Емкостная спектроскопия многослойных структур GaN/InP, сформированных методом плазмохимического атомно-слоевого осаждения на Si-подложке

© О.П. Михайлов[1,2], А.И. Баранов[1], А.А. Максимова[1,3], А.В. Уваров[1], Е.А. Вячеславова[1], В.А. Поздеев[1,3], Э.Я. Ярчук[1,3], Д.А. Кириленко[2], А.С. Гудовских[1,3]

[1] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
[2] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
[3] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),
197022 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: oleg.mikhaylov.00@gmail.com

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 14 июля 2026 г.
Принята к публикации 14 июля 2026 г.

Методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней исследованы электрофизические свойства периодических многослойных структур на основе GaN/InP, выращенных в виде цифрового твердого раствора и короткопериодной сверхрешетки, на монокристаллических подложках Si. Слои GaN и InP осаждались методом плазмохимического атомно-слоевого осаждения, в котором рост GaN происходил без использования водородсодержащей плазмы. Показано, что GaN/InP-сверхрешетки обладают существенно более высокой плотностью поверхностных состояний на границах раздела по сравнению со структурами, выполненными в виде цифрового твердого раствора.

Ключевые слова: нитрид галия, фосфид индия, нитрид индия, нестационарная спектроскопия глубоких уровней.

DOI: 10.61011/FTP.2026.08.63951.9793

1. Введение

На сегодняшний день доминирующее положение в фотоэлектрической энергетике занимают однопереходные солнечные элементы кремния. Их успех обусловлен удачным сочетанием относительно высокой эффективности и экономической целесообразности. Однако дальнейшее повышение коэффициента полезного действия (кпд) таких структур практически достигло теоретического предела [1]. Наиболее существенным ограничением предельно достижимой эффективности однопереходных солнечных элементов являются потери на термализацию носителей заряда, когда избыточная энергия фотонов, переданная генерируемым носителям заряда, рассеивается в виде колебаний решетки. Данная проблема стимулирует поиск альтернативных технологических решений.

В числе наиболее перспективных направлений рассматриваются многопереходные солнечные элементы с использованием широкозонных соединений III–V, выращенных на Si-подложке [2,3]. Основной задачей в таких системах является достижение эффективной ширины запрещенной зоны в диапазоне 1.7–1.8 эВ [4] и достижение согласования параметров кристаллической решетки с Si-подложкой [5]. Этому критерию потенциально могут удовлетворять цифровые твердые растворы на основе фосфида индия с нитридом галлия (InP/GaN). Под цифровым твердым раствором в данной работе понимается наноструктура, состоящая из чередующихся атомарнотонких слоев GaN и InP (толщиной в несколько монослоев), которая за счет малой толщины периодов проявляет электрофизические свойства, усредненные и аналогичные свойствам однородного твердого раствора (сплава) GaInNP. Чередование слоев с различающимися параметрами кристаллической решетки потенциально позволяет компенсировать упругие напряжения относительно кремниевой подложки. Однако такие слои ранее не были выращены методами плазмохимического осаждения, поэтому в данной работе они будут получены и определены механизмы дефектообразования в них. Для оценки качества материала использовалась емкостная спектроскопия — одна из наиболее эффективных методик исследования дефектов в полупроводниках.

2. Эксперимент

Периодические многослойные структуры GaN/InP были получены на монокристаллических подложках *n*-Si с ориентацией (100) с предварительно сформированным эпитаксиальным слоем GaP толщиной 7 нм. Многослойные структуры осаждались методом плазмохимического атомно-слоевого осаждения (PE-ALD) в реакторе Oxford

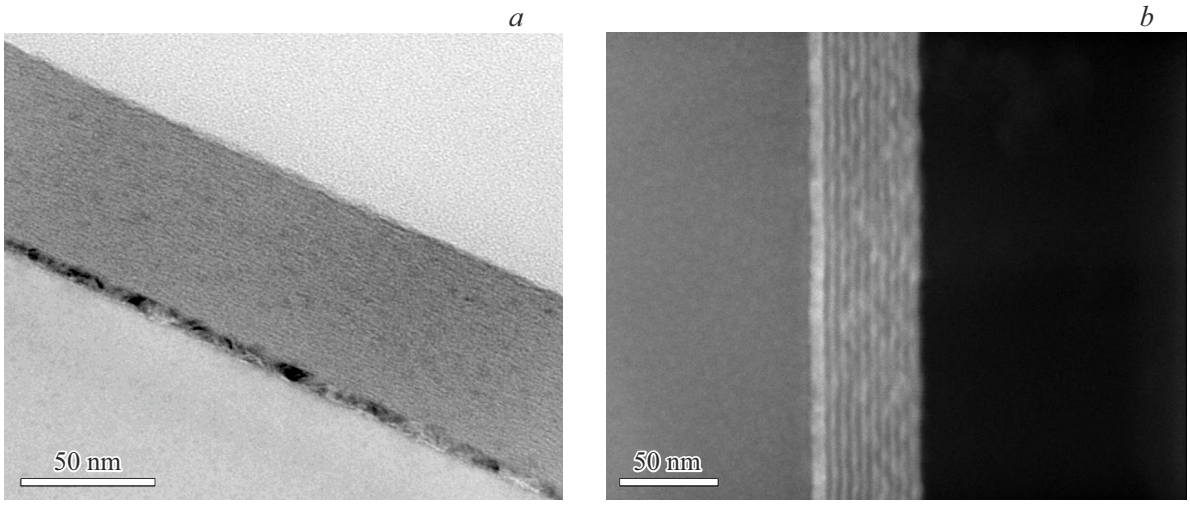


Рис. 1. *a, b* — TEM-изображения полученных сверхрешеток GaN/InP: *a* — OX1132, *b* — OX1133.

Plasmalab System 100 при давлении 350 мТорр, температуре 380 °C. Рост атомарного слоя элементов III группы (Ga и In) осуществлялся за счет поверхностной реакции металлорганических соединений (триметилгаллия и триметлиндия соответственно). Рост атомарного слоя элементов V группы (P, N) осуществлялся за счет разложения соответствующего прекурсора в плазме тлеющего разряда (13.56 МГц, 200 Вт). В качестве источника фосфора использовался фосфин, разбавленный в водороде, а источника азота — газообразный азот. В отличие от предыдущей работы, рост GaN осуществлялся без использования водорода в плазме [6]. Ранее было показано, что при росте многослойных структур GaN/InP добавление водорода в азотную плазму при росте GaN приводит к встраиванию в этот слой фосфора и формированию твердого раствора GaN — неконтролируемого состава [7].

После удаления естественного оксида в растворе HF на подложку *n*-Si был осажден слой GaP толщиной 200 циклов (7–8 нм). Далее проведен рост двух типов многослойных структур: цифровой твердый раствор (OX1132) и короткопериодная сверхрешетка (OX1133). Для образца OX1132 программа роста включала 50 периодов осаждения GaN/InP. Каждый из которых состоял из 6 циклов InP и 4 циклов GaN. Для образца OX1133 рост был 10 периодов, каждый из которых включал 30 циклов InP и 20 цикла GaN на повторение. После осаждения были сформированы омические контакты к *n*-Si. Верхний контакт выполнен из золота, нанесенного методом вакуумного термического напыления на верхний слой GaN/InP.

Структурные свойства исследовались с помощью просвечивающей электронной микроскопии, используя микроскоп Jeol JEM-2100F. Емкостные характеристики образцов были измерены методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней (НСГУ). В данной работе исследования методом НСГУ проводились в диапазоне температур 78–360 K в азотном криостате фирмы Janis при помощи емкостного моста Boonton-7200B. Управление этими установками проводилось в среде LabView. НСГУ позволит определить энергию активации, сечение захвата и концентрацию дефектов образца (кремний, GaN/InP, гетергранницы).

3. Результаты и обсуждение

Изображения поперечного сечения, полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопии, для обоих структур представлены на рис. 1, *a* и *b*. Твердый цифровой раствор (OX1132) имеет однородную структуру, границы между слоями GaN и InP практически не различимы. Короткопериодная сверхрешетка (OX1133) имеет четко выраженную слоистую структуру с четко различимыми границами раздела между слоями GaN и InP, а также с периодом, соответствующим ростовой программе сверхрешетки. При этом сама структура получилась тоньше, чем OX1132. Согласно дифракции электронов из выделенной области, слои GaN и InP в обоих случаях имеют преимущественно аморфную структуру.

Для обоих образцов с барьером Шоттки были измерены вольт-фарадные характеристики (ВФХ) при 80 и 300 K: рис. 2, *a* — образец OX1132, рис. 2, *b* — образец OX1133.

Сравнивая рис. 2, *a* и *b*, можно заметить, что для расширения области пространственного заряда в подложку Si (когда профиль распределения носителей заряда соответствует квазинейтральной области кремния) в образце OX1133 при 80 K нужно приложить напряжение ~ -6 В, а для образца OX1132 достаточно -4 В. Это значит, что в структуре OX1133 большее количество локализованных носителей заряда, в данном случае электронов, что косвенно подтверждает наличие

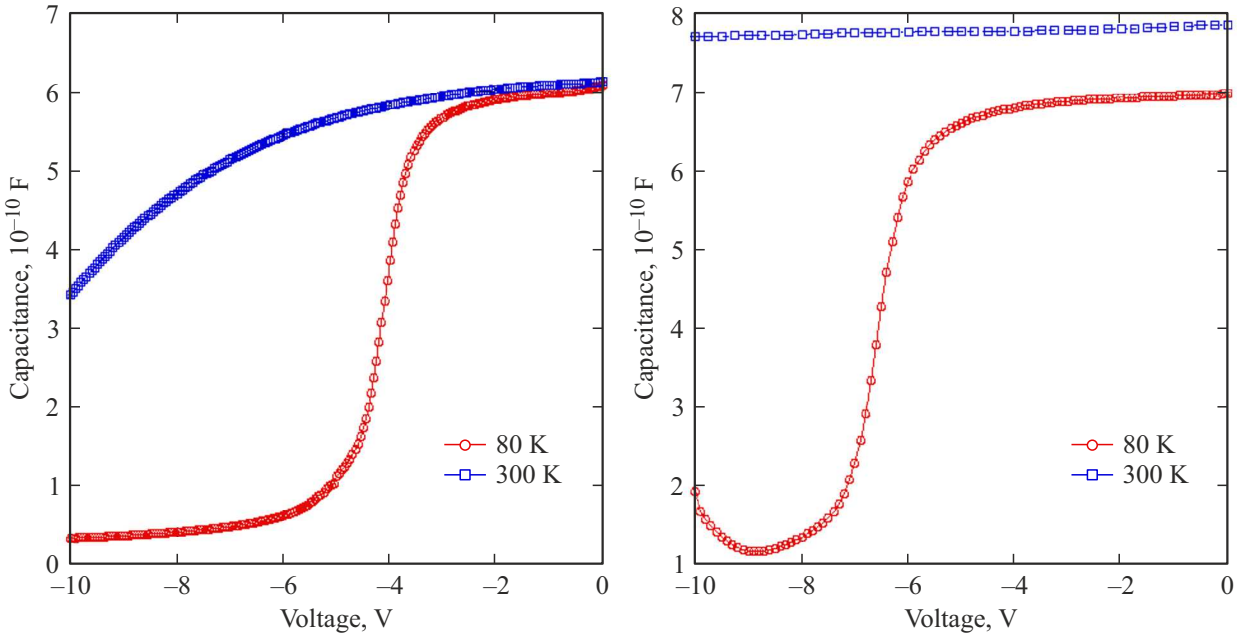


Рис. 2. *a, b* — вольт-фарадные характеристики образцов OX1132 (*a*) и OX1133 (*b*).

потенциальных ям для электронов (InP), ожидаемых для сверхрешетки GaN/InP. Поэтому для обеднения GaN/InP нужно приложить такое большое напряжение, после чего область пространственного заряда (ОПЗ) переходит через гетерограницу между твердым раствором и кремнием, что приводит к резкому падению емкости и происходит профилирование подложки кремния. Далее, при рассмотрении ВФХ при 300 K для образца OX1132 емкость начинает уменьшаться уже при −6 В, тогда как у OX1133 емкость почти не меняется даже при −10 В, несмотря на то что физическая толщина OX1132 выше, чем в OX1133. Слабая зависимость значения емкости при приложении даже значительного напряжения смещения может говорить о пиннинге уровня Ферми, вызванного повышенной концентрацией дефектов на гетерограницах в сверхрешетке (образце OX1133). Для исследования дефектных уровней в структурах были измерены спектры НСГУ обоих образцов. Идея метода заключается в измерении релаксации емкости области пространственного заряда после заполнения ее импульсом смещения. В данном случае релаксация емкости определяется скоростью эмиссии носителей заряда с дефектных уровней в запрещённой зоне полупроводника, а эмиссия носителей заряда зависит от температуры, при которой происходит измерение. Полученные графики для одного темпа эмиссии и разных напряжений смещения представлены на рис. 3, *a* и *b*. Разные напряжения смещения (в данном случае от −2 до −8 В) позволяют „зондировать“ образец на разной глубине — от поверхности (или границы раздела) до объема полупроводника. Темп эмиссии — это скорость, с которой носители заряда эмитируются с ловушки.

На графиках наблюдаются серии пиков, наличие которых может говорить об отклике от дефектных уровней. Отклик, наблюдаемый в диапазоне температур от 100 до 200 K, для сверхрешетки (OX1133) существенно превосходит сигнал, детектируемый для цифрового раствора (OX1132), что свидетельствует о существенно большой концентрации дефектов в структуре, выполненной в виде сверхрешетки (OX1133). Также в обоих случаях при увеличении обратных напряжений пик сдвигается в сторону бóльших температур и, соответственно, увеличивается энергия активации данного отклика (в случае образца OX1132 от 0.18 до 1.48 эВ). Изменение энергии активации при приложении напряжения смещения свидетельствует о том, что наблюдаемый отклик соответствует поверхностным состояниям на границе раздела. При этом поверхностные состояния должны быть распределены по энергии, а не локализованы на одном энергетическом уровне. В такой ситуации при приложении обратного напряжения смещения на границе раздела происходит сдвиг положения уровня Ферми относительно зоны проводимости, что приводит к изменению энергетического распределения заполнения уровней и, как следствие, к изменению энергии активации. Таким образом, для структуры, сформированной в виде сверхрешетки (OX1133), наблюдается существенно бóльшая концентрация поверхностных состояний. Более слабая зависимость энергии активации от прикладываемого напряжения для этой структуры также может быть связана с высокой плотностью поверхностных состояний, приводящей к пиннигу уровня Ферми. Данный факт в свою очередь объясняет необходимость прикладывать

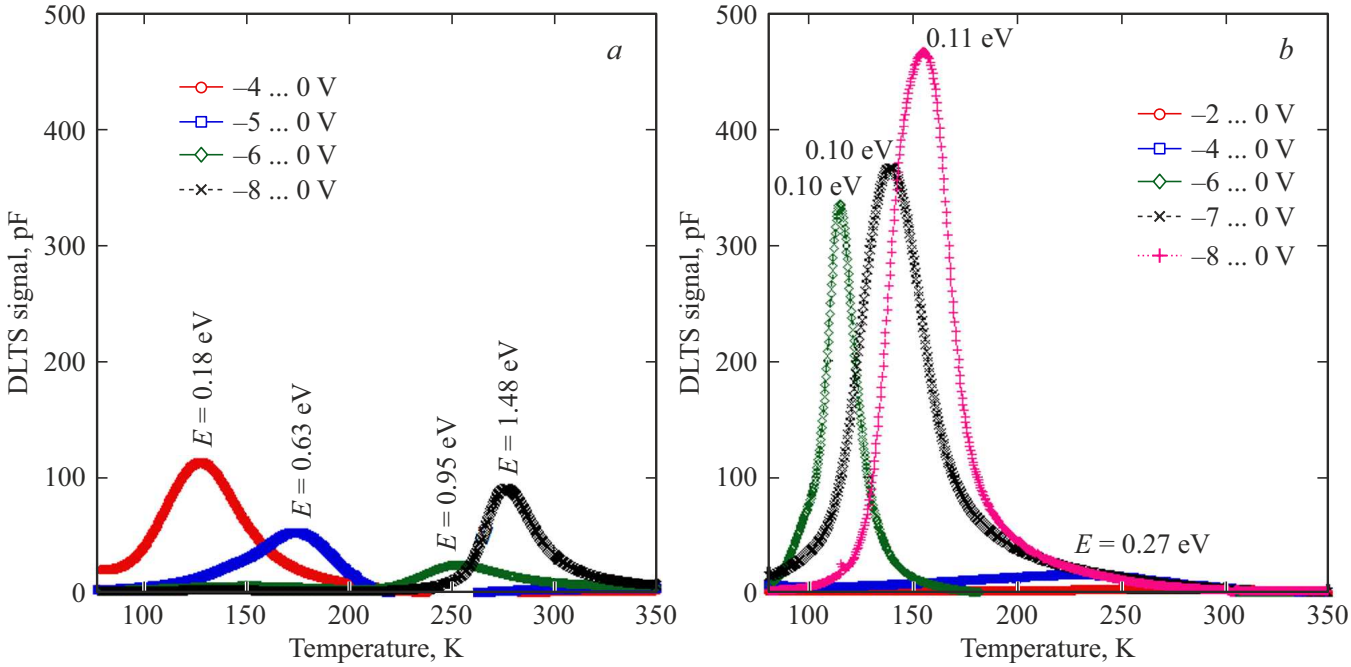


Рис. 3. *a, b* — график НСГУ сигнала для обоих образцов (*a* — OX1132, *b* — OX1133) для напряжений обратного смещения от −2 до −8 В.

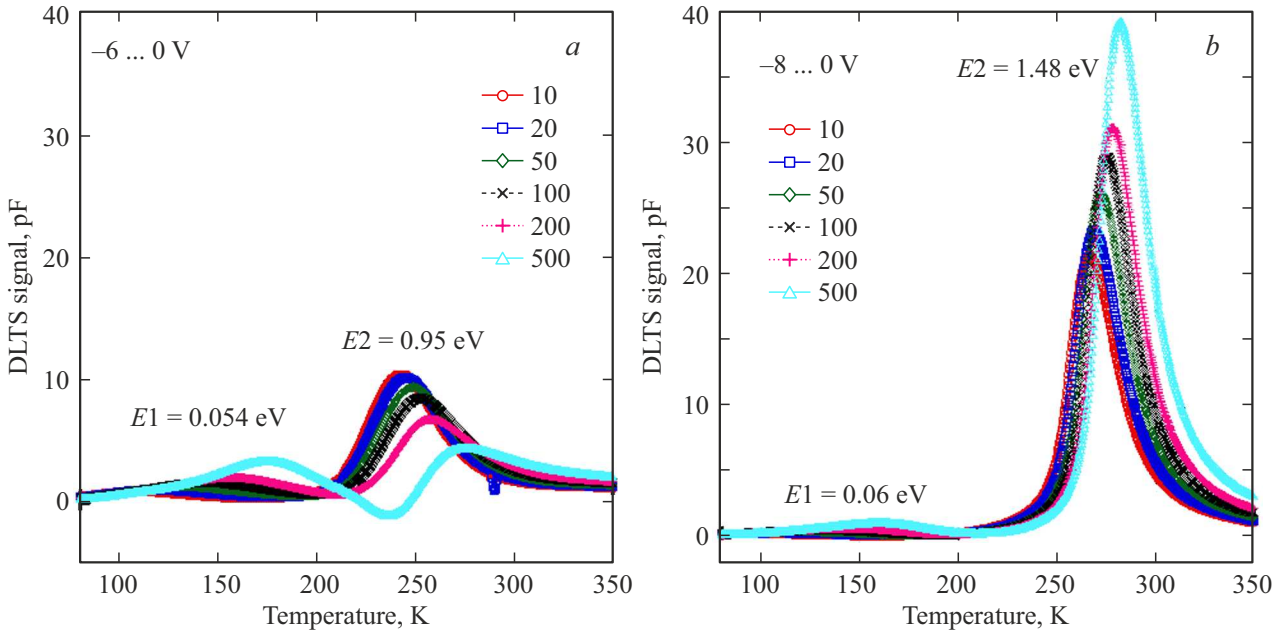


Рис. 4. *a, b* — график НСГУ сигнала образца OX1132, измеренный при обратных напряжениях −6–0 В (*a*) и −8–0 В (*b*) для темпов эмиссии 10, 20, 50, 100, 200, 500.

большее напряжение смещения для профилирования кремния.

Помимо поверхностных состояний для цифрового раствора (OX1132) наблюдается также точечный дефект в объеме. Как показано на рис. 4, *a* и *b*, в диапазоне температур от 100 до 200 K наблюдается слабый отклик с энергией активации ~ 0.06 эВ, которая не зависит от прикладываемого напряжения. Данный мелкий уровень с малой концентрацией не должен оказывать существенного влияния на электрофизические свойства материала.

4. Заключение

В работе проведены емкостные измерения двух типов периодических многослойных InP/GaN-структур, выпол-

ненных в виде цифрового твердого раствора и короткопериодной сверхрешетки, выращенных методом плазмохимического атомно-слоевого осаждения при температуре 380 °C. Показано, что в случае GaN/InP-сверхрешётки электрофизические свойства определяются поверхностными состояниями на границах раздела, концентрация которых существенно выше по сравнению со структурами, выполненными в виде цифрового твердого раствора. Несмотря на то что в объеме цифрового раствора GaN/InP дополнительно наблюдается мелкий точечный дефект с глубиной залегания 0.06 эВ, данная конфигурация является предпочтительной для формирования фотоактивных слоев.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-19-00150, https://rscf.ru/project/24-19-00150. Исследования методом ПЭМ выполнены с использованием оборудования ФЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“, поддержанного Минобрнауки России.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] R.R. King, D.C. Law, K.M. Edmondson, C.M. Fetzer, G.S. Kinsey, H. Yoon, R.A. Sherif, Sherif, N.H. Karam. Appl. Phys. Lett., **90** (18), 183516 (2007). https://doi.org/10.1063/1.2734507
[2] Y. Zou, C. Zhang, C. Honsberg, D. Vasileska, R. King, S. Goodnick. IEEE Proc. *7th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion* (WCPES-7), June 10–15, Waikoloa, Hawaii, 0279-0282 (2018).
[3] G. Dushaq, A. Siddiqui, K. Jumaa, A. Nayfeh, M. Rasras. IEEE Proc. *7th World Conf. Photovolt. Energy Conversion*, WCPEC 2018: A Joint Conf. of *45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC*, Waikoloa Village, HI, USA, 3857–3860 (2018).
[4] J. Zeitouny, E.A. Katz, A. Dollet, A. Vossier. Sci. Rep., **7** (1), 1766 (2017).
[5] T. Orzali, A. Vert, B. O'Brien, J.L. Herman, S. Vivekanand, R.J.W. Hill, Z. Karim, S.S. Papa Rao. J. Appl. Phys., **118** (10), 105307 (2015). DOI: 10.1063/1.4930594
[6] O.P. Mikhaylov, A.I. Baranov, V.A. Pozdeev, A.V. Uvarov, A.A. Maksimova, E.A. Vyacheslavova, A.S. Gudovskikh. St. Petersburg State Polytech. Univ. J.: Phys. and Math., **18** (3.1), 258 (2025). DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.183.151
[7] A. Gudovskikh, A. Uvarov, A. Baranov, V. Pozdeev, A. Maksimova, E. Vyacheslavova, O. Mikhaylov, E. Yarchuk, D. Kirilenko, V. Fedorov, M. Drozdov, P. Yunin. Sci. Technol. A, **44** (2), 023007 (2026). https://doi.org/10.1116/6.0005036

Редактор Г.А. Оганесян

Capacitance spectroscopy of GaN/InP multilayer structures formed by plasma-enhanced atomic layer deposition on Si substrate

O.P. Mikhaylov[1,2], A.I. Baranov[1], A.A. Maksimova[1,3], A.V. Uvarov[1], E.A. Vyacheslavova[1], V.A. Pozdeev[1,3], E.Ya. Yarchuk[1,3], D.A. Kirilenko[2], A.S. Gudovskikh[1,3]

[1] Alferov University,
194021 St. Petersburg, Russia
[2] Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia
[3] St. Petersburg Electrotechnical University „LETI“,
197022 St. Petersburg, Russia

Abstract The electrophysical properties of periodic GaN/InP multilayer structures grown as a digital alloy and a short-period superlattice on single-crystal Si substrates were investigated by deep-level transient spectroscopy. The GaN and InP layers were deposited by plasma-enhanced atomic layer deposition, in which the GaN growth was carried out without the use of hydrogen- containing plasma. It is shown that the GaN/InP superlattices exhibit a significantly higher interface state density at the boundaries compared to the structures formed as a digital alloy.
Keywords: gallium nitride, indium phosphide, indium nitride, deep-level transient spectroscopy.