

ВЛИЯНИЕ СЛАБОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОДВИЖНОСТЬ ДИСЛОКАЦИЙ В КРЕМНИИ

А. А. Скворцов*, А. М. Орлов, Л. И. Гончар

Ульяновский государственный университет
432700, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 5 декабря 2000 г.

Обнаружен магнитоэластический эффект в дислокационном кремнии. Показано, что при наличии растягивающих напряжений до 20 МПа механически активируемый пробег поверхностных дислокационных полупетель лимитируется преимущественно динамикой дефектов в различных системах скольжения по отношению к внешней нагрузке. При этом активационные барьеры движения дислокаций, контролируемого различными условиями, в диапазоне температур $T = 850\text{--}950$ К равны $E_{aF} = 2.1 \pm 0.1$ эВ и $E_{aS} = 1.8 \pm 0.1$ эВ. Зафиксировано увеличение пробега поверхностных дислокационных полупетель и изменение активационных барьеров ($E_{aF} = 1.4 \pm 0.1$ эВ и $E_{aS} = 1.6 \pm 0.1$ эВ) после обработки кремния в магнитном поле $B = 0.7$ Тл в течение 30 мин. Обсуждаются возможные причины наблюдаемых эффектов.

PACS: 61.72.-y

При изучении пластических свойств конденсированных сред во внешнем магнитном поле в работе [1] обнаружен магниточувствительный отклик дислокационной структуры ионных кристаллов. В этой и последующих работах [2–5] появление магнитоэластического эффекта связывается с откреплением дислокаций от парамагнитных примесей в результате спин-зависимых переходов в системе дислокация–примесный центр с последующей релаксацией дефектной структуры. В ионных кристаллах [2, 3] и металлах [4, 5] это проявляется в изменении подвижности индивидуальных дислокаций после магнитной обработки. Что же касается полупроводников, то исследований магниточувствительных взаимодействий в них значительно меньше [6–9]. Полученная нами информация [9] свидетельствует о влиянии слабого магнитного поля на акустическую эмиссию кремния, отражающую дислокационную перестройку внутренней структуры полупроводника, хотя непосредственными визуальными исследованиями это до сих пор не подтверждено. Устранению этого информационного пробела и посвящена настоящая работа.

Для опытов использовались кремниевые пластины n -типа диаметром 76 мм и с удельным сопротивлением $\rho = 0.01\text{--}0.1$ Ом·м, ориентированные в направлении [111]. После их разрезания по направлениям $[\bar{1}10]$, $[11\bar{2}]$ и $[111]$ получали образцы размером соответственно $30 \times 10 \times 0.5$ мм³. Ввод дислокаций осуществлялся по технологии работ [10, 11] — царапанием алмазной пирамидкой полированной поверхности кремния в направлении $[\bar{1}10]$. Для этого на всех образцах, вырезанных из ближайших участков одной и той же пластины, наносилось до шести параллельных царапин, расстояние между которыми значительно превышало максимальный пробег дислокационных полупетель, плотность которых определялась по стандартной кремниевой технологии [9]. Краевые области исключались из рассмотрения.

Движение дислокаций провоцировалось растягивающими напряжениями до 20 МПа при изгибе относительно оси $[11\bar{2}]$ четырехпорным методом [10, 11] в течение 120 мин и в диапазоне температур 850–950 К. Их смещение контролировалось методом повторного химического травления. Величина пробега дислокационных сегментов (полупетель) регистрировалась при помощи микроскопа МИИ-4 с помощью окуляр-микрометра с точностью 0.5 мкм и фиксировалась по $5 \cdot 10^2\text{--}10^3$ индивидуальным дисло-

*E-mail: scvor@sv.uven.ru

кациям. Характерно, что без механической нагрузки движение дислокаций не обнаружено. К аналогичному результату приводило и многократное химическое травление поверхности исследуемых образцов. Наблюдаемый эффект указывает на незначительное влияние поверхностных стопоров на динамику перемещения дислокаций, что характерно для кристаллов с высоким значением барьера Пайерлса, к которым относится кремний (примерно 1.3 эВ).

Дислокационные пластины обрабатывались между полюсами постоянного электромагнита при комнатной температуре в течение 30 мин. Направление магнитного поля ($B = 0.7$ Тл) совпадало с направлением $[110]$. Время между магнитной экспозицией и механическим деформированием не превышало 3 мин.

Экспериментальные результаты анализировались по гистограммам распределения длин пробега выявленных дислокационных полупетель (n_i), несущих информацию о наличии препятствий, преодолеваемых ими при движении. Поскольку спектр стопоров в исследуемых кристаллах весьма широк, экспериментальная гистограмма несет интегральные сведения о преодолении линейным дефектом стопоров различного типа. Действительно, при стимулированном их движении в рельефе Пайерлса подвижность дислокационного сегмента зависит от времени его открепления от стопора, которое, в свою очередь, определяется эффективной тормозящей способностью стопора в конкретной плоскости скольжения. При механическом воздействии на образец имеющиеся в нем плоскости скольжения разделяются на благоприятные и неблагоприятные с точки зрения подвижности дислокаций. Подобное разделение обусловлено взаимной пространственной ориентацией разрешенных приоритетных плоскостей скольжения по отношению к направлению механического воздействия на образец. В исследуемом образце кремния, решетка которого имеет структуру алмаза, благоприятная плоскость скольжения одна — это плоскость (111) . Остальные плоскости скольжения из семейства $\{111\}$, а также $\{110\}$ являются неблагоприятными, поскольку расположены под различными углами к внешнему воздействию. Вследствие этого стопоры, встречающиеся на пути дислокаций, перемещающихся в разных плоскостях скольжения, обладают разной тормозящей способностью, что и оказывает непосредственное влияние на пространственное распределение дислокаций в движущемся дислокационном ансамбле. Следовательно, фиксируемые на гистограммах ярко выраженные максимумы

должны быть связаны с преодолением дислокациями стопоров, имеющих различную эффективную тормозящую способность.

Убедительной иллюстрацией этого служат приведенные на рис. 1 типичные гистограммы распределения дислокационных пробегов в образцах, выдержанных в магнитном поле (сплошная линия) и в контрольных образцах (штрихи). Очевидно, что оба максимума на приведенных гистограммах (указаны стрелками) определяются динамикой взаимодействия дислокаций с различными стопорами при механически активированном их движении со скоростью V .

Действительно, при конечных температурах на дислокациях устанавливается равновесная концентрация перегибов. Если перегиб на дислокации совершает беспорядочное движение под действием тепловых флуктуаций, то его коэффициент диффузии имеет вид [12]

$$D = \beta a^2 \omega. \quad (1)$$

Здесь a — пространственный параметр (расстояние между канавками рельефа Пайерлса), β — корреляционный коэффициент, ω — частота перескоков в соответствующем направлении. Через время t дефект может переместиться на расстояние

$$x \approx \sqrt{\frac{a^2 n}{\tau}} = \mu_m F t, \quad (2)$$

где $n = t/\tau$ — число перескоков за время t , τ — время оседлой жизни перегиба, зависящее от времени задержки дислокации (или ее сегмента) на стопоре, F — сила, действующая на дефект, μ_m — механическая подвижность.

При малых напряжениях перегибы направленно диффундируют в поле внешних сил, вызывая перемещение всей дислокации со скоростью

$$V = \mu_m F. \quad (3)$$

Поэтому движение наиболее «быстрых» дислокаций характеризуется наименьшими значениями τ и лимитируется их взаимодействием с низкоэнергетическими препятствиями, обладающими малым временем задержки, концентрация которых на дислокационной линии должна быть преобладающей. Доминирование одного типа центров над другими и определяет сильное различие амплитуд максимумов экспериментальных гистограмм¹⁾ (рис. 1).

¹⁾ На 15% гистограмм, снятых с различных царапин при идентичных условиях деформирования, «малый» максимум

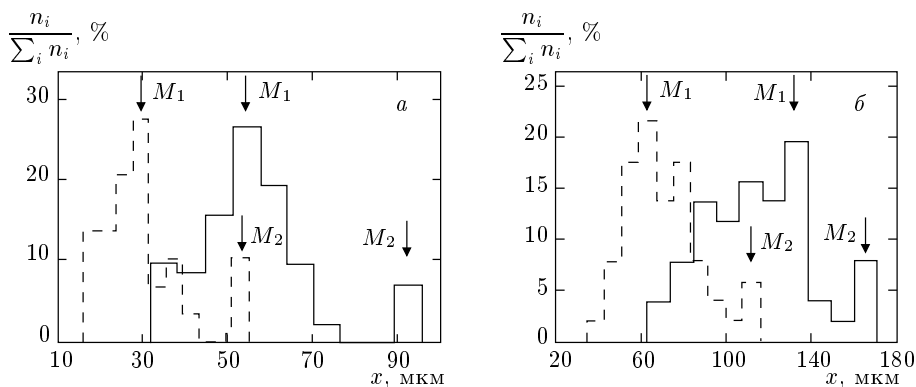


Рис. 1. Гистограммы распределения длин пробегов дислокаций при растягивающих напряжениях 20 МПа и $T = 600$ К (а) и 625 К (б): штрихи — до обработки в магнитном поле; сплошная линия — после магнитной обработки при $B = 0.7$ Тл в течение 30 мин

Увеличение температуры, облегчающее движение дислокаций, должно приводить к закономерному изменению скорости миграции при фиксированной механической нагрузке и, следовательно, увеличению величины пробега L .

Температурные исследования показали, что механическое деформирование не обработанных в магнитном поле дислокационных образцов в указанном температурном диапазоне приводит к изменениям динамики линейных дефектов (рис. 1). Так, изменение температуры всего на 25 К увеличивает пробег как «медленных» (более чем в два раза), так и «быстрых» (в 1.8 раза) дислокаций.

Температурные зависимости пробегов до экспонирования в магнитном поле представлены на рис. 2. Из этих зависимостей видно, что в исходных образцах величина пробега имеет термоактивационный характер для всех типов стопоров:

$$L = L_0 \exp(-E_a/kT). \tag{4}$$

Здесь и далее L_0 — предэкспоненциальный множитель, T — температура, E_a — кажущаяся энергия активации процесса перемещения дефектов.

Существенное различие пробегов быстрых и медленных дислокаций при фиксированной температуре предполагает различную природу стопоров, следовательно, и различие преодолеваемых ими активационных барьеров. Действительно, для быстрых и медленных дислокаций они оказались соответственно равными $E_{aF} = 2.1 \pm 0.1$ эВ и $E_{aS} = 1.8 \pm 0.1$ эВ. Полученное значение энергии активации E_{aF} хоро-

M_2 практически не проявляется, но «основной» максимум M_1 присутствует на всех гистограммах.

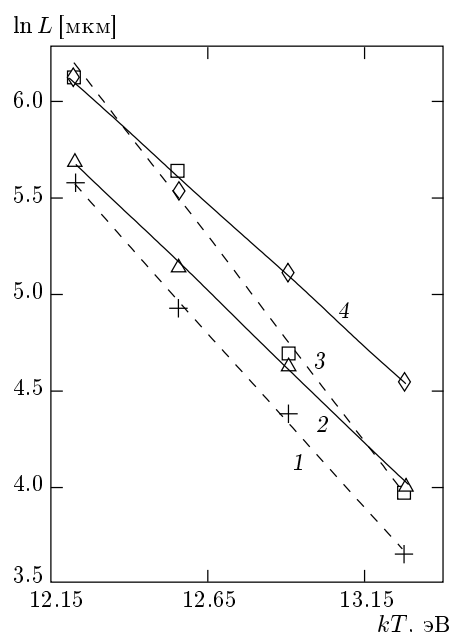


Рис. 2. Активационные зависимости до (штрихи) и после (непрерывная линия) магнитной обработки медленных (1, 2) и быстрых (3, 4) дислокаций

шо согласуется с известными литературными данными для подобных экспериментов [9]. Основную ответственность за наблюдаемые различия энергии активации мы возлагаем на точечные дефекты, лимитирующие динамику дислокаций в дефектном кристалле [9], причем соотношение амплитуд максимумов M_1 и M_2 на гистограммах определяет концентрационное различие низко- и высокоэнергетических стопоров, преодолеваемых дислокациями.

В другой серии опытов исследовалось влияние магнитных возмущений на движение линейных дефектов при механической нагрузке. Для этого были продублированы описанные выше эксперименты с предварительной выдержкой образцов в магнитном поле. При этом само поле без последующего приложения внешней нагрузки не приводило к заметному смещению дислокационных линий. Его роль проявлялась лишь при наложении механического возмущения, отражающего «магнитную» предысторию образца.

Убедительной иллюстрацией этого служат резко различающиеся гистограммы распределения пробегов дислокаций (рис. 1а, б). Видно, что, как и в ионных кристаллах [2, 13], дислокационная структура кремния «запоминает» факт магнитной экспозиции, что приводит к облегченному движению линейных дефектов после отключения магнитного поля. Роль поля при этом сводится к изменению энергетического состояния ядра дислокации и точечных дефектов, способствующих ослаблению их взаимодействия при механически активируемом движении.

Для проверки влияния магнитостимулированных переходов на энергетические барьеры движения дислокаций регистрировались температурные изменения величины их пробегов в кремнии после магнитной экспозиции. Результаты исследований показали увеличение дислокационных пробегов после магнитной обработки во всем исследуемом температурном диапазоне, что свидетельствует о влиянии магнитного поля на оба типа стопоров. Отличительная особенность этого влияния проявляется в различной энергии активации, снятой для медленных ($E_{aS} = 1.6 \pm 0.1$ эВ) и быстрых ($E_{aF} = 1.4 \pm 0.1$ эВ) дислокаций (кривые 3, 4 на рис. 3). Таким образом, магнитное поле способствует некоторому понижению энергетических барьеров при механически активируемом движении дефектов, что согласуется с результатами работ по деформации кристаллов LiF и InSb в постоянном магнитном поле [8, 13]. Причина такого изменения энергии активации движения дислокаций связана со спин-зависимым откреплением дислокации от парамагнитного центра (ион фосфора). Магнитное поле «нейтрализует» часть парамагнитных стопоров и, следовательно, понижает энергетические барьеры при движении линейного дефекта.

Кинетика перемещения дислокаций при совместном действии температуры и магнитного поля определяется термоактивационным и магнитостимулированным вкладами. При увеличении температуры термоактивационная составляющая растет, а магни-

тостимулированная остается постоянной. Поэтому влияние магнитного поля на пробег дислокаций ярче проявляется в области низких температур, а сильное различие в динамике медленных и быстрых дислокаций после магнитной обработки определяется концентрационным преобладанием парамагнитных стопоров, встречаемых быстрыми дефектами при движении.

Таким образом, в работе зафиксирован магнитопластический эффект в монокристаллическом кремнии, выражающийся в изменении скорости движения дислокационных полупетель при внешнем механическом воздействии после магнитной обработки. Последствие магнитного поля связано с остаточными изменениями в состоянии точечных дефектов и ядер дислокаций.

Обнаружено, что применительно к исследуемым кристаллам кремния магнитное поле может понижать активационные барьеры движения дислокации. Пластификация кристаллов после отжига в магнитном поле свидетельствует об образовании разночувствительных к полю стопоров в кремнии. Это выражается в различных активационных барьерах движения дислокаций для двух типов стопоров после магнитной экспозиции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ по программе «Деградационные процессы в многослойных тонкопленочных структурах» и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 98-02-03335).

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, Т. М. Перекалина и др., ФТТ **29**, 467 (1987).
2. Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, С. Е. Жуликов, ФТТ **39**, 495 (1997).
3. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, Е. Ю. Михина и др., ФТТ **38**, 2426 (1996).
4. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, Е. А. Петржик, ФТТ **34**, 155 (1992).
5. О. И. Дацко, В. И. Алексеенко, ФТТ **39**, 1234 (1997).
6. В. Н. Давыдов, Е. А. Лоскутова, Е. Н. Найден, ФТТ **23**, 1596 (1989).
7. Ю. И. Головин, Р. В. Моргунов, А. А. Баскаков и др., Письма в ЖЭТФ **70**, 114 (1999).

8. Е. В. Даринская, Е. А. Петржик, С. А. Ерофеева и др., Письма в ЖЭТФ **70**, 298 (1999).
9. А. А. Скворцов, А. М. Орлов, Л. И. Гончар и др., ФТТ **42**, 1814 (2000).
10. И. В. Островский, Л. П. Стебленко, А. Б. Надточий, ФТТ **42**, 478 (2000).
11. В. А. Макара, Л. П. Стебленко, В. В. Обуховский и др., ФТТ **42**, 854 (2000).
12. Дж. Хирт, И. Лоте, *Теория дислокаций*, Атомиздат, Москва (1972).
13. В. И. Альшиц, А. А. Урусовская, А. Е. Смирнов и др., ФТТ **42**, 270 (2000).