

## УПРУГОСТЬ И МИКРОПЛАСТИЧНОСТЬ КВАЗИ-ОБЪЕМНЫХ КРИСТАЛЛОВ НИТРИДА ГАЛЛИЯ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 300 – 700 К

Гузилова Л.И. \*, Кардашев Б.К., Печников А.Е., Николаев В.И.

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
Санкт-Петербург, Россия  
[guzilova@mail.ioffe.ru](mailto:guzilova@mail.ioffe.ru)*

К настоящему моменту нитрид галлия (GaN), обеспечивший переход к светодиодному освещению, стал одним из наиболее значимых полупроводниковых материалов в оптоэлектронной технике. Нитрид галлия обладает высокой химической стабильностью в сочетании с отличными оптическими и электронными транспортными характеристиками [1]. Однако, кроме чисто полупроводниковых свойств интерес могут представлять и другие его свойства, в том числе и механические. Недавно было обнаружено, что он обладает весьма высокой стойкостью к износу, близкой по своему значению износостойкости алмаза [2].

Нитрид галлия синтезируется в основном либо в виде эпитаксиальных тонких слоев, либо в форме небольших объемных кристаллов. В силу трудоемкости ростовых процессов, большие кристаллы крайне редкие и дорогие. По этой причине обычно для механических исследований выбирались не прямые методы измерений, а те, которые позволяют оценить параметры по небольшой области, например, методы рентгеновской дифракции, бреллюэновского рассеяния, микро- и нано-индентирования, а в ряде случаев измерения заменялись расчетами из первых принципов.

В настоящей работе исследовались упругие и микропластические свойства поликристаллических и монокристаллических объемных образцов, полученных в однотипных технологических условиях химического осаждения на керамическую подложку из пиролитического h-BN и базисноориентированную стандартную сапфировую подложку с последующим отделением толстых (2-3 мм) слоев от подложек [3-5]. Отделенные от подложки объекты принято называть квази-объемными кристаллами.

Данная работа посвящена исследованию упругости и микропластичности квази-объемного нитрида галлия при температурах от комнатной и выше до 700 К, и является логическим продолжением начатых ранее акустических исследований [6]. Надо заметить, что исследований упругих и микропластических свойств объемных кристаллов, нами в литературе не было обнаружено, что обуславливает дополнительный интерес к данной проблеме.

Для данных исследований нами использована акустическая методика внутреннего трения, основанная на принципе составного пьезоэлектрического вибратора [7], заключающемся в возбуждении кварцем продольной стоячей ультразвуковой волны в приклеенном к его торцу образце. Размеры кварца и образца подобраны для обеспечения резонанса на частоте ~100 кГц. Стоит отметить, что в данной системе кварц выступает в роли как источника, так и приемника сигнала. Сложностью проведения акустических измерений на объемных образцах GaN является необходимость того, чтобы образец обладал достаточным длиной (~3 см) для осуществления эксперимента при дефиците больших кристаллов.

Для проведения экспериментов по микропластическому деформированию поликристаллические образцы GaN вырезались в двух направлениях: вдоль и поперёк газового потока во время процесса роста поликристаллической пластины GaN. При осуществлении рентгенографического исследования поликристаллического образца было определено, что в преимущественной является ориентация  $[10\bar{1}0]$ , это, возможно, связано с быстрым ростом в этом направлении по сравнению с другими двумя технологическими направлениями (вдоль и поперёк газового потока). Какой-либо выделенной же ориентации в данных технологических направлениях не было обнаружено. Монокристаллический образец GaN для исследований был вырезан из пластины GaN в направлении  $[10\bar{1}0]$ . Монокристалл GaN содержал некоторое

количество крупных дефектов – пит, пронизывающих весь кристалл. Место для вырезки образца из кристалла, тщательно отбиралось с целью снизить количество данных включений в образце. Все образцы, вырезанные из монокристалла и поликристалла GaN имели форму прямоугольных брусков длиной 27 мм с квадратным поперечным сечением  $\sim (2.8 \times 2.8)$  мм. Такая длина образца обеспечивает резонанс продольных колебаний на частоте около 100 кГц.

Основная проблема, возникающая при осуществлении температурных акустических экспериментов с составным вибратором, заключается в подборе высокотемпературного клея, т.е. вещества которое на протяжении всего процесса нагрева до 700 К прочно соединяло бы поперечные стороны концов пьезокварца и образца GaN, и, кроме того, не оказывало бы существенного влияния на результаты эксперимента. Для решения данной проблемы нами была использована смесь жидкого стекла и ультрадисперсного порошка  $Al_2O_3$ .

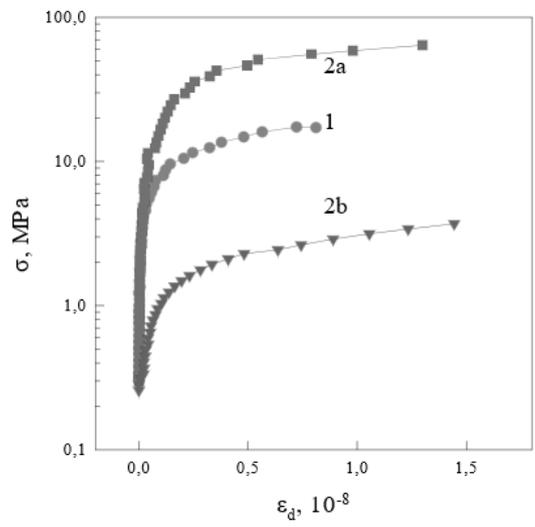
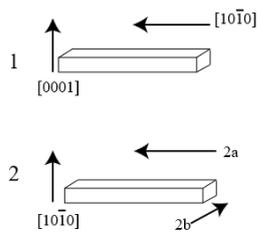
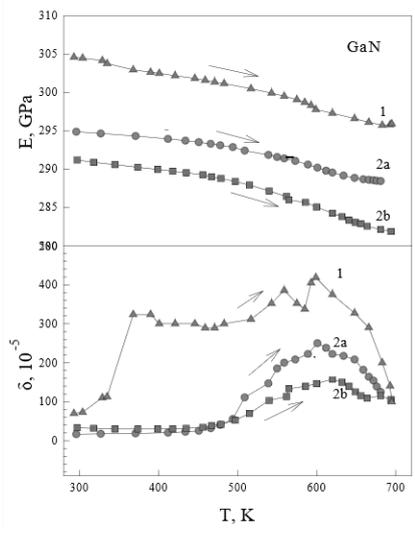


Рисунок 1 - Температурные зависимости модуля Юнга  $E$  и декремента  $\delta$  для GaN (1 - монокристаллического, 2- поликристаллического); в случае поликристалла: 2a – в направлении газового потока, 2b – поперёк потока

Рисунок 2 - Диаграммы  $\sigma$ - $\epsilon$  микропластического деформирования объемного GaN при комнатной температуре, построенные по данным акустического внутреннего трения; 1-монокристаллический образец, 2 – поликристаллический образец, в направлении потока (a), поперек потока (b)

На рис. 1 представлены температурные зависимости модуля упругости  $E$  и декремента  $\delta$  для трех образцов GaN: монокристалл и поликристалл в двух направлениях (вдоль и поперек газового потока при процессе роста хлорид-гидридным осаждением). Демонстрируется значительное снижение модуля упругости  $E$  у всех трех образцов с повышением температуры от комнатной до 700 К, при этом

значительное уменьшение  $E$  начинается с 500 К. Также начиная с данной температуры в поликристаллическом образце (во обоих направлениях) наблюдается резкое повышение декремента затухания вплоть до 600 К и дальнейшее постепенное снижение до 700 К. Декремент затухания в монокристаллическом образце значительно повышается в диапазоне температур 350-400 К, в диапазоне 600-700 К, как и в поликристаллических образцах, наблюдается снижение. В настоящий момент уточняется, возможно, что некоторые эффекты в монокристаллическом образце в диапазоне температур 300 до 600 К могут быть связаны с влиянием склейки образца к пьезокварцу. На рис. 2 показаны диаграммы  $\delta$ - $\epsilon$  микропластического деформирования поликристаллических и монокристаллического образцов GaN при комнатной температуре.

Видно, что в поликристаллическом образце наблюдается анизотропия свойств в различных направлениях. Предел упругости в нем в направлении, соответствующем росту в направлении газового потока, оказался даже выше чем у монокристаллического образца. Однако, последнее может быть связано с тем, что в монокристалле имеется несколько больших дефектов (пирамидальных пит), характерных для данной хлорид-гидридной технологии GaN.

В данной работе впервые проведены измерения акустического модуля упругости и декремента затухания ультразвука в больших объемных кристаллах GaN. Впервые получены температурные зависимости внутреннего трения в этих кристаллах. Собраны первичные сведения о неупругих свойствах, проявляющиеся в отклонении от линейной упругости при больших амплитудах возбуждения ультразвука, что мы связываем с явлением микропластичности. Установлены зависимости свойств как от кристаллографической ориентации, так и от технологических параметров, связанных с газовыми потоками.

### Список литературы

- [1] Ueda D. // Power GaN Devices: Materials, Application and Reliability / Eds M. Meneghini, G. Meneghesso, E. Zanoni. Switzerland: Springer Nature. 2017. P. 1-26.
- [2] Zeng G., Tan C.-K., Tansu N., Krick B.A. / Appl. Phys. Lett. 2016. V. 109. Art. no. 051602.
- [3] Мынбаева М.Г., Печников А.И., Ситникова А.А., Кириленко Д.А., Лаврентьев А.А., Иванова Е.В., Николаев В.И. // Письма ЖТФ. 2015. Т. 41. N. 84. С. 84-90.
- [4] Voronenkov V., Tsyuk A., Gorbunov R., Lelikov Y., Rebane Y., Zubrilov A., Vochkareva N., Shreter Y., Latyshev P. // ECS Transactions. Montreal. 2011. V. 35. N. 6. P. 91-97.
- [5] Nikolaev V.I., Golovatenko A., Mynbaeva M.G., Nikitina I.P., Seredova N.V., Pechnikov A., Bougrov V., Odnobludov M. // Phys. Status Solidi C. 2014. V. 11. N. 3-4. P. 502-504.
- [6] Гузилова Л.И., Кардашев Б.К., Печников А.И., Крымов В.М., Николаев В.И. // Перспективные материалы и технологии: материалы международного симпозиума (22-26 мая 2017 года, Витебск, Беларусь). В 2-х ч. Ч. 2 / Под ред. В.В. Рубаника. Витебск: УО «ВГТУ». 2017. С. 105-107.
- [7] Кардашев Б.К. // Кристаллография. 2009. Т. 54. N. 6. С. 1074-1086.