

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОКСИДА ГАЛЛИЯ

Гузилова Л.И.¹, Гращенко А.С.², Печников А.И.^{1,3}, Николаев В.И.^{1,3}¹ ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия² Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия³ ООО «Совершенные кристаллы», Санкт-Петербург, Россия

guzilova@mail.ioffe.ru

Оксид галлия (Ga_2O_3) – новый широкозонный полупроводниковый материал, перспективный для использования в полупроводниковой технике [1]. Интерес к исследованию механических свойств кристаллов и эпитаксиальных слоёв обусловлен тем, что при конструировании полупроводниковых приборов наряду с электрическими и оптическими свойствами используемых материалов, необходимо знать их механические характеристики, которые дают возможность оценить возникающие напряжения и деформации в материале, как при процессе роста монокристаллов или эпитаксиальных плёнок, так и, например, при механической обработке материала.

Одним из универсальных методов оценки механических свойств материалов является метод наноиндентирования [2], суть которого заключается во внедрении в приповерхностный слой алмазного индентора (трехгранной пирамиды Берковича или четырехгранной пирамиды Виккерса). По отклику к этому проникновению в образец (кривым нагрузки-разгрузки) можно судить о его упругих и пластических свойствах. В результате экспериментов по наноиндентированию образцов используя метод Оливера-Фарра [3] для анализа кривых нагружения можно количественно оценить нанотвердость и модуль упругости (непосредственно по наклону кривой разгрузки).

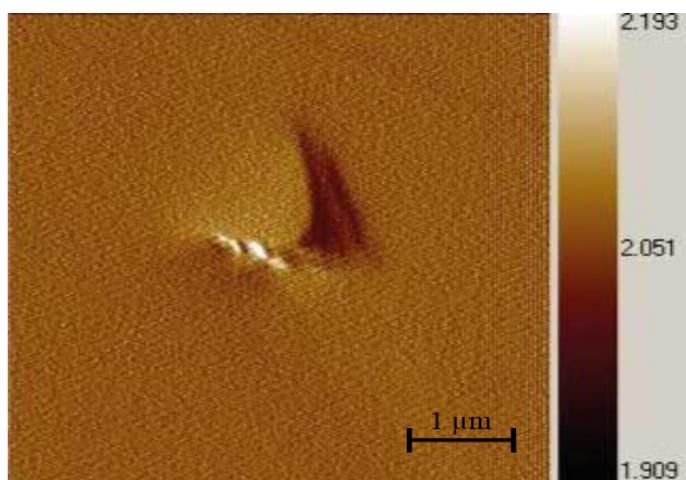


Рисунок 1 - Изображение отпечатка трехгранной пирамидой на поверхности плоскости спайности (100) монокристалла $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$.

В данной работе исследовались монокристаллы $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, выращенные методом свободной кристаллизации на установке «Гранат-2М» [4], а также эпитаксиальные слои α - и $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, полученные методом хлоридной эпитаксии [5] на сапфировых подложках двух кристаллографических ориентаций, с- (0001) и т- (10-10). Толщина эпитаксиальных слоёв оксида галлия составляла порядка 1-30 мкм.

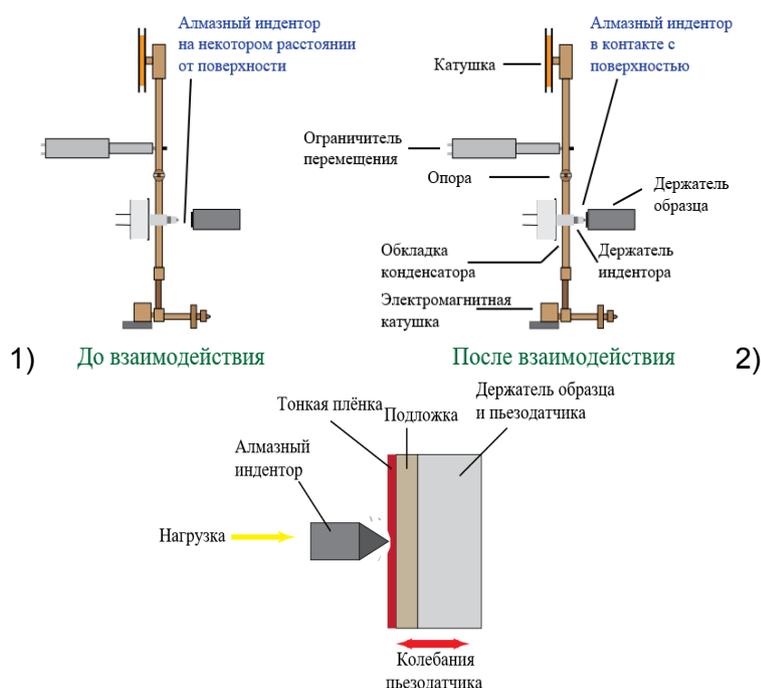


Рисунок 2- Принципиальная схема устройства (1) и работы (2) нанотвердомера NanoTest производства Micro Materials Ltd. (Великобритания).

Индентирование образцов осуществлялось при помощи нанотестера NanoTest 600 фирмы MicroMaterials (UK) (рис.2) с трёхгранной пирамидой Берковича, скорость нагрузки и разгрузки составляла 1 мН/с. При индентировании $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{c-Al}_2\text{O}_3$ использовался режим фиксации максимальной нагрузки, приложенной на индентор, значение критической нагрузки составляло 5 мН. При индентировании $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{m-Al}_2\text{O}_3$ использовался режим фиксации глубины погружения индентора в поверхность исследуемого материала, значение критической глубины составляло 100 нм, что соответствует 10 % толщины пленки. На рис. 3 изображены диаграммы нагружения и разгрузки при индентировании поверхности эпитаксиальных слоёв (-201) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{c-Al}_2\text{O}_3$ и (10-10) $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{m-Al}_2\text{O}_3$ и, и поверхности (100) монокристалла $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$.

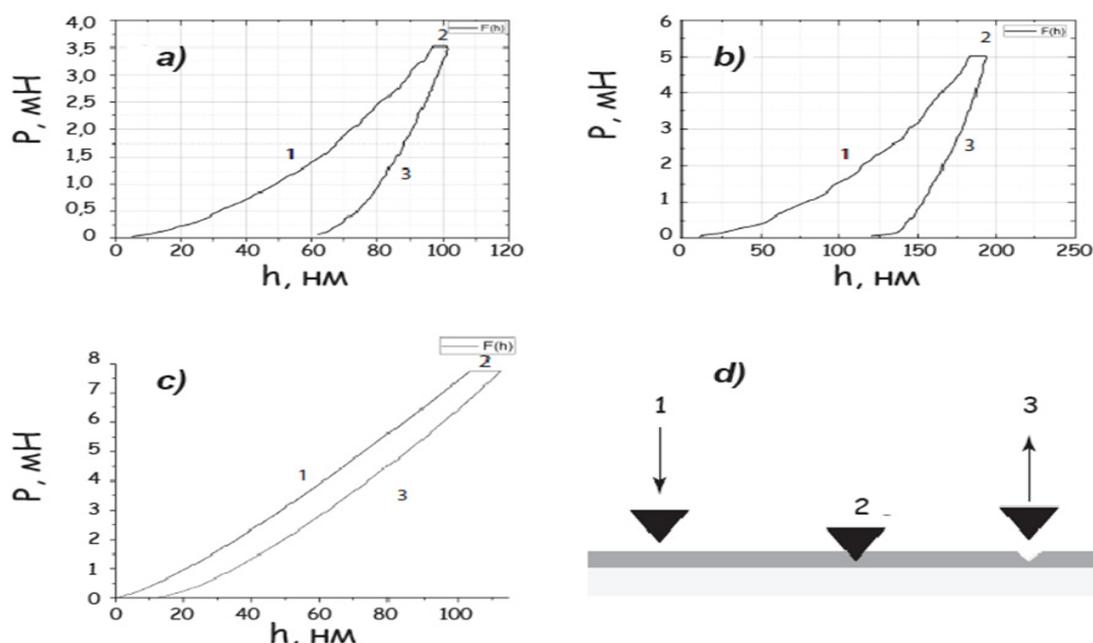


Рисунок 2- Зависимости нагрузки, приложенной на индентор (мН), от глубины проникновения индентора (нм) в эпитаксиальные слои (-201) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{c-Al}_2\text{O}_3$ (a) и (10-10) $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{m-Al}_2\text{O}_3$ (b) и в поверхность (100) монокристалла $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (c): 1 – нагрузка; 2 – выдержка под постоянной нагрузкой на индентор; 3 – разгрузка, (d) – схема эксперимента.

Таким образом, было проведено исследование механических свойств монокристаллов и эпитаксиальных слоёв оксида галлия. Результаты экспериментов по наноиндентированию отображены в таблице 1.

Таблица 1 - Данные о модуле Юнга и твёрдости для различных плоскостей кристаллов и плёнок Ga₂O₃.

	Эпитаксиальные слои		Объемные монокристаллы β-Ga ₂ O ₃		
	β-Ga ₂ O ₃ /c-Al ₂ O ₃ (-201)	α-Ga ₂ O ₃ /m-Al ₂ O ₃ (10-10)	(100)	[Tamura Corp. [6]] (101) (-201)	
Н, ГПа	12.0	17.0	8.9	9.7	12.5
Е, ГПа	225.0	300.0	234.0	230.0	230.0

ЛИТЕРАТУРА

- [1] S.I. Stepanov, V.I. Nikolaev, V.E. Bougrov, A.E. Romanov // Rev.Adv.Mater.Sci 44 (2016) 63.
- [2] A.C. Fischer-Cripps, Nanoindentation (Springer, Heidelberg, 2011).
- [3] W.C. Oliver, G.M. Pharr // Journal of Materials Research 6(7) (1992) 1564.
- [4] В.Н. Маслов, В.М. Крымов, М.Н. Блащенко, А.А. Головатенко, В.И. Николаев // Письма в ЖТФ 40(7) (2014) 56.
- [5] В.И. Николаев, А.И. Печников, С.И. Степанов, Ш.Ш. Шарофидинов, А.А. Головатенко, И.П. Никитина, А.Н. Смирнов, В.Е. Бугров, А.Е. Романов, П.Н. Брунков, Д.А. Кириленко // Физика и техника полупроводников 50(7) (2016) 997.
- [6] <https://www.tamura-ss.co.jp/en/gao/>