

Бистабильный низкотемпературный (77 К) примесный пробой в 4H-SiC *p*-типа

© П.А. Иванов[†], А.С. Потапов, Т.П. Самсонова

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

(Получена 24 ноября 2009 г. Принята к печати 30 ноября 2009 г.)

Измерены низкотемпературные (77 К) прямые вольт-амперные характеристики мезаэпитаксиальных диодных структур $p^+-p-n-n$ (подложка) на основе 4H-SiC. Измеренные вольт-амперные характеристики проявляют *S*-образный характер, который интерпретируется как бистабильный примесный пробой акцепторных атомов алюминия с вымороженными на примеси носителями заряда.

1. Введение

Известно, что при низкотемпературном примесном пробое в полупроводниках обратный захват носителей на опустошенные примесные уровни с релаксацией по энергии может сопровождаться излучением в терагерцовом (ТГц) диапазоне (внутрицентровые переходы) [1–3]. Такие ТГц излучатели на основе кремния эффективно работают при температуре жидкого гелия (4 К) [1,2]. Интерес к карбиду кремния как потенциальному ТГц излучателю подобного рода обусловлен тем, что легирующие примеси в этом широкозонном полупроводнике имеют сравнительно большую энергию ионизации по сравнению с традиционными полупроводниками — кремнием и соединениями $A^{III}B^V$. Как следствие, вымораживание носителей в SiC при охлаждении происходит раньше, чем в Si и $A^{III}B^V$. Поэтому можно ожидать, что SiC-излучатели будут работать при температурах выше 4.2 К.

Исследованиям низкотемпературного примесного пробоя в карбиде кремния внимания пока уделялось мало. Ранее нами была исследована низкотемпературная (77 К) ударная ионизация атомов алюминия в пленках 4H-SiC *p*-типа с концентрацией $N_A \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ [4]. Было установлено, что коэффициент ионизации α_p экспоненциально зависит от обратного поля F :

$$\alpha_p = \alpha_p^* \exp(-F^*/F), \quad (1)$$

где $\alpha_p^* = 7.1 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$, а $F^* = 2.9 \cdot 10^4 \text{ В/см}$. Подобные экспоненциальные зависимости коэффициента ионизации от обратного поля характерны и для других полупроводниковых материалов [5]. Оказалось, что в случае 4H-SiC *p*-типа величина α_p^* одного порядка по сравнению с соответствующими величинами для материалов $A^{III}B^V$, однако пороговое поле F^* на 3 порядка выше, что является следствием большой энергии ионизации акцепторов в 4H-SiC (около 240 мэВ для алюминия).

В данной работе примесный пробой исследовался в пленках 4H-SiC с концентрацией акцепторов $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Как оказалось, в таком материале пробой проявляет сложный бистабильный характер.

2. Образцы

Для экспериментов использовалась коммерческая эпитаксиальная 4H-SiC-структура p^+-p-n^+-n , выращенная CVD эпитаксией. Структура представляет собой проводящую подложку *n*-типа с удельным сопротивлением 0.02 Ом·см, сильно легированный буферный n^+ -слой толщиной 1 мкм, активный *p*-слой толщиной 3 мкм, легированный алюминием (концентрация $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$), и сильно легированный подконтактный p^+ -слой толщиной 0.5 мкм. На основе эпитаксиальной структуры были изготовлены мезадиодные элементы, схематически показанные на рис. 1. Для изготовления мезаструктур использовалось реактивное ионное травление в плазме SF_6 . В качестве омических контактов к p^+ -слою и *n*-подложке использовались пленки Ti/Al и Ni соответственно, нанесенные магнетронным распылением соответствующих мишеней и отожженные в вакууме при температуре около 900°C.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) структуры, измеренные при комнатной температуре и $T \approx 77 \text{ К}$. ВАХ представляет собой обычную диодную характеристику. В диапазоне $10^{-10} - 10^{-3} \text{ А}$ ток экспоненциально зависит от приложенного напряжения (все приложенное внешнее напряжение падает на n^+-p -переходе); при токах свыше 10^{-3} А сопротивление

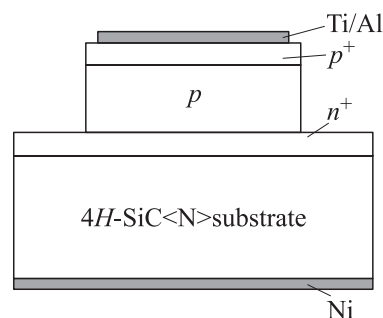


Рис. 1. Схематическое изображение исследованной структуры.

[†] E-mail: Pavel.Ivanov@mail.ioffe.ru

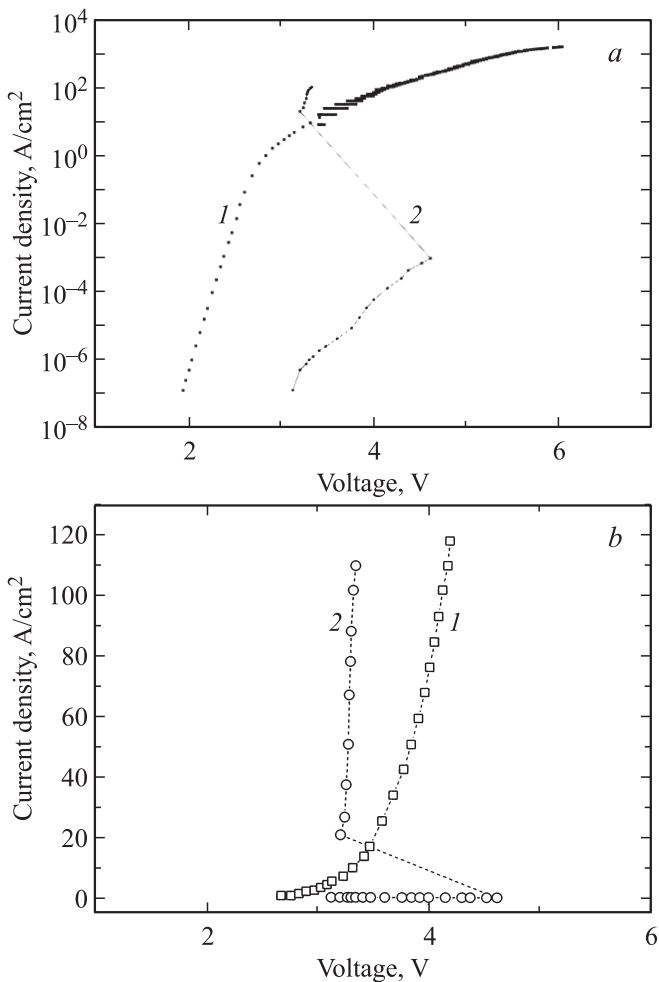


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диода: *a* — в полупрологарифмическом масштабе, *b* — в линейном. *T*, К: 1 — 300, 2 — 77.

p^+ - p -перехода уменьшается до величины, сравнимой с сопротивлением p -базы, так что все большая часть приложенного внешнего напряжения падает на p -области, и ВАХ становится все более линейной.

ВАХ той же структуры, измеренная при 77 К, кардинально отличается от ВАХ, измеренной при комнатной температуре (рис. 2):

- во-первых, начальный участок ВАХ сдвигается в сторону больших напряжений;

- во-вторых, из-за вымораживания носителей в p -базе ограничение экспоненциального участка ВАХ сопротивлением базы начинается при меньших токах;

- при напряжении 4.6 В происходит *переключение*, характеризующееся S -образной ВАХ (величина „сбрасываемого“ с диода напряжения составляет 1.4 В). После переключения сопротивления диода оказывается меньшим по величине по сравнению с сопротивлением при комнатной температуре (см. рис. 2, на котором ВАХ представлены в линейном масштабе). Напряженность поля в базе, при которой наступает переключение, составляет около $5.3 \cdot 10^3$ В/см.

Наблюдаемые особенности низкотемпературных ВАХ мы связываем с ударной ионизацией атомов алюминия в электронейтральной части p -базы.

1. Очевидно, что при интенсивной ударной ионизации концентрация возбужденных свободных дырок может сравниться с концентрацией акцепторов. Если подвижность дырок при азотной температуре выше, чем при комнатной (что обычно имеет место в полупроводниках), то сопротивление диода в открытом состоянии, определяемое сопротивлением базы, при азотной температуре будет меньше, чем при комнатной. Это и наблюдается экспериментально.

2. Наиболее вероятным механизмом, ответственным за наблюдаемую S -образность ВАХ, является связанный двухступенчатый процесс ударной ионизации. Если примесные акцепторные атомы имеют, помимо основного уровня (E_0), одно возбужденное состояние (E_1), то возможны следующие процессы. При приложении поля дырки возбуждаются за счет ударной ионизации в валентную зону (E_v) с основного (невозбужденного) состояния примеси (дырочные переходы $E_0 \rightarrow E_v$). В стационарном состоянии этот процесс сбалансирован обратным захватом дырок (дырочные переходы $E_v \rightarrow E_1 \rightarrow E_0$). Когда концентрация атомов, находящихся в возбужденном состоянии, становится достаточно большой, возможна ударная ионизация возбужденных атомов (дырочные переходы $E_1 \rightarrow E_v$). При этом за счет большей скорости ионизации возбужденных атомов генерационно-рекомбинационный баланс может поддерживаться при меньших полях по сравнению с ионизацией невозбужденных атомов. В этом случае возникает бистабильность, проявляющаяся как отрицательная дифференциальная проводимость. Отметим, что отрицательная дифференциальная проводимость S -типа, связанная с ударной ионизацией примесей, экспериментально наблюдалась ранее при низких (гелиевых) температурах в ряде других полупроводниковых материалов: Ge [6], GaAs [7], InSb [8], CdSe [9].

4. Заключение

В нашей работе [4], в которой были исследованы низкотемпературные ВАХ вертикальных n^+p-p^+ -диодов с p -базой, легированной до концентрации алюминия 10^{15} см $^{-3}$, участков ВАХ с отрицательной дифференциальной проводимостью обнаружено не было. Появление S -образности ВАХ при увеличении концентрации акцепторов в p -слое может быть объяснено нелинейным характером зависимости скорости ионизации возбужденных атомов от концентрации неравновесных дырок [10]. Так или иначе, проведенные исследования показали, что увеличение концентрации акцепторов в p -слое может способствовать тому, что режим примесного пробоя может происходить при меньших полях по сравнению со слабо легированным материалом.

Работа поддержана программой Фундаментальных исследований ОФН РАН „Проблемы радиофизики“, раздел „Освоение терагерцового диапазона“.

Список литературы

- [1] T.N. Adam, R.T. Troeger, S.K. Ray, P.-C. Lv, J. Kolodzey. Appl. Phys. Lett., **83** (9), 1713 (2003).
- [2] P.-C. Lv, R.T. Troeger, T.N. Adam, S. Kim, J. Kolodzey. Appl. Phys. Lett., **85** (1), 22 (2004).
- [3] Л.Е. Воробьев, Д.А. Фирсов, В.А. Шалыгин, В.Ю. Паневин, А.Н. Сафронов, Д.В. Цой, А.Ю. Егоров, А.Г. Гладышев, О.В. Бандаренко. Письма ЖТФ, **32** (9), 34 (2006).
- [4] И.В. Грехов, П.А. Иванов, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова. ФТП, **41**, 561 (2007).
- [5] A. Dargys, A. Cesna, J. Cundrotas. Semicond. Sci. Technol., **7**, 210 (1992).
- [6] S.H. Koenig, R.D. Brown, W. Schillinger. Phys. Rev., **128**, 1668 (1962).
- [7] R.A. Reynolds. Sol. St. Electron., **11**, 385 (1968).
- [8] E.H. Putley. Semicond. Semimet., **1**, 289 (1966).
- [9] R.P. Khosla, J.R. Fischer, B.C. Burkey. Phys. Rev. B, **7**, 2551 (1973).
- [10] E. Scholl. Z. Phys. B–Condensed Matter., **46**, 23 (1982).

Редактор Т.А. Полянская

Bistable low temperature (77 K) impurity breakdown in *p*-type 4H-SiC

P.A. Ivanov, A.S. Potapov, T.P. Samsonova

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

Abstract Forward current-voltage ($I-V$) characteristics of p^+-p-n^+-n structures based on 4H-SiC were measured at low temperature (77 K). The measured $I-V$ characteristics have S -shaped form that is attributed to bistable impurity breakdown of aluminum acceptor atoms.