

Влияние ультразвуковой обработки на подвижность коротких дислокаций в кристаллах кремния

© И.В. Островский, Л.П. Стебленко, А.Б. Надточий

Киевский университет им. Т. Шевченко,
252022 Киев, Украина

E-mail: iostrov@genphys.ups.kiev.ua

(Поступила в Редакцию 8 июля 1999 г.)

Изучено влияние ультразвуковой обработки на подвижность коротких приповерхностных дислокаций в кристаллах кремния. Обнаружено, что ультразвуковая обработка кристаллов кремния приводит к изменению скорости перемещения дислокаций при постоянной механической нагрузке. При этом характер изменения скорости дислокаций определяется знаком внешних напряжений, действующих на образец, — сжимающие усилия приводят к уменьшению, а растягивающие — к увеличению скорости дислокаций. После воздействия на образцы кремния ультразвуковых колебаний наблюдается уменьшение энергии активации движения дислокаций и усиление электропластического эффекта. Обсуждается возможный механизм наблюдаемых явлений.

Для управления физико-механическими и пластическими свойствами твердых материалов обычно используются различные термические, физико-химические и другие методы. Характеристики неупругой деформации кристаллов могут меняться при протекании через образцы электрического тока (электропластический эффект — ЭПЭ) [1–4]. В [3,4] экспериментально и теоретически исследовано влияние электрического тока на среднюю скорость V_d движения коротких 60° дислокаций в кристаллическом кремнии.

Возможна также и активация движения дислокаций путем их механического возбуждения ультразвуком (УЗ). Интересным аспектом изучения подвижности дислокаций является выявление взаимосвязи между электронным возбуждением дислокаций и ультразвуковым возбуждением. В литературе практически отсутствуют данные по влиянию ультразвука на подвижность дислокаций в кристаллах кремния. Это и определило целесообразность проведения данной работы. Было исследовано влияние УЗ как на исходные образцы, так и на образцы кремния, возбужденные электрическим током.

1. Методика эксперимента

Для экспериментов использовался кремний n - и p -типа проводимости, выращенный по методу Чохральского и легированный фосфором и бором соответственно. Образцы кремния вырезались из стандартных пластин и имели размеры $20 \times 4 \times 0.4$ mm соответственно по направлениям [110], [112], [111].

Источником дислокационных полупетель служили концентраторы напряжений — царапины, проведенные в направлении [110] на поверхности (111). Движение дислокаций вызывалось изгибом вокруг оси [112] (четырёхпорный метод). Вводимые в образцы кремния дислокационные полупетли дислокации были короткими, приповерхностными и имели длину сегментов

от 10 до 100 μm . Стартовое и финишное положение концов полупетель фиксировалось методом химического травления и наблюдалось на металлографическом микроскопе МИМ. Исследования проводились при действии на образцы кремния как растягивающих, так и сжимающих механических напряжений. При изучении влияния электронного возбуждения на динамику дислокаций использовался метод четырёхпорного изгиба, который отличался от традиционного тем, что в роли двух нижних опор выступали вольфрамовые цилиндрические электроды, к которым подводилось электрическое напряжение. Это позволяло непосредственно в процессе механического деформирования образцов кремния пропускать через них электрический ток.

После введения изолированных дислокаций в образцы кремния проводилась ультразвуковая обработка (УЗО) образцов. Для этого в пластинах кремния с помощью пьезоэлектрических преобразователей возбуждались нулевые моды волн Лэмба. Пьезоэлектрические преобразователи приклеивались к противоположным концам пластины. На один из преобразователей подавалось электрическое напряжение с амплитудой около 50 V в частотном диапазоне 0.3–0.9 MHz. Второй преобразователь использовался для контроля прохождения УЗ волны через образец. Максимальная температура системы за счет тепловыделения в преобразователях и пластине не превышала 343 K.

После УЗО проводилась деформация образцов методом четырёхпорного изгиба при температурах $T = 823\text{--}923$ K при механическом напряжении $\sigma = 80$ МПа. Через некоторые образцы во время их деформирования пропускался также электрический ток плотностью $j = 10^6$ A/m². Далее образцы подвергались химическому травлению. По положению концов полупетель до и после механического деформирования образцов определялась длина пробега дислокаций.

2. Экспериментальные результаты и обсуждение

Само по себе действие УЗ колебаний не приводило к перемещению дислокаций. Четкие изменения в динамике дислокаций фиксируются только в том случае, когда после УЗО осуществлялось механическое деформирование образцов. Механическое нагружение образцов Si, проводимое в тот же день что и УЗО, а также спустя 20 суток после УЗО, приводило к одинаковым изменениям в динамике дислокаций. Это свидетельствует о том, что свойства, приобретенные в результате УЗО, не исчезают после прекращения ультразвуковых колебаний.

По полученным экспериментальным данным были построены зависимости средних длин пробегов концов дислокационных полупетель от времени действия нагрузки при фиксированной температуре. Типичные зависимости средней длины пробега дислокаций от времени действия механической нагрузки в образцах кремния представлены на рис. 1. Из представленных данных видно, что в кристаллах кремния после УЗО наблюдается увеличение пробегов дислокаций при растягивающих нагрузках и уменьшение пробегов дислокаций при сжимающих нагрузках, т.е. скорость дислокаций после УЗО может как увеличиваться, так и уменьшаться по сравнению со скоростью дислокаций в исходных кристаллах. В

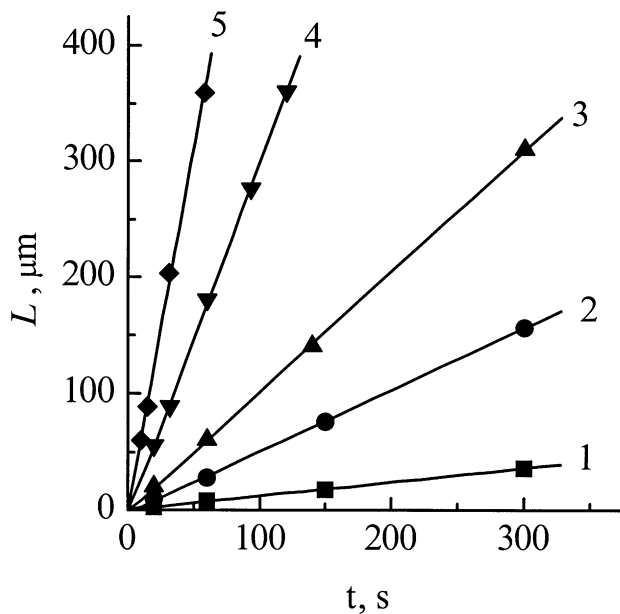


Рис. 1. Зависимости средней длины пробегов дислокаций L от времени t действия механического напряжения 80 МПа в различных образцах кремния при температуре 923 К. 1 — обработанные УЗ и деформированные сжатием, 2 — исходные (деформированные сжатием или растяжением), 3 — обработанные УЗ и деформированные растяжением, 4 — деформированные растяжением с одновременным пропуском через них тока, 5 — обработанные УЗ и деформированные растяжением с одновременным пропуском через них тока.

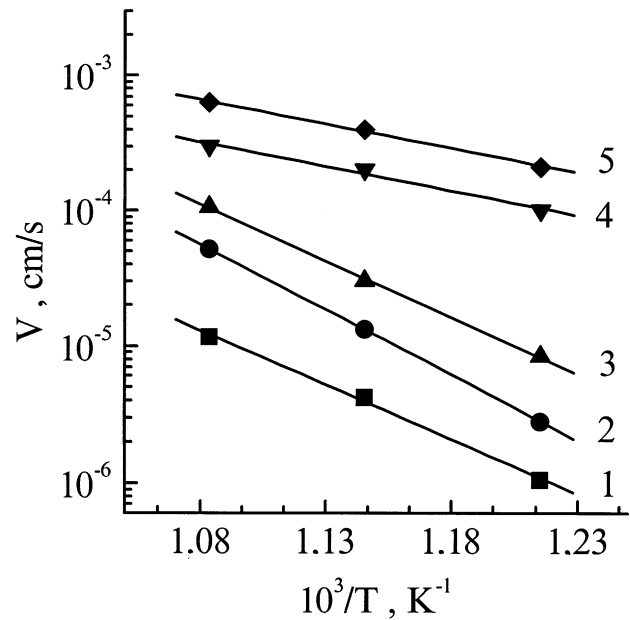


Рис. 2. Температурные зависимости скорости движения дислокаций V . Обозначения 1–5 такие же как для рис. 1.

исследованном диапазоне температур при растяжении или сжатии скорость дислокаций в обработанных ультразвуком кристаллах Si изменяется в 2–4 раза по сравнению с исходными кристаллами. Следует отметить, что в исходных образцах кремния не обнаружено изменений в скорости движения дислокаций при изменении знака деформирующего напряжения.

Температурные зависимости скоростей движения дислокаций в разных образцах представлены на рис. 2. Из этих зависимостей видно, что как в исходных образцах, так и в образцах, обработанных УЗ, температурные зависимости носят экспоненциальный характер

$$V \sim \exp(-E/kT), \quad (1)$$

где E — энергия активации движения дислокаций. Данный факт указывает на то, что в обработанных УЗ кристаллах кремния так же как и в исходных кристаллах, имеет место термоактивированный механизм движения дислокаций. Характер полученных нами зависимостей хорошо согласуется с твердо установленными закономерностями подвижности дислокаций в полупроводниках [5]. Рассчитанная из приведенных на рис. 2 зависимостей энергия активации движения дислокаций для исходных образцов оказалась равной $E_2 = 2.02$ эВ. Для обработанных ультразвуком образцов кремния при сжимающих и растягивающих нагрузках $E_1 \approx E_3 = 1.62$ эВ. Таким образом обработанные УЗ кристаллы Si обнаруживают различие в скоростях движения дислокаций при действии на них различных по знаку механических деформирующих напряжениях и практически не обнаруживают различий в величине энергии активации движения дислокаций. Наши эксперименты не выявили

корреляции между величиной наблюдаемых эффектов и типом проводимости кристаллов кремния, а также степенью их легирования.

Полученные экспериментальные результаты можно объяснить влиянием целого ряда факторов.

Известно, что под действием УЗ волны происходит стимулированная диффузия вакансий и примесей [6–8]. Принимая во внимание то, что в наших экспериментах дислокационная полупетля состоит из коротких сегментов, выходящих своими концами на поверхность, а также то, что поверхность и дислокации играют роль практически бесконечного стока точечных дефектов, можно предположить, что наблюдаемые эффекты связаны с ростом концентрации точечных дефектов под действием УЗО.

Учитывая, что энергия активации движения дислокаций в полупроводниках складывается из энергии активации процесса образования парных перегибов и энергии активации процесса распространения перегибов [5,9], а также учитывая возросшую в результате УЗО концентрацию точечных дефектов в приповерхностном слое, можно объяснить парадоксальный на первый взгляд результат уменьшения энергии активации движения дислокаций при действии как растягивающих, так и сжимающих напряжений. Уменьшение энергии активации E в кристаллах Si после УЗО связано с тем, что двойные перегибы рождаются преимущественно на точечных дефектах, которые продифундировали к поверхности в результате УЗО.

Наблюдаемое экспериментально уменьшение энергии активации движения дислокаций можно объяснить увеличением частоты зарождения перегибов на примесях при возрастании концентрации примесей в окрестности дислокации [10]. В исходных кристаллах, где концентрация примесей в окрестности дислокации меньше, частота зарождения перегибов ниже, и как следствие, энергия активации движения дислокаций должна быть больше. Последнее и наблюдается экспериментально.

Если энергии активации движения дислокаций в кристаллах, прошедших УЗО, были практически одинаковы и при сжимающих и при растягивающих напряжениях, то скорости дислокаций при изменении знака действующего напряжения различались примерно в 6–8 раз. Подобное различие в скоростях движения дислокаций, возможно, обусловлено наличием в образцах Si после УЗО сильных внутренних упругих полей, вызывающих повышенной концентрацией точечных дефектов. К тому же, наличие точечных дефектов и примесей на поверхности и в объеме, как известно, влияет на электронные процессы в кристаллах, что может проявиться и в скоростях движения дислокаций.

Изменяющиеся от чистого растяжения до чистого сжатия поля упругих напряжений должны приводить к изменению ширины запрещенной зоны полупроводника [1], что может привести к изменению степени заполнения акцепторных состояний дислокации. Следствием будет изменение потенциального электростатического барьера, обусловленного существованием вокруг

дислокации пространственного заряда. Таким образом, в образцах Si, прошедших УЗО, знак действующего постоянного механического напряжения влияет, по-видимому, на изменение высоты потенциального электростатического барьера. Иначе говоря, УЗО может воздействовать на зарядовое состояние дислокации и точечных дефектов в ее окрестности. Собственно, подобный результат наблюдался ранее в ряде твердых тел [6,11,12] при исследовании нелинейных взаимодействий с УЗ.

В связи со сказанным выше в кристаллах Si после УЗО скорость дислокаций оказывается зависящей от знака механического напряжения. Дислокацию, движущуюся в обработанном УЗ кристалле кремния, можно рассматривать как индикатор полей напряжений в кристалле, а также как индикатор изменений в связанных электронных состояниях на дислокации.

Очевидно, что наблюдаемые после УЗО эффекты могут проявляться, начиная с появления в приповерхностной области определенной концентрации точечных дефектов. Подтверждением этому служит возможность наблюдать эффект увеличения или уменьшения скорости дислокаций лишь после определенной длительности УЗО (больше 2 часов). Отсутствие зависимости скорости дислокаций от знака действующего напряжения в исходных кристаллах может быть связано с отсутствием в них таких внутренних полей упругих напряжений, которые возникают вследствие УЗО.

Рассмотрим влияние УЗО образцов кремния на электропластический эффект. При ЭПЭ происходит увеличение скорости движения дислокаций и уменьшение их энергии активации. Одним из возможных объяснений ЭПЭ может быть изменение зарядового состояния дислокаций и окружающей их атмосферы, в результате чего уменьшается кулоновская составляющая взаимодействия дислокаций с центрами закрепления и понижается высота барьеров, которые удерживают дислокации в стартовых положениях. ЭПЭ, с нашей точки зрения, может быть обусловлен также влиянием дополнительной энергии, выделяющейся локально в области дислокации при рекомбинации носителей в процессе протекания электрического тока в кристаллах. Дополнительная энергия облегчает образование и движение заряженных двойных перегибов на дислокациях [13]. Как видно из представленных на рис. 2 зависимостей 2, 4, 5, УЗО приводит к усилению ЭПЭ. Так, при температуре $T = 823$ К ЭПЭ возрастает почти в 36 раз. В кристаллах, обработанных УЗ, ЭПЭ увеличивается примерно в 75 раз. При этом скорости движения дислокаций в кристаллах Si, возбужденных УЗ, а затем током увеличиваются приблизительно в 2 раза по сравнению со скоростями движения дислокаций в кристаллах, возбужденных только током. В то же время энергии активации движения дислокаций в двух указанных случаях изменяются незначительно. Рассчитанная по зависимости 4 энергия активации образцов без УЗО оказалась равной $E_4 = 0.76$ eV, а рассчитанная по зависимости 5 энергия активации образцов после УЗО составила величину $E_5 = 0.70$ eV. Возможно

УЗО кристаллов Si стимулирует перезарядку точечных дефектов [11,14], следствием чего является увеличение скорости дислокаций при последующем возбуждении таких кристаллов электрическим током.

Таким образом, можно сделать следующие заключения.

1) УЗО образцов кремния, содержащих короткие приповерхностные дислокации, приводит к изменению скорости перемещения дислокаций при постоянной механической нагрузке. При этом характер изменения скорости определяется знаком внешних, действующих на образец напряжений: при сжимающих усилиях УЗО дает уменьшение, а при растягивающих — увеличение скорости дислокаций.

2) Энергия активации движения дислокаций в кристаллах кремния, обработанных УЗ, уменьшается на величину приблизительно равную 0.4 eV и не зависит от знака постоянной нагрузки, которая вызывает перемещение дислокаций.

3) УЗО кристаллов кремния приводит к усилению электропластического эффекта.

4) Физически процессы УЗО могут быть связаны с протеканием акусто-стимулированной диффузии примесей в образцах и возрастанием концентрации примесей в приповерхностном слое кремния. Последнее, по видимому, приводит к преимущественному зарождению двойных перегибов на примесях и к уменьшению энергии активации движения дислокаций.

Список литературы

- [1] H.F. Matare. Defects Electronics in Semiconductors. Wiley-Intersciens, N.Y.–London (1971). 474 p.
- [2] Н. Маеда, К. Кимура, С. Такеути. Изв. АН СССР. Сер. физ. **51**, 4, 729 (1987).
- [3] V.A. Makara, L.P. Steblenko, E.G. Robur. Solid State Phenomena **32–33**, 619 (1993).
- [4] В.В. Лемешко, В.А. Макара, Л.П. Стебленко, В.В. Обуховский, Е.Г. Робур. ФТТ **36**, 9, 2618 (1994).
- [5] Т. Судзуки, Х. Есинага, С. Такеути. Динамика дислокаций и пластичность. Мир, М. (1989). 294 с.
- [6] I.V. Ostrovskii, O.A. Korotchenkov, T. Goto, H.G. Grimmeiss. Phys. Reports **311**, 1, 1 (1999).
- [7] И.Б. Ермолович, В.В. Миленин, Р.В. Конакова, Л.Н. Применко, И.В. Прокопенко, В.Л. Громашевский. ФТП **31**, 4, 503 (1997).
- [8] В.П. Алехин. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. Наука, М. (1983). 280 с.
- [9] Дж. Хирт, И. Лоте. Теория дислокаций. Атомиздат, М. (1972). 600 с.
- [10] Б.В. Петухов. ФММ **56**, 6, 1178 (1983).
- [11] И.В. Островский. Акустолюминесценция и дефекты кристаллов. Выща шк., Киев (1993). 229 с.
- [12] О.А. Коротченков, А.Х. Рожко, А.М. Антонов, И.В. Островский. ФТТ **35**, 8, 2244 (1993).
- [13] В.А. Макара, Л.П. Стебленко, М.Я. Горидько, Е.Г. Робур, Т.В. Волкова. УФЖ **42**, 3, 328 (1997).
- [14] А.П. Здебский, М.И. Лисянский, Н.Б. Лукьянчиков, М.К. Шейнкман. Письма в ЖТФ **13**, 16, 1009 (1987).