

Генерация в двухбарьерной резонансно-туннельной структуре, стабилизированная микрополосковым резонатором

© А.А. Белоушкин, Ю.А. Ефимов, А.С. Игнатъев, А.Л. Карузский, В.Н. Мурзин, А.В. Пересторонин, Г.К. Расулова, А.М. Цховребов, Е.Г. Чижевский

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
117924 Москва, Россия

(Получена 21 августа 1995 г. Принята к печати 11 августа 1997 г.)

Впервые исследована генерация в двухбарьерной резонансно-туннельной структуре на основе гетеропереходов GaAs/AlAs, стабилизированная микрополосковым резонатором. Изготовленные структуры содержат приконтактные слои (спейсеры), препятствующие проникновению примесей в активную часть структуры и улучшающие временные характеристики системы. Микрополосковые контакты из сплава AuNiGe, связывающие структуру с внешней высокочастотной цепью, изготовлены в планарном исполнении, позволяющем минимизировать время задержки RC в области отрицательной дифференциальной проводимости благодаря уменьшению последовательного сопротивления и емкости структуры. Обнаружено сложное поведение отрицательной дифференциальной проводимости, обусловленное влиянием пространственного заряда в структурах со слоями-спейсерами.

Введение

Недавние теоретические и экспериментальные исследования отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) двухбарьерных резонансно-туннельных структур (ДБРТС) показали, что характерные времена переноса заряда в таких структурах очень малы (менее 100 фс) [1,2]. Еще более перспективными в этом отношении представляются асимметричные структуры, состоящие из двух и более квантовых ям [3–6], благодаря резкому уменьшению прозрачности барьеров при нарушении резонансных условий для уровней энергии в квантовых ямах. Сочетание микрополосковой техники с нелинейными устройствами миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов на основе таких структур обещает прогресс в продвижении частоты генерации в область терагерцовых частот.

Отношение пикового тока к току в долине на участке ОДП вольт-амперной характеристики (ВАХ) является показателем качества ДБРТС и сильно зависит от степени рассеяния носителей тока на ионизованных примесях. С целью увеличения этого отношения нелегированные разделяющие слои (спейсеры) помещаются в структуру между сильно легированными электродами и туннельными барьерами, что предотвращает проникновение примесей в активную часть структуры во время процесса эпитаксиального роста [7–11]. Введение спейсеров уменьшает примесное рассеяние и улучшает частотные характеристики ДБРТС. Как показано в данной работе, присутствие таких слоев приводит к особенностям как в ВАХ, так и в высокочастотном поведении ДБРТС, определяемым изгибом зон, а также возникновением квазисвязанных уровней в области спейсера вблизи сильно легированного электрода [9,11] и накоплением пространственного заряда в квантовой яме и в области спейсера. Эти эффекты сопровождаются возникновением бистабильности и гистерезиса в статических и динамических характеристиках системы [9,10,12], а также особенностями в нелинейных свойствах ДБРТС.

Технология изготовления двухбарьерных резонансно-туннельных структур и техника эксперимента

Исследованные структуры изготавливались методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием результатов компьютерного моделирования. Структура изготавливалась на полуизолирующей подложке GaAs и содержала: 1000 нм n^+ -AlGaAs, легированного Si до уровня 10^{18} см^{-3} ; 14 нм нелегированного GaAs, 4,5 нм AlAs, 4 нм GaAs, 4,5 нм AlAs, 7 нм нелегированного GaAs, 10 нм n^- -GaAs, легированного Si до уровня $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 500 нм n^+ -GaAs, легированного Si до уровня $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Меза-структуры диаметром 0.014 или 0.028 мм и планарные коллекторные контактные площадки формировались фотолитографическим методом на нижнем n^+ -слое, с последующим вытравливанием. Для формирования омических контактов использовалась изоляция из SiO_2 и металлический сплав AuGeNi. Планарные квадратные ($0.05 \times 0.05 \text{ мм}^2$) эмиттерные и коллекторные омические контакты из этого сплава образовывали отрезки микрополосковых линий с диэлектриком SiO_2 , связывающих ДБРТС с внешней сверхвысокочастотной (СВЧ) цепью.

Для использования в СВЧ эксперименте пластина, на которой изготавливались ДБРТС, раскалывалась на кристаллы размером $0.25 \times 0.25 \times 0.1 \text{ мм}^3$. Кристалл с содержащейся на нем меза-структурой монтировался в микрополосковую плату держателя, связанную в свою очередь с микрополосковым резонатором. В качестве диэлектрической подложки в микрополосковой плате держателя использовался оксид алюминия. Микрополосковая линия на кристалле GaAs соединялась с позолоченной микрополосковой линией на плате держателя с помощью припаивания золотыми проволочками. Для изучения генерационных процессов микрополосковый держатель со структурой был смонтирован в микрополосковом резонаторе с целью выполнения СВЧ измерений с помощью анализатора спектра в диапазоне

0.01 ÷ 40 ГГц, либо для измерения частоты с помощью частотомера. Резонатор представлял собой четвертьволновой отрезок (с одним открытым и другим закороченным концом) микрополосковой линии шириной 2 мм и длиной 200 мм, связанный через резистивный делитель с внешней коаксиальной линией. Он был изготовлен методом вытравливания из Cu на одной стороне плоской диэлектрической подложки толщиной 1.5 мм с двусторонней металлизацией. Металлизированный слой на другой стороне подложки выполнял роль 2-го заземленного плоского проводника микрополосковой линии. Подложка представляла собой прямоугольник из стеклотекстолита длиной 200 мм и шириной 30 мм с диэлектрической проницаемостью, равной 2. Частота основной гармоники резонатора равнялась 0.29 ГГц. Напряжение смещения на ДБРТС подводилось через резистивный делитель к его коллекторному контакту. Эмиттерный контакт структуры подсоединялся к полосковому проводнику резонатора в точке, расположенной на расстоянии 70 мм от короткозамкнутого конца резонатора. СВЧ характеристики этой микрополосковой цепи, используемой для стабилизации колебаний ДБРТС в диапазоне частот порядка 1 ГГц, предварительно исследовались с помощью серийного туннельного диода на $p-n$ -переходе типа 3И101В, который монтировался в микрополосковом резонаторе вместо ДБРТС. При использовании туннельного диода была получена генерация с выходной мощностью порядка десятков микроватт на частоте 0.58 ГГц, что соответствует полуволновой резонансной моде резонатора. Наблюдались также четвертьволновые и одноволновые гармоники с частотами 0.29 и 1.1 ГГц соответственно, выходная мощность которых была на 2 порядка ниже.

Статические характеристики

Статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) ДБРТС показана на рис. 1 (линия a). Отношение пикового тока к току долины составляло 4.3 при температуре 77 К (при комнатной температуре эта величина была немного меньше [9,10]), а пиковая плотность тока равнялась $2.2 \cdot 10^4$ А/см². Измерения были выполнены на меза-структуре диаметром 0.028 мм с последовательным сопротивлением внешней цепи 2.5 Ом. Отрицательное напряжение смещения подавалось на коллекторный контакт. Экспериментально наблюдались неустойчивость и гистерезис ВАХ при напряжениях (0.6–1.0) В, соответствующих области ОДП. Данные эффекты могут быть вызваны внутренней бистабильностью структуры, которая усиливается внешней неустойчивостью системы благодаря планарной конфигурации контактов [9,10].

Микроволновая генерация

Микроволновая генерация на основе резонансного туннелирования в ДБРТС со спейсерными слоями наблюдалась при подаче отрицательного смещения в области ОДП при напряжениях смещения между 0.78 и 1.0 В.

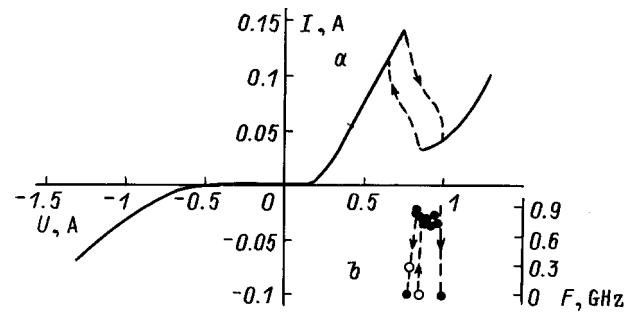


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика двухбарьерной резонансно-туннельной структуры диаметром 0.028 мм при 77 К (a). Штриховой линией показана область гистерезиса, в которой наблюдается токовая неустойчивость. Частота генерации F в зависимости от напряжения смещения U , подаваемого на структуру при $T = 77$ К (b). Стрелками обозначены значения U , при которых происходит возбуждение (\uparrow) и срыв (\downarrow) генерации, светлые кружки соответствуют неустойчивым состояниям.

Измерения производились при 77 К. Выходная мощность в этом случае была в несколько раз меньше выходной мощности, наблюдаемой в случае туннельного диода на $p-n$ -переходе. В частотном поведении структуры наблюдался динамический гистерезис. Генерация возникла в районе критического значения 0.85 В как при повышении, так и при понижении напряжения. После возникновения устойчивая генерация затем наблюдалась при варьировании напряжения смещения в интервале $0.78 \text{ В} < V < 1.0 \text{ В}$. При этом частота генерации изменялась, как показано на рис. 1 (зависимость b), и срыв генерации происходил в крайних точках этого интервала. Отчетливая корреляция между характерными точками кривой динамического гистерезиса самовозбуждения генерации и статической ВАХ позволяет высказать предположение о наличии внутренней бистабильности структуры, обусловленной пространственным перераспределением заряда. Заметим, что в случае туннельного диода на $p-n$ -переходе динамический гистерезис не наблюдался.

Величина динамического сопротивления в области ОДП для ДБРТС была существенно больше, чем для туннельного диода на $p-n$ -переходе, о чем свидетельствует различие частот генерации ДБРТС (0.8 ГГц) и туннельного диода (0.58 ГГц), стабилизированных одним и тем же микрополосковым резонатором. Частота генерации ДБРТС соответствует ($\frac{3}{4}\lambda$)-моде резонатора, при которой точка соединения ДБРТС и резонансной полоски соответствует пучности поперечного электрического поля этой резонансной моды. Поскольку ДБРТС включена в направлении поперечного электрического поля, наличие пучности этого поля в точке его включения в цепь резонатора указывает на большую величину динамического сопротивления структуры. Другим важным отличием поведения ДБРТС от туннельного диода явилось обнаруженное наличие глубокой (порядка 50%) амплитудной модуляции колебаний, генерируемых ДБРТС. Наблюдались два значения характерных ча-

стот модуляции. В диапазоне напряжений смещения от 0.8 до 0.96 В частота модуляции составляла 20 МГц, глубина модуляции порядка 50%, а на краях области существования незатухающих колебаний вблизи 0.78 и 1.0 В наблюдалась амплитудная модуляция с частотой 1 МГц и глубиной $\leq 10\%$. Учитывая, что характерные времена нерезонансного туннелирования в структурах, состоящих из нескольких квантовых ям с параметрами, близкими к исследованной ДБРТС, при температуре 77 К имеют значения порядка нескольких наносекунд или порядка 200 нс (долгоживущая компонента) [13], можно предположить, что наблюдаемая амплитудная модуляция может быть вызвана колебаниями пространственного заряда, накапливаемого в ДБРТС со спейсерными слоями вследствие процессов нерезонансного туннелирования.

Многоямные резонансно-туннельные структуры

Приведенные выше результаты относятся к структурам типа ДБРТС. Как показано в работах [3–6], более перспективными представляются квантово-размерные резонансно-туннельные структуры с несколькими квантовыми ямами, в частности трехбарьерные (двухъямные) структуры. Условие резонанса в электрическом поле соответствует ситуации, когда уровень Ферми и нижние уровни размерного квантования в обеих ямах оказываются вблизи друг друга, т.е. структура должна быть асимметричной (ширина ям неодинакова). Ближайшее расстояние между уровнями соответствует области антипересечения (см. вставку на рис. 2). Изменения параметров асимметричной квантово-размерной структуры позволяют независимым образом менять как отношение токов в пике и долине, так и величину пикового тока в отличие от ДБРТС, где такое изменение принципиально

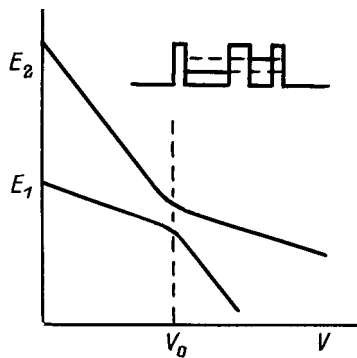


Рис. 2. Положение энергетических уровней размерного квантования E_1 и E_2 в асимметричной структуре из 2-х квантовых ям (см. вставку) в зависимости от приложенного напряжения V . Величина V_0 — напряжение, при котором резонансные уровни в ямах сближаются на минимальное расстояние, определяемое прозрачностью барьера, и распределение электронной плотности на уровнях выравнивается между ямами.

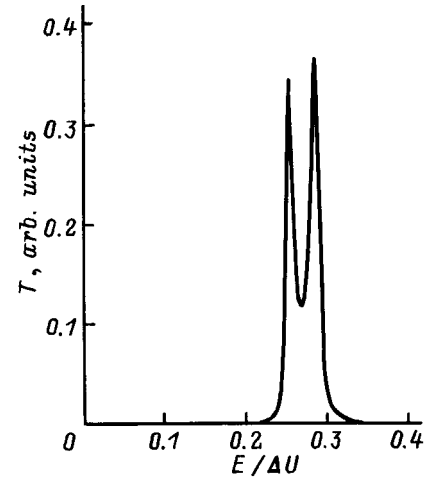


Рис. 3. Зависимость коэффициента прозрачности T от энергии носителей тока E при прохождении асимметричной двухъямной структуры с размерами: 1-й барьер — 3 нм, 1-я яма — 6 нм, 2-й барьер — 5 нм, 2-я яма — 6.5 нм, 3-й барьер — 3 нм; ΔU — высота барьера.

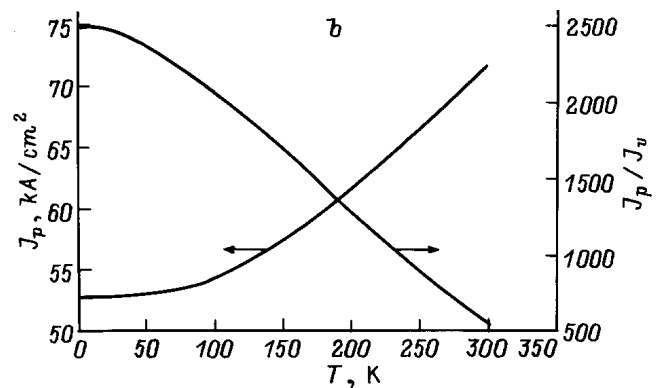
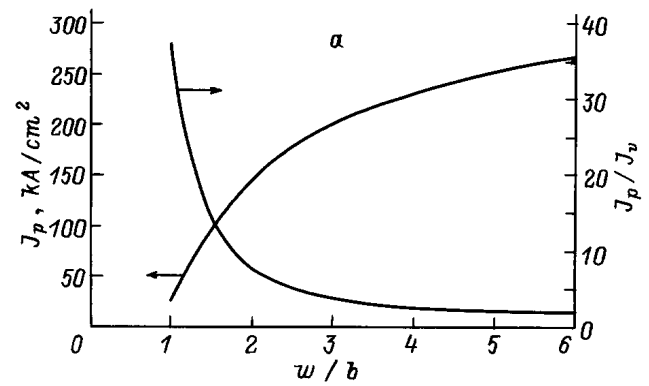


Рис. 4. Рассчитанные зависимости плотности пикового тока J_p и отношения токов в пике и в долине вольт-амперной характеристики J_p/J_v : *a* — от относительной толщины барьера b/w для симметричной одноямной структуры при толщине ямы $w = 45$ нм; *b* — от температуры T для двухъямной структуры со следующими размерами: 1-й барьер — 2.83 нм, 1-я яма — 7.358 нм, 2-й барьер — 5.66 нм, 2-я яма — 3.962 нм, 3-й барьер — 5.943 нм.

исключено. Это позволяет при высокой электронной прозрачности в достаточно широком интервале напряжений (рис. 3), при одном и том же соотношении токов в пике и в долине ВАХ достигать существенно больших значений самой величины пикового тока по сравнению с ДБРТС (рис. 4). В приведенных расчетах не учитывалось рассеяние носителей заряда на примесях [8]. Однако возникающая в данном случае возможность раздельного варьирования параметров системы открывает в принципе новые перспективы для создания резонансно-туннельных структур с оптимальными характеристиками. Включение этих структур в системы с микрополосковыми резонаторами, как следует из оценок, должно значительно улучшить высокочастотные параметры генераторов, полученных на их основе.

Заключение

Впервые продемонстрирована возможность получения стабилизированной микрополосковым резонатором микроволновой генерации на основе ДБРТС со спейсерными слоями. В поведении системы обнаружены явления динамического гистерезиса и модуляции микроволновых колебаний. Полученные результаты указывают на перспективность резонансно-туннельных структур с несколькими квантовыми ямами с точки зрения продвижения эффекта генерации в сторону терагерцовых частот.

Работа выполнена при поддержке по государственным научно-техническим программам "Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники" (грант 133/57/2), "Физика твердотельных наноструктур" (грант 1-012), "Актуальные направления в физике конденсированных сред. Сверхпроводимость" (грант 93190) и благодаря поддержке Международной ассоциации INTAS (грант 93-1704).

Список литературы

- [1] E.R. Brown, T.C.L.G. Sollner, C.D. Parker, W.D. Goodhue, C.L. Chen. *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 1777 (1989).
- [2] E.R. Brown, J.R. Soderstrom, C.D. Parker, L.J. Mahoney, K.M. Molvar, T.C. McGill. *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 2291 (1991).
- [3] A.A. Gorbachev, V.M. Kolyzhenkov. *Proc. of Intern. Workshop on Physics and Modelling of Low-Dimensional Structures Based Devices* (Aizu, Japan, 1995) p. 68.
- [4] W.S. Truscott. *Sol. St. Electron.*, **37**, 1235 (1994).
- [5] H.G. Roskos, M.C. Nuss, J. Shah, K. Leo, D.A.B. Miller, A.M. Fox, S. Schmitt-Rink, K. Kohler. *Phys. Rev. Lett.*, **68**, 2216 (1992).
- [6] E.R. Brown, C.D. Parker, A.R. Calawa, M.J. Manfra. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 3016 (1993).
- [7] A.A. Belouskkin, E.G. Chizhevskii, Yu.A. Efimov, A.S. Ignatyev, A.L. Karuzskii, V.N. Murzin, A.V. Perestoronin, G.K. Rasulova, A.M. Tskhovrebov. In: *Abstracts of Int. Symp. "Nanostructures: physics and technology"* (St.Petersburg, Russia, May–Yune 1995) p. 431.
- [8] S. Muto, T. Inata, H. Ohnishi, N. Yokoyama, S. Hiamizu. *Japan. J. Appl. Phys.*, **25**, 577 (1986).
- [9] А.С. Игнатъев, В.Е. Каминский, В.Б. Копылов, В.Г. Моке-ров, Г.З. Немцев, С.С. Шмелев, В.С. Шубин. *ФТП*, **26**, 1795 (1992).
- [10] А.С. Игнатъев, А.В. Каменев, В.Б. Копылов, Д.В. Посвинский. *ФТП*, **27**, 769 (1993).
- [11] F. Laruelle, G. Faini. *Sol. St. Electron.*, **37**, 987 (1994).
- [12] С.А. Стоклицкий, В.Н. Мурзин, Ю.А. Митягин, В.И. Кадушкин, Ю.А. Ефимов, Г.К. Расулова. *Кр. сообщ. по физике ФИАН*, № 9–10, 10 (1994).
- [13] А.В. Квит, А.Л. Карузский, В.Н. Мурзин, А.В. Пересторонин. *Кр. сообщ. по физике ФИАН*, № 9–10, 3 (1994).

Редактор Т.А. Полянская

Double barrier resonant tunneling oscillations stabilized by a microstrip resonator

A.A. Beloushkin, Yu.A. Efimov, A.S. Ignatyev, A.L. Karuzskii, V.N. Murzin, A.V. Perestoronin, G.K. Rasulova, A.M. Tskhovrebov, E.G. Chizhevskii

P.N. Lebedev Physical Institute,
Russian Academy of Sciences,
117924 Moskow, Russia

Abstract Microwave oscillations have been observed for the first time from GaAs/AlAs double barrier resonant tunneling structures (DBRTS) stabilized by a microstrip resonator. The DBRTSs were investigated with undoped spacer layers, inserted between heavily doped electrodes and tunneling barriers, which prevented segregated impurities from incorporating into the active part of the structure improving the frequency response of DBRTS. Microstrip AuNiGe interconnection of the active layer suitable to the probes used in microstrip resonator circuiting have been obtained in a coplanar configuration. The coplanar contacts provide the extremely low RC time delay in the negative-differential conductance (NDC) region due to a decrease in the capacitance and the series resistance of a DBRTS device. The obtained microwave data reveal the complicated behaviour of the NDC in the spacer-claded DBRTS.

E-mail: karuz@sci.fian.msk.su

Fax: (007-095)-9382251