

Особенности латеральной электропроводности легированных островковых Si/Ge-структур p -типа

© В.А. Гергель^{¶¶}, Т.М. Бурбаев*, В.А. Курбатов^{¶¶¶}, А.О. Погосов*, М. Рзаев*,
Н.Н. Сибельдин*, И.М. Щелева[¶], М.Н. Якупов

Институт радиотехники и электроники Российской академии наук,
125009 Москва, Россия

* Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
119991 Москва, Россия

(Получена 9 ноября 2006 г. Принята к печати 23 ноября 2006 г.)

Выполнен численный расчет проводимости структур с профилированным легированием вдоль направления протекания тока с учетом разрывов зон на границах высокоомных и низкоомных областей. Найдено, что вольт-амперные характеристики таких структур должны иметь S -образный вид, в пределе с отрицательным участком вольт-амперной характеристики, при этом критическим параметром теории является резкость гетероперехода между узкозонной и широкозонной составляющими структуры и степень легирования. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии изготовлены легированные островковые структуры Si/Si_{1-x}Ge_x p -типа проводимости с различными размерами островков и различными величинами разрывов зон. Результаты теоретического анализа сопоставлены с результатами измерений латеральной электропроводности выращенных структур.

PACS: 73.40.Lq, 73.61.Cw, 73.63.Bd

1. Введение

Наноразмерные структуры с профилированным вдоль направления тока легированием должны обладать характерными особенностями электропроводности, представляющими практический интерес. В работах [1,2] показано, что чередующиеся низкоомные области, введенные в канал полевого транзистора, должны привести к повышению средней скорости носителей в канале за счет эффективного охлаждения электронного газа в низкоомных включениях.

Эта ситуация численно моделирована в рамках квазигидродинамической модели в работе [3], результаты которой могут быть применены и к островковым структурам Si/Si_{1-x}Ge_x n -типа проводимости, в которых проводимость островков существенно выше, чем проводимость матрицы, и для которых разрывами зоны проводимости на гетерограницах при комнатной температуре можно пренебречь. По этой же причине практическое моделирование такой структуры требует непосредственного и раздельного легирования Si-области и островков Si_{1-x}Ge_x, что тесно связано с вопросом о влиянии легирования на морфологию структуры, которое частично изучено пока лишь для высокого содержания примеси, сравнимого с количеством основного материала [4].

Не менее интересным и целесообразным представляется исследовать высокополевой дрейфовый процесс в сильно легированных структурах другого типа, а именно в наноразмерных гетероструктурах, где достаточно сильные изменения электропроводности обусловлены зонным несоответствием, в результате которого часть

подвижных носителей из широкозонных слоев переходит в узкозонные, обеспечивая тем самым выравнивание уровня Ферми. Практически это могут быть все те же островковые структуры Si/Si_{1-x}Ge_x, но уже p -типа проводимости, для которых ситуация технологически более проста, поскольку в этом случае можно квазиоднородно легировать область структуры вне зоны собственно островков, а соответствующие пространственные изменения концентрации дырок автоматически возникают в результате зонного несоответствия.

В настоящей работе выполнен необходимый теоретический анализ, учитывающий потенциальные барьеры на границах гетеропереходов, а также приведены результаты ростовых экспериментов и измерения электропроводности островковых пленок, в известной степени подтверждающие выводы теории о характере нелинейности вольт-амперных характеристик (ВАХ).

2. Теория

Как и в предыдущих работах [2,3], в основу моделирования положим известную систему уравнений квазигидродинамики, включающую уравнения Пуассона и непрерывности,

$$\begin{aligned} \frac{d^2\varphi}{dx^2} &= \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}(N_A - p), \\ \frac{dj_p}{dx} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

и уравнение энергетического баланса,

$$\frac{dj_T}{dx} = j_p \frac{d(\varphi + \varphi_v)}{dx} - p \frac{T - T_0}{\tau}, \quad (2)$$

в формулировке Страттона [5], дополнив их, за исключением уравнения Пуассона, электростатическим потен-

[¶] E-mail: ira@mail.cplire.ru

Fax: (495) 2038414

^{¶¶} E-mail: gergel@mail.cplire.ru, vgergel@mail.ru

^{¶¶¶} E-mail: vadimkurbatov@yandex.ru

Параметры слоев структур и температуры роста

Структура 1	Структура 2
$\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$, 48 Å, 550°C Si , 90 Å, 550°C $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$, 48 Å, 550°C Буфер Si:B, 2700 Å, 800°C Подложка: n-Si, 4.5 Ом·см, (001)	Ge , 12 Å, 300°C Si , 120 Å, 300°C Ge , 12 Å, 300°C Буфер Si:B, 2700 Å, 750°C Подложка: n-Si, 4.5 Ом·см, (001)

циалом φ , который складывается с зонным квазипотенциалом $\varphi_v = -E_v(x)/q$, где $E_v(x)$ — край валентной зоны, изменяющийся с координатой x в соответствии с изменениями состава. Здесь p — концентрация дырок, N_A — концентрация акцепторов, T — температура, ε — диэлектрическая проницаемость, ε_0 — электрическая постоянная, q — заряд электрона. Систему (1), (2) раскрывают формулы для дырочного потока,

$$j_p = \mu p \left[\frac{d(\varphi + \varphi_v)}{dx} - (1 - \alpha) \frac{dT}{dx} \right] - \mu T \frac{dp}{dx}, \quad (3)$$

и потока температуры дырочного газа,

$$j_T = \left(\frac{5}{2} - \alpha \right) \left(\mu p T \frac{dT}{dx} + j_p T \right). \quad (4)$$

Формулы

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T_0}{T} \right)^\alpha, \quad \tau = \tau_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1-\alpha}, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (5)$$

конкретизируют степенные (для простоты) температурные зависимости подвижности и времени энергетической релаксации. Здесь $T_0 = 0.025$ В — равновесная температура решетки, μ_0 — низкополевая подвижность материала, значение $\tau_0 = \mu_0 T_0 / v_s^2$ согласовано с величиной скорости насыщения v_s .

Для проведения конкретного вычислительного эксперимента была выбрана гипотетическая тестовая гетероструктура с однородным легированием акцепторной примесью, с узкозонными контактными областями

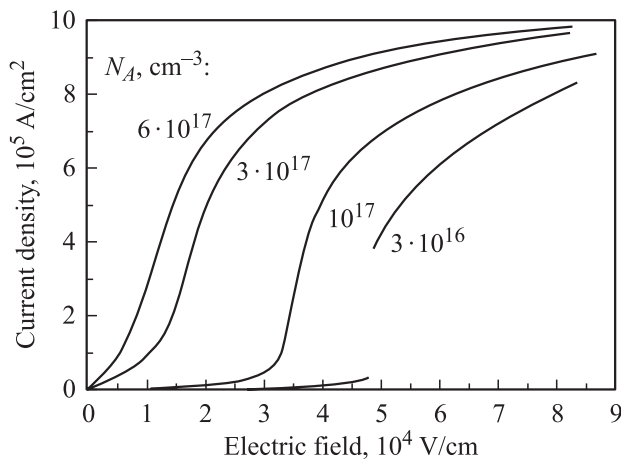


Рис. 1. Рассчитанные ВАХ для структуры с четырьмя гетеробарьерами шириной 80 нм и высотой 0.2 В. $T = 300$ К.

и четырьмя гетеробарьерами амплитудой $\varphi_0 = 0.2$ В и протяженностью 100 нм, разделенными узкозонными слоями той же толщины. Проведенное математическое моделирование позволило сделать расчет ВАХ структуры (рис. 1). Видно, что ВАХ при некоторых величинах приложенного напряжения имеют участок с максимальной дифференциальной проводимостью и при определенных параметрах структуры участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Численный анализ распределения электрического поля в структуре при различных величинах приложенного напряжения показывает, что на начальном участке ВАХ ток ограничивается влиянием гетеробарьеров, но по достижении определенного диапазона внешнего напряжения скорость процесса нарастания тока резко увеличивается за счет заметного увеличения температуры дырочного газа в инжектирующих обогащенных границах узкозонных слоев. С дальнейшим ростом напряжения дырочная температура на гетерограницах повышается настолько, что лимитирующее влияние гетеробарьеров на транспортный процесс в дырочном газе становится пренебрежимо малым, а вольт-амперная характеристика приближается к соответствующей характеристике преимущественно однородной (без гетеробарьеров) структуры.

Показано также, что характерное напряжение максимума дифференциальной проводимости, как и ее максимальная величина, должны увеличиваться с ростом крутизны гетероперевода, а с ростом концентрации примеси это характерное напряжение будет уменьшаться. Отметим также, что эффективная скорость носителей при больших напряжениях не сильно отличается от v_s , а ее поведение имеет отчетливую тенденцию к насыщению, что обусловлено достаточно большой, ~ 1 мкм, общей протяженностью рассмотренной структуры и практически однородным (при высоких напряжениях) распределением концентрации подвижных носителей в ней.

3. Эксперимент

Для проверки применимости теории к описанию проводимости островковых структур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на установке „Катунь“ были выращены легированные бором структуры $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с различным составом слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и различными размерами островков. Данные о геометрии структур и режимах роста приведены в таблице.

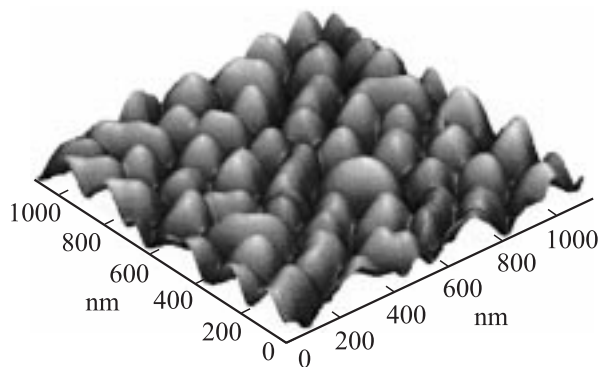


Рис. 2. АСМ-изображение структуры 1 со слоями $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0.5$) толщиной 4.8 нм, выращенной при 550°C .

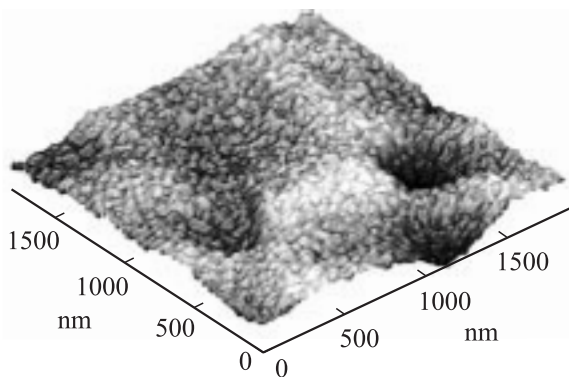


Рис. 3. АСМ-изображение структуры 2 со слоями чистого германия толщиной 1.2 нм, выращенной при 300°C .

Для получения высокой плотности островков с необходимыми размерами использованы достаточно толстые слои $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, низкие температуры роста и вариация состава слоя. Последнее дает также некоторую разницу в высотах барьеров в структурах. Для электрической изоляции от подложки структуры выращивались на пластинах кремния n -типа проводимости, а буферный слой в процессе роста легировался бором в концентрации $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для более надежного обеднения легированного буферного слоя структуры имели несколько слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Отметим, что заполнением слоев носителями можно в принципе управлять, изготовив тыльный электродный контакт.

Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) получена информация о размерах и плотности островков в структурах. АСМ-изображение (рис. 2), полученное для структуры 1, выращенной при 550°C и имеющей слои $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0.5$) толщиной 4.8 нм, показывает, что размер типичных островков в основании составил 120 нм при плотности $\sim 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Видно, что они представляют собой так называемые *hut*-кластеры. Для структуры 2 со слоями чистого германия толщиной 1.2 нм, выращенной при 300°C , размер островков существенно ниже, ~ 40 нм, как показывает АСМ-изображение (рис. 3), а их плотность составляет $\sim 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Отметим, что

для столь низкой температуры роста размер островков сравнительно велик (см., например, [6]). Это может быть связано с более высокой скоростью осаждения и большей толщиной слоя германия в нашем случае.

Омические контакты изготавливались вакуумным напылением алюминия с последующим сплавлением в течение 2 мин при температуре $\sim 500^\circ\text{C}$. Размеры токового промежутка между контактами составляли 700×30 мкм с длиной в направлении тока 30 мкм. Чтобы избежать нагрева образца, измерения ВАХ проводились в импульсном режиме. Импульсные сигналы, соответствующие величинам напряжения и тока, детектировались двумя пиковыми детекторами и записывались с помощью двухкоординатного самописца. Типичные ВАХ изготовленных образцов резисторов при комнатной и азотной температурах показаны на рис. 4.

Главной отличительной чертой приведенных характеристик является диаметрально противоположная температурная зависимость электропроводности представленных образцов. В то время как в образце 2, с более высокой плотностью мелких германиевых островков, проводимость при охлаждении повышается, в образце 1, со сравнительно крупными островками $\text{Si}_{0.5}\text{—Ge}_{0.5}$, электропроводность при азотной температуре существенно меньше, чем при комнатной. Можно думать, что образец 2 представляет собой конгломерат взаимопроникающих друг в друга германиевых островков, образующих связную двумерную область, в которую вкраплены несвязные кремниевые включения. В силу отмеченной связности заполненной дырками германиевой подобласти можно считать, что наблюдаемое повышение электропроводности образца 2 при азотной температуре обусловлено известным эффектом повышения подвижности носителей (дырок).

Совершенно иначе ведет себя электропроводность образца 1, в котором при комнатной температуре наблюдается заметный пик дифференциальной проводимости при полях $\sim 3 \text{ кВ/см}$, что, согласно развитой модели, свидетельствует о надбарьерно-инжекционном механизме электропроводности. Следовательно, образец 1, по

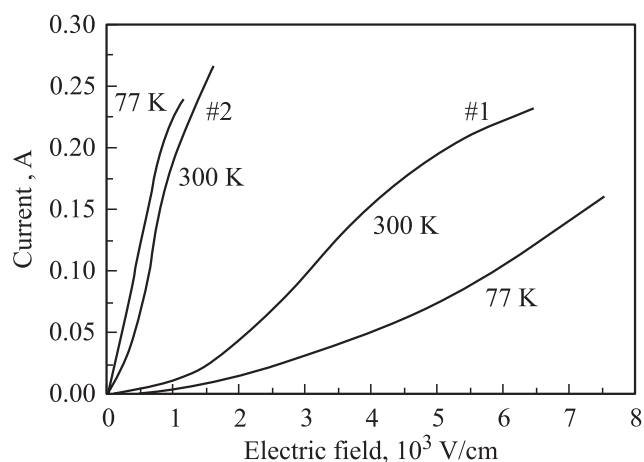


Рис. 4. ВАХ изготовленных образцов резисторов при комнатной и азотной температурах.

всей вероятности, представляет собой конгломерат сравнительно больших островков $\text{Si}_{0.5}\text{--Ge}_{0.5}$, вкрапленных в связную кремниевую область и соответственно отделенных друг от друга энергетическими барьерами зонного несоответствия, термоинжекционная проницаемость которых, естественно, падает с понижением температуры, как об этом и свидетельствует нижняя кривая на рис. 4.

4. Заключение

Проведенные эксперименты показывают, что разработанная теоретическая модель, рассматривающая движение носителей в системе упорядоченных барьеров, качественно применима и к аperiодической системе барьеров, свойственной островковым структурам. Можно надеяться, что оптимизация параметров островковых структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ позволит реализовать вольт-амперные характеристики пленок со значительно более яркими пиками дифференциальной проводимости и даже *S*-образные ВАХ с отрицательной дифференциальной проводимостью.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 04-02-17681, и INTAS, проект № 03-51-50-15.

Список литературы

- [1] В.А. Гергель, Ю.В. Гуляев, В.А. Курбатов, М.Н. Якупов. ФТП, **39**, 453 (2005).
- [2] В.А. Гергель, Ю.В. Гуляев, М.Н. Якупов. ФТП, **39**, 1075 (2005).
- [3] В.А. Гергель, В.А. Курбатов, М.Н. Якупов. ФТП, **40**, 446 (2006).
- [4] А.А. Тонких, Г.Э. Цырлин, В.Г. Дубровский, В.М. Устинов, P. Werner. ФТП, **38**, 1239 (2004).
- [5] R. Stratton. Phys. Rev., **126**, 2002 (1962).
- [6] M.W. Dashiell, U. Denker, C. Müller, G. Costantini, C. Manzano, K. Kern, O.G. Schmidt. Appl. Phys. Lett., **80**, 1279 (2002).

Редактор Л.В. Шаронова

Peculiarities of the lateral electrical conductivity of the doped Si/Ge islands *p*-type structures

V.A. Gergel, T.M. Burbaev*, V.A. Kurbatov*,
A.O. Pogosov*, M. Rzaev*, N.N. Sibeldin*,
I.M. Scheleva, M.N. Yakupov

Institute for Radio-Engineering and Electronics,
Russian Academy of Sciences,
125009 Moscow, Russia

* P.N. Lebedev Physical Institute,
Russian Academy of Sciences,
119991 Moscow, Russia

Abstract In frames of quasi-hydrodynamic model of carrier drift in high electrical fields is carried out theoretical consideration of the electrical conductivity of nanosize Si/SiGe structures with account of band offsets at interfaces between low- and high-resistance regions. It is found that volt-ampere characteristics of such structures must be of *S*-type, in limit with negative slope region, and critical parameters of the theory are sharpness of heterojunction between narrow- and widegap parts of structure and doping degree. Doped island structures having different sized of islands were made by molecular beam epitaxy and results of conductivity measurements are compared with theory.