

Исследования процессов транспорта носителей заряда в изотипных гетероструктурах типа $n^+-\text{GaAs}/n^0-\text{GaAs}/n^+-\text{GaAs}$ с тонким широкозонным барьером AlGaAs

© С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, О.С. Соболева, В.С. Юферев, В.С. Головин, П.С. Гаврина, Д.Н. Романович, И.В. Мирошников, Н.А. Пихтин

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

E-mail: SergHPL@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 9 января 2020 г.

В окончательной редакции 17 января 2020 г.

Принята к публикации 17 января 2020 г.

Проведены экспериментальные исследования изотипных гетероструктур типа $n^+-\text{GaAs}/n^0-\text{GaAs}/n^+-\text{GaAs}$ с широкозонным барьером $N^0\text{-AlGaAs}$ толщиной 100 нм, расположенным в $n^0\text{-GaAs}$ -области. Показано, что вольт-амперные характеристики исследуемых структур имеют область отрицательного дифференциального сопротивления, при этом переход в данную область происходит с задержкой по времени, которая может достигать десятков нс. Установлено, что работа в области отрицательного дифференциального сопротивления связана с включением процесса ударной ионизации. Численный анализ в рамках модели энергетического баланса показал, что переход в область отрицательного дифференциального сопротивления связан с формированием домена электрического поля, захватывающего часть слабо легированной области между тонким широкозонным барьером $N^0\text{-AlGaAs}$ и сильно легированным слоем $n^+-\text{GaAs}$ и включением ударной ионизации на границе с указанным сильно легированным слоем $n^+-\text{GaAs}$. Сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов моделирования показал, что для корректного описания вольт-амперных характеристик исследуемых гетероструктур в модели необходимо учесть менее выраженную способность гетероперехода ограничивать транспорт носителей в барьерном слое.

Ключевые слова: изотипная гетероструктура, модель энергетического баланса, $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$, ударная ионизация, транспорт в гетероструктурах.

DOI: 10.21883/FTP.2020.05.49258.9344

1. Введение

Квантово-размерные полупроводниковые гетероструктуры могут демонстрировать различные типы нелинейности вольт-амперных характеристик (ВАХ), проявляющиеся в отрицательном дифференциальном сопротивлении (ОДС). Обычно гетероструктуры такого типа включают тонкие широкозонные барьеры, транспорт носителей заряда через которые определяет их свойства. S- или N-форма нелинейности ВАХ может быть использована для решения таких задач как быстрое переключение, генерация микроволнового излучения и т.д. [1]. Эффекты резонансного туннелирования используются в туннельных диодах и транзисторах [2,3]. Достаточно подробно эти эффекты рассматривались в структурах для получения генерации электромагнитного излучения в ТГц частотном диапазоне [4]. Обычно для описания процессов используют квантовые эффекты, связанные с термоэлектронной эмиссией или туннелированием через гетеробарьер [5]. В результате базовым является параметр, характеризующий туннельную прозрачность барьера, а также эффекты, описывающие релаксацию энергии носителей, разогретых электрическим полем, при этом эффекты, связанные с ударной ионизацией в сильных электрических полях, не рассматривались. В работе [6] с использованием метода Монте-Карло

был проведен анализ ВАХ структуры с одиночным барьером, при этом, с одной стороны, был учтен эффект междолинного перераспределения носителей в сильных электрических полях, с другой — область рассмотрения не захватывала эффекты ударной ионизации.

В рамках данной работы проведены экспериментальные исследования и теоретический анализ с использованием модели энергетического баланса особенностей транспорта носителей заряда в $n^+-\text{GaAs}/n^0-\text{GaAs}/n^+-\text{GaAs}$ структурах с широкозонным барьером $N^0\text{-AlGaAs}$, расположенным в слабо легированной $n^0\text{-GaAs}$ -области. Ранее в работах [7,8] экспериментально и теоретически были исследованы особенности транспорта через гетеробарьер, где было показано, что необходимо учитывать ударную ионизацию при анализе особенностей вольт-амперных характеристик.

2. Экспериментальные исследования

Для решения поставленных задач методом МОС-гидридной эпитаксии были изготовлены образцы изотипных гетероструктур типа $n^+-n^0-n^+$ с тонким широкозонным барьером, расположенным в n^0 -слое. Схематическое изображение структуры показано на рис. 1. Структура включала $n^+-\text{GaAs}$ -подложку ($n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$),

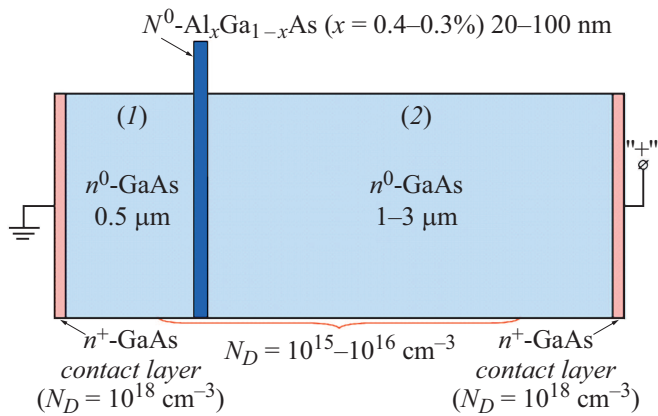


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемой изотипной структуры типа $n^+-GaAs/n^0-GaAs/n^+-GaAs$ с широкозонным барьером $N^0-AlGaAs$, расположенным в n^0-GaAs -области.

на которой были выращены часть (1) слабо легированного слоя n^0-GaAs ($n^0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$) толщиной 0.5 мкм, далее слой широкозонного барьера $N^0-Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ ($N^0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$) толщиной 100 нм, широкозонный слой был закрыт частью (2) слабо легированного слоя n^0-GaAs ($n^0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$) толщиной 2 мкм и далее контактным сильно легированным слоем n^+-GaAs ($n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$) толщиной 0.5 мкм. В структуре были сформированы мезаструктуры круглой формы, диаметром 200 мкм и глубиной 4 мкм. К контактному слою и подложке были сформированы омические контакты AuGe/Au. В первой части работы были проведены экспериментальные исследования ВАХ подготовленных образцов. Для этого использовался генератор импульсов тока длительностью ~ 150 нс. Полярность включения экспериментальных образцов соответствовала следующему порядку: плюс-контактный слой, минус-подложка. Использование контрольного резистора номиналом 1.5 Ом, расположенного последовательно с экспериментальным образцом, позволило контролировать как амплитуду и форму импульсов тока, так и падение напряжения на образце. На рис. 2 показаны типичные импульсы тока, получаемые при накачке исследуемых образцов. Видно, что диапазон токов накачки включает две области. Для первой импульс тока воспроизводит форму, которая получается при использовании только пассивной нагрузки в цепи генератора тока. Для второй области в импульсе тока возникает особенность, выражающаяся в резком увеличении амплитуды тока. Данная особенность возникает в конце импульса и с ростом общего уровня тока накачки смещается к началу импульса (рис. 2). На основании измеренных импульсов тока и напряжения на структуре были построены ВАХ образцов. Так как особенности импульса тока возникают с задержкой и меняются со временем, то для построения ВАХ выбиралось значение времени, для которого определялась как амплитуда тока, так и напряжение на структуре. На рис. 3 показаны „мгно-

венные“ ВАХ, полученные для моментов времени 60 и 80 нс, соответствующих импульсам, показанным на рис. 2. Видно, что независимо от выбранного момента времени общий характер ВАХ остается без изменений. Для полученных „мгновенных“ ВАХ можно выделить три области. В первой области от 0 до 3 А ВАХ имеет характер, близкий к линейному с низким эквивалентным сопротивлением. При переходе во вторую область (от 3 до 6 А) происходит резкое возрастание эквивалентного сопротивления, при этом линейный характер по-

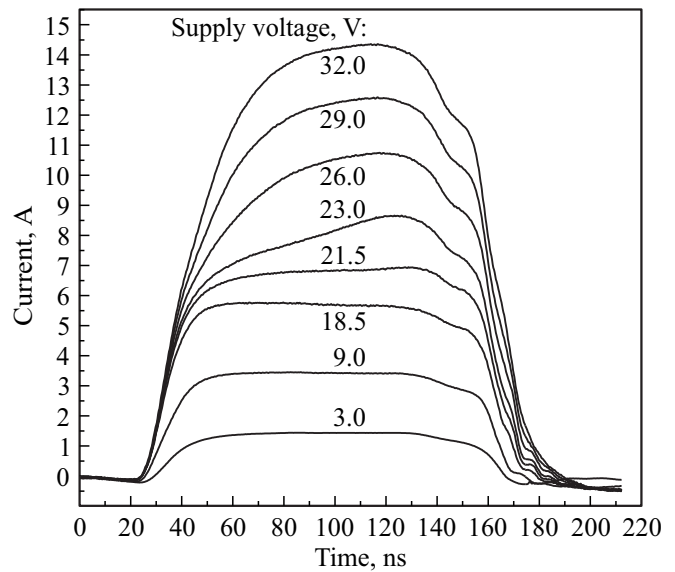


Рис. 2. Импульсы тока через исследуемую изотипную структуру типа $n^+-GaAs/n^0-GaAs/n^+-GaAs$ с широкозонным барьером $N^0-AlGaAs$, расположенным в n^0-GaAs -области.

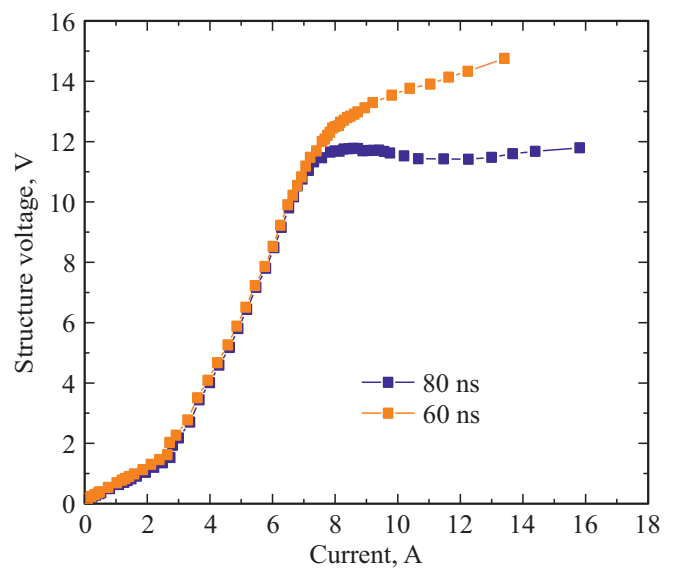


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики для моментов времени 60 и 80 нс (рис. 2), полученные для исследуемой изотипной структуры типа $n^+-GaAs/n^0-GaAs/n^+-GaAs$ с широкозонным барьером $N^0-AlGaAs$, расположенным в n^0-GaAs -области.

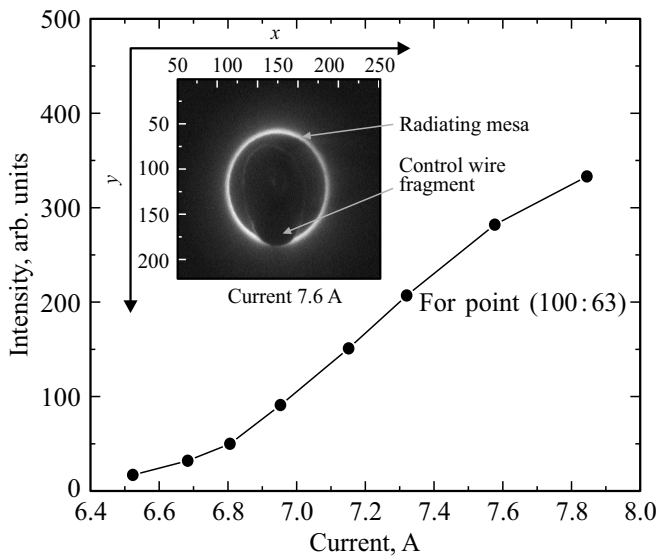


Рис. 4. Зависимость интенсивности оптического излучения от тока через образец для момента времени 80 нс. На вставке — люминесценция при токе накачки 7.6 А.

прежнему сохраняется. Третья область характеризуется S-образной формой ВАХ с участком отрицательного дифференциального сопротивления. На участке ОДС напряжение на структуре падает с 11 до 10 В и с 10.5 до 8 В для моментов времени 60 и 80 нс соответственно. Проведенные ранее экспериментальные исследования особенностей транспорта через гетеробарьер показали, что область ОДС ВАХ была связана с включением ударной ионизации [7,8]. С целью проведения экспериментальной оценки наличия процесса ударной ионизации в исследуемой структуре были выполнены измерения люминесцентных характеристик во всем исследуемом диапазоне токов накачки. Необходимо отметить, что именно процесс люминесценции является индикатором появления дырок в процессе ударной ионизации в изотипных гетероструктурах. Для этого с помощью оптической схемы было сформировано изображение плоскости мезаструктуры на матрице CCD камеры. Так как боковая поверхность мезаструктуры располагалась под углом к плоскости слоев, а также не была закрыта металлом, то часть оптического излучения могла после рассеивания на боковой поверхности излучаться в окружающее пространство, где оно собиралось созданной оптической схемой. На рис. 4 показана зависимость интенсивности люминесценции от тока накачки. Видно, что первый сигнал от оптического излучения соответствует началу сверхлинейного роста тока в области ОДС. Также видно, что при увеличении тока накачки интенсивность оптического излучения возрастает сверхлинейно. Кроме этого, оптический сигнал достаточно равномерно распределен по краю мезаструктуры, что говорит об отсутствии эффекта пространственной локализации тока для исследуемого диапазона уровней накачки.

3. Анализ результатов расчета и сравнение с экспериментом

Для анализа экспериментальных результатов был проведен расчет ВАХ в рамках модели энергетического баланса [9–11]. Ранее модель энергетического баланса использовалась для анализа процессов транспорта через гетеропереход в изотипных гетероструктурах при сверхвысоких уровнях токов накачки [7,8]. На рис. 5 показаны статические ВАХ, рассчитанные при различных значениях параметров конструкции исследуемого типа структуры. В качестве варьируемых параметров конструкции были выбраны: толщина широкозонного барьера $N^0\text{-AlGaAs}$, толщина части (2) слабо легированного слоя $n^0\text{-GaAs}$, концентрация примеси в слабо легированных слоях и состав (высота) широкозонного барьера $N^0\text{-AlGaAs}$. Видно, что для тонкого барьера $N^0\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ общей особенностью всех ВАХ является отсутствие заметного тока утечки на участке блокировки, тогда как для экспериментальных ВАХ начальный участок характеризуется практически линейным ростом тока. Только заметное снижение высоты барьера при замене состава с $N^0\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ на $N^0\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ позволяет сместить переход к заметному току утечки в область меньших напряжений (рис. 5). Другим важным параметром является толщина части (2) слабо легиро-

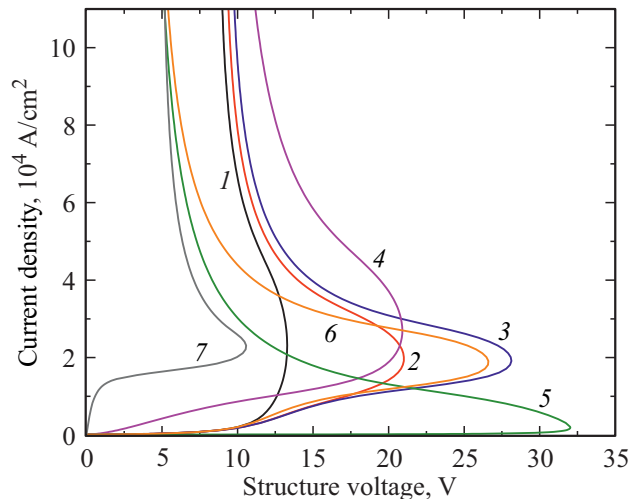


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики, рассчитанные в модели энергетического баланса для различных параметров структуры: 1 — барьер $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.4$) толщиной 100 нм, толщина структуры 1.5 мкм, $N^0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 2 — барьер $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.4$) толщиной 100 нм, толщина структуры 2.5 мкм, $N^0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (параметры экспериментальной структуры); 3 — барьер $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.4$) толщиной 100 нм, толщина структуры 3.5 мкм, $N^0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 4 — барьер $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.4$) толщиной 100 нм, толщина структуры 2.5 мкм, $N^0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 5 — барьер $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.4$) толщиной 20 нм, толщина структуры 3.5 мкм, $N^0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 6 — барьер $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.4$) толщиной 20 нм, толщина структуры 3.5 мкм, $N^0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 7 — гомоструктура (GaAs) толщиной 2.5 мкм, $N^0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

ванной области n^0 -GaAs. Видно, что увеличение данного значения приводит к росту максимального блокирующего напряжения, при этом изменение толщины части (1) слабо легированной области n^0 -GaAs не оказывает влияния на величину блокирующего напряжения. Проведенные расчеты показали, что концентрация примеси в слабо легированном слое влияет на характер блокирующей ветки ВАХ. Видно, что при уровне легирования ниже $n^0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ утечка тока в области блокировки ВАХ практически отсутствует. Повышение уровня легирования приводит к появлению области с заметным током утечки на блокирующем участке ВАХ, а также к снижению максимального блокирующего напряжения, что связано с повышением электрического поля вблизи барьера N^0 -AlGaAs и возросшим током. Заметный вклад в значение остаточного напряжения в области ОДС дает толщина барьера N^0 -AlGaAs. Видно, что снижение толщины барьера N^0 -AlGaAs позволяет уменьшить остаточное напряжение в области ОДС (рис. 5).

Проведем анализ процессов, определяющих характер ВАХ на примере модельной структуры: толщина барьера $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ — 20 нм, толщина части (1) слабо легированного слоя n^0 -GaAs — 0.5 мкм, толщина части (2) слабо легированного слоя n^0 -GaAs — 3 мкм, концентрация примеси 10^{16} см^{-3} в слабо легированных областях n^0 -GaAs и N^0 -AlGaAs. Видно, что для блокирующей ветки ВАХ домен поля расширяется от барьера N^0 -AlGaAs до границы части (2) слабо легированного слоя n^0 -GaAs со слоем n^+ -GaAs (рис. 6). Блокирующая ветвь ВАХ состоит из двух частей: первая часть соответствует начальному участку ВАХ, где током утечки можно пренебречь, и вторая часть, где ток утечки существенный. Переход ко второй части блокирующей ветви ВАХ сопровождается накоплением избыточных

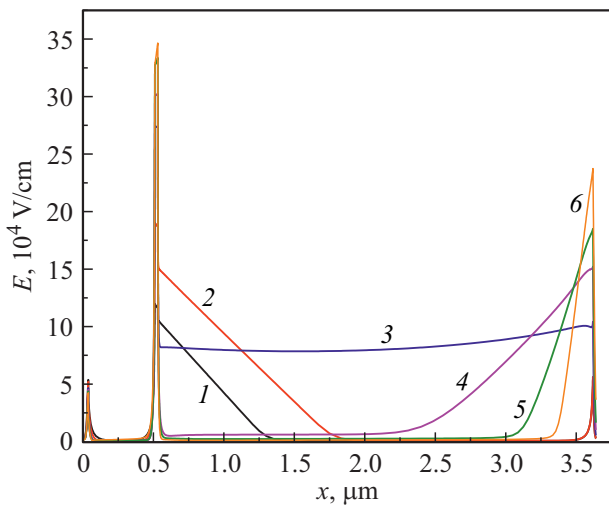


Рис. 6. Распределение электрического поля в структуре с параметрами экспериментальной (ВАХ для данной структуры приведена на рис. 5, линия 2) для различных значений плотности тока, kA/cm^2 : 1 — 0.2, 2 — 2, 3 — 20, 4 — 40, 5 — 80, 6 — 200.

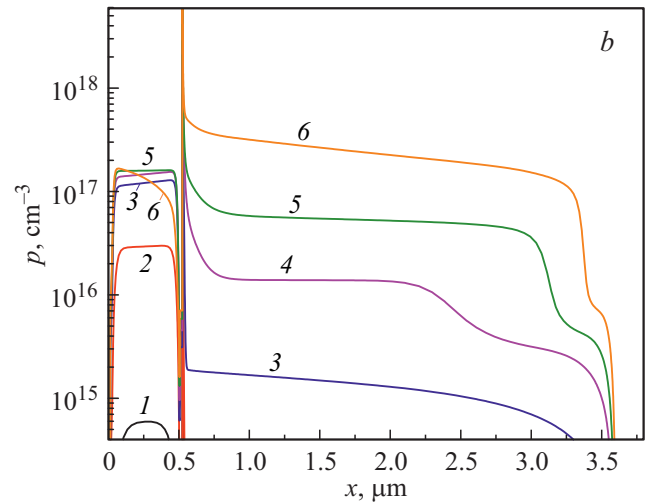
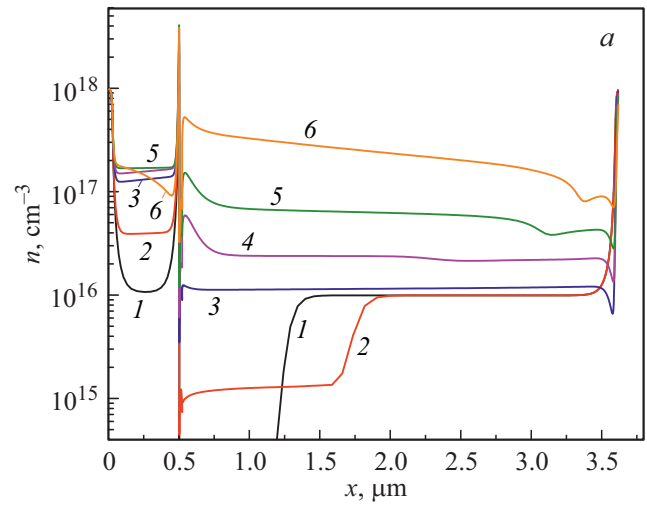


Рис. 7. Распределение электронов (a) и дырок (b) в структуре с параметрами экспериментальной для различных значений плотности тока, kA/cm^2 : 1 — 0.2, 2 — 2, 3 — 20, 4 — 40, 5 — 80, 6 — 200.

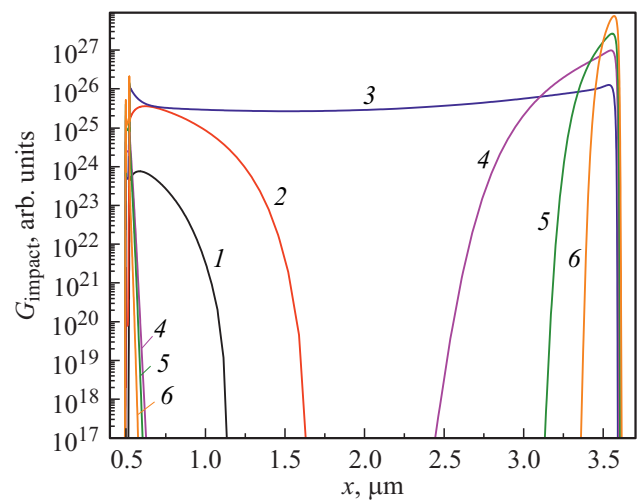


Рис. 8. Распределение скорости ударной ионизации в структуре с параметрами экспериментальной для различных плотностей тока, kA/cm^2 : 1 — 0.2, 2 — 2, 3 — 20, 4 — 40, 5 — 80, 6 — 200.

электронов и дырок в части (1) слоя n^0 -GaAs заметно выше уровня легирования, а также электронов в области электрического поля части (2) слоя n^0 -GaAs (рис. 7, *a* и *b*). Одним из факторов, который определяет переход от первой части блокирующей ветви ВАХ ко второй, является рост скорости ударной ионизации в области барьера N^0 -AlGaAs (рис. 8). Переход в область ОДС происходит при выполнении двух условий: (i) домен электрического поля заполнит полностью часть (2) слоя n^0 -GaAs и (ii) начнется процесс ударной ионизации на границе части (2) слоя n^0 -GaAs со слоем n^+ -GaAs (рис. 7 и 8). Это позволяет сформировать источник избыточных дырок, которые формируют достаточно высокую концентрацию электронно-дырочной плазмы в части (2) слоя n^0 -GaAs (рис. 7). Именно высокая концентрация электронно-дырочной плазмы в части (2) слоя n^0 -GaAs разбивает электрическое поле на два узких домена (рис. 6): первый — на границе с широкозонным барьером, второй — на границе части (2) слоя n^0 -GaAs со слоем n^+ -GaAs, а также позволяет сбросить напряжение на структуре и сформировать область ОДС (рис. 5).

4. Заключение

Сравнение полученных результатов моделирования ВАХ (рис. 5) с экспериментальными зависимостями (рис. 3) показывает, что, несмотря на совпадение общего характера полученных зависимостей, имеют место серьезные отличия. Рассмотрим их подробнее. Первое отличие наблюдается уже для начального участка блокирующей ветви ВАХ и связано оно с наличием заметной токовой утечки. Как показали проведенные расчеты, ограничение в протекании тока на начальном участке ВАХ связано с влиянием тонкого широкозонного барьера N^0 -AlGaAs. Действительно, снижение высоты барьера заметно смещает область появления заметной токовой утечки в область меньших напряжений. При этом в предельном случае гомоструктуры расчет дает те же характерные области ВАХ, что наблюдаются в экспериментальных измерениях. Кроме этого получающееся в эксперименте максимально блокирующее напряжение (10–12 В) заметно ниже максимального блокирующего напряжения модельной структуры (20–22 В), при этом в области ОДС напряжение модельных структур снижается до 2 раз, тогда как в эксперименте это падение не превышает 1.2 раза. Однако, если мы проведем сравнение указанных выше параметров с модельной гомоструктурой, то увидим недооценку максимального блокирующего напряжения. Таким образом, с одной стороны, имеет место некоторая переоценка вклада тонкого широкозонного барьера N^0 -AlGaAs как области, ограничивающей транспорт носителей заряда, что проявляется в недооценке тока утечки в начальной области блокирующей ветви ВАХ, с другой — влиянием тонкого широкозонного барьера N^0 -AlGaAs на распределение электрического поля в структуре пренебрегать

нельзя, что проявляется в недооценке максимального блокирующего напряжения для предельного случая гомоструктуры. Таким образом, корректный анализ процессов транспорта носителей заряда в рамках модели энергетического баланса позволяет учитывать процессы ударной ионизации в объемных слоях, при этом описание транспорта через локальные области потенциальных барьеров требует введения дополнительных параметров, например, учитывающих эффективную высоту гетеробарьеров.

Финансирование работы

Авторы С.О. Слипченко, О.С. Соболева, В.С. Юферев, В.С. Головин благодарят РФФИ (Российский фонд фундаментальных исследований) за финансовую поддержку исследования (грант № 18-08-01130 А).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N. Balkan, B.K. Ridley, A.J. Vickers. *Negative Differential Resistance and Instabilities in 2D Semiconductors*, NATO ASI Series (Plenum Press, N.Y., 1993) v. 307.
- [2] S. Ohki, H. Funato, M. Suhara, T. Okumura, L.E. Wernersson, W. Seifert. *Appl. Surf. Sci.*, **190** (1–4), 288 (2002).
- [3] J. H. Tsai. *Solid-State Electron.*, **44** (6), 1049 (2000).
- [4] A. Reklaitis. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **46** (14), 145107 (2013).
- [5] V.Y. Aleshkin, L. Reggiani, A. Reklaitis. *Phys. Rev. B*, **63** (8), 085302 (2001).
- [6] V.Y. Aleshkin, L. Reggiani, A. Reklaitis. *J. Appl. Phys.*, **90** (8), 3979 (2001).
- [7] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, V.S. Yuferev, V.S. Golovin, P.S. Gavrina, D.N. Romanovich, N.A. Pikhtin. *Semiconductors*, **53** (6), 806 (2019).
- [8] O.S. Soboleva, V.S. Yuferev, A.A. Podoskin, N.A. Pikhtin, V.V. Zolotarev, V.S. Golovin, S.O. Slipchenko. To be published in *IEEE Trans. Electron Dev.* (2020).
- [9] T. Grassier, T.W. Tang, H. Kosina, S. Selberherr. *Proc. IEEE*, **91** (2), 251 (2003).
- [10] Y. Apanovich, E. Lyumkis, B. Polsky, A. Shur, P. Blakey. *IEEE Trans. Comput. Aid. D.*, **13** (6), 702 (1994).
- [11] R. Stratton. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **19** (12), 1288 (1972).

Редактор А.Н. Смирнов

**Investigations of the processes
of charge carrier transport
in isotype heterostructures
of the n^+ -GaAs/ n^0 -GaAs/ n^+ -GaAs type
with a thin wide-gap AlGaAs barrier**

*S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva,
V.S. Yuferev, V.S. Golovin, P.S. Gavrina,
D.N. Romanovich, I.V. Miroshnikov, N.A. Pikhtin*

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Experimental studies of isotype heterostructures of the n^+ -GaAs/ n^0 -GaAs/ n^+ -GaAs type with a wide-gap N^0 -AlGaAs barrier with a thickness of 100 nm located in the n^0 -GaAs region were carried out. It was shown that the I - V characteristic of the structures under study has a region of negative differential resistance (NDR), while the transition to this region occurs with a time delay that can reach tens of ns. It is established that work in the field of NDR is connected with the inclusion of the process of impact ionization. A numerical analysis within the framework of the energy balance model showed that the transition to the NDR region is associated with the formation of an electric field domain that captures part of the lightly doped region between the thin wide-gap N^0 -AlGaAs barrier and the heavily doped n^+ -GaAs layer and the inclusion of impact ionization at the interface with the indicated highly doped n^+ -GaAs layer. A comparative analysis of experimental data and modeling results showed that for the correct description of the I - V characteristic of the structures under study the model must take into account reduced current limiting ability of the barrier layer.