

07

## Облучение электронами с энергией 0.9 MeV $p$ -SiC, выращенного методом сублимации

© А.А. Лебедев, В.В. Козловский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Поступило в Редакцию 17 февраля 2014 г.

Определена скорость удаления носителей ( $V_d$ ) в 3 политипах SiC, выращенного методом сублимации,  $p$ -типа проводимости при его облучении электронами с энергией 0.9 MeV. На основе известных литературных данных проводится сравнение величины  $V_d$  в карбиде кремния при комнатной температуре в зависимости от политипа, типа проводимости и технологии изготовления. Предложена модель, объясняющая различие в значениях величины  $V_d$ .

В настоящее время облучение полупроводников электронами широко используется как для фундаментальных исследований, так и для решения прикладных задач. В то же время работ, посвященных изучению воздействия электронного облучения на  $p$ -SiC, в известной нам литературе не так много [1–3]. Целью данной работы было частично ликвидировать данный пробел.

Задачей настоящего исследования являлось определение скорости удаления носителей при электронном облучении  $p$ -SiC, выращенного методом сублимации, и сравнение со значением  $V_d$ , полученным для карбида кремния, выращенного методом газовой фазной эпитаксии (Chemical Vapor Deposition (CVD)). Для работы использовались три политипа карбида кремния: 4H, 6H и 15R.

Исследовавшиеся эпитаксиальные слои толщиной  $\sim 10 \mu\text{m}$  были выращены методом сублимационной эпитаксии (SE) в вакууме [4] на основе подложек  $n$ -типа проводимости с концентрацией нескомпенсированных доноров (Nd–Na)  $\sim 3\text{--}5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Для роста использовались подложки производства фирмы Cree (4H-SiC) и полученные по методу Лэли (6H- и 15R-SiC). Для получения  $p$ -типа проводимости источник эпитаксиального роста был легирован алюминием.

Для создания омических контактов к подложке *n*-типа проводимости на ее поверхность напылялись слои металла Ti/Ni/Au толщиной 50/300/200 nm соответственно. Далее проводилась процедура отжига металла с полупроводником при температуре 1000°C в течение 90 s при высоком вакууме. При этом формировались низкоомные омические контакты с переходными (контактным) сопротивлением порядка  $4-5 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ . Диоды Шоттки диаметром 500–800  $\mu\text{m}$  были сформированы за счет напыления на поверхность эпитаксиального слоя металлического золота.

Облучение электронами с энергией 0.9 MeV проводилось на импульсном ускорителе resonant transformer accelerator (частота импульсов 490 Hz, длительность импульса 330  $\mu\text{s}$ ) на охлаждаемой проточной водой мишени. Пробег электронов с энергией 0.9 MeV составляет  $\sim 1.0 \text{ mm}$  в SiC. Средняя плотность тока пучка электронов составляла  $12.5 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Можно считать, что при электронном облучении дефекты вводились равномерно по объему образцов, поскольку толщина облучаемых образцов SiC была значительно меньше длины пробега электронов. Максимальная доза облучения составляла  $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ . Скорость удаления носителей рассчитывалась по формуле

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

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;  $\Delta D$  — доза облучения.

Концентрации нескомпенсированных акцепторов ( $N_a - N_d$ ) в исходных и облученных образцах определялись из вольт-фарадных характеристик на стандартной установке с параллельной схемой замещения и синусоидальной частотой 10 kHz при комнатной температуре.

Полученные результаты представлены в табл. 1. Как видно из таблицы, для всех 3 политипов SiC скорости удаления носителей оказались близкими и составили  $1-1.7 \text{ cm}^{-1}$ . Отметим, что эти значения почти на 2 порядка больше, чем значения  $V_d$ , определенные для образцов *n*-типа проводимости, выращенных методом SE [6–8].

В таблице 2 представлены наши и литературные данные по определению величины  $V_d$  для 4H- и 6H-карбида кремния *n*- и *p*-типа проводимости, выращенного как методом SE, так и методом CVD. Как видно из таблицы, при электронном облучении материала *n*-типа

**Таблица 1.** Скорости удаления носителей в сублимационном *p*-SiC при облучении электронами с энергией 0.9 MeV

Политип	Исходная концентрация, $10^{17} \text{ cm}^{-3}$	Скорость удаления носителей, $\text{cm}^{-1}$
4H	23	1.7
6H	6	1.3
15R	5	1.0

**Таблица 2.** Скорости удаления носителей и диффузионные длины неосновных носителей заряда в карбиде кремния при комнатной температуре в зависимости от политипа, типа проводимости и технологии изготовления

Тип материала		Энергия электронов			Диффузионная длина неосновных носителей заряда, $\mu\text{m}$ [10,11]**
		0.5 MeV	1 MeV	6 MeV	
6H-SiC	N	CVD		1.0 [9]	$\sim 10$
		SE	0.015 [6]		$\sim 1$
	P	CVD	0.26 [8]		$\sim 1$
		SE	1.3*		$\sim 1.5$
4H-SiC	N	CVD	0.1 [8]	2.15 [9]	$\sim 12$
		SE	0.015 [6]		$< 0.5$
	P	CVD	0.8 [5]		$\sim 1.5$
		SE		1.7*	1–2

\* Настоящая работа.

\*\* В слоях с концентрацией  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

проводимости величина  $V_d$  меньше для сублимационного SiC, чем для CVD SiC, и больше в случае облучения материала *p*-типа проводимости.

С нашей точки зрения, данное различие может быть связано с разным спектром глубоких центров (ГЦ) в SiC, выращенном по различным технологиям. Одним из значительных отличий материала, полученного методом CVD, и сублимационного материала является малая диффузионная длина неосновных носителей заряда в *n*-SiC.

Как видно из табл. 2, это различие больше чем на порядок. При этом в материале  $p$ -типа такой разницы нет, диффузионная длина в  $p$ -сублимационных слоях бывает даже выше, чем в слоях, выращенных методом CVD.

Это различие может быть связано с тем, что сублимационные слои выращиваются в более высокотемпературных условиях, при которых растущий слой неконтролируемо легируется алюминием и бором из графитового тигля. Данные примеси образуют в SiC акцепторные центры и компенсируют материал  $n$ -типа проводимости. Кроме того, в материале  $n$ -типа проводимости эти центры заряжены отрицательно и снижают подвижность и диффузионную длину дырок. А в материале  $p$ -типа проводимости они нейтральны и, видимо, на подвижности и диффузионной длине электронов не сказываются.

Известно, что облучение полупроводников электронами приводит к образованию в них френкелевских пар (вакансия—междуузельный атом). Можно предположить, что наличие заряженных компенсирующих акцепторов в  $n$ -SiC, выращенном методом SE, снижает диффузионную длину компонентов френкелевских пар, так же как и диффузионную длину носителей заряда. Это увеличивает вероятность рекомбинации компонентов пар, уменьшает концентрацию образующихся радиационных дефектов и увеличивает радиационную стойкость сублимационного  $n$ -SiC по сравнению с материалом, выращенным методом CVD.

Таким образом, показано, что скорость удаления носителей при облучении сублимационного  $p$ -SiC электронами с энергией 0.9 MeV составляет  $1-2 \text{ см}^{-1}$ . Обнаружено, что величина  $V_d$  для сублимационного  $p$ -SiC практически не отличается от величины  $V_d$  для  $p$ -SiC, выращенного методом CVD. В то же время скорость удаления носителей в сублимационном  $n$ -SiC на порядок ниже, чем в  $n$ -SiC, выращенном методом CVD. Высказано предположение, что наблюдавшиеся различия могут быть связаны с различным примесным составом эпитаксиальных слоев SiC, выращенных по разным технологиям.

## Список литературы

- [1] Matsuura H., Aso K., Kagamihara S. et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. P. 4981.
- [2] Zolnai Z., Son N.T., Hallin C., Janzen E. // J. Appl. Phys. 2004. V. 96. P. 2408.

- [3] Luo J.M., Zhong Z.Q., Gong M., Fung S, Ling C.C. // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 063 711.
- [4] Savkina N.S., Lebedev A.A., Davydov D.V. et al. // Materials Science and Engineering. B. 2000. V. 61–62. P. 50–54.
- [5] Matsuura H., Minohara N., Ohsima T. // J. Appl. Phys. 2008. V. 104. P. 043 702.
- [6] Kozlovski V.V., Bogdanova E.V., Emtsev V.V., Emtsev K.V., Lebedev A.A., Lomasov V.N. // Material Science Forum. 2005. V. 483–485. P. 383.
- [7] Козловский В.В., Емцев В.В., Емцев К.В., Строкан Н.Б., Иванов А.М., Ломасов В.Н., Оганесян Г.А., Лебедев А.А. // ФТП. 2008. V. 42. P. 243.
- [8] Iwamoto N., Onoda S., Hishiki S., Oshima T. et al. // Material Science Forum. 2009. V. 600–603. P. 1043.
- [9] Mikelsen J., Grossner U., Bleka J.H., Monakhov E.V., Svensson B.G., Yakimova R., Henry A., Janzen E., Lebedev A.A. // Mater. Sci. Forum. 2009. V. 425. P. 600–603.
- [10] Levinshtein M.E., Rumyantsev S.L., Shur M.S. Properties of Advanced Semiconductor materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe. New York: Wiley, 2001.
- [11] Camara N. et al. // Semiconductor Science and Technology. 2008. V. 23. P. 025 016.