

УПРУГИЕ И НЕУПРУГИЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЁВ GaN/Al₂O₃¹Гузилова Л.И., ¹Кардашев Б.К., ²Печников А.И.,¹Крымов В.М., ^{1,2}Николаев В.И.¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия²ООО «Совершенные кристаллы»,

г. Санкт-Петербург, Россия, E-mail: luba-guzilova@yandex.ru

Введение

Методы физической акустики позволяют исследовать упругие свойства и микропластичность материалов не разрушая их. Резонансный метод пьезоэлектрического вибратора нашел широкое применение для таких исследований. В данной работе нами показано, что этот метод позволяет исследовать не только объемные материалы, но и работать с такими образцами как эпитаксиальные пленки на подложках, Ранее для исследования которых в основном использовались методы: низкочастотных изгибных колебаний [1,2] и микро- и наноиндентирования [3,4], которые имеют ряд недостатков. Недостатком первого метода является то, что нельзя непосредственно измерить модули пленок, а микропластические свойства, в свою очередь, оцениваются по данным амплитудно-зависимого внутреннего трения очень сложным пересчетом. В случае же микро- и наноиндентирования подложка оказывает огромное влияние на измерения, слишком сильно влияет состояние поверхности материала и результаты зависят от величина нагрузки.

Объекты исследования (кристаллы GaN, эпитаксиальные слои GaN/c-Al₂O₃ и кристаллические подложки c- Al₂O₃)

Эпитаксиальные слои GaN были выращены методом хлорид-гидридной эпитаксии (HVPE) на базисной (с) грани сапфировых подложек, которые были изготовлены в виде длинных брусков размером 50×2×1 мм³, ориентированных вдоль направления *a* (в монокристалле сапфира). Соответственно, вдоль длинной оси образца слой GaN имел направление [10-10], а подложка Al₂O₃ [11-20]. Толщина слоёв составляла до ~100 мкм. По данным рентгеновской дифракции кривая качания GaN/Al₂O₃ имела полуширину 277 arcsec (рис.1), что свидетельствует об их высоком кристаллическом качестве. Для сравнения в работе использовались объемные поликристаллические образцы нитрида галлия, толщиной ~1 мм, выращенные аналогичным способом и отделенные от подложки.

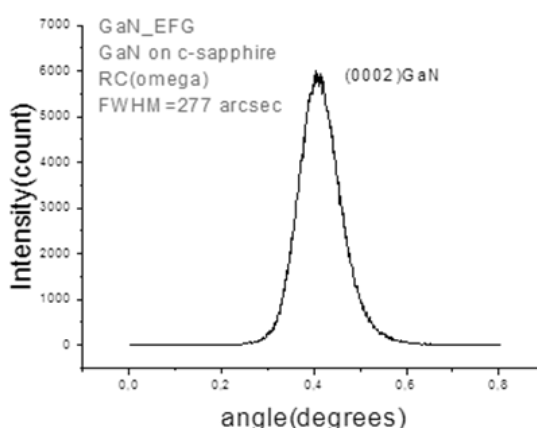


Рисунок1 – Рентгеновская кривая качания слоя GaN, выращенного на боковой грани сапфирового бруска (подложке)

Описание методики, используемой в работе

Метод составного пьезоэлектрического вибратора описан в [5,6]. Суть данного метода состоит в том, что с помощью пьезоэлектрического кварцевого преобразователя в испытуемом образце, приклеенном к кварцу, возбуждается продольная стоячая ультразвуковая волна. Акустическая система, состоящая из

пьезокварца с исследуемым образцом, настраивается в резонанс на определенной частоте (~100 кГц) возбуждающего электрического напряжения.

Зная резонансную частоту составного вибратора и резонансную частоту пьезокварца, можно определить резонансную частоту образца:

$$fm = f_2 m_2 - f_q m_q \quad (1)$$

Здесь f и m , $f_q m_q$ и m_q – соответственно резонансные частоты и массы образца и кварца, а f_2 и m_2 – частота и масса составного (двойного) вибратора.

По аналогичной формуле рассчитывается декремент образца δ :

$$\delta m = \delta_2 m_2 - \delta_q m_q \quad (2)$$

Измерения проводятся дважды: вначале определяются акустические параметры кварца, f_q и δ_q , затем двойного вибратора (кварца с приклеенным образцом).

Амплитуда пропорциональна току, проходящему через кварц, декремент – эквивалентному электрическому сопротивлению кварца или кварца с образцом, а модуль упругости (Юнга) рассчитывается по формуле:

$$E = 4\rho(lf)^2 \quad (3)$$

В данной формуле ρ и l – соответственно плотность и длина образца.

Результаты экспериментов

В настоящем исследовании измерения проводились дифференциальным путем, т.е. сначала определились характеристики подложки, затем той же подложки со слоем. Определение параметров слоя проводилось методом вычитания подложки. Для проверки справедливости такого подхода и уточнения других свойств нитрида галлия дополнительно проводились измерения и на объемных кристаллах GaN [7]. Необходимая для расчета модуля Юнга величина плотности была измерена на объемном образце методом гидростатического взвешивания и составляла для объемного материала 6,12 г/см³. Результаты экспериментов приведены на рисунках 2 и 3.

Таблица 1 – Сравнение данных о модуле Юнга GaN полученных в данной работе с литературными [8-10]

Образцы	E, ГПа
Литературные данные	
Монокристаллы [8]	302,7*
Эпитаксиальный слой GaN на SiC подложке [9]	330,0**
Высококачественный эпитаксиальный слой GaN (MOCVD) [10]	302,5*
Определено акустическим методом составного пьезоэлектрического вибратора	
Эпитаксиальный слой GaN (HVPE)	277,6
Объемный GaN	290,0
*Вычислено с помощью данных, полученных бриллюэновского рассеяния	
**Измерено методом микроиндентирования	

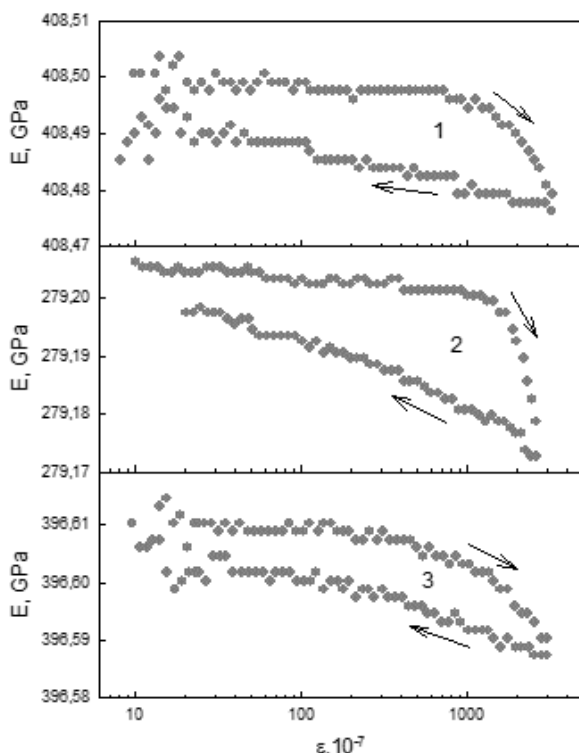


Рисунок 2 – Амплитудные зависимости модуля Юнга E для образцов сапфира (1), объемного GaN (2) и того же образца сапфира после нанесения эпитаксиального слоя GaN (3)

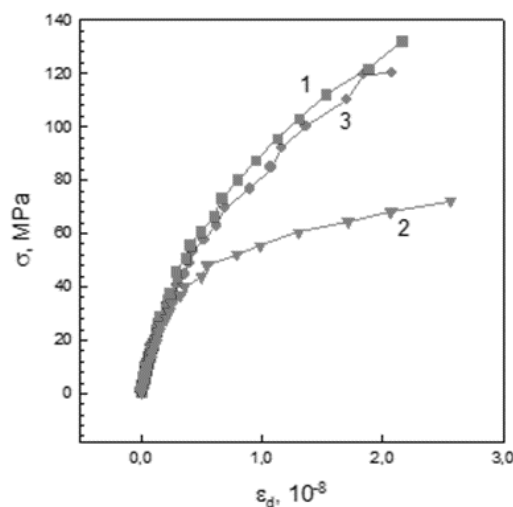


Рисунок 3 – Диаграммы микропластического деформирования образцов сапфира (1), объемного GaN (2) и сапфира после нанесения эпитаксиального слоя GaN (3)

Как оказалось, значения модуля Юнга для слоев GaN исследуемых в данной работе неплохо согласуются со значениями, полученными ранее в [8-10]. На наш взгляд предложенный подход расширяет возможности исследования упругих и неупругих свойств, таких объектов как эпитаксиальные слои. Более того методика позволяет измерять упругие свойства в направлении параллельном межфазной границе слой/подложка.

Список литературы:

1. Nishino Y., Ota Y., Kawazoe T. // *Materials Science and Engineering A* 370 (2004) 146-149.
2. Nishino Y., Ikai K. // *Materials Science and Engineering A* 442 (2006) 347–351.
3. Гузилова Л.И., Маслов В.Н., Айфантис К.Е., Николаев В.И., Романов А.Е. // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики* 15 (2015) 546-549.
4. Гузилова Л.И., Гращенко А.С., Печников А.И., Маслов В.Н., Завьялов Д.В., Абдрахманов В.Л., Романов А.Е., Николаев В.И. // *Materials Physics and Mechanics* 29 (2016) 166-171.
5. Никаноров С.П., Кардашев Б.К. *Упругость и дислокационная неупругость кристаллов* (М., Наука, 1985), с. 254.
6. Кардашев Б.К. // *Кристаллография* 54 (2009) 1074-1086.
7. Мынбаева М.Г., Печников А.И., Ситникова А.А., Кириленко Д.А., Лаврентьев А.А., Иванова Е.В., Николаев В.И. // *Письма ЖТФ* 41 (2015) 84-90.
8. Polian A., Grimsditch M., Grzegory I. // *J. Appl. Phys.* 79 (1996) 3343-3344.
9. Nikolaev V.I., Shpeizman V.V., Smirnov B.I. // *Physics of the Solid State.* 42 (2000) 437-440.
10. Takagi Y., Ahart M., Azuhata T., Sota T., Suzuki K., Nakamura S. // *Physica B* 219&220, (1996) 547-549.