Влияние температуры облучения на скорость удаления носителей в GaN

© А.А. Лебедев [1], В.В. Козловский [1,2], Д.А. Малевский [1], А.В. Сахаров [1], К.С. Давыдовская [1], М.Е. Левинштейн [1], А.Е. Николаев [1]

[1] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский политехнических университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: shura.lebe@mail.ioffe.ru; VKozlovski@spbstu.ru

Поступила в Редакцию 4 мая 2025 г.
В окончательной редакции 2 июля 2025 г.
Принята к публикации 2 июля 2025 г.

Создание приборов на основе широкозонных полупроводников является одним из наиболее быстроразвивающихся направлений современной электроники. В статье проведено сравнение влияния температуры облучения на радиационную стойкость GaN при облучении протонами и электронами. Определена скорость удаления носителей в GaN в случае облучения протонами и электронами при повышенных температурах. Показано, что, как и в случае SiC, происходит значительное уменьшение скорости удаления носителей при температуре облучения 200 °C по сравнению с облучением при комнатной температуре.

Ключевые слова: GaN, SiC, радиационная стойкость, температура облучения, протоны, электроны.

DOI: 10.61011/FTP.2025.04.61255.8005

1. Введение

Полупроводники с большой величиной запрещенной зоны часто рассматриваются как материалы для создания приборов высокотемпературной электроники [1–3]. Поэтому становится важным исследовать влияние температуры на различные характеристики данных приборов, например радиационную стойкость.

Ранее нами было показано, что увеличение температуры облучения до $\sim$ 500 °C в случае карбида кремния приводит к снижению скорости удаления носителей почти на порядок [4]. Обнаруженный эффект связывался с увеличением подвижности вакансий с увеличением температуры, что приводило к значительному увеличению вероятности рекомбинации образующихся первичных радиационных дефектов. В результате концентрация образующихся компенсирующих радиационных дефектов значительно снижалась. Для GaN зависимость скорости удаления носителей от температуры ранее не изучалась.

2. Образцы и методы исследования

Для исследований использовались слои нитрида галлия толщиной $d = 2$ мкм, выращенные на сапфировых подложках методом MOVPE. Исходная концентрация $(N_d{-}N_a)_0$ при комнатной температуре, равнялась $1.8 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$. Для проведения вольт-фарадных измерений на поверхности эпитаксиальных слоев были сформированы высокотемпературные диоды Шоттки диаметром $\sim$ 600 мкм методом электронно-лучевого напыления Pt(50 нм)/Au(150 нм). Омические контакты формировались напылением металлов Ti/Al/Ti/Au (30/150/60/150 нм) после обработки поверхности в плазме аргона.

Облучение проводилось электронами с энергией 0.9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ. Температура облучения — 200 °C. Максимальная доза составила $1 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$ (протоны) и $4 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$ (электроны). После каждой дозы облучения проводилось измерение вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик.

3. Результаты и обсуждение

Для оценки радиационной стойкости часто используют такой параметр, как скорость удаления носителей (η_e):

$$\eta_e = [(N_d{-}N_a)_0 - (N_d{-}N_a)]\,/\Delta D, \qquad (1)$$

где $(N_d{-}N_a)_0$ — исходная концентрация нескомпенсированных доноров в полупроводнике до облучения, $(N_d{-}N_a)$ — концентрация нескомпенсированных доноров после облучения; ΔD — доза облучения.

Отметим, что ранее наблюдался значительный разброс в определенных значениях величины η_e даже в случае облучения при комнатной температуре [5,6]. Возможно, это было связано с различным примесным составом использованных для экспериментов образцов [7,8]. Поэтому в наших экспериментах использовались эпитаксиальные слои, полученные в одном технологическом эксперименте и на одной подложке. На основе измерений вольт-фарадных характеритик (ВФХ) по формуле (1) были рассчитаны значения (η_e) для облучения электронами и протонами в указанных условиях эксперимента. Эти величины составили: для облучения

протонами $\eta_e = 50.3\,\text{см}^{-1}$; для облучения электронами $\eta_e = 0.2\,\text{см}^{-1}$ (рис. 1 и 2). В случае облучения протонами величина η_e также оценивалась из измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) диодов Шоттки. Из наклона ВАХ на омическом участке (рис. 3 и 4) определялась величина сопротивления базы R. Далее η_e рассчитывалась по формуле

$$\eta_e = n_0(1 - R_0/R)/\Delta D, \qquad (2)$$

где n_0 — исходная концентрация носителей в слое; R_0 — исходное сопротивление диода в прямом направлении; R — сопротивление диода после облучения дозой ΔD [9,10].

Все полученные экспериментальные данные, а также литературные данные для облучения при комнатной температуре и для SiC представлены в таблице.

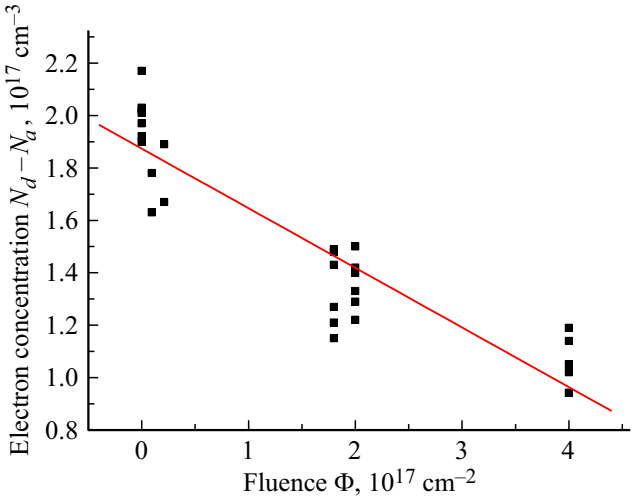

Рис. 1. Зависимость измеряемой величины $N_d - N_a$ в эпитаксиальных слоях GaN от дозы облучения электронами.

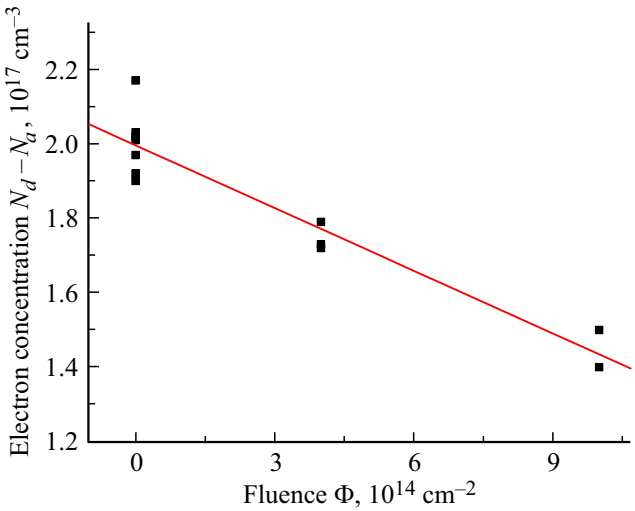

Рис. 2. Зависимость измеряемой величины $N_d - N_a$ в эпитаксиальных слоях GaN от дозы облучения протонами.

Зависимость скорости удаления носителей от температуры для SiC и GaN

T, K	300		500	
Материал	SiC [9]	GaN [10]	SiC [9]	GaN, настоящая работа
η_e, см$^{-1}$, электроны	~ 0.07	0.47	0.02	0.2
η_e, см$^{-1}$, протоны	~ 60	150	13	65 (ВФХ) 68 (ВАХ)

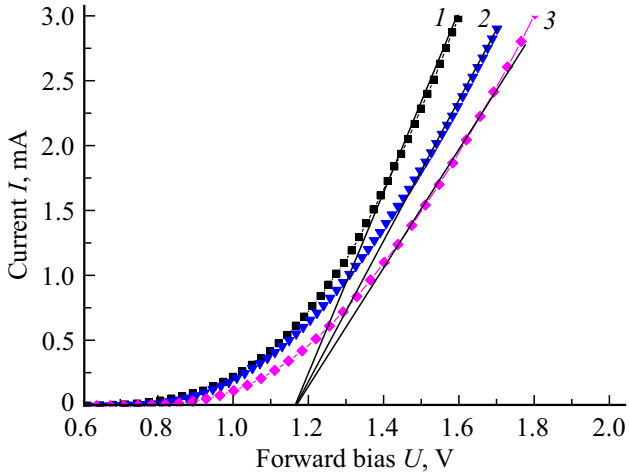

Рис. 3. ВАХ образцов после различных доз облучения протонами, см$^{-2}$: *1* — 0, *2* — $5 \cdot 10^{14}$, *3* — $1 \cdot 10^{15}$. Прямыми линиями аппроксимирована ВАХ на омическом участке.

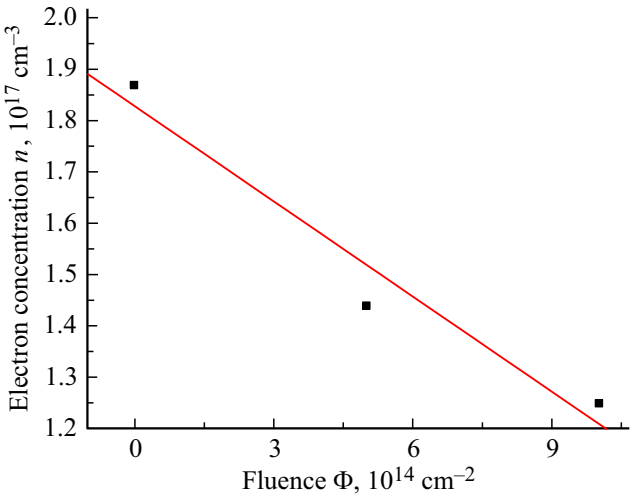

Рис. 4. Зависимость концентрации носителей заряда (n) по данным ВАХ в образцах GaN от дозы облучения протонами.

Как видно из таблицы, радиационная стойкость GaN несколько уступает радиационной стойкости SiC. При этом характер температурной зависимости скорости удаления носителей схожий для обоих полупроводников —

нагрев до 200 °C приводит к уменьшению величин η_e в $\sim 3-4$ раза для SiC и 2–3 для GaN.

4. Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что в GaN, так же как и в SiC, наблюдается значительное снижение скорости удаления носителей в случае облучения при повышенных температурах. Этот результат важен для GaN как перспективного материала для создания приборов высокотемпературной электроники. Можно предположить, что в GaN, так же как и в SiC, этот эффект связан с увеличением подвижности вакансий с ростом температуры. Это приводит к увеличению вероятности рекомбинации вакансий и межузельных атомов, что уменьшает концентрацию образующихся радиационных дефектов. Однако для окончательного подтверждения этого вывода необходимо проведение дополнительных экспериментов, что и будет темой наших дальнейших исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] X. Liu, P. Zou, H. Wang, Yu. Lin, J. Wu, Z. Chen, X. Wang, Sh. Huang. IEEE Trans. Electron Dev., **70**, 3748 (2023).

[2] M. Matys, K. Kitagawa, T. Narita, T. Uesugi, J. Suda, T. Kachi. Appl. Phys. Lett., **121**, 203507 (2022).

[3] D. Khachariya, Sh. Stein, W. Mecouch, M. HaydenBreckenridge, Sh. Rathkanthiwar, S. Mita, B. Moody1, P. Reddy, J. Tweedie, R. Kirste, K. Sierakowski, G. Kamler, M. Bockowski, E. Kohn, S. Pavlidis, R. Collazo, Z. Sitar. Appl. Phys. Express, **15**, 101004 (2022).

[4] А.А. Лебедев, В.В. Козловский, М.Е. Левинштейн, К.С. Давыдовская, Р.А. Кузьмин, Прверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № **9**, 58 (2024).

[5] E. Omotoso, W.E. Meyer, F. D. Auret, A.T. Paradzah, M. Diale, S.M.M. Coelho, P.J. Janse, van Rensburg. Mater. Sci. Semicond. Process., **39**, 112 (2015).

[6] Z. Luo, T. Chen, J.D. Cressler, D.C. Sheridan, J.R. Williams, R.A. Reed, P.W. Marshall. IEEE Trans. Nucl. Sci., **50**, 1821 (2003).

[7] S.J. Pearton, F. Ren, E. Patrick, M.E. Law, A.Y. Polyakov. ECS J. Solid State Sci. Technol., **5** (2), Q35 (2016).

[8] S.J. Pearton, R. Deist, F. Ren, Lu Liu, A.Y. Polyakov, J. Kim. J. Vac. Sci. Technol. A, 31 (5), 050801 (2013).

[9] С.Ю. Давыдов, К.С. Давыдовская, В.В. Козловский, А.А. Лебедев. ФТП, **58** (9), 482 (2024).

[10] V.V. Kozlovski, A.E. Vasil'ev, A.A. Lebedev, E.E. Zhurkin, M.E. Levinshtein, A.M. Strelchuk, D.A. Malevsky, A.V. Sakharov, A.E. Nikolaev. J. Surf. Investigation: *X*-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, **18** (6), 1577 (2024).

Редактор Г.А. Оганесян

Effect of irradiation temperature on the carrier removal rate in GaN

A.A. Lebedev[1], *V.V. Kozlovski*[1,2], *D.A. Malevsky*[1], *A.V. Sakharov*[1], *K.S. Davydovskaya*[1], *M.E. Levinshtein*[1], *A.E. Nikolaev*[1]

[1] Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia
[2] Peter the Great St. Petersburg Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

Abstract Creation of devices based on wide-bandgap semiconductors is one of the fastest growing areas of modern electronics. The article compares the effect of irradiation temperature on the radiation resistance of GaN when irradiated with protons and electrons. The carrier removal rate in GaN was determined in the case of proton and electron irradiation at elevated temperatures. It was shown that, as in the case of SiC, there is a significant decrease in the carrier removal rate at an irradiation temperature of 200 °C, compared to irradiation at room temperature.