

# Объемная упругая энергия двойников кристаллов висмута и поверхностная энергия границы раздела двойник–матрица в магнитном поле

© А.И. Пинчук, С.Д. Шаврей

Мозырский государственный педагогический университет,  
247760 Мозырь, Белоруссия

E-mail: apinchook@tut.by

(Поступила в Редакцию 28 декабря 2004 г.)

Частичное подавление двойникового в кристаллах висмута при приложении постоянного магнитного поля не сопровождается изменением объемной упругой энергии, запасенной в клиновидных двойниках. Приложение магнитного поля снижает поверхностную энергию межфазной границы раздела двойник–матрица.

Работа выполнена при частичной поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Ф03-105).

Ранее авторами было обнаружено [1], что длительное воздействие сосредоточенной нагрузки и постоянного магнитного поля (МП) частично подавляет двойникование в кристаллах висмута, что выражается в уменьшении размеров и числа клиновидных двойников. В результате снижаются объем двойников и площадь границ раздела двойник–матрица [2]. В связи с этим представляется актуальным выяснить вопрос о том, приводит ли приложение МП к снижению объемной упругой энергии двойников и поверхностной энергии границы раздела двойник–матрица.

Для выращивания кристаллов висмута по методу Бриджмена использовалось сырье химической чистоты. Образцы, имевшие вид прямоугольных призм размером  $10 \times 5 \times 5$  мм, получались раскалыванием монокристалла висмута по плоскости спайности. Клиновидные двойники системы  $\{110\}\langle 001\rangle$  получались путем вдавливания стандартной алмазной пирамиды в плоскость спайности (111) кристаллов висмута. Исследования проводились с помощью микротвердомера ПМТ-3 с использованием специального устройства, изготовленного из неферромагнитных металлов, для нагружения образца в условиях приложения к нему МП. Вектор магнитной индукции лежал в плоскости спайности (111) кристаллов висмута. Особое внимание уделялось отсутствию инструментальных эффектов. Специальный контрольный опыт показал, что включение и выключение МП в ходе нагружения образца не приводит к увеличению размеров отпечатка алмазного индентора. Неоднородность МП в геометрическом центре зазора сердечника электромагнита, куда помещался образец, не превышала 2%.

Сосредоточенная нагрузка составляла  $P = 0.14$  Н. В первой серии опытов индукция МП была равна  $B = 0.2$  Т, время выдержки кристалла под индентором варьировалось в интервале  $t = 0–5$  h. Во второй серии опытов индукция МП варьировалась в интервале  $B = 0–0.9$  Т, время выдержки кристалла под индентором было постоянно и равно  $t = 5$  min.

В опытах с помощью окуляра-микроскопа ПМТ-3 непосредственно измерялись длина и ширина клиновид-

ных двойников, а также их число у отпечатка алмазного индентора. Точки на экспериментальных кривых получены путем усреднения результатов измерений размеров клиновидных двойников, заклинившихся вокруг 20 и более отпечатков. Экспериментальная погрешность не превышала 3%.

Объемная упругая энергия двойника оценивалась с помощью соотношения  $W_V = w_V V N$ , где  $w_V$  — плотность объемной упругой энергии,  $V$  — усредненный объем одного двойника,  $N$  — среднее число механических двойников, заклинившихся у отпечатка индентора после снятия нагрузки и выключения МП.

В кристалле по обе стороны от межфазной границы двойник–материнский кристалл возникают смещения, равные по порядку величины толщине клиновидного двойника. Поскольку в конце клиновидного двойника это смещение равно нулю, вокруг его возникают упругие деформации порядка  $sh/L$ , где  $h$  — толщина клиновидного двойника у устья,  $L$  — его длина,  $s = 0.694$  — множитель [3]. Следовательно, плотность объемной упругой энергии по порядку величины равна

$$w_V = \frac{G(sh)^2}{L^2}. \quad (1)$$

Тогда объемную упругую энергию клиновидного двойника можно найти из соотношения

$$W_V = \frac{G(sh)^2}{L^2} V N. \quad (2)$$

Поскольку форму двойниковых прослоек, возникающих при точечном нагружении, можно аппроксимировать линзой, объем двойника находился по формуле для объема шарового сегмента. Радиус основания шарового сегмента принимался равным усредненной длине клиновидного двойника, а толщина сегмента — равной средней толщине клиновидного двойника у устья [4,5].

Поверхностная энергия межфазной границы двойник–материнский кристалл может быть оценена с помощью формулы  $W_s = w_s S N$ , где  $w_s$  — удельная поверхностная

энергия межфазной границы двойник–матрица,  $S$  — ее площадь. В [3] удельная поверхностная энергия двойниковой границы оценивалась из соотношения  $w_s = Ga$ , где  $G$  — модуль сдвига,  $a$  — параметр решетки кристалла висмута. Следовательно, поверхностная энергия границ раздела двойник–матрица равна

$$W_s = GaSN. \quad (3)$$

Площадь границ раздела двойник–матрица  $S$  находилась как половина площади шарового сегмента с радиусом основания, равным усредненной длине клиновидного двойника [4,5].

В первой серии опытов устанавливались экспериментальные зависимости  $W_V(t)$  и  $W_s(t)$ . Из поведения кривых на рис. 1 и 2 видно, что  $W_V$  и  $W_s$  обнаруживают рост как в МП, так и без него и испытывают тенденцию к насыщению с увеличением времени выдержки  $t$  кристалла под индентором. В пределах экспериментальной погрешности можно сделать вывод о том, что приложение МП не изменяет объемную упругую энергию клиновидных двойников при одинаковом времени  $t$ .

Воздействие поля уменьшает среднее междислокационное расстояние  $L/h$ , выражаемое в параметрах кристаллической решетки висмута (рис. 3). Из (1) видно, что это ведет к увеличению плотности объемной упругой энергии  $w_V$ , запасенной в клиновидном двойнике при его выдержке под индентором в МП. Поэтому,

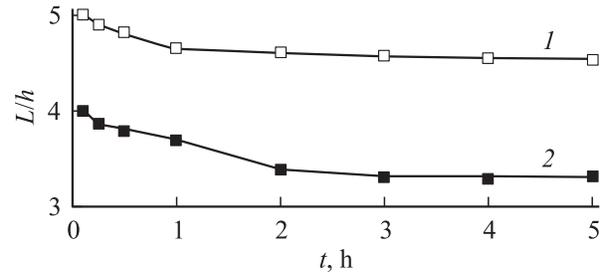


Рис. 3. Зависимость  $L/h$  от времени воздействия  $t$  сосредоточенной нагрузки.  $B, T$ : 1 — 0, 2 — 0.2.

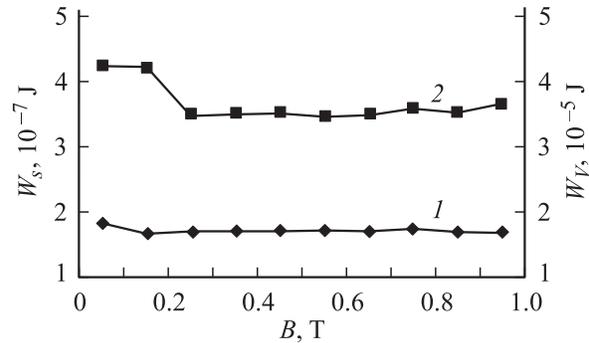


Рис. 4. Зависимость объемной упругой энергии  $W_V$  (1) и поверхностной энергии  $W_s$  (2) двойников от индукции магнитного поля  $B$ . Время выдержки кристалла под индентором  $t = 5$  min.

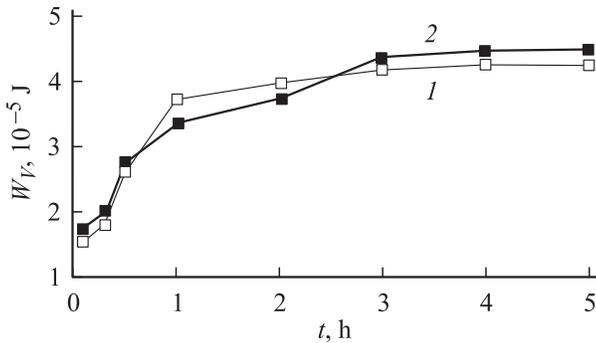


Рис. 1. Зависимость объемной упругой энергии  $W_V$  клиновидных двойников в кристаллах висмута от времени выдержки кристалла под индентором  $t$ .  $B, T$ : 1 — 0, 2 — 0.2.

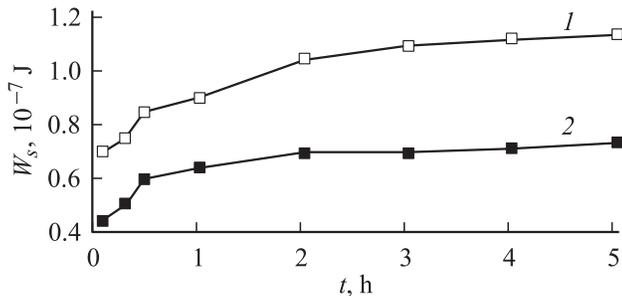


Рис. 2. Зависимость поверхностной энергии границ раздела двойник–матрица  $W_s$  в кристаллах висмута от времени выдержки кристалла под индентором  $t$ .  $B, T$ : 1 — 0, 2 — 0.2.

несмотря на то что приложение МП к кристаллам висмута подавляет двойникование, объемная упругая энергия клиновидных двойников неизменна при одинаковом времени  $t$ .

МП не подавляет процесс генерации двойникоующих дислокаций в устье двойника. Известно, что число двойникоующих дислокаций, локализованных на границе раздела двойник–матрица, равно  $h/a$ . С увеличением времени воздействия сосредоточенной нагрузки  $t$  толщина двойников  $h$  растет как в МП, так и без него [1]. Рост  $h$  вызывает увеличение сдвойникованного объема  $V$ , площади границ раздела  $S$  и, как следует из (2) и (3), возрастание  $W_V$  и  $W_s$ .

При одинаковом времени  $t$  поверхностная энергия двойниковой границы  $W_s$  заметно меньше в присутствии МП (рис. 2). По-видимому, приложение МП отключает магниточувствительные (парамагнитные) стопоры и разблокированная двойниковая граница приобретает термодинамически равновесную длину. Как следствие площадь границ раздела  $S$  двойник–матрица в МП уменьшается [5], что ведет, согласно (3), к уменьшению  $W_s$ .

Во второй серии опытов исследовалось поведение объемной упругой и поверхностной энергии двойников в зависимости от индукции МП. Как было показано в [6], при достижении порогового уровня индукции МП в  $B = 0.2 T$  длина клиновидных двойников уменьшается

скачком. Несмотря на то что суммарный сдвойникованный объем двойников также уменьшается подобным образом при  $B = 0.2\text{ Т}$ , объемная упругая энергия  $W_V$  клиновидных двойников практически не изменяется (кривая 1 на рис. 4). Последнее объясняется сокращением междислокационного расстояния  $L/h$  при  $B = 0.2\text{ Т}$ . Это ведет к увеличению плотности объемной упругой энергии  $w_V$ , локализованной в двойнике. Поскольку при  $B = 0.2\text{ Т}$  площадь  $S$  скачкообразно уменьшается (главным образом из-за сокращения средней длины клиновидных двойников  $L$ ), соответственно убывает и величина  $W_s$  (кривая 2 на рис. 4).

## Список литературы

- [1] А.И. Пинчук, С.Д. Шаврей. ФТТ **43**, 1, 39 (2001).
- [2] С.Д. Шаврей, А.И. Пинчук. Письма в ЖТФ **29**, 15, 35 (2003).
- [3] М.В. Классен-Неклюдова. Механическое двойникование кристаллов. Изд-во АН СССР, М. (1960). 262 с.
- [4] А.И. Пинчук. Металлофизика. Новейшие технологии **22**, 3, 88 (2000).
- [5] А.И. Пинчук, С.Д. Шаврей. Новейшие технологии **22**, 12, 43 (2000).
- [6] А.И. Пинчук, С.Д. Шаврей. ФТТ **46**, 9, 1603 (2004).