

О сравнении радиационной стойкости кремния и карбида кремния

© А.А. Лебедев, В.В. Козловский

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

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

(Получена 18 марта 2014 г. Принята к печати 26 марта 2014 г.)

Проводится сравнение радиационной стойкости на примере карбида кремния и кремния. Показано, что одна из основных характеристик радиационной стойкости полупроводника — скорость удаления носителей (V_d), в случае широкозонных полупроводников будет сильно зависеть от условий ее измерения. Сделан вывод, что сравнение величин V_d , полученных при комнатной температуре для Si и SiC, не является полностью корректным с физической точки зрения.

1. Введение

Первые работы по исследованию радиационных дефектов в карбиде кремния, выполненные в 50–60-х годах прошлого века, подтверждали высокую радиационную стойкость этого материала [1]. Следует отметить, что исследовавшиеся в те годы кристаллы были сильно легированы и имели высокую плотность структурных дефектов. По мере того как удавалось получать все более совершенные и чистые образцы SiC, их измеряемая радиационная стойкость постепенно снижалась. Появились даже работы, где утверждалось, что SiC не только не превосходит кремний по радиационной стойкости, но даже уступает ему по ряду параметров [2–5].

Цель настоящей работы — проанализировать, насколько выводы о низкой радиационной стойкости SiC являются корректными.

Известно, что скорость удаления носителей рассчитывалась по формуле

$$V_d = (N_0 - N_1)/\Delta D, \quad (1)$$

где N_0 — концентрация $N_a - N_d$ в эпитаксиальном слое до облучения; N_1 — концентрация $N_a - N_d$ в эпитаксиальном слое после облучения; ΔD — доза облучения.

Ранее вопрос о радиационной стойкости широкозонных полупроводников рассматривался в [6]. В работе [6] отмечалось, что для оценки этой величины можно применять, как минимум, два подхода — „приборный“, когда оценивается деградация какого-нибудь приборного параметра под действием радиации; и „материаловедческий“, когда сравнивается деградация каких-нибудь характеристик материалов независимо от их приборного назначения.

Для иллюстрации первого подхода рассмотрим два диода с одинаковым напряжением пробоя — кремневый и карбид кремниевый:

$$U_{brSi} = U_{brSiC} \Rightarrow (E_{cr}^{Si} W^{Si})/2 = (E_{cr}^{SiC} W^{SiC})/2 \Rightarrow W^{Si} = W^{SiC} E_{cr}^{SiC} / E_{cr}^{Si}, \quad (2)$$

где U_{br} — напряжение пробоя; E_{cr} — критическая напряженность электрического поля; W — толщина слоя объемного заряда при U_{br} .

С учетом того, что $E_{cr}^{SiC} / E_{cr}^{Si} \approx 10$, а $W \approx (N_b)^{1/2}$, где N_b — концентрация нескомпенсированной примеси в базовой области диода, получаем

$$N_b^{Si} = 100 N_b^{SiC}. \quad (3)$$

Таким образом, при том же напряжении пробоя база SiC-диода будет легирована на 2 порядка больше, чем база Si-диода. Следовательно, даже при равных значениях V_d для компенсации карбид кремниевый диод потребует в 100 раз большую дозу облучения, чем для компенсации Si-диода.

В случае „материаловедческого“ подхода к радиационной стойкости следует учитывать то, что в широкозонных полупроводниках, в отличие от узкозонных, могут образовываться глубокие центры, которые еще не ионизованы при комнатной температуре и их вклад в величину V_d может зависеть от температуры, при которой проводилось измерение [6]:

$$V_d = V_{d0} - V_d(T_M), \quad (4)$$

где V_{d0} — не зависящее от температуры слагаемое, обусловленное образованием мелких радиационных дефектов, ионизованных при температуре измерений.

Остановимся на этом немного подробнее. В самом общем случае после облучения полупроводника в нем могут образовываться как мелкие (N_M), так и глубокие центры (N_G), как доноры (N^D), так и акцепторы (N^A), причем в обеих половинах запрещенной зоны. Будем считать „низкими“ температуры, при которых ионизованы только мелкие центры, и „высокими“ температуры, когда имеет место полная ионизация всех образовавшихся в полупроводнике радиационных дефектов. Тогда для случая полупроводника n -типа проводимости вклад всех типов центров в изменение концентрации носителей можно описать следующим образом (табл. 1).

Как видно из таблицы, мы можем записать для низких температур:

$$V_{d0} = [N_0 - (N_G^A + NN_M^A + NN_G^A) + N_M^D] / \Delta D \quad (5)$$

и для высоких температур:

$$V_d = [N_0 - (NN_M^A + NN_G^A) + (N_M^D + N_G^D)] / \Delta D. \quad (6)$$

Таблица 1. Вклад всех типов радиационных дефектов в компенсацию полупроводника при разных температурах

Положение в запрещенной зоне	Тип центра	Вклад в концентрацию носителей при низких температурах	Вклад в концентрацию носителей при высоких температурах
Верхняя половина E_g (n -тип)	N_M^A	0	0
	N_M^D	+1	+1
	N_G^A	-1	0
	N_G^D	0	+1
Нижняя половина E_g (n -тип)	NN_M^A	-1	-1
	NN_M^D	0	0
	NN_G^A	-1	-1
	NN_G^D	0	0

Таблица 2. Температуры отжига радиационных дефектов в SiC, после различных видов облучения

Работы	SiC	Вид облучения	Температуры, при которых началась перестройка дефектов, °C	Температуры окончательного отжига РД, °C
[8]	4H- p	e — 2.5 МэВ	200–400	950–1400
[9]	6H- n	e — 0.3–0.4 МэВ	400–900	1600
[10]	4H- n	e — 15 МэВ; p — 1.2 МэВ	200–800	> 1200
[11]	6H- n	e — 2.5 МэВ; p — 1 МэВ		1200–1700
	4H- n	He		
[12]	4H- n	e — 15 МэВ	400–800	1200–2000

Примечание. e — облучение электронами, p — облучение протонами, He — облучение ядрами гелия.

Подставляя выражения (5) и (6) в (4), получаем

$$V_d(T_M) = V_d - V_{d_0} = (N_G^A + N_G^D)/\Delta D. \quad (7)$$

Выше речь шла о первичных радиационных дефектах. В случае если первичный дефект образует нейтральный комплекс с донорным уровнем, то он будет учтен как NN_G^A или NN_M^A , т.е. независимо от температуры измерения уменьшит концентрацию электронов в зоне проводимости на единицу.

В случае если первичный дефект образует акцепторный комплекс с донорным уровнем, то он будет учтен как NN_G^A или NN_M^A плюс один из типов акцепторных центров в зависимости от его положения в запрещенной зоне. Таким образом, как и в первом случае, такой дефект уменьшит концентрацию электронов, как минимум, на единицу, а уберет ли он второй электрон — будет зависеть от энергетического положения уровня и температуры измерений.

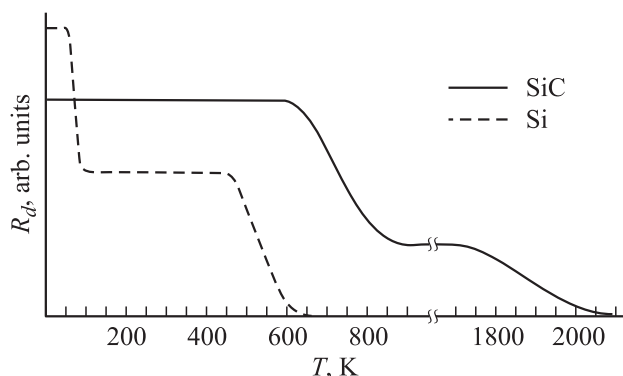
Далее мы хотели бы рассмотреть другой аспект определения V_d в широкозонных полупроводниках, а именно — влияние отжига радиационных дефектов. Известно, что при взаимодействии заряженных частиц с кристаллической решеткой полупроводника происходит образование вакансий и междоузлий — так называемых первичных радиационных дефектов. Если облучение полупроводника происходило при низких температурах, то эти первичные дефекты практически не рекомбинируют, находясь в „замороженном“ состоянии. С повышением

температуры эти дефекты начинают двигаться по кристаллу, большая часть из них рекомбинирует, а оставшиеся образуют комплексы с примесными атомами или дивакансии — более термостойкие вторичные радиационные дефекты. Наконец, при дальнейшем повышении температуры вторичные дефекты также отжигаются и кристалл возвращается в исходное состояние (до облучения).

Для кремния стадии отжига радиационных дефектов хорошо изучены. Известно, что отжиг первичных дефектов начинается при температуре ~ 80 К, а вторичные дефекты (A и E центры, дивакансии) отжигаются при температурах 150–350°C [7].

В последние годы был выполнен ряд работ по исследованию отжига радиационных дефектов в карбиде кремния. Часть полученных результатов представлена в табл. 2. Как видно из таблицы, для карбида кремния тоже можно выделить две стадии отжига. На первой в диапазоне 200–900°C, как следовало из DLTS измерений, наблюдалось уменьшение концентраций одних радиационных дефектов и увеличение концентраций других. По-видимому, эти температуры соответствовали отжигу первичных радиационных дефектов в SiC. На второй стадии при температурах более 1000–1200 происходил полный отжиг радиационных дефектов.

На рисунке схематично представлено изменение концентрации радиационных дефектов, образовавшихся при одинаковом облучении Si и SiC при низких температурах



Схематическое изображение отжига радиационных дефектов в кремнии и карбиде кремния.

(условно 0 К). Как видно из рисунка, относительно спектра существующих в них радиационных дефектов, при комнатной температуре Si и SiC находятся в существенно отличающихся состояниях. В кремнии уже закончился отжиг первичных дефектов, а в SiC он еще не начался. В результате измеренная при 300 К величина V_d в SiC может оказаться такой же или даже выше, чем в Si. Возможно, такие измерения будут интересны с практической точки зрения, но делать на их основе выводы о радиационной стойкости SiC будет некорректно.

С нашей точки зрения, можно сравнивать значения V_d для Si и SiC либо измеренные при низких температурах (0 К) до начала стадии отжига первичных дефектов, либо после окончания этой стадии, что соответствует 200–300 К для Si и 800–900°С для SiC.

2. Заключение

Рассмотрены вопросы, связанные с определением скорости удаления носителей при облучении Si и SiC. Показано, что использовать значения V_d для сравнения радиационной стойкости Si и SiC можно, только если они измерены при температурах, соответствующих одинаковой стадии отжига радиационных дефектов в обоих полупроводниках.

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 et al. *Mater. Sci. Forum*, **353–356**, 349 (2001).
- [4] G. Casse. *Nucl. Instruments and Meth. Phys. Res. A*, **598**, 54 (2009).
- [5] J. Metcalfe. *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*, **215**, 151 (2011).
- [6] A.A. Lebedev, V.V. Kozlovski, N.B. Strokan, D.V. Davydov, A.M. Ivanov, A.M. Strel'chuk, R. Yakimova. *Semiconductors*, **36**, 1270 (2002).
- [7] J.J.W. Corbett, J.C. Bourgein. In: *Point Defects in Solids* (N.Y.–London, Plenum Press, 1975) v. 2, p. 1.
- [8] Z. Zolnai, N.T. Son, C. Hallin, E. Janzen. *J. Appl. Phys.*, **96** (4), 2406 (2004).
- [9] J.M. Luo, Z.Q. Zhong, M. Gong, S. Fung, C.C. Ling. *J. Appl. Phys.*, **105**, 063 711 (2009).
- [10] G. Alferi, E.V. Monakhov, B.G. Svensson, A. Hallen. *J. Appl. Phys.*, **98**, 113 524 (2005).
- [11] M. Weider, T. Frank, G. Pensl, A. Kawasuso, H. Itoh, R. Krause-Rehberg. *Physica B*, **308–310**, 633 (2001).
- [12] G. Alferi, E.V. Monakhov, B.G. Svensson, M.K. Linnarsson. *J. Appl. Phys.*, **98**, 043 518 (2005).

Редактор Т.А. Полянская

On comparison of the radiation resistance of silicon and silicon carbide

A.A. Lebedev, V.V. Kozlovski*

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

* St. Petersburg State Polytechnical University,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The article compares the radiation resistance of silicon carbide and silicon. It is shown that one of the main characteristics of the radiation resistance of a semiconductor — carrier removal rate (V_d), in the case of wide bandgap semiconductors will strongly depend on the conditions of measurement. Concluded that the comparison of the values V_d obtained at room temperature for Si and SiC is not entirely correct from a physical point of view.