

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

О МЕХАНИЗМЕ ОТЖИГА ДИВАКАНСИЙ В КРЕМНИИ,  
ОБЛУЧЕННОМ ПРОТОНАМИ

Берман Л. С., Воронков В. Б., Козлов В. А., Ременюк А. Д.

## Постановка задачи

В кремнии, облученном тяжелыми частицами высоких энергий, создающими разупорядоченные области (РО), дивакансии (ДВ) являются одним из основных радиационных дефектов (РД), обуславливающих генерационно-рекомбинационные параметры кремниевых приборов [1-3]. Однако кинетика отжига ДВ в РО, дефектно-примесной оболочке вокруг РО, а также в «ненарушенной» матрице кристалла изучена мало. Согласно [4], в *n*-кремнии, облученном  $\alpha$ -частицами с энергией  $E \approx 4$  МэВ, ДВ отжигаются в интервале температур 150—250 °С. Согласно [5, 6], в *n*-кремнии, облученном быстрыми нейтронами, отжиг ДВ происходит в интервале 100—350 °С (в зависимости от дозы облучения) в две стадии: отжиг ДВ в РО и окружающей ее дефектно-примесной оболочке, а также в ненарушенной матрице кристалла.

С другой стороны, в кремнии, облученном  $\gamma$ -квантами или электронами ( $E \approx 1$  МэВ), не образуется РО, и ДВ ожигаются в интервале температур 250—350 °С [7-13]; причем, согласно [7, 12], различие температур отжига обусловлено разницей в концентрации кислорода: меньшей концентрации кислорода соответствует большая температура отжига.

В настоящей работе исследована зависимость отжига ДВ от концентрации атомарного кислорода в *n*-кремнии, облученном протонами.

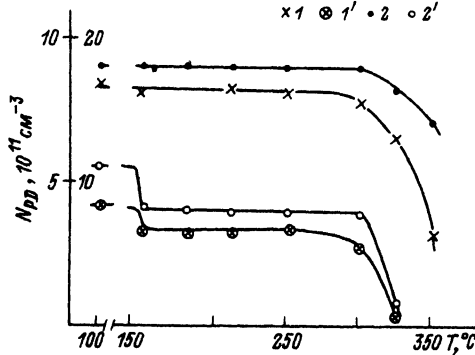
## Образцы

Для изготовления образцов использовался бестигельный *n*-кремний с концентрацией фосфора  $2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. *p-n*-Диоды изготовлены диффузией бора в воздухе при температуре 1230 °С в течение 10 ч. Глубина залегания *p-n*-перехода  $\approx 80$  мкм. Часть образцов после диффузии бора прошла дополнительную термообработку (ТО) — выдержку 1 ч при  $T = 1000$  °С, которая переводит атомарный кислород в преципитаты [14]. Область  $n^+$  со стороны базы создавалась диффузией фосфора при 1000 °С в течение 2 ч. Омические контакты изготовлены химическим нанесением никеля с его последующим вжиганием ( $T = 600$  °С, 10 мин).

Все образцы, как прошедшие ТО (группа 1, 6 штук), так и не прошедшие ТО (группа 2, 6 штук) были облучены протонами с энергией  $E = 3.7$  МэВ дозой  $6 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>.

## Методика измерений

Концентрация остаточных глубоких центров (ГЦ)  $N_T$  и РД измерялась методом релаксационной спектроскопии глубоких центров (DLTS). Измерительная установка описана в [15]. Концентрация РД вычислялась по амплитуде сигнала DLTS [[см. формулу (5.13), работы [16]].



Зависимость концентрации А-центров и дивакансий от температуры отжига диодов, облученных протонами.

1 — А-центры в диоде группы 1, 1' — дивакансии в том же диоде, 2 — А-центры в диоде группы 2, 2' — дивакансии в том же диоде. Левая ось — концентрация дивакансий, правая ось — концентрация А-центров.

### Результаты измерений и их обсуждение

До облучения во всех образцах было  $N_T < 10^9 \text{ см}^{-3}$ . После облучения во всех образцах наблюдались РД с уровнями: 1 —  $E_c - 0.17 \text{ эВ}$  (А-центр, комплекс вакансия—кислород), 2 —  $E_c - 0.23 \text{ эВ}$  (уровень, приписываемый ДВ), 3 —  $E_c - 0.49 \text{ эВ}$  (ДВ).

Все образцы прошли изохронный отжиг в интервале 150—350 °С при шаге 30 °С и времени каждого отжига 1 ч. Концентрации А-центров и ДВ до отжига и в ходе отжига приведены на рисунке. Для обеих групп образцов скорости введения как А-центров, так и ДВ соответственно близки. Отжиг ДВ происходит в два этапа (аналогично отжигу ДВ в кремнии, облученном нейтронами, см. выше): а — при  $T = 150 \text{ °С}$ ; б — в интервале 275—325 °С. Уменьшение концентрации ДВ в ходе отжига приблизительно одинаково для обеих групп образцов. Отжиг А-центров начинается при  $T = 300 \text{ °С}$ , ход отжига близок для обеих групп образцов.

Из приведенных экспериментальных данных следует, что состояние кислорода в решетке кремния не оказывает существенного влияния на скорость введения дивакансий и температуру их отжига. По-видимому, различие в температурах отжига дивакансий [7–13] обусловлено различной концентрацией структурных дефектов, являющихся стоками для вакансий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Wondrack W., Silber D. // Physica. 1985. V. 129B. N 1-3. P. 322—326.
- [2] Wondrack W., Bethge K., Silber D. // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. N 8. P. 3464—3466.
- [3] Svenson B. G., Hallen A., Sundquist B. U. R. // Mater. Sci. Eng. 1989. V. B4. P. 285—289.
- [4] Берман Л. С., Ременюк А. Д., Шуман В. Б. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 6. С. 1155—1158.
- [5] Васильев В. А., Смагулова С. А., Смирнов Л. С. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 3. С. 561—564.
- [6] Антонова И. В., Васильев В. А., Панов В. Н., Шаймеев С. С. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 6. С. 1076—1079.
- [7] Watkins G. D. // Phys. Rev. 1965. V. 138. N 2A. P. 543—555.
- [8] Kimerling L. Radiation Effects in Semiconductors. 1976. Int. Phys. Conf. Ser. N 31. Bristol—London, 1977. P. 221—229.
- [9] Ewvaraye A. O., Baliga B. J. // J. Electrochem. Soc. 1977. V. 124. N 6. P. 913—916.
- [10] Sah C. T. // Phys. Rev. B. 1973. V. 7. N 10. P. 4587—4593.
- [11] Brotherton S. D., Bradley P. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. N 8. P. 5720—5732.
- [12] Cheng L. J. // Phys. Rev. 1966. V. 152. P. 761—773.
- [13] Ewvaraye A. O., Sun E. // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. N 2. P. 3776—3780.
- [14] Малышев В. А. // ФТП. 1974. Т. 8. В. 1. С. 148—155.

- [15] Берман Л. С., Ременюк А. Д., Толстобров М. Г. // Препринт ФТИ АН СССР им. А. Ф. Иоффе. Л., 1985. № 974.
- [16] Берман Л. С., Лебедев А. А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л., 1981. 176 с.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе  
РАН  
Санкт-Петербург

Получено 19.02.1992  
Принято к печати 4.03.1992

ФТП, том 26, вып. 8, 1992

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В БЕЗДИСЛОКАЦИОННОМ КРЕМНИИ

Луговых П. Ф., Лукьяница В. В.

При облучении и последующем отжиге бездислокационного зонного *n*-кремния в процессах образования и перестройки дефектов наблюдался ряд особенностей, которые связывались с наличием в объеме таких кристаллов не выявляемых селективным травлением включений или примесно-дефектных скоплений (ПДС) междоузельного типа, окруженных полями упругих напряжений [1, 2]. В работе исследовалось влияние предварительной высокотемпературной ( $T > 800$  °C) обработки на эффективность образования компенсирующих радиационных дефектов (РД) в таком материале.

Используемые бездислокационные кристаллы *n*-Si диаметром 30 мм ( $\rho \approx 100$  Ом·см) были получены (скорость  $v_p = 3$  мм/мин) методом зонной плавки в атмосфере аргона и не содержали ростовых микродефектов, выявляемых селективным травлением (свирл-картина отсутствовала). Концентрации фоновых примесей (кислород, углерод), определенные по данным ИК спектроскопии, не превышали  $(2+3) \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

Результаты получены из измерений температурных зависимостей коэффициента Холла (ТЗКХ) на различных этапах облучения ( $T_{\text{обл}} < 50$  °C) гамма-квантами <sup>60</sup>Co и изохронного (15 мин) отжига образцов, подвергнутых предварительной термообработке (ПТО) в течение 1 ч в интервале температур  $T_{\text{ПТО}} = 800 \div 1000$  °C.

Анализ ТЗКХ показал, что при всех  $T_{\text{ПТО}}$  после облучения в исследуемых кристаллах наиболее эффективно образуются РД с уровнями  $\sim E_c - 0.17$  эВ (*A*-центры и комплексы  $C_i - C_s$ ) и  $\sim E_c - 0.40$  эВ (прежде всего *E*-центры) [3-5].

На рисунке представлены зависимости скоростей  $\eta$  образования РД ( $\eta_{0.17}$  и  $\eta_{0.40}$ ) от температуры предварительной термообработки. Как видно, скорости образования РД практически не изменяются при увеличении  $T_{\text{ПТО}}$  до 900 °C, а затем ( $T_{\text{ПТО}} > 900$  °C)  $\eta_{0.40}$  возрастает, а  $\eta_{0.17}$  уменьшается. При этом абсолютные значения изменений  $\eta_{0.40}$  и  $\eta_{0.17}$  ( $\Delta\eta_{0.40}$  и  $\Delta\eta_{0.17}$ ) хотя и одного порядка, однако, согласно оценкам,  $\Delta\eta_{0.17} > \Delta\eta_{0.40}$  примерно в 1.5 раза при фиксированном потоке облучения ( $\Phi = \text{const}$ , кривые 1, 3). Из рисунка видно также, что увеличение  $\Phi$  на порядок не приводит к изменению характера полученных зависимостей (кривые 1, 2), а вызывает лишь незначительное уменьшение  $\eta_{0.40}$ .

В зависимости от условий выращивания ( $v_p$ , осевой температурный градиент вблизи фронта кристаллизации) бездислокационного кремния в его объеме образуются микродефекты различных типов [6], а в так называемых «бездефектных» кристаллах (свирл-картина отсутствует) — не выявляемые селективным трав-