

## О влиянии постоянного магнитного поля на электропластический эффект в кристаллах кремния

© В.А. Макара, Л.П. Стебленко, Н.Я. Горидько, В.М. Кравченко, А.Н. Коломиец

Киевский национальный университет им. Т. Шевченко,  
01033 Киев, Украина

E-mail: makara@hq.ups.kiev.ua

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 27 июля 2000 г.)

Изучено влияние постоянного магнитного поля на электропластический эффект, возникающий в возбужденных электрическим током кристаллах кремния. Обнаружено, что предварительная магнитная обработка кристаллов кремния приводит к ослаблению электропластического эффекта. Обсуждается возможный механизм наблюдаемых явлений.

В работах [1–7] отмечается, что существует ряд особенностей поведения дислокаций в щелочно-галлоидных кристаллах, металлах, сложных полупроводниках в присутствии магнитного поля (МП).

Опыты показывают, что наложение магнитного поля способно заметно изменить пластические свойства кристаллов. Это явление получило название магнитопластического эффекта (МПЭ). Обнаружен как положительный, так и отрицательный МПЭ, т.е. поле может вызывать как упрочнение, так и разупрочнение кристаллов. Наложение магнитного поля способно резко увеличить внутреннее трение дислокаций, закрепленных парамагнитными примесями [1].

В литературе исследован также вопрос влияния электрического тока на магнитоиндуцированную микропластичность монокристаллов Al [6]. К сожалению, несмотря на имеющийся обширный экспериментальный материал и наличие целого ряда моделей, объясняющих МПЭ, сегодня нет последовательной теории, способной описать экспериментальные данные с единых позиций.

Что касается класса простых полупроводниковых кристаллов, в частности кристаллов кремния, то следует указать на практическое отсутствие в литературе работ по исследованию влияния МП на подвижность дислокаций в указанных кристаллах.

В то же время исследование указанного влияния, безусловно, является актуальным для современной физики полупроводников, поскольку приближает нас к установлению физических механизмов, которые определяют свойства пластичности и прочности полупроводниковых кристаллов.

С другой стороны, известно, что магнитная восприимчивость диа- и парамагнитных кристаллов чувствительна к наличию и количеству дислокаций в них. В работе [8] показано, что появление неростовых дислокаций в образцах монокристаллического кремния приводит к уменьшению диамагнетизма (образованию парамагнитных центров) и изменению статической восприимчивости кремния. При этом существует корреляция между магнитной восприимчивостью и плотностью неростовых дислокаций. В [9] приведены соответствующие экспериментальные и теоретические результаты, которые свиде-

тельствуют о принципиальной возможности магнитного упорядочения электронных спинов на дислокационных структурах в кремнии, в частности, указывается на возможность упорядочения по типу ферромагнитного в ядре дислокации. Таким образом, существует и обратное влияние — а именно влияние дефектов структуры на магнитные свойства кристаллов.

В связи с изложенным выше представляется целесообразным изучение влияния постоянного магнитного поля на динамическое поведение дислокаций в кристаллах кремния. В качестве индикатора и меры такого влияния была избрана скорость перемещения дислокаций.

Проведены предварительные исследования по выявлению влияния МП на динамическое поведение дислокаций в исходных кристаллах кремния [10]. Экспериментально установлено, что само по себе действие МП не приводило к перемещению дислокаций. Четкие изменения в динамическом поведении дислокаций фиксировались только в том случае, когда после магнитной обработки (МО) осуществлялось механическое деформирование образцов. После выдержки образцов кремния в МП с магнитной индукцией  $B = 0.17\text{ Т}$  на протяжении определенного времени ( $t_{MF} \geq 7$  суток) и при дальнейшем механическом нагружении наблюдается возрастание стартовых напряжений и времени задержки начала движения дислокаций, а также уменьшение примерно в 3 раза скорости дислокаций. Таким образом, в кристаллах кремния, которые прошли предварительную магнитную обработку, наблюдается эффект упрочнения. Характеристики подвижности дислокаций оказались чувствительными только к действию магнитного поля, индукция которого достигает некоторого порогового значения ( $B = 0.17\text{ Т}$ ). Свойства, приобретенные в результате магнитной обработки, не исчезают сразу же после прекращения действия МП, во время сохранения этих свойств небольшое (около 1 часа). Иными словами, магнитная память, появляющаяся у образцов кремния с дислокациями после выдержки в магнитном поле, носит кратковременный характер.

Возможной причиной наблюдаемых эффектов, по нашему мнению, являются вызванные действием магнитного поля изменения в системе дефектов кремния (распад

больших комплексов, диффузия отдельных точечных дефектов к дислокации как из объема матрицы, так и вдоль линии дислокации, увеличение мощности атмосферы вокруг дислокации). Происходящая в МП перестройка в системе точечных дефектов, взаимодействующих с упругими полями дислокаций и вызывает изменение динамического поведения дислокаций в результате обработки образцов магнитным полем.

Полученные результаты показывают, что выявленные изменения структуры после "магнитного" влияния в чем-то подобны изменениям, которые наблюдаются в процессах деформированного старения в сталях после обработки импульсным полем [11].

С нашей точки зрения, изучение влияния постоянного МП на подвижность дислокаций актуально как само по себе, так и в связи с объяснением широко известного электропластического эффекта (ЭПЭ), выявленного в металлах [12], а также открытого нами в кристаллах кремния [13,14]. Представляло интерес выявление роли МП в ЭПЭ, возникающем в кристаллах кремния при пропускании через них электрического тока.

В связи с этим задачей данных исследований было изучение влияния магнитного поля на ЭПЭ в возбужденных электрическим током кристаллах кремния.

## 1. Методика эксперимента

Для экспериментов использовались образцы кремния размером  $20 \times 4 \times 0.4$  mm *n*- и *p*-типа проводимости, легированные при выращивании методом Чохральского соответственно фосфором и бором. Источником дислокационных полупетель служили концентраторы напряжений — царапины, проведенные в направлении  $[1\bar{1}0]$  на поверхности (111). Движение дислокаций вызывалось изгибом вокруг оси  $[11\bar{2}]$  (четырёхопорный метод). Дислокационные полупетли, которые вводились в образцы, имели длину сегментов от 10 до 100  $\mu\text{m}$ , т.е. исследуемые дислокации были короткими приповерхностными. Стартовое и финишное положение концов полупетель фиксировалось методом химического травления и наблюдалось с помощью металлографического микроскопа. Исследования проводились при действии на образцы кремния механических напряжений растяжения. При изучении влияния МП на ЭПЭ использовался метод четырёхопорного изгиба, который отличался от традиционного тем, что роль двух нижних опор играли цилиндрические вольфрамовые электроды, на которые подавалось электрическое напряжение, что в свою очередь позволяло непосредственно в процессе механического деформирования образцов пропускать через них электрический ток.

После введения изолированных дислокаций в образцы кремния проводилась их магнитная обработка: образцы с предварительно введенными дислокациями помещались в постоянное магнитное поле с индукцией  $B = 0.17$  Т. Продолжительность выдержки в МП составляла 7 суток.

Образцы, побывавшие в магнитном поле, в дальнейшем подвергались статическому нагружению с одновременным пропусканием через них постоянного электрического тока. Основной исследуемой в работе величиной была длина пробега дислокаций  $L$ . Влияние магнитной обработки на длину пробегов дислокаций изучалось в области температур  $T = 823\text{--}923$  К при механическом напряжении  $\sigma = 63.5$  МПа и плотности тока  $J = (0.2\text{--}1.0) \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>. Таким образом, МО проводилась при комнатной температуре, а дальнейшее термоактивируемое движение дислокаций осуществлялось при температурах 823–923 К. После высокотемпературного механического деформирования образцы подвергались химическому травлению. По положению концов полупетель до и после механического деформирования образцов определялась длина пробега дислокаций.

Полученные в работе экспериментальные данные позволили установить ряд особенностей движения дислокационных сегментов в кристаллах кремния, которые прошли предварительную магнитную обработку.

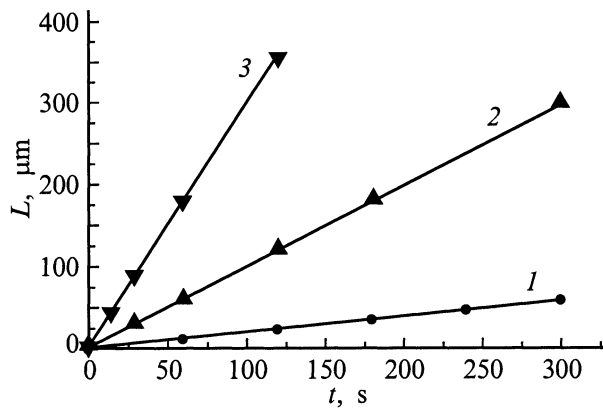
## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Рассмотрим влияние МО образцов кремния на электропластический эффект.

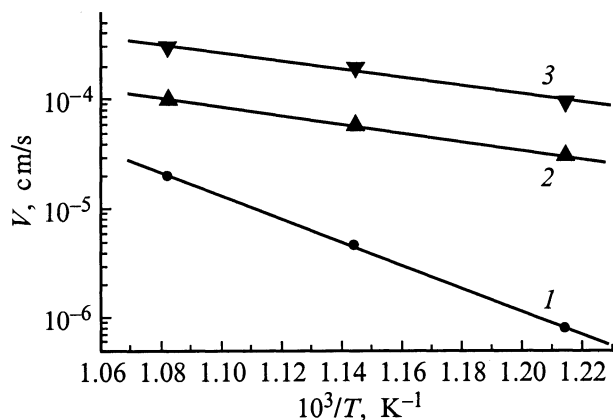
Как уже отмечалось выше, действие МП на исходные кристаллы кремния приводит к закреплению дислокаций в стартовых позициях и уменьшению скорости движения дислокаций. Поэтому можно предположить, что ЭПЭ, проявляющийся в возбужденных постоянным электрическим током кристаллах кремния и состоящий в увеличении скорости перемещения дислокаций и уменьшении стартовых напряжений, вряд ли обусловлен влиянием только магнитного поля тока. Скорее всего, наличие ЭПЭ сопряжено с действием целого ряда других факторов.

С нашей точки зрения, представляет интерес не только вычлнить роль магнитного поля тока в ЭПЭ, но также проверить влияние предварительной МО на величину ЭПЭ.

Как видно из представленных на рис. 1 зависимостей, в образцах кремния, которые прошли магнитную обработку (зависимость 2), скорость движения дислокаций при возбуждении постоянным электрическим током была меньше, чем в образцах, которые не проходили предварительной обработки магнитным полем и возбуждались только током (зависимость 3). При этом, как показали эксперименты, скорость дислокаций после магнитной обработки образцов уменьшалась примерно в 3 раза независимо от плотности тока, которым возбуждались эти образцы. В то же время в кристаллах кремния, не обработанных магнитным полем, наблюдалась зависимость скорости движения дислокаций от плотности тока [14].



**Рис. 1.** Зависимость средней длины пробегов дислокаций  $L$  от времени  $t$  действия механического напряжения  $\sigma = 63.5$  МПа при температуре 923 К для образцов кремния: 1 — исходные (деформированные растяжением); 2 — обработанные магнитным полем ( $B = 0.17$  Т) с последующим деформированием растяжением при пропускании электрического тока ( $j = 1 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>); 3 — деформированные растяжением с одновременным пропусканием электрического тока ( $j = 1 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>).



**Рис. 2.** Температурные зависимости скорости движения дислокаций в кристаллах кремния, деформированных механическим напряжением 63.5 МПа. Обозначения образцов такие же, как на рис. 1.

Если под величиной ЭПЭ понимать отношение скорости дислокаций в возбужденных током кристаллах к скорости дислокаций в исходных кристаллах, то оказывается, что после магнитной обработки величина ЭПЭ уменьшается примерно в 3 раза. Так, при температуре 923 К величина ЭПЭ в возбужденных током образцах была примерно 15. В кристаллах, обработанных магнитным полем, величина ЭПЭ была около 5. Предварительные исследования показали, что при электроизоляции образцов кремния, прошедших МО, скорость дислокаций в указанных кристаллах уменьшалась до нуля. Следовательно, ЭПЭ, вызванный действием электрического поля на кристаллы кремния, выдержанные в МП, не

только уменьшался (как в случае электрического тока), то и менял свой знак. Однако приведенные результаты требуют дальнейшей проверки и уточнения.

Рассмотрим температурную зависимость скорости движения дислокаций. На рис. 2 приведены серии экспериментальных зависимостей  $V = f(1/T)$  для исходных образцов и образцов, обработанных МП. Рассчитанные по этим зависимостям энергии активации дислокаций в образцах, которые предварительно подвергались действию МП, а затем возбуждались током, и в образцах без предварительной МО, а только возбужденных током, оказались практически одинаковыми  $E_{MF+I} \approx E_I \approx 0.75$  эВ. В исходных образцах Si рассчитанная энергия активации составила величину  $E_{init} \approx 2.03$  эВ.

Эффект "магнитного" влияния на подвижность дислокаций в диамагнитном кремнии, обнаруженный в работе, может быть связан с действием целого ряда факторов. В частности, изменение динамического поведения дислокаций в исходных кристаллах кремния в результате их обработки МП можно объяснить перестройкой системы точечных дефектов и дефектных комплексов, которые взаимодействуют с упругими полями дислокаций [15].

Проанализируем влияние МП на ЭПЭ. Как отмечалось в [13,14], одним из возможных объяснений ЭПЭ может быть изменение зарядового состояния дислокаций и окружающих их атмосфер, в результате чего уменьшается кулоновская составляющая взаимодействия дислокаций с центрами захвата и понижается высота барьеров, которые удерживают дислокации в стартовых положениях ЭПЭ, с нашей точки зрения, может быть обусловлен также влиянием дополнительной энергии, которая локально выделяется в области дислокации при рекомбинации носителей в процессе протекания электрического тока в кристаллах. Эта энергия облегчает образование и движение заряженных двойных перегибов на дислокации.

Экспериментальные результаты, полученные в настоящей работе, можно качественно понять, если обратиться к модели, предложенной В.В. Кведером, Ю.А. Осипьяном и А.И. Шалькиным [16]. В этой модели исследуется спин-зависимая рекомбинация свободных носителей через дислокационные оборванные связи (ДОС) в магнитных полях. Процесс захвата электронов (или дырок) из мелких уровней на ДОС является спин-зависимым процессом. При этом вероятность захвата зависит от поляризации спиновой цепочки ДОС и направления спина электрона.

Вероятно, в наших экспериментах действие МП приводит к изменению поляризации парамагнитного спинового центра и к уменьшению вероятности захвата. В результате уменьшается вероятность рекомбинации носителей.

Как показывают полученные в настоящей работе экспериментальные результаты, в обработанных магнитным полем и возбужденных током кристаллах кремния изменяется скорость дислокаций и практически не из-

меняется энергия активации их движения. Последнее указывает на то, что наблюдаемые эффекты сопряжены с изменением предэкспоненциального множителя в эмпирической формуле для скорости дислокаций, полученной авторами [17] для возбужденных электронным пучком кристаллов кремния. В работе [17] предэкспонента включает частоту рекомбинации  $\nu$ , умноженную на величину квантового выхода  $\eta$ . Поэтому в соответствии с [17] можно предположить, что в результате действия магнитного поля изменяется рекомбинационная частота, определяющаяся скоростью образования носителей, временем их жизни и сечением захвата перегиба.

Таким образом, вслед за [16] можно предположить, что наряду с чисто флуктуационными центрами захвата в кремнии существуют также чисто спиновые центры захвата, которые по-разному проявляются в актах быстрого захвата при полевых влияниях, в частности, при "магнитных" влияниях. Изменение состояния спиновых центров захвата после пребывания образцов кремния в магнитном поле приводит к изменению величины ЭПЭ. При возбуждении кристаллов кремния, прошедших предварительную магнитную обработку электрическим током, ЭПЭ уменьшается примерно в 3 раза. Как показал эксперимент, уменьшение ЭПЭ характерно для всего исследуемого диапазона плотностей тока. При этом ЭПЭ уменьшался примерно в 3 раза независимо от плотности тока, которым возбуждали образцы кремния.

Последнее позволяет высказать предположение, что в условиях данного эксперимента спин-зависимая рекомбинация практически не зависит от плотности тока, а зависит, согласно [16], лишь от поляризации цепочки ДЭС на направление спина электрона.

Все перечисленные экспериментальные результаты еще требуют более глубокого теоретического осмысления. Однако уже сейчас можно говорить о практической значимости полученных результатов.

Поскольку разорванные связи кремния ответственны за канал спин-зависимой рекомбинации, то, очевидно, обработка образцов кремния магнитным полем приводит к "нейтрализации" спиновых центров захвата и к уменьшению вероятности рекомбинации.

## Список литературы

- [1] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Т.М. Перекалина, А.А. Урусовская. ФТТ **29**, 2, 467 (1987).
- [2] Ю.И. Головин, О.Л. Казакова, Р.Б. Моргунов. ФТТ **35**, 5, 1384 (1993).
- [3] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Петржик. Изв. вузов. Черн. металлургия **10**, 85 (1990).
- [4] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, О.Л. Казакова, Е.Ю. Михина, Е.А. Петржик. Письма в ЖЭТФ **63**, 628 (1996).
- [5] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, В.Е. Иванов, С.Е. Жуликов, А.А. Дмитриевский. Письма в ЖЭТФ **68**, 400 (1998).
- [6] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.Ю. Михина, Е.А. Петржик. Письма в ЖЭТФ **67**, 788 (1998).
- [7] E.V. Darinska, E.A. Petrzhik, S.A. Erofeeva, V.P. Kisel. Sol. Stat. Phenom. **69–70**, 503 (1999).
- [8] Н.Н. Новиков, В.М. Цмоць, З.Ф. Івасів, Я.Л. Заяць, В.С. Штим. Укр. фіз. журн. **41**, 11–12, 1127 (1996).
- [9] В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашев. Дефекты в кремнии и на его поверхности. Наука, М. (1990).
- [10] В.А. Макара, Л.П. Стебленко, Н.Я. Горидько, В.М. Кравченко, А.Н. Коломиец. Вісник Київського університету, серія фізико-математичні науки **4**, 316 (1999).
- [11] О.И. Дацко, В.И. Алексеевко, А.Д. Шахова. ФТТ **38**, 6, 1799 (1996).
- [12] В.И. Спицын, О.А. Троицкий. Электропластическая деформация металлов. Наука, М. (1985).
- [13] V.A. Makara, L.P. Steblenko, E.G. Robur. Sol. Stat. Phenom. **32–33**, 619 (1993).
- [14] В.А. Макара, Л.П. Стебленко, В.В. Обуховский, Е.Г. Робур. ФТТ **36**, 9, 2618 (1994).
- [15] В.Н. Бузынин, О.И. Дацко, С.Н. Постников. Электронная обработка материалов. АН Республики Молдова (Ин-т прикладной физики) **2(170)**, 16 (1993).
- [16] В.В. Кведер, Ю.А. Осипьян, А.И. Шалькин. ЖЭТФ **85**, 2(8), 699 (1982).
- [17] Н. Маеда, К. Кимура, С. Такеучи. Изв. АН СССР. Сер. физ. **51**, 4, 729 (1987).