

Полуизолирующие слои $4H$ -SiC, полученные имплантацией высокоэнергетических (53 МэВ) ионов аргона в эпитаксиальные пленки n -типа проводимости

© П.А. Иванов, М.Ф. Кудояров, М.А. Козловский, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова

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

E-mail: Pavel.Ivanov@mail.ioffe.ru

(Получена 16 декабря 2015 г. Принята к печати 24 декабря 2015 г.)

Показана возможность формирования в умеренно легированном карбиде кремния n -типа проводимости (концентрация доноров $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) приповерхностных полуизолирующих слоев толщиной 9 мкм с помощью относительно низкодозной ($7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$) имплантации высокоэнергетических (53 МэВ) ионов аргона. Скорость удаления свободных носителей оценивается величиной $\sim 10^4 \text{ см}^{-1}$. Удельное сопротивление полуизолятора составляет не менее $7 \cdot 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Анализ тока монополярной инжекции электронов в полуизолятор показал, что за компенсацию примесной проводимости ответственны радиационные дефекты, закрепляющие равновесный уровень Ферми на глубине 1.16 эВ ниже дна зоны проводимости. Энергетическая плотность дефектов на уровне Ферми составляет $2.7 \cdot 10^{16} \text{ см}^2 \cdot \text{эВ}^{-1}$.

1. Введение

К настоящему времени радиационная модификация свойств полупроводниковых материалов приобрела большое значение в технологии полупроводниковых приборов. Здесь сформировалось целое направление, называемое „радиационная технология полупроводников“. Далеко не полный перечень применяемых радиационных технологий включает ионное легирование, радиационно-стимулированное ускорение диффузии внедренных примесных атомов, формирование аморфизированных поверхностных и скрытых пористых слоев, введение центров излучательной рекомбинации, управление рекомбинационными параметрами неравновесных носителей, компенсацию примесной проводимости радиационными дефектами и др.

Механизм компенсации примесной проводимости в полупроводниках при имплантации высокоэнергетических заряженных частиц (электронов, легких и тяжелых ионов) обусловлен главным образом тем, что при торможении в приповерхностной области полупроводника имплантируемые частицы создают дефекты с глубокими энергетическими уровнями в запрещенной зоне, способные захватывать свободные носители заряда (компенсирующие дефекты). В принципе, облучением можно добиться полной компенсации примесной проводимости, создавая тем самым приповерхностные полуизолирующие слои [1].

Исследования компенсации примесной проводимости в SiC радиационными дефектами ранее проводились преимущественно с использованием легких заряженных частиц — электронов и протонов [2–5]. Скорость удаления свободных носителей составляет от долей до нескольких единиц обратных сантиметров. В настоящей работе мы сообщаем о первых результатах исследования компенсации проводимости в n - $4H$ -SiC после облучения тяжелыми частицами — ионами аргона с

энергией 53 МэВ. Заранее ожидалось, что за счет более интенсивного дефектообразования при торможении тяжелых ионов скорость удаления свободных носителей должна быть существенно выше по сравнению с легкими частицами. Практическая цель работы состояла в том, чтобы с помощью облучения получить полуизолирующие слои карбида кремния.

2. Предварительные расчеты и замечания

Когда идет речь о компенсации примесной проводимости при имплантации ионов, возникают вопросы как о пространственном распределении внедренных ионов, так и о профиле потерь их первоначальной энергии (пространственное распределение компенсирующих радиационных дефектов должно коррелировать именно с профилем потерь энергии ионов). Для подобных расчетов используют различные программы компьютерного моделирования, среди которых наибольшую популярность приобрел пакет SRIM [6], основанный на теоретических моделях, описанных в [7]. На рис. 1 показаны рассчитанные нами по программе SRIM профиль распределения внедренных в $4H$ -SiC ионов аргона с энергией 53 МэВ и профиль потерь их энергии. Как видно, рассчитанный пробег ионов аргона составляет ~ 10 мкм, при этом ионы более или менее равномерно теряют энергию на расстоянии от поверхности, приблизительно равном $2/3$ от длины пробега.

Таким образом, при облучении ионами аргона с энергией 53 МэВ толщина компенсированной приповерхностной области слоя должна быть ~ 10 мкм. Если при этом степень компенсации будет достаточно высокой, то электрические свойства такого слоя можно исследовать, анализируя ток монополярной инжекции электронов в i -слой из n -области (рис. 2). Анализ инжекционного

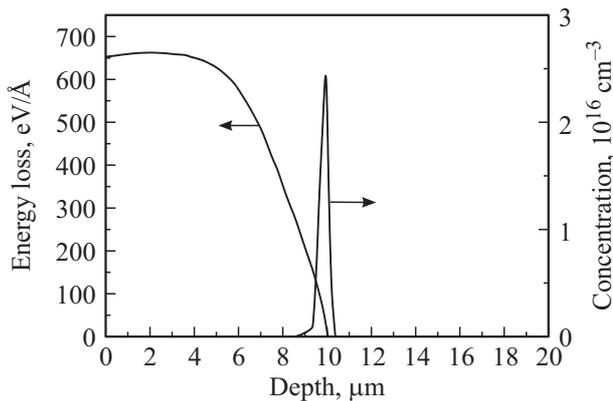


Рис. 1. Профиль распределения внедренных в $4H$ -SiC ионов аргона с энергией 53 МэВ и профиль потерь их энергии, рассчитанные по программе SRIM. Доза облучения 10^{12} см^{-2} .

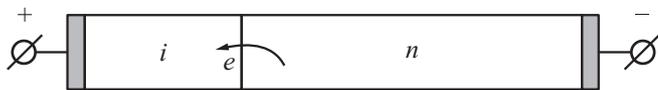


Рис. 2. Схематическое сечение полупроводниковой структуры с приповерхностным полупроводящим слоем. Стрелкой показана инжекция электронов (e) из полупроводника (n) в диэлектрик (i).

тока может в принципе, дать информацию о параметрах локальных состояний в запрещенной зоне $4H$ -SiC (теория инжекционных токов в изоляторах с ловушками захвата носителей заряда развита Лампертом и Марком в работе [8]).

3. Экспериментальные детали

Экспериментальные образцы изготавливались на основе коммерческих эпитаксиальных $4H$ -SiC-структур. Эпитаксиальная структура состоит из n^+ -подложки с удельным сопротивлением 0.02 Ом·см и n -слоя с концентрацией доноров $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 10 мкм. Технология изготовления образцов состояла в следующем. Вначале формировался никелевый омический контакт к шлифованной с обратной стороны подложке: слой никеля толщиной ~ 100 нм осаждался путем ионного распыления Ni-мишени с последующим отжигом в вакууме при температуре 950° в течение 15 мин. Далее проводилось облучение эпитаксиального n -слоя ионами аргона с энергией 53 МэВ на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Доза облучения составляла $\sim 7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Затем формировались металлические контакты на поверхности облученного слоя путем ионного распыления Ni-мишени (толщина слоя никеля 300 нм). Площадь контактов $S = 1.2 \text{ мм}^2$. Образцы после облучения термическому отжигу не подвергались. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) изготовленных образцов измерялись в диапазоне токов от 1 нА до нескольких мкА (на по-

стоянном токе). Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) измерялись с помощью измерителя адмиттанса Е7-20 на частотах от 1 кГц до 1 МГц.

4. Экспериментальные результаты

Измерения адмиттанса (со смещением до 40 В при обеих полярностях) показали, что изготовленные структуры обладают свойствами электрического конденсатора с малыми утечками; емкость конденсатора $C = 12.5$ пФ и практически не зависит от частоты в пределах 1 кГц–1 МГц. Как мы полагаем, в результате облучения формируется приповерхностный полупроводящий слой, толщина которого $d = \epsilon S / C = 8.9$ мкм ($\epsilon = 8.85 \cdot 10^{13} \text{ Ф/см}$ — диэлектрическая проницаемость $4H$ -SiC, S — площадь структуры). Отметим, что определенная таким образом толщина полупроводящего слоя близка к рассчитанному по программе SRIM пробегу ионов аргона.

Вольт-амперные характеристики нескольких образцов, измеренные при отрицательном потенциале на n^+ -подложке (катод) и построенные в двойном логарифмическом масштабе, показаны на рис. 3. Как видно, качественно характер зависимостей тока I от напряжения V для разных образцов был одинаков: заметный ток ~ 1 нА (нижний предел измерений использованного цифрового амперметра) появлялся при напряжении ~ 540 В и нарастал при увеличении напряжения до 760 В по близкому к степенному закону (в пределах изменения по току на 2 порядка): $I \propto V^m$, где показатель степени $m \approx 13$. При увеличении напряжения выше 760 В ток проявлял нестабильный характер. Кроме того, на этом участке форма ВАХ заметно различалась для разных образцов. При токе выше нескольких микроампер в образцах происходил деструктивный пробой. Подобные ВАХ характерны для токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ) в изоляторах с ловушками за-

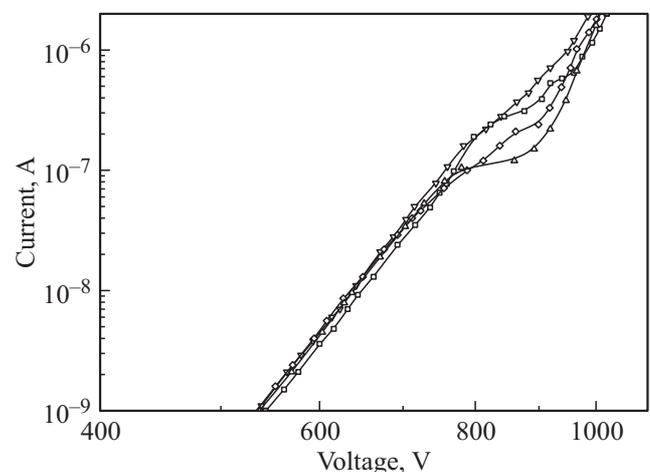


Рис. 3. ВАХ нескольких образцов, измеренные при отрицательном потенциале на n^+ -подложке.

хвата носителей [8]. На качественном уровне особенности измеренных ВАХ могут быть проинтерпретированы следующим образом. В равновесии концентрация свободных электронов в облученном слое ничтожно мала, так что омическая проводимость последнего практически отсутствует. По величине тока 1 нА, протекающего при напряжении 540 В, можно оценить (при известной толщине полуизолирующего слоя 8.9 мкм и площади структуры 1.2 мм²) нижний предел удельного сопротивления полуизолятора: $\rho > 7 \cdot 10^{12}$ Ом·см (для сравнения: удельное сопротивление полуизолирующих эпитаксиальных пленок карбида кремния, легированных ванадием в процессе роста, может достигать 10^{12} Ом·см [9]). При приложении к катоду отрицательного потенциала происходит монополярная инжекция электронов в полуизолирующий слой из необлученной *n*-области. При этом часть инжектированных электронов захватывается ловушками, а оставшаяся часть поддерживает инжекционный ТОПЗ. Концентрация захваченных электронов и концентрация свободных электронов, поддерживающих ток, определяются статистикой заполнения уровней и довольно сложным образом растут при увеличении приложенного напряжения. Наблюдаемая нестабильность тока и разная форма ВАХ при больших напряжениях, скорее всего, связаны с микронеоднородностями свойств полуизолирующего слоя, который после имплантации дополнительной термообработке не подвергался (есть основания полагать, что термическим отжигом при относительно невысоких температурах (200–500 °С) можно добиться гомогенизации и стабилизации свойства полуизолятора).

5. Анализ вольт-амперных характеристик

Цель последующего анализа ВАХ состоит в том, чтобы оценить параметры введенных облучением ловушек. Анализ ВАХ будем проводить на участке до напряжения 760 В. Будем исходить из того, что облучением создается группа глубоких ловушек с квазинепрерывным энергетическим спектром в запрещенной зоне, и будем считать для простоты, что в окрестности уровня Ферми E_{F0} энергетическая плотность ловушек $N_t(E)$ постоянна. Такое упрощение оправдано тем, что изменение положения квазиуровня Ферми при приложении обратного напряжения составляет не более нескольких единиц kT (kT — тепловая энергия).

При приложении к структуре напряжения в изолятор инжектируются электроны, полная концентрация которых n_i определяется его емкостью и приложенным напряжением V :

$$n_i = \frac{2eV}{qd^2}. \tag{1}$$

Часть инжектированных электронов захватывается ловушками, а другая их часть поддерживает инжекционный ТОПЗ. Концентрация свободных электронов n_f

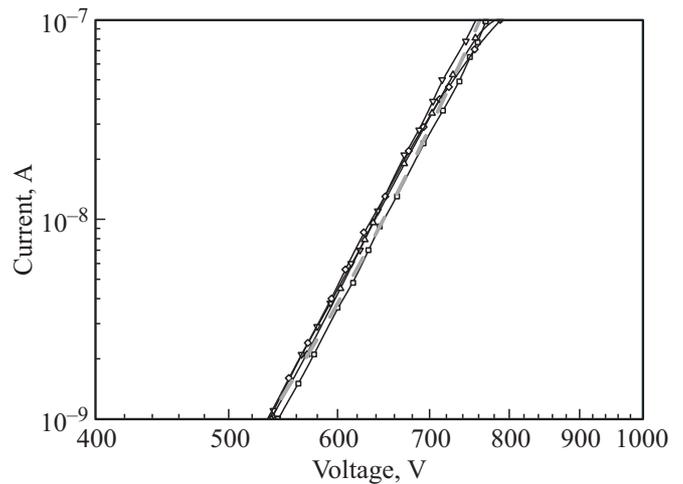


Рис. 4. Экспериментальные ВАХ (сплошные линии с точками) и ВАХ, рассчитанная по формулам (2)–(6) (толстая штриховая линия) со следующими параметрами: $N_t = 2.7 \cdot 10^{16}$ см⁻³ · эВ⁻¹, $E_c - E_{F0} = 1.16$ эВ.

определяется положением квазиуровня Ферми $E_F(V)$ относительно дна зоны проводимости E_c и растет с ростом напряжения:

$$n_f = N_c \exp \left[\frac{E_F(V) - E_c}{kT} \right] \tag{2}$$

(N_c — эффективная плотность состояний в зоне проводимости 4H-SiC). По мере роста напряжения квазиуровень Ферми E_F смещается от своего равновесного положения E_{F0} ближе к дну зоны проводимости, так что концентрация захваченных электронов также растет:

$$n_t = N_t (E_F(V) - E_{F0}). \tag{3}$$

Для ряда значений напряжения V и при заранее известных значениях N_t и E_{F0} из уравнения баланса зарядов

$$n_i = n_f + n_t \tag{4}$$

можно определить положение квазиуровня Ферми $E_F(V)$ и построить ВАХ по формуле

$$I = qn_f v_s S = qv_s S N_c \exp \left[\frac{E_F(V) - E_c}{kT} \right], \tag{5}$$

где $v_s = 2 \cdot 10^7$ см/с — насыщенная скорость дрейфа электронов в 4H-SiC (при напряжениях $V > 540$ В электрическое поле в полуизоляторе, $F = V/d > 6 \cdot 10^5$ В/см, в несколько раз превышает поле, при котором наступает насыщение дрейфовой скорости электронов). На практике с помощью комбинации численных методов решалась обратная задача — определение параметров N_t и E_{F0} из экспериментально измеренной ВАХ. В результате аппроксимации ВАХ получены следующие параметры: $N_t = 2.7 \cdot 10^{16}$ см⁻³ · эВ⁻¹ и $E_c - E_{F0} = 1.16$ эВ. На рис. 4

наряду с экспериментальными показана ВАХ, рассчитанная по формулам (1)–(5) с указанными параметрами. Как видно, экспериментальные ВАХ хорошо описываются по рассмотренной модели.

6. Заключение

Проведенное исследование показало возможность формирования в умеренно легированном карбиде кремния (с концентрацией доноров $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) приповерхностных полуизолирующих слоев толщиной 9 мкм с помощью относительно низкодозной ($7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$) имплантации высокоэнергетических (53 МэВ) ионов аргона. Скорость удаления свободных носителей, оцениваемая величиной $\sim 10^4 \text{ см}^{-1}$, оказывается на 4–5 порядков больше по сравнению с облучением легкими частицами — электронами и протонами. В дальнейшем предполагается исследовать: 1) влияние термического отжига на свойства полуизолирующего слоя, 2) компенсацию материала *n*- и *p*-типа проводимости с разной концентрацией примесей, 3) возможное изменение кристаллической структуры (аморфизацию) 4H-SiC при облучении.

Список литературы

- [1] В.А. Козлов, В.В. Козловский. ФТП, **35**, 769 (2001).
- [2] H. Kaneko, T. Kimoto. Appl. Phys. Lett., **98**, 262 106 (2011).
- [3] V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, E.V. Bogdanova. J. Appl. Phys., **117**, 155 702 (2015).
- [4] А.А. Лебедев, А.И. Вейнгер, Д.В. Давыдов, В.В. Козловский, Н.С. Савкина, А.М. Стрельчук. ФТП, **34**, 1058 (2000).
- [5] А.А. Лебедев, В.В. Козловский, С.В. Белов, Е.В. Богданова, Г.А. Оганесян. ФТП, **45**, 1188 (2011).
- [6] <http://www.srim.org>.
- [7] J.F. Zeigler, J. Biersack, U. Littmark. *The Stopping and Ranges of Ions in Matter* (Oxford, Pergamon Press, 1985).
- [8] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973).
- [9] H.K. Song, S.Y. Kwon, J.H. Moon, H.S. Seo, J.H. Yim, J.H. Lee, H.J. Kim. J. Electrochem. Soc., **155**, H11 (2008).

Редактор Л.В. Шаронова

Semi-insulating 4H-SiC layers obtained by implantation of high energy (53 MeV) Ar ions into *n*-type epi-layers

P.A. Ivanov, V.F. Kudoyarov, M.A. Kozlovski,
A.S. Potapov, T.P. Samsonova

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract When implanting high energy (53 MeV) argon ions into moderately doped ($2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) *n*-type 4H-SiC, the formation of semi-insulating layer at the surface is successfully achieved. The implantation dose was $7 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. The layer thickness, compensation rate and specific resistance were found to be $9 \mu\text{m}$, $\sim 10^4 \text{ cm}^{-1}$ and more than $7 \cdot 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$, respectively. The analysis of electron injection current showed that compensation defects have the following parameters: the equilibrium Fermi level position is 1.16 eV below the bottom of conduction band while the density of states at the Fermi level is $\sim 2.7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$.