

УДК 621.315.592

## Распределение водорода в кремнии и карбиде кремния после высокотемпературного протонного облучения

© В.В. Козловский<sup>¶</sup>, В.А. Козлов\*

Санкт-Петербургский государственный технический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

\* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 10 июня 1999 г. Принята к печати 11 июня 1999 г.)

Методом вторично-ионной масс-спектрометрии изучено распределение водорода в Si и SiC после высокотемпературного протонного облучения ( $T_{\text{итт}} = 20\text{--}700^\circ\text{C}$ ). Показано, что в SiC профили концентрации водорода слабо зависят от температуры облучения. В Si заметное изменение профиля наблюдается уже при  $T_{\text{итт}} \simeq 300^\circ\text{C}$ , а при  $T_{\text{итт}} \simeq 700^\circ\text{C}$  профиль полностью утрачивает градиент своей концентрации.

В последнее десятилетие широкое развитие получили методы радиационной модификации полупроводниковых материалов с использованием протонных пучков [1–4]. В таких методах, как протонно-стимулированная диффузия и легирование радиационными дефектами [1], прецизионное расслоение полупроводниковых пластин (технология *smart cut*) [2], трансмутационное легирование [3] и ионно-лучевое перемешивание [4] используется широкий диапазон температур, при которых облучается полупроводник. Весьма важным аспектом в этих методах модификации материалов является распределение водорода по глубине полупроводника в зависимости от температуры облучения. До настоящего времени специальных исследований этой проблемы не проводилось.

В настоящей работе проведено изучение концентрационных профилей распределения водорода (КПРВ) в базовом и в одном из наиболее перспективных материалов современной полупроводниковой электроники — кремнии и карбиде кремния после облучения (имплантации) ионами водорода  $\text{H}^+$  в широком температурном диапазоне  $20\text{--}700^\circ\text{C}$ . Облучение образцов кремния марки КДБ-40 и карбида кремния политаипа 6Н выполнялось на ускорителе нейтронного генератора НГ-200У. Энергия протонов составляла 100 кэВ, плотность тока пучка составляла  $5\text{ мкА/см}^2$ , время облучения — 1200 с, доза облучения —  $4 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-2}$ . Облучение выполнялось в специальных устройствах, позволявших устанавливать и контролировать температуру мишеней при облучении с точностью  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Для измерения КПРВ использовался метод вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС).

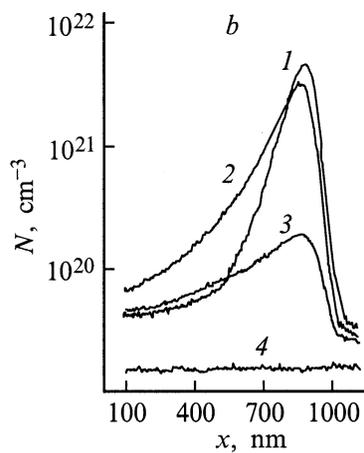
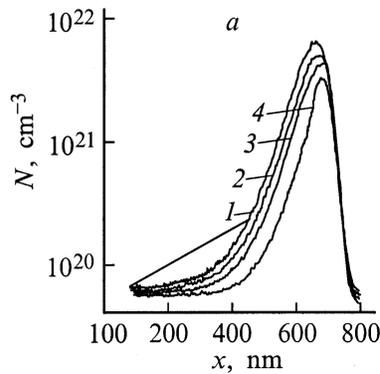
На рисунке представлены примеры полученных результатов. Как видно из рисунка, положение максимума на КПРВ в облученных кристаллах практически не зависит от температуры облучения и находится для протонов с энергией 100 кэВ на глубине  $x \simeq 0.9\text{ мкм}$  в Si и  $x \simeq 0.65\text{ мкм}$  в SiC. При этом положение максимумов определяется проецированным пробегом ионов водорода в полупроводнике и находится в хорошем соответствии с

тормозными потерями протонов, обусловленными зарядом и массой кремния и углерода, а также плотностью полупроводника [5]. Следует отметить, что изменение температуры облучения  $T_{\text{итт}}$  в диапазоне от 20 до  $700^\circ\text{C}$  практически не сказывается на форме КПРВ в SiC (рисунок, а), которые сохраняют "узкий" максимум даже в случае имплантации протонов при  $T_{\text{итт}} = 700^\circ\text{C}$ . В отличие от SiC облучение Si уже при  $T = 300^\circ\text{C}$  приводит к заметному изменению профиля КПРВ (рисунок, б), наблюдается проседание и уширение максимума на КПРВ в сторону облучаемой поверхности. Эти изменения усиливаются с ростом температуры облучения и при  $T_{\text{итт}} = 700^\circ\text{C}$  КПРВ полностью утрачивает градиент (рисунок, б, кривая 4).

Полагая, что перераспределение водорода при высокотемпературной имплантации обусловлено процессом диффузии и описывается уравнением Фика, мы оценили коэффициент диффузии водорода  $D$ , используя решение уравнения Фика для полуограниченного тела с непроницаемой границей [6]. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало, что величина  $D$  в Si в условиях высокотемпературного протонного облучения в несколько раз меньше значений, полученных при изучении обычной тепловой диффузии [7]. Так, для  $T_{\text{итт}} = 300^\circ\text{C}$  величина  $D$  в нашем случае составила только  $D = 5 \cdot 10^{-12}\text{ см}^2/\text{с}$ , тогда как в случае чисто тепловой диффузии  $D > 10^{-11}\text{ см}^2/\text{с}$ . Такое различие в значениях коэффициента диффузии H в Si связано, по-видимому, с чувствительностью процесса миграции водорода к дефектности кристаллической структуры полупроводника, обусловленной радиационными повреждениями при имплантации протонов.

В заключение отметим существенный практический интерес полученных результатов. Проведенные исследования продемонстрировали, что формирование в кристаллах Si и SiC скрытых слоев, насыщенных водородом, может быть успешно реализовано при повышенных температурах облучения. Для кремния эти температуры могут достигать до  $T_{\text{итт}} \simeq 300^\circ\text{C}$ , тогда как для карбида кремния они превышают уровень  $700^\circ\text{C}$ . Использование

<sup>¶</sup> E-mail: kozlovski@tuexp.stu.neva.ru



Распределение концентрации ( $N$ ) в SiC (a) и Si (b) после облучения протонами с энергией 100 кэВ, дозой  $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  при температурах облучения  $T_{\text{irr}}$ , °C: 1 — 20, 2 — 300, 3 — 500, 4 — 700.

таких высокотемпературных режимов имплантации протонов перспективно при изготовлении структур "кремний на изоляторе" и "карбид кремния на изоляторе" по технологии *smart cut*. Поскольку повышение температуры облучения резко снижает количество вводимых в полупроводник при протонном облучении радиационных дефектов [8], высокотемпературная имплантация протонов способна резко снизить дефектность активных слоев в структурах типа "полупроводник на изоляторе", смягчить условия постимплантационного отжига радиационных дефектов в таких структурах и улучшить их качество. Особенно ярко эти достоинства высокотемпературной имплантации протонов должны проявиться в случае карбида кремния, для которого постимплантационный отжиг радиационных дефектов после протонного облучения является одной из ключевых проблем создания структур "карбид кремния на изоляторе", пригодных для приборных применений.

Авторы признательны Р.Ш. Малковичу за помощь в решении диффузионных задач и Ю.А. Кудрявцеву за измерение профилей распределения водорода методом ВИМС.

Работа выполнена при частичной поддержке программы "Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники" Министерства науки и технологий РФ (грант 02.04.330.89.1.2).

## Список литературы

- [1] И.В. Васильева, Г.А. Ефремов, В.В. Козловский, В.Н. Лома-сов, В.С. Иванов. *Радиационные процессы в технологии материалов и изделий электронной техники* (М., Энергоатомиздат, 1997).
- [2] M. Bruel. *Electron. Let.*, **31**, 1201 (1995).
- [3] Л.Ф. Захаренков, В.В. Козловский, Б.А. Шустров. *ФТП*, **26**, 3 (1992).
- [4] *Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками* (М., Машиностроение, 1987). [Пер. с англ.: *Surface modification and alloying by Laser, Ion, and Electron Beams*, ed. by J.M. Poate, G. Foti, D.C. Jacobson (N.Y., Plenum Press, 1983)].
- [5] *Взаимодействие заряженных частиц с твердым телом* (М., Высш. шк., 1994). [Пер. с англ.: *Interaction of Charged Particles with Solids and Surfaces*. Ed. by A. Gras-Marti, H.M. Urbassek, N.R. Arista, F. Flores (N.Y., Plenum Press, 1991)].
- [6] Е.Д. Горнушкина, В.А. Дидик, В.В. Козловский, Р.Ш. Малкович. *ФТП*, **25**, 2044 (1991).
- [7] S.J. Pearton, J.W. Corbett, M. Stavola. *Hydrogen in Crystalline Semiconductors* (Heidelberg, Springer Verlag, 1992) p. 225.
- [8] В.С. Вавилов, Б.М. Горин, Н.С. Данилин, А.Е. Кив, Ю.Л. Нуров, В.И. Шаховцов. *Радиационные методы в твердотельной электронике* (М., Наука, 1990).

Редактор Т.А. Полянская

## Distribution of hydrogen in silicon and silicon carbide after high temperature proton implantation

V.V. Kozlovski, V.A. Kozlov\*

St.Petersburg State Technical University  
195251 St.Petersburg, Russia  
\* A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St.Petersburg, Russia

**Abstract** Distribution of hydrogen in Si and SiC after high temperature proton implantation ( $T_{\text{irr}} = 20-700^\circ\text{C}$ ) is investigated by Secondary Ion Mass Spectroscopy depth profiling. It is shown that profile of hydrogen concentration in SiC did not change significantly with temperature of implantation. The profile of hydrogen concentration in Si changed dramatically at  $T_{\text{irr}} \geq 300^\circ\text{C}$  and at  $T_{\text{irr}} \sim 700^\circ\text{C}$  hydrogen profile did not show any concentration gradient and profile peak.