс, ион/см <sup>2</sup>	S <sub>e</sub> , кэВ/нм	S <sub>n</sub> , кэВ/нм	R, мкм
Хе	200	10 <sup>7</sup> –10 <sup>8</sup>	65,91	0,2254	7,07

После облучения структура SiO<sub>2</sub>/Si травится в водных растворах HF. В зависимости от времени травления получаем нанопоры различных диаметров. Далее осуществляется процесс заполнения нанопор различными материалами. В нашем случае мы рассматриваем возможность осаждения оксида галлия.

Оксид галлия вызывает значительный интерес как функциональный материал для различных применений. Оксид галлия Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> принадлежит к семейству проводящих прозрачных полупроводниковых оксидов. Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> исследовался с точки зрения микроволновых и оптических лазерных исследований в качестве материала для люминофоров и электролюминесцентных устройств, для химического зондирования и катализа, в качестве прозрачных проводящих покрытий и т.д. Нанопроволоки Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> могут иметь различные применения, такие как полевые транзисторы на основе нанопроволок Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, газовые сенсоры и фотодетекторы глубокого УФ-излучения. За последнее несколько десятков лет оксид галлия (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) стал перспективным широкозонным полупроводником [4].

В зависимости от условий получения оксид галлия может образовывать несколько различных полиморфов, таких как  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -,  $\delta$ -,  $\epsilon$  [5]. Также сообщалось о временном полиморфе  $\kappa$ - Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [6]. Полиморфы различаются не только пространственной группой кристаллов, но и координационным числом ионов Ga. Все эти фазы оксида галлия можно приготовить в определенных условиях [5,7].

$\beta$ -форма представляет собой наиболее распространенный и хорошо изученный полиморф оксида галлия.  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> является единственным стабильным полиморфом во всем диапазоне температур до точки плавления, в то время как все остальные полиморфы являются метастабильными и превращаются в  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при температурах выше 750-900 ° C [8]. Термическая стабильность  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> позволяет получать объемные монокристаллы и эпитаксиальные пленки с помощью высокотемпературных процессов, таких как кристаллизация из расплава или эпитаксия из паровой фазы. Среди других полиморфов оксида галлия  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> привлек больше внимания исследователей из-за своей доступности и выдающихся свойств.

Существует проблемы выращивания пленок политипа  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с высоким кристаллическим качеством и контролируемым легированием, учитывая, что рост происходит на чужеродных подложках, чаще всего на сапфире.

Недавно пленки  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с высоким кристаллическим свойством были выращены методом химического осаждения из газовой фазы (MIST CVD), разновидности металлоорганического химического осаждения из газовой фазы (MOCVD) на сапфир в базовой плоскости [9,10]. С помощью использования галогенной парофазной эпитаксии (HVPE), эпитаксиального латерального зарастания (ELO) для скрытого роста на сапфире можно улучшить кристаллическое свойство [11]. Если не использовать ELO, кристаллическое свойство пленок  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, выращенных методом HVPE на сапфире, улучшается по мере увеличения толщины пленки с ~2 мкм до 12 мкм [12].

Исследование связано с разработкой процессов формирования нанопроволок оксидов галлия в трековых темплейтах SiO<sub>2</sub><sub>нанопор</sub>/Si. Такие нанокompозиты вызывают интерес с точки зрения возможного применения в фотонике и сенсорике.

#### Список использованных источников

1. Комаров Ф.Ф. Дефектообразование и трекообразование в твердых телах при облучении ионами сверхвысоких энергий // Успехи физических наук, Т. 173, №12, 2003.
2. N. Itoh, A.M. Stoneham Excitonic model of track registration of energetic heavy ions in insulators // Nucl. Instrum. Meth. B., [V. 146, Issues 1–4](#), 1998, P. 362-366.
3. SRIM-2008 based on J.F. Ziegler, J.P. Biersak, U. Littmark The Stopping and Range of Ions in Solid // New York: Pergamon Press, 1985.
4. L. de Boisbaudran // Philos. Mag. Ser. 4, 414, 1875.
5. R. Roy., V.G. Hill and E.F. Osborn Polymorphism of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and the System Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—H<sub>2</sub>O // J. Am. Chem. Soc., 74, 3, 1952, P. 719–722.
6. H.Y. Playford, A.C. Hannon, E.R. Barney and R.I. Walton Structures of Uncharacterised Polymorphs of Gallium Oxide from Total Neutron Diffraction // Chem. - A Eur. J. V. 19, Issue 8, 2013, P. 2803-2813.
7. L. Li, W. Wei and M. Behrens Synthesis and characterization of  $\alpha$ -,  $\beta$ -, and  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> prepared from aqueous solutions by controlled precipitation // Solid State Sci. [V. 14, Issue 7](#), 2012, P. 971-981
8. S.D. Lee, K. Akaiwa and S. Fujita Thermal stability of single crystalline alpha gallium oxide films on sapphire substrates // Phys. Status Solidi, V. 10, Issue 11, 2013, P. 1592-1595.

9. K. Kaneko, S. Fujita and T. Hitora A power device material of corundum-structured  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fabricated by MIST EPITAXY<sup>®</sup> technique // J. Appl. Phys., V. 57, №2S2, 2018.
10. M. Oda, R. Tokuda, H. Kambara, T. Tanikawa, T. Sasaki and T. Hitora Schottky barrier diodes of corundum-structured gallium oxide showing on-resistance of 0.1 m $\Omega$ ·cm<sup>2</sup> grown by MIST EPITAXY // Appl. Phys. Express, V. 9, №2, 2016.
11. Y. Oshima, K. Kawara, T. Shinohe, T. Hitora, M. Kasu and S. Fujita Epitaxial lateral overgrowth of  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by halide vapor phase epitaxy // APL Mater., V. 7, Issue 2, 2019.
12. A.I. Pechnikov, S.I. Stepanov, A.V. Chikiryaka, M.P. Shcheglov, M.A. Odnoblyudov and Nikolaev V.I. Thick  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films grown on sapphire by halide vapor phase epitaxy // Russ. Phys. Semicond. V. 6, 789, 2019.