

06.2

Особенности деградации высоковольтных $4H$ -SiC $p-i-n$ -диодов под действием импульсов прямого тока

© М.Е. Левинштейн, П.А. Иванов, J.W. Palmour,
A.K. Agarwal, M.K. Das

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

Cree Inc., 4600 Silicon Dr., Durham NC 27703, USA

E-mail: melev@nimis.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 11 октября 2010 г.

Деградация карбидкремниевых диодов под действием прямого тока впервые исследована в импульсном режиме. Показано, что при длине токовых импульсов, меньшей нескольких миллисекунд, деградация оказывается существенно меньшей, чем в режиме постоянного тока при одинаковом заряде, протекшем через диодную структуру. Впервые наблюдалось также частичное самовосстановление (уменьшение деградации со временем) при комнатной температуре.

Выпрямительные $p-i-n$ -диоды на основе карбида кремния политипа $4H$ ($4H$ -SiC) характеризуются сочетанием очень высоких блокирующих напряжений (вплоть до 20 kV), малых времен переключения, высоких рабочих температур (до 800 K) и малых прямых падений напряжения при высоких и сверхвысоких плотностях прямого тока [1–3]. Однако широкому практическому использованию $4H$ -SiC $p-i-n$ -диодов препятствует так называемое явление деградации под действием прямого тока, выражающееся в увеличении прямого напряжения со временем при пропускании прямого тока. Явление деградации изучено к настоящему времени достаточно подробно. Оно объясняется формированием нарушений кристаллической структуры $4H$ -SiC (дефектов упаковки). Энергия, необходимая для этого процесса, выделяется при рекомбинации электронно-дырочных пар (см., например, [4]). Акт формирования одиночного дефекта упаковки не может произойти за счет поглощения только одного оптического фонона (энергия оптического фонона в $4H$ -SiC составляет ~ 0.1 eV), а многофононный процесс требует определенного времени, тем большего, чем большее число

фононов участвует в процессе. Однако вопрос о характерном времени формирования дефекта упаковки в $4H\text{-SiC}$ до сих пор даже не ставился. В данной работе в качестве первого шага проделан сравнительный анализ деградации в режиме постоянного тока и в импульсном режиме.

Исследованные $4H\text{-SiC}$ $p-i-n$ -диоды (класса 20 kV) были изготовлены Cree, Inc. (США). Толщина блокирующей n_0 -базы диодов составляла $200\ \mu\text{m}$; концентрация доноров в базе — $(1-2) \cdot 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$, рабочая площадь — $5 \cdot 10^{-3}\ \text{cm}^2$. Время жизни неосновных носителей τ_p , измеренное по спаду послеинжекционной ЭДС после обрыва прямого тока (метод Госсика) [5,6], лежало в диапазоне $1.2-1.6\ \mu\text{s}$. Для корректного сравнения результатов испытаний на постоянном токе и в импульсном режиме длительность импульсов выбиралась заведомо большей, чем τ_p (таким образом, распределение неосновных носителей в базе было стационарным при всех длительностях импульсов). Длительность импульсов прямого тока варьировалась в диапазоне от $20\ \mu\text{s}$ до $5\ \text{ms}$; частота повторения — от 200 до 1 Hz. Амплитуда постоянного тока составляла 50 mA (что соответствовало плотности тока $j = 10\ \text{A/cm}^2$) при длительности протекания 17 min (протекающий заряд равнялся $Q = 50\ \text{C}$).

До сих пор считалось, что степень деградации диода при пропускании прямого тока задается числом актов безызлучательной рекомбинации в базе (см., например, обзор [7]). Поэтому в наших экспериментах при всех длительностях импульса протекающий заряд также составлял $Q = 50\ \text{C}$.

Хорошо известно, что скорость деградации сильно зависит от исходной плотности базальных дислокаций в пленках $4H\text{-SiC}$, образующих базу диодной структуры. В наших экспериментах исследовались две группы диодов: I — с низкой и II — с умеренной скоростью деградации [8].

На рис. 1 показано, как величина дрейфа прямого напряжения ΔV_F при токе $I = 50\ \text{mA}$ (плотности тока $j = 10\ \text{A/cm}^2$) зависит от заряда, протекающего через диод типа I. До проведения испытаний прямое падение напряжения на диоде при токе 50 mA составляло 3.9 V.

Как видно из рис. 1, под действием импульсов длительностью $100\ \mu\text{s}$ величина ΔV_F , измеренная при токе 50 mA, составила 0.05 V (участок 1 на рис. 1). Последующее увеличение длины импульса до $500\ \mu\text{s}$ вызвало такое же увеличение падения напряжения, как и в предыдущем случае: $\Delta V_F = 0.05\ \text{V}$ (участок 2 на рис. 1). Сразу после двух импульсных

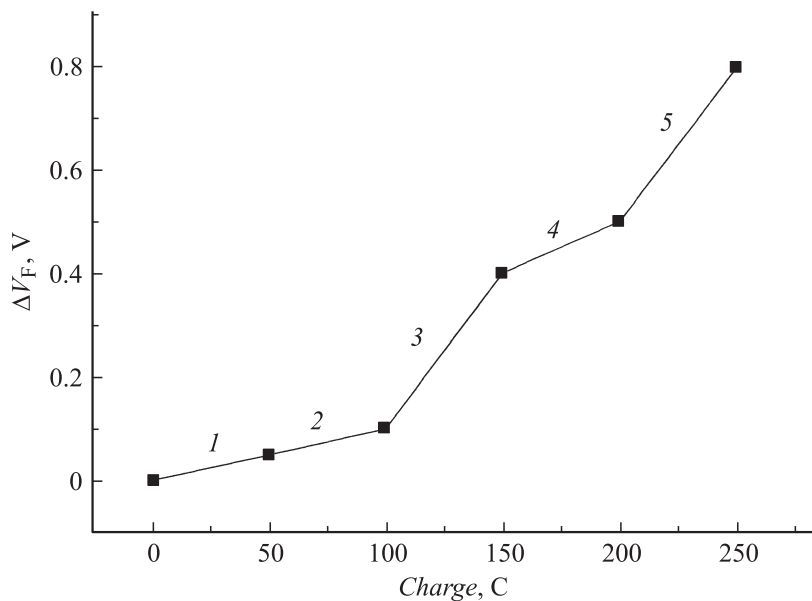


Рис. 1. Изменение прямого падения напряжения ΔV_F (при токе через диод 50 mA) как функция заряда, протекшего через диод (диод из группы I). Режимы протекания тока: 1 — импульсы длительностью $t_0 = 100 \mu s$, амплитудой $A = 0.92 A$, с частотой следования $f = 50 Hz$, продолжительность испытания $T = 181 min$; 2 — $t_0 = 500 \mu s$, $A = 0.92 A$, $f = 10 Hz$, $T = 181 min$; 3 — постоянный ток 50 mA в течение 17 min; 4 — $500 \mu s$, 50 mA, 100 Hz, 330 min; 5 — $5000 \mu s$, 0.9 A, 1 Hz, 65 min.

нагрузок через диод был пропущен постоянный ток 50 mA в течение 17 min. Величина дрейфа составила $\Delta V_F = 0.3 V$, т.е. в 6 раз больше, чем при импульсных нагрузках (участок 3 на рис. 1). Для того чтобы исключить возможное влияние на результат испытаний разницы амплитуд постоянного и импульсного токов, следующее испытание (участок 4 на рис. 1) осуществлялось импульсным током той же амплитуды (50 mA), что и значение постоянного тока. Как видно, значение ΔV_F и в этом случае оказалось значительно меньшим, чем при испытании на постоянном токе. Последнее испытание (участок 5 на рис. 1) осуществлялось импульсами длительностью 5 ms. В этом

случае величины дрейфа ΔV_F , соответствующие импульсной нагрузке и нагрузке постоянным током, практически совпали.

Таким образом, можно сделать вывод, что характерное время формирования дефектов упаковки составляет, по-видимому, несколько миллисекунд.

Этот вывод подтверждается и экспериментами, проделанными на диодах из группы II (рис. 2). Для диодов этого типа прямое падение напряжения составляло 4.0 V при $I = 50$ mA. Как видно из сравнения рис. 1 и 2, оба типа диодов демонстрируют качественно аналогичные зависимости ΔV_F от характера нагрузки, хотя скорость деградации в диодах второго типа заметно выше. После воздействия импульсов длительностью $20 \mu\text{s}$ величина ΔV_F составила (при токе 50 mA) около 0.2 V (участок 1 на рис. 2). После пропускания постоянного тока (участок 2 на рис. 2) величина дрейфа ΔV_F оказалась в 6.5 раз больше (1.3 V). Следующие два испытания (участки 3 и 4 рис. 2) в точности воспроизводили условия испытаний 1 и 2 соответственно и имели целью проверить воспроизводимость результатов.

Как видно из рис. 2, под действием четырех последовательных испытаний полный дрейф напряжения составил 3.15 V. Дальнейшие измерения были проделаны через 3 недели ($\sim 30\,000$ min). За это время при комнатной температуре произошел частичный возврат V_F к исходному значению (скачок A_1 на рис. 2).

Эффект такого рода самовосстановления наблюдался ранее в работах [8,9], однако только в результате отжига при повышенных температурах: 300 и 400°C в работе [8] и 505 и 700°C в работе [9]. Так, в работе [8] уменьшение ΔV_F составило ~ 2 V после отжига диодов в течение ~ 3000 min при 300°C. Однако насколько нам известно, обнаруженное нами частичное восстановление диодов при комнатной температуре ранее не наблюдалось.

Далее вновь проводилось испытание постоянным током (участок 5 на рис. 2). Величина ΔV_F составила 0.9 V (ср. с $\Delta V_F = 1.3$ и 1.2 V на участках 2 и 4 соответственно). Тенденция к постепенному „насыщению“ ΔV_F при неизменных условиях нагрузки постоянным током отмечалась также ранее в работе [10]). После последнего испытания (участок 6 на рис. 2) измерения были вновь продолжены через 3 недели ($\sim 30\,000$ min). Как видно из рисунка, гораздо меньший, но вполне заметный „отжиг“ деградации ($\Delta V_F = -0.2$ V) наблюдался и в этом случае.

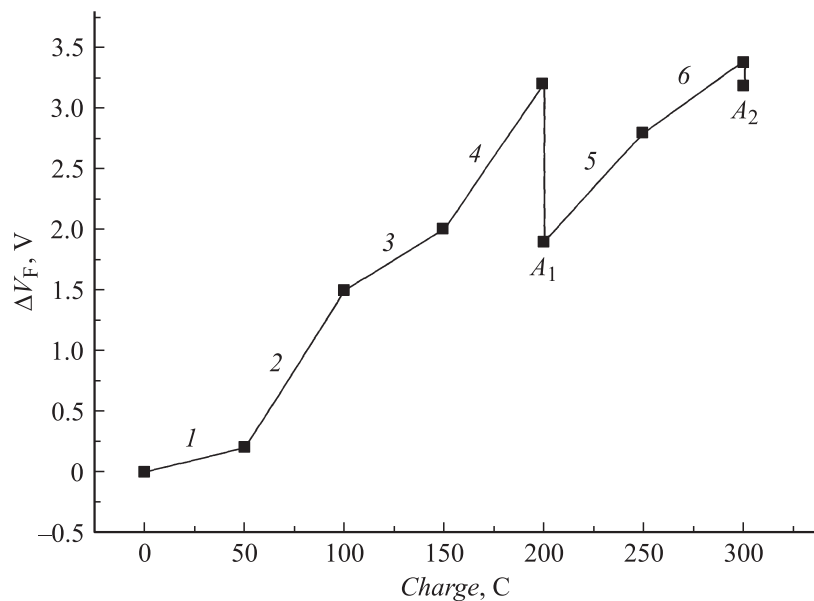


Рис. 2. Изменение прямого падения напряжения ΔV_F (при токе через диод 50 mA) как функция заряда, протекшего через диод (диод из группы II). Режимы протекания тока: 1 — длительность импульсов $t_0 = 20 \mu s$, амплитуда $A = 1 A$, частота следования $f = 200 Hz$, длительность испытания $T = 208 min$; 2 — постоянный ток 50 mA в течение 17 min; 3 — $t_0 = 20 \mu s$, $A = 1 A$, $f = 200 Hz$, $T = 208 min$; 4 — постоянный ток 50 mA в течение 17 min; A_1 — после трех недель „самовосстановления“ при комнатной температуре; 5 — постоянный ток 50 mA в течение 17 min; 6 — $t_0 = 50 \mu s$, $A = 0.7 A$, $f = 100 Hz$, $T = 238 min$; A_2 — после трех недель „самовосстановления“ при комнатной температуре.

Результаты проведенных испытаний позволяют уверенно утверждать, что на начальной стадии деградации импульсная нагрузка длительностью меньше нескольких миллисекунд ведет к значительно меньшему дрейфу прямого падения напряжения по сравнению с нагрузкой постоянным током (при одинаковом заряде, протекшем через диод, и одинаковом распределении носителей в базе диода). Полученные результаты наглядно демонстрируют высказанное предположение о том, что формирование дефектов упаковки в 4H-SiC представляет собой

многофононный процесс с характерным временем порядка нескольких миллисекунд. Из этого следует, в свою очередь, что величина протекшего через диод заряда является хотя и важным, но не единственным параметром, контролирующим процесс образования дефектов упаковки.

Работа в фирме Cree, Inc. поддержана AFRL Wright Labs DUS&T Technology Investment Agreement number F33615-01-2-2108, monitored by Clarence Severt.

Список литературы

- [1] *Sugawara Y., Takayama D., Asano K., Singh R., Palmour J., Hayashi T.* // Proc. of 13th Intern. Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. Osaka, Japan, 2001. P. 27–30.
- [2] *Levinstein M., Ivanov P., Boltovets M., Krivutsa V., Palmour J., Das M., Hull B.* // Materials Science Forum. 2006. V. 527–529. P. 1339–1343.
- [3] *Levinshstein M., Romyantsev S., Mnatsakanov T., Agarwal A., Palmour J.* // SiC thyristors (in SiC Materials and Devices). Singapore–New Jersey–London–Hong Kong, World Scientific Pub. Company, 2006.
- [4] *Galeckas A., Hallén A., Majdi S., Linnros J., Pirouz P.* // Phys. Rev. B. 2006. V. 74. P. 233 203.
- [5] *Gossik B.* // J. Appl. Phys. 1956. V. 27. P. 905–912.
- [6] *Schlangenotto H., Gerlach W.* // Solid-State Electron. 1972. V. 15. P. 393–399.
- [7] *Skowronski M., Hab S.* // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. P. 011 101.
- [8] *Caldwell J., Stahlbush R., Imhoff E., Hobart K., Tadjer M., Zhang Q., Agarwal A.* // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. P. 044 504.
- [9] *Caldwell J., Stahlbush R., Hobart K., Glembocki O., Liu K.* // J. Appl. Phys. 2007. V. 90. P. 143 519.
- [10] *Romyantsev S., Levinshstein M., Shur M., Palmour J., Agarwal A., Das M.* // J. Appl. Phys. 2010. V. 108. P. 024 508.