

Низкотемпературные (77–300 К) вольт-амперные характеристики $p^+ - p - n^+$ -диодов на основе 4H-SiC: влияние примесного пробоя в p -базе

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

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

(Получена 13 октября 2011 г. Принята к печати 17 октября 2011 г.)

Исследовано влияние примесного пробоя на вольт-амперные характеристики 4H-SiC диодов с p -базой в диапазоне температур 77–300 К. Для изготовления экспериментальных образцов использовались коммерческие эпитаксиальные 4H-SiC $p^+ - p - n^+$ -структуры, выращенные CVD эпитаксией. Сильное электрическое поле в p -базе создавалось при смещении диодов в прямом направлении. Обнаружено, что при температурах 136, 89 и 81 К вслед за обычным „диодным“ участком на вольт-амперной характеристике проявляется участок, где ток растет быстрее за счет ударной ионизации вымороженных акцепторных атомов Al, находящихся в основном (невозбужденном) состоянии. При температурах 81 и 77 К вслед за этим участком наблюдается участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением — регенеративное переключение диода за счет ударной ионизации атомов алюминия, находящихся в возбужденном состоянии.

1. Введение

Одним из перспективных направлений поиска новых активных сред для генерации электромагнитных волн в терагерцовом диапазоне спектра является исследование стимулированного излучения, возникающего в легированных полупроводниках при создании неравновесной населенности возбужденных состояний примесных атомов (см., например, [1]). 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 — германием, кремнием и соединениями $A^{III}B^V$. Как следствие, вымораживание носителей в SiC при охлаждении происходит раньше. Поэтому можно ожидать, что SiC-излучатели смогут работать при более высоких температурах.

Ранее в работе [2] нами было обнаружено, что в прямосмещенных 4H-SiC $p^+ - p - n^+$ -диодах при полях в p -базе около $5.5 \cdot 10^3$ В/см (сильное электрическое поле в p -базе создавалось при смещении диодов в прямом направлении) происходит переключение, характеризующееся S-образной вольт-амперной характеристикой диодного типа. Было выдвинуто предположение о том, что наблюдаемый эффект вызван бистабильным примесным пробоем вымороженных акцепторных атомов алюминия. В настоящей работе проведены более детальные исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) 4H-SiC $p^+ - p - n^+$ -диодов в диапазоне температур 77–300 К. Получено экспериментальное подтверждение того, что бистабильный характер примесного пробоя связан с ударной ионизацией вымороженных акцепторных атомов алюминия, находящихся в возбужденном состоянии.

2. Образцы

Для изготовления экспериментальных образцов использовались эпитаксиальные 4H-SiC $p^+ - p - n^+$ -структуры (пластина с эпитаксиальной структурой была приобретена на коммерческой основе в компании Cree, Inc. (США)). Структуры представляют собой проводящую подложку n -типа с удельным сопротивлением 0.02 Ом·см, сильно легированный буферный n^+ -слой толщиной 1 мкм, активный p -слой толщиной 10 мкм, легированный алюминием (концентрация $2 \cdot 10^{17}$ см⁻³) и сильно легированный подконтактный p^+ -слой толщиной 0.5 мкм. На основе таких эпитаксиальных структур были изготовлены мезадиодные чипы, схематически показанные на рис. 1. Мезы формировались с помощью реактивного ионного травления в плазме SF₆. 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. Низкотемпературные измерения ВАХ проводились в

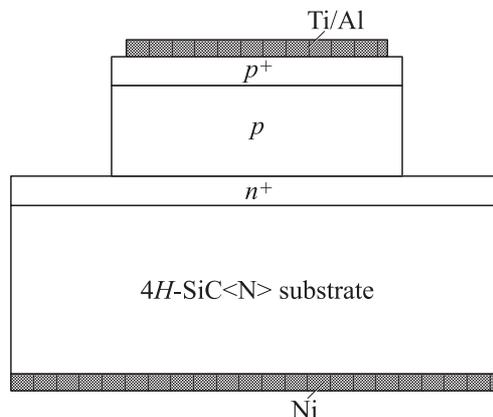


Рис. 1. Схематический разрез 4H-SiC мезадиодного чипа.

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

азотном криостате, в котором температура поддерживалась с точностью ± 2 К в диапазоне от 77 до 300 К. Диоды тестировались в бескорпусном варианте.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны типичные ВАХ, измеренные на постоянном токе при пониженных температурах в диапазоне 77–300 К. Можно видеть как количественные, так и качественные изменения ВАХ, возникающие при охлаждении:

— при понижении температуры от комнатной до 81 К прямое напряжение открывания (V_{on}) увеличивается: при комнатной температуре V_{on} составляет около 3 В, а при температурах 136, 89 и 81 К V_{on} увеличивается до 4, 7 и 10 В соответственно; при этом дифференциальное сопротивление в открытом состоянии также растет;

— при температурах 81 и 77 К диод спонтанно переключается, демонстрируя S-образную ВАХ диностороннего типа;

— напряжение, при котором происходит переключение (V_s), уменьшается при понижении температуры: при температурах 81 и 77 К V_s составляет 12 и 6 В соответственно;

— при понижении температуры ток „удержания“ в состоянии с высокой проводимостью (I_s) уменьшается: при температурах 81 и 77 К I_s составляет 30 и 20 мА;

— после переключения ($I > I_s$) ВАХ диода становится близкой к ВАХ, измеренной при комнатной температуре (дифференциальное сопротивление диода после переключения оказывается даже чуть меньше сопротивления при комнатной температуре).

На качественном уровне описанные выше особенности измеренных ВАХ объясняются, с одной стороны, вымораживанием примесных атомов алюминия, имеющих относительно большую энергию ионизации

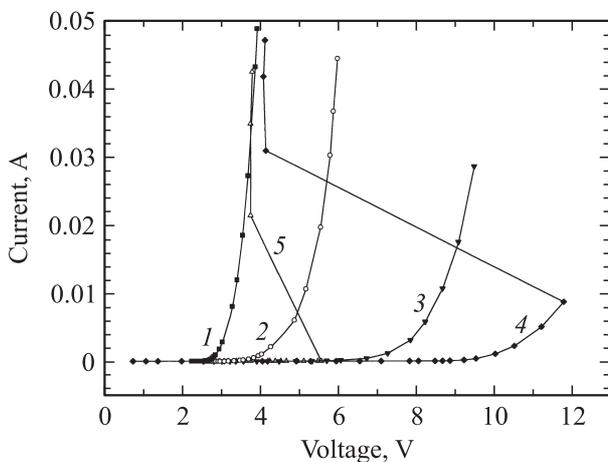


Рис. 2. Прямые вольт-амперные характеристики $4H$ -SiC диода с p -базой при пониженных температурах T , К: 1 — 293, 2 — 136, 3 — 89, 4 — 81, 5 — 77.

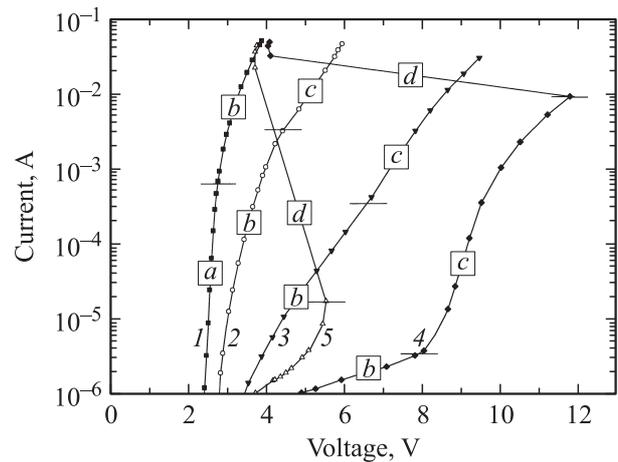


Рис. 3. Прямые вольт-амперные характеристики $4H$ -SiC диода с p -базой при пониженных температурах T , К (полулогарифмический масштаб): 1 — 293, 2 — 136, 3 — 89, 4 — 81, 5 — 77. Пояснение в тексте.

в $4H$ -SiC (0.19 эВ), а с другой — их ударной ионизацией в сильном электрическом поле. Очевидно, что вымораживание может быть в принципе полностью скомпенсировано ударной ионизацией. В этом случае концентрация неравновесных дырок будет равна полной концентрации акцепторных атомов алюминия, так что сопротивление диода будет близким к его сопротивлению при комнатной температуре (или даже меньше, если низкотемпературная подвижность дырок больше высокотемпературной). Можно отметить, что отрицательная дифференциальная проводимость S-типа, связанная с ударной ионизацией примесей, экспериментально наблюдалась ранее при низких (гелиевых) температурах в ряде других полупроводниковых материалов: Ge [3], GaAs [4], InSb [5], CdSe [6].

Более детальные представления о характере примесного пробоя дают ВАХ, построенные в полулогарифмическом масштабе (рис. 3):

— при комнатной температуре ВАХ представляет собой обычную диодную характеристику: в диапазоне токов от 10^{-6} до 10^{-3} А (участок *a*) протекание тока обусловлено инжекцией и рекомбинацией неосновных носителей в $n^+ - p$ -переходе, так что ток экспоненциально зависит от приложенного напряжения (все приложенное внешнее напряжение падает на $n^+ - p$ -переходе); при токах свыше 10^{-3} А (участок *b*) сопротивление $n^+ - p$ -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 полой;

— при понижении температуры ограничение экспоненциального участка ВАХ сопротивлением базы начинается при все меньших и меньших токах из-за вымораживания примесных атомов алюминия в p -базе; в результате участок *a* практически вырождается уже при температуре 136 К;

— при температурах 136, 89 и 81 К вслед за участком b наблюдается участок c , на котором ВАХ становится более крутой (наиболее отчетливо это видно на кривой, соответствующей температуре 81 К). Как мы полагаем, на участке c происходит ударная ионизация атомов Al, находящихся в основном состоянии;

— при температурах 81 и 77 К вслед за участком c наблюдается регенеративное переключение — участок d с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Как мы полагаем, здесь главную роль играет ударная ионизация атомов алюминия, находящихся в возбужденном состоянии (за счет большой скорости ионизации возбужденных атомов генерационно-рекомбинационный баланс поддерживается при меньших полях по сравнению с ионизацией невозбужденных атомов).

Описанные выше характерные особенности измеренных низкотемпературных ВАХ дают все основания полагать, что в исследованных $4H$ -SiC p^+-p-n^+ -диодах примесный пробой проявляет двухступенчатый характер с участием основного и возбужденного состояния вымороженных атомов алюминия. В связи с этим возникает интерес к генерированию электромагнитных волн в терагерцовом диапазоне за счет создания неравновесной населенности возбужденных состояний примесных атомов Al в $4H$ -SiC. Остается пока открытым важный вопрос о роли неосновных носителей (электронов), инжектируемых в p -базу n^+ -эмиттером, в механизме примесного пробоя. На основании проведенных исследований нельзя ответить на вопрос, какими носителями инициируется ударная ионизация акцепторов — дырками или инжектированными электронами. Для ответа на этот вопрос необходимо провести низкотемпературные измерения и анализ ВАХ резистивных $4H$ -SiC p^+-p-p^+ -элементов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФТИ им. А.Ф. Иоффе Н.Д. Ильинской и И.В. Ильичеву за помощь в изготовлении экспериментальных образцов.

Работа поддержана ОФН РАН (программа „Проблемы радиофизики“, раздел „Освоение терагерцового диапазона“).

Список литературы

- [1] С.Г. Павлов. Автореф. докт. дис. (Н. Новгород, Ин-т физики микроструктур РАН, 2010). http://ipmras.ru/UserFiles/Diss/Pavlov_SG.pdf
- [2] П.А. Иванов, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова. ФТП, **44** (7), 902 (2010).
- [3] S.H. Koenig, R.D. Brown, W. Schillinger. Phys. Rev., **128**, 1668 (1962).
- [4] R.A. Reynolds. Sol. St. Electron., **11**, 385 (1968).
- [5] E.H. Putley. Semicond. Semimet., **1**, 289 (1966).
- [6] R.P. Khosla, J.R. Fischer, B.C. Burkey. Phys. Rev. B, **7**, 2551 (1973).

Редактор Т.А. Полянская

Impact of impurity breakdown on low temperature current–voltage characteristics of $4H$ -SiC diodes with p -type base

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

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

Abstract An impact of impurity breakdown on low temperature (77–300 K) current–voltage (I – V) characteristics of $4H$ -SiC diodes with p -type base have been studied. Commercial p^+-p-n^+ -epiwafer grown by CVD were used for diode fabrication. In such diodes, strong electric field along the p -base was generated by applying a forward bias. At temperatures of 136, 89 and 81 K, the conventional „diode“ portion is seen on I – V characteristic followed by a portion with more rapid current growth due to impact ionization of frozen Al-acceptor impurities situated in nonexcited state. At temperatures of 81 and 77 K the above I – V portion is followed by regenerative dynistor-like switch due to impact ionization of Al-acceptors situated in excited state.