

06

Генерация донорного центра в высоковольтных $4H$ -SiC $p-i-n$ -диодах под действием прямого тока

© А.М. Иванов, М.Е. Левинштейн, J.W. Palmour, А.К. Agarwal,
М.К. 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 7 мая 2011 г.

Исследованы DLTS-спектры высоковольтных карбид-кремниевых диодов полупроводникового типа $4H$ -SiC. Обнаружено, что в результате протекания прямого тока в базе диодов активируется центр с глубиной залегания $E_c - 0.2$ eV и сечением захвата электронов $\sigma_n \sim 2.0 \cdot 10^{-15}$ cm². DLTS-измерения обнаруживают появление этого центра при очень малых значениях протекшего через диод заряда, в условиях, когда прямое падение напряжения на диодах практически не меняется. Обсуждается возможная природа обнаруженного явления.

Биполярные приборы на основе карбида кремния характеризуются сочетанием очень высоких блокирующих напряжений, малых времен переключения и высоких рабочих температур (см., например, обзор [1]). Широкому практическому использованию $4H$ -SiC биполярных приборов препятствует, однако, явление деградации, выражающееся в увеличении прямого напряжения со временем при пропускании прямого тока. Этот эффект изучен лучше всего на примере высоковольтных SiC-выпрямительных диодов, однако он проявляется также и в высоковольтных карбид-кремниевых биполярных транзисторах, тиристорах и MOSFETs [2,3]. Поэтому явлениям, сопутствующим протеканию прямого тока через карбид-кремниевые $p-n$ -переходы, уделяется большое внимание [4]. DLTS-исследования диодов после протекания прямого тока были проделаны в работе [5] на p^+-n -структурах с толщиной базы $40 \mu\text{m}$ и уровнем легирования $\sim 5 \cdot 10^{14}$ cm⁻³. В работе [5] подчеркнуто, что изменения в DLTS-спектрах удается обнаружить в таких диодах только после весьма сильной деградации. В таких структурах

в результате деградации обнаружено появление акцепторного центра с энергией активации $E_t = E_v + 0.38 \pm 0.2$ eV.

Хорошо известно, что скорость деградации SiC-диодов сильно зависит от толщины базы. Например, при одном и том же заряде, протекшем через структуры, уровень деградации в диодах с базой толщиной ~ 150 μm оказывается во много раз больше, чем в диодах с толщиной базы ~ 40 μm [6]. В данной работе сообщается о DLTS-измерениях в наиболее высоковольтных к настоящему времени 4H-SiC $p-i-n$ -диодах (класса 20 kV) с толщиной базы 200 μm . Обнаружено новое явление: активация донорного уровня с энергией активации $E_t = E_c - 0.2$ eV, проявляющаяся при очень малых значениях протекшего через диод заряда, в условиях, когда прямое падение напряжения на диодах практически не меняется. Таким образом, наблюдающийся эффект не связан с деградацией параметров базы диодов.

Исследованные 4H-SiC $p-i-n$ -диоды (класса 20 kV) были изготовлены Cree, Inc. (США). Толщина блокирующей n_0 -базы диодов составляла 200 μm ; концентрация доноров в базе — $(1-2) \cdot 10^{14}$ cm^{-3} , рабочая площадь — 0.09 cm^2 . Время жизни неосновных носителей τ_p , измеренное по спаду послелинжекционной эдс после обрыва прямого тока (метод Госсика) [7,8] лежало в диапазоне 1.2–1.6 μs .

На рис. 1 показан DLTS-спектр одного из исследованных диодов, снятый с инжекцией дырок через $p-n$ -переход. Спектры сняты до пропускания через диод какого-либо прямого тока (исходная структура, сплошная кривая) и после пропускания прямого тока плотностью $j_F = 2.5$ A/cm² в течение 2 h (протекший заряд $Q = 1.8 \cdot 10^4$ C/cm²). До пропускания тока прямое падение напряжения на структуре U_F при плотности прямого тока $j_F = 0.55$ A/cm² составляло 3.5 V, после пропускания прямого тока $U_F = 5.0$ V. При DLTS-измерениях после деградации амплитуда прямого напряжения „накачки“ была увеличена с 3 до 5.5 V, с тем чтобы поддержать неизменным ток накачки в условиях возросшего прямого падения U_F .

Из рис. 1 видно, что до пропускания прямого тока DLTS-измерения регистрируют пик, соответствующий положению уровня в нижней половине запрещенной зоны (кривая 1). Этот пик наблюдался во всех исследованных структурах как до, так и после деградации. При этом положение пика и его амплитуда не менялись ни при каких уровнях деградации. Энергия активации центра, отвечающего за появление этого пика, составляет $E_v + 0.25$ eV. Сечение захвата σ_p равняется

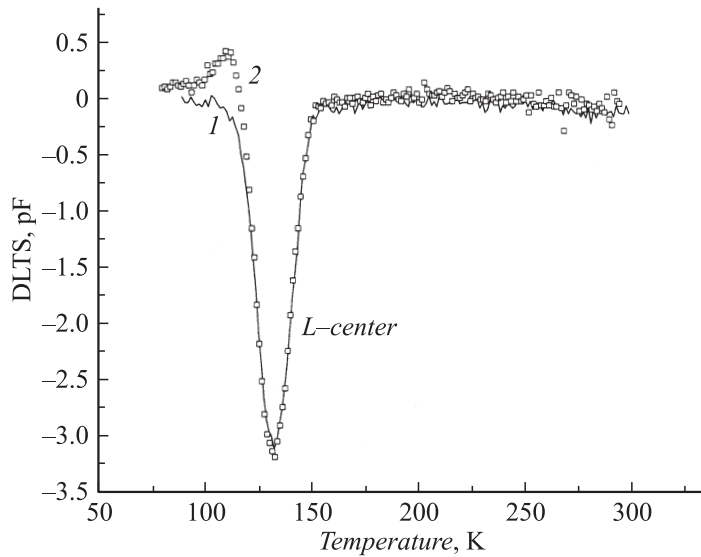


Рис. 1. DLTS-спектр одного из исследованных диодов до пропускания через него какого-либо прямого тока (исходная структура, сплошная кривая 1) и после деградации под действием прямого тока плотностью $j_F = 2.5 \text{ A/cm}^2$, пропускавшегося через диод в течение 2 h (протекший заряд $Q = 1.8 \cdot 10^4 \text{ C/cm}^2$, кривая 2). Спектры сняты с предварительной инжекцией дырок. Окно скоростей 38.8 ms. Для кривой 1 амплитуда прямого напряжения $U_1 = +3.0 \text{ V}$; амплитуда обратного напряжения $U_2 = -5 \text{ V}$. Для кривой 2 $U_1 = +5.5 \text{ V}$; $U_2 = -5.0 \text{ V}$.

$2 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$. Концентрация центра составляет $\sim N_t = 2.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Параметры этого центра близки к параметрам так называемого *L*-центра [9,10], неоднократно наблюдавшегося как в *6H*-, так и в *4H-p-n*-структурах.

На кривой 2, снятой после деградации под действием прямого тока, помимо отмеченного пика, наблюдается пик с противоположной полярностью, соответствующий положению уровня в верхней половине запрещенной зоны. Амплитуда этого пика на порядок меньше.

Более детально параметры уровня, отвечающего за появление этого пика, могут быть установлены при DLTS-измерениях без инжекции дырок.

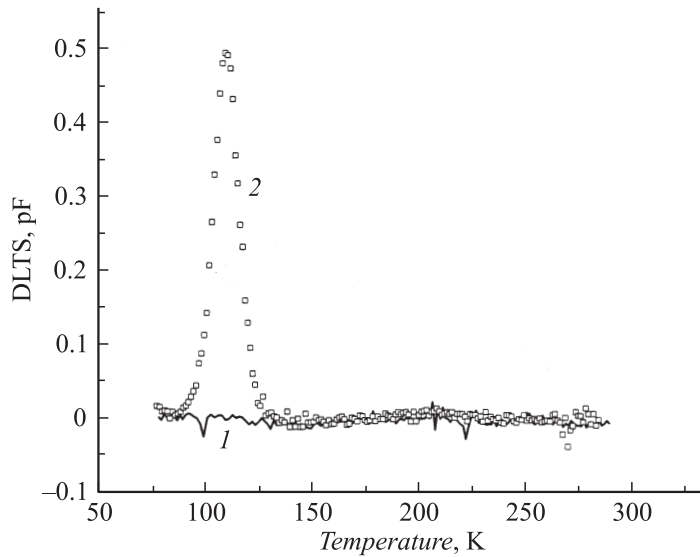


Рис. 2. DLTS-спектр одного из исследованных диодов до пропускания через него какого-либо прямого тока (исходная структура, сплошная кривая 1) и после пропускания прямого тока плотностью $j_F = 0.55 \text{ A/cm}^2$ в течение 1 h (кривая 2). Протекший заряд $Q \approx 2 \cdot 10^3 \text{ C/cm}^2$. Для обеих кривых $U_1 = -0.2 \text{ V}$; $U_2 = -5.0 \text{ V}$.

На рис. 2 показан DLTS-спектр другого диода со сходными параметрами, снятый без какой-либо инжекции дырок через $p-n$ -переход. При снятии обеих кривых 1 и 2 к диоду прикладывалось обратное напряжение $U_2 = -5.0 \text{ V}$, затем „скачком“ уменьшавшееся до значения $U_1 = -0.2 \text{ V}$. Как до, так и после пропускания прямого тока, приведшего к появлению показанного на рис. 2 пика, прямое падение напряжения на структуре U_F при плотности прямого тока $j_F = 0.55 \text{ A/cm}^2$ составляло 2.85 V .

Энергия активации центра, отвечающего за появление этого пика, составляет $E_c - 0.208 \text{ eV}$. Сечение захвата σ_n равняется $2 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$. Концентрация центра составляет $\sim N_t = 4.6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Параметры этого центра близки к параметрам уровня, отождествляемого со структурным дефектом в $4H\text{-SiC}$ [10,11].

Следует заметить, что хотя никакого официального стандарта для деградационных тестов $4H$ -SiC диодов не существует, в подавляющем большинстве случаев в качестве такого теста используется пропускание тока плотностью $j_F = 100 \text{ A/cm}^2$ в течение 1 h. При этом протекший через диод заряд составляет $3.6 \cdot 10^5 \text{ C/cm}^2$. Приведенные на рис. 2 спектры сняты после пропускания через испытуемый диод в 200 раз меньшего заряда $Q = 1980 \text{ C/cm}^2$. Поэтому отсутствие дрейфа прямого напряжения после такой нагрузки не вызывает удивления. Концентрация центра $N_t = 4.6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, возникшего после проделанного деградационного теста, невелика.

Однако наиболее удивительным результатом, неоднократно проверенным нами на нескольких однотипных диодах, является отсутствие зависимости N_t от протекшего через диод заряда. В ряде последовательных тестов, проделанных с одним из диодов, прямое напряжение на диодной структуре при плотности прямого тока $j_F = 0.55 \text{ A/cm}^2$ возрастало от исходного значения $U_F = 3.5 \text{ V}$ до 5 V и затем до 10.1 V после пропускания через диод заряда $Q = 9000$ и $20\,000 \text{ C/cm}^2$ соответственно. Между тем измеренное DLTS-значение N_t в пределах точности не изменилось и составило $N_t \approx 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. После этого образец был отожжен при температуре 200°C в течение 3 h. При этом прямое напряжение U_F уменьшилось до 4.6 V . Концентрация N_t при этом осталась неизменной.

Полученные результаты позволяют предположить, что в базе диода, по крайней мере в области, прилегающей к p - n -переходу, имеется электрически неактивный дефект с концентрацией порядка $4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Дефект активируется при захвате дырки [12,13], образуя уровень в верхней половине запрещенной зоны с энергией активации $E_c - 0.208 \text{ eV}$.

Работа в фирме Cree, Inc. поддержана AFRL Wright Labs DUS&T Technology Investment Agreement number F33615-01-2-2108, monitored by Clarence Servert. Авторы признательны А.А. Лебедеву за многочисленные полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Иванов П., Левинштейн М., Мнацаканов Т., Palmour J., Agarwal A. // ФТП. 2005. Т. 39. С. 897.
- [2] Agarwal A., Fatima H., Haney S., Ryu S.-H. // IEEE Electron Dev. Lett. 2007. Т. 28. С. 587.

- [3] *Farese L., Malm G., Domeij M., Ostling M.* // Material Science Forum. 2010. T. 645–648. C. 1037–1040.
- [4] *Skowronski M., Hab S.* // J. Appl. Phys. 2006. T. 99. C. 011101.
- [5] *Galeckas A., Hallén A., Majdi S., Linnros J., Pirouz P.* // Phys. Rev. B. 2006. T. 74. C. 233203.
- [6] *Nakayama K., Sugawara Y., Tsuchida H., Miyanagi T., Kamata I., Nakamura T., Asano K., Ishii R.* // Material Science Forum. 2005. T. 483–485. C. 969–972.
- [7] *Gossik B.* // J. Appl. Phys. 1956. T. 27. C. 905–912.
- [8] *Schlengenotto H., Gerlach W.* // Solid-State Electron. 1972. T. 15. C. 393–399.
- [9] *Anikin M., Lebedev A., Syrkin A., Suvorov A.* // Sov. Phys. Semiconductors. 1985. T. 15. C. 69–71.
- [10] *Lebedev A.* // SiC Materials and Devices. V. 2. World Scientific Pub. Company, Singapore–New Jersey–London–Hong Kong, 2007.
- [11] *Lebedev A.A., Veinger A.I., Davydov D.V., Strel'chuk A.M., Kozlovskii V.V., Savkina N.S.* // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. P. 6265–6271.
- [12] *Hemmingsson C.G., Son N.T., Janzen E.* // Appl. Phys. Lett. 1999. T. 24. C. 839–841.
- [13] *Watkins G.D., Troxell J.R.* // Phys. Rev. Lett. 1980. T. 24. C. 593–595.