

Сравнение особенностей транспорта электронов и субтетрагерцовой генерации в диодах на основе 6-, 18-, 30-, 70- и 120-периодных сверхрешеток GaAs/AlAs

© Е.С. Оболенская¹, А.С. Иванов¹, Д.Г. Павельев¹, В.А. Козлов^{1,2}, А.П. Васильев^{3,4}

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

² Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603087 Нижний Новгород, Россия

³ Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук,

194021 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,

194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: bess009@mail.ru

Поступила в Редакцию 24 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2019 г.

Принята к публикации 29 апреля 2019 г.

Проведено сравнение особенностей транспорта электронов в диодах на основе 6-, 18-, 30-, 70- и 120-периодных подобных сверхрешеток GaAs/AlAs, при этом количество периодов и площадь диодов были различными. Сопоставлены значения паразитных сопротивлений приконтактных областей диодов, и определена величина удельного падения напряжения на одном периоде сверхрешетки для всех особых точек на вольт-амперных характеристиках диодов. Исследован механизм возникновения стабильных колебаний тока в диодах на основе 6-, 18-, 30-, 70- и 120-периодных сверхрешеток GaAs/AlAs с высоким уровнем легирования.

Ключевые слова: сверхрешетки, транспорт электронов, диоды, ТГц генерация.

DOI: 10.21883/FTP.2019.09.48127.10

1. Введение

Возможность возникновения отрицательной дифференциальной проводимости и генерации в сверхрешетках ранее обсуждалась в ряде работ [1–4]. В [1] было показано, что сверхрешетки (СР) могут обладать отрицательной дифференциальной проводимостью, которая сохраняется вплоть до терагерцового (ТГц) диапазона частот. В [2] предложено для создания СР использовать сверхтонкие барьеры. Возможность получения ТГц генерации в устройствах на основе диодов, включающих СР с малым количеством периодов, показана в [3]. Такой тип ТГц генерации аналогичен доменной генерации в диодах Ганна [3,4].

В данной работе сопоставлены механизмы возникновения колебаний тока в диодах на основе 6-, 18-, 30-, 70- и 120-периодных сверхрешеток GaAs/AlAs с высоким уровнем легирования. За счет сопоставления параметров диодов, включающих близкие по конструкции сверхрешетки, была экспериментально определена зависимость средней дрейфовой скорости электронов от напряженности поля в диодах. Это позволило предложить аналог критерия Крэмера для исследования процесса стабильных колебаний тока в СР с малым числом периодов с учетом квазибаллистического характера движения электронов в активной области диодов.

2. Эксперимент

Исследовались диоды, изготовленные на основе 6-, 18-, 30-, 70- и 120-периодных сверхрешеток GaAs/AlAs, их конструкция [4] показана на рис. 1 и 2, а параметры — в табл. 1. Были измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) 15–30 образцов каждого типа. На рис. 3 сопоставлены типичные экспериментальные

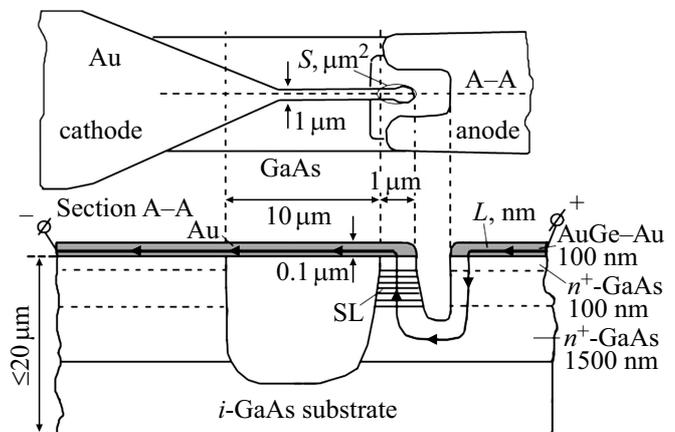


Рис. 1. Конструкция исследуемых диодов. L — длина рабочей области диода со сверхрешеткой, стрелками показано направление тока в диоде. S — площадь контакта.

ВАХ $I(U)$ диодов. Так как диоды имели различную площадь и разное количество периодов активной области СР (рис. 2, *c*), то для проведения корректного сравнения ВАХ нормировали на значения напряжений и токов в максимуме. Из рис. 3 видно, что присутствует сходство между ВАХ для диодов с разным количеством периодов активной области СР, а именно наличие экстремумов max 1 и max 2.

Очевидно, что чем меньше количество периодов СР в активной области диода, тем сильнее влияет сопротивление приконтактных областей диодов на вид ВАХ. Сопоставление параметров диодов позволило на начальном участке ВАХ определить удельное сопротив-

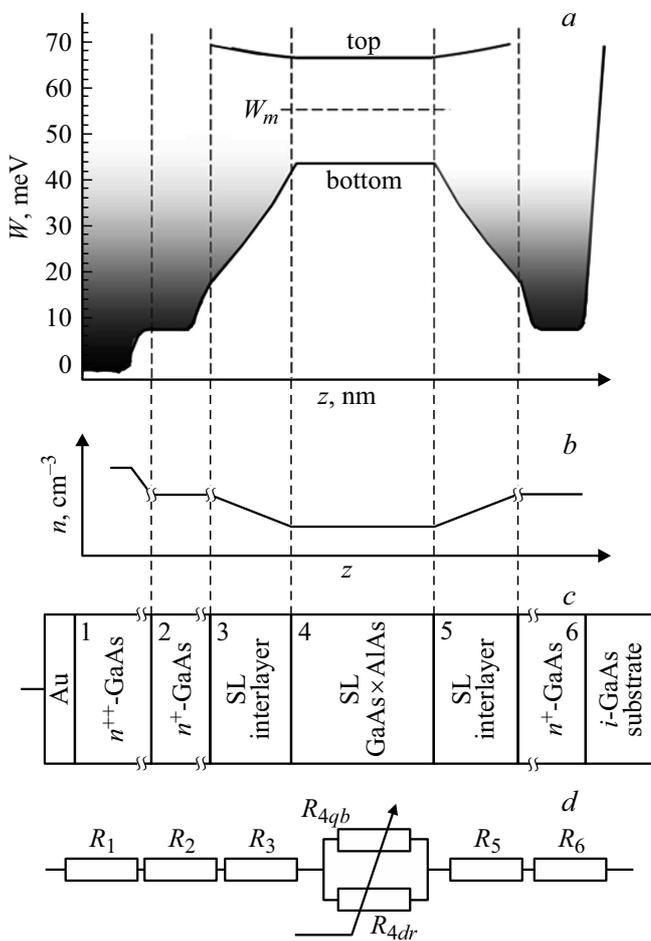


Рис. 2. Зонная диаграмма, состав слоев и эквивалентная схема исследуемых диодов. *a* — энергетическая диаграмма минизоны с учетом переходных слоев, градиентным затемнением показано распределение электронов по энергии W , W_m — середина минизоны. *b* — концентрация доноров в сверхрешетке. *c* — описание слоев диодной структуры (4 — активная область СР, 3 и 5 — переходные слои, состоящие из чередующихся слоев AlAs и GaAs с толщинами в единицах монослоев указанных полупроводников 1×28 , 2×24 и 3×21). *d* — эквивалентная схема, R_1, R_6 — сопротивления слоев, R_{4qb} описывает квазибаллистическое движение, R_{4dr} — дрейфовое. Уровень легирования и количество монослоев в сверхрешетке приведены в табл. 1.

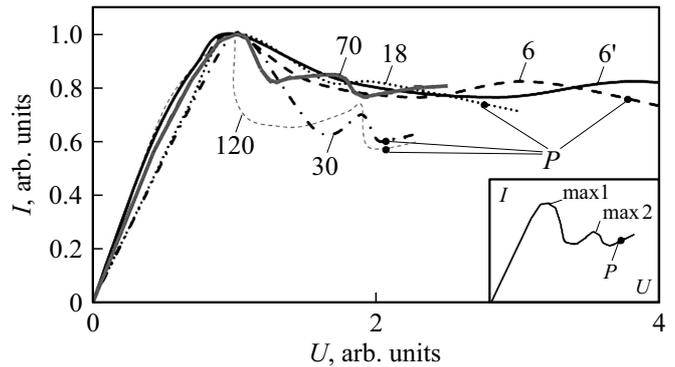


Рис. 3. Сравнение экспериментальных вольт-амперных характеристик диодов. Числа у кривых — количество периодов СР в диодах. $6'$ — расчетная ВАХ для диодов на основе СР с 6 периодами без влияния сопротивлений контактов. P — рабочая точка по напряжению смещения, для которой наблюдалась устойчивая генерация ТГц сигнала. На вставке схематически показан общий вид вольтамперной характеристики исследуемых диодов, указаны первый (max 1) и второй (max 2) максимумы тока.

ление 1 периода СР, которое для СР с соотношением монослоев 4×18 (см. табл. 1) составило 23 Ом/мкм^2 . Это дало возможность для каждого экспериментального диода определять сопротивление контактов, включая их металлизацию, контактное сопротивление, сопротивление растекания и т.д. С учетом того, что величина сопротивления контактов не зависит от приложенного напряжения, так как напряженность электрического поля в контактах мала, возможно определение падения напряжения на активной области СР для любого внешнего напряжения смещения. Последнее позволило определять среднюю напряженность поля в СР при различных напряжениях смещения.

Ранее в работе [4] была предложена модель контактов диодов и показано наличие разброса контактного сопротивления. Подход, предложенный в данной работе, позволил минимизировать погрешность определения сопротивления активной области СР для конкретных исследуемых образцов диодов. Было получено, что для 18-периодной СР соотношение сопротивлений активной области СР и контактов составляет примерно $3 : 1$, для СР с большим числом периодов сопротивлением контактов вообще можно пренебречь. Для 6-периодной СР указанные сопротивления примерно равны, что требует обязательного уточнения сопротивления конкретного образца СР при обработке результатов измерений.

В результате использования описанного выше подхода сопоставление ВАХ диодов было проведено достаточно корректно. Из рис. 3 видно, что второй максимум (max 2) для 6-периодной СР в 3–4 раза больше по напряжению, чем первый, в то время как для остальных диодов только в 1.5–2 раза, несмотря на то что конструкция диодов подобна. Учет влияния сопротивления контактов приводит к еще большему сдвигу ВАХ вправо.

Таблица 1. Параметры исследуемых диодов

Количество периодов СР	6	18	30	70	120
Длина активной области диодов L , нм	37	111	186	435	746
Легирование активной области диода n , см ⁻³	10 ¹⁸	10 ¹⁸	10 ¹⁸	2 · 10 ¹⁷	1.4 · 10 ¹⁷
Площадь контакта S , мкм ² (см. рис. 1)	1	5	6	10	64
Кол-во монослоев в СР*, GaAs × AlAs	18 × 4	18 × 4	18 × 4	14 × 3	14 × 3

Примечание.* Для СР с 3 монослоями AlAs толщина барьера по данным рентгеноструктурных исследований составляла $\sim (9-10)$ Å, с 4 монослоями 10–11 Å, так что параметры минизон в указанных сверхрешетках были сопоставимы и составляли 24–35 мэВ с учетом неоднородности изготовления барьерных слоев AlAs по поверхности полупроводниковой структуры [2].

Таблица 2. Параметры диодов в режиме автогенерации и характеристики генерируемого сигнала

Количество периодов СР	6	18	30	70	120
Ток в рабочей точке, мА (см. рис. 3)	1.2–1.3	10–12	12–13	5.6–6	12–13
Напряжение в рабочей точке, мВ (см. рис. 3)	0.5–0.6	0.7–0.9	1.5–1.7	2–2.2	2.4–2.6
Частота генерации F , ГГц	200–250	70–120	50–100	70–100	30–70
Период колебаний, пс	4–5	8–14	10–20	10–14	14–33
Мощность генерируемого сигнала P , мкВт	≤ 1	20–30	50–200	200–400	400–900
Эффективность генератора, %	≤ 0.1	1	1	1	1–2

Причины сдвига максимума ВАХ для диодов с малым числом периодов будут обсуждаться далее.

Для проведения ТГц измерений диоды размещались в волноводной камере. Частота и мощность генерируемого ТГц сигнала определялась при помощи фурье-спектрометра с приемником на криогенном болометре [5,6]. При нулевом постоянном напряжении смещения ТГц генерация отсутствовала. При постоянных напряжениях смещения в диапазоне между максимумами $\max 1$ и $\max 2$ на ВАХ диодов регистрировалась шумовая генерация. Максимум мощности стабильных колебаний наблюдался при выборе рабочей точки при напряжении выше второго максимума ВАХ. Частоты и мощности наблюдаемых стабильных колебаний представлены в табл. 2.

3. Обсуждение результатов эксперимента

Для расчетов транспорта электронов совместно использовались одночастичный метод Монте-Карло и квазигидродинамическая модель [7–9].

При напряжении немного ниже первого максимума на ВАХ (рис. 3), когда генерация отсутствует, электрическое поле однородно в латеральной плоскости, не

изменяется во времени и приложено вдоль оси СР. Расчет проводился для комнатной температуры. Параметры активной области СР таковы, что все электроны движутся в единственной минизоне СР. В качестве основных механизмов рассеяния электронов рассматривалось рассеяние на акустических фонах, полярных оптических фонах, атомах ионизированной примеси. Все параметры материала, необходимые для расчета частот рассеяния, выбирались такие же, как для объемного GaAs.

Сокращение числа периодов СР до 6 приводит к тому, что важным становится начальный участок движения, когда электроны инжектируются из контакта в активную область СР, где сосредоточено большое продольное поле. В этом случае квазибаллистический характер движения может распространяться на большую часть активной области СР так, что средняя скорость электронов может быть в 2–5 раз выше, чем в длинных СР [9,10]. Указанные результаты расчетов в данной работе подтверждаются оценкой скорости электронов в СР путем простейшего пересчета ВАХ диодов по формуле $j = env$, где j — плотность тока, e — заряд электрона, n — концентрация электронов, v — их скорость (рис. 4).

Следует отметить, что на экспериментальных зависимостях скоростей от напряженности поля перепад скоростей в максимуме и минимуме несколько выше, чем на расчетных кривых, полученных методом Монте-

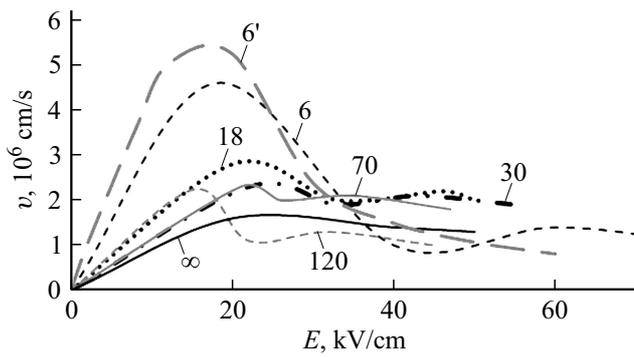


Рис. 4. Расчетная зависимость средней скорости электронов v от напряженности электрического поля E в активной области исследуемых диодов: ∞ — расчетная зависимость [4] (расчет проводился в приближении бесконечной CP); $6'$ — расчет методом Монте-Карло (для 6-периодной CP) [10]; остальные линии — расчет из экспериментальных ВАХ. Числа у кривых — количество периодов CP в диодах.

Карло. Это объясняется тем, что при измерении низкочастотных ВАХ в диодах будет возникать доменная генерация, так что пересчет тока в скорость дает среднюю скорость электронов по времени, которая определяется средней скоростью движения домена. Это коррелирует с данными работ [3,4]. Также следует отметить, что само наличие второго максимума на ВАХ — это результат возникновения стабильной генерации, за счет чего средняя скорость электронов, а значит, и средний ток несколько снижаются. Аналогичный эффект возникновения стабильной генерации на ВАХ известен и для диодов Ганна [11].

Сравнение исследуемых диодов показало, что второй максимум на ВАХ всех диодов, кроме диода на 6-периодной CP, соответствует такому напряжению на диоде, когда падение напряжения на одном периоде CP становится больше, чем отношение ширины минизоны CP к заряду электрона. Для диода с 6-периодной CP напряжение второго максимума в 1.5–2 раза выше. Это будет объяснено далее с использованием предложенного в данной работе аналога критерия Кремера.

В описанном выше эксперименте с помощью наблюдения ТГц генерации было показано, что увеличение напряжения смещения переводит шумовую генерацию в стабильную с шириной линий генерации по уровню 3дБ ~ 10 МГц. Наблюдалась перестройка частоты до +100 МГц при увеличении напряжения смещения на CP от второго максимума до прекращения генерации (до 0.5 В выше второго максимума). Проведенное в данной работе сравнение режимов работы диодов показывает: при увеличении напряжения смещения выше второго максимума на ВАХ среднее напряжение на CP таково, что на одном периоде падает напряжение выше, чем отношение ширины минизоны к заряду электрона. Это приводит к „разрушению“ („разрыву“) минизоны. В таких условиях движение электронов в CP затруднено,

что существенно влияет на величину отрицательной дифференциальной проводимости CP.

Следует отметить, что при концентрации доноров и электронов $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в CP расстояние между ними составляет ~ 10 нм, при длине CP в 6-периодном диоде 37 нм это приводит к накоплению 3–5 электронов на всей длине CP. Таким образом, дипольный домен в таком диоде минимально возможный и близок к единичным монослоям электронов и доноров, которые представляют собой заряженные обкладки эквивалентного конденсатора, соответствующего дипольному домену. Характерное время формирования указанного домена составляет ~ 1 пс. Моделирование показало, что при напряжениях смещения, соответствующих второму максимуму ВАХ, формируется дипольный домен, внутри которого поле велико, и за счет образования области пространственного заряда концентрация электронов, а также и их скорость близки к нулю. Вне домена поле мало, концентрация электронов велика и им разрешено перемещаться по минизоне CP. При движении домена область с „замершими“ электронами перемещается за счет диффузионного обмена электронами между областями большого и малого поля. Подобный механизм формирования домена значительно эффективнее с точки зрения построения ТГц генераторов, чем механизм отрицательной проводимости, определяемой столкновением электронов с потолком минизоны, так как наблюдаемые в эксперименте отрицательная дифференциальная проводимость, мощность ТГц сигнала и эффективность генератора (табл. 1) в целом значительно выше, чем рассчитанные теоретически исходя из предположения, что „разрушения“ („разрыва“) минизон нет.

Для сравнения условий возникновения автогенерации было предложено использовать аналог критерия Кремера [11]: $nL > (3\epsilon v_s m^* / e^2 \tau_p)$, где n — концентрация электронов, L — длина диода, m^* — масса электрона, v_s — средняя скорость электронов, ϵ — диэлектрическая проницаемость, τ_p — время релаксации импульса, e — заряд электрона [4,12]. Исключение из критерия Кремера подвижности, использование эффективной массы и времени релаксации импульса позволяют учесть квазибаллистический характер движения электронов с CP с малым числом периодов (см. скорость и время пролета CP в табл. 3). Конкретные значения времен релаксации вычислялись нами с помощью моделирования методом Монте-Карло [10].

Результаты расчетов с использованием предложенного аналога критерия Кремера показывают, что с уменьшением количества периодов в CP диодов разница в правой и левой частях приведенного неравенства снижается, так что для диодов с 6 периодной CP указанные выражения примерно совпадают, что недостаточно для возникновения стабильной генерации. Поэтому возникновение стабильной генерации в эксперименте наблюдается только при напряжениях второго максимума на ВАХ в 1.5–2 раза выше, чем у диодов с большим количеством периодов в CP (рис. 3), где аналог критерия Кремера

Таблица 3. Сравнение режимов работы исследуемых диодов. В последней строке приведен расчет с использованием аналога критерия Кремера

Количество периодов СР	6	18	30	70	120
Ширина минизоны СР, мэВ	25 ± 3	25 ± 3	25 ± 3	25–35	25–35
Плотность тока: max 1, 10 ⁵ А/см ² max 2, 10 ⁵ А/см ² max 1/max 2	1.7 1.4 1.21	2.8 2.2 1.27	3.2 2.17 147	0.48 0.4 1.2	0.31 0.188 1.65
Напряжение на 1 периоде СР: max 1, мВ max 2, мВ max 1/max 2	11 57 0.19	12 29 0.41	14 27 0.52	13 22 0.6	10 21 0.48
Время пролета СР: max 1, пс max 2, пс max 1/max 2	0.7 2.7 0.52	4.1 5.1 0.8	5.9 8.6 0.69	18 20 0.9	33 56 0.58
Напряженность электрического поля E: max 1, кВ/см max 2, кВ/см max 1/max 2	18 60 ± 20 0.194	20 46 ± 5 0.434	22 43 ± 3 0.512	21 35 ± 2 0.6	15 32 ± 2 0.469
Скорость электронов: max 1, 10 ⁶ см/с max 2, 10 ⁶ см/с max 1/max 2	4.6 1.4 3.28	2.8 2.2 1.27	2.2 2.1 1.05	2.4 2.1 1.13	2.23 1.3 1.72
$nL/(3ev_s m^* / e^2 \tau_p)$: max 1 max 2	1.3 (0.9*) 10	8 11	11.2 20	7 8	9 25

Примечание.* Значение скорости, вычисленное методом Монте-Карло.

выполняется строго уже при напряжениях смещения, соответствующих первому максимуму.

Следует также отметить, что характерное время пролета (табл. 3) 6-периодной СР составляет < 1 пс, что позволяет говорить о возможности построения генераторов с частотами генерируемых сигналов 1 ТГц и выше. В то же время экспериментально полученное значение эффективности генератора на 6-периодной СР на порядок меньше (табл. 2), чем эффективность генераторов на СР с большим числом периодов. Это может объясняться тем, что в генераторе реализуется режим с задержкой доменообразования на каждом периоде колебаний. Такой режим генерации известен для диодов Ганна и характеризуется возможностью значительной перестройки по частоте, но малой эффективностью генератора по сравнению пролетным режимом генерации. Последнее позволяет надеяться на повышение эффективности и частоты генерируемого сигнала для генератора на 6-периодной СР за счет оптимизации резонатора.

Важно отметить, что при дальнейшем сокращении числа периодов СР в диодах квазибаллистическая скорость электронов будет возрастать еще больше, что приведет к ограничению инжекции электронов из контакта. Как рост скорости, так и снижение концентрации элект-

тронов приведут к тому, что аналог критерия Кремера перестанет выполняться. Таким образом, для диодов с (3–4)-периодными СР можно ожидать подавления доменообразования. Это открывает возможность проявления отрицательной дифференциальной проводимости и ТГц генерации, связанной с пролетными эффектами без доменообразования [13]. Последнее открывает возможности разработки ТГц генераторов на СР, связанных с наличием блоховской неустойчивости.

4. Заключение

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы.

Предложенный в работе метод исключения сопротивления контактов имеет низкую погрешность. С использованием указанного метода получено, что у диодов на основе 6-периодной СР сопротивления контактов и самой сверхрешетки примерно равны, что требует обязательного уточнения сопротивлений конкретного экспериментального образца. Это важно, так как чем меньше количество периодов СР в диоде, тем сильнее влияет сопротивление приконтактных областей диодов

на вид ВАХ. Было получено удельное сопротивление 1 периода СР, которое для СР с соотношением монослоев 18×4 (см. табл. 1) составило 23 Ом/мкм^2 .

Проведенное в данной работе сравнение режимов работы диодов показывает, что при увеличении напряжения смещения выше второго максимума на ВАХ среднее напряжение на СР таково, что на одном периоде СР падает напряжение выше, чем отношение ширины минизоны к заряду электрона. В таких условиях движение электронов в СР затруднено, что существенно влияет на величину отрицательной дифференциальной проводимости СР. Таким образом, квазибаллистическое движение в совокупности с „разрушением“ („разрывом“) зон дает значительно большую отрицательную дифференциальную проводимость.

При дальнейшем сокращении числа периодов СР в диодах квазибаллистическая скорость электронов будет возрастать еще больше, что приведет к ограничению инжекции электронов из контакта. Это приведет к тому, что аналог критерия Кримера перестанет выполняться, и для диодов с (3–4)-периодными СР можно ожидать подавления доменообразования. Следовательно, сокращение числа периодов в СР позволит подавить доменную генерацию, что открывает возможности построения генераторов на основе блоховских осцилляций.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L. Esaki, R. Tsu. IBM J. Res. Dev., **14**, 61 (1970).
- [2] E. Schomburg, S. Brandl, K.F. Renk, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, A.Yu. Egorov, R.N. Kyutt, B.V. Volovik, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, A. Rosenauer, D. Litvinov, D. Gerthsen, D.G. Pavel'ev, Yu. Koschurinov. Phys. Lett. A, **262** (4–5), 396 (1999).
- [3] A.A. Ignatov, D.G. Pavel'ev, S. Winnerl, E. Schomburg, J. Grenzer, H.-J. Regl, A.D. Semenov, K.F. Renk, Yu. Koschurinov, B. Melzer, V. Ustinov, S. Ivanov, S. Schaposchnikov, P.S. Kop'ev. Phys. Rev. B, **56** (16), 10303 (1997).
- [4] Д.Г. Павельев, Н.В. Демарина, Ю.И. Кошуринов, А.П. Васильев, Е.С. Семёнова, А.Е. Жуков, В.М. Устинов. ФТП, **38** (9), 1141 (2004).
- [5] Д.Г. Павельев, Ю.И. Кошуринов, А.С. Иванов, А.Н. Панин, В.Л. Вакс, В.И. Гавриленко, А.В. Антонов, В.М. Устинов, А.Е. Жуков. ФТП, **46** (1), 125 (2012).
- [6] D.G. Pavelyev, V.A. Kozlov, E.S. Obolenskaya, S.V. Obolensky, V.M. Ustinov, A.P. Vasilev. IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., **8** (2), 231 (2018).
- [7] S.V. Obolensky, A.V. Murel, N.V. Vostokov, V.I. Shashkin. IEEE Trans. Electron Dev., **58** (8), 2507 (2011).
- [8] Д.Г. Павельев, А.П. Васильев, В.А. Козлов, Ю.И. Кошуринов, Е.С. Оболенская, С.В. Оболенский, В.М. Устинов. ФТП, **50** (11), 1548 (2016).
- [9] Д.Г. Павельев, А.П. Васильев, В.А. Козлов, Ю.И. Кошуринов, Е.С. Оболенская, С.В. Оболенский, В.М. Устинов. Журн. радиоэлектроники, **1**, 1. (2016).
- [10] Д.Г. Павельев, А.П. Васильев, В.А. Козлов, Е.С. Оболенская, С.В. Оболенский, В.М. Устинов. ФТП, **51** (11), 1439 (2017).
- [11] Шур М. *Современные приборы на основе арсенида галлия* (М., Мир, 1991).
- [12] D.G. Pavel'ev, E. Schomburg, K. Hofbeck, R. Scheuerer, M. Haussler, K.F. Renk, A.-K. Jappsen, A. Amann, A. Wacker, E. Schöll, Yu. Koschurinov. Phys. Rev. B, **65** (15), 155320 (2002).
- [13] А.С. Тареп, В.М. Вальд-Перлов. *Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ* (М., Сов. радио, 1968).

Редактор Л.В. Шаронова

Comparison of features of electron transport and terahertz generation in diodes based on 6-, 18-, 30-, 70-, and 120-period GaAs/AlAs superlattices

E.S. Obolenskaya¹, A.S. Ivanov¹, D.G. Pavelyev¹, V.A. Kozlov^{1,2}, A.P. Vasilev^{3,4}

¹ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

² Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, 603087 Nizhny Novgorod, Russia

³ Research and Engineering Center for Submicron Heterostructures for Microelectronics, 194021 St. Petersburg, Russia

⁴ Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The features of electron transport in diodes based on 6-, 18-, 30-, 70-, and 120-period GaAs/AlAs superlattices with similar design, but in which number of periods and the area of the diodes were different are compared. The values of the parasitic resistances of the near-contact regions of the diodes are compared and the magnitude of the specific voltage drop over one period of the superlattices is determined for all the special points on the current–voltage characteristics of the diodes. The mechanism of the occurrence of stable current oscillations in diodes based on 6-, 18-, 30-, 70-, and 120-period GaAs/AlAs superlattices with a high doping level is investigated.