

06

Отжиг радиационно-компенсированного карбида кремния

© А.А. Лебедев, Е.В. Богданова, М.В. Григорьева, С.П. Лебедев,
В.В. Козловский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: shura.lebe@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 3 мая 2012 г.

Было проведено исследование процессов восстановления проводимости радиационно-компенсированных эпитаксиальных слоев различных политипов карбида кремния p -типа проводимости. Показано, что созданная облучением компенсация SiC сохраняется при отжигах $\leq 1000^\circ\text{C}$. Практически полное восстановление проводимости происходит при $T \geq 1200^\circ\text{C}$. Данный характер отжига радиационной компенсации не зависит от политипа карбида кремния и исходного уровня легирования эпитаксиального слоя. Определенные температуры полного отжига значительно превосходят рабочие температуры приборов SiC.

Как известно, протонное облучение („протонирование“) широко используется для формирования локальных высокоомных (полуизолирующих) областей как в приборах силовой электроники, так и в микроэлектронике [1]. Особый прогресс в этой области достигнут для приборов на основе арсенида галлия [1]. Это обусловлено, с одной стороны, спецификой вводимых радиационных дефектов (РД), а с другой — 40-летним опытом изучения РД в GaAs.

Значительно хуже изучены возможности протонирования для перспективного широкозонного полупроводника — карбида кремния. Исследования РД в этом материале интенсивно проводятся в течение только последних десяти лет, причем объектом исследования являлся в основном материал n -типа проводимости. К настоящему времени существует лишь несколько публикаций, где были исследованы только параметры образующихся при облучении p -SiC глубоких центров и определены энергии их отжигов [2–6]. Однако практический интерес для создания приборов представляет формирование локальных высоко-

коомных областей в матрице полупроводника и исследование их температурной стабильности. Задачей данной работы было исследование процессов компенсации проводимости и восстановления проводимости радиационно-компенсированных эпитаксиальных слоев различных политипов карбида кремния p -типа проводимости.

В качестве образцов использовались эпитаксиальные слои p -SiC, выращенные методом сублимационной эпитаксии [7] на основе подложек трех политипов: n -SiC:6H и 15R (выращенных методом Лэли) и 4H (коммерчески выпускаемых фирмой CREE, США). Толщина p -слоя около 10–20 μm , толщина подложки около 400 μm . Концентрация некомпенсированных доноров в подложке Nd–Na $(3–5) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и акцепторов в p -слое $\sim (3–24) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Исходная компенсация образцов достигалась облучением протонами на циклотроне МГЦ-20. Использовались протоны с энергией 8 meV в диапазоне доз облучения (D) — $2.0 \cdot 10^{15}–2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. Отжиг образцов проводился в вакууме при температурах 900–1200°С. Концентрации некомпенсированных акцепторов Na–Nd в исходных, облученных и отожженных образцах определялись из вольт-фарадных характеристик ($C–U$). Измерение характеристик $C–U$ производилось с использованием ртутного зонда на стандартной установке с параллельной схемой замещения синусоидальной частотой 10 kHz при комнатной температуре.

Полученные экспериментальные данные представлены в таблице и на рисунке.

Рассмотрим сначала процесс радиационной компенсации проводимости полупроводников. Из таблицы видно, что все три политипа p -SiC успешно компенсируются при протонном облучении. Поскольку ранее мы получили такой же вывод для материала n -SiC [8], то можно рекомендовать „протонирование“ для использования в технологии карбид-кремниевых приборов. Этот вывод весьма актуален, поскольку для основного материала электроники — кремния, протонирование не позволяет формировать полуизолирующие области [1]. Сравнивая скорости удаления дырок в различных политипах карбида кремния (см. таблицу), отметим, что процесс компенсации акцепторов более эффективен в политипе 6H, чем в политипе 4H. Напомним, что для n -материала эти соотношения обратные — скорость удаления электронов в 4H-политипе в несколько раз выше, чем в 6H-политипе [8].

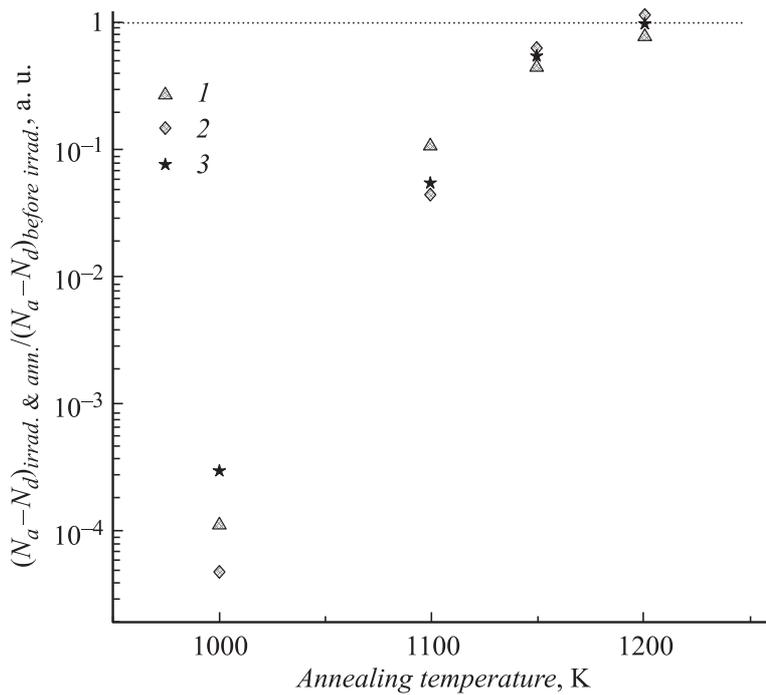
Теперь обсудим процесс отжига облученных образцов. Проведенные исследования показали, что при температурах отжига $< 900^\circ\text{C}$ не

Концентрации $N_a - N_d$ в исследовавшихся образцах до облучения и после отжига при различных температурах

Политип карбида кремния	6H-SiC	4H-SiC	15R-SiC
Исходные концентрации $N_a - N_d$, cm^{-3}	$6.9 \cdot 10^{17}$,	$24 \cdot 10^{17}$	$5.14 \cdot 10^{17}$
Доза облучения (протоны, 8 meV), при которой наблюдалась полная компенсация	$4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$	$2.3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$	$4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$
Концентрации $N_a - N_d$, после отжига при 1100°C , cm^{-3}	$0.95 \cdot 10^{17}$	$1.1 \cdot 10^{17}$	$0.29 \cdot 10^{17}$
Концентрации $N_a - N_d$, после отжига при 1150°C , cm^{-3}	$3.92 \cdot 10^{17}$	$15 \cdot 10^{17}$	$2.99 \cdot 10^{17}$
Концентрации $N_a - N_d$, после отжига при 1200°C , cm^{-3}	$6.89 \cdot 10^{17}$	$26 \cdot 10^{17}$	$5.1 \cdot 10^{17}$

наблюдалось заметного увеличения проводимости компенсированных образцов. А после отжига при 1200°C концентрация некомпенсированных акцепторов была равна исходной до облучения. Указанные закономерности не зависели от политипа карбида кремния. Полученные температуры полного отжига значительно превосходят рабочие температуры приборов. Поэтому протонирование можно рекомендовать для изготовления высокотемпературных приборов на основе SiC.

К настоящему времени достаточно сложно связать отжиговые характеристики слоев со свойствами конкретных радиационных дефектов, так как основные работы по изучению радиационных дефектов в *p*-SiC выполнены для облучения электронами [2–6]. По сравнению с электронным облучением воздействие протонного облучения имеет принципиальное отличие: появление микрообластей монокристаллического карбида кремния с высокой концентрацией вакансий, в которых интенсивно протекают реакции по формированию дивакансий и их комплексов с примесными атомами [9]. Поэтому разумно согласиться с



Зависимость отношения концентрации в образцах после отжига $(N_a - N_d)_{irrad. \& \text{ann.}}$ к исходной $(N_a - N_d)_{before irrad.}$: 1 — 6H-SiC, 2 — 4H-SiC, 3 — 15R-SiC.

предположением, сделанным в работах [10–12], что одним из основных РД, вносимых в SiC при протонном облучении, являются вакансии в подрешетках углерода и кремния. Причем этот дефект может оказаться преобладающим для полупроводников обоих типов проводимости. Образование моновакансий и более сложных дефектных комплексов на их основе приводит к появлению глубоких уровней в запрещенной зоне и компенсации проводимости материалов как донорной, так и акцепторной природы проводимости. Идентификация дивакансии с дефектами, регистрируемыми различными методами (позитронная аннигиляция, ЭПР, DLTS и др.), на наш взгляд, требует дополнительных исследований.

Проведенные исследования показали, что созданная облучением компенсация SiC сохраняется при отжигах $\leq 100^\circ$. Практически полное восстановление проводимости происходит при $T \geq 1200^\circ\text{C}$. Данный характер отжига радиационной компенсации не зависит от политипа карбида кремния и исходного уровня легирования эпитаксиального слоя (в диапазоне концентраций $2 \cdot 10^{17} - 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Возможно, что восстановление проводимости связано с отжигом радиационных дефектов вакансионного типа.

Проведенные исследования показывают перспективность использования радиационной компенсации в технологии высокотемпературных приборов на основе SiC.

Работа выполнена при частичной поддержке программы президиума РАН „Квантовая физика конденсированных сред“.

Список литературы

- [1] Козловский В.В. Модифицирование полупроводников пучками протонов. СПб.: Наука, 2003.
- [2] Matsuura H., Aso K., Kagamihara S., Iwata H., Ishida T., Nishikawa K. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. P. 4981.
- [3] Matura H., Minohara N., Oshima T. // J. Appl. Phys. 2008. V. 104. P. 043 702.
- [4] Reshanov S.A., Beljakowa S., Zippelius B., Danno K., Alferi K., Kimoto T., Onodo S., Ohshima T., Fei Yan, Devaty R.P., Choyke W.J. // Mater. Science Forum. 2010. V. 645–648. P. 423–426.
- [5] Zolnai Z., Son N.T., Hallin C., Janzen E. // J. Appl. Phys. 2004. V. 96. P. 2406.
- [6] Luo J.M., Zhong Z.Q., Gong M., Fung S., Ling C.C. // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 063 711.
- [7] Savkina N.S., Lebedev A.A., Davydov D.V., Strel'chuk A.M., Tregubova A.S., Yagovkina M.A. // Mat. Science and Eng. B. 1999. V. 61–62. P. 165.
- [8] Lebedev A.A., Veinger A.I., Davydov D.V., Strel'cuk A.M., Kozlovski V.V., Savkina N.S. // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. P. 6265.
- [9] Емцев В.В., Иванов А.М., Козловский В.В., Лебедев А.А., Оганесян Г.А., Строкан Н.Б., Wagner G. // ФТП. 2012. Т. 46. В. 4. P. 473–481.
- [10] Henry L., Barthe M.-F., Cordel C., Desgardin P., Blondiaux G., Arpiainen S., Liskay L. // Phys. Rev. B. 2003. V. 67. P. 115210.
- [11] Weidner M., Frank T., Pensl G., Kawasuso A., Itoh H., Krause-Renberg R. // Physica. 2001. V. 308–310. P. 633.
- [12] Bardeleben H.J., Cantin J.L., Vickridge I., Battistig G. // Phys. Rev. B. 2000. V. 62. P. 10126.