

07

## **Влияние термообработки на электрические характеристики полуизолирующих слоев, полученных с помощью облучения $n$ -SiC высокоэнергетическими ионами аргона**

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

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

Поступило в Редакцию 27 июля 2017 г.

В карбиде кремния  $n$ -типа с помощью облучения высокоэнергетическими (53 MeV) ионами аргона созданы приповерхностные полуизолирующие слои ( $i$ -SiC). Исследовано влияние термического отжига на электрические свойства облученных слоев. Показано, что наиболее высокоомными облученные слои  $i$ -SiC становятся после термообработки при температуре 600°C: их удельное сопротивление при комнатной температуре составляет не менее  $1.6 \cdot 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ , а при температуре 230°C — около  $5 \cdot 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ .

DOI: 10.21883/PJTF.2018.06.45762.16987

Радиационная модификация свойств полупроводниковых материалов находит все более широкое применение в приборной технологии: это ионное и радиационное легирование, радиационно ускоренная диффузия примесей, введение центров излучательной рекомбинации, регулирование времени жизни неравновесных носителей, компенсация примесной проводимости радиационными дефектами и др.

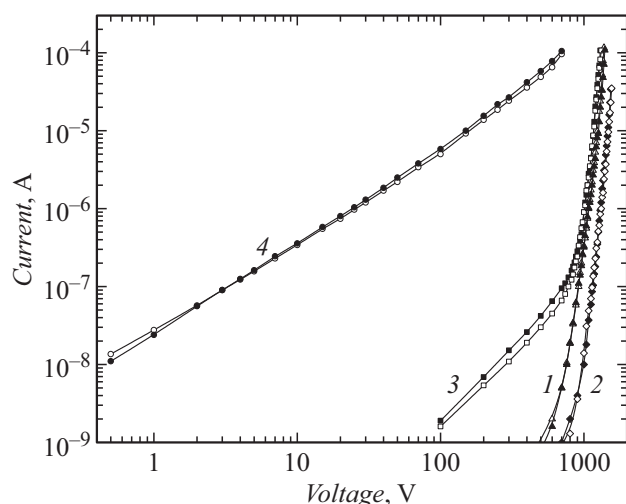
Ранее нами была показана возможность создания в  $n$ -SiC с концентрацией доноров  $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  приповерхностных полуизолирующих слоев ( $i$ -SiC) с помощью облучения высокоэнергетическими ионами аргона [1,2]. Необходимая для создания полуизолятора доза облучения относительно невелика — порядка  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , т.е. скорость удаления свободных электронов  $\sim 10^4 \text{ cm}^{-1}$ . Это на четыре-пять порядков выше,

чем в случае легких частиц — электронов и протонов [3–5]. При комнатной температуре удельное сопротивление имплантированных аргоном слоев  $i$ -SiC составляет  $\sim 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ . Анализ тока монополярной инжекции электронов в полупроводник показал, что за компенсацию донорной проводимости ответственны ловушки, закрепляющие положение равновесного уровня Ферми на глубине 1.1–1.2 eV ниже дна зоны проводимости SiC. Энергетическая плотность ловушек на уровне Ферми составляет  $(2–5) \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ .

Электрические характеристики слоев  $i$ -SiC, не подвергнутых дополнительной термической обработке после облучения, проявляли некоторую нестабильность [1], однако после термообработки при температуре 400°C эта нестабильность исчезала [2]. В настоящей работе продолжено исследование влияния термообработки (при температурах от 400 до 1000°C) на электрические характеристики слоев  $i$ -SiC, полученных с помощью облучения  $n$ -SiC высокоэнергетическими ионами аргона.

Экспериментальные образцы размером  $20 \times 20 \text{ mm}$  изготавливались на основе коммерческой пластины  $4H$ -SiC  $n$ -типа с выращенным на ней эпитаксиальным слоем (концентрация доноров в  $n$ -слое  $2 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , удельное сопротивление  $0.4 \Omega \cdot \text{cm}$ , толщина  $n$ -слоя  $10 \mu\text{m}$ ). Вначале проводилось облучение образцов со стороны  $n$ -слоя ионами аргона с энергией 53 MeV на УНУ „Циклотрон ФТИ“. Доза облучения составляла  $1 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$ . Далее образцы подвергались изохронной термической обработке в вакууме (30 min) при разных температурах: 400, 600, 800 и 1000°C. Затем на поверхности имплантированных слоев формировались структуры металл–полупроводник путем напыления анодных никелевых контактов площадью  $S = 2.56 \text{ mm}^2$  (толщина слоя никеля 300 nm). На обратную (шлифованную) сторону каждого из образцов напылялся сплошной слой никеля (катод) толщиной 300 nm. Напыленные анодные и катодный контакты термическому отжигу не подвергались. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) изготовленных структур с металлическими контактами измерялись в диапазоне токов  $10^{-9}$ – $10^{-4} \text{ A}$  (при постоянном токе). Вольт-фарадные характеристики определялись с помощью измерителя адмиттанса E7-20 на частоте 1 MHz.

Измерения вольт-фарадных характеристик со смещением на аноде от нуля до +10 V показали, что изготовленные структуры обладают свойствами электрического конденсатора с малыми утечками. Емкость конденсаторов практически не зависит от смещения и режима термообработки:  $C \approx 22 \text{ pF}$ . Очевидно, что в результате облучения форми-



**Рис. 1.** Типичные ВАХ изготовленных структур, измеренные при комнатной температуре. Температура термообработки, °C: 1 — 400, 2 — 600, 3 — 800, 4 — 1000.

руется приповерхностный полупроводящий слой, толщина которого  $d = \epsilon S/C = 8.9 \mu\text{m}$  ( $\epsilon = 8.85 \cdot 10^{13} \text{ F/cm}$  — диэлектрическая проницаемость 4H-SiC).

На рис. 1 показаны типичные ВАХ изготовленных структур в двойном логарифмическом масштабе, измеренные при комнатной температуре и при положительном потенциале анода (для демонстрации стабильности свойств показаны ВАХ двух структур на каждом из образцов). Как видно, электрическое сопротивление изготовленных структур немонотонно зависит от температуры термообработки. В структурах № 1 (термообработка при 400°C) начальный ток 1 нА протекает при напряжении 500 В и далее почти экспоненциально растет при увеличении напряжения. При напряжении 1400 В ток достигает 0.1 мА. Вид ВАХ структур № 2 (термообработка при 600°C) качественно тот же, однако ВАХ смещена в сторону больших напряжений приблизительно на 200 В. В структурах № 3 (термообработка при 800°C) ток в целом больше, чем для структур № 1. ВАХ этих структур состоит из двух участков. Начальный ток 1 нА протекает при напряжении 100 В. Далее с ростом

напряжения ток возрастает по закону, близкому к линейному, однако при напряжении свыше 700 V крутизна ВАХ резко увеличивается и сравнивается с наблюдаемой для структур № 1 и 2. Наконец, в структурах № 4 (термообработка при 1000°C) ВАХ практически линейная во всем диапазоне измеренных токов. При напряжении 700 V ток достигает 0.1 mA.

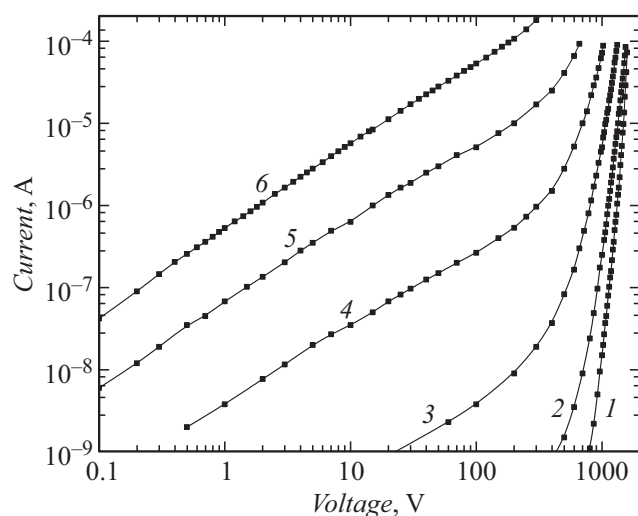
Описанные ВАХ характерны для инжекционных токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ), в изоляторах с ловушками захвата носителей. В рамках теории ТОПЗ изменение свойств *i*-SiC в результате термообработок на качественном уровне можно объяснить следующим образом.

Образец № 1. После термообработки при 400°C концентрация глубоких ловушек в облученном слое остается намного большей концентрации доноров. Равновесный уровень Ферми закрепляется глубоко в запрещенной зоне SiC, так что в равновесии концентрация свободных электронов ничтожно мала. При приложении к аноду положительного потенциала достаточной величины (более 700 V) происходит монополярная инжекция электронов в слой *i*-SiC из необлученной *n*-области (при напряжении 700 V концентрация инжектированных носителей составляет  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ). При этом часть инжектированных электронов захватывается ловушками, а оставшаяся часть поддерживает инжекционный ТОПЗ. Концентрация захваченных электронов и концентрация свободных инжектированных электронов, поддерживающих ток, определяются статистикой заполнения уровней ловушек и довольно сложным образом растут при увеличении приложенного напряжения.

Образец № 2. После термообработки при 600°C равновесный уровень Ферми еще больше заглубляется, что может быть связано с отжигом и перестройкой первичных радиационных дефектов (их комплексообразованием).

Образец № 3. Термообработка при 800°C приводит к частичному отжигу радиационных дефектов. Концентрация ловушек уменьшается, и становится заметной концентрация равновесных свободных электронов (равновесный уровень Ферми приближается к зоне проводимости).

Образец № 4. При 1000°C происходит дальнейший отжиг радиационных дефектов и рост концентрации свободных электронов. Во всем диапазоне напряжений от нуля до 700 V ток поддерживается равновесными свободными носителями, в то время как концентрация инжектированных свободных электронов пренебрежимо мала.



**Рис. 2.** ВАХ одной из структур № 2, измеренные при повышенных температурах  $T$ , °C: 1 — 25, 2 — 65, 3 — 105, 4 — 145, 5 — 185, 6 — 230.

Таким образом, при комнатной температуре наиболее высокоомными слои  $i$ -SiC становятся после термообработки при  $600^\circ\text{C}$ : их удельное сопротивление при комнатной температуре составляет не менее  $1.6 \cdot 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ .

Поскольку приборы на основе SiC потенциально работоспособны при температурах до  $200\text{--}250^\circ\text{C}$ , представляло интерес определить, как сильно ухудшаются изолирующие свойства облученных слоев при повышении температуры. На рис. 2 показаны ВАХ одной из структур № 2, измеренные при температурах от  $25$  до  $230^\circ\text{C}$ .

Как видно, при повышении температуры в облученном слое все более заметной становится омическая проводимость, которая поддерживается равновесными свободными электронами. Концентрация последних растет при повышении температуры за счет термических выбросов электронов с ловушек. Но даже при температуре  $230^\circ\text{C}$  материал остается высокоомным: удельное сопротивление составляет около  $5 \cdot 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ .

Таким образом, исследование показало, что сопротивление полуизолирующих слоев карбида кремния, полученных путем облучения высокоэнергетическими ионами аргона эпитаксиальных пленок  $4H$ -SiC, увеличивается при температуре обработки вплоть до  $600^{\circ}\text{C}$ , и лишь при превышении этой температуры сопротивление начинает уменьшаться за счет отжига радиационных дефектов.

## Список литературы

- [1] *Иванов П.А., Кудояров М.Ф., Козловский М.А., Потапов А.С., Самсонова Т.П.* // ФТП. 2016. Т. 50. В. 7. С. 937–940.
- [2] *Иванов П.А., Кудояров М.Ф., Козловский М.А., Потапов А.С., Самсонова Т.П.* // Тр. XXVI Междунар. конф. „Радиационная физика твердого тела“. Севастополь, 2016. С. 84.
- [3] *Kaneko H., Kimoto T.* // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. P. 262106.
- [4] *Kozlovski V.V., Lebedev A.A., Bogdanova E.V.* // J. Appl. Phys. 2015. V. 117. P. 155702.
- [5] *Лебедев А.А., Козловский В.В., Белов С.В., Богданова Е.В., Оганесян Г.А.* // ФТП. 2011. Т. 45. В. 9. С. 1188–1190.