

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 621.3.049.77

В. Д. Вернер, д-р физ.-мат. наук, проф., председатель научно-технич. совета,
e-mail: tc@tcen.ru,

Н. М. Луканов, д-р техн. наук, вед. науч. сотр.,

А. Н. Сауров, чл.-корр. РАН, директор,
НПК "Технологический центр", Москва

ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ БИПОЛЯРНЫХ СВЧ СТРУКТУР С ПРЕДЕЛЬНО УЗКИМИ ЭМИТТЕРНЫМИ ОБЛАСТЯМИ

Поступила в редакцию 04.10.2011

Приведены конструктивные и технологические особенности формирования биполярных СВЧ самосовмещенных и полностью самосовмещенных транзисторных структур на кремнии. Эти структуры с предельно узкими эмиттерными областями предназначены для создания монолитных маломощных широкополосных усилителей и радиочастотных ИС с рабочей частотой 10...160 ГГц. Разработан новый метод осаждения (или селективного наращивания) и анизотропного травления различных слоев с использованием исходной одной (вертикальной или наклонной) плоскости, задающей опорный рельеф самоформирования для всей структуры.

Ключевые слова: конструктивные и технологические особенности, СВЧ самосовмещенные и полностью самосовмещенные транзисторные структуры, предельно узкие эмиттерные области, опорный рельеф самоформирования для всей структуры, кремний, радиочастотные ИС с рабочей частотой 10–160 ГГц

Введение

Высокоскоростные беспроводные гигабитные системы обработки больших массивов информации с рабочей частотой 10...160 ГГц находят самое широкое применение при создании систем связи, аналого-цифровых систем, специализированных радарных устройств, систем пространственной ориентации объектов, различных чувствительных элементов, промышленных, биологических и специальных систем контроля. Для их реализации широко используются биполярные транзисторные гетероструктуры (БТГС) с ультратонкими областями базы на основе материала Si—Ge—В—С. Дорожная карта ITRS 2009 г. ставит целью достижение к 2024 г. узких эмиттерных областей с шириной 50 нм. В этом случае расчетная максимальная частота генерации БТГС должна достигать 910 ГГц, а граничная частота усиления 565 ГГц. На рис. 1 приведена зарубежная самосовмещенная структура БТГС с шириной эмиттерного окна $W_{30} = 100$ нм, реализованная с технологическими нормами 45 нм [1].

Исходные псевдоэмиттерные окна 5 (ПЭО) в пассивных областях базы имеют наклонные стенки и формируются путем прецизионных прямых методов литографии для получения в дальнейшем узких эмиттерных областей. Тонкие области 8 боковой диэлектрической изоляции переходов эмиттер — база (БДИЭ₁) создают на основе Si₃N₄ дополнительные утолщенные области 9 (БДИЭ₂) из пиролитического диоксида кремния SiO_{2п}. Ультра-

тонкие базовые области 7 самоформируются в ПЭО методом селективной эпитаксии из газовой фазы Si—Ge—В—С после селективного вытравливания в участках ПЭО первой маскирующей пленки 2 SiO_{2т}. Создание узких эмиттерных окон осуществляется по типовому методу встречного осаждения и селективного травления различных слоев (6, 8, 9) с двух противоположных наклонных плоскостей самоформирования. Очевидно, что результирующая ширина эмиттерных окон зависит от ширины ПЭО, толщины областей БДИ, БДИЭ₁, БДИЭ₂ и от их разбросов, а также от точности анизотропного реакционно-ионного травления (АРИТ) этих областей [1].

Ряд конструктивно-технологических особенностей самоформирования СВЧ структур на чистом кремнии и их критические места в конструкции и технологии изготовления приведены в статьях авторов [2–14].

Методика изготовления псевдолитографических масок

В настоящей работе создание предельно узких (в диапазоне 30...50 нм) и относительно длинных (более 2 мкм) эмиттерных окон осуществляется по методу осаждения (или селективного наращивания) и анизотропного травления различных слоев с использованием исходной одной (вертикальной или наклонной) плоскости, задающей опорный рельеф самоформирования (ОРСФ) для всей структуры. Длина ОРСФ задается отдельным типовым процессом литографии. Ниже приведены различные конструктивно-технологические варианты самоформирования узлов эмиттер — база. Для их реализации авторы использовали косвенные методы литографии с псевдолитографическими масками (ПЛМ) и самосовмещенными резистивными масками (СРМ), а также методы самосовмещения

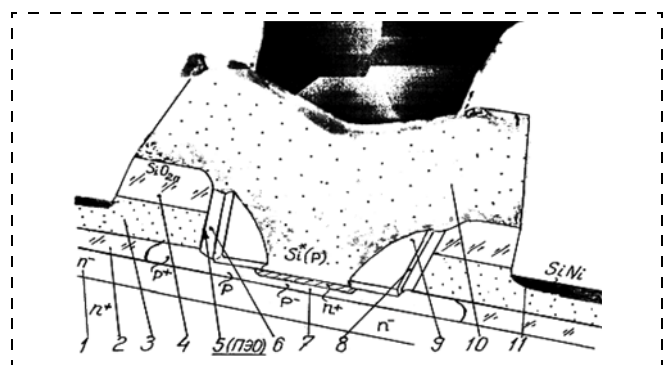


Рис. 1. Микрофотография сечения БТГС:

1 — тонкий n-коллекторный слой; 2 — маскирующая пленка термического SiO_{2т}; 3 — пассивные области базы из поликремния, легированного В — Si*(В); 4 — защитный слой пиролитического SiO_{2п}; 5 — псевдоэмиттерные окна (ПЭО); 6 — боковая диэлектрическая изоляция (БДИ); 7 — селективные области (p⁺-p-p⁻) базы Si—Ge—В—С; 8 — области изоляции БДИЭ₁; 9 — области изоляции БДИЭ₂; 10 — области пассивного эмиттера из поликремния, легированного Р — Si*(Р); 11 — локальные контакты на основе SiNi

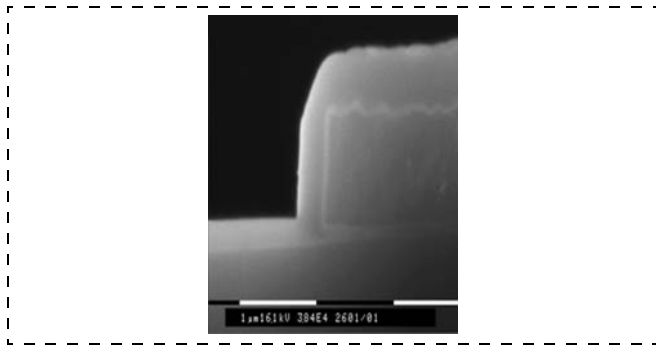


Рис. 2. Сечение ПЛМ на 1-м этапе ее изготовления

и самоформирования с составными областями БДИЭ, представленные в работах [2—13].

На рис. 2 представлено сечение структуры на этапе предварительного создания ПЛМ. В самом общем случае формирование ПЛМ начинается с создания на исходном Si тонкого пассивирующего слоя $\text{SiO}_{2\text{T}}$, тонкой маскирующей пленки Si_3N_4 и временного слоя опорного материала $\text{SiO}_{2\text{П}}$. Затем в этом материале создается опорный рельеф самоформирования (ОРСФ) практически с вертикальными стенками с помощью АРИТ и осаждения слоя Si_3N_4 заданной толщины для создания собственно ПЛМ. Разброс по толщине пленки Si_3N_4 определяет разброс ширины области ПЛМ, а следовательно, и разброс ширины эмиттерного окна. Далее (не показано на рис. 2) формируется СРМ с помощью заливки углублений фоторезистом и задается промежуточный 1-й уровень планаризации, расположенный ниже поверхности опорного материала (около границы изгиба пленки ПЛМ). Проводится АРИТ до полного вскрытия поверхности опорного материала, удаляется СРМ, вытравливается опорный материал и переносится изображение ПЛМ в нижележащий материал с помощью АРИТ. В итоге получается ПЛМ практически прямоугольного сечения. В качестве опорного материала может быть использован Si^* , аморфный Si, в этом случае ПЛМ создается на основе $\text{SiO}_{2\text{П}}$, Si_3N_4 , SiN_x или фосфорно(боро)силикатного стекла.

На рис. 3 представлены примеры самоформирования ПЛМ в виде выступа (а, б) и в виде щели (в, г). На рис. 3, а материал СРМ1 не проходит стадию предварительной градиентной обработки в плазме для получения близких по скорости АРИТ материалов СРМ1 и ПЛМ. На рис. 3, б, в применяется еще и СРМ2.

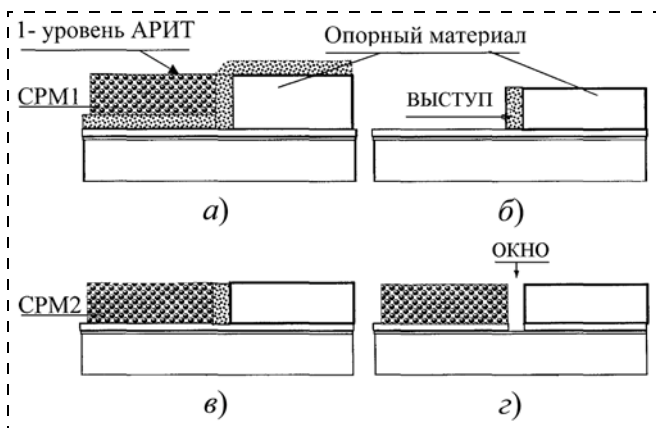


Рис. 3. Примеры самоформирования ПЛМ в виде выступа (а, б) и в виде узкой щели (в, г)

Примеры самоформирования СВЧ транзисторных структур

На рис. 4 и 5 представлены различные структуры с узкими и тонкими пассивными эмиттерными областями. Структуры, показанные на рис. 4, а, б, имеют металлические вставки для уменьшения сопротивления эмиттера. Приведенные конструктивные варианты применимы и для селективной эпитаксии Si—Ge—В—С, $\text{Si}^*(\text{P})$ и W [3, 4, 14].

Структура, приведенная на рис. 4, а, имеет предельно узкую эмиттерную вертикальную область 5 на основе $\text{Si}^*(\text{P})$ и селективного металла W.

Структура содержит:

- мелкие области 1 боковой диэлектрической изоляции (БДИ) из $\text{SiO}_{2\text{П}}$;
- тонкие, сильнолегированные As, скрытые области 2 коллектора;
- сверхтонкие области 3 коллектора со средним уровнем легирования;
- ультратонкие области 4 базы Si—Ge—В—С, заключенные между ультратонкими буферными n-слоями;
- узкие пассивные области 5 эмиттера на основе $\text{Si}^*(\text{P})$, сформированные с применением ПЛМ;
- ультратонкие пассивирующие слои 6 $\text{SiO}_{2\text{T}}$;
- области 7 БДИЭ из SiN_x ;
- пассивные области 8 базы из $\text{Si}^*(\text{B})$ или $\text{Ge}^*(\text{B})$, самоформируемые после создания областей 5—7 (или до их создания с использованием узких щелей);
- маскирующие слои 9 из $\text{SiO}_{2\text{П}}$;
- селективные металлизированные области 10 из W;
- шины 11 металлизации TiN.

Структура, показанная на рис. 4, б, самоформируется относительно исходной области прямоугольной ПЛМ из Si_3N_4 . Относительно границ ПЛМ создаются:

- точно локализованные тонкие изолирующие области БДИ — $\text{SiO}_{2\text{T}}$, задающие предельно узкие (0,2...0,3 мкм) окна для пассивных областей базы;
- точно смещенные утолщенные области БДИ — $\text{SiO}_{2\text{П}}$;
- пассивные области базы из $\text{Si}^*(\text{B})$;
- дополнительные вставки из $\text{SiO}_{2\text{П}}$, ограничивающие области селективной металлизации на $\text{Si}^*(\text{B})$ и паразитную емкость эмиттер—база.

После удаления ПЛМ самоформируются области БДИЭ ($\text{SiO}_{2\text{T}} - \text{SiO}_{2\text{П}}$), задающие ширину эмиттерных окон. Области БДИЭ могут быть созданы и на основе композиционных материалов (рис. 5).

Структура, представленная на рис. 4, в, имеет ПЭО с наклонными стенками и с малым разбросом по ширине. Для достижения цели на исходном слое пассивной базы $\text{Si}^*(\text{B})$ или $\text{Ge}^*(\text{B})$ создается дополнительная пленка $\text{SiO}_{2\text{T}}$ (или металла TiN, TaN), в которой с помощью ПЛМ и АРИТ формируются исходные (см. рис. 3, б) узкие окна. Последние используются для дальнейшего са-

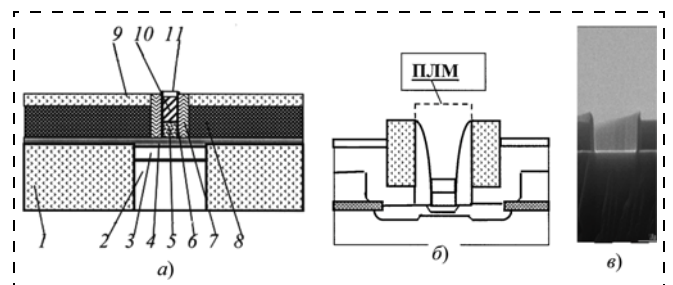


Рис. 4. Самосовмещенные ультратонкие структуры

моформирования ПЭО с малым разбросом по ширине и с требуемым наклоном стенок в слое $\text{Si}^*(\text{B})$ или $\text{Ge}^*(\text{B})$.

В структуре, приведенной на рис. 5, обеспечивается полное самоформирование всех критичных узлов конструкции относительно области 4 ОРСФ, выполненной на основе исходной ПЛМ — SiN_x (или $\text{SiO}_{2\text{п}}$) и показанной штриховой линией 4.

Для этого на исходных пластинах высокоомного p -Si создаются скрытые n^{++} -коллекторные слои 1, сильно легированные As с отжигом в водороде, высокоомные n^- -коллекторные слои 2 и глубокие области 3 БДИ. Между этими областями на слое 2 формируется область 4 ПЛМ. Затем с помощью АРИТ создаются канавки с вертикальными стенками, которые последовательно заполняются сначала материалом 5 — $\text{SiO}_{2\text{п}}$, с проведением процесса селективного травления, затем материалом 6 — $\text{Si}^*(\text{B})$. После селективного травления последнего на нем формируется маскирующая пленка 7 термического $\text{SiO}_{2\text{т}}$. Далее избирательно вытравливается ПЛМ и верхний слой 2 высокоомного Si. При этом маской является сильнолегированная В пассивная область 6 базы. Используя селективную эпитаксию создают:

- ультратонкий демпфирующий слой чистого Si;
- ультратонкий слой 8 базы на основе сплава Si—Ge—В—С;
- ультратонкий слой чистого Si;
- пассивирующий слой 9 сверхчистого $\text{SiO}_{2\text{т}}$;
- защитный слой 10 — БДИЭ₁ на основе пленки Si_3N_4 .

После этого самоформируются временные области 11 — БДИЭ₂ на основе Si или $\text{SiO}_{2\text{п}}$. Тонкие (0,6...0,8 мкм) области пассивного эмиттера (на рис. 5 не показаны) из $\text{Si}^*(\text{P})$ селективно осаждаются в узких эмиттерных окнах сразу после вытравливания временных областей 11.

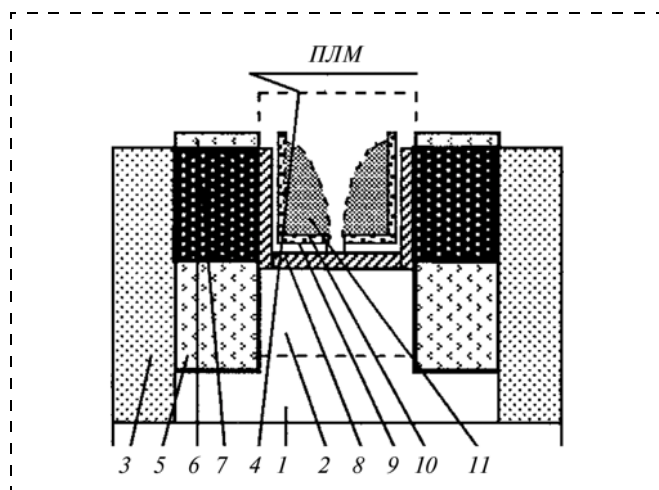


Рис. 5. Полностью самосовмещенная СВЧ структура:

1 — скрытый коллекторный слой, сильно легированный As с отжигом в водороде; 2 — сверхтонкий коллекторный слой; 3 — глубокие области шелевой изоляции; 4 — псевдολитографическая маска (ПЛМ), задающая ПЭО; 5 — мелкие области шелевой изоляции — $\text{SiO}_{2\text{п}}$; 6 — пассивные области базы из $\text{Si}^*(\text{B})$ шелевого типа; 7 — маскирующая пленка термического $\text{SiO}_{2\text{т}}$; 8 — ультратонкие области базы Si—Ge—В—С, расположенные между двумя ультратонкими слоями чистого кремния; 9 — пассивирующий слой сверхчистого $\text{SiO}_{2\text{т}}$; 10 — защитный слой (БДИЭ₁) на основе Si_3N_4 ; 11 — временные дополнительные области изоляции БДИЭ₂ на основе Si^* или $\text{SiO}_{2\text{п}}$. Тонкие (0,8 мкм) области пассивного эмиттера (не показаны на рисунке) из поликремния, легированного P, $-\text{Si}^*(\text{P})$, селективно осаждаются в эмиттерных окнах сразу после вытравливания временных областей 11

С использованием в общем случае схемы конструктивного варианта, приведенного на рис. 5, полностью самоформируемые СВЧ транзисторные структуры с областями БДИ могут быть изготовлены по отечественному "эпипланарному" процессу [14] при комплексном применении методов селективной (избирательной) эпитаксии: скрытых сильнолегированных слоев, ультратонких коллекторных слоев, базовых и эмиттерных слоев, а также локальных слоев металлизации. В этом случае на исходных подложках Si создаются мелкие области 5 БДИ, области 6 пассивной базы из $\text{Si}^*(\text{B})$ или $\text{Ge}^*(\text{B})$ с маскирующим слоем 7 и глубокие области 3 шелевой изоляции. Затем для создания основных коллекторных областей транзисторных структур и близко расположенных к ним контактных коллекторных областей в слое 7 с помощью ПЛМ вскрываются окна и АРИТ создаются ОРС в слоях 6 и 5. При этом глубокие области 3 БДИ ограничивают площадь структур. С помощью диффузии As создают внутренние соединения основных коллекторных областей и близко расположенных к ним контактных коллекторных областей. Затем на боковых стенках окон формируют тонкие демпфирующие слои SiN_x , проводят селективную эпитаксию составных коллекторных областей до уровня нижней поверхности слоя 6 и диффузией P создают сильнолегированные контактные области коллектора.

Далее избирательно вытравливают слой SiN_x в верхней его части до уровня нижней поверхности слоя 6 и проводят самоформирование слоя 8 для ультратонких областей базы Si—Ge—В—С, расположенных между двумя ультратонкими слоями чистого кремния. В таком конструктивном варианте пассивные области 6 базы надежно соединяются с пассивными областями 8 собственно ультратонких областей базы Si—Ge—В—С. Далее проводится самоформирование эмиттерного узла по рассмотренной выше схеме. В последнем конструктивном варианте обеспечивается полное и точное самоформирование всех элементов критичных узлов.

В известной зарубежной структуре [15] элементы пассивной базы и элементы БДИЭ не самосовмещаются относительно мелких областей БДИ.

При разработке конкретной структуры для определенной СВЧ системы необходимо учитывать ряд факторов, которые будут влиять на окончательный выбор $W_{\text{эо}}$:

- воспроизводимость ширины эмиттерного окна;
- проводимость и надежность границы раздела p -Si—полиэмиттер;
- сплошность и однородность границы p -Si—полиэмиттер;
- профиль легирования и поверхностное сопротивление эмиттера;
- сопротивление узла металл—пассивный эмиттер;
- паразитные емкости всего узла эмиттер—база;
- паразитные емкости областей БДИЭ;
- активацию примеси в активной и пассивной областях базы и эмиттера с учетом метода и аппаратуры для активации примеси.

3D-оптимизация конструктивно-технологического базиса структуры должна проводиться с учетом реальных профилей легирования ионизированной и неактивной примесей.

Заключение

Показано, что создание предельно узких (в диапазоне 30...50 нм) и относительно длинных (более 2 мкм) эмиттерных окон с относительно малым разбросом по ширине, может быть осуществлено по методу осаждения (или селективного наращивания) и анизотропного травления

различных слоев с использованием исходной одной (вертикальной или наклонной) плоскости формирования опорного материала, задающей опорный рельеф самоформирования (ОРСФ) для всей транзисторной структуры. Рассмотрены различные конструктивно-технологические варианты изготовления самоформируемых СВЧ транзисторных структур с предельно узкими эмиттерными областями.

Список литературы

1. Chevalier P., Barbalat B., Laurens M. et al. High-speed SiGe BiCMOS technologies: 120-nm Status and End-of-Roadmap challenges // IEEE Xplore. 2007. P. 18–23.
2. Луканова Н. Н., Луканов Н. М. Конструктивно-топологическое проектирование самосовмещающихся субмикронных сверхтонкослойных транзисторных структур с улучшенными параметрами // Сб. науч. тр. МИЭТ. "Физика, технология и схемотехника СБИС". М.—Зеленоград: МИЭТ. 1989. — С. 80–93.
3. Lukanov N. M. et al. Bipolar VLSI based on self-aligned transistor structures // Electronic Engineering. Series Microelectronics. 1991. Issue 1 (1). News from Soviet "Silicon Valley". М.—Зеленоград: НПО "Научный центр". 1991. P. 53–55.
4. Сауров А. Н. Методы самоформирования в микроэлектронике // Изв. вузов. Сер. ЭЛЕКТРОНИКА. 1997. № 5. С. 41–47.
5. Сауров А. Н. Специальные методы плазменного травления в технологии самоформирования // Изв. вузов. Сер. Электроника. 1997. № 6. С. 60–68.
6. Сауров А. Н. Графическая модель метода самоформирования интегральных структур // Изв. вузов. Сер. Электроника. 1998. № 1. С. 61–70.
7. Сауров А. Н., Вернер В. Д. Методы самоформирования в технологии микросистем // Изв. вузов. Сер. Электроника. 2000. № 4–5. С. 118–123.
8. Демидова Ю. Б., Луканов Н. М., Сауров А. Н. Методы самоформирования и методики контроля трехмерных элементов

микроэлектроники // Научные основы разработки технологий и оборудования микроэлектроники: Межвузовский сб. / Под ред. В. В. Гусева и М. Л. Минкина. М.: МГИЭТ, 2000. С. 32–43.

9. Галушков А. И., Демидова Ю. Б., Луканов Н. М., Сауров А. Н. Би-КМОП технологии, использующие методы самосовмещения и самоформирования // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. М.: ФГУП "ВИМИ". 2001. № 2. С. 8–20.
10. Галушков А. И., Демидова Ю. Б., Луканов Н. М., Путря М. Г., Рыбачек Е. Н. Влияние маскирующих слоев на геометрические параметры трехмерных элементов СБИС при реактивно-ионном травлении // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. М.: ФГУП "ВИМИ". 2001. № 1. С. 7–11.
11. Демидова Ю. Б., Луканов Н. М., Метельков П. В., Сауров А. Н. Конструктивно-технологический базис СВЧ сверхинтегрированных структур и микросхем РЧ-диапазона на кремнии // Изв. вузов. Сер. Электроника 2003. № 2. С. 25–32.
12. Голишников А. А., Демидова Ю. Б., Луканов Н. М., Сауров А. Н. Особенности изготовления самоформируемых СВЧ транзисторных структур на кремнии. Ч. 1, 2 // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. М.: ФГУП "ВИМИ". Ч. № 1. № 4. 2005. С. 73–77; Ч. 2. № 1. 2006. С. 44–49.
13. Вернер В. Д., Луканов Н. М., Сауров А. Н., Метельков П. В. Оптимизация СВЧ самосовмещенных транзисторных структур на чистом кремнии и малошумящего широкополосного усилителя для радиопередающих ИС с элементами МЭМС. Ч. 1–3 // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. М.: ФГУП "ВИМИ". 2011. Ч. 1. № 1. С. 78–84; Ч. 2. № 2. С. 20–27; Ч. 3. № 3. С. 11–20.
14. Авторское свидетельство № 439863 СССР. Способ изготовления активных элементов интегральных схем / Луканов Н. М., Лебедев В. В., Любушкин Е. Н., Шварц К.-Г. М., Щербинин А. А. Опубл. 19.04.74 (приоритет от 13.07.70).
15. Tilke A. T., Rochel M., Berkner J. et al. A Low-cost fully self-aligned SiGe BiCMOS technology using selective epitaxy and a lateral quasi-single-poly Integration Concept // IEEE Transactions on Electron Devices. 2004. Vol. 51. N 7. С. 1101–1107.

УДК 538.975, 539.23

Д. С. Пономарев¹, аспирант,
И. С. Васильевский¹, канд. физ.-мат. наук, доц.,
Г. Б. Галиев², д-р физ.-мат. наук, зав. лаб.,
Е. А. Климов², мл. науч. сотр.,
Р. А. Хабибуллин¹, аспирант,
В. А. Кульбачинский^{1,3}, д-р физ.-мат. наук, проф.,
¹ Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" (НИЯУ МИФИ),
² Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН),
³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ),
e-mail: kulb@mig.phys.msu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОННОЙ ДИАГРАММЫ И РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОЙ МАССЫ ЭЛЕКТРОНОВ В СОСТАВНЫХ КВАНТОВЫХ ЯМАХ InGaAs С НАНОСЛОЯМИ GaAs/InAs

Поступила в редакцию 04.10.2011

Теоретически и экспериментально изучены зонная структура и электрофизические свойства гетероструктур InAlAs/InGaAs/InAlAs/InP с составной квантовой ямой (КЯ) InGaAs с нановставками InAs и GaAs. С помощью эффекта Шубникова — де Гааза измерены и рассчитаны значения эффективной циклотронной массы m_c^* с учетом непараболичности энергетического спектра электронов. Впервые предложенная гетероструктура с двумя симметрично расположенными в КЯ нановставками InAs позволяет уменьшить m_c^* на 26 % по сравнению с КЯ In_{0,53}Ga_{0,47}As.

Ключевые слова: СВЧ транзисторы, нанoeлектроника, наногетероструктуры, молекулярно-лучевая эпитаксия, полупроводники типа АЗВ5

Введение

В наногетероструктурах InAlAs/InGaAs/InAlAs на подложках InP двумерный электронный газ с высокой концентрацией $n_s \approx (2...3) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ имеет высокую подвижность $\mu_e \geq 10000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ [1, 2]. Данные структуры активно применяют для создания СВЧ устройств миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн [3, 4]. Согласно нашим предыдущим результатам [5] введение одного тонкого слоя InAs в квантовой яме (КЯ) InGaAs приводит к увеличению подвижности двумерных электронов по сравнению со структурой, содержащей однородную КЯ. Однако увеличение толщины слоя InAs ограничено критическим значением, превышение которого приводит к ухудшению качества вставки и всей активной области вследствие образования дислокаций несоответствия. Таким образом, для дальнейшего увеличения μ_e необходимо изменять слоевую конструкцию КЯ с учетом ограничений, накладываемых механической деформацией слоев, а также влиянием нановставок на электронную структуру КЯ. Одним из решений является применение составных КЯ (СКЯ), неоднородных по составу, в том числе содержащих несколько гетероставок различных полупроводников. В настоящей работе предложен альтернативный метод уменьшения эффективной массы электронов в СКЯ за счет введения двух наноразмерных вставок InAs, равноотстоящих как