

УДК 538.9

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ НИТРИДА ГАЛЛИЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

© 2025 г. А. А. Лебедев^{а,*}, А. В. Сахаров^а, Г. А. Оганесян^а, В. В. Козловский^б,
Д. А. Малевский^а, М. Е. Левинштейн^{а,**}, А. Е. Николаев^а

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

^бСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: Shura.Lebe@mail.ioffe.ru

**e-mail: Melev@nimis.ioffe.ru

Поступила в редакцию 21.04.2025 г.

После доработки 30.05.2025 г.

Принята к публикации 30.05.2025 г.

В нитриде галлия *n*-типа в рамках метода Ван дер Пау впервые установлены значения скорости удаления носителей η_e (removal rate) для комнатной температуры при облучении *n*-GaN электронами с энергией 0.9 МэВ. При исходной (до облучения) концентрации электронов $1.87 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ значения η_e составили при комнатной температуре (293 К) 0.023 см^{-1} и 0.054 см^{-1} для доз $\Phi_n = 1.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и $\Phi_n = 3.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ соответственно. С понижением температуры величина η_e возрастает: при $T = -55^\circ\text{C}$ значения η_e составляют 0.064 см^{-1} и 0.086 см^{-1} для доз $1.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и $3.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Максимальная величина подвижности в необлученных образцах составляет $650 \text{ см}^2/\text{Вс}$. После облучения дозой $\Phi_n = 3.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ максимальное значение подвижности падает до значения $530 \text{ см}^2/\text{Вс}$. Изменение подвижности под влиянием облучения уверенно прослеживается при температурах $T \approx 260 \text{ К}$ ($1000/T \approx 3.85$).

Ключевые слова: нитрид галлия, электронное облучение, радиационные дефекты, радиационная стойкость, Холловские измерения.

DOI: 10.7868/S3034573125070139

ВВЕДЕНИЕ

До последнего времени нитрид галлия рассматривался как один из весьма перспективных широкозонных материалов для применения в области высокотемпературной, высоковольтной и относительно низкочастотной полупроводниковой электроники [1–4]. В последние годы, однако, появились работы, указывающие на возможность эффективного применения широкозонных материалов, включая GaN, в высокочастотной электронике [5, 6] и в применениях при криогенных температурах [7, 8].

Впервые более 50 лет назад было сформулировано, что продвижение в область более высоких частот требует по правилам масштабирования (scaling) соответствующего уменьшения длины рабочей области и увеличения концентрации но-

сителей (закон масштабирования Деннарда [9]). Использование приборов при низких температурах также предполагает достаточно высокий уровень легирования материала во избежание “вымораживания” электронов на примесные центры.

В целом ряде применений устойчивость по отношению к различным видам облучения может являться важным, а часто и решающим фактором, определяющим возможность использования приборов на его основе. Эффективным методом исследования основных параметров материала и их изменения под влиянием различных типов облучения в широком диапазоне температур является исследование эффекта Холла.

Влияние электронного облучения на параметры нитрида галлия исследовалось с помощью

эффекта Холла в целом ряде работ [10–13]). В работе [10] энергия облучающих электронов E_e составляла 10 МэВ. При этом скорость удаления носителей η_e (removal rate) в образцах с высокой исходной концентрацией электронов $n_0 = 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ составляла $\approx 1 \text{ см}^{-1}$. С уменьшением n_0 величина η_e монотонно уменьшается и при $n_0 = 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ составляет $\approx 0.4 \text{ см}^{-1}$.

В работе [11] исследовалось влияние электронного облучения на образцы GaN с исходной концентрацией n_0 в диапазоне от 10^{16} см^{-3} до $3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Значения энергии E_e составляли 7 и 10 МэВ. Величина скорости удаления носителей η_e не определялась. Однако наибольшее число работ выполнено при облучении GaN электронами с $E_e \approx 1 \text{ МэВ}$ [12–14].

Как отмечается в [15], электроны с $E_e \sim 1 \text{ МэВ}$ могут рассматриваться как “стандартный” источник облучения, обеспечивающий эффективную ионизацию и смещение атомов в GaN. С другой стороны, облучение электронами с такой энергией создает относительно простые собственные дефекты, что позволяет достаточно точно определять их природу. Несмотря на значительное число работ, в которых исследовалось облучение электронами с энергией $\sim 1 \text{ МэВ}$ слоев GaN, полученные значения η_e отличаются весьма существенно.

В работе [12] облучение слоев GaN с исходной концентрацией $n_0 \sim 1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ электронами с $E_e \approx 1 \text{ МэВ}$ и дозой $\Phi_e = 5 \times 16 \text{ см}^{-2}$ практически не уменьшало концентрацию. В работе [13] величина η_e , установленная в результате облучения образцов с исходной концентрацией $n_0 = 2.3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ электронами с $E_e = 1 \text{ МэВ}$ и дозой $\Phi_e = 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ равнялась 0.2 см^{-1} . Отметим, что при одинаковом значении величины скорости η_e ситуация должна была бы быть противоположной: отношение произведения $\eta_e \times \Phi_e$ к исходной концентрации n_0 в работе [12] на порядок выше, чем в работе [13].

Целью настоящей работы является установление значения скорости удаления носителей η_e в полученном методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (MOVPE) высоколегированном GaN, перспективном для применения в высокочастотной и криогенной электронике.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовались слои нитрида галлия толщиной $d = 2 \text{ мкм}$, выращенные на сапфировых подложках методом MOVPE. Исходная концентрация электронов при комнатной температуре n_0 рав-

нялась $1.87 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, Холловские измерения проводились методом Ван дер Пау в постоянном магнитном поле напряженностью 4 кГс в диапазоне температур 75–293 К. Ток, протекающий через образец, при измерениях не превышал 1 мА.

Облучение электронами с энергией $E_e = 0.9 \text{ МэВ}$ проводилось в импульсном режиме. Частота следования импульсов составляла 500 Гц. Длительность импульсов равнялась 330 мкс. Температура во время облучения поддерживалась постоянной с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$. При толщине активного слоя $d = 2 \text{ мкм}$ и энергии облучающих электронов $E_e = 0.9 \text{ МэВ}$ радиационные дефекты генерировались в базе структур с высокой степенью однородности [16]. Облучение проводилось последовательно шестью дозами от $\Phi_e = 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ до $3.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$. После каждого облучения в указанном температурном диапазоне измерялись концентрация и подвижность электронов. Максимальное значение $\Phi_e = 3.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ было выбрано исходя из соображения, что для значения $\eta_e = 0.2 \text{ см}^{-1}$, чаще всего встречающегося в литературе, концентрация электронов после облучения должна была бы упасть в ~ 3.5 раза.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны температурные зависимости концентраций $n(1000/T)$ в исходном образце (кривая 1) и после облучения электронами дозами Φ_e , равными 1.7×10^{17} и $3.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Следует заметить, прежде всего, что во всем температурном диапазоне 75–293 К ($3.4 \approx 1000/T \approx 13 \text{ K}^{-1}$) отношение концентрации при комнатной температуре к концентрации при 75 К монотонно возрастает с ростом Φ_n . Так, в исходном материале ($\Phi_n = 0$) отношение концентрации при комнатной температуре к концентрации при 75 К n_{293}/n_{75} равняется 7.3. При облучении дозой $\Phi_n = 1.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ $n_{293}/n_{75} \approx 10.6$; после облучения дозой $\Phi_n = 3.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ $n_{293}/n_{75} \approx 30$.

На вставке к рис. 1 зависимости $n(1000/T)$ представлены в более узком температурном диапазоне. Температура -55°C соответствует характерному значению предельно низкой рабочей температуры приборов на основе карбида кремния, единственного широкозонного материала, нашедшего в настоящее время широкое применение практически во всех областях современной электроники. Представленные на вставке данные позволяют с разумной точностью определить величину скорости удаления носителей при облучении электронами $\eta_e = (n_0 - n)/\Phi_n$, где n_0 — концентрация электронов в базе исходного образца, n — концентрация после облучения дозой Φ_n .

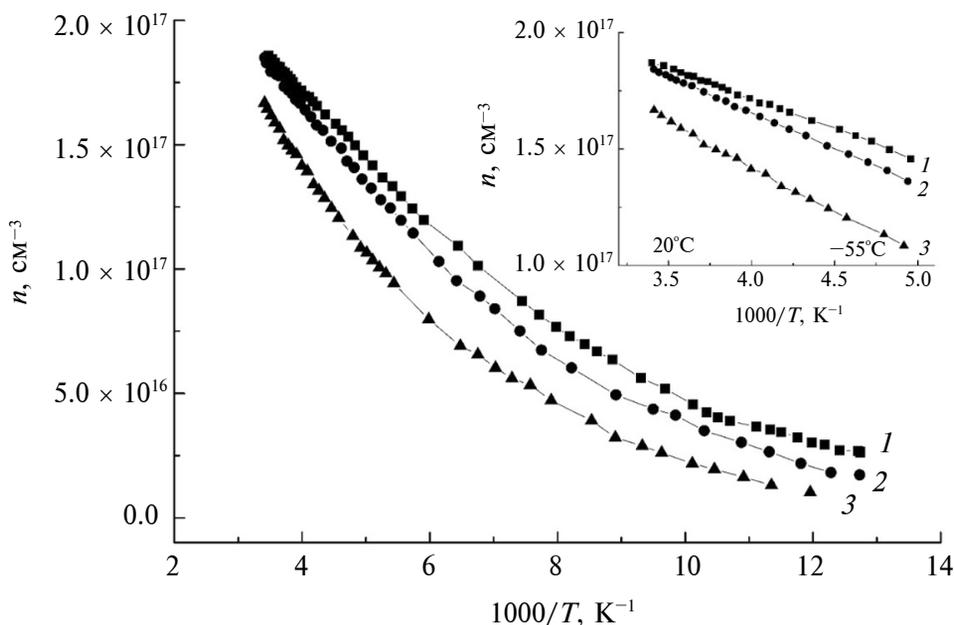


Рис. 1. Температурные зависимости концентрации электронов при облучении электронами с энергией 0.9 МэВ при комнатной температуре. Доза Φ_n см^{-2} : 1 — 0; 2 — 1.7×10^{17} ; 3 — 3.7×10^{17} . На вставке показаны соответствующие зависимости в области температур: -75 — $+20^\circ\text{C}$.

При комнатной температуре ($T = 20^\circ\text{C}$) после облучения дозой $\Phi_n = 1.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ соответствующее значение η_e составляет $\eta_e \approx 0.023 \text{ см}^{-1}$. После облучения дозой $\Phi_n = 3.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ величина η_e составляет $\eta_e \approx 0.054$. Насколько нам известно, в настоящей работе впервые прослежено изменение концентрации в GaN под влиянием облучения с $E_e = 0.9$ МэВ вплоть до комнатной температуры (см. вставку к рис. 1).

Заметим, что отмеченная в работе зависимость скорости удаления носителей от дозы представляется несколько необычной. Как правило, концентрация спадает с ростом дозы приблизительно линейно, и величина η_e с хорошей точностью может считаться постоянной (см., например, данные для SiC в [17,18]). Насколько нам известно, зависимость скорости удаления носителей от дозы Φ_n при электронном облучении в GaN ранее не наблюдалась. Природа наблюдающейся нелинейности в настоящее время не ясна. Отметим, что даже максимальное полученное значение $\eta_e \approx 0.054 \text{ см}^{-1}$ в несколько раз меньше, чем чаще всего указываемая в литературе величина $\eta_e \approx 0.2 \text{ см}^{-1}$ для GaN, облученного электронами с $E_e = 0.9$ МэВ. С другой стороны, установленные значения η_e по порядку величины близки к величине $\eta_e \approx 0.015 \text{ см}^{-1}$, полученные в работе [19] для SiC, выращенного методом сублиминационной эпитаксии (SE). Хотя значение скорости удаления

носителей рассчитывается, как правило, только для комнатной температуры, представляет практический интерес сравнение значений η_e для комнатной температуры и для $T = -55^\circ\text{C}$. Соответствующие значения η_e при $T = -55^\circ\text{C}$ равняются 0.064 см^{-1} и 0.086 см^{-1} для значений доз Φ_n , равных $1.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и $3.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ соответственно.

В работе [14] изменение концентрации в GaN с исходной концентрацией $n_0 \approx 1.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ под влиянием облучения с той же энергией $E_e = 0.9$ МэВ может быть прослежено в области температур $T \approx 250 \text{ K}$ ($1000/T > 4 \text{ K}^{-1}$), (рис. 1, *b* работы [14]). Скорость удаления носителей в [14] не определялась. Из приведенных данных можно установить, что при $\Phi_n = 3.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ величина η_e при 250 K равняется 0.017 см^{-1} . Величина η_e монотонно уменьшается с увеличением температуры T . В работе [20] приведены данные облучения электронами с энергией 0.9 МэВ образцов GaN с исходной концентрацией электронов $n_0 \approx 4.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Максимальная доза облучения Φ_n равнялась $1.14 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Тем не менее изменение концентрации под влиянием электронного облучения по результатам, представленным в [20], может быть прослежено только при температурах $T \approx 170 \text{ K}$ ($1000/T > 5.8 \text{ K}^{-1}$).

Из представленных на вставке к рис. 1 зависимостей непосредственно видно, что с пониже-

нием температуры скорость удаления носителей возрастает. На рис. 2 показана исходная температурная зависимость подвижности $\mu(1000/T)$ в необлученном образце (кривая 1) и температурные зависимости после облучения образца электронами энергией 0.9 МэВ дозами $1.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (кривая 2) и $3.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (кривая 3).

Максимальное значение подвижности в необлученных образцах составляет $650 \text{ см}^2/\text{Вс}$. Облучение электронами с энергией 0.9 МэВ дозой $\Phi_n = 3.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ снижает максимальную подвижность до величины $530 \text{ см}^2/\text{Вс}$, т.е. в ~ 1.25 раза. Изменение подвижности под влиянием облучения может быть уверенно прослежено на вставке к рис. 2 при температурах $T \approx 260 \text{ К}$ ($1000/T \approx 3.85$). Приблизительно в том же температурном диапазоне влияние облучения электронами с энергией 0.9 МэВ на подвижность образцов GaN с исходной концентрацией $n_0 \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ прослежено в работе [12]. Максимальная подвижность электронов снижалась в этой работе в ~ 1.8 раза после облучения дозой $\Phi_n = 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, что в ~ 7 раз меньше, чем в данной работе. Столь значительная разница в радиационной стойкости подвижности обусловлена, по-видимому, более высокой исходной максимальной подвижностью носителей, наблюдавшейся в [12] ($\sim 2400 \text{ см}^2/\text{Вс}$).

В работе [20] изменение подвижности в GaN с исходной концентрацией $n_0 \approx 4.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (заметно меньшей, чем в настоящей работе и в работе [12]) под воздействием облучения электронами с $E_e = 0.9 \text{ МэВ}$ прослежено в диапазоне температур 50–300 К. Максимальная подвижность электронов до облучения ($\sim 1600 \text{ см}^2/\text{Вс}$) снижалась в исследованной в [20] структуре после облучения дозой $\Phi_n = 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ до значения $\sim 1200 \text{ см}^2/\text{Вс}$, т.е. в ~ 1.33 раза. Изменение подвижности под влиянием облучения в [20] может быть прослежено при

$$T \leq 170 \text{ К.}$$

Анализ полученных в настоящей работе экспериментальных данных, а также их сравнение с известными литературными данными показывает заметный разброс в определяемых значениях скорости удаления носителей. По всей видимости, это связано с тем, что даже промышленно выпускаемые образцы GaN обладают относительно низким структурным совершенством. Плотность дислокаций в образцах GaN находится на уровне 10^7 см^{-2} . Взаимодействие дислокаций с образующимися при облучении первичными радиационными дефектами может значительно повлиять на величину η_c . Кроме того, следует учитывать и различный уровень неконтролируемого леги-

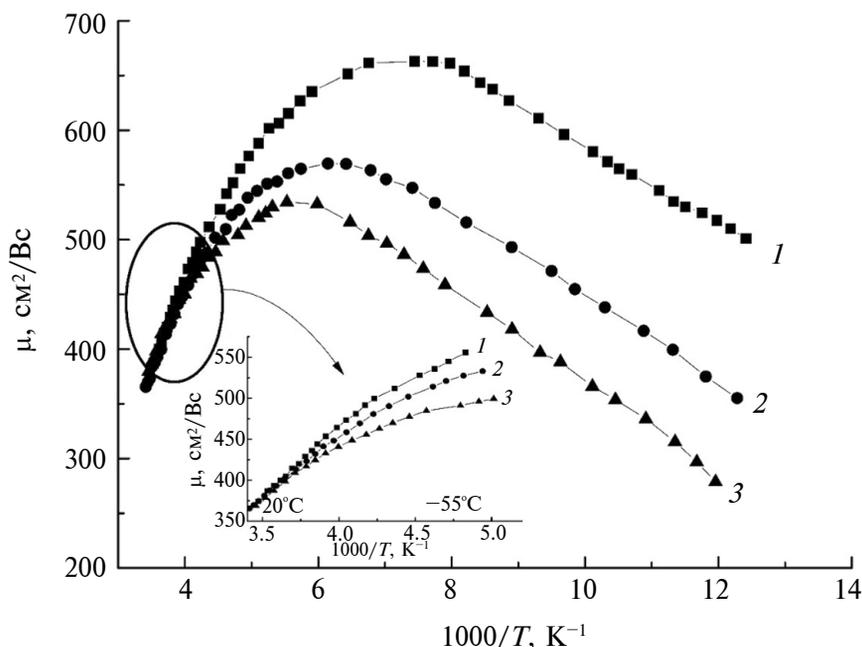


Рис. 2. Температурные зависимости подвижности при облучении электронами с энергией 0.9 МэВ при комнатной температуре. Доза $\Phi_n \text{ см}^{-2}$: 1 — 0; 2 — 1.7×10^{17} , 3 — 3.7×10^{17} . На вставке показаны соответствующие зависимости в области температур $3.4 < 1000/T \leq 5.0$ ($75 < T < +20^\circ\text{C}$).

рования образцов при выращивании в различных технологических установках. Образование радиационных дефектов создает дополнительные центры рассеяния носителей заряда, что снижает их подвижность. Однако обычно такое снижение не является катастрофическим, как это и наблюдалось в настоящей работе. Определение параметров и структуры возникающих радиационных дефектов представляет собой отдельную задачу и является целью нашей следующей работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что в настоящей работе для *n*-GaN впервые установлены в рамках метода Ван дер Пау значения скорости удаления носителей η_c для комнатной температуры при облучении электронами с энергией 0.9 МэВ. При исходной (до облучения) концентрации электронов $1.87 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ значения η_c составили при комнатной температуре (293 К) 0.023 см^{-1} и 0.054 см^{-1} для доз $\Phi_n = 1.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и $\Phi_n = 3.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Природа наблюдающейся нелинейности зависимости $\eta_c(\Phi_n)$ в настоящее время не ясна. С понижением температуры величина η_c возрастает: при $T = -55^\circ\text{C}$ значения η_c составляют 0.064 см^{-1} и 0.086 см^{-1} для доз $1.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и $3.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Максимальная величина подвижности в необлученных образцах составляет $650 \text{ см}^2/\text{Вс}$. После облучения дозой $\Phi_n = 3.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ максимальное значение подвижности падает до значения $530 \text{ см}^2/\text{Вс}$. Изменение подвижности под влиянием облучения уверенно прослеживается при температурах $T \approx 260 \text{ К}$ ($1000/T \approx 3.85$).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Buffolo M., Favero D., Marcuzzi A., De Santi C., Meneghesso G., Zanoni E., Meneghini M. // IEEE Trans. ED. 2024. V. 71. № 3. P. 1344. <https://doi.org/10.1109/TED.2023.3346369>
2. Zhong Y., Zhang Jin., Wu S., Jia L., Yang X., Liu Y., Zhang Y., Sun Q. // Fundam. Res. 2022. V. 2. № 3. P. 462. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.11.028>
3. Meneghini M., De Santi C., Abid I., Buffolo M., Marcello C., Khadar R.A., Nela L., Zagni N., Chini A., Medjdoub F., Meneghesso G., Verzellesi G., Zanoni E., Matioli E. // J. Appl. Phys. 2021. V. 130. № 18. 181101. <https://doi.org/10.1063/5.0061354>
4. Pushpakaran B.N., Subburaj A.S., Bayne S.B. // J. Electron. Mater. 2020. V. 49. № 11. P. 6247. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08397-z>
5. Di Gioia G., Frayssinet E., Samnoui M., Chinni V., Mondal P., Treutiel J., Wallart X., Zegaoui M., Ducournau G., Roelens Y., Cordier Y.von, Zaknoute M. // J. Electron. Mat. 2023. V. 52. № 8. P. 5249. <https://doi.org/10.1007/s11664-023-10499-3>
6. Han L., Li Y. // Electronics. 2023. V. 12. № 24. P. 4966. <https://doi.org/10.3390/electronics12244966>
7. Chen J.X., Liu B.Y., Gu Y., Chen R., Li B., Zhou Ch. // IEEE Trans. ED. 2024. V. 71. № 7. P. 4233. <https://doi.org/10.1109/TED.2024.3403530>
8. Wang Sh., Hu R., Chen G., Luo Ch., Gong M., Li Y., Huang M., Ma Y., Yang Zh. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research Section B. 2021. V. 494–495. (15 May). P. 53. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.03.009>
9. Dennard R.H., F. Gaensslen F., Yu H.-N., Rideout L., Bassous E., LeBlanc A. // IEEE J. Solid State Circuits. 1974. V. 9. № 5. P. 256. <https://doi.org/10.1109/JSSC.1974.1050511>
10. Polyakov A.Y., Lee I.-H., Smirnov N.B., Govorkov A.V., Kozhukhova E.A., Kolin N.G., Korulin A.V., Boiko V.M., S. J. Pearton S.J. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. № 12. P. 123703. <https://doi.org/10.1063/1.3596819>
11. Брудный В.Н., Веревкин С.С., Говорков А.В., Ермаков В.С., Колин Н.Г., Корюлин А.В., Поляков А.Я., Смирнов Н.Б. // ФТП. 2012. Т. 46. № 4. С. 451. ISSN 0015-3222
12. Look D.C., Reynolds D.C., Hemsley J.W., Sizelove J.R., Jones R.L., J. Moln R.J. // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. № 12. P. 2273. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.2273>
13. Fang Z.-Q., Hemsley J.W., Look D.C., Macka M.P. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. № 4. P. 448. <https://doi.org/10.1063/1.120783>
14. Emtsev V.V., Davydov V.Yu., Kozlovskii V.V., Oganessian G.A., Poloskin D.S., Smirnov A.N., Tropp E.A., Morozov Yu.G. // Physica B. 2007. V. 401–402. (15 December). P. 315. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2007.08.176>
15. Lu T., Wang Ch. // Electronics. 2022. V. 11. № 8. P. 1186. <https://doi.org/10.3390/electronics11081186>
16. Agullo-Lopez F., Catlow C.R.A., Townsend P.D. Point Defects in Materials. Academic: New York, 1988. P. 445. ISBN 10: 0120445107
17. Козловский В.В., Васильев А.Э., Лебедев А.А., Стрельчук А.М., Левинштейн М.Е. // Поверхность. Рентгеновские, синхротрон. и нейтрон. исслед. 2022. Т. 16. № 6. С. 64. <https://doi.org/10.31857/S1028096022060097>
18. Kozlovski V.V., Vasil'ev A.E., Lebedev A.A., Davydovskaya K.S., Levinshtein M.E. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2023. V. 17. № 2. P. 397. <https://doi.org/10.1134/S1027451023020076>
19. Kozlovski V.V., Lebedev A.A., Bogdanova E.V. // J. Appl. Phys. 2015. V. 117. № 15. P.155702. <https://doi.org/10.1063/1.4918607>
20. Emtsev V.V., Davydov V.Yu., Emtsev K.V., Poloskin D.S., Oganessian G.A., Kozlovskii V.V., E. E. Haller. // Phys. Stat. Sol. (C). 2003. № 2. P. 601. <https://doi.org/10.1002/pscc.200306191>

Effect of Electron Irradiation on the Parameters of Gallium Nitride in a Wide Temperature Range

A. A. Lebedev^{1,*}, A. V. Sakharov¹, G. A. Oganessian¹, V. V. Kozlovski², D. A. Malevsky¹,
M. E. Levinshtein^{1,**}, A. E. Nikolaev¹

¹*Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021Russia*

²*Department of Experimental Physics Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, 195251Russia*

**e-mail: Shura.Lebe@mail.ioffe.ru*

***e-mail: Melev@nimis.ioffe.ru*

When irradiating MOVPE *n*-GaN with electrons with an energy of 0.9 MeV, the values of the carrier removal rate, η_c for room temperature were established for the first time within the framework of the Van der Pauw method. At the initial (before irradiation) electron concentration of $1.87 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, the values of η_c were 0.023 cm^{-1} and 0.054 cm^{-1} at room temperature (293 K) for doses $\Phi_n = 1.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ and $\Phi_n = 3.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, respectively. With temperature decrease, the η_c value increases: at $T = -55^\circ\text{C}$, the η_c^{-1} values are 0.064 cm and 0.086 cm^{-1} for doses of $1.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ and $3.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ respectively. The maximum mobility value in non-irradiated samples is $650 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. After irradiation with a dose of $\Phi_n = 3.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, the maximum mobility value decreases to $530 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. The change in mobility under the influence of irradiation is reliably traced at temperatures of $T \leq 260 \text{ K}$ ($1000/T \approx 3.85$).

Keywords: gallium nitride, electron irradiation, radiation defects, radiation resistance, Hall measurements.