

УДК 621.315.592

## Влияние рода и концентрации мелких примесей на микротвердость и фотомеханический эффект в полупроводниках

© А.Б. Герасимов, Г.Д. Чирадзе<sup>¶</sup>Кутаисский государственный университет им. Акакия Церетели,  
384000 Кутаиси, Грузия

(Получена 17 августа 2000 г. Принята к печати 26 сентября 2000 г.)

Приведены результаты исследования по влиянию типа и концентрации мелких примесей на микротвердость и фотомеханический эффект в монокристаллическом кремнии. Показано, что с увеличением концентрации мелких примесей уменьшается как темновая микротвердость, так и величина фотомеханического эффекта. При этом влияние акцепторных примесей сравнительно больше, чем донорных. Полученные данные объясняются на основе механизма, согласно которому за уменьшение микротвердости в полупроводниках ответственны свободные носители тока (антисвязывающие квазичастицы), которые образуются в соответствующих энергетических зонах.

Влиянию типа и концентрации мелких примесей на микротвердость (МТ) и фотомеханический эффект (ФМЭ) (влияние света на МТ [1]) в полупроводниках посвящен ряд работ [2–6], из анализа которых видно, что часто экспериментальные результаты не только не согласуются, но и противоречат друг другу. Одной из возможных причин противоречия, вероятно, являются разные условия проведения экспериментов. Отсутствие единой точки зрения относительно механизма образования отпечатков в процессе индентирования, а также механизма ФМЭ на микроскопическом уровне не давало возможности раскрыть физическую природу эффектов.

В настоящей работе раскрыта физическая природа влияния типа и концентрации мелких примесей на МТ и ФМЭ в полупроводниках на основе механизма, предложенного в работах [7,8] и позволяющего объяснить все характерные явления, связанные с ФМЭ [9–12], электро-механическим [13] и термомеханическим [14] эффектами. Согласно этому механизму, наблюдаемое уменьшение значений МТ под влиянием различных внешних воздействий (свет, электрическое поле, температура) на полупроводник происходит из-за образования антисвязывающих квазичастиц — АКЧ (свободных электронов и дырок).

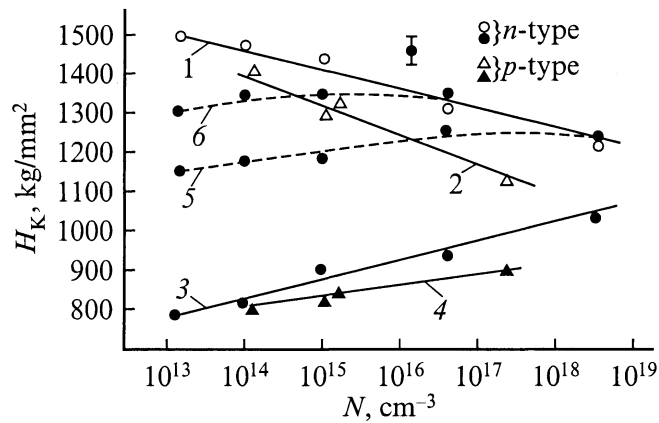
Исследовались монокристаллические бездислокационные образцы Si с ориентацией поверхности (100), легированные фосфором и бором (создающие в Si мелкие уровни соответственно донорного и акцепторного типа) в пределах концентрации  $N$  от  $10^{13}$  до  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Методики приготовления поверхностей исследуемых образцов, измерения МТ в темноте и при освещении белым светом разной интенсивности описаны в работе [9]. Нагрузка выбиралась равной 25 г. Во всех измерениях большая диагональ используемой пирамиды Кнупа всегда совпадала с направлением  $\langle 100 \rangle$  в исследуемой плоскости (100).

На рисунке приведены результаты измерения МТ в темноте и при освещении образцов Si в зависимости от концентрации примесей. Как видно, с увеличением концентрации мелких примесей уменьшается как темновая МТ, так и величина ФМЭ (оцениваемая как разность между темновыми и световыми значениями МТ). При этом видно, что влияние акцепторных примесей на темновую МТ больше, чем влияние донорных примесей. Качественно аналогичная картина наблюдается и в отношении влияния типа примеси на величину ФМЭ.

Уменьшение темнового МТ с увеличением концентрации мелких примесей связано с тем, что в соответствующих зонах создаются свободные электроны и дырки (АКЧ), которые, ослабляя химические связи между атомами [8], облегчают их перемещение в механическом поле, создаваемом под давлением индентора. Это подтверждается и тем, что в компенсированных образцах Si влияние примесных атомов на темновую МТ отсутствует.

Более сильное влияние акцепторных примесей на темновую МТ по сравнению с донорными вызвано тем, что потолок связывающей (валентной) зоны удален на большее энергетическое расстояние от энергетического уровня изолированного атома, чем дно антисвязывающей зоны (проводимости) (рис. 3.3 из [15]). Поэтому дырка в связывающей зоне ослабляет химические связи больше, чем свободный электрон, находящийся в антисвязывающей зоне. Следует также отметить, что ослабляющее действие тех АКЧ, которые образуются в результате ионизации примесей, значительно слабее, чем АКЧ, образованных при переходах зона–зона. В последнем случае химическая связь ослабляется на величину энергии, равную запрещенной зоне [16]. В случае АКЧ, образованных переходами электронов и дырок с примесных уровней в соответствующие зоны, ослабление химических связей происходит на величину энергии залегания этих примесных уровней. Поэтому для достижения одинакового по величине эффекта ослабления химических связей таких АКЧ требуется на порядки больше, чем АКЧ, образованных в результате переходов зона–зона.

<sup>¶</sup> E-mail: irpdd@sanetk.net.ge  
Fax: (995 331) 43833



Концентрационная зависимость темновой (1, 2) и световой (3–6) МТ  $H_k$  в Si. Интенсивность освещения, отн. ед.: 1, 2 — 0; 3, 4 — 1; 5 — 1/2; 6 — 1/4.

Легко объяснить и уменьшение величины ФМЭ с ростом концентрации примесей в Si. В этом случае уменьшается время жизни носителей тока, образованных светом, что ведет к уменьшению стационарной концентрации АКЧ при данной интенсивности освещения. При этом сравнительно большее уменьшение величины ФМЭ в кристаллах с акцепторными примесями связано с тем, что размягчающее действие АКЧ, образованных светом, для обоих типов образцов одинаково, а темновая МТ в случае акцепторных примесей меньше.

При концентрации примесей, когда ослабляющее действие АКЧ, образованных в результате ионизации этих примесей, значительно больше, чем АКЧ, образованных светом (т. е. переходами зона–зона), влияние освещения не наблюдается (области на рисунке после слияния зависимостей 1 и 5, 1 и 6). Это подтверждается тем, что с ростом интенсивности освещения область слияния концентрационной зависимости темновых и световых МТ сдвигается в сторону больших концентраций АКЧ, образованных ионизацией примесей.

Присутствие мелких примесных атомов находит свое отражение и в остаточном ФМЭ (остаточное размягчение приповерхностного слоя материала после прекращения освещения [10]). С увеличением концентрации примесей кроме уменьшения времени жизни носителей тока уменьшается также длина экранирования Дебая [17] и тем самым ширины барьеров, создаваемых неравномерным изгибом энергетических зон вдоль поверхности образца [18]. Это приводит к увеличению концентрации АКЧ, накопленных в соответствующих пространственно разделенных минимумах, которое уменьшит влияние АКЧ, созданных светом, и увеличит их скорость рекомбинации. Все эти факторы вызывают уменьшение как величины остаточного ФМЭ, так и времени его существования.

## Список литературы

- [1] G.C. Kuczynsky, R.H. Hochman. *Phys. Rev.*, **108**, 946 (1957).
- [2] М.С. Аблова, А.Р. Регель. *ФТТ*, **4**, 1053 (1962).
- [3] М.Г. Мильвидский, В.Б. Освенский, О.Г. Столяров, Д.Б. Шлякова. *ФММ*, **20**, 150 (1965).
- [4] С.С. Горелик, Ю.М. Литвинов, М.Г. Лозинский, Т.Г. Терещенкова. *Изв. АН СССР. Неорг. матер.*, **2**, 1689 (1966).
- [5] Ю.Х. Векилов, М.Г. Мильвидский, В.Б. Освенский, О.Г. Столярова, Л.И. Холодный. *Изв. АН СССР. Неорг. матер.*, **2**, 636 (1966).
- [6] П.П. Кузьменко, Н.Н. Новиков, Н.Я. Горидько, К.И. Федоренко. *ФТТ*, **8**, 1732 (1966).
- [7] А.Б. Герасимов, В.Б. Голубков, Э.Р. Кутелия, В.П. Минсеев, Э.М. Мкртычян, А.А. Церцвадзе. *Письма ЖТФ*, **6**, 58 (1980).
- [8] A.B. Gerasimov. *Proc. Fourth. Int. Conf. Materials of Science Forum* (N. Y., 1990) v. 65–66, p. 47.
- [9] А.Б. Герасимов, Г.Д. Чирадзе, Н.Г. Кутивадзе, А.П. Бибилашвили, З.Г. Бохочадзе. *ФТТ*, **40**, 503 (1998).
- [10] А.Б. Герасимов, Г.Д. Чирадзе, Н.Г. Кутивадзе, А.П. Бибилашвили, З.Г. Бохочадзе. *ФТТ*, **41**, 1225 (1999).
- [11] А.Б. Герасимов, Г.Д. Чирадзе, Н.Г. Кутивадзе, А.П. Бибилашвили, З.Г. Бохочадзе. *ФТТ*, **42**, 683 (2000).
- [12] А.Б. Герасимов, Г.Д. Чирадзе, Н.Г. Кутивадзе. *ФТП*, **35** (1), 70 (2001).
- [13] А.Б. Герасимов, Г.Д. Чирадзе, Н.Г. Кутивадзе. *Сб. науч. тр. "Интеллекти"*, **3**, 24 (1998).
- [14] A.B. Gerasimov, G.D. Chiradze, N.G. Kutivadze, A.P. Bibilashvili, Z.G. Bokhochadze. *Proc. Tbilisi University. Ser. Physics*, **34**, 79 (1999).
- [15] У. Харрисон. *Электронная структура и свойства твердых тел* (М., Мир, 1983) т. 1, с. 92.
- [16] A.B. Gerasimov, G.D. Chiradze, N.G. Kutivadze, A.P. Bibilashvili, Z.G. Bokhochadze. *Proc. Tbilisi University. Ser. Physics*, **34**, 73 (1999).
- [17] С.М. Рывкин. *Фотоэлектрические явления в полупроводниках* (М., Изд-во физ.-мат. лит., 1963).
- [18] *Вопросы радиационной технологии полупроводников*, под ред. Л.С. Смирнова (Новосибирск, Наука, 1980) с. 149.

Редактор Л.В. Шаронова

## The influence of impurity type and concentration on the microhardness and photomechanical effect in semiconductors

A.B. Gerasimov, G.D. Chiradze

Kutaisi Akaki Tsereteli State University,  
384000 Kutaisi, Georgia

**Abstract** The paper presents results on the influence of impurity type and concentration on microhardness and photomechanical effect in silicon single crystals. It has been found that the increase in the impurity concentration leads to a decrease of both microhardness and photomechanical effect. Besides, the role of the acceptor impurities is comparatively bigger than that of donor ones.

Data obtained can be regarded as an evidence in favour of a mechanism, according to which the decrease of microhardness in semiconductors is caused by free charge carriers (antibonding quasiparticles) occurring in appropriate energy bands.