

На правах рукописи

УДК 621.382

Малышев Константин Васильевич

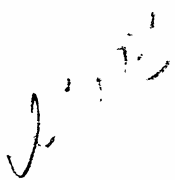
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕЛИНЕЙНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СПЕКТРА РАДИОСИГНАЛОВ
ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ AlGaAs ГЕТЕРОСТРУКТУР.

05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников,
материалов и приборов электронной техники



Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва – 2004



Работа выполнена в Московском государственном техническом университете
им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук,
профессор Иванов Ю.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Панфилов Ю.В.

кандидат технических наук,
доцент Меньшенин Ю.В.

Ведущая организация ФГУП ЦНИИ «Комета»

Защита состоится "23" декабря 2004 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета Д.212.141.18 в Московском государственном
техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу:

105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5.

Просим выслать Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный
печатью по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан "19" ноября 2004 г.

Телефон для справок 267-09-63

Ученый секретарь

диссертационного совета



Цветков Ю.Б.

Подписано к печати 13.11.04 г. Зак. 253; объем 1,0 п.л. Тир.100

Типография МГТУ им.Н.Э. Баумана

5.11



1698507

Малышев К.В. Разработка те

1. Общая характеристика работы

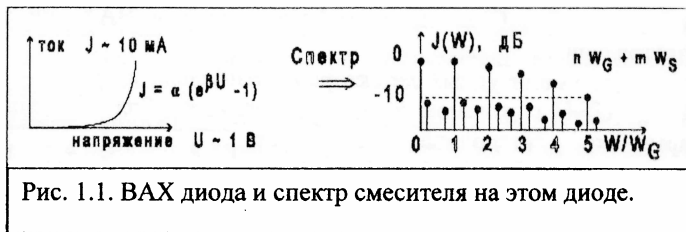
1.1. Актуальность работы

Основными тенденциями развития технологических процессов в производстве радио – электронных систем (РЭС) сегодня являются технологии для обеспечения повышения рабочих частот до сотен гигагерц, расширения рабочей полосы частот до десятков гигагерц, обработки импульсов наносекундной длительности, расширения динамического диапазона до 140 дБ, выполнения РЭС в виде одной интегральной схемы типа процессора. В состав большинства РЭС (радио – локационных станций, систем цифровой связи и специальных РЭС) входит супергетеродинный приемник, основным узлом которого является нелинейный преобразователь спектра радиосигналов.

Поэтому для выполнения вышеперечисленных задач актуальна разработка технологического процесса, обеспечивающего улучшение характеристик такого нелинейного преобразователя. Он состоит из смесителя и гетеродина. Основной характеристикой смесителя является его частотный спектр, то есть зависимость мощности от частоты на выходе смесителя, когда на его вход поступают гармонические колебания гетеродина и сигнала. Этот спектр определяется нелинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ) $J=J(U)$ диода в смесителе (Рис. 1.1).

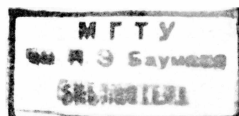
Поэтому для улучшения характеристик нелинейного преобразователя актуальна

задача
создания
технологии
для
производства
диода с такой
формой ВАХ



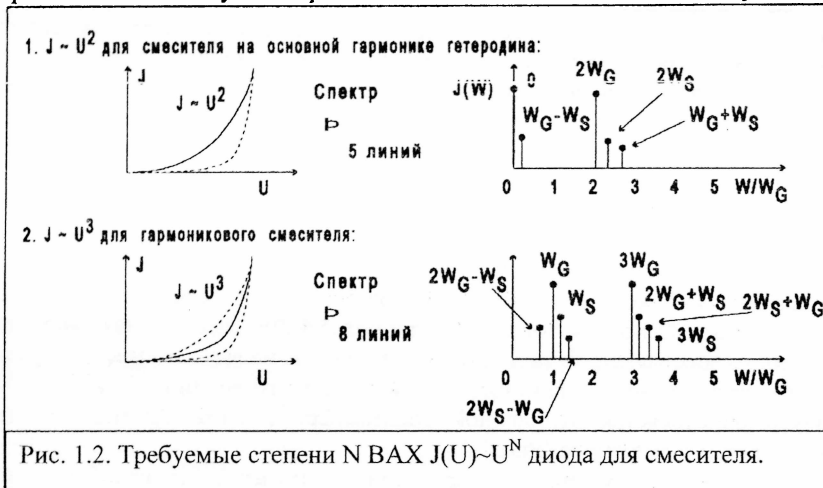
$J=J(U)$, которая приводила бы к желаемому виду частотного спектра смесителя, в частности к уменьшению интеркомбинационных составляющих $nW_1 \pm mW_C$ частот гетеродина W_1 и сигнала W_C (где n и m – целые числа). Все ныне применяемые диоды имеют экспоненциальную ВАХ вида $J=J(U) = \alpha \cdot [\exp(\beta U) - 1]$. Таковы, например, диоды с барьером Шоттки (ДБШ) и диоды с р-п – переходами. Большая кривизна такой экспоненциальной ВАХ приводит к обилию интеркомбинационных частот $nW_1 \pm mW_C$ в спектре смесителя вместо одной полезной частоты $W_{ПЧ} = W_1 - W_C$ (Рис. 1.1).

Чтобы в смесителе увеличить долю мощности сигнала, преобразуемую в эту единственную полезную частоту $W_{ПЧ}$ в нынешних смесителях применяют частотные фильтры, уменьшающие мощность



интеркомбинационных составляющих $nW_I \pm mW_C$. Эти фильтры препятствуют вышеперечисленным тенденциям развития технологии в производстве РЭС, в частности, из-за своих больших размеров делают невозможным изготовление смесителя в виде одной интегральной схемы.

С другой стороны, со времени появления первых диодов известны идеальные формы ВАХ (степени N в формуле $J(U) \sim U^N$) диодов, дающие теоретический минимум интеркомбинационных составляющих гетеродина и



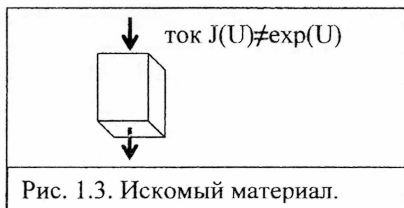
сигнала, но не было ни материала с такими ВАХ, ни технологии его изготовления.

Для амплитудных детекторов оптимальна кусочно – линейная ($N=1$) ВАХ $J(U) \sim U$ с изломом в начале координат. Для смесителя на основной гармонике гетеродина желательна квадратичная ($N=2$) ВАХ $J(U) \sim U^2$ (Рис. 1.2). Эта идеальная ВАХ имеет гораздо меньшую кривизну, чем экспонента, и дает спектр смесителя, состоящий только из 5 спектральных линий. Для гармонического смесителя желательна кубическая ($N=3$) ВАХ диода $J(U) \sim U^3$.

Эта ВАХ имеет кривизну больше, чем у квадратичной ВАХ и меньше, чем у экспоненциальной ВАХ. Кубическая ВАХ дает спектр смесителя из 8 спектральных линий.

Таким образом, актуальны следующие вопросы:

1. Существует ли материал, из которого можно попытаться создать диод с неэкспоненциальной ВАХ (Рис. 1.3).



2. Если такой материал существует, то какова связь его характеристик со степенью его ВАХ.
3. С какой точностью нужно задавать эти характеристики, чтобы получить заданную степень ВАХ.
4. Какой технологический метод позволит изготовить этот материал с нужной точностью.

Итак, объектом исследования является диодный нелинейный преобразователь спектра радиосигнала, а предметом исследования – материал для диода с заранее заданной неэкспоненциальной формой ВАХ и технологический процесс изготовления этого материала.

1.2. Цель и задачи работы

В качестве кандидата на роль материала с неэкспоненциальной ВАХ можно рассмотреть стопку слоев квантоворазмерной толщины из тройного твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (Рис. 1.4), иными словами, AlGaAs квантоворазмерную гетероструктуру. Из литературы известно, что начальные участки ВАХ $J=J(U)$ резонансно – туннельных диодов (РТД), построенных из таких AlGaAs гетероструктур, имеют ВАХ менее крутые, чем экспонента.

Итак, гипотезой исследования является предположение о том, что материалом с заранее заданной неэкспоненциальной ВАХ может служить слоистая квантоворазмерная AlGaAs гетероструктура (называемая в дальнейшем просто AlGaAs гетероструктура).

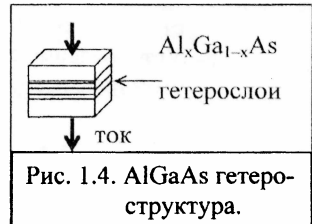
Таким образом, относительно слоистых AlGaAs гетероструктур как нового материала для получения заданной формы ВАХ есть три актуальных технологических вопроса:

1. Какова связь характеристик (параметров) AlGaAs гетероструктуры со степенью N ее ВАХ $J(U) \sim U^N$.
2. С какой точностью нужно задавать эти параметры, чтобы получить заданную степень ВАХ AlGaAs гетероструктуры.
3. Какой технологический метод позволит изготовить AlGaAs гетероструктуру с нужной точностью.

Итак, цель работы заключается в следующем: разработать технологический метод повышения эксплуатационных показателей нелинейных преобразователей спектра радиосигналов путем применения AlGaAs гетероструктур.

Для достижения этой цели надо решить следующие задачи

1. Установить пригодность AlGaAs гетероструктуры на роль материала с неэкспоненциальной ВАХ.



2. Установить связь параметров AlGaAs гетероструктуры со степенью ее ВАХ.
3. Построить диаграммы этой связи с указанием допусков на параметры для получения заданной степени ВАХ.
4. Определить технологический метод нанесения пленок, позволяющий изготовить AlGaAs гетероструктуры с нужной точностью по этим диаграммам.
5. Проверить этот метод на макетах диодов и смесителей.

При решении этих задач использовались следующие методы.

1. Метод молекулярно – лучевой эпитаксии для изготовления AlGaAs гетероструктур.
2. Метод математического моделирования для решения следующих задач.
 - а. Установление пригодности AlGaAs гетероструктуры на роль материала с неэкспоненциальной ВАХ.
 - б. Установление связи параметров AlGaAs гетероструктуры со степенью ее ВАХ.
 - в. Установление связи этой ВАХ со спектром смесителя на диоде из этой гетероструктуры.

1.3. Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложены слоистые AlGaAs гетероструктуры в качестве нового материала для получения заданной формы ВАХ.
2. Определен технологический метод нанесения пленок, позволяющий изготовить AlGaAs гетероструктуры с наперед заданной степенью ВАХ для нелинейных диодных преобразователей спектра радиосигналов.
3. Предложена аналитическая модель начального участка ВАХ РТД, позволяющая установить связь параметров AlGaAs гетероструктуры со степенью ее ВАХ.
4. Технологический метод и предложенная модель ВАХ проверены на макетах диодов и смесителей.
5. Расчитаны и получены AlGaAs гетероструктуры с кубической ВАХ, близкой к оптимальной ВАХ для гармоникового смесителя.

1.4. Практическая ценность работы

Практическая ценность работы заключается в том, что:

1. Предложены слоистые AlGaAs гетероструктуры в качестве нового материала для получения заданной формы ВАХ.
2. Построены диаграммы связи параметров AlGaAs гетероструктуры со степенью ее ВАХ.

3. Определен технологический метод нанесения пленок, позволяющий изготовить AlGaAs гетероструктуры с нужной точностью по этим диаграммам
4. Технологический метод проверен на AlGaAs гетероструктурах с заданной кубической ВАХ, близкой к оптимальной ВАХ для гармоникового смесителя.
5. Разработана методика численного моделирования спектров смесителей по заданным ВАХ диода.
6. Созданы и испытаны макеты смесителей с диодами на базе AlGaAs гетероструктур с заданной кубической ВАХ.

1.5. Основные положения, представляемые к защите

1. Слоистые AlGaAs гетероструктуры в качестве нового материала для получения заданной формы ВАХ.
2. Технологический метод нанесения пленок, позволяющий изготовить AlGaAs гетероструктуры с наперед заданной степенью ВАХ для нелинейных диодных преобразователей спектра радиосигналов.
3. Аналитическая модель начального участка ВАХ РТД, позволяющая установить связь параметров AlGaAs гетероструктуры со степенью ее ВАХ.
4. Диапазон степеней ВАХ AlGaAs гетероструктур, которые позволяет получить разработанная технология.
5. Диаграммы связи параметров AlGaAs гетероструктуры со степенью ее ВАХ.
6. Методика численного моделирования спектров смесителей по заданным ВАХ диода $J=J(U)$.

1.6. Реализация и внедрение результатов работы

Разработанные методики и алгоритмы внедрены в учебно – образовательный процесс каф. РЛ–6 МГТУ им. Н.Э.Баумана, применены в производстве опытных образцов диодов, которые были использованы при изготовлении смесителей в ФГУП «ЦНИРТИ».

1.7. Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 2 международных конференциях.

1.8. Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ.

1.9. Структура и объем диссертации

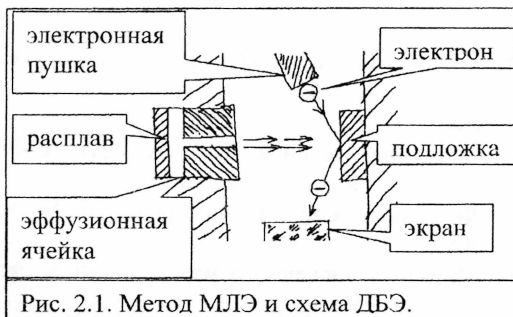
Диссертация изложена на 183 страницах машинописного текста, иллюстрируется 151 рисунком и 5 таблицами, состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 111 наименований.

2. Содержание работы

Во введении рассмотрены актуальность, цель, задачи, научная новизна и практическая ценность работы, указаны объект, предмет и гипотеза исследования и применяемые методы, а также приведены основные результаты и положения, представляемые к защите.

В первой главе проведен обзор разнообразных методов нанесения пленок под углом зрения их пригодности к изготовлению квантоворазмерных гетероструктур, так как в качестве нового материала для получения заданной формы ВАХ предполагается рассматривать AlGaAs гетероструктуры. С этой целью проведен сравнительный анализ следующих методов: термическое и электроннолучевое

испарение, химическое осаждение из паровой фазы, ионно – плазменные методы (включая магнетронное напыление), плазмохимическое осаждение, а также 3 вида эпитаксий: лазерная, жидкофазная и молекулярно – лучевая (МЛЭ) (Рис. 2.1).



Подробно метод МЛЭ рассмотрен в следующем разделе об изготовлении с его помощью AlGaAs гетероструктур вместе со схемой отражательной дифракции быстрых электронов (ДБЭ или RHEED). Здесь рассмотрены только те характерные черты МЛЭ, которые сближают его с ранее рассмотренными методами эпитаксии и описываются комбинированные варианты МЛЭ с другими методами. Из этого обзора сделан вывод, что самым перспективным при разработке технологии многослойных квантоворазмерных гетероструктур является метод МЛЭ в сочетании с дополнениями типа плазменной активации.

Во второй главе проведен обзор тенденций развития РЭС с применением квантоворазмерных гетероструктур. Необходимость этого обзора вызвана тем обстоятельством, что при разработке новых технологических процессов и материалов надо знать, каким требованиям должен удовлетворять новый материал, для каких приборных применений он предназначен. В частности, для диода из нового материала с

неэкспоненциальной ВАХ нужно знать, какова связь характеристик (параметров) материала со степенью его ВАХ, и с какой точностью нужно задавать эти параметры, чтобы получить заданную степень ВАХ. Поэтому этот обзор физико – технологических аспектов применения квантоворазмерных гетероструктур в электронике проведен с упором на вид их ВАХ по следующим направлениям.

1. Какие квантоворазмерные гетероструктуры давно применялись в микроэлектронике и стали прообразом квантоворазмерных приборов.

2. Как связаны с размерами центральной токопроводящей области тип гетероструктуры и вид ее ВАХ (Рис. 2.2). Какие способы расчета ВАХ квантоворазмерных гетероструктур применяются ныне и какова эквивалентная электрическая схема резонансно–туннельного диода (РТД).

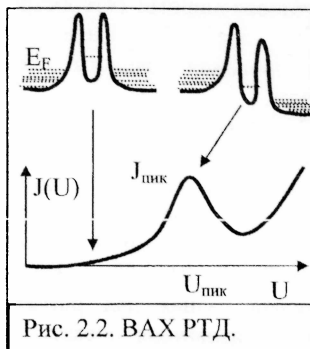


Рис. 2.2. ВАХ РТД.

$$J(U) = J_0 \ln \left[\frac{1 + \alpha \exp(\gamma \beta U)}{1 + \alpha \exp(-(1 - \gamma) \beta U)} \right] \quad (2.1)$$

3. Каковы проблемы технологии, связанные с требуемыми атомными точностями изготовления гетероструктур.

4. Какие шумы токопереноса исследуются в гетероструктурах ныне. В частности, каковы физико – технологические особенности фликкер – шума, дробового, теплового и квантового шумов в квантоворазмерных гетероструктурах.

В третьей главе проведено математическое моделирование для выяснения связи параметров AlGaAs квантоворазмерной гетероструктуры со степенью ее ВАХ. Для этого рассчитана вероятность прохождения $Z(E)$ электрона поперек квантоворазмерных слоев (иными словами, прозрачность этих слоев для

электрона проводимости) в зависимости от напряжения и параметров слоев РТД. Затем получена аналитическая формула ВАХ (2.1) квантоворазмерных гетероструктур для диодов и показано, как из нее получаются формула экспоненциальной ВАХ диода с барьером Шоттки (ДБШ), а также

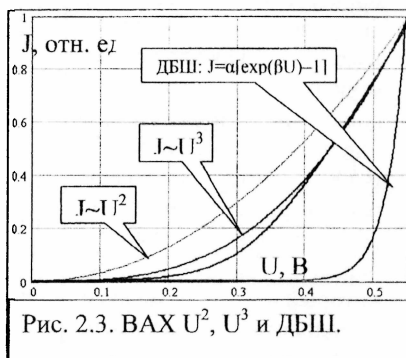


Рис. 2.3. ВАХ U^2 , U^3 и ДБШ.

характерная величина сопротивления контакта между атомами и максимальная теоретически достижимая плотность тока в таких квантоворазмерных гетероструктурах. Из этого математического моделирования сделаны следующие выводы.

1. Слоистые AlGaAs

квантоворазмерные гетероструктуры годятся в качестве нового материала для получения заданной формы ВАХ. В ВАХ $J(U) \sim U^N$. Эта степень нужна разная для разных типов преобразователя спектра. На Рис. 2.3 некоторые требуемые формы квадратичная ($N=2$) и кубичная ($N=3$) сравниваются с единственно доступной на сегодня экспоненциальной ВАХ ДБШ.

1. Предложенная аналитическая модель начального участка ВАХ РТД

позволяет установить связь параметров AlGaAs гетероструктуры со степенью ее ВАХ. Для этого получена формула [1, 2] начального участка ВАХ $J=J(U)$ РТД (2.1), совпадающая с формулой Шульмана – Брокерта ВАХ РТД [3, 4] на участке до пикового тока.

Предложенная модель содержит параметр $\alpha = \exp(-\beta E_B)$, определяющий степень N ВАХ. Этот ключевой параметр α зависит от эффективной высоты барьера $E_B = E_0 - E_F$, который должен преодолеть электрон, чтобы попасть с уровня

Ферми E_F предбарьерных слоев на резонансный уровень E_0 в потенциальной яме между барьерными слоями.

При изменении E_B от 0 до 0,2 эВ форма ВАХ $J(U) \sim U^N$ меняется от линейной ($N=1$) до пятой ($N=5$) степени (Рис. 2.4).

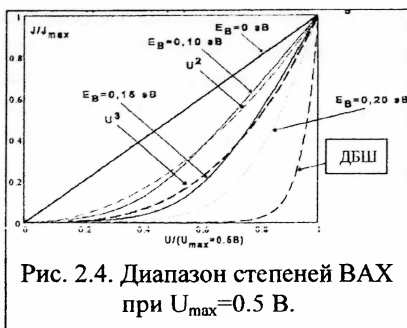


Рис. 2.4. Диапазон степеней ВАХ при $U_{max}=0.5$ В.

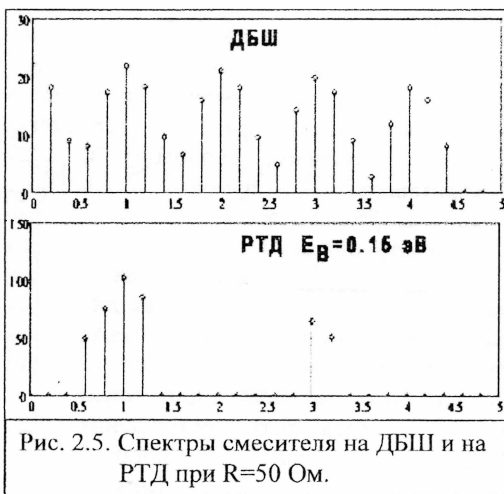


Рис. 2.5. Спектры смесителя на ДБШ и на РТД при $R=50$ Ом.

2. Далее на основе такой модели можно получить диаграммы этой связи и найти диапазон степеней ВАХ AlGaAs гетероструктур, которые позволит получить разрабатываемая технология.

В четвертой главе проведено численное моделирование спектров смесителей по заданной ВАХ диода (Рис. 2.5). Необходимость такого моделирования вызвана тем, что именно спектр нелинейного преобразователя определяет потери мощности в нем на преобразование сигнала, то есть искомую эксплуатационную характеристику, улучшаемую в

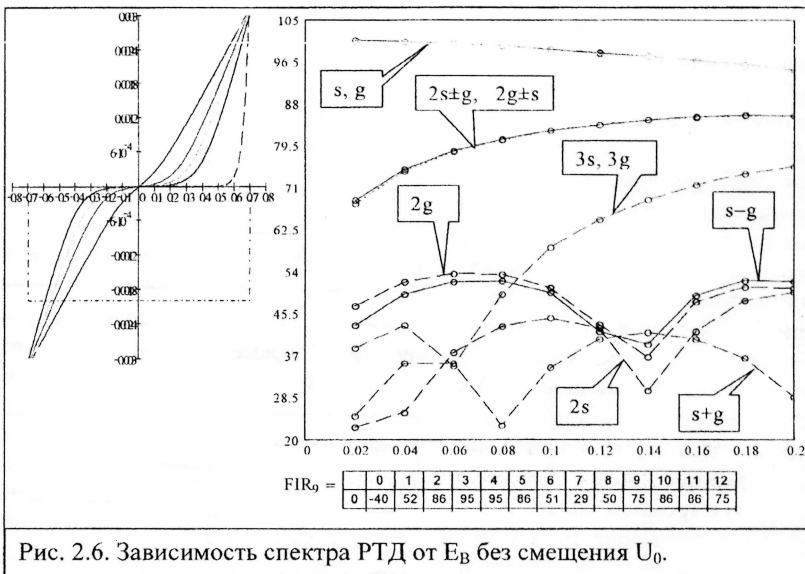


Рис. 2.6. Зависимость спектра РТД от E_B без смещения U_0 .

настоящей работе.

Особое внимание обращено на «квадратичную» и «кубическую» спектральные линии (Рис. 2.6), так именно они определяют потери преобразования в обычном и гармониковом смесителях радиосигналов. Показано, как с поведением этих линий при изменении напряжения смещения связаны преимущества РТД над ДБШ в спектральной области.

Изучено влияние сопротивления нагрузки на спектры и найден диапазон возможных спектров смесителей на РТД. Из проведенного численного моделирования спектров смесителей по заданным ВАХ диода сделан вывод, что применение AlGaAs гетероструктур с наперед заданной степенью ВАХ в нелинейных диодных преобразователях спектра радиосигналов увеличивает мощность полезных спектральных составляющих от 3 до 20 дБ в зависимости от вида преобразователя и от режима его работы (рабочего диапазона напряжений).

В пятой главе описано, как методом молекулярно – лучевой эпитаксии (МЛЭ) были изготовлены искомые AlGaAs квантоворазмерные гетероструктуры с заданной степенью ВАХ (Рис. 2.7). Сначала описаны эффузионные ячейки, контроль роста монослоев по картине на экране ДБЭ (Рис. 2.8) и измерение потоков наносимых материалов Al, Ga, As, Si ионизационной лампой.

Затем определяются точности задания параметров AlGaAs гетероструктуры, которые связаны с процессом эпитаксиального роста: количество N, химсостав (молярная доля x_n алюминия и концентрация легирующей примеси кремния Si_n) и толщины слоев L_n (). Эти параметры влияют на степень ВАХ посредством изменения параметра E_B разработанной аналитической модели ВАХ, описанной в предыдущих разделах. Химический состав слоев описывается двумя величинами.

1. Молярной долей алюминия $x(Al)$ в тройном сплаве $Al_xGa_{1-x}As$ в диапазоне от $xAl=0$ до $xAl=1$, причем она задается с погрешностью ± 0.01 .
2. Концентрацией nSi легирующей примеси Si в диапазоне от $nSi=10^{15} \text{ см}^{-3}$ до $nSi=10^{19} \text{ см}^{-3}$, причем она задается с погрешностью $\pm 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Толщина L слоев задается в диапазоне от $L=0,565 \text{ нм}$ до $L=2000 \text{ нм}$ с погрешностью $0,565 \text{ нм}$ (толщина одного монослоя GaAs).

Затем с учетом этих допустимых погрешностей были получены диаграммы связи параметров AlGaAs квантоворазмерной гетероструктуры со степенью N ее ВАХ (Рис. 2.9). Эти диаграммы есть зависимости $E_B(xAl, M, n)$ введенного ранее модельного параметра E_B от трех параметров гетероструктуры: 1) M – толщины среднего слоя GaAs ямы, 2) xAl – содержания алюминия в барьерных AlGaAs слоях по обе стороны этого среднего слоя, 3) nSi – концентрации легирующей примеси Si в самых

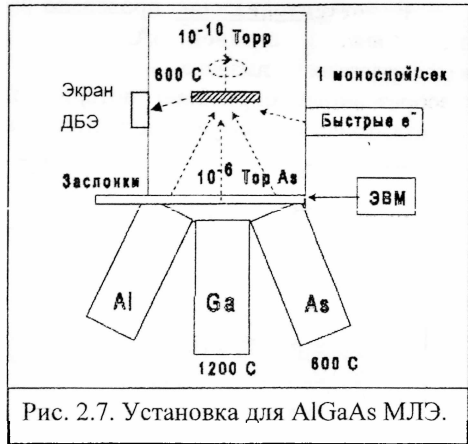


Рис. 2.7. Установка для AlGaAs МЛЭ.

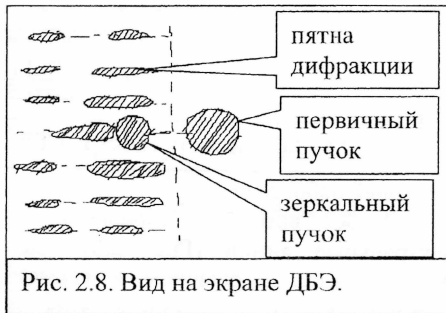


Рис. 2.8. Вид на экране ДБЭ.

крайних GaAs слоев. Для этого сначала привлекается результат, полученный в третьей главе, в виде зависимости энергии E_0 резонанса прозрачности $Z(E)$ от двух параметров – толщины M среднего слоя GaAs ямы и высоты V_b потенциальных AlGaAs барьеров. Далее высоту V_b этих барьеров с достаточной точностью связали с молярной долей алюминия xAl в тройном сплаве $Al_xGa_{1-x}As$ известным соотношением $V_b = xAl$, и таким образом получили зависимость величины E_0 от толщины M слоя GaAs ямы и от содержания xAl алюминия в барьерных AlGaAs слоях.

Расчеты показали, что на энергию E_0 резонанса остальные параметры слоев оказывают слабое влияние. При изменении ширины GaAs слоя потенциальной ямы, (не содержащей алюминия) в диапазоне от $M=5$ до $M=10$ GaAs монослоев (по 0,565 нм каждый) и при изменении молярной доли xAl алюминия в тройном сплаве $Al_xGa_{1-x}As$ барьерных

слоев в диапазоне от $xAl=0,4$ до $xAl=1$ энергия E_0 резонанса меняется в диапазоне от $E_0=0,15$ эВ до $E_0=0,28$ эВ. Соединением полученных

результатов для зависимостей $E_0(xAl, N_w)$ и $E_F(n)$ в формуле $E_B(xAl, N_w, n) = E_0(xAl, N_w) - E_F(n)$, был получен набор диаграмм $E_B(xAl, N_w,$

$n)$ в виде зависимостей $E_0(xAl, N_w)$ при разных значениях концентрации n .

В полученных диаграммах $E_B(xAl, M, n)$ определили области параметров AlGaAs слоев, нужные для получения требуемой степени N .

Эти области зависят от заранее заданного рабочего диапазона напряжений U_{max} нелинейного преобразователя спектра, то есть от планируемой амплитуды гетеродина, как показано в Таблица 1.

Разработанный технологический метод был проверен на получении AlGaAs гетероструктур с заранее заданными кубической ВАХ ($N=3$) и кусочно – линейной ВАХ ($N=1$). Для изготовления AlGaAs гетероструктуры

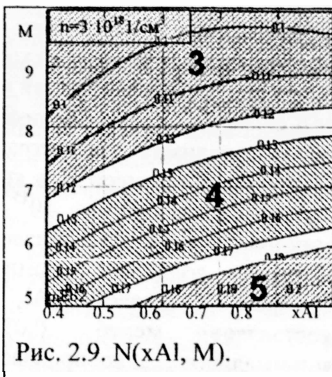


Рис. 2.9. $N(xAl, M)$.

Таблица 1.

U_{max} , В	E_b , эВ	N	U_{max} , В	E_b , эВ	N
0,3	0,0±0,02	1	0,5	0,0±0,05	1
	0,05±0,02	2		0,10±0,02	2
	0,10±0,02	3		0,15±0,02	3
	0,15±0,02	4		0,18±0,01	4
	0,20±0,02	5		0,20±0,01	5

с ВАХ третьей степени из областей на вышеописанных диаграммах был получен следующий набор параметров слоев (Таблица 2). Допустимые погрешности указаны исходя из практических погрешностей метода МЛЭ.

Таблица 2.

N	L, нм	$n_{Si}, 10^{18} \text{ см}^{-3}$	x_{Al}
1	1000±100	3±0,3	< 0,001
2	30+10	< 0,001	< 0,001
3	2,8±0,3	< 0,001	1-0,2
4	4,5±0,3	< 0,001	< 0,001
5	2,8±0,3	< 0,001	1-0,2
6	30+10	< 0,001	< 0,001
7	1000±100	3±0,3	< 0,001

Минимальная воспроизводимая концентрация n легирующей примеси Si в крайних GaAs слоях равна 10^{15} см^{-3} , минимальная воспроизводимая молярная доля x_{Al} алюминия в тройном сплаве $Al_xGa_{1-x}As$ составляет менее 0,01, и минимальное воспроизводимое изменение в толщине L слоя составляет менее одного GaAs монослоя = 0,565 нм.

Погрешности при задании толщины L крайних GaAs слоев указаны большими из-за их большой (относительно квантоворазмерных центральных слоев) микронной толщины.

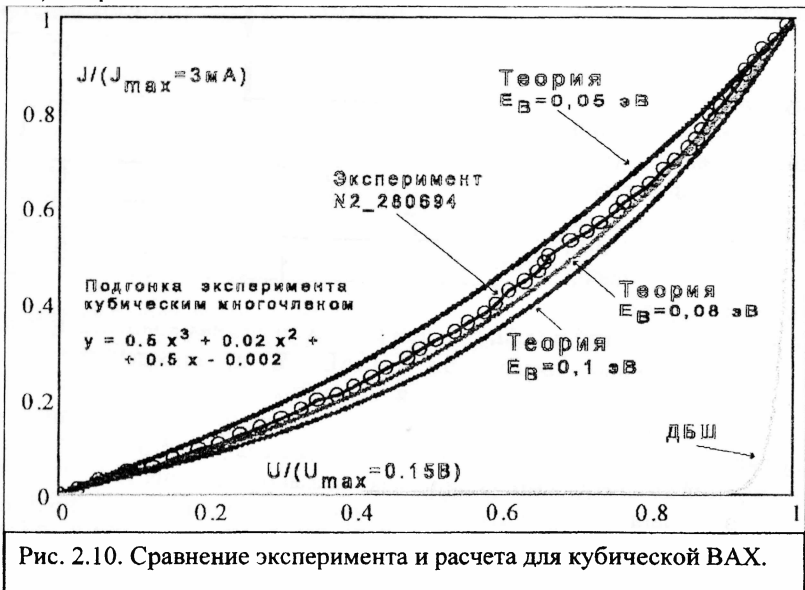


Рис. 2.10. Сравнение эксперимента и расчета для кубической ВАХ.

Рис. 2.10 показывает хорошее соответствие между экспериментом и расчетом. После снятия этих ВАХ были изготовлены макеты смесителей на диодах из таких AlGaAs гетероструктур. Искомое улучшение характеристик нелинейных преобразователей спектра следует из 1) измерений на изготовленных макетах смесителей, показавших для гармоникового смесителя 3 см диапазона на двух диодах потери преобразования 9 дБ при мощности гетеродина 3 мВт на диод, и из 2) расчетов спектров смесителя на основе диода, имеющего неэкспоненциальную ВАХ $J=J(U)$, взятую из полученной аналитической модели (2.1). Как видно из Рис. 2.5, спектр смесителя на полученной AlGaAs гетероструктуре содержит меньше комбинационных составляющих $nW_f \pm mW_c$ частот гетеродина W_f и сигнала W_c (где n и m – целые числа), чем спектры смесителя на ДБШ, что и требуется для улучшения эксплуатационных характеристик нелинейного преобразователя спектра радиосигнала.

3. Заключение по работе

При разработке технологического метода для повышения эксплуатационных показателей нелинейных преобразователей спектра радиосигналов были получены следующие результаты:

1. Предложены слоистые AlGaAs квантоворазмерные гетероструктуры в качестве нового материала с заранее заданной степенью ВАХ.
2. Определен технологический метод нанесения пленок, позволяющий изготовить AlGaAs гетероструктуры с наперед заданной степенью ВАХ для нелинейных диодных преобразователей спектра радиосигналов. Этим методом является метод МЛЭ, обеспечивающий требуемые точности нанесения слоев по толщине и химическому составу.
3. Для реализации этого метода проведено математическое моделирование со следующими результатами:
 - а. Предложена аналитическая модель начального участка ВАХ P/U , позволяющая установить связь параметров AlGaAs гетероструктуры со степенью ее ВАХ.
 - б. Получены диаграммы связи параметров AlGaAs квантоворазмерной гетероструктуры со степенью N ее ВАХ. В полученных диаграммах определены области параметров AlGaAs слоев, нужные для получения требуемой степени N .
 - в. Определено, как эти области зависят от заранее заданного рабочего диапазона напряжений $U_{\max}$ нелинейного преобразователя спектра, то есть от планируемой амплитуды гетеродина.
4. Технологический метод и предложенная модель ВАХ проверены на макетах диодов. Для этого по диаграммам были найдены области параметров AlGaAs слоев, нужные для получения кубической ($N=3$) и

кусочно – линейной ($N=1$) ВАХ, изготовлены опытные образцы диодов и проведено сравнение экспериментальных и теоретических ВАХ, давшее хорошие результаты.

5. Искомое улучшение характеристик нелинейных преобразователей спектра следует из 1) измерений на изготовленных макетах смесителей с полученными макетами диодов и из 2) расчетов спектров смесителя на диоде с неэкспоненциальной ВАХ.
6. Для этих расчетов была разработана методика численного моделирования спектров смесителей по заданным ВАХ диода. Спектры смесителя на диодах из полученных AlGaAs гетероструктур содержат меньше комбинационных составляющих, чем спектры смесителя на ДБШ, чем и достигается поставленная цель – улучшение эксплуатационных характеристик нелинейного преобразователя спектра радиосигнала.

Цитированная литература

1. Аналитическое выражение начального участка ВАХ РТД : Научно-технический отчет о НИР “Джейран-МРП-2” (итоговый). /Ассоциация специальной микроэлектроники (АСЭ). Руководитель НИР Ю.А.Иванов. ГР №5087692, Инв №137.– М., 1997.– 140 с.
2. Иванов Ю.А., Малышев К.В., Федоркова Н.В. Формирование ВАХ AlGaAs нанодиодов //СВЧ техника и телекоммуникационные технологии.: Тез. докл. 14 Междунар. Крымская конф. – Севастополь, 2004.– С.532–534.
3. Schulman J.N., De-Los Santos H.J., Chow D.H.. Physics-Based RTD Current-Voltage Equation //IEEE Electron Device Letters.– 1996.– Vol. 17.– P. 220–222.
4. A Monolithic 4-Bit 2-Gbps Resonant Tunneling Analog-to-Digital Converter /T.P.E.Broekaert, B.Brar, J.P.A.van der Wagt et al. //IEEE Journal of Solid State Circuits.– 1998.– Vol. 33.– P. 1342–1349.

3.1. Основные результаты диссертации опубликованы в работах

1. Исследование направлений применения резонансно-туннельного диода в интегральных схемах СВЧ диапазона /А.М.Георгиевский, Д.В.Громов, К.В.Дудинов и др. //Микроэлектроника.– 1996.– Т.25, №4.– С.249–258.
2. Гармониковый смеситель СВЧ диапазона на РТД /Ю.А.Иванов, К.В.Малышев, Ю.М.Перунов, Н.В.Федоркова. //СВЧ техника и телекоммуникационные технологии.: Тез. докл. 8 Междунар. Крымская конф. – Севастополь, 1998.– Т.2.– С.590–591.

3. Иванов Ю.А., Малышев К.В., Перунов Ю.М. Численное моделирование смесителей на резонансно-туннельных диодах //СВЧ техника и телекоммуникационные технологии.: Тез. докл. 8 Междунар. Крымская конф. – Севастополь, 1998.– Т.2.– С.597–598.
4. Нанодиод для смесителей / Ю.А.Иванов, К.В.Малышев, Ю.М.Перунов, Н.В.Федоркова. //СВЧ техника и телекоммуникационные технологии.: Тез. докл. 12 Междунар. Крымская конф. – Севастополь, 2002.– Т.2.– С.491–492.
5. Иванов Ю.А., Малышев К.В., Федоркова Н.В. Нанoeлектроника на базе многослойных гетероструктур //Известия вузов. Машиностроение.– 2003.– №5.– С.73–78.
6. Иванов Ю.А., Малышев К.В., Федоркова Н.В. Формирование ВАХ AlGaAs нанодиодов //СВЧ техника и телекоммуникационные технологии.: Тез. докл. 14 Междунар. Крымская конф. – Севастополь, 2004.– С.532–534.