

УДК 524.0

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОНКИХ ПОЛИПАРАКСИЛИЛЕНОВЫХ ПЛЕНОК ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ВИСМУТА

О. М. Остриков

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого,  
246746 Гомель, Беларусь  
E-mail: ostrikov@gstu.gomel.by

Изучено влияние тонких полипараксилиленовых пленок на механическое двойникование монокристаллов висмута при локальном деформировании их поверхности (111). Установлено, что пленка способствует увеличению числа двойников, возникающих вблизи концентратора напряжений. Предложены возможные механизмы увеличения подвижности двойникующих дислокаций в деформируемом кристалле с нанесенной на его поверхность полипараксилиленовой пленкой. Обнаружено выкрашивание висмута в деформированных индентором областях.

Ключевые слова: монокристаллы висмута, двойникование, полипараксилиленовая пленка.

Двойникование является основным механизмом пластической деформации твердых тел. В настоящее время изучаются различные энергетические воздействия [1–5] и влияние структурных изменений [4–7] на развитие двойниковых прослоек. Эти исследования представляют интерес не только с практической точки зрения (разработка метода управления механическими свойствами двойникующихся материалов), но и с теоретической (исследование характера междислокационного взаимодействия при двойниковании кристаллов, находящихся в модифицированном состоянии или в состоянии возбужденной электронной подсистемы [3, 4]). Представляет также интерес изучение влияния состояния поверхности на двойникование кристаллов [8]. Целью данной работы является исследование влияния тонких полипараксилиленовых (ППК) пленок на двойникование монокристаллов висмута.

Монокристаллы висмута выращивались методом Бриджмена из сырья с содержанием висмута 99,999 %. Образцы в виде призм размером  $4 \times 5 \times 10$  мм получались путем раскола монокристалла вдоль плоскости спайности (111). Исходная плотность базисных дислокаций леса  $10^5 \text{ см}^{-2}$ , пирамидальных —  $10^3 \text{ см}^{-2}$ .

Полипараксилилен представляет собой линейный полимер с регулярной химической структурой ( $-\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2-$ ) и молекулярной массой  $200\,000 \div 500\,000$ , плотность которого равна  $1,1 \text{ г/см}^3$ , модуль упругости при растяжении —  $24\,500 \text{ кгс/см}^2$ , предел прочности при растяжении —  $630 \text{ кгс/см}^2$ . Полипараксилилен, осаждаемый на поверхности подложек, прозрачен в оптическом диапазоне, имеет кристаллическую структуру, высокие диэлектрические характеристики. Пленки конформные, ненапряженные и имеют одинаковую толщину. Адгезия ППК пленок к гладким поверхностям невелика, если не проводилась предварительная обработка (например, плазмохимическим методом).

На исследуемых образцах ППК пленки получены методом Горхэма следующим образом. Газ-мономер образуется в высокотемпературном реакторе ( $550 \div 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ) в процессе пиролиза паров исходного димера — циклодипараксилола. Из реактора газ-мономер по-

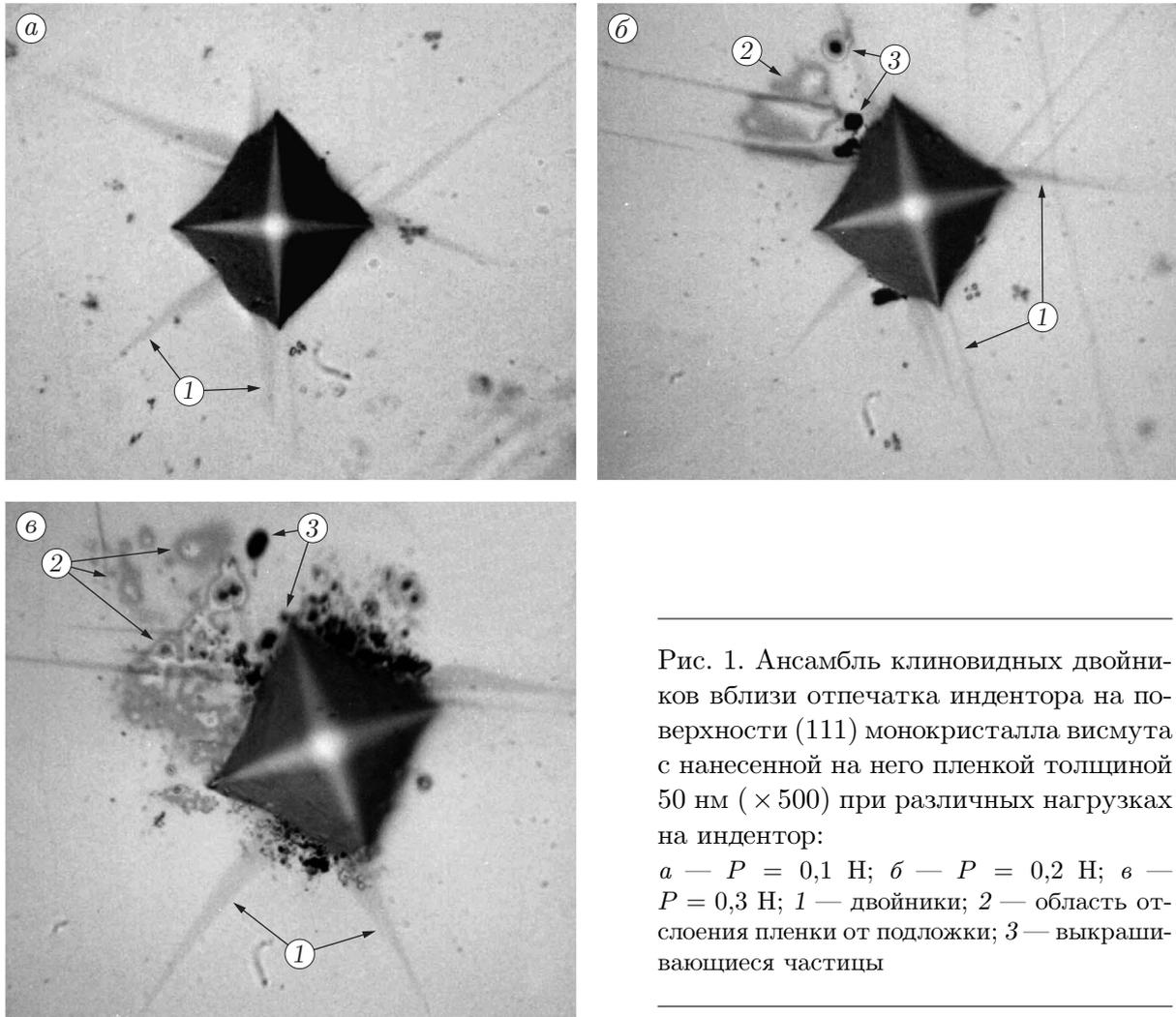


Рис. 1. Ансамбль клиновидных двойников вблизи отпечатка индентора на поверхности (111) монокристалла висмута с нанесенной на него пленкой толщиной 50 нм ( $\times 500$ ) при различных нагрузках на индентор:

*a* —  $P = 0,1$  Н; *б* —  $P = 0,2$  Н; *в* —  $P = 0,3$  Н; 1 — двойники; 2 — область отслоения пленки от подложки; 3 — выкрашивающиеся частицы

ступает в низкотемпературную ( $0 \div 30$  °С) камеру для нанесения пленок, где полимеризуется на поверхностях с температурой ниже 30 °С. Получение ППК пленок происходит в различных технологических зонах установки в проточном режиме при низких давлениях ( $0,1 \div 100,0$  Па). Образцы монокристаллического висмута со свежесколотыми поверхностями (111) помещались в вакуумную камеру установки для получения ППК пленок, газ в камере откачивался до давления 0,1 Па. Пленка на образцах формировалась со средней скоростью 5 нм/мин при давлении мономера в камере  $3 \div 5$  Па. Толщина пленок составила  $10 \div 50$  нм.

Сложнонапряженное состояние в приповерхностном слое монокристаллов висмута создавалось алмазной пирамидой Виккерса стандартного прибора ПМТ-3. Измерялись геометрические параметры двойников, возникающих вблизи отпечатка алмазной пирамиды. Велась съемка деформационной картины на поверхности (111) монокристаллов висмута с нанесенной на нее ППК пленкой. Фиксировалось число двойников, возникающих вблизи отпечатка пирамиды. Плотность двойникуюющих дислокаций на двойниковых границах, как и в [7], определялась по степени некогерентности границ двойников.

Деформационная картина на поверхности (111) монокристалла висмута вблизи отпечатка пирамиды Виккерса при различных нагрузках на индентор представлена на рис. 1.

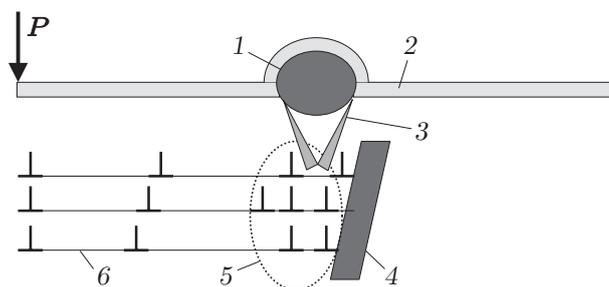


Рис. 2. Схема дислокационного механизма выкрашивания монокристаллов висмута: 1 — частица; 2 — ППК пленка; 3 — трещина; 4 — стопор; 5 — скопление базисных дислокаций; 6 — плоскость (111)

Видно, что вокруг отпечатка индентора возникал ансамбль из 6–12 двойников. Граница отпечатка на поверхности с нанесенной на нее тонкой ППК пленкой неровная, волнистая. Кроме того, в непосредственной близости к отпечатку при нагрузке на индентор 0,1 Н наблюдаются потемнения и небольшие светлые пятна, указывающие на иное направление распространения светового потока, падающего на ППК пленку в области ее интенсивной деформации (рис. 1, *a*). Данные особенности, вероятно, обусловлены неоднородностью пленки по упругим свойствам и по толщине. В результате в отдельных микрообластях материал выдавливается индентором неодинаково, что приводит к неровности границы отпечатка, неровности рельефа и как следствие к неоднородному отражению светового потока.

С увеличением нагрузки на индентор (рис. 1, *b, в*) наблюдается выкрашивание материала подложки в виде черных частиц, задерживаемых нанесенной пленкой, число которых растет. Вероятно, выкрашивание происходит и в случае деформирования поверхности монокристалла висмута при отсутствии пленки, а свободные частицы материала висмута в ходе эксперимента удаляются с его поверхности или смещаются из зоны наблюдения потоками воздуха при перемещении столика прибора ПМТ-3 от индентора к объективу микроскопа. В рассматриваемом случае ППК пленка является фиксатором отколотых частиц.

Представляет интерес изучение механизма выкрашивания монокристаллов висмута при локальном деформировании их поверхности. Под действием сосредоточенной нагрузки  $P$  помимо двойникования активизируется базисное скольжение, имеющее место в плоскостях, параллельных плоскости (111). При взаимодействии со стопором (рис. 2) такие дислокации образуют скопления, локализующиеся вблизи стопора напряжения, что приводит к искривлению поверхности монокристалла висмута. В области концентрации напряжений активно развиваются трещины, которые способствуют отделению вспученных областей от поверхности монокристалла висмута (рис. 2). При наличии на поверхности упругой и слабо связанной с поверхностью ППК пленки продукты выкрашивания удерживаются на поверхности. В случае, если пленка прозрачная (как в данной работе), это позволяет предложить удобный способ изучения процесса выкрашивания материалов.

Помимо выкрашивания наблюдается локальное отслоение от подложки ППК пленок (см. рис. 1), обусловленное в первую очередь их слабой адгезией. Такие отслоения свидетельствуют о локализации в данных областях напряжений, которые не приводят к выкрашиванию. Однако в этих областях, очевидно, находятся дислокационные скопления, выявить которые визуальным способом при отсутствии на поверхности пленки невозможно. Поэтому нанесение на поверхность материала пленки со слабой адгезией является также способом исследования областей локализации дислокаций.

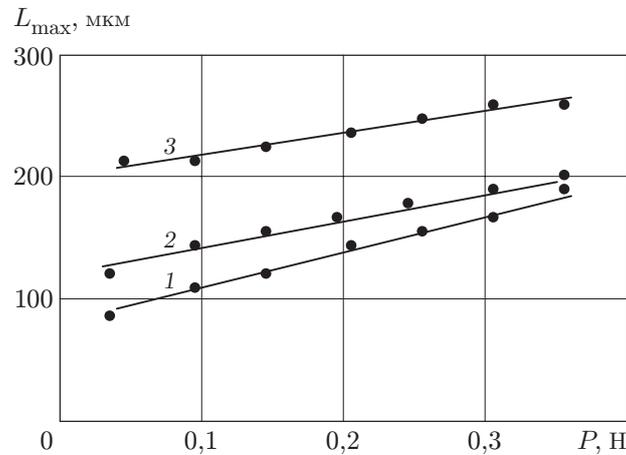


Рис. 3. Зависимость максимальной длины двойников от нагрузки на индентор:  
 1 — монокристалл висмута без пленки; 2 — монокристалл висмута с нанесенной на поверхность (111) ППК пленкой толщиной 12 нм; 3 — то же с ППК пленкой толщиной 50 нм

$\delta$ , нм	$\langle N \rangle$	$\rho$ , $10^4 \text{ см}^{-1}$
0	7,1	2,9
12	7,8	2,7
50	11,2	2,3

Примечание.  $\delta$  — толщина пленки,  $\langle N \rangle$  — среднее число двойников, возникающих вблизи отпечатка индентора на поверхности (111) монокристаллов висмута,  $\rho$  — плотность двойникующих дислокаций на двойниковых границах,  $P = 0,2 \text{ Н}$ .

На рис. 3 представлена зависимость максимальной длины двойников  $L_{\max}$  от нагрузки на индентор. Видно, что ППК пленка способствует увеличению длины двойников (особенно при толщине пленки 50 нм). Нанесение тонкой ППК пленки не приводит к существенному уменьшению плотности двойникующих дислокаций на двойниковых границах (см. таблицу). Это свидетельствует о том, что увеличение длины двойников обусловлено не стимуляцией подвижности двойникующих дислокаций, а активизацией процесса их генерации.

Таким образом, в результате исследования влияния ППК пленки различной толщины на особенности пластической деформации приповерхностных слоев монокристаллов висмута установлено, что нанесенное покрытие способствует увеличению числа и длины двойников, возникающих вблизи концентратора напряжений. При этом плотность двойникующих дислокаций на двойниковых границах существенно не изменяется. Обнаружено выкрашивание материала подложки при нагрузках на индентор более 0,2 Н. Выявлено отслоение ППК пленки на двойниковых ламелях и у частиц, выделившихся в ходе пластической деформации. Рассмотрен механизм выкрашивания монокристаллов висмута при их локальном пластическом деформировании.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Остриков О. М.** Влияние импульсов электрического тока на работу источников двойникующих дислокаций в монокристаллах висмута // Инж.-физ. журн. 1999. Т. 72, № 3. С. 592–594.
2. **Остриков О. М.** Магнитопластический эффект при двойниковании монокристаллов висмута // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 3. С. 159–161.

3. **Савенко В. С., Остриков О. М.** Применение статистического метода для изучения кинетики образования клиновидных двойников в кристаллах висмута при наложении на них электрических и магнитных полей // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. 1998. № 2. С. 96–98.
4. **Савенко В. С., Цедрик М. С.** Влияние облучения на электромеханический эффект при двойниковании кристаллов висмута // Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. наук. 1980. № 1. С. 105–108.
5. **Остриков О. М.** Физические закономерности двойникования при воздействии внешних ортогональных друг другу электрических и магнитных полей, прикладываемых к монокристаллам висмута, облученным ионами бора // Журн. техн. физики. 2000. Т. 70, № 12. С. 39–42.
6. **Савенко В. С., Углов В. В., Остриков О. М., Ходоскин А. П.** Двойникование монокристаллов висмута, облученных ионами бора // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24, № 8. С. 1–9.
7. **Остриков О. М.** Двойникование ионно-имплантированных монокристаллов висмута // Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Минск, 1999.
8. **Остриков О. М.** Влияние алюминиевых тонких пленок на двойникование приповерхностных слоев монокристаллов висмута // Металлы. 2000. № 1. С. 79–81.

*Поступила в редакцию 12/IX 2005 г.*

---