

Компенсация проводимости p -6H-SiC при облучении протонами с энергией 8 МэВ

© А.А. Лебедев[¶], В.В. Козловский*, С.В. Белов, Е.В. Богданова, Г.А. Оганесян

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194921 Санкт-Петербург, Россия

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

(Получена 2 марта 2011 г. Принята к печати 9 марта 2011 г.)

Проведено исследование скорости удаления носителей заряда (V_D) в p -6H-SiC при его облучении протонами с энергией 8 МэВ. Образцы p -6H-SiC были получены методом сублимации в вакууме. Величина V_D определялась как на основе анализа вольт-фарядных характеристик, так и на основе данных измерения эффекта Холла. Было обнаружено, что полная компенсация образцов с исходным значением $N_a - N_d \approx 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ происходила при дозе облучения $\sim 1.1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Скорость удаления носителей при этом составила $\sim 130 \text{ см}^{-1}$.

С развитием технологии полупроводниковых приборов на основе карбида кремния и начала их промышленного производства все актуальнее становится задача исследования радиационной стойкости данного материала. Выполненные к настоящему времени исследования главным образом касаются образцов SiC n -типа проводимости. В то же время слои p -типа также активно используются в приборах как в качестве сильно легированных эмиттерных слоев, так и в качестве базовых областей транзисторов и детекторов заряженных частиц. Цель настоящей работы — хотя бы частично закрыть пробел, существующий в исследовании радиационной стойкости p -6H-SiC.

В качестве образцов использовались эпитаксиальные слои p -SiC, изготовленные методом сублимационной эпитаксии [1] на основе коммерчески выпускаемых подложек CREE. Толщина p -слоя $\sim 30 \text{ мкм}$, толщина подложки $\sim 400 \text{ мкм}$. Концентрация нескомпенсированных доноров в подложке ($N_d - N_a$) составляла $3 - 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и акцепторов в p -слое $\sim 1 - 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Омические контакты к p^+ -слою были изготовлены магнетронным напылением Al и Ti с последующим вжиганием при 1100°C .

Облучение протонами выполнялось на циклотроне МГЦ-20. Использовались протоны с энергией 8 МэВ в диапазоне доз облучения $D \approx 1.0 \cdot 10^{15} - 1.1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

В настоящей работе мы контролировали два электрофизических параметра, существенные при работе приборов, использующих зарядовые и токовые характеристики p - n -перехода: концентрацию нескомпенсированных акцепторов и концентрацию свободных носителей заряда (дырок). Концентрации нескомпенсированных акцепторов $N_a - N_d$ в исходных и облученных образцах определялись из вольт-фарядных характеристик ($C-U$). Измерение $C-U$ -характеристик производилось с использованием ртутного зонда на стандартной установке с параллельной схемой замещения и синусоидальной частотой 10 кГц при комнатной температуре. При тех же

дозах облучения проводилось определение концентрации свободных носителей и их подвижности на основе измерения эффекта Холла и удельной электропроводности с помощью метода Ван-дер-Пау.

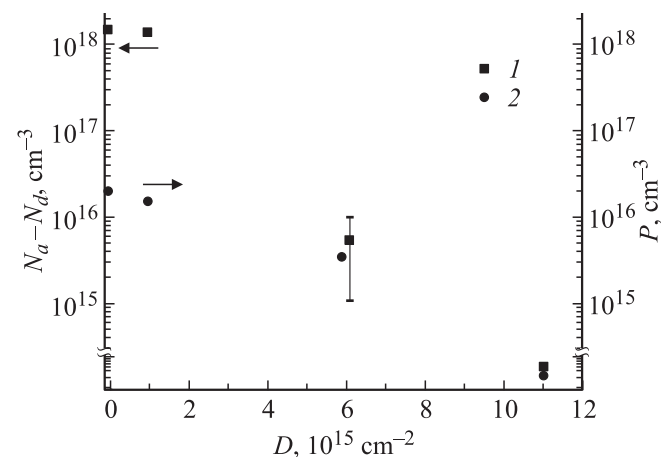
Полученные экспериментальные результаты зависимости величины $N_a - N_d$ и концентрации свободных носителей в зависимости от дозы облучения представлены на рисунке.

На основе представленных на рисунке зависимостей можно оценить скорость удаления носителей V_d , используя известную формулу:

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

где N_0 и N — концентрации носителей до и после облучения соответственно, D — доза облучения, см^{-2} .

С использованием выражения (1) получаем, что при использовании данных $C-U$ -характеристик величина $V_d \approx 130 \text{ см}^{-1}$, а при использовании данных исследований эффекта Холла $V_d \approx 1.8 \text{ см}^{-1}$. Полученная разница,



Зависимость концентрации нескомпенсированных акцепторов (1) и концентрации свободных носителей (2) от дозы облучения при комнатной температуре.

[¶] E-mail: Shura.Lebe@mail.ioffe.ru

на наш взгляд, связана с тем, что данные методики измеряют разные концентрации. В случае вольт-фарадных характеристик измеряется величина нескомпенсированных акцепторов (атомных остовов), которые есть в данном слое. Из эффекта Холла мы определяем концентрацию свободных носителей при данной температуре. В случае, если глубина акцепторных (донорных) уровней составляет сотые электронвольта (как это, например, имеет место в кремнии), то величина $N_a - N_d$ будет равна концентрации свободных дырок при комнатной температуре.

В широкозонных полупроводниках типа SiC энергии ионизации основных примесных уровней значительно больше, и полная их ионизация не наступает даже при комнатной температуре, т.е. $p < N_a - N_d$. Для SiC характерна зависимость энергии ионизации акцепторного уровня алюминия от его концентрации [2]. Она составляет 0.1 эВ при $N_a - N_d \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и увеличивается до 0.24–0.27 при $N_d - N_a < 10^{18} \text{ см}^{-3}$. По-видимому, это связано с образованием в SiC (Al) двух различных типов акцепторных уровней [3].

В соответствии с этим нетрудно оценить, какое должно быть соотношение между величинами p и $N_a - N_d$ в нашем случае. Согласно [4], для случая, когда $E_a/kT \gg 1$ и степень компенсации невелика, выражение для концентрации свободных носителей имеет вид

$$P = ((N_a - N_d)/2N_d) \cdot N_v \cdot \exp(-E_a/kT), \quad (2)$$

где E_a — энергия ионизации акцепторного уровня, равная 0.24 эВ; N_v — плотность состояний в валентной зоне, равная $2.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [5]; K — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

Мы полагали степень компенсации наших образцов невысокой ($\sim 10\%$). Это подтверждается значением подвижности дырок в исходных образцах при комнатной температуре на уровне 50–60 В/см²с, что практически совпадает с максимальной подвижностью дырок в 6H-SiC при таком уровне легирования [5]. С использованием выражения (2) получаем для $N_a - N_d = 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ значение $p = 1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что хорошо совпадает с экспериментом, т.е. для наших условий $p \approx 10^{-2}(N_a - N_d)$, или с учетом выражения (1)

$$\begin{aligned} V_d(p) &= \{10^{-2}(N_a - N_d)_0 - 10^{-2}(N_a - N_d)_1\}/D \\ &= 10^{-2}V_d(N_a - N_d). \end{aligned}$$

Таким образом, скорости удаления носителей, определенные по $C-U$ -характеристикам и из измерений эффекта Холла, будут отличаться в наших условиях на 2 порядка.

Известные нам литературные данные по исследованию скорости удаления носителей в 4H- 6H-SiC, *n*- и *p*-типа проводимости представлены в таблице. Ранее было обнаружено, что скорость удаления носителей заряда при облучении электронами с энергией 0.9 МэВ

Скорости удаления носителей (V_d) в карбиде кремния при комнатной температуре в зависимости от политипа, типа проводимости, технологии изготовления и вида облучающих частиц см^{-1}

Частицы	Тип материала							
	6H-SiC				4H-SiC			
	N		P		N		P	
	CVD	SE	CVD	SE	CVD	SE	CVD	SE
Электроны 1 МэВ		0.015 [7]	0.26 [11]		0.1 [8]	0.015 [7]		
Электроны 4.6 МэВ							15 [6]	
Электроны 6 МэВ	1.0 [12]				2.15 [12]			
Протоны, 8 МэВ	17 [10]	17 [10]		130*	110–130 [9,10]	130 [10]		

Примечание. * — настоящая работа.

в сублимационном карбиде кремния *n*-типа проводимости (политип 6H) составляет 0.015 см^{-1} , а в CVD-пленках (политип 4H) — 0.1 см^{-1} . В то же время при облучении протонами скорость удаления носителей в материале обоих типов приблизительно одинакова. Возможно, что различие в скоростях объясняется не столько первичным, сколько вторичным радиационным дефектообразованием.

Как известно, при облучении электронами средняя энергия атомов отдачи (АО) кремния и углерода T_{av} составляет ~ 50 эВ [13]. Эти энергии лишь немного превосходят пороговую энергию смещения атомов $T_d \approx 25$ эВ. Поэтому электронное облучение создает лишь точечные дефекты — единичные близко расположенные пары вакансия–межузельный атом (пары Френкеля (ПФ)).

При облучении карбида кремния протонами с энергией от 1 до 20 МэВ величина T_{av} составляет от 200 до 300 эВ. По сравнению с электронным облучением наблюдаются два существенных отличия. Во-первых, за счет большей T_{av} могут значительно увеличиваться расстояния между образующимися компонентами ПФ. Во-вторых, АО с вышеприведенными энергиями способны вызывать каскады столкновений с образованием „вторичных“ ПФ, причем число вторичных ПФ, согласно TRIM, может в несколько раз превышать число первичных ПФ [14]. В результате каскада возникают микрообласти размером 20–30 Å, в которых генерируются до десятка смещений. Такие микрообласти еще не являются, строго говоря, областями разупорядочения (ОР). Однако высокая концентрация вакансий в них способствует формированию дивакансий и их комплексов с примесными атомами. В сублимационном материале из-за особенностей технологии его получения создавались благоприятные условия для стока и рекомбинации только точечных дефектов, что приводит к малым значениям скорости удаления носителей заряда

при электронном облучении. При протонном облучении вторичные радиационные дефекты более сложные и, как следствие, менее подвижные. Поэтому наличие стоков в сублимационном материале сказывается не так заметно.

Если высказанная гипотеза верна, то можно спрогнозировать поведение сублимационного SiC и при других видах облучения: нейтронного и гамма-облучения. При облучении нейтронами с энергией 1 МэВ величина T_{av} составляет ~ 40 кэВ [13]. АО с такой энергией формирует на расстоянии своего пробега ~ 500 Å [15] около сотни смещений [16]. В результате совокупность точечных дефектов в малом локальном объеме образует единый протяженный дефект со специфическими свойствами — разупорядоченную область РО [17]. Пороговая энергия атомов кремния, при которой начинают образовываться РО, составляет ~ 10 кэВ [17,18]. Как показали наши расчеты по программе TRIM [19], такие энергии практически не реализуются при облучении кремния протонами, поэтому РО не наблюдаются в протонных экспериментах. Очевидно, что для РО наличие каких-либо стоков несущественно, и поведение сублимационных и газофазных слоев SiC при нейтронном облучении будет аналогичным.

При гамма-облучении, например в кобальтовых установках ^{60}Co со средней энергией квантов 1.25 МэВ, основное воздействие на полупроводник осуществляется за счет вторичных комптоновских электронов с энергией ~ 0.7 МэВ. Можно предположить, что при таком облучении сублимационные слои будут более стойкие, чем газофазные.

Таким образом, появление микрообластей монокристаллического карбида кремния с высокой концентрацией вакансий, в которых интенсивно протекают реакции по формированию дивакансий и их комплексов с примесными атомами, есть принципиальное различие в воздействии протонного облучения. Наблюдающаяся при протонном облучении ситуация представляется „промежуточной“ между случаем разупорядоченных областей при нейтронном облучении и случаем одиночных точечных дефектов при электронном облучении. Особенности сублимационных слоев SiC будут существенно проявляться при гамма- и электронном облучении и практически незаметны при протонном и нейтронном облучении.

Список литературы

- [1] N.S. Savkina, A.A. Lebedev, D.V. Davydov, A.M. Strel'chuk, A.S. Tregubova, M.A. Yagovkina. *Mater. Sci. Eng. B*, **61–62** 165 (1999).
- [2] Г.А. Ломакина, Ю.А. Водаков, Е.Н. Мохов, В.Г. Одинг, Г.Ф. Холуянов. *ФТТ*, **12**, 2918 (1970).
- [3] A.A. Lebedev, E.V. Bogdanova, P.L. Abramov, S.P. Lebedev, D.K. Nel'son, G.A. Oganessian, A.S. Tregubova, R. Yakimova. *Semicond. Sci. Technol.*, **23** 075004S (2008).
- [4] Р. Смит. *Полупроводники* (М., Мир, 1982).

- [5] *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*, ed by M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev and M.S. Shur, (John Wiley & Sons, Ins., 2001).
- [6] H. Matsuura, K. Aso, S. Kagamihara, H. Iwata, T. Ishida, K. Nishikawa. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 4981 (2003).
- [7] V.V. Kozlovski, E.V. Bogdanova, V.V. Emtsev, K.V. Emtsev, A.A. Lebedev, V.N. Lomasov. *Mater. Sci. Forum*, **483–485**, 383 (2005).
- [8] В.В. Козловский, В.В. Емцев, К.В. Емцев, Н.Б. Строкан, А.М. Иванов, В.Н. Ломасов, Г.А. Оганесян, А.А. Лебедев. *ФТП*, **42**, 243 (2008).
- [9] В.В. Емцев, А.М. Иванов, В.В. Козловский, А.А. Лебедев, Г.А. Оганесян, Н.Б. Строкан. *ФТП*, **44**, 706 (2010).
- [10] A.A. Lebedev, A.I. Veinger, D.V. Davydov, A.M. Strel'chuk, V.V. Kozlovski, N.S. Savkina. *J. Appl. Phys.*, **88**, 6265 (2000).
- [11] N. Iwamoto, S. Onoda, S. Hishiki, T. Ohshima, M. Murakami, I. Nakano, K. Kawano. *Mater. Sci. Forum*, **600–603**, 1043 (2009).
- [12] 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).
- [13] В.Т. Громов. *Введение в радиационную физику твердого тела* (Снежинск, Изд. ВНИИТФ, 2007).
- [14] H.J. von Bardeleben, J.L. Cantin, I. Vickridge, G. Battistig. *Phys. Rev. B*, **62**, 10 126 (2000).
- [15] А.Ф. Буренков, Ф.Ф. Комаров, М.А. Кумаров, М.М. Темкин. *Пространственные распределения энергии, выделенной в каскаде атомных столкновений в твердых телах* (М., Энергоатомиздат, 1985).
- [16] Р.Ф. Коноплева, В.И. Остроумов. *Взаимодействие заряженных частиц высоких энергий с германием и кремнием* (М., Атомиздат, 1975).
- [17] *Вопросы радиационной технологии полупроводников*, под ред. Л.С. Смирнова (Новосибирск, Наука, 1980).
- [18] А.М. Иванов, И.Н. Ильяшенко, Н.Б. Строкан, Б. Шмидт. *ФТП*, **29**, 543 (1995).
- [19] J.F. Ziegler, J.P. Biersack, U. Littmark. *The Stopping and Ranges of Ions in Solids* (N.Y., Pergamon Press, 1985).

Редактор Л.В. Беляков

***p*-6H-SiC conductivity compensation after irradiation of 8 MeV protons**

A.A. Lebedev, V.V. Kozlovski*, S.V. Belov, E.V. Bogdanova, G.A. Oganessian

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

* St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

Abstract Was investigated carrier removal rate (V_D) in *p*-6H-SiC after irradiation with 8 MeV protons. Silicon carbide samples were grown by sublimation epitaxy in vacuum. V_D value was defined both from measurement capacitance-voltage characteristics and Hall effect. It was founded that full compensation of samples with initial value of $N_a - N_d \approx 1.5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ took place at irradiation doze about: $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. Calculated carrier removal rate was $\sim 130 \text{ cm}^{-1}$.