

Формирование и исследование захороненных слоев SiC с высоким содержанием радиационных дефектов

© Е.В. Богданова, В.В. Козловский*, Д.С. Румянцев*, А.А. Волкова, А.А. Лебедев

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

* Санкт-Петербургский политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 1 марта 2004 г. Принята к печати 4 марта 2004 г.)

Проведена имплантация протонов с энергией $E = 100$ кэВ в диапазоне доз от $2 \cdot 10^{17}$ до $4 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$ в 6H- и 4H-SiC n -типа проводимости при комнатной температуре. После имплантации выполнены различные типы отжига в диапазоне температур 550–1500°C. Параметры образцов контролировались методами вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик, фотолюминесценции. Обнаружен блистеринг поверхности образцов после отжига при температуре 800°C только при имплантации протонов с дозой $\leq 3 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$. Уменьшение сопротивления компенсированного слоя начинается после отжига при температуре ~ 1200 °C и заканчивается после отжига при температуре ~ 1500 °C. После имплантации наблюдается резкое уменьшение интенсивности фотолюминесценции для всех типов образцов. Восстановление интенсивности фотолюминесценции образцов начинается после отжига при температурах ≥ 800 °C и завершается после отжига при температуре 1500°C.

1. Введение

Известно, что протонное облучение характеризуется достаточно уникальным характером тормозных потерь энергии, приводящим к генерации радиационных дефектов (РД) в полупроводнике преимущественно на глубинах, близких к пробегу протонов (R_p). При этом непосредственно на поверхности полупроводника скорость генерации РД почти на порядок меньше, чем в районе пробега, а на глубинах, много больших R_p , РД вообще не образуются [1]. Таким образом, с помощью протонного облучения можно получить локализованные по глубине („захороненные“) слои полупроводника с высокой концентрацией радиационных дефектов. По этой причине облучение высокими дозами низкоэнергетических протонов широко используется в технологии различных полупроводников — как для создания захороненных слоев с высоким сопротивлением (SOI), так и для отделения тонких пленок материала при отжиге облученных образцов (Smart Cut) [1]. Использование протонного облучения в технологии карбида кремния может представлять особый интерес в связи с недавно обнаруженной возможностью формирования аморфного слоя SiC [2] при облучении протонами. Как известно, явление аморфизации при протонном облучении в обычных условиях для других полупроводников не наблюдается [1].

Цель настоящей работы заключается в создании захороненных слоев SiC с высоким содержанием радиационных дефектов и исследовании их свойств.

2. Условия эксперимента

В качестве образцов использовались пластины SiC политипов 6H и 4H n -типа проводимости. Концентрация некомпенсированных доноров ($N_d - N_a$) была

$\sim 1.6 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ в 6H-SiC и $3.8 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ в 4H-SiC. Облучение образцов выполнялось на ускорителе нейтронного генератора НГ-200У при комнатной температуре. Использовались протоны с энергией $E = 100$ кэВ в диапазоне доз от $2 \cdot 10^{17}$ до $4 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$. (При облучении SiC протонами с энергией 100 кэВ значение R_p должно быть ~ 0.65 мкм [1]). После имплантации осуществлялся постадийный отжиг образцов в диапазоне температур 500–1500°C в атмосфере аргона. Параметры образцов до и после облучения, а также после отжига при различных температурах контролировались методами вольт-фарадных, вольт-амперных характеристик и фотолюминесценции. Вольт-фарадные характеристики ($C-U$ -характеристики) измерялись с помощью ртутного зонда на емкостном мосте с параллельной схемой замещения и частотой синусоидального сигнала 10 кГц. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) снимались при возбуждении образцов импульсным излучением азотного лазера (длина волны $\lambda = 337$ нм, диаметр светового пятна 400 мкм) при температуре 77 К.

3. Экспериментальные результаты

В спектрах ФЛ необлученных образцов 6H-SiC (рис. 1) наблюдалась полоса с максимумом излучения на длине волны $\lambda_{\max} \approx 465-470$ нм, обусловленная излучательной рекомбинацией на донорно-акцепторных парах Al-N. В спектре необлученных кристаллов 4H-SiC (рис. 2) также наблюдалась полоса ФЛ ($\lambda_{\max} \approx 420$ нм), связываемая с излучательной рекомбинацией с участием акцепторного центра Al. Кроме того, в длинноволновой части спектра ФЛ 4H-SiC наблюдалась полоса ($\lambda_{\max} \approx 560$ нм), связываемая с наличием примеси бора в кристаллах SiC [3]. Непосредственно после облучения ФЛ практически исчезала для всех типов образцов. Ранее тушение ФЛ, связанной с атомами примеси Al,

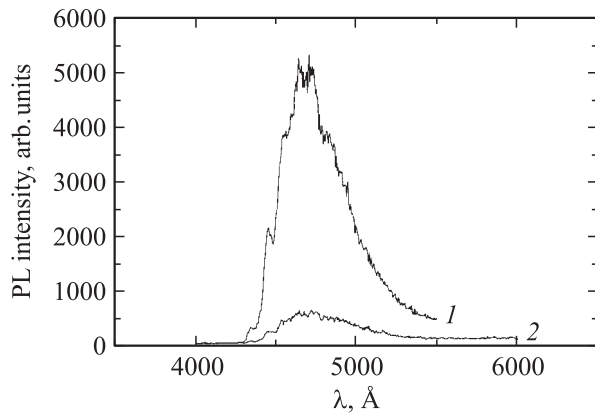


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции (PL) образца 6H-SiC до облучения (1), после облучения и отжига при 800°C (2). Доза облучения $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

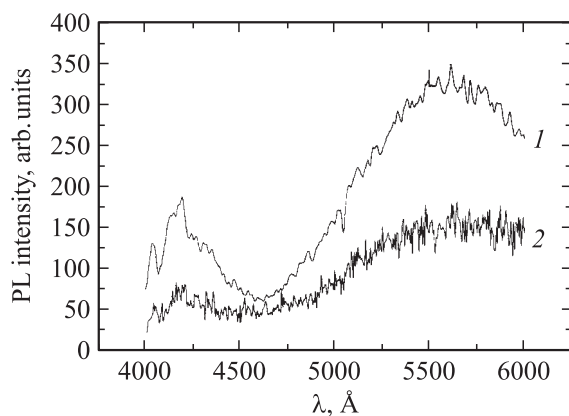


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции (PL) образца 4H-SiC до облучения (1), после облучения и отжига при 800°C (2). Доза облучения $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

в образцах SiC, обработанных в водородной плазме, изучалось в работах [4–6]. Авторы работ [4–6] связывали это тушение со способностью атомов водорода пассивировать акцепторные центры В и Al в SiC, т.е. со способностью водорода образовывать с атомами Al и В электрически неактивные комплексы. Эти комплексы обладают невысокой температурной стабильностью, и при температурах $> 200^\circ\text{C}$ наблюдается их распад и происходит диффузия водорода из объема полупроводника [6]. В работе [4] наблюдалось полное восстановление интенсивности исходной ФЛ после отжига образцов при температурах $\sim 750^\circ\text{C}$. В нашем случае заметное восстановление интенсивности ФЛ начинается при больших температурах ($\sim 800^\circ\text{C}$) (рис. 1, 2), что, возможно, связано с существенно большей концентрацией водорода в исследованных нами образцах по сравнению с работой [6]. Отметим, что эта температура близка к значению, при котором начинается отжиг РД в SiC [7,8]. После отжига при 1500°C интенсивность ФЛ исследованных образцов возвращалась к исходной величине.

Исследование поверхности облученных образцов показало, что во всем диапазоне использованных доз имплантация протонов в карбид кремния не приводила к изменению морфологических параметров. Изменение морфологии поверхности начинает наблюдаться после отжига облученных образцов, причем, в отличие от кремния [2], необходимые температуры отжига весьма высоки, $\sim 880^\circ\text{C}$.

Для всех образцов, облученных протонами дозой $< 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, после отжига при температуре $\geq 800^\circ\text{C}$ наблюдались „вздутие“ и отслаивание чешуек материала — блистеринг [2]. Для образцов, облученных протонами дозой $\geq 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, после отжига при температуре от 800 до 1500°C блистеринг поверхности не наблюдался (рис. 3, b). Обнаруженный эффект подавления блистеринга, по нашему мнению, обусловлен аморфизацией облученного слоя. Ранее методом атомно-силовой микроскопии было зарегистрировано появление аморфной фазы в карбиде кремния, облученном низкоэнергетичными протонами дозой $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при сравнительно невысоких токах пучка протонов ($< 5 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$) [2]. Такой эффект свидетельствует, по-видимому, об особенностях разделения первичных радиационных дефектов в карбиде кремния, приводящих к накоплению достаточной для аморфизации полупроводника концентрации многовакансионных комплексов. Аморфизация препятствует формированию плоских двумерных вакансионно-водородных дефектов, наблюдающихся только в кристаллическом материале и являющихся основным начальным звеном в развитии микротрещин в плоскости захороненных дефектных слоев, приводящим к блистерингу.

На рис. 3, a, b приведены изображения поверхностей отожженных образцов 4H-SiC после облучения протонами с различными дозами. Аналогичную картину мы имеем для 6H-SiC.

После облучения исследовавшихся поверхностно-барьерных структур наблюдалось смещение $C-U$ -характеристик вверх по оси ординат при сохранении прежнего угла наклона (прежнего значения величины $N_d - N_a$). Кроме того, наблюдалась зависимость величины измеряемой емкости (C) от частоты измерения (f) — рост C с уменьшением f . Совпадение величины C со значением, полученным для необлученного диода, наблюдалось при частотах $\sim 100 \text{ Гц}$. Подобный характер

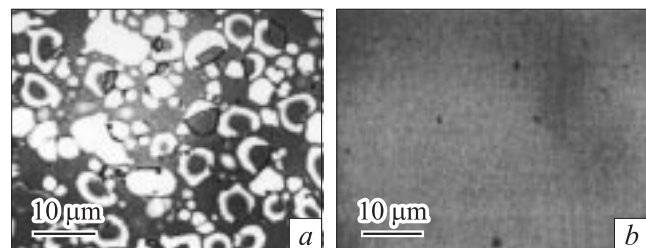


Рис. 3. Оптические фотографии поверхности образцов 4H-SiC после облучения и отжига при 800°C. Дозы облучения, см^{-2} : a — $2 \cdot 10^{17}$, b — $4 \cdot 10^{17}$.

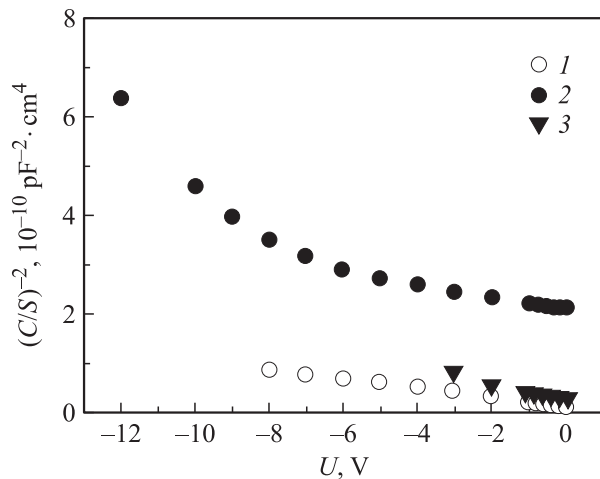


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики образцов 6H-SiC до облучения (1), после облучения (2), после облучения и отжига при 1500°C (3). Доза облучения $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. S — площадь образца.

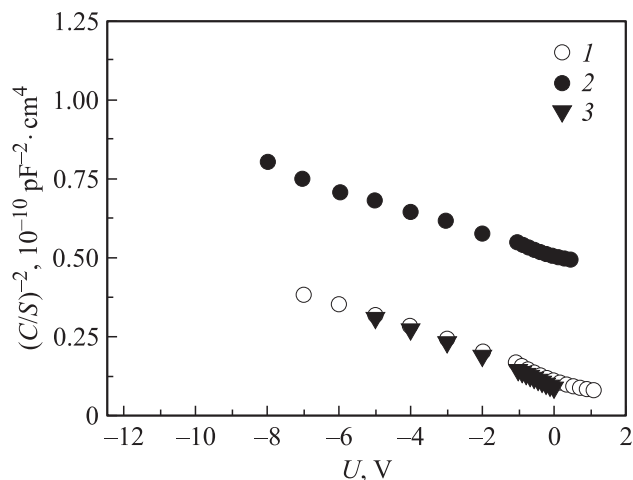


Рис. 5. Вольт-фарадные характеристики образцов 4H-SiC до облучения (1), после облучения (2), после облучения и отжига при 1500°C (3). Доза облучения $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. S — площадь образца.

изменения $C-U$ -характеристики свидетельствует [9] о значительном увеличении омического сопротивления базы диода после облучения. Кроме того, для образцов 6H-SiC при обратных напряжениях $> 8 \text{ В}$ (толщина слоя объемного заряда $> 0.1 \text{ мкм}$) наблюдался нелинейный ход зависимости $C^{-2}(U)$, что свидетельствовало об уменьшении значения концентрации $N_d - N_a$ в глубине образца. Для образцов 4H-SiC этот эффект был выражен гораздо слабее, что, очевидно, связано с большей изначальной (до облучения) величиной $N_d - N_a$ в образцах данного политипа (толщина слоя объемного заряда при максимальных обратных напряжениях $\sim 0.06 \text{ мкм}$). Таким образом, согласно емкостным измерениям, облучение привело к образованию компенсированного слоя на глубинах $> 0.1 \text{ мкм}$ при практически не изменившейся концентрации у поверхности образца.

После отжига при 1500°C вольт-фарадные характеристики полностью совпадали с характеристиками необлученных структур (рис. 4, 5).

4. Заключение

Проведены исследования воздействия низкоэнергетического протонного облучения и последующего отжига на свойства образцов SiC. Показано, что для SiC применимость протонного облучения в различных технологических процессах зависит от дозы облучения. „Граничной“ для протонов с энергией 100 кэВ является доза $\sim 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Дозы $< 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ приводят к развитию блистеринга при отжиге и могут быть использованы в технологии Smart Cut. При дозах $> 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ явление блистеринга оказывается подавленным, скорее всего за счет наступающей аморфизации облученного слоя. Изменяя энергию протонов, можно изменять и глубину данного слоя. Таким образом, облучение с дозами $> 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ может оказаться перспективным для создания SOI-структур на основе SiC. Отметим, что с увеличением энергии протонов обычно уменьшается сечение дефектообразования, т.е. уменьшается концентрация дефектов в захороненном слое. Поэтому следует ожидать, что увеличение энергии протонов приведет к увеличению критического значения дозы облучения.

Работа выполнена при поддержке грантов INTAS 01-603 и NATO SFP-978011, РФФИ № 03-02-16054.

Список литературы

- [1] В.В. Козловский. *Модифицирование полупроводников пучками протонов* (СПб., Наука, 2003).
- [2] В.А. Козлов, В.В. Козловский, А.Н. Титков, М.С. Дунаевский, А.К. Крыжановский. *ФТП*, **36**, 1310 (2002).
- [3] А.А. Лебедев. *ФТП*, **33**, 129 (1999).
- [4] Y. Koshka, M. Mazzola. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 752 (2001).
- [5] Y. Koshka, M. Mazzola. *Mater. Sci. Forum*, **389–393**, 609 (2002).
- [6] C. Hulsen, N. Achtziger, U. Reinlohner, W. Witthuhn. *Mater. Sci. Forum*, **338–342**, 929 (2000).
- [7] T. Dalibor, G. Pensl, T. Kimoto, W.J. Choyke, A. Schoner, N. Nordell. *Phys. Status Solidi A*, **162**, 199 (1997).
- [8] А.А. Лебедев, А.И. Веингер, Д.В. Давыдов, В.В. Козловский, Н.С. Савкина, А.М. Стрел'чук. *J. Appl. Phys.*, **88**, 6265 (2000).
- [9] А.А. Лебедев, Н.А. Соболев. *ФТП*, **16**, 1874 (1982).

Редактор Л.В. Шаронова

Formation and investigation of buried SiC layers with a high content of radiation-induced defects

E.V. Bogdanova, V.V. Kozlovski, D.S. Rumyantsev*, A.A. Volkova, A.A. Lebedev*

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

Abstract Hydrogen ions having the energy 100 keV and doses ranging from $2 \cdot 10^{17}$ to $4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ have been implanted into the *n*-type 6H- and 4H-SiC samples at room temperature. The postimplantation sequential annealings of irradiated samples were performed in the 500–1500°C temperature range. Parameters of the samples were determined by the capacitance-voltage and current-voltage measurements, and by the photoluminescence technique, and the atomic-force microscopy. It was found that surface blistering appears after the postimplantation annealing at 800°C in the case of hydrogen implantation with doses $< 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. A decrease in the resistivity of the compensated layer begins after annealing at $\sim 1200^\circ\text{C}$ and ends after annealing at 1500°C. After irradiation, the photoluminescence intensity decreases dramatically for all the samples. Recovery of the photoluminescence intensity starts after annealing at 800°C and is completed upon annealing at the temperature of 1500°C.