

Влияние облучения протонами и электронами МэВ-ных энергий на компенсацию проводимости и фотолюминесценцию слабо легированного p -4H-SiC (CVD)

© В.В. Козловский*, А.А. Лебедев[†], 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 25 февраля 2015 г. Принята к печати 3 марта 2015 г.)

Проведено исследование процесса компенсации слабо легированных образцов p -4H-SiC, выращенных методом газовой фазовой эпитаксии, при облучении электронами с энергией 0.9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ. Измеренные скорости удаления носителей составили $1.2\text{--}1.6\text{ см}^{-1}$ для электронов и $240\text{--}260\text{ см}^{-1}$ для протонов. При этом зависимость измеряемой концентрации нескомпенсированных акцепторов и доноров с увеличением дозы облучения уменьшалась линейно вплоть до полной компенсации. Такой характер зависимости показывает, что компенсация образцов обусловлена переходом носителей заряда на глубокие центры, образованные первичными радиационными дефектами. Показано, что в слаболегированном p -SiC (CVD), в отличие от n -SiC (CVD), первичные дефекты только в подрешетке углерода не могут объяснять процесс компенсации. В p -SiC за компенсацию проводимости отвечают либо первичные дефекты в подрешетке кремния, либо дефекты в обеих подрешетках. Также было проведено исследование спектров фотолюминесценции в зависимости от дозы облучения.

1. Введение

Известно, что широкозонные полупроводники рассматриваются как перспективные материалы для создания приборов, способных работать при повышенных температурах и высоких уровнях ионизирующего излучения. В то же время, несмотря на большое количество работ по радиационной стойкости SiC [1–5], до сих пор имеется значительный разброс в определении скорости удаления носителей и до конца не выяснен физический механизм компенсации полупроводника под действием облучения. Поэтому исследования радиационной стойкости слабо легированных образцов карбида кремния представляются достаточно актуальными. В наших предыдущих работах были проведены исследования скорости удаления носителей (V_d) в слабо легированном n -4H-SiC.

Цель настоящей работы — исследование величины V_d в слабо легированном p -4H-SiC.

2. Эксперимент и обсуждение

Образцы карбида кремния 4H-SiC представляли собой эпитаксиальные пленки толщиной 50 мкм, выращенные методом химического газозащитного осаждения (CVD) в Германии (Leibniz-Institute for Crystal Growth, Berlin). Концентрации нескомпенсированных акцепторов ($N_a - N_d$) в исходных и облученных образцах определялись из вольт-фарадных характеристик $C(U)$ на стандартной установке с параллельной схемой замещения и синусоидальной частотой 10 кГц при комнатной

температуре. Измерения вольт-фарадных характеристик проводились с использованием ртутного зонда и на диодах Шоттки. Для создания омических контактов к n^+ -подложке на ее поверхность напылялись слои металла, Ti/Ni/Au толщиной 50/300/200 нм соответственно. Далее проводилась процедура отжига металла с полупроводником при температуре 1000°C в течение 90 с при высоком вакууме. При этом формировались низкоомные омические контакты с переходным (контактным сопротивлением) порядка $(4\text{--}5) \cdot 10^{-6}\text{ Ом} \cdot \text{см}$. Диоды Шоттки диаметром 500–800 микрон были сформированы за счет напыления на поверхность эпитаксиального слоя металлического золота. 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 составляет $\sim 1.0\text{ мм}$ в SiC. Средняя плотность тока пучка электронов составляла $12.5\text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$. Облучение протонами выполнялось на циклотроне МГЦ-20. Длина пробега была 1.0 мм. Можно считать, что как при электронном, так и при протонном облучении дефекты вводились равномерно по всему объему образцов, поскольку толщина облучаемых образцов SiC была значительно меньше длины пробега заряженных частиц. Для возбуждения спектров фотолюминесценции (ФЛ) использовался азотный лазер, 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 $\sim 50\text{ кВт/см}^2$. Исследования

[†] E-mail: shura.lebe@mail.ioffe.ru

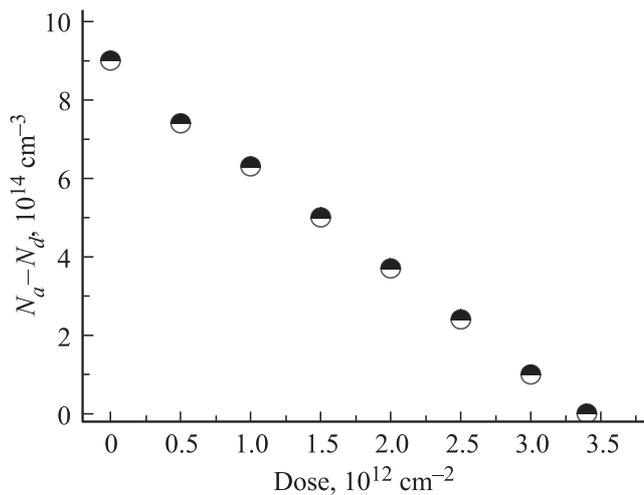


Рис. 1. Зависимость концентрации нескомпенсированных дырок в *p*-4H-SiC от дозы облучения протонами с энергией 15 МэВ.

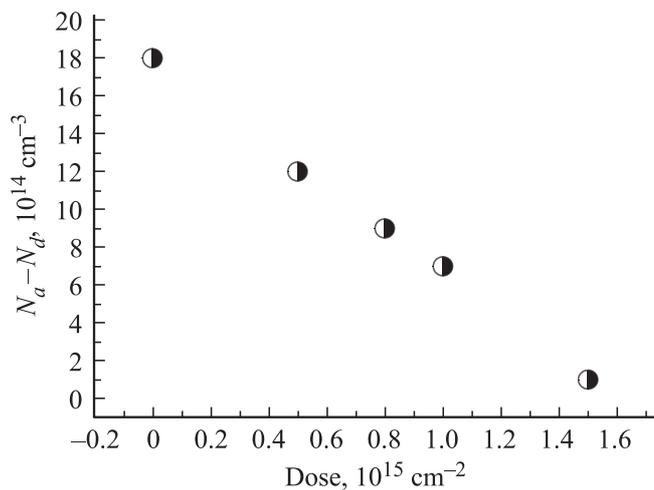


Рис. 2. Зависимость концентрации нескомпенсированных дырок в *p*-4H-SiC от дозы облучения электронами с энергией 0.9 МэВ.

спектров ФЛ проводились при температуре жидкого азота (77 К).

На рис. 1 и 2 представлены экспериментально полученные зависимости компенсации электропроводимости карбида кремния при электронном облучении: исходная концентрация ($N_a - N_d$) *p*-4H-SiC составила $(1-2) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Скорость удаления носителей при этом составила $1.2-1.6 \text{ cm}^{-1}$ для облучения электронами и $240-260 \text{ cm}^{-1}$ для облучения протонами. Видно, что до значительных уровней компенсации полупроводников (90%) для *p*-4H-SiC (так же как было показано ранее для *n*-4H-SiC [6]) наблюдается линейная зависимость от дозы (D). Это позволяет предположить, что уменьшение концентрации носителей заряда при облучении возникает за счет образования глубоких центров

в объеме полупроводника, на которые уходят дырки с мелких акцепторных уровней [7]. В состав радиационных дефектов, образующих глубокие центры, могут входить компоненты пар Френкеля (вакансии и межузельные атомы) только собственных атомов полупроводника.

Отметим, что в *p*-SiC экспериментально наблюдаемая величина $V_d \sim 1.2-1.6 \text{ cm}^{-1}$ превосходит расчетное значение скорости генерации пар Френкеля (ПФ) в подрешетке углерода [6]. Поэтому за компенсацию проводимости отвечают либо первичные дефекты в подрешетке кремния, либо дефекты в обеих подрешетках. К сожалению, в отличие от *n*-SiC, для *p*-SiC экспериментальных работ по облучению электронами очень мало. Если работает вакансия только кремния, то вероятность разделения образовавшейся пары Френкеля в этой подрешетке f_{FP} составляет $\sim 80\%$. Сильное различие в поведении (степени диссоциации) ПФ в материалах *p*- и *n*-типа проводимости может быть связано не

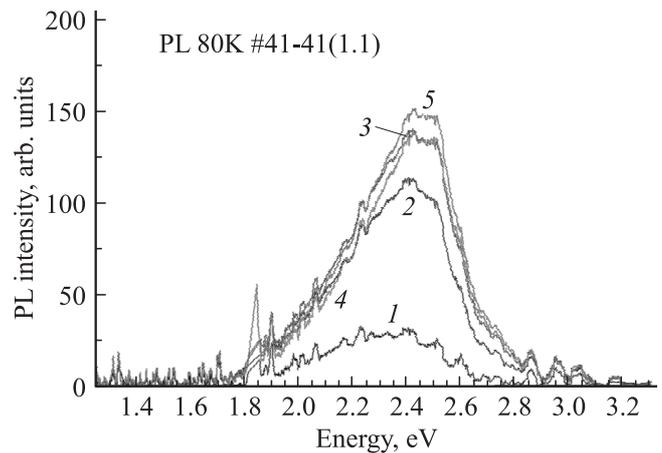


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции образцов после облучения электронами с энергией 0.9 МэВ, с различными дозами $D, 10^{15} \text{ cm}^{-2}$: 1 — 0, 2 — 0.5, 3 — 8, 4 — 1.1, 5 — 1.4.

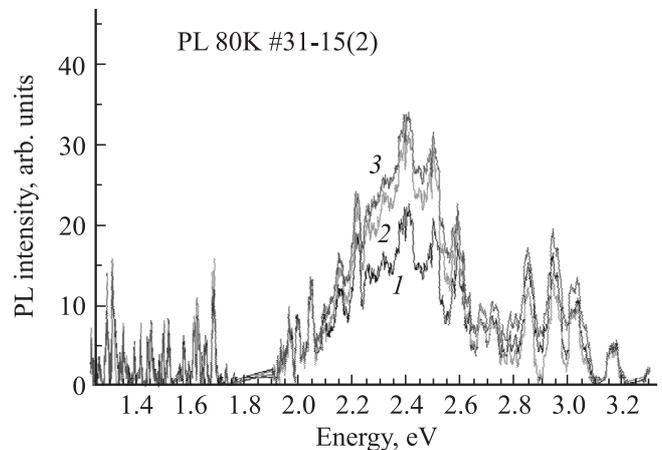


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции образцов после облучения протонами с энергией 15 МэВ, с различными дозами $D, 10^{12} \text{ cm}^{-2}$: 1 — 0, 2 — 2, 3 — 3.

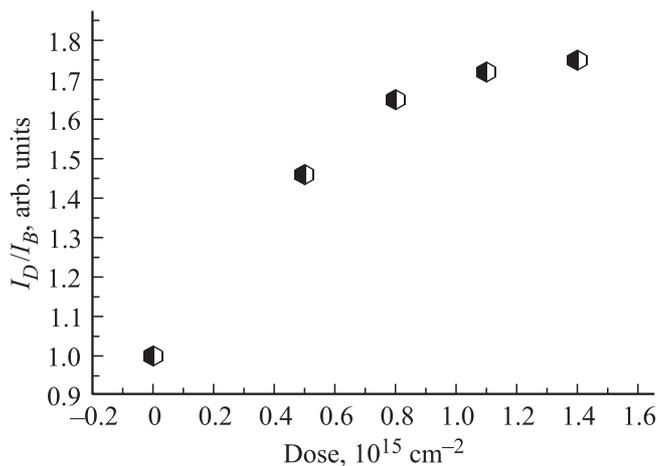


Рис. 5. Зависимость отношения интенсивностей „дефектной“ ФЛ (I_D) и борной ФЛ (I_B) от дозы облучения электронами с энергией 0.9 МэВ.

только с различными подрешетками, но и с зарядовым состоянием компонент ПФ, образующихся в материалах p - и n -SiC.

Также были проведены исследования спектров ФЛ образцов как исходных, так и после каждой дозы облучения. До облучения в спектре ФЛ присутствовала широкая полоса с максимумом $h\nu \sim 2.2$ эВ, которую обычно связывают с излучательной рекомбинацией на акцепторных уровнях бора (D -центр) [8] (рис. 3, 4). Очевидно, что ее наличие связано с неконтролируемым легированием бором исходных эпитаксиальных слоев.

Как и в случае облучения n -4H-SiC в некоторых образцах p -4H-SiC наблюдалось появление так называемой „дефектной“ ФЛ (ДЕЛ) с максимумом $h\nu \sim 2.5$ эВ [9]. Однако в отличие от n -4H-SiC, где интенсивность данной ФЛ линейно росла с увеличением дозы облучения, в p -4H-SiC интенсивность ФЛ быстро выходила на насыщение (рис. 3), или практически не изменялась (рис. 4). Характер изменения интенсивности ФЛ не зависел от типа облучающих частиц (протоны или электроны). Это говорит о том, что зависимость $I_D = F(D)$ определяется свойствами образца, а не типом облучающих частиц. На рис. 5 представлено отношение интенсивностей этих двух ФЛ с увеличением дозы облучения для образцов первого типа. Ранее [10] высказывалось предположение, что активатором ДЕЛ являются донорно-акцепторные пары азот–глубокий акцепторный дефект. Очевидно, что полученные в настоящей работе результаты подтверждают данную точку зрения. Вероятно, что в карбиде кремния n -типа проводимости концентрация атомов азота (основного донорного уровня) будет больше, чем в образцах p -типа проводимости. Отметим также, что образование ДАП — активаторов „дефектной ФЛ“, не сказывается на процессе компенсации SiC радиационными дефектами. Несмотря на то что в p -SiC все атомы азота уже исходно скомпенсирова-

ны акцепторными центрами, увеличение интенсивности ДЕЛ с ростом дозы облучения тем не менее наблюдается.

3. Заключение

В ходе проведенных исследований было установлено, что компенсация карбида кремния p -типа проводимости протонами и электронами носит линейный характер вплоть до полной компенсации. Это совпадает с результатами, полученными при облучении SiC n -типа проводимости. Полученные результаты указывают на то, что основным механизмом компенсации является переход свободных носителей на глубокие центры, связанные с образующимися при облучении первичными радиационными дефектами. Исследование спектров ФЛ подтвердило ранее высказанную точку зрения, что активатором ДЕЛ является донорно-акцепторная пара: азот–глубокий центр акцепторной природы.

Список литературы

- [1] W.J. Choyke. Inst. Phys.: Conf. Ser., **31**, 58 (1977).
- [2] A. Hallen, A. Henry, P. Pelligrino, B.G. Swensson, D. Aberg. Mater. Sci. Eng. B, **61–62**, 378 (1999).
- [3] B.G. Swensson, A. Hallen, M.K. Linnarsson et al. Mater. Sci. Forum, **353–356**, 549 (2000).
- [4] A.A. Lebedev, A.I. Veinger, V.V. Kozlovski, D.V. Davydov, N.S. Savkina, A.M. Strelchuk. J. Appl. Phys., **88**, 6265 (2000).
- [5] J. Metcalfe. Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), **215**, 151 (2011).
- [6] В.В. Козловский, А.А. Лебедев, В.Н. Ломасов, Е.В. Богданова, Н.В. Середова. ФТП, **48** (8), 1033 (2014).
- [7] В.В. Козловский, А.Е. Васильев, В.В. Емцев, А.А. Лебедев. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 9, 101 (2014).
- [8] А.А. Лебедев, Н.К. Полетаев. ФТП, **30** (3), 55 (1996).
- [9] А.А. Лебедев. ФТП, **33** (2), 129 (1999).
- [10] А.Н. Андреев, М.М. Аникин, А.А. Лебедев, Н.К. Полетаев, А.М. Стрельчук, А.Л. Сыркин, В.Е. Челноков. ФТП, **28** (5), 729 (1994).

Редактор А.Н. Смирнов

Effect of irradiation with protons and electrons MeV-energy on compensation of conductivity and photoluminescence moderately doped *p*-4H-SiC (CVD)

V.V. Kozlovski*, A.A. Lebedev⁺, 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 A study of the compensation process of the moderately doped samples *p*-4H-SiC, grown by gas-phase epitaxy, under electron irradiation with energy of 0.9 MeV and protons with an energy of 15 MeV were done. Measured carrier removal rate was 1.2–1.6 cm⁻¹ for electrons and 240–260 cm⁻¹ for protons. The dependence of the measured concentration of uncompensated acceptors and donors with increasing dose decreases linearly until full compensation. Such a dependence shows that the compensation is due to the transition of charge carriers to a deep centers formed by primary radiation defects. It is shown that in moderately doped *p*-SiC (CVD), in contrast to *n*-SiC (CVD), primary defects only carbon sublattice can not explain the compensation process. In the *p*-SiC conduction responsible for compensation is or primary defects in the silicon sublattice or defects in both sublattices. Also conducted a study of the photoluminescence spectra as a function of radiation dose.