В. С. САВЕНКО, А. И. ПИНЧУК, В. В. ПОНАРЯДОВ, В. Б. ЗЛОТНИК

ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ НАЛОЖЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ВИСМУТА

The electroplastic effect (EPE) in bismuth under condition of location of crystal in electrical and magnetic field simultaneously was observed. The density of current impulses was less threshold value it of usual EPE in bismuth. The theoretical model discribing this effect by lowering of surface energy is presented.

Модель «электронного ветра», используемая в настоящее время для объяснения электропластического эффекта (ЭПЭ), предусматривает объемный физический механизм, согласно которому ускоренные под действием электрического поля электроны передают импульс движущимся дислокациям [1—6]. В то же время некоторые экспериментальные данные указывают на поверхностный характер этого эффекта [7—10]. Так, в [10] показано, что электромеханический и фотомеханический эффекты наблюдаются в поверхностном слое одинаковой толщины (2—3 мкм) полуметаллов и ковалентных кристаллов и могут быть объяснены только изменением поверхностной энергии. Наложение определенным образом на проводящий кристалл электрического и магнитного поля во взаимно перпендикулярных направлениях приводит к изменению концентрации носителей тока у индентируемой грани и, как следствие, к изменению ее поверхностной энергии.

Весьма интересную информацию в этом плане можно получить, исследуя поведение микротвердости двойникующихся кристаллов в условиях одновременного наложения электрического и магнитного полей.

Клиновидные двойники создаются полем неоднородного напряжения алмазного индентора на плоскости спайности двойникующихся кристаллов. Поскольку двойниковый клин растет за счет перемещения смешанных двойникующих дислокаций, можно оценить процессы взаимодействия дислокаций со свободной поверхностью [11].

Материал и методика

Для изучения двойникования нагружением в «точке» была изготовлена специальная приставка к стандартному микротвердомеру ПМТ-3, которая позволила проводить индентирование в условиях возбуждения электронной подсистемы кристаллов электромагнитными полями. Инструментальные эффекты, возникающие при подведении магнитного поля к образцу, могут быть разделены на две группы: искажение магнитного потока ферромагнитными деталями оборудования и действие сил электромагнитного давления. Последние приводят к дополнительному механическому давлению на индентор в условиях градиента магнитного поля на верхнем срезе зазора сердечника электромагнита [12]. С целью устранения этих эффектов все детали установки и нагрузочного узла микротвердомера были сделаны из диамагнитных материалов, имеющих коэффициент магнитной восприимчивости $\gamma = 10^{-5}$. Во избежание искажения магнитного поля стальным предметным столиком микротвердомера образец и нижний срез сердечника электромагнита располагались на достаточно большой высоте от столика (10—15 см).

Кристалл закреплялся между массивными медными электрическими контактами в геометрическом центре сердечника, где магнитное поле наиболее однородно. Импульс тока через кристалл создавался путем разрядки батареи конденсаторов. Длительность импульса составляла 10^{-4} с, форма была близка к треугольной.

Измерения проводились на свежесколотой плоскости спайности (111) монокристаллов висмута технической чистоты. Использовался метод повторного опускания индентора в то же место. Импульсы тока без механических напряжений дополнительного двойникования не вызывают. Для устранения возможного влияния МПЭ кристалл в процессе измерения постоянно находился в области магнитного поля. Спустя 5 с после повторного опускания индентора в индентированое поле через кристалл пропускался импульс тока. Индентирование без импульса тока не дает заметного изменения картины двойникования. Индукция магнитного поля в образце была постоянной и равнялась 0,22 Тл. Поскольку на развитие отдельных двойников в большой степени вляют локальные особенности кристаллической структуры в окрестности двойниковых границ, число отпечатков составляло не менее 20. Полученные экспериментальные зависимости строились компьютерным способом с помощью графического редактора GRAPHER.



Результаты и их обсуждение

Рис. 1. Зависимость средней ширины двойниковых лучей у устья ћ (1, 1) и средней длины пробега двойникующих дислокаций ΣLi/2n (2, 2) от плотности тока в импульсе при положительном (1, 2) и отрицательном (1, 2) потенциале индентируемой плоскости спайности висмута.

Рис. 2. Степень некогерентности двойниковых границ h/L_{max}(1, 1) и среднее число двойников n (2, 2) в зависимости от плотности тока при положительно (1, 2) и отрицательно (1', 2') заряженной индентируемой плоскости спайности монокристаллов висмута.

На рис. 1, 2, 3 приведены зависимости количественных характеристик двойникования от плотности тока в импульсе при постоянном значении магнитного поля. Темные точки на графиках соответствуют отрицатель-



Рис. 3. Зависимость суммарного сдвойникованного объема V_{дв} (1,1) и суммарной площани границ раздеда двойников S_{дв} (2,2) от плотности тока в импульсе при положительном (1,2) и отрицательном (1,2) потенциале индентируемой поверхности.

ному потенциалу на индентируемой плоскости спайности монокристаллов висмута. Избыточные элетронная и дырочная концентрации приводят, очевидно, к повышению поверхностной энергии. Светлые точки на графиках соответствуют положительному потенциалу на индентируемой плоскости. Недостаток электронов и дырок у этой плоскости ведет к понижению поверхностной энергии. Из графика видно, что индентирование висмута в условиях одновременного возбуждения его электронной подсистемы электрическим и магнитным полем приводит к его существенной пластификации за счет дополнительной деформации двойникованием. Прохождение импульса тока через образец ведет к возникновению побочных физических эффектов: скин- и пинч-эффекта, теплового разупрочнения решетки. Влияние этих эффектов на ЭПД

детально рассмотрено в [1, 6, 13, 14], где показано, что вклад скин-, пинч-эффектов и теплового разупрочнения несущественен при плотностях тока в импульсе на один-два порядка больше, чем в данной работе. Из графиков можно видеть, что все количественные характеристики дополнительного двойникования обнаруживают полярный характер в зависимости от взаимной ориентации вектора поля Холла в образце и индентируемой грани. Эту зависимость невозможно объяснить действием напряжений, создаваемых силой Ампера, поскольку скалывающее напряжение за счет этой силы $\tau = I_{max}BL/al$ для используемых плотностей тока на два порядка меньше, чем скалывающее напряжение для двойникующих дислокаций $\tau = P/L^2_{max}$. Здесь I_{max} — максимальная сила тока, l и а — длина и ширина образцов, P — нагрузка на штоке индентера, L_{max} — максимальная длина двойникового луча. Как показывает расчет, суперпозицией внешнего магнитного поля и собственного магнитного поля на поверхности образца можно пренебречь. Полученные результаты невозможно объяснить и на основе классического электропластического эффекта [16], так как в этом случае плотность пластифицирующего импульса ограничена снизу порогом в 50—70 А/мм².

Таким образом, пластификация монокристаллов висмута при одновременном наложении на них электромагнитных полей может быть объяснена только взаимодействием двойникующих дислокаций с возбужденной свободной поверхностью. Перемещение винтовой составляющей двойникующей дислокации на одно межатомное расстояние по плоскости спайности сопровождается появлением характерной ступеньки. При этом на создание новой ячейки затрачивается энергия $b^2\gamma$, где b — вектор Бюргерса, γ — поверхностная энергия. Для преодоления этой силы, распространяющейся в глубь кристалла на несколько b и действующей в непосредственной близости от поверхности, необходимо дополнительное локальное скалывающее напряжение $\Delta \tau$, которое при T = 0 находится

$$\Delta \tau = \frac{|\text{gradU}(z)|}{b^2},$$

где U(z) — поверхностный потенциальный барьер [15].

Увеличение поверхностной энергии противодействует силе зеркального изображения, что притягивает к поверхности краевую компоненту двойникующей дислокации как неустойчивый объект, имеющий избыточную свободную энергию. Эта сила определяется медленно меняющимся логарифмическим потенциалом [15]. Подобный подход хорошо описывает поведение ЭПЭ как при положительном, так и отрицательном потенциале индентируемой грани.

Из рис. 1 видно, что средний пробег $\Sigma Li/2n$ двойникующих дислокаций увеличивается с возрастанием плотности тока в импульсе без изменения средней толщины двойника у устья ћ. В этом случае уменьшение поверхностной энергии облегчает пробег дислокаций и не интепсифицирует работу поверхностных источников дислокаций. При отрицательном потенциале на индентируемой грани увеличивается как средний пробег двойникующих дислокаций, так и средняя толщина двойников у устья. Объяснением может служить интенсификация работы поверхностных источников двойникующих дислокаций за счет противодействия силе зеркального изображения возросшей силой поверхностного натяжения. Кроме того, увеличение пробега двойникующих дислокаций при отрицательном потенциале на индентируемой поверхности происходит, по-видимому, за счет снижения влияния силы зеркального изображения по всей длине пробега дислокации.

Следствием возбуждения поверхностного состояния кристалла электромагнитными полями является уменьшение степени некогерентности двойниковых границ h/L_{max}, т. е. уменьшение плотности двойникующих дислокаций на границах раздела. Другой результат — увеличение суммарного сдвойникованного объема V_{дв} и суммарной площади двойниковых границ S_{дв} (см. рис. 3). При этом увеличение сдвойникованного объема происходит не только за счет роста «старых» двойников, но и за счет появления новых — «электродвойников» (см. рис. 2).

Важно, что полученные результаты хорошо коррелируют с данными работы [16], где ЭПЭ двойникованием изучался при наложении только электрического поля. Однако максимальная плотность тока в импульсе в этом случае была на два порядка выше, что соответствует увеличению плотности электромагнитной энергии в образце на четыре порядка.

Выволы.

Свободная поверхность металла играет важную роль в ЭПД металлов. Возбуждение поверхностного состояния кристалла электромагнитными полями приводит к интенсификации дислокационных процессов в приповерхностном слое и, как следствие, к ускорению деформации всего образца. При этом одновременное наложение электрического и магнитного поля во взаимно-перпендикулярных направлениях позволяет существенно снизить плотность электромагнитной энергии.

1. Спицын В. И., Троицкий О. А. Электропластическая деформация металлов. М., 1985.

2. Саве́нко В. С., Троицкий О. А. идр. //Изв. АН СССР. Сер. Металлы. 1985. №5. C. 97.

3. Савенко В. С., Пинчук А. И. //Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1993. №2. С. 27.

4. Савенко В. С. идр. //Тамже. 1994. №1. С. 14. 5. Альшиц В. И. идр. //ФТТ. 1992. Т. 34. №1. С. 155. 6. Альшиц В. И. идр. //Тамже. 1987. Т. 29. №2. С. 467. 7. Савенко В. С. идр. //Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1993. №1. C. 3.

8. Рощупкин А. М., Батаронов И. Л. //Изв. вузов. Сер. Черная металлургия. 1990. №10. С. 75. 9. Савенко В. С., Пинчук А. И. //Там же. 1992. №6. С. 93. 10. Upit G. P., Varchenya S. A., Spalvin J. P. //Phys. stat. sol.

1966. V. 15. P. 617.

1900. V. 15. Р. 017.
11. Булычев С. И., Алехин В. П., Шоршоров М. Х. //Физика и химия обработки материалов. 1979. №5. С. 69.
12. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М., 1983.
13. Троицкий О. А. //Докл. АН СССР. Т. 251. С. 400.
14. Савенко В. С. //Весці АН БССР. Сер. фіз.-мат. навук. 1985. №2. С. 106.
15. Лихтман В. И., Щукин Е. Д., Ребиндер П. А. Физико-химическая механика металлов. М., 1962. 16. Савенко В. С.,

Спицын В. И., Троицкий О. А. //Докл. AH CCCP. T. 263. №5. C. 1181.

Поступила в редакцию 31.09.94.

УДК 537.22; 548:539.12.04

М. И. ДАНИЛЬКЕВИЧ

НАКОПЛЕНИЕ И РЕЛАКСАЦИЯ ЗАРЯДА В ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ ДИЭЛЕКТРИКАХ

The article sets forth the results of dose and time depedence of a charge accumulated as a result of implantations of boric ions into polytetrafluorethylene and polyethylentereftalat film and massive samples of polymethylmethacrylate and barium titanate.

Внедрение ускоренных электрическим полем ионов в твердые тела сопровождается рядом физических эффектов, проявляющихся как на их поверхности, так и в объеме. Наименее изученным среди них является накопление и последующая релаксация электрического заряда. В зависимости от величины электропроводности, условий внедрения ионов и хранения имплантированного объекта заряд, накопленный в нем в результате имплантации, сохраняется длительное время или может быть быстро скомпенсирован. В случае имплантации ионов в диэлектрики можно говорить об электретном эффекте [1,2], так как накопленный при этом заряд сохраняется месяцы и годы. Хотя первые сообщения о такого типа электретах появились 15—20 лет назад, пока можно говорить лишь о первоначальных и весьма ограниченных сведениях по этому вопросу [3]. Необходимы более подробные исследования характеристик диэлектриков и окружающей среды, а также параметров потока заряженных ионов на накопление и последующую релаксацию остаточного заряда в диэлектриках с различным строением и электропроводностью.

В данной работе изучались накопление и последующая компенсация заряда в облученных ускоренными до 50 кэВ ионами бора (В⁺) полимерных и кристаллических диэлектриках, существенно отличающихся по величине удельного электросопротивления. Получены данные о дозовой зависимости эффективного поверхностного заряда при постоянной энергии ионов В+ и изменение его от времени хранения.