

Радиационные дефекты в n -4H-SiC, облученном протонами с энергией 8 МэВ

© А.А. Лебедев, А.И. Вейнгер, Д.В. Давыдов, В.В. Козловский*, Н.С. Савкина, А.М. Стрельчук

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

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

(Получена 22 февраля 2000 г. Принята к печати 24 февраля 2000 г.)

Емкостными методами и методом электронного парамагнитного резонанса проведено исследование глубоких центров, образующихся в n -4H-SiC, облученном протонами с энергией 8 МэВ. В качестве образцов были исследованы диоды Шоттки и p - n -структуры на слоях, изготовленных как методом сублимационной эпитаксии, так и коммерчески выпускаемых CREE Inc (США). Обнаружено, что тип вводимых облучением центров не зависит от технологии изготовления материала и от вида заряженных частиц. На основе данных по отжигу дефектов и данных электронного парамагнитного резонанса сделаны предположения о возможной структуре образовавшихся центров.

Введение

Известно, что облучение протонами используется в полупроводниковой технологии для создания локальных полуизолирующих областей [1]. В нашей предыдущей работе [2] сообщалось о получении полуизолирующих (при комнатной температуре) слоев наиболее распространенного политипа 6H-SiC [2–4] и исследовании параметров образующихся в этом материале радиационных дефектов (РД). Однако более перспективным для создания полупроводниковых приборов политипом карбида кремния является 4H-SiC, имеющий большую ширину запрещенной зоны и меньшую энергию ионизации основных донорных уровней. Поэтому в настоящей работе мы повторили представленные в работе [2] исследования для 4H-SiC.

Таким образом, цель настоящей работы состоит в получении полуизолирующих слоев 4H-SiC протонным облучением и исследовании параметров РД, определяющих свойства этих слоев.

Образцы

В качестве образцов использовались эпитаксиальные слои SiC, коммерчески выпускаемые фирмой CREE [3], а также слои, изготовленные нами методом сублимационной эпитаксии [4]. В последнем случае толщина n -слоя составляла около 5 мкм, толщина подложки — около 400 мкм. Диаметр барьеров Шоттки составлял 300–1200 мкм. Концентрация нескомпенсированных доноров в n -слое ($N_d - N_a$) составляла $(1-4) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, в подложке — $(3-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, уровень легирования подложки не менее чем на 2 порядка превосходил уровень легирования базового слоя n -типа. Поскольку скорость генерации РД в полупроводнике практически не зависит от уровня его легирования [5], мы предполагали, что сопротивление данных структур в прямом направлении (R) определяется концентрацией носителей заряда в n -слое. Для исследования РД методом

электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) использовались подложки фирмы CREE толщиной около 0.5 мм с исходной концентрацией азота $\sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Облучение протонами выполнялось на циклотроне МГЦ-20. Использовались протоны с энергией 8 МэВ в диапазоне доз облучения $D = 10^{14} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Результаты эксперимента

1. Вольт-фарадные характеристики ($C-U$)

Измерение $C-U$ характеристик производилось на стандартной установке с параллельной схемой замещения и синусоидальной частотой 10 кГц. Исследования облученных образцов показало уменьшение величин

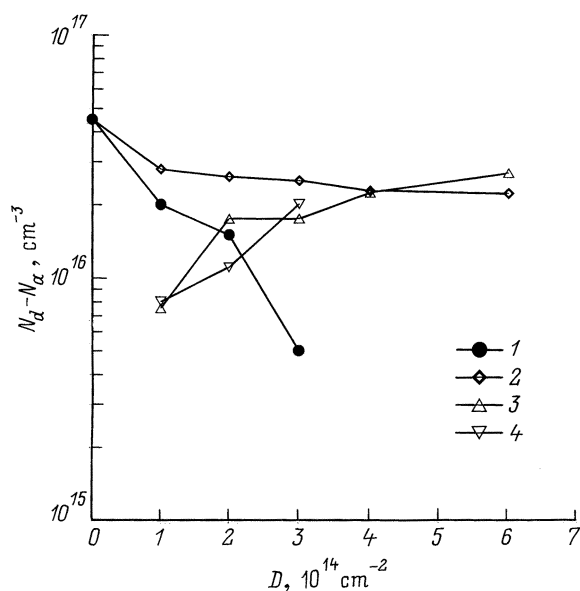


Рис. 1. Зависимости величины $N_d - N_a$ при $T = 300 \text{ К}$ (1), $T = 650 \text{ К}$ (2), их разности (3) и суммарной концентрации радиационных центров ($RD_{1/2} + RD_3 + RD_4$) (4) от дозы облучения D .

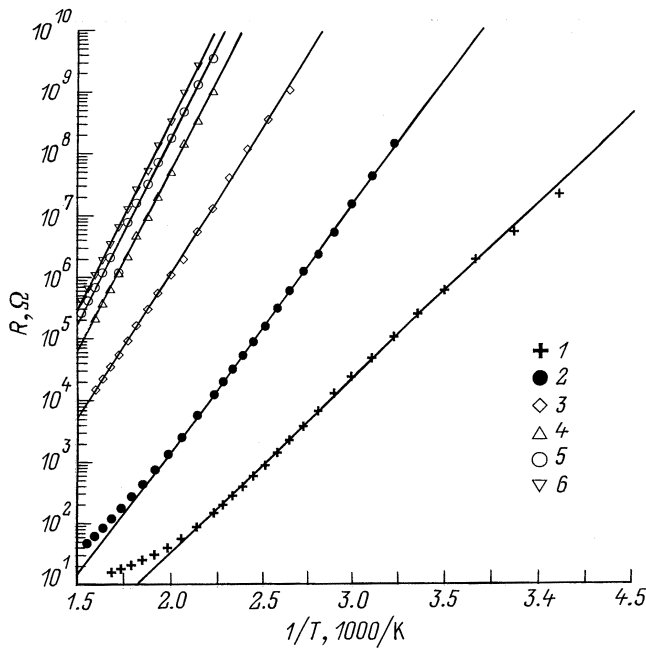


Рис. 2. Температурные зависимости прямого сопротивления диода Шоттки R при разных дозах облучения $D, 10^{14} \text{ см}^{-2}$: 1 — 6, 2 — 10, 3 — 20, 4 — 50, 5 — 100, 6 — 200.

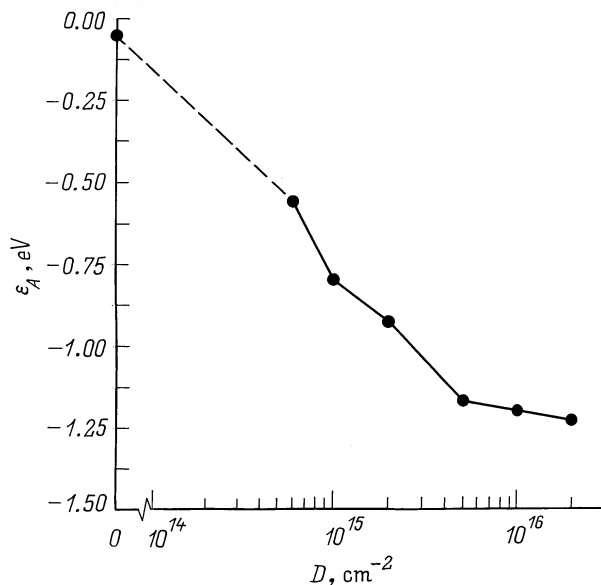


Рис. 3. Зависимость величины ε_A от дозы облучения для диода Шоттки (рис. 2) на основе эпитаксиального слоя, полученного сублимационной эпитаксией.

ны $N_d - N_a$, измеряемой при комнатной температуре с возрастанием дозы облучения, в то же время величина $N_d - N_a$ заметно увеличивалась при нагреве структуры до 650 К (рис. 1). С увеличением дозы облучения разность между высокотемпературным и низкотемпературным значением $N_d - N_a$ возрастала.

Облучение приводило также к росту величины R — сопротивления барьера Шоттки в прямом направлении. С увеличением дозы облучения рост R приводил к невозможности емкостных измерений — измеряемая величина емкости переставала зависеть от приложенного напряжения [6]. С нагревом величина R уменьшалась по экспоненциальному закону с энергией активации ε_A (рис. 2). С увеличением дозы облучения величина $-\varepsilon_A$ увеличивалась, достигая значения ~ 1.25 эВ при $D = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (рис. 3). Подобный характер изменения сопротивления под действием облучения (“пининг” уровня Ферми) характерен и для других полупроводниковых материалов (см., например, GaAs [7] или 6H-SiC [2]).

2. DLTS-измерения

При исследовании глубоких центров (ГЦ) в верхней половине запрещенной зоны было обнаружено 5 типов глубоких центров, большинство из которых обнаружено в *n*-4H-SiC, имплантированном ионами He^+ [8], либо были близки по параметрам к структурным дефектам. В таблице представлены энергии ионизации обнаруженных центров ($E_c - E_0$), сечения захвата электронов (σ_n) и их концентрации после дозы облучения $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Один из обнаруженных центров с энергией $E_c - 0.18$ эВ полностью отжигался при температурах 500–650 К. Не было обнаружено заметной разницы в спектре ГЦ, образующихся в эпитаксиальных слоях CREE и выращенных сублимационной эпитаксией. На рис. 4 представлены зависимости Аррениуса для обнаруженных РД.

Полный отжиг обнаруженных РД наблюдался при температурах ~ 1500 К.

3. Электронный парамагнитный резонанс радиационных дефектов, полученных протонным облучением

Облучение объемных образцов (часть подложки CREE) проводилось в тех же условиях эксперимента (доза облучения $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$). Для измерений использовался ЭПР спектрометр E-112 фирмы Varian. Измерения проводились при температуре 77 К. При этой температуре до облучения наблюдался ЭПР примесных атомов азота, концентрация которых была настолько велика, что сигнал представлял собой одиночную уширенную линию без каких-либо признаков наличия сверхтонкой структуры. Кроме того, при температуре 77 К наблюдалась заметная проводимость образцов, что приводило к уменьшению добротности и к искажению формы линии. Она приобретала дайсоновскую форму с отношением крыльев производной около 3, что указывает на большую глубину скин-слоя по сравнению с длиной свободного пробега относительно спиновой релаксации [11]. В результате облучения концентрация электронов уменьшилась приблизительно в 2.6 раза, линия сузилась и стала более симметричной (отношение крыльев производной уменьшилось до 1.3). На фоне линии появились слабо

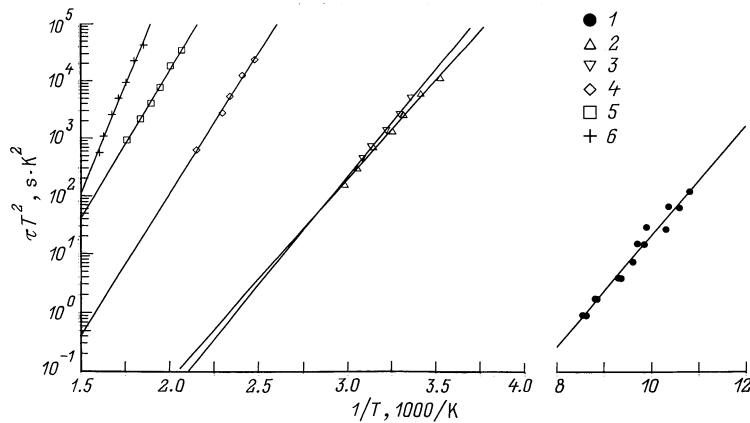


Рис. 4. Зависимости Аррениуса для обнаруженных радиационных дефектов типа: 1 — P_1/P_2 , 2 — Z_1 после облучения, 3 — Z_1 до облучения, 4 — $RD_{1/2}$, 5 — RD_3 , 6 — RD_4 .

выраженные дополнительные пики, часть которых можно приписать появлению спектра от одиночных атомов азота, а часть — появлению новых спектров, связанных с РД. Кроме того, как и в облученном $6H$ -SiC, наблюдались спектры РД с большим тонким расщеплением [2], самый сильный из которых состоял из 12 линий при произвольной ориентации образца. Другие линии, не принадлежащие этому спектру, были гораздо слабее.

Обсуждение результатов

1. Компенсация

Как показали проведенные исследования, под действием протонного облучения в n - $4H$ -SiC происходит образование нескольких глубоких центров в диапазоне энергий 0.96–1.5 эВ. Как следует из параметров центра $RD_{1/2}$, постоянная времени его перезарядки (τ) составляет $5 \cdot 10^3$ с при $T = 300$ К. Таким образом, зарядовое состояние данного центра (и более глубоких) не изменится в процессе $C-U$ -измерений при комнатной температуре. В то же время τ для ближайшего к этому уровню центра Z_1 составляет $36 \cdot 10^{-3}$ с при 300 К. Следовательно, центр Z_1 (и все более мелкие) при $C-U$ -измерениях при комнатной температуре можно считать полностью опустошенным. При больших дозах облучения проводимость образцов начинает определяться термической ионизацией электронов с данных центров, и энергия активации сопротивления прибли-

жается к энергии ионизации наиболее глубокого центра. Имеющиеся у нас экспериментальные данные не позволяют сделать однозначного вывода о том, являются ли данные центры донорами или акцепторами (подробнее см. [21]). Однако независимо от природы РД максимальная энергия активации сопротивления базы с ростом величины дозы D будет стремиться к энергии ионизации наиболее глубокого из них, т.е. к величине ~ 1.5 эВ. Таким образом, разность величин $N_d - N_a$, измеренных при 300 и 650 К, должна быть равна концентрации центров $RD_{1/2} + RD_3 + RD_4$, определенной из DLTS-спектров. Как видно из рис. 1, это равенство хорошо согласуется с экспериментом для доз $\leq 3 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$. При больших дозах облучения $C-U$ -измерения при комнатной температуре были невозможны из-за большой величины R . С нагревом сопротивление облученных структур уменьшается по экспоненциальному закону, что и наблюдалось ранее экспериментально [12].

2. Идентификация и возможная структура центров

Как видно из таблицы, наблюдается хорошее соответствие между спектрами РД $4H$ -SiC, возникающими после протонного облучения и имплантации ионов He^+ . Также существует корреляция между температурами отжига T_{ann} введенных центров. Таким образом, можно сделать вывод, что в SiC, как и в других полупроводниковых материалах [7], различные типы радиационного

Параметры обнаруженных глубоких центров				Соответствие литературным данным		Возможная структура дефектов
$E_c - E_0$, эВ	σ_n , см 2	N_g , см $^{-3}$	T_{ann} , К	Имплантация He^+ [8]	Структурные дефекты	
0.18	$6 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^{14}$	500–650	P_1/P_2	Z ₁ [8,9],	Первичные дефекты V _C
0.63–0.70	$5 \cdot 10^{-15}$	$5 \cdot 10^{15}$	$800 < T_{ann} < 1500$	Z ₁		
0.96	$5 \cdot 10^{-15}$	$6.3 \cdot 10^{15}$	”	$RD_{1/2}$	$E_c - 1.1$ эВ [10]	} V _C + V _{Si}
1.0	$1 \cdot 10^{-16}$	$6.3 \cdot 10^{15}$	”	RD ₃		
1.5	$2 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{15}$	”	RD ₄		

воздействия приводят к образованию одних и тех же ГЦ, но с различным соотношением концентраций.

Несмотря на совпадение параметров РД с параметрами некоторых собственных дефектов (Z_1 , $E_c - 1.1$ эВ), с нашей точки зрения, пока рано говорить о полной идентичности данных РД и собственных дефектов. Напомним, что полный отжиг РД наблюдается при температуре ~ 1500 К, в то время как близкие к ним по параметрам собственные дефекты существуют в эпитаксиальных слоях n - $4H$ -SiC, выращенных сублимацией при 2100 К.

Как отмечалось в работе [13], где механизм формирования и отжига РД в SiC изучался на основе экспериментов с позитронным временем жизни, протонное облучение приводит к образованию углеродных и кремниевых вакансий, а также других первичных дефектов, которые рекомбинируют при отжиге до 400–600 К с образованием термически стабильных комплексов. Таким образом, на основе наших исследований DLTS-спектров до и после отжига можно предположить, что центр $E_c - 0.18$ эВ связан с первичными РД.

По данным ЭПР хорошо определяется структура РД, но для того, чтобы связать структуру с электрическими свойствами, необходимы дополнительные условия. В частности, это возможно, когда дефекты являются фоточувствительными.

В общем случае до настоящего времени не удается однозначно связать структуру РД, возникающих в SiC при радиационном воздействии, с их электрическими характеристиками. Для некоторых структурных дефектов, возникающих в SiC при закалке образцов, это удалось сделать благодаря фоточувствительности их спектров ЭПР [14]. Изучение влияния света на амплитуду спектров ЭПР поглощения в исследованных нами образцах показало их нечувствительность к свету. В связи с этим для отождествления структуры и электрических свойств РД, как и в политипе $6H$ -SiC [2], мы сравнивали параметры ЭПР спектров, полученных нами, с параметрами, полученными при изучении термодефектов в закаленных образцах $6H$ -SiC [14], и радиационных дефектов в образцах $4H$ -SiC, облученных нейтронами и α -частицами [15]. Как показано в этих работах, дефекты в SiC обуславливают появление двух типов ЭПР спектров: со спином $S = 1/2$ и со спином $S = 1$. В последних наблюдается тонкая структура. ЭПР параметры центров в обоих политипах очень близки, что позволяет предполагать наличие такого же соответствия ЭПР параметров и электрических характеристик, как и в политипе $4H$ -SiC.

В политипе $6H$ -SiC также наблюдались спектры двух типов. Центру со спином $S = 1/2$ соответствует слабо анизотропная одиночная линия с g -фактором, почти совпадающим с g -фактором примеси азота. Поскольку в исследованных образцах спектр атомов азота не исчезал и оставался достаточно интенсивным, на его фоне терялись возможно присутствующие в спектре слабые линии сверхтонкой структуры, обусловленные взаимодействием электронного спина с ядерными спинами изотопов ^{29}Si и ^{31}C . В связи с этим пока не

удалось однозначно идентифицировать структуру этого центра. Однако сравнение со спектром термодефектов позволяет предположить, что линию ЭПР спектра со спином $S = 1/2$ дает одиночная вакансия в подрешетке углерода с термической энергией активации 0.63–0.7 эВ (в работе [14] измеренная оптическая энергия активации оказалась равной 0.65 эВ).

Гораздо более точную идентификацию удалось провести для центра со спином $S = 1$. В произвольной ориентации спектр содержит 12 линий, как и в политипе $6H$, и это значит, что центр, дающий такой спектр, обладает симметрией 2-го порядка, и ось симметрии лежит в плоскости, содержащей ось c и одну из осей 2-го порядка. Максимальное наблюдаемое значение тонкого расщепления $D = 567$ Э (508 · 10⁻⁴ см⁻¹) и лежит под углом 30° к оси c . Подобным спектром обладает наблюдавшийся в работе [15] центр $G2$ в политипе $4H$, который интерпретирован как пара ближайших вакансий в подрешетках углерода и кремния. Похожим спектром обладает и наблюдавшийся в [14] в политипе $6H$ фоточувствительный термодефект $P7$ с энергией оптической активации 1.17 эВ. Следует также отметить, что различным образом ориентированные дивакансии обладают близкими энергиями активации. Отсюда следует, что спектр центра с $S = 1$ можно с большой долей вероятности отождествить с одним из представленных в таблице РД центром, имеющим энергию активации 0.96–1 эВ.

Таким образом, в облученном протонами n - $4H$ -SiC удалось сопоставить структуру и электрические свойства двух РД: вакансию углерода с энергией активации 0.63–0.7 эВ и пару вакансий в подрешетках углерода и кремния с энергией активации 0.96–1 эВ.

Заключение

Проделанная работа позволяет сделать два вывода.

1. Наблюдается тождественность свойств и параметров РД, образующихся в n - $4H$ -SiC под действием облучения различными видами заряженных частиц.

2. В отличие от $6H$ -SiC наблюдается не увеличение, а уменьшение суммарной концентрации нескомпенсированных доноров в облученных протонами образцах. Это показывает, что под действием облучения происходит образование акцепторных центров в нижней половине запрещенной зоны либо разрушение донорных центров в верхней половине запрещенной зоны. Кроме того под действием облучения происходит образование глубоких акцепторных центров, на которые переходят электроны с более мелких донорных уровней. Это приводит к заглублению положения уровня Ферми и получению полуизолирующих при комнатной температуре слоев n - $4H$ -SiC. Такие слои могут быть использованы в технологии приборов, не предназначенных для работы при высоких температурах — например, фотоприемников или различных детекторов излучения.

Список литературы

- [1] В.В. Козловский, В.А. Козлов, В.Н. Ломасов. ФТП, **34**, 129 (2000).
- [2] А.А. Лебедев, В.И. Вейнгер, Д.В. Давыдов, В.В. Козловский, Н.С. Савкина, А.М. Стрельчук. ФТП (в печати).
- [3] J.W. Palmor, J.A. Edmond, H.S. Kong, C.H. Carter, Jr. Physica B, **185**, 461 (1993).
- [4] 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).
- [5] *Радиационные процессы в технологии материалов и изделий электронной техники*, под ред. В.С. Иванова, В.В. Козловского (М., Энергоатомиздат, 1997).
- [6] А.А. Лебедев, Н.А. Соболев. ФТП, **16**, 1874 (1982).
- [7] D.C. Look, J.P. Sizelove. J. Appl. Phys., **62**, 3660 (1987).
- [8] T. Dalibor, G. Pensl, H. Matsunami, T. Kimoto, W.J. Choyke, A. Schoner, N. Nordel. Phys. St. Sol. (a), **162**, 199 (1997).
- [9] J.P. Doyle, M.O. Aboelfotoh, B.G. Svensson et al. Diamond and Rel. Mater., **6**, 1388 (1977).
- [10] W.C. Michel, A. Saxler, R. Perrin et al. *Abstracts of International Conference on SiC and related Materials* (Raleigh, NC, USA, Oct. 10–15, 1999) Abstract No 281.
- [11] C. Pool. *Electron Spin Resonance* (J. Wiley & Sons, N.Y.–London, 1967). [Русск. пер.: Ч. Пул. *Техника ЭПР спектроскопии* (М., Мир, 1970)].
- [12] R.K. Nadela, M.A. Capano. Appl. Phys. Lett., **70**, 886 (1997).
- [13] W. Puff, P. Mascher, A.G. Balogh, H. Baumann. Mater. Sci. Forum, **258–263**, 733 (1997).
- [14] А.И. Вейнгер, В.А. Ильин, Ю.М. Таиров, В.Ф. Цветков. ФТП, **15**, 1557 (1981).
- [15] Н.М. Павлов, М.И. Иглицын, М.Г. Косаганова, В.Н. Соломатин. ФТП, **9**, 1279 (1975).

Редактор Т.А. Полянская

Radiation defects in *n*-4H-SiC irradiated by 8 MeV protons

A.A. Lebedev, A.I. Veinger, D.V. Davydov,
V.V. Kozlovskii*, N.S. Savkina, A.M. Strel'chuk

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

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