

УДК 621.315

Механическая стабильность материалов силовых устройств. Высокотемпературная твердость SiC, AlN и GaN

I. YONENAGA

*Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai 980–8577 (Japan)**E-mail: yonenaga@imr.edu*

Аннотация

Методом Виккерса в интервале температур 20–1400 °С измерена твердость монокристаллов 6H-SiC, GaN и AlN при нагрузке 0.5–5 Н. Установлено, что при комнатной температуре средняя твердость SiC, GaN и AlN (0001) составляет 25, 11 и 18 ГПа соответственно. При повышенной температуре твердость SiC, GaN и AlN больше, чем для Si, GaAs и ZnS. Установлена высокая механическая стабильность этих полупроводников.

ВВЕДЕНИЕ

Карбид кремния (SiC), нитрид галлия (GaN) и нитрид алюминия (AlN) являются перспективными широкозонными полупроводниками для силовых высокочастотных устройств, силовых переключателей, голубых и ультрафиолетовых светоизлучающих устройств, фотодетекторов и в качестве химически стойких подложек для осаждения различных материалов. К тому же полагают, что эти материалы могут быть механически устойчивыми и полезными при высоких температурах. Однако до настоящего времени знания о механических свойствах этих материалов, и особенно о микротвердости при комнатной температуре, недостаточны. В процессе роста кристаллов и работы устройств информация о механической стойкости материалов при повышенных температурах является основой для контроля генерации дислокаций и пластической деформации, а также для улучшения оптических и электронных свойств материалов. Трудность выращивания кристаллов GaN и AlN ограничивает получение этой информации. Недавно методом гидридной газофазной эпитаксии (ГГФЭ) были успешно выращены толстые

пленки GaN и AlN [1, 2]. Эти толстые кристаллические пленки могут рассматриваться как объемные материалы. Авторы работ [3–5] пишут, что твердость – это параметр, характеризующий устойчивость к пластической деформации объемных монокристаллов GaN и AlN при повышенных температурах.

В этой статье представляются данные о твердости при повышенных температурах широкозонных полупроводников SiC, GaN и AlN в сравнении с твердостью таких материалов, как Si, GaAs, ZnSe и α -сапфир.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Твердость монокристаллов 6H-SiC, GaN и AlN толщиной 0.5 мм измерялись методом Виккерса в интервале температур 20–1400 °С. Монокристаллы GaN и AlN были приготовлены из высококачественных толстых пленок, выращенных на подложке методом ГГФЭ, описанным в [1, 2]. После выращивания толстый слой удаляли с подложки. Плотность дислокаций в выращенных монокристаллах AlN составляла приблизительно 10^8 – 10^9 см⁻², а в GaN была менее 10^7 см⁻².

Определение твердости на монокристаллах осуществляли традиционным методом Виккерса с использованием пирамидального алмазного индентора. Нагрузка P составляла 0.5–5 Н. Измерения производились в атмосфере высокочистого аргона в интервале температур от комнатной (КТ) до 1400 °С. Продолжительность нагружения составляла 30 с для каждой температуры. По крайней мере, для каждой температуры и для каждой базисной плоскости кристалла формировались четыре отпечатка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При комнатной температуре отпечатки индентора, сформированные на базисных плоскостях кристаллов GaN и AlN при нагрузке более чем 2 Н, иногда выявляли изломы с радиальными трещинами, распространяющимися от углов вмятины, характерные для хрупких материалов.

Твердость H_B рассчитывалась по формуле

$$H_B = P/(2a^2) \quad (1)$$

где P – масса нагрузки, $2a$ – длина диагоналей отпечатка, измеренная с помощью оптического микроскопа.

Прочность на излом K_c определялось по формуле:

$$K_c = \xi (E/H_B)^{1/2} (P/c^{3/2}) \quad (2)$$

Здесь c – длина радиальной трещины, E – модуль Юнга, ξ – калибровочная константа для хрупкого материала, равная 0.016.

При всех исследованных температурах твердость оказалась почти одинаковой для (0001) и (000 $\bar{1}$) полярных плоскостей кристалла с *hcp*-базовой структурой. При КТ твердость GaN составляла 10.8 ГПа при нагрузке 0.5–3 Н, что приблизительно вдвое и в 10 раз больше, чем для GaAs и ZnSe соответственно. Измеренная и опубликованная ранее авторами [6, 7] твердость для GaN (0001) составляла 12 и 12.3 ГПа соответственно. Твердость AlN при КТ равнялась 17.7 ГПа при нагрузке 0.5 Н. Недавно опубликованное в [8] для GaN значение прочности на изгиб K_c , рассчитанное по уравнению (2) при нагрузках 0.5–5 Н и

ТАБЛИЦА 1

Сравнение твердости по Виккерсу H_B , прочности на излом K_c и длины химической связи для различных материалов

Материал	H_B , ГПа	K_c , МПа · м ^{1/2}	Длина связи, нм [13]
6H-SiC(0001)	22.9*	3.3 [10]	0.188
GaN (0001)	10.2 [3]	1.1 [4]	0.196
AlN (0001)	17.7 [5]	0.4 [5]	0.192
Si (111)	12.0	0.7 [10]	0.235
GaAs (111)	6.8	0.4 [11]	0.245
ZnSe (111)	1.1	0.9 [10]	0.245
α -Al ₂ O ₃ (0001)	28**[12]	2.5 [10]	0.192

Примечание. H_B и K_c измерялись при комнатной температуре [3–5, 10–12], нагрузке 0.5 Н и времени нагружения 30 с.

*При температуре 300 °С.

**С нагрузкой 12 Н и временем нагружения 15 с [12].

$E = 295$ ГПа и равное 1.1 МПа · м^{1/2}, также сравнимо с данными в [6, 7]. Значение K_c для AlN при нагрузках 2–5 Н и значении модуля Юнга $E = 308$ ГПа составило 0.4 МПа · м⁻² [9]. В табл. 1 приводится сравнение твердости и прочности на излом для разных полупроводников и α -сапфира, измеренных при КТ [3–5, 10–12]. Видно, что AlN тверже, чем GaN, и мягче SiC и α -Al₂O₃ [12]. Полученные результаты показывают, что твердость полупроводников зависит от длины химической связи, как и предполагали авторы [14].

На рис. 1 показана зависимость твердости H_B от обратной температуры для (111) или (0001) плоскостей SiC, GaN и AlN, определенной при нагрузке 0.5 Н и времени нагружения 30 с, в сравнении с другими материалами. Во всей исследованной области температур твердость SiC, GaN и AlN плавно уменьшается начиная от КТ и приблизительно до 600 °С, выходит на плато в области около 1000 °С и затем резко уменьшается. Такая тенденция зависимости твердости от температуры является общей для полупроводников и сапфира, имеющих *hcp*-базовую структуру, хотя значения температур и твердости для SiC или сапфира выше, чем для GaN. Плато может появляться в соответствии с проявлением различных систем скольжения в кристаллической структуре. Установлено, что во всей исследованной области темпера-

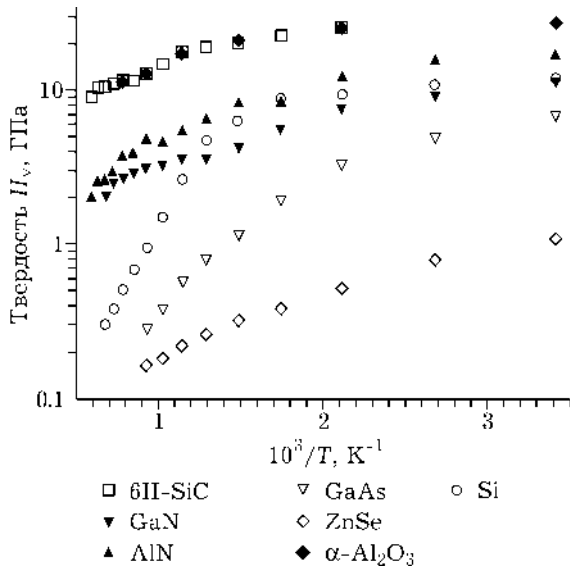


Рис. 1. Зависимость твердости по Виккерсу от обратной температуры для объемных монокристаллов 6H-SiC, AlN, GaN в сравнении с Si, GaAs и ZnSe. Твердость $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, измеренная при нагрузке 2 Н и времени нагружения 15 с, относится к сверхнагруженному образцу [12].

тур твердость AlN выше, чем для GaN, но ниже, чем для 6H-SiC.

В области низких температур твердости GaN и AlN сопоставимы с твердостью Si. При температурах фазового перехода индентор может оказывать влияние на твердость кремния, поскольку фазовый переход наблюдается при давлении около 11.3 ГПа. Удивительно, что приблизительно до 1100 °C GaN и AlN сохраняют твердость более высокую, чем у кремния. Действительно, для Si и GaAs характерно резкое уменьшение твердости с увеличением температуры от 500 и 200 °C соответственно. Это свидетельствует о начале движения макроскопических дислокаций и появлении пластической деформации. Таким образом, полученные результаты означают, что движение этих макроскопических дислокаций и пластическая деформация SiC, GaN и AlN могут проявляться при 1100 °C. Известно, что в области температур выше исследованных ZnSe наиболее нестабильный материал.

Эти результаты означают, что SiC, GaN и AlN по сравнению с Si, GaAs, ZnSe и, возможно, другими III-V и II-VI соединениями со структурой сфалерита менее способны к деформации в процессе работы устройств при высоких температурах. При отсутствии адек-

ватной теории более полное понимание физической природы твердости, позволяющее моделировать динамические свойства дислокаций, остается недостаточным и является задачей будущего исследования. Однако мы установили, что полученные данные полезны для предсказания прочности материалов при повышенных температурах. Также следует отметить, что эмпирически установлена линейная зависимость энергии активации диффузии дислокаций от ширины запрещенной зоны этой группы полупроводников, т. е. элементарных и IV-IV, III-V, II-VI полупроводников [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено сравнение твердости по Виккерсу для широкозонных полупроводников SiC, GaN и AlN в области температур от 20 до 1400 °C. При комнатной температуре средняя твердость SiC, GaN и AlN составила приблизительно 25.11 и 18 ГПа соответственно. По сравнению с Si, GaAs, ZnSe эти полупроводники сохраняют свою твердость приблизительно до 1100 °C, оставаясь при этом механически устойчивыми.

Авторы благодарны профессору P. Pirouz (Case Western Reserve University) за предоставленные кристаллы SiC, А. Николаеву и Ю. Мельнику (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе и Центр исследования роста кристаллов, Москва), д-ру В. Дмитриеву (TDI, Inc., USA) за кристаллы AlN, д-ру А. Usui (NEC Corp.) за кристаллы GaN и Y. Kato (Stanley Electric Co., Ltd.) за кристаллы ZnSe.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 A. Usui, H. Sunakawa, A. Sakai and A. A. Yamaguchi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 36 (1997) L899.
- 2 A. Nikolaev, I. Nikitina, A. Zubrilov et al., *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 595 (2000) W6.5.1.
- 3 I. Yonenaga, T. Hoshi and A. Usui, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 39 (2000) L200.
- 4 I. Yonenaga, T. Hoshi and A. Usui, *J. Phys. Condens. Mater.*, 12 (2000) 10319.
- 5 I. Yonenaga, A. Nikolaev, Y. Melnik and V. Dmitriev, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40 (2001) L426.
- 6 M. D. Drory, J. W. Ager III, T. Suski et al., *Appl. Phys. Lett.*, 69 (1996) 4044.
- 7 M. H. Hong, P. Pirouz, P. M. Tavernier and D. R. Clarke, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 622 (2000) T6.18.

- 8 R. Nowak, M. Pessa, M. Suganuma *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 75 (1999) 2070.
- 9 D. Gerich, S. L. Dole and G. A. Slack, *J. Phys. Chem. Solids*, 47 (1986) 437.
- 10 I. J. McColm, *Ceram. Hardness*, Plenum, New York, 1990.
- 11 G. Michot, A. George, A. Chabli-Brenac and E. Molva, *Scri. Metall.*, 22 (1988) 1043.
- 12 B. Ya. Farber, S. Y. Yoon, K. P. D. Lagerlöf and A. H. Heuer, *Phys. Stat. Sol.*, (a) 137 (1993) 485.
- 13 J. C. Phillips, *Bonds & Bands in Semiconductors*, Academic Press, New York, 1973.
- 14 A. Sher A. A.-B. Chen and W. E. Spicer, *Appl. Phys. Lett.*, 46 (1985) 54.
- 15 I. Yonenaga, *J. Appl. Phys.*, 84 (1998) 4209.