

Компенсация проводимости n -4H-SiC (CVD) при облучении электронами с энергией 0.9 МэВ

© В.В. Козловский⁺, А.А. Лебедев^{*†}, В.Н. Ломасов⁺, Е.В. Богданова^{*}, Н.В. Середова^{*}

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

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

(Получена 19 декабря 2013 г. Принята к печати 25 декабря 2013 г.)

Методами вольт-фарядных характеристик и фотолюминесценции исследовано воздействие электронного облучения в n -4H-SiC. Обнаружено, что скорость удаления носителей составила $V_d \approx 0.25 \text{ см}^{-1}$. Полная компенсация проводимости образцов с исходной концентрацией $(1-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ наблюдалась при дозах облучения $\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Одновременно с ростом компенсации увеличивалась интенсивность характерной для 4H-SiC „дефектной“ люминесценции. Проведено сравнение параметров образца до облучения и после облучения и отжига. Анализируются физические механизмы компенсации исследованных образцов.

1. Введение

В настоящее время облучение полупроводников электронами широко используется как для фундаментальных исследований, так и для решения прикладных задач. Несмотря на целый ряд работ, выполненных по исследованию n -4H-SiC, облученного электронами [1–7], до сих пор остается нерешенным ряд важных задач. Существует значительный разброс в определенных скоростях удаления носителей (V_d), предлагались различные физические механизмы компенсации карбида кремния, не ясно, отличаются ли свойства отожженного после облучения SiC от свойств исходного материала. Изучение последнего вопроса может иметь также и практическое применение, так как температура отжига радиационных дефектов в карбиде кремния ниже температуры его сублимации, т. е. за счет отжига можно восстановить исходные характеристики SiC-прибора без его термического разрушения.

Цель настоящей работы — изучение компенсации проводимости карбида кремния при электронном облучении и анализ механизма этого явления, а также сравнение свойств компенсированных и отожженных образцов со свойствами исходных.

2. Условия эксперимента

Образцы 4H-SiC представляли собой эпитаксиальные пленки толщиной 50 мкм, выращенные методом химического газозофазного осаждения (CVD) в Германии (Leibniz-Institute for Crystal Growth, Berlin). Пленки имели концентрацию некомпенсированных доноров $(N_d - N_a) \approx 2 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Концентрации некомпенсированных доноров $(N_d - N_a)$ в исходных и облученных образцах определялись из вольт-фарядных характеристик $C(U)$ на стандартной установке с параллельной схемой замещения и синусоидальной частотой 10 кГц при комнатной температуре. Для проведения измерений на поверхности эпитаксиального слоя формировались

диоды Шоттки диаметром 2 мм за счет напыления пленки Au. Дополнительно спектр вводимых уровней радиационных дефектов контролировался методом фотолюминесценции. Для возбуждения ФЛ использовался азотный лазер ИЛГИ-503, работающий на длине волны 337.1 нм и имеющий следующие параметры: импульсная мощность — 2 кВт, длительность импульса — 10 нс, частота повторения импульсов — 100 Гц. Плотность мощности накачки составляла $\sim 20 \text{ кВт/см}^2$. Исследования спектров ФЛ проводились при температуре жидкого азота (77 К).

Облучение электронами с энергией 0.9 МэВ проводилось на импульсном ускорителе (resonant transformer accelerator, частота импульсов 490 Гц, длительность импульса 330 мкс) на охлаждаемой проточной водой мишени. Пробег электронов с энергией 0.9 МэВ в SiC составляет ~ 1.0 мм. Средняя плотность тока пучка электронов составляла $12.5 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$. Можно считать, что при электронном облучении дефекты вводились равномерно по объему образцов, поскольку толщина облучаемых образцов SiC была значительно меньше длины пробега электронов. Отжиг образцов проводился в вакууме при температурах до 1400°C в течение 30 мин.

3. Результаты

Проводилось два типа экспериментов.

В первом случае образец постепенно компенсировался за счет последовательного облучения дозами $(1-1.5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 1 представлена дозовая зависимость концентрации $(N_d - N_a)$ при комнатной температуре для первой группы образцов. Видно, что до значительных уровней компенсации полупроводника (90%) наблюдается линейная зависимость. По данным рис. 1, скорость удаления носителей, составляет $V_d \approx 0.25 \text{ см}^{-1}$.

До облучения в спектре ФЛ присутствовала широкая полоса с максимумом при энергии фотона $h\nu \approx 2.2 \text{ эВ}$, которую обычно связывают с излучательной реком-

[†] E-mail: shura.lebe@mail.ioffe.ru

Зависимость концентрации N_d-N_a одного из исследовавшихся образцов от облучения и отжига

Номер облучения	Доза облучения, 10^{16} см^{-2}	Концентрация после облучения $N_d-N_a, \text{ см}^{-3}$	Концентрация после отжига ($1400^\circ\text{C}, 30 \text{ мин}$) $N_d-N_a, \text{ см}^{-3}$
	0	$2.6 \cdot 10^{15}$	
1	1	$2.6 \cdot 10^{14}$ *	
2	2	Компенсирован	$2.43 \cdot 10^{15}$
3	2	\gg	$2.49 \cdot 10^{15}$
4	2	\gg	$2.4 \cdot 10^{15}$

Примечание. * Скорость удаления носителей составила 0.25 см^{-1} .

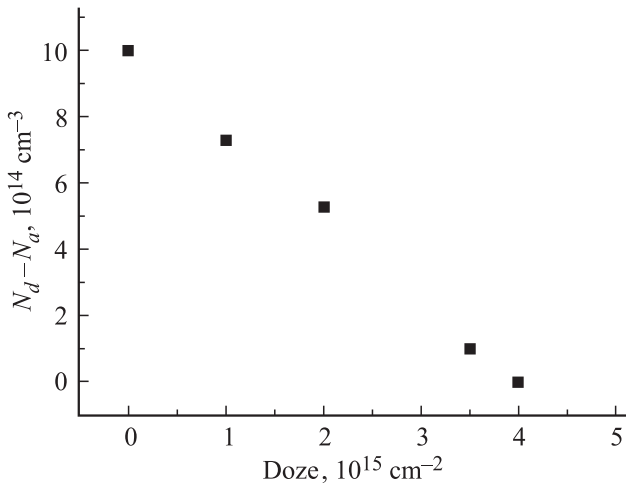


Рис. 1. Зависимость концентрации N_d-N_a в исследовавшихся образцах от дозы облучения.

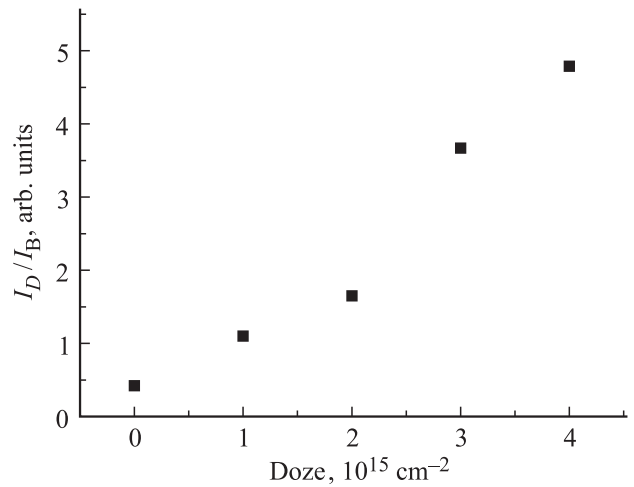


Рис. 3. Зависимость отношения интенсивностей „дефектной“ (I_D) и борной ФЛ (I_B) от дозы облучения.

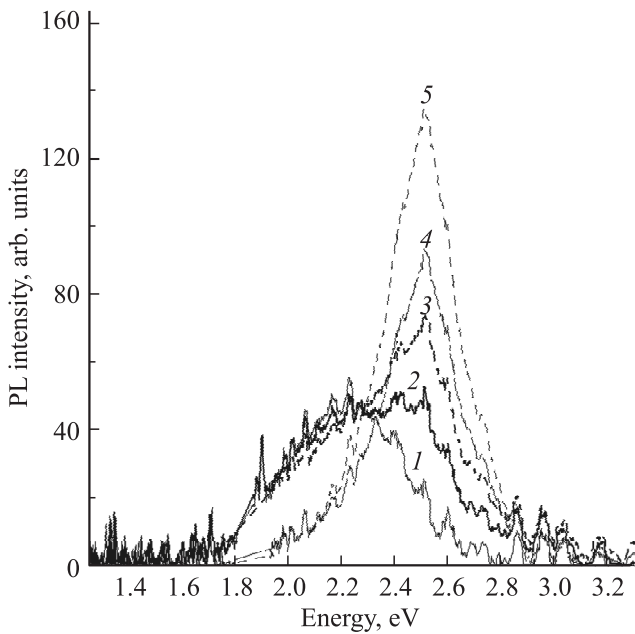


Рис. 2. Спектры фотолуминесценции (PL) образцов после облучения различными дозами $D, 10^{15} \text{ см}^{-2}$: 1 — 0, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 3.5, 5 — 4.5.

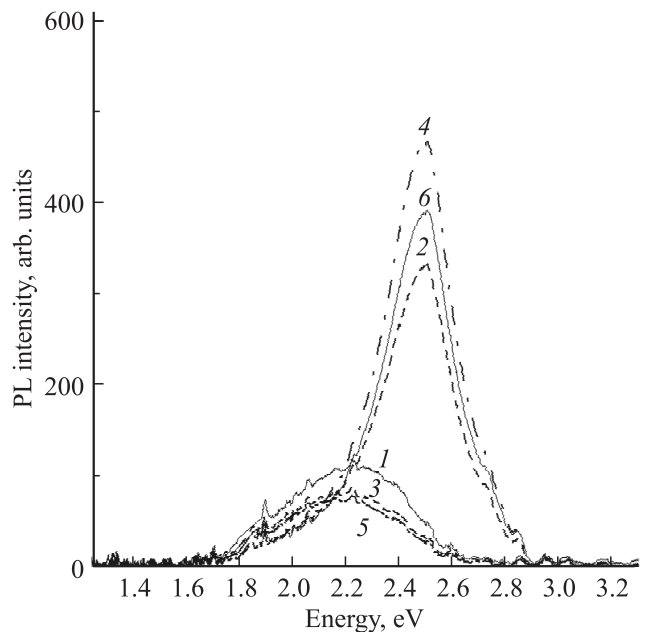


Рис. 4. Спектры фотолуминесценции (PL) исходного образца (1), образца после 2-го облучения (2) и последующего отжига (3), после 3-го облучения (4) и последующего отжига (5), после 4-го облучения (6).

бинацией на акцепторных уровнях бора — D -центрах [8] (рис. 2). Очевидно, что ее наличие связано с неконтролируемым легированием бором исходных эпитаксиальных слоев.

После облучения в спектре ФЛ начинала разгораться полоса с максимумом при $h\nu \approx 2.5$ эВ. Это так называемая „дефектная“ ФЛ, интенсивность которой увеличивается при облучении SiC и природа которой до сих пор однозначно не установлена [8]. На рис. 3 представлено отношение интенсивностей этих двух типов ФЛ с увеличением дозы облучения. Как видно из рисунка, интенсивность „дефектной“ ФЛ растет практически линейно с увеличением дозы облучения.

Вторую группу образцов сразу облучали дозой $1 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$, а затем отжигали. Всего было выполнено три таких цикла. Полученные результаты представлены в таблице и на рис. 4.

Как видно из таблицы и рис. 4, наблюдается практически полное восстановление параметров образцов после облучения и отжига.

4. Обсуждение результатов

Наблюдаемое при облучении уменьшение концентрации носителей заряда в карбиде кремния связывалось с прямым уменьшением концентрации доноров за счет удаления мелких донорных состояний примесных атомов азота [9]. Согласно [9], образующиеся при облучении SiC элементарные дефекты взаимодействуют с легирующей примесью азота с образованием нейтральных комплексов (деактивация донорных состояний радиационными дефектами). В качестве возможного кандидата на роль такого элементарного дефекта рассматривалась кремниевая вакансия (V_{Si}). Согласно другой модели [10–13], уменьшение концентрации носителей заряда при облучении происходит за счет образования глубоких акцепторных центров в объеме полупроводника, на которые уходят электроны с мелких донорных уровней. Отметим, что, согласно [11,12], в состав радиационных дефектов, образующих глубокие центры, могут входить компоненты пар Френкеля (вакансии и межузельные атомы) только кремния и углерода. При этом при нагреве исследуемых образцов возможно восстановление концентрации свободных носителей в зоне проводимости (за счет термической ионизации глубоких уровней радиационных дефектов).

Рассмотрим подробнее возможные механизмы компенсации проводимости в исследованных образцах. Предполагаем, что основными дефектами, генерируемыми быстрыми электронами, являются вакансии в одной из подрешеток SiC. Если при этом считать маловероятным образование многовакансионных комплексов, то в данном случае имеем

$$\frac{dV}{dt} = \alpha G - \frac{V}{\tau} - \beta VM, \quad (1)$$

Здесь V — концентрация вакансий, G — интенсивность потока электронов, α — вероятность образования ва-

кансии одним электроном, τ — время жизни вакансии, определяемое стоками, β — вероятность захвата вакансии примесным свободным (без захваченной вакансии) атомом азота, M — концентрация свободных атомов азота.

Из формулы (1) следует: для того чтобы собственный дефект (вакансия) был доминирующим в механизме компенсации проводимости и при этом экспериментально наблюдалась линейная зависимость концентрации носителей заряда от дозы облучения $D = Gt$, необходимо, чтобы время жизни вакансии, определяемое как стоками, так и примесным захватом, должно значительно превышать время облучения t и составлять десятки минут.

Если же время жизни вакансии значительно меньше времени облучения и при этом определяется стоками, то концентрацию вакансий можно считать стационарной и равной

$$V = \alpha G \tau. \quad (2)$$

В этом случае зависимость концентрации носителей заряда от дозы облучения определяется взаимодействием вакансии с примесью. При этом концентрация носителей заряда равна концентрации свободных атомов азота (M), кинетика изменения которых описывается уравнением

$$\frac{d(N - M)}{dt} = \alpha \beta \tau G M. \quad (3)$$

Решением этого уравнения будет:

$$M = N \exp(-\alpha \beta \tau G t), \quad (4)$$

где N — концентрация свободных атомов азота до облучения, M — концентрация свободных атомов азота после облучения. Из соотношения (4) следует, что при малых дозах облучения

$$M = N(1 - \alpha \beta \tau G t) = N(1 - \alpha \beta \tau D), \quad (5)$$

т.е. зависимость компенсации от дозы становится линейной.

Полученный анализ показывает, что исследование процесса компенсации проводимости при облучении принципиально позволяет получить сведения о механизме этого явления, если детально исследовать зависимость эффекта от дозы и интенсивности облучения. Действительно, если время жизни вакансий много больше времени облучения и компенсация определяется вакансиями, то зависимость компенсации от дозы линейна до полной компенсации, как и наблюдалось в наших экспериментах. Если время жизни вакансии значительно меньше времени облучения и процесс компенсации регулируется взаимодействием вакансии с примесью, то при больших дозах линейность зависимости нарушается в соответствии с формулой (4).

Отметим, что ранее в [14] был сделан аналогичный вывод о механизме компенсации SiC при облучении протонами.

5. Заключение

Показано, что скорость удаления носителей при облучении *n-4H-SiC* составляет $\sim 0.25 \text{ см}^{-1}$. Линейная дозовая зависимость компенсации однозначно говорит в пользу того, что компенсация происходит за счет перехода электронов на радиационные дефекты акцепторного типа, в состав которых входят компоненты пар Френкеля (вакансии и межузельные атомы) только кремния и углерода. Показано, что компенсация при облучении электронами носит полностью обратимый характер. После отжига при 1400°C полностью восстанавливаются электрические и оптические свойства материала.

Авторы признательны G. Wagner за предоставление образцов для экспериментов, С.В. Белову за изготовление диодов Шоттки и С.П. Лебедеву за проведение отжигов.

Список литературы

- [1] M. Weidner, T. Frank, G. Pensl, A. Kawasuso, H. Itoh, R. Krause-Rehberg. *Physica B*, **308–310**, 633 (2001).
- [2] L. Storasta, J.P. Bergman, E. Janzen, A. Henry, J. Li. *J. Appl. Phys.*, **96**, 4909 (2004).
- [3] G. Alferi, E.V. Monakhov, B.G. Svensson, A. Hallen. *J. Appl. Phys.*, **98**, 113 524 (2005).
- [4] A. Castaldini, A. Cavallini, L. Rigutti, F. Nava, S. Ferrero, F. Giorgis. *J. Appl. Phys.*, **98** 053 706 (2005).
- [5] M. Asghar, I. Hussain, N.S. Noor, F. Iqbal, Q. Wahab, A.S. Bhatti. *J. Appl. Phys.*, **101**, 073 706 (2007).
- [6] H. Kaneko, T. Kimoto. *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 262 106 (2011).
- [7] F.C. Beyer, C. Hemmingsson, H. Pedersen, A. Henry, E. Janzen, J. Isoya, N. Morishita, T. Ohshima. *J. Appl. Phys.*, **109**, 103 703 (2011).
- [8] А.А. Лебедев. *ФТП*, **33** (2), 129 (1999).
- [9] D. Aberg, A. Hallen, P. Pellegrino, B.G. Swensson. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 2908 (2001).
- [10] А.А. Лебедев, В.В. Козловский, Н.Б. Строкан, Д.В. Давыдов, А.М. Иванов, А.М. Стрельчук, Р. Якимова. *ФТП*, **36** (11), 1354 (2002).
- [11] M. Mikelsen, U. Grossner, J.H. Bleka, E.V. Monakhov, B.G. Svensson, R. Yakimova, A. Henry, E. Janzen, A.A. Lebedev. *Mater. Sci. Forum*, **600–603**, 425 (2009).
- [12] D.V. Davydov, A.A. Lebedev, V.V. Kozlovski, N.S. Savkina, A.M. Strel'chuk. *Physica B: Condens. Matter*, **308**, 641 (2001).
- [13] A.M. Strel'chuk, V.V. Kozlovski, N.S. Savkina, M.G. Rastegayeva, A.N. Andreev. *Mater. Sci. Engin. B*, **61–62**, 441 (1999).
- [14] A. Castaldini, A. Cavallini, L. Rigutti. *Semicond. Sci. Technol.*, **21**, 724 (2006).

Редактор Л.В. Шаронова

Conductivity compensation in *n-4H-SiC* (CVD) by electron irradiation with energy 0.9 MeV

V.V. Kozlovski⁺, A.A. Lebedev^{*}, V.N. Lomasov⁺, E.V. Bogdanova^{*}, N.V. Seredova^{*}

⁺ St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia
^{*} Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract By methods of capacitance–voltage characteristics and photoluminescence, effects of electron irradiation of *n-4H-SiC* were investigated. It was found that the rate of carriers removal reached $V_d \approx 0.25 \text{ cm}^{-1}$. Full compensation of conductivity in the samples with an initial concentration of $1.2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ was observed at doses $\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Simultaneously with the growth of compensation degree, the intensity of „defect“ luminescence, typical for *4H-SiC* increased. Comparison of the parameters of the samples before irradiation and after irradiation and annealing was made. The physical mechanisms of compensation for investigated samples have been analyzed.