

Глубокий уровень, образующийся в слоях GaN при облучении протонами

© М.М. Соболев, Н.А. Соболев[¶], А.С. Усиков, Н.М. Шмидт, А.Н. Якименко*, Г.М. Гусинский, В.О. Найденов

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

* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 16 апреля 2002 г. Принята к печати 15 мая 2002 г.)

Методом емкостной спектроскопии исследованы параметры глубоких уровней в эпитаксиальных слоях *n*-GaN после облучения барьеров Шоттки протонами с энергией 1 МэВ и дозой 10^{12} см⁻². Наблюдалось введение глубокого уровня *EP1* в верхней половине запрещенной зоны с энергией активации 0.085 эВ. Образование этого дефекта зависит от напряжения смещения, приложенного к барьеру Шоттки во время облучения.

1. Введение

Стремительный прогресс в разработке голубых, зеленых и ультрафиолетовых (УФ) светодиодов, голубых лазеров, УФ детекторов и приборов высокотемпературной силовой электроники на основе GaN и его твердых растворов привлекает огромный интерес к исследованию процессов дефектообразования в III-нитридных системах [1,2]. Изучение радиационного воздействия на GaN является одним из методов развития инженерии дефектов и в то же время уже позволило улучшить параметры быстрых переключателей и детекторов [3,4]. Исследование радиационных дефектов методами емкостной спектроскопии пока находится в начальной стадии. Опубликовано несколько работ по изучению влияния протонов, быстрых электронов, γ -квантов и ионов гелия на спектр образующихся глубоких уровней [5–8]. Известно несколько способов дополнительного воздействия в процессе облучения на спектр вводимых радиационных дефектов, например, изменение температуры облучения, освещение образца или пропускание через него электрического тока. Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния напряжения смещения на барьере Шоттки на спектр глубоких уровней, образующихся при протонном облучении.

2. Экспериментальные условия

Пленки слабо легированного кремнием GaN *n*-типа проводимости выращивались на сапфировых подложках (0001) методом газофазного осаждения из металл-органических соединений (MOCVD). После осаждения буферного слоя GaN толщиной ~ 20 нм при 500°C осуществлялся рост эпитаксиального слоя GaN при 1040°C толщиной 3–4 мкм. Концентрация электронов в слоях составляла $6 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Барьеры Шоттки и омические контакты создавались напылением Ni/Au и Ti/Al/Ni/Au соответственно. Площадь барьера Шоттки составляла 0.18 мм². Высота барьера Шоттки —

0.8 В. При обратном смещении барьера до 20 В токи утечки были меньше 10 мкА. Образцы облучались на циклотроне Физико-технического института протонами с энергией 1 МэВ и дозой $1 \cdot 10^{12}$ см⁻². Одновременно на одной подложке облучались два барьера Шоттки: один без приложенного напряжения, а второй — при прямом или обратном смещении ± 13 В. В процессе облучения протонами увеличения прямого тока не наблюдалось, тогда как обратный ток возрастал почти на 3 порядка.

Образующиеся дефекты исследовались методом емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) на спектрометре Polaron Bio-Red (модель DL 4600) на частоте 1 МГц при окнах скоростей эмиссии 80, 200, 400 и 1000 с⁻¹. Предварительно образцы нагревались до 450 К и охлаждались до 80 К при обратном смещении, после чего в процессе нагрева записывались DLTS-спектры. Длительность импульсов заполнения уровней электронами при измерениях составляла 4 мкс. Параметры уровней (энергия активации *E* и сечение захвата электронов на уровень σ) определялись из зависимости Аррениуса в предположении, что σ не зависит от температуры:

$$e/T^2 = b\sigma \exp(-E/kT), \quad (1)$$

где *e* — скорость термической эмиссии электронов с уровня в зону проводимости, *T* — температура, $b = 3.3 \cdot 10^{20}$ см⁻² с⁻¹ К⁻² — константа [6], *k* — постоянная Больцмана.

3. Результаты и обсуждение

Типичные DLTS-спектры образцов после облучения протонами при разных напряжениях смещения на барьерах Шоттки представлены на рис. 1. Спектры измерялись при обратном смещении на барьере Шоттки –8 В. Заполнение уровней электронами осуществлялось при сбросе обратного напряжения до –0.5 В. Наблюдается пять глубоких уровней *EP1–EP5*, причем наиболее мелкий уровень *EP1* образуется только в барьерах Шоттки, к которым в процессе облучения протонами не было приложено напряжение смещения (рис. 1, кривая *c*).

[¶] E-mail: nick@sobolev.ioffe.rssi.ru

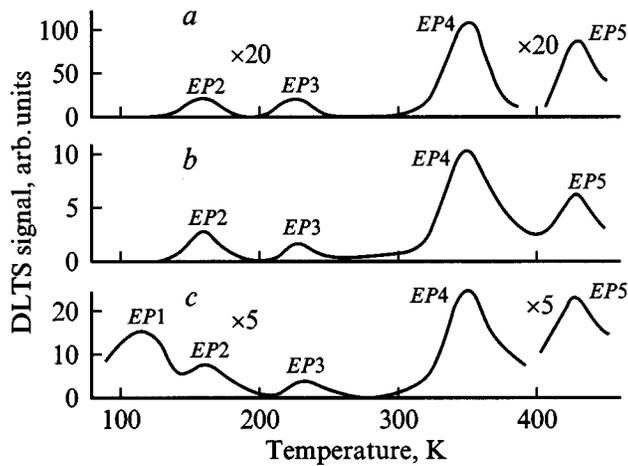


Рис. 1. DLTS-спектры в барьерах Шоттки, облученных при напряжениях смещения U , В: a — +13, b — -13, c — 0.

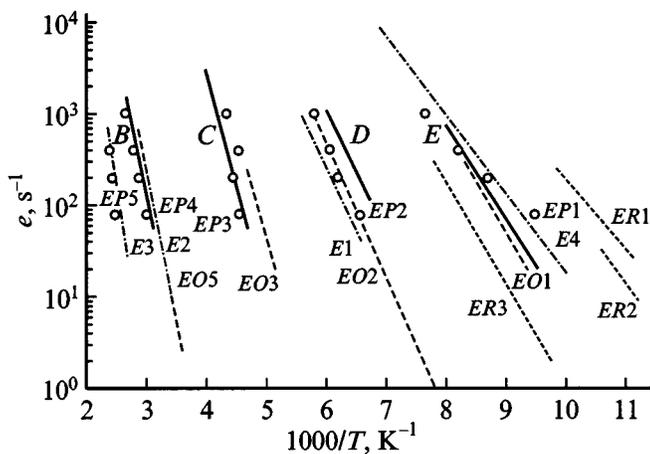


Рис. 2. Температурные зависимости скоростей эмиссии электронов с глубоких уровней, обнаруженных в данной работе (точки), в работах [5,8] (пунктирные и штриховые линии), в работе [6] (сплошные линии) и в работе [7] (штрихпунктирные линии).

Зависимости скоростей термической эмиссии электронов с глубоких уровней в зону проводимости от обратной температуры приведены на рис. 2 (точки). Энергии активации и сечения захвата электронов на уровни, вычисленные из зависимостей Аррениуса (1), составили $E_1 = 0.085$ эВ, $E_2 = 0.16$ эВ, $E_3 = 0.48$ эВ, $E_4 = 0.56$ эВ, $E_5 = 0.60$ эВ и $\sigma_1 = 3.5 \cdot 10^{-19}$ см², $\sigma_2 = 3.8 \cdot 10^{-18}$ см², $\sigma_3 = 3.5 \cdot 10^{-16}$ см², $\sigma_4 = 5.3 \cdot 10^{-16}$ см², $\sigma_5 = 4.3 \cdot 10^{-17}$ см².

Для идентификации природы уровней производилось сравнение температурных зависимостей скоростей термической эмиссии электронов с этих уровней с аналогичными зависимостями для уровней в n -GaN, подвергнутых облучению протонами с энергией 2 МэВ и дозой $3 \cdot 10^{11}$ см⁻² [5], ионами гелия с энергией 5.4 МэВ и дозами $(0.4-2.5) \cdot 10^{11}$ см⁻² [8], электронами с энергией 1 МэВ и дозами $5 \cdot 10^{14}$ и $1 \cdot 10^{15}$ см⁻² [6] и

γ -квантами излучения ⁶⁰Co с дозой $1.2 \cdot 10^{19}$ см⁻² [7]. Экспериментальные зависимости скоростей эмиссии от обратной температуры из этих работ представлены на рис. 2. Глубокие уровни в этих работах обозначались как $EO1 \dots EO5$ и $ER1 \dots ER4$ в [5,8], $E1 \dots E4$ в [6] и B, C, D, E в [7]. Скорости эмиссии для наблюдаемых в наших образцах уровней $EP2, EP3, EP4$ и $EP5$ близки к аналогичным зависимостям для четырех групп уровней ($EO2, D, E1$), ($EO3, C$), ($EO5, B, E2$) и $E3$, которые наблюдались соответственно в [5–8] после изготовления барьеров Шоттки перед радиационным воздействием.

Образование уровня $EP1$ в наших образцах наблюдалось только после облучения протонами, когда к барьеру Шоттки не прикладывалось внешнее смещение. Обычно формирование центров с глубокими уровнями в полупроводниках III–V при протонном облучении с энергиями, меньшими нескольких МэВ, определяется квазихимическими реакциями между точечными собственными дефектами кристаллической решетки и примесными атомами [9]. При этом взаимодействие происходит между как нейтральными, так и заряженными точечными дефектами. Приложение внешнего электрического поля оказывает влияние на квазихимические реакции, протекающие с участием заряженных точечных дефектов. Поэтому отсутствие уровня $EP1$ в наших образцах, когда в процессе облучения протонами к барьеру Шоттки было приложено внешнее смещение, указывает на то, что существенную роль в образовании этого центра играют заряженные точечные дефекты. Иными словами, процесс образования центра $EP1$ контролируется зарядово-чувствительной квазихимической реакцией. Весьма вероятно, что различные физические механизмы ответственны за предотвращение образования центра $EP1$ при приложении прямого и обратного смещений [9].

В отличие от наших образцов в работе [5] после облучения протонами наблюдалось образование трех глубоких уровней, $ER1, ER2$ и $ER3$, для которых скорости эмиссии электронов в том же исследуемом температурном диапазоне отличаются от детектируемого нами центра $EP1$ в 2–10 раз. В то же время в облученных электронами [6] и γ -квантами [7] образцах наблюдалось образование одного уровня, обозначенного соответственно E и $E4$, с близкими к уровню $EP1$ скоростями эмиссии электронов. Эти результаты, по видимому, обусловлены влиянием протяженных ростовых дефектов и внутренних напряжений в исследованных образцах на процессы радиационного дефектообразования. Хорошо известно, что эпитаксиальные слои GaN характеризуются высоким уровнем дефектности, включая дислокации с плотностью 10^7-10^{10} см⁻², развитую мозаичную структуру и высокую концентрацию примесных атомов (водорода, углерода, кислорода и др.). В наших образцах плотность дислокаций — 10^8-10^9 см⁻². Часто решающее влияние на спектр дефектов оказывает используемый метод выращивания слоев. Авторы работы [5] проводили исследование на образцах, выращенных методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений

(OMVPE), тогда как в нашей работе и [6,7] использовались слои, полученные методом MOCVD. Различия в вычисленных из кривых Аррениуса значениях энергии активации и сечений захвата электронов для уровней $EP1$, E ($E_E = 0.18$ эВ и $P\sigma_E = 2.5 \cdot 10^{-15}$ см²) и $E4$ ($E_{E4} = 0.15$ эВ и $\sigma_{E4} = 2 \cdot 10^{-16}$ см²), по-видимому, обусловлены влиянием на дефектную структуру и внутренние локальные напряжения MOCVD-слоев целого ряда технологических факторов (качества подложек, режимов роста, чистоты используемых материалов и т.д.). Скорость введения детектируемого после облучения протонами с энергией 1 МэВ дефекта $EP1$ составляет ~ 50 см⁻¹. Для сравнения: скорости введения дефектов после облучения протонами с энергией 2 МэВ равнялись 30 см⁻¹ ($ER1$), 400 см⁻¹ ($ER2$) и 600 см⁻¹ ($ER3$), тогда как при облучении 1 МэВ электронами скорость введения дефекта E достигала значения только 0.2 см⁻¹. Необходимо отметить, что DLTS-линии для дефектов $EP1$, E и $E4$ несколько уширены и, возможно, принадлежат нескольким уровням. Эта возможность должна быть исследована в дальнейшем.

4. Заключение

После облучения протонами эпитаксиальных пленок n -GaN с барьерами Шоттки наблюдались пять глубоких уровней. Образование уровня, характеризующегося температурной зависимостью скорости термической эмиссии электронов $e = 3.5 \cdot 10^{-19} bT^2 \exp(-0.085/kT)$, обусловлено радиационным воздействием и зависит от напряжения смещения на барьере Шоттки во время облучения протонами. Скорость введения уровня в отсутствие напряжения смещения составляет 50 см⁻¹.

Работа выполнена при частичной поддержке CRDF (грант № RP1-2258).

Список литературы

- [1] S. Nakamura, S. Pearton, G. Fasol. *The Blue Laser Diode* (Springer, Berlin, 2000).
- [2] H. Markoc. Springer. Ser. Mater. Sci., **32** (1999).
- [3] M. Lambsdorff, J. Kohl, J. Rosenzweig, A.A. Armann, J. Schneider. *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 1881 (1991).
- [4] V.M. Rao, W.-P. Hong, C. Caneau, G.-K. Chang, N. Papanicolaou, H.B. Dietrich. *J. Appl. Phys.*, **70**, 3943 (1991).
- [5] F.D. Auret, S.A. Goodman, F.K. Koschnick, J.-M. Spaeth, B. Beaumont, P. Gibart. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 407 (1999).
- [6] Z.-Q. Fang, J.W. Hemsky, D.C. Look, M.P. Mack. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 448 (1998).
- [7] D.V. Davydov, V.V. Emtsev, A.A. Lebedev, W.V. Lundin, D.S. Poloskin, N.M. Schmidt, A.S. Usikov, E.E. Zavarin. *Mater. Sci. Forum*, **353–356**, 799 (2001).
- [8] F.D. Auret, S.A. Goodman, F.K. Koschnick, J.-M. Spaeth, B. Beaumont, P. Gibart. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 3745 (1998).
- [9] D. Ponce, G.C. Bourgoin. *J. Phys. C: Sol. St. Phys.*, **18**, 3839 (1985).

Редактор Л.В. Беляков

Deep level induced in GaN layers irradiated with protons

M.M. Sobolev, N.A. Sobolev, A.S. Usikov, N.M. Shmidt, A.N. Yakimenko*, G.M. Gusinskii, V.O. Naidenov

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

* St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

Abstract The parameters of deep levels in n -GaN epitaxial layers have been studied by the capacitance spectroscopy technique after the irradiation of Schottky barrier diodes with 1 MeV energy protons at 10^{12} cm⁻² dose. The formation of deep level $EP1$ with the activation energy of 0.085 eV is observed in the upper half of the band gap. The formation of the defect depends on the bias voltage applied to the Schottky barrier diodes during the irradiation.