

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1092-1097

УДК 538.911, 621.315.592

Нахождение распределения электронов в сверхрешетках AlGaAs/GaAs с узкими барьерами методом вольт-фарадного профилирования

Елена Игоревна Василькова^{1✉}, Евгений Викторович Пирогов²,
Максим Сергеевич Соболев³, Артем Игоревич Баранов⁴,
Александр Сергеевич Гудовских⁵, Алексей Дмитриевич Буравлев⁶

^{1,2,3,4,5} Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алферова РАН, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

^{5,6} Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация

⁶ Университет при МПА ЕвразЭС, Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация

⁶ Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация

¹ elenvasilkov@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-0349-7134>

² zzzavr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7186-3768>

³ sobolevsm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8629-2064>

⁴ itiomchik@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4894-6503>

⁵ gudovskikh@spbau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7632-3194>

⁶ bour@mail.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7432-2091>

Аннотация

Предмет исследования. Исследовано распределение концентрации электронов в однородно легированных кремнием сверхрешетках AlGaAs/GaAs с толщинами слоев 1,5/10 нм и различным количеством квантовых ям. **Метод.** Структуры с одинаковыми параметрами слоев и уровнем легирования, содержащие 3, 5 и 25 периодов, выращены на установке молекулярно-пучковой эпитаксии. Профили концентрации носителей в структурах определены методом вольт-фарадного профилирования экспериментально и с помощью численного моделирования. **Основные результаты.** В результате анализа экспериментальных вольт-фарадных характеристик получено, что концентрация носителей заряда растет с увеличением числа квантовых ям от $7,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (для трех ям) до $9,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (для 25-ти ям) при уровне легирования 10^{17} см^{-3} . На профилях концентрации у части образцов наблюдаются плоские участки насыщения в областях, соответствующих сверхрешетке. Концентрации, полученные из компьютерного моделирования, соответствуют экспериментальным данным с точностью в пределах 10 %. **Практическая значимость.** Вольт-фарадное профилирование позволило определить профиль концентрации носителей по глубине в сверхрешетках с узкими барьерами. Несмотря на то, что метод дает представление о распределении «кажущейся» концентрации носителей, его можно использовать для оценки характера распределения легирующей примеси в гетероструктурах с сильно связанными квантовыми ямами.

Ключевые слова

вольт-фарадное профилирование, сверхрешетки AlGaAs/GaAs, распределение носителей, молекулярно-пучковая эпитаксия

Благодарности

Работа частично поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (FSRM-2020-0008) и Российским фондом фундаментальных исследований (19-29-12053).

Ссылка для цитирования: Василькова Е.И., Пирогов Е.В., Соболев М.С., Баранов А.И., Гудовских А.С., Буравлев А.Д. Нахождение распределения электронов в сверхрешетках AlGaAs/GaAs с узкими барьерами методом вольт-фарадного профилирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 6. С. 1092–1097. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1092-1097

Determination of the electron distribution in thin barrier AlGaAs/GaAs superlattices by capacitance-voltage profiling

Elena I. Vasilkova¹✉, Evgeny V. Pirogov², Maxim S. Sobolev³, Artem I. Baranov⁴,
Alexander S. Gudovskikh⁵, Alexei D. Bouravlev⁶

^{1,2,3,4,5} Alferov Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

^{5,6} Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation

⁶ University under the Inter-Parliamentary Assembly of EurAsEC, Saint Petersburg, 194044, Russian Federation

⁶ Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation

¹ elenvasilkov@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-0349-7134>

² zzzavr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7186-3768>

³ sobolevsm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8629-2064>

⁴ itiomchik@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4894-6503>

⁵ gudovskikh@spbau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7632-3194>

⁶ bour@mail.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7432-2091>

Abstract

Electron density distribution in uniformly doped AlGaAs/GaAs superlattices with respective layer thicknesses 1.5/10 nm and a different number of quantum wells was investigated. Experimental samples containing 3, 5 and 25 periods with the same layer parameters were grown by molecular beam epitaxy. Capacitance-voltage profiling was used to determine the carrier concentration profiles in the structures both numerically and experimentally. During the analysis of experimental capacitance-voltage characteristics it was found that the maximum electron concentration increases with an increase in the number of quantum wells starting from $7.1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ for 3 wells up to $9.2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ for 25 wells with overall superlattice doping level of 10^{17} cm^{-3} . In some samples saturation areas are observed on the concentration profiles, that are associated with the region of superlattice. Concentration values, obtained from computer modeling, correspond to the experimental data with an error of less than 10 %. Capacitance-voltage profiling is a suitable technique for determining the carrier concentration profiles in thin barrier superlattices. Despite the fact that the method provides distribution of the “apparent” carrier concentration profile, it can be used to estimate the dopant atoms distribution in the strongly coupled quantum well heterostructures.

Keywords

capacitance-voltage profiling, AlGaAs/GaAs superlattices, molecular beam epitaxy

Acknowledgments

The work was partly supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSRM-2020-0008) and the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) (19-29-12053).

For citation: Vasilkova E.I., Pirogov E.V., Sobolev M.S., Baranov A.I., Gudovskikh A.S., Bouravlev A.D. Determination of the electron distribution in thin barrier AlGaAs/GaAs superlattices by capacitance-voltage profiling. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 1092–1097 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1092-1097

Введение

На базе A_3B_5 гетероструктур с квантовыми ямами уже долгие годы реализуется множество приложений полупроводниковой сверхвысокочастотной электроники и оптоэлектроники [1, 2]. Среди применений эпитаксиальных квантоворазмерных гетероструктур отметим сверхмногопериодные сверхрешетки AlGaAs/GaAs с сильно связанными квантовыми ямами, излучающие в терагерцовом диапазоне [3]. При изготовлении подобных структур требуется осуществлять прецизионный контроль уровня легирования слоев и профиля распределения атомов примеси, так как от них напрямую зависит частота излучения и эффективность генерации в терагерцовой области спектра.

Наибольшую точность определения профиля примеси в эпитаксиальных слоях GaAs предоставляют классическое вольт-фарадное (C-V, capacitance-voltage) профилирование и метод на основе эффекта Холла [4]. Отметим, что измерение эффекта Холла дает представление лишь о среднем значении концентрации носителей, а не распределению их по структуре, которое

принципиально важно для многопериодных толстых гетероструктур, ориентированных на создание терагерцовых источников. В связи с этим в настоящей работе для исследования распределения электронов в сверхрешетке выбран метод C-V профилирования. Метод основан на зависимости ширины W и емкости C области пространственного заряда, образующейся на границе металл-полупроводник, от приложенного напряжения смещения. Профиль концентрации носителей n (а также профиль залегания примеси) косвенно определяется из вольт-фарадной характеристики по формуле:

$$n(W) = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_0 S^2} \left(\frac{d(1/C^2)}{dV} \right)^{-1}, \quad (1)$$

$$W = \frac{\epsilon_s\epsilon_0 S}{C},$$

где q — заряд электрона; ϵ_s — относительная диэлектрическая проницаемость материала; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; S^2 — площадь контакта металл-полупроводник; V — приложенное напряжение смещения.

Формально C-V профилирование предоставляет информацию о некоей эффективной (или «кажущейся», apparent) концентрации основных носителей. Ее профиль представляет собой усредненную функцию, разрешение которой ограничивается дебаевской длиной экранирования. Кажущаяся концентрация в общем случае не равна ни истинной концентрации электронов, ни концентрации легирующей примеси в структуре, однако, их можно считать приблизительно совпадающими [5]. Например, C-V профилирование применяется для нахождения профиля залегания примеси в GaAs-сверхрешетках в основном с широкими барьерами [6–8]. Исследования распределения носителей в сверхрешетках с сильно связанными квантовыми ямами с помощью C-V профилирования в научных работах представлены реже [8]. Заметим, что ранее данным методом не исследовалась зависимость концентрации электронов от числа периодов сверхрешетки.

Среди существующих экспериментальных способов определения уровня легирования в гетероструктурах метод C-V профилирования выделяется относительной трудозатратностью, так как требует наличия перехода металл-полупроводник, а значит предварительного формирования на экспериментальном образце диодной структуры типа Шоттки. Кроме того, при работе с толстыми структурами, такими как гетероструктуры с большим количеством квантовых ям, следует учитывать, что максимальная глубина профилирования ограничена вследствие возникновения электрического пробоя при высоких напряжениях обратного смещения.

Образцы и методика эксперимента

Рассмотрим A_3B_5 сверхрешетки, состоящие из однородно легированных кремнием 10^{17} см^{-3} барьеров $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ и квантовых ям GaAs толщиной 1,5 и 10 нм соответственно. Данные сверхрешетки имеют конфигурацию слоев, оптимальную для генерации терагерцового излучения [9], но меньшее количество периодов — 3, 5 и 25. Слоевой дизайн структур включает сильно легированный 10 нм GaAs контактный слой, а также верхний 400 нм и нижний 200 нм GaAs слои-обкладки с легированием $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Экспериментальные образцы выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Riber MBE49 на двухдюймовых «*epi-ready*» проводящих подложках GaAs с ориентацией (100).

Профили концентрации свободных электронов по глубине в данных структурах определены с использованием методики C-V профилирования по численно смоделированным и по экспериментальным вольт-фарадным характеристикам. Компьютерное моделирование C-V кривых выполнено с использованием программного обеспечения AFORS-HET 2.5 [10]. Экспериментальные вольт-фарадные характеристики данных образцов получены с помощью прецизионного LCR-метра KEYSIGHT E4980A-001. Измерения выполнены при комнатной температуре на частоте 1 МГц в диапазоне обратных напряжений смещения от 0 до –12 В. Для осуществления эксперимента были подготовлены тестовые структуры с массивами диодов

Шоттки, перед изготовлением которых произведено травление сильно легированного контактного слоя GaAs. Далее методом вакуумного термического напыления на поверхность открывшегося слоя-обкладки GaAs напылены круговые Au/Ge контакты Шоттки, а с тыльной стороны образцов к подложке *n*-типа сформирован сплошной омический контакт.

Результаты и обсуждение

Вид распределения концентрации носителей в выращенных образцах был теоретически предсказан на основе смоделированных вольт-фарадных характеристик и уравнения (1). На рисунке, *a* представлено сравнение профилей кажущейся концентрации, полученных из расчетных C-V кривых, для сверхрешеток с тремя, пятью и 25-ю периодами. Согласно результатам моделирования, распределение электронов имеет максимум в области сверхрешетки, где происходит аккумуляция носителей. Осцилляции значений концентрации, соответствующие областям барьеров и квантовых ям, не наблюдались, так как толщины барьеров не превысили дебаевской длины, и разрешить их по глубине невозможно. Показано, что несмотря одинаковую степень легирования во всех образцах, значения кажущейся концентрации электронов увеличивались с ростом числа периодов в структуре. Максимальные концентрации электронов в сверхрешетке по результатам моделирования для структур составили: с тремя периодами — $6,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, с пятью — $8,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, с 25-ю — $9,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Для образца с 25-ю периодами распределение электронов приходит в насыщение при значении 10^{17} см^{-3} , что совпадает со степенью преднамеренного легирования слоев, образующих сверхрешетку. Исходя из протяженности участка насыщения и разрешения метода, электроны должны быть делокализованы практически по всей области сверхрешетки.

Профили кажущейся концентрации носителей заряда, представленные на рисунок, *b*, рассчитаны по экспериментальным вольт-фарадным характеристикам. Измерения вольт-фарадных характеристик для структуры с 25-ю периодами выполнены в ограниченном диапазоне толщин до 550 нм от поверхности. Это связано с ростом тока утечки при больших напряжениях обратного смещения (свыше 10 В), затрудняющим корректные измерения. Для всех образцов экспериментальная концентрация электронов в верхнем слое-обкладке GaAs с высокой точностью совпадает с заложенной степенью легирования, что позволяет говорить о достоверности измерений и возможности провести анализ профилей концентрации в интересующей нас области сверхрешетки.

Профили кажущейся концентрации имеют единственный ярко выраженный пик, соответствующий накоплению электронов в квантовых ямах, что согласуется с результатами моделирования. Уширение на левом плече распределения носителей образца с 3-мя квантовыми ямами в области толщин от 300 до 400 нм предположительно связано с диффузией электронов в 400-нм слой GaAs. Подобные «хвосты» наблюдались

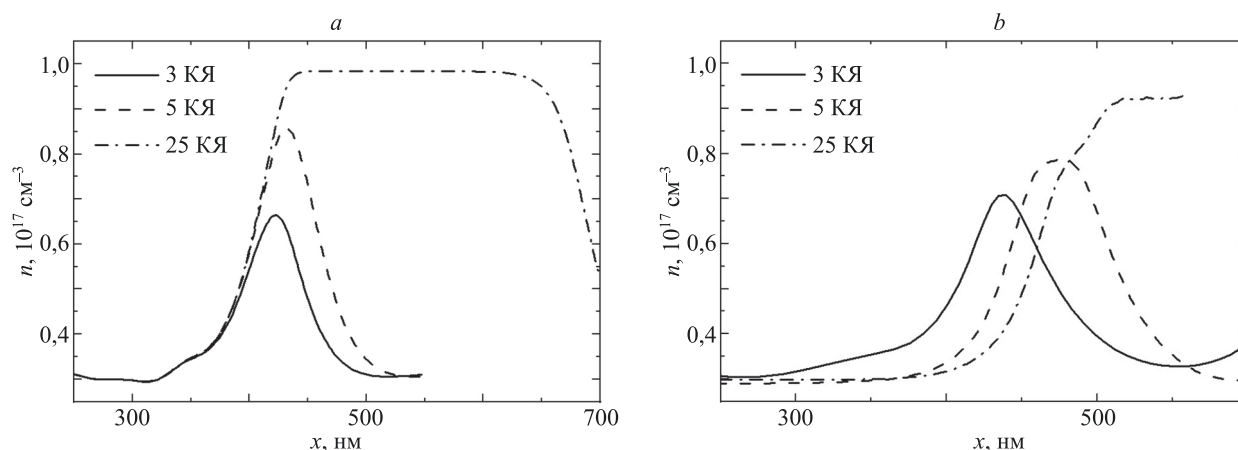


Рисунок. Профили кажущихся концентраций сверхрешеток $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$, содержащих 3, 5 и 25 квантовых ям, полученные из смоделированных (а) и экспериментальных (б) вольт-фарадных характеристик.

x — глубина от поверхности образца, КЯ — квантовая яма

Figure. Apparent concentration profiles of $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ superlattices with 3, 5 and 25 periods, obtained from numerically simulated (a) and experimental (b) capacitance-voltage characteristics. x represents the distance from the sample surface.

КЯ — quantum well

на кривых, полученных из моделирования (рисунок, а), для каждого из образцов. Смещение пиков распределения, соответствующих сверхрешеткам с различным количеством периодов, вероятно связано с тем, что в результате травления контактного слоя GaAs итоговые толщины травленных слоев у разных образцов отличались.

В соответствии с результатами теоретического моделирования на кривых наблюдается рост абсолютных значений концентрации пропорционально увеличению числа квантовых ям в структуре от n равного $7,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (для трех периодов) до $9,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (для 25-ти периодов). Абсолютные значения n для всех образцов соответствуют значениям, предсказанным моделированием, с погрешностью в пределах 10 %. У структур, содержащих 5 и 25 ям, наступает насыщение концентрации носителей на глубине порядка 460 и 500 нм от поверхности соответственно. В областях насыщения распределение электронов имеет плоский участок, который указывает, что электроны делокализованы и распределены по сверхрешетке однородно. Дополнительных особенностей в виде максимумов на профилях концентрации не наблюдается, что говорит об отсутствии флуктуаций толщин эпитаксиальных слоев [8]. Таким образом, метод C-V профилирования может являться дополнительным методом контроля структурного качества сверхрешеток.

Заключение

В работе выполнено исследование распределения свободных носителей заряда в $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ сверхрешетках с сильно связанными квантовыми ямами с использованием методики вольт-фарадного профилирования. Из экспериментальных профилей кажущейся концентрации носителей выявлено, что свободные электроны эффективно накапливаются в квантовых ямах и их концентрация увеличивается с ростом числа периодов сверхрешетки, что также согласуется с результатами моделирования. Для части образцов наблюдается насыщение концентрации электронов, при этом электроны распределены равномерно по области сверхрешетки. При сравнении теоретических профилей распределения носителей с экспериментальными выяснено, что абсолютные значения концентраций, полученные из численного моделирования, являются завышенными, тем не менее отклонение не превышает 10 %. Таким образом, моделирование вольт-фарадных характеристик является эффективным подходом для предсказания характера распределения носителей в сверхрешетках с узкими барьерами.

Отметим, что вольт-фарадное профилирование является методом, подходящим для оценки не только распределения носителей, но и примеси. При этом следует учесть, что в гетероструктурах со сложным зонным строением смоделированная или измеренная методом C-V профилирования концентрация может не давать точного вида профиля залегания примеси.

Литература

1. Del Alamo J.A. Nanometre-scale electronics with III–V compound semiconductors // *Nature*. 2011. V. 479. N 7373. P. 317–323. <https://doi.org/10.1038/nature10677>
2. Fox M., Ispasoiu R. Quantum wells, superlattices, and band-gap engineering // *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*. Cham: Springer International Publishing, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48933-9_40
3. Goray L., Pirogov E., Sobolev M., Ilkiv I., Dashkov A., Nikitina E., Ubyivovk E., Gerchikov L., Ipatov A., Vainer Y., Svechnikov M., Yunin P., Chkhhalo N., Bouravlev A. Matched characterization of super-multiperiod superlattices // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2020. V. 53. N 45. P. 455103. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aba4d6>
4. Мохов Д.В., Березовская Т.Н., Кузьменков А.Г., Малеев Н.А., Тимошнев С.Н., Устинов В.М. Прецизионная калибровка уровня легирования кремнием эпитаксиальных слоев арсенида галлия // Письма в журнал технической физики. 2017. Т. 43. № 19. С. 87–94. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.19.45086.16931>
5. Schroder D.K. *Semiconductor Material and Device Characterization*. 3rd ed. Piscataway, Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2015. 800 с.
6. Tschirner B.M., Morier-Genoud F., Martin D., Reinhart F.K. Capacitance-voltage profiling of quantum well structures // *Journal of Applied Physics*. 1996. V. 79. N 9. P. 7005–7013. <https://doi.org/10.1063/1.361466>
7. Bobylev B.A., Kovalevskaja T.E., Marchishin I.V., Ovsyuk V.N. Capacitance-voltage profiling of multiquantum well structures // *Solid-State Electronics*. 1997. V. 41. N 3. P. 481–486. [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(96\)00186-4](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(96)00186-4)
8. Chiquito A.J., Pusep Yu.A., Mergulhão S., Galzerani J.C. Carrier confinement in an ultrathin barrier GaAs/AlAs superlattice probed by capacitance-voltage measurements // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2002. V. 13. N 1. P. 36–42. [https://doi.org/10.1016/S1386-9477\(01\)00222-3](https://doi.org/10.1016/S1386-9477(01)00222-3)
9. Герчиков Л.Г., Дашков А.С., Горай Л.И., Буравлёв А.Д. Разработка дизайна сверхмногопериодных излучающих структур терагерцевого диапазона, выращиваемых методом молекулярно-пучковой эпитаксии // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2021. Т. 160. № 2. С. 197–205. <https://doi.org/10.31857/S0044451021080058>
10. Varache R., Leendertz C., Gueunier-Farret M.E., Haschke J., Muñoz D., Korte L. Investigation of selective junctions using a newly developed tunnel current model for solar cell applications // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2015. V. 141. P. 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.05.014>

Авторы

Василькова Елена Игоревна — инженер, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 57433507900](https://orcid.org/0000-0002-0349-7134), <https://orcid.org/0000-0002-0349-7134>, elenvasilkov@gmail.com

Пирогов Евгений Викторович — младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 24468711600](https://orcid.org/0000-0001-7186-3768), <https://orcid.org/0000-0001-7186-3768>, zzzavr@gmail.com

Соболев Максим Сергеевич — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, заведующий лабораторией, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 57205203666](https://orcid.org/0000-0001-8629-2064), <https://orcid.org/0000-0001-8629-2064>, sobolevsm@gmail.com

Баранов Артем Игоревич — кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 57195761820](https://orcid.org/0000-0002-4894-6503), <https://orcid.org/0000-0002-4894-6503>, itiomchik@yandex.ru

Гудовских Александр Сергеевич — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация; профессор,

References

1. Del Alamo J.A. Nanometre-scale electronics with III–V compound semiconductors. *Nature*, 2011, vol. 479, no. 7373, pp. 317–323. <https://doi.org/10.1038/nature10677>
2. Fox M., Ispasoiu R. Quantum wells, superlattices, and band-gap engineering. *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*. Cham, Springer International Publishing, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48933-9_40
3. Goray L., Pirogov E., Sobolev M., Ilkiv I., Dashkov A., Nikitina E., Ubyivovk E., Gerchikov L., Ipatov A., Vainer Y., Svechnikov M., Yunin P., Chkhhalo N., Bouravlev A. Matched characterization of super-multiperiod superlattices. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, vol. 53, no. 45, pp. 455103. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aba4d6>
4. Mokhov D.V., Berezovskaya T.N., Kuzmenkov A.G., Maleev N.A., Timoshnev S.N., Ustinov V.M. Precision calibration of the silicon doping level in gallium arsenide epitaxial layers. *Technical Physics Letters*, 2017, vol. 43, no. 10, pp. 909–911. <https://doi.org/10.1134/S1063785017100091>
5. Schroder D.K. *Semiconductor Material and Device Characterization*. 3rd ed. Piscataway, Hoboken, NJ, Wiley-IEEE Press, 2015, 800 c.
6. Tschirner B.M., Morier-Genoud F., Martin D., Reinhart F.K. Capacitance-voltage profiling of quantum well structures. *Journal of Applied Physics*, 1996, vol. 79, no. 9, pp. 7005–7013. <https://doi.org/10.1063/1.361466>
7. Bobylev B.A., Kovalevskaja T.E., Marchishin I.V., Ovsyuk V.N. Capacitance-voltage profiling of multiquantum well structures. *Solid-State Electronics*, 1997, vol. 41, no. 3, pp. 481–486. [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(96\)00186-4](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(96)00186-4)
8. Chiquito A.J., Pusep Yu.A., Mergulhão S., Galzerani J.C. Carrier confinement in an ultrathin barrier GaAs/AlAs superlattice probed by capacitance-voltage measurements. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2002, vol. 13, no. 1, pp. 36–42. [https://doi.org/10.1016/S1386-9477\(01\)00222-3](https://doi.org/10.1016/S1386-9477(01)00222-3)
9. Gerchikov L.G., Dashkov A.S., Goray L.I., Bouravlev A.D. Development of the design of super-multiperiod structures grown by molecular-beam epitaxy and emitting in the terahertz range. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2021, vol. 133, no. 2, pp. 161–168. <https://doi.org/10.1134/S1063776121070037>
10. Varache R., Leendertz C., Gueunier-Farret M.E., Haschke J., Muñoz D., Korte L. Investigation of selective junctions using a newly developed tunnel current model for solar cell applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, vol. 141, pp. 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.05.014>

Authors

Elena I. Vasilkova — Engineer, Alferov Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 57433507900](https://orcid.org/0000-0002-0349-7134), <https://orcid.org/0000-0002-0349-7134>, elenvasilkov@gmail.com

Evgeny V. Pirogov — Junior Researcher, Alferov Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 24468711600](https://orcid.org/0000-0001-7186-3768), <https://orcid.org/0000-0001-7186-3768>, zzzavr@gmail.com

Maxim S. Sobolev — PhD (Physics & Mathematics), Scientific Researcher, Head of Laboratory, Alferov Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 57205203666](https://orcid.org/0000-0001-8629-2064), <https://orcid.org/0000-0001-8629-2064>, sobolevsm@gmail.com

Artem I. Baranov — PhD (Physics & Mathematics), Junior Researcher, Alferov Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 57195761820](https://orcid.org/0000-0002-4894-6503), <https://orcid.org/0000-0002-4894-6503>, itiomchik@yandex.ru

Alexander S. Gudovskikh — D. Sc., Leading Researcher, Alferov Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация, [sc 6602958574](https://orcid.org/0000-0002-7632-3194), <https://orcid.org/0000-0002-7632-3194>, gudovskikh@spbau.ru

Буравлев Алексей Дмитриевич — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Университет при МПА ЕврАзЭС, Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация; профессор, Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник, Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация, [sc 6603227351](https://orcid.org/0000-0002-7432-2091), <https://orcid.org/0000-0002-7432-2091>, bour@mail.ioffe.ru

Petersburg, 197022, Russian Federation, [sc 6602958574](https://orcid.org/0000-0002-7632-3194), <https://orcid.org/0000-0002-7632-3194>, gudovskikh@spbau.ru

Alexei D. Bouravlev — D. Sc. (Physics & Mathematics), Head of Laboratory, University under the Inter-Parliamentary Assembly of EurAsEC, Saint Petersburg, 194044, Russian Federation; Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation; Leading Researcher, Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation, [sc 6603227351](https://orcid.org/0000-0002-7432-2091), <https://orcid.org/0000-0002-7432-2091>, bour@mail.ioffe.ru

Статья поступила в редакцию 18.08.2022
Одобрена после рецензирования 31.10.2022
Принята к печати 27.11.2022

Received 18.08.2022
Approved after reviewing 31.10.2022
Accepted 27.11.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»