

Влияние количества квантовых ям на темновые вольт-амперные характеристики AlGaAs/GaAs QWIP-структур

А.В. Сапожников^{1,2}, Л.С. Богословская^{1,2}, А.Л. Дудин², В.И. Зубков¹, В.В. Перепеловский¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

²АО «Светлана-Рост»

Аннотация: Разработана физико-топологическая модель инфракрасного фотодетектора с квантовыми ямами (QWIP) на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs в среде TCAD. Методом численного моделирования исследовано влияние количества квантовых ям на темновые токи. Корректность модели подтверждена экспериментальными данными, полученными с фотоприемников производства АО «Светлана-Рост». С помощью предложенной модели определено оптимальное количество квантовых ям с заданными параметрами для обеспечения приемлемого уровня темнового тока в рабочем диапазоне напряжений.

Ключевые слова: QWIP, GaAs/AlGaAs, квантовые ямы, TCAD, темновые токи, численное моделирование

1. Введение

Инфракрасные фотодетекторы с квантовыми ямами (QWIP) на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs являются одним из активно развивающихся в настоящее время направлений для обнаружения инфракрасного излучения. QWIP обладают потенциалом для использования в различных сферах: от медицинской диагностики [1] до обнаружения газов [2], а технология их производства обеспечивает как высокую однородность параметров по пластине, так и воспроизводимость ростовых и постростовых процессов [3].

Одной из ключевых характеристик QWIP является темновой ток: его величина определяет предельную температуру работы детектора (BLIP) [4]. Параметры гетероструктуры подбираются таким образом, чтобы обеспечивать минимально возможный уровень темнового тока.

Наличие инструмента, позволяющего заранее оценить целесообразность той или иной модификации гетероструктуры, крайне важно для такого дорогостоящего процесса, как производство QWIP. В качестве такого инструмента может служить математическая модель, наглядно демонстрирующая характеристики фотодетектора при изменении тех или иных параметров.

К настоящему моменту уже существуют аналитические модели, обзор некоторых из которых представлен в публикации [5]. Однако, в связи со сложностью учета всех квантово-механических особенностей гетероструктур, результаты моделирования зачастую отличаются от экспериментальных данных.

При разработке модели важно последовательно варьировать параметры и отслеживать совпадение модельных и экспериментальных данных. В качестве первого шага было выбрано изменение количества квантовых ям: известно, что таким образом может быть достигнуто снижение темнового тока за счет меньшего электрического смещения, прикладываемого к каждой [6]. Однако этот метод ограничен технологическими и экономическими факторами: процесс эпитаксиального роста гетероструктур с большим числом интерфейсов сопряжен с повышенной вероятностью накопления дефектов и шероховатости поверхности [7].

В данной работе представлена модель поведения вольт-амперных характеристик (ВАХ) в зависимости от количества квантовых ям в гетероструктуре QWIP. Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие корректность предложенного математического решения, а также сделан вывод об оптимальном количестве квантовых ям заданного состава.

2. Математическая модель

QWIP представляет собой эпитаксиальную гетероструктуру с множественными квантовыми ямами: слоями узкозонного GaAs, заключенными между слоями широкозонного AlGaAs. Квантовые ямы легируются для обеспечения достаточного количества носителей заряда. Параметры слоев моделируемой структуры представлены в таблице 1.

Таблица 1. Состав слоев гетероструктуры QWIP, содержащей N квантовых ям

Наименование слоя	Толщина слоя, Å	Тип легирования, концентрация, см ⁻³
GaAs	7000	$n, 4.1 \cdot 10^{18}$
$N \text{ Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$	300	-
$N \text{ GaAs}$	50	$n, 4.5 \cdot 10^{17}$
$\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$	300	-
GaAs	15000	$n, 4.1 \cdot 10^{18}$
Буферный слой GaAs	8000	-

Моделирование гетероструктуры выполнялось численными методами с решением фундаментальных уравнений электроники: уравнения Пуассона, уравнений непрерывности и переноса носителей заряда. В TCAD использована гидродинамическая модель, которая может эффективно применяться в контексте субмикронных размерностей прибора, однако для корректного описания квантово-размерных структур она была дополнена решениями квантово-механических уравнений. Уравнения, используемые в настоящем исследовании, представлены в работах [8], [9]

Численный анализ в САПР включал учет ключевых физических явлений в модели QWIP. Для корректного описания энергетических уровней в квантовых ямах и вероятностей межподзонных переходов использовалось самосогласованное решение уравнения Пуассона и уравнения Шрёдингера для связанных состояний в квантовых ямах. Высота потенциального барьера квантовой ямы определялась по молярному составу тройных твердых растворов AlGaAs.

Для обеспечения точности численного моделирования область QWIP была разбита на адаптивную сетку. Ключевой особенностью являлось экстремально локальное сгущение сетки в области каждой квантовой ямы – области, где сосредоточены связанные состояния носителей заряда и наблюдаются наибольшие градиенты зонной диаграммы и волновых функций. Для корректного разрешения этих величин было задано высокое пространственное разрешение в области ям GaAs в 2D разрезе модели (используемом для последующей калибровки 3D модели): не менее 5-10 узлов на каждую квантовую яму и шаг менее 1 нм вблизи гетерограниц. Такая детализация критически важна для точного расчета энергетических уровней и вероятностей межподзонных переходов, определяющих характеристики прибора.

3. Результаты

Проведено детальное исследование влияния различного числа квантовых ям (КЯ) на характеристики инфракрасных фотоприёмников на основе структур квантовых ям (QWIP) на базе AlGaAs/GaAs. Методы исследования базировались на сопоставлении

данных численного моделирования с экспериментальными результатами, полученными на реальных технологических образцах (фотоприемниках) производства АО "Светлана-Рост".

Гетероструктуры для фотоприемников были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на отечественной автоматизированной установке STE35 производства ЗАО «НТО» и проведены через стандартные этапы планарной модификации поверхности [10]. Параметры слоев гетероструктур соответствуют указанным в таблице 1, варьировалось количество квантовых ям: 30, 50 и 70 КЯ.

Измерение электрооптических характеристик фотоприемников проводилось с помощью ИК спектрального комплекса при температуре 77 К. Длина волны максимума в спектре фоточувствительности всех фотоприемников составляла ~8,3 мкм, что подтверждает однородность параметров выращенных гетероструктур и корректность их сравнения между собой. Необходимо отметить, что фоточувствительность в максимуме спектра всех образцов менялась незначительно.

Сопоставление экспериментальных данных с результатами моделирования (рис. 1) позволяет судить о достоверности разработанной модели. Несмотря на незначительные отличия в абсолютных величинах, модельная зависимость достаточно точно повторяет экспериментальную.

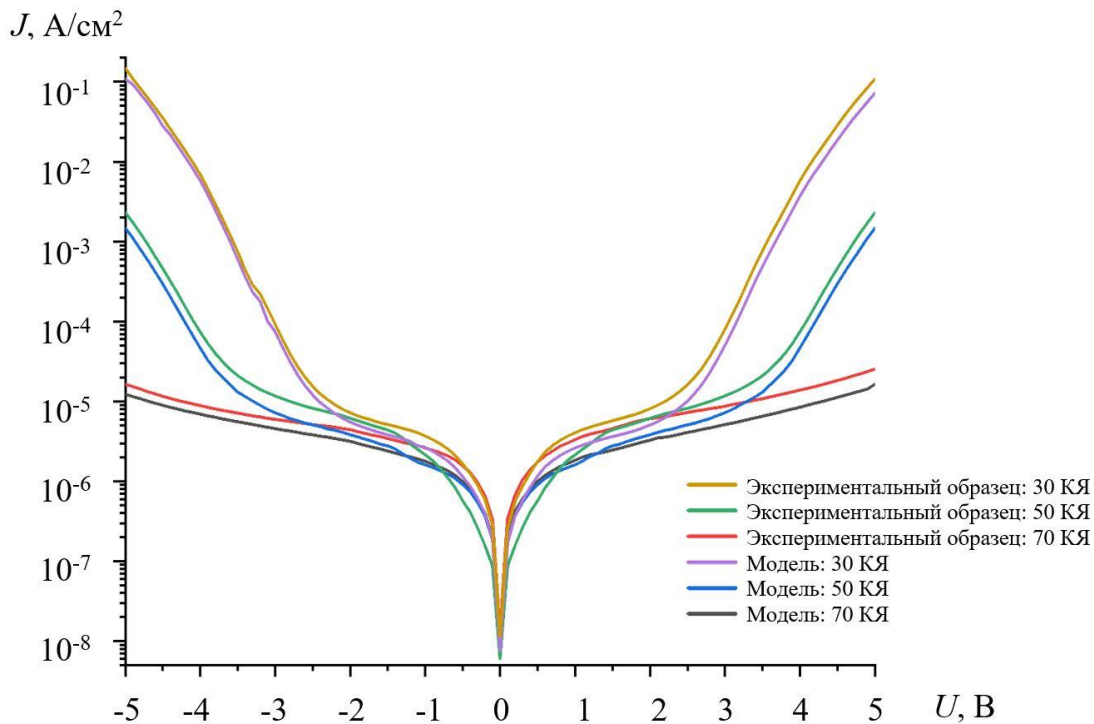


Рисунок 1. Численные и экспериментальные ВАХ структур с различным количеством квантовых ям. По вертикали приведены значения плотности темнового тока, по горизонтали – значения приложенного напряжения

На сравнительной темновой ВАХ (рис. 2) структур QWIP с вариацией квантовых ям от 10 до 70 наблюдается резкое возрастание темнового тока при определенном смещении. Т.к. стандартным интервалом рабочих напряжений QWIP считается 1-3 В [11], а фоточувствительность образцов примерно одинакова, структуры с более чем 50 квантовыми ямами не дают практического выигрыша. При этом, несмотря на резкое возрастание в рабочем диапазоне, плотность тока на структурах с 30 и более квантовыми ямами находится ниже стандартного для LWIR QWIP значения – 10^{-4} А/см² при 77 К в рабочем диапазоне [12]. Таким образом, выявлено, что оптимальная структура QWIP при стандартных условиях содержит 30-50 квантовых ям.

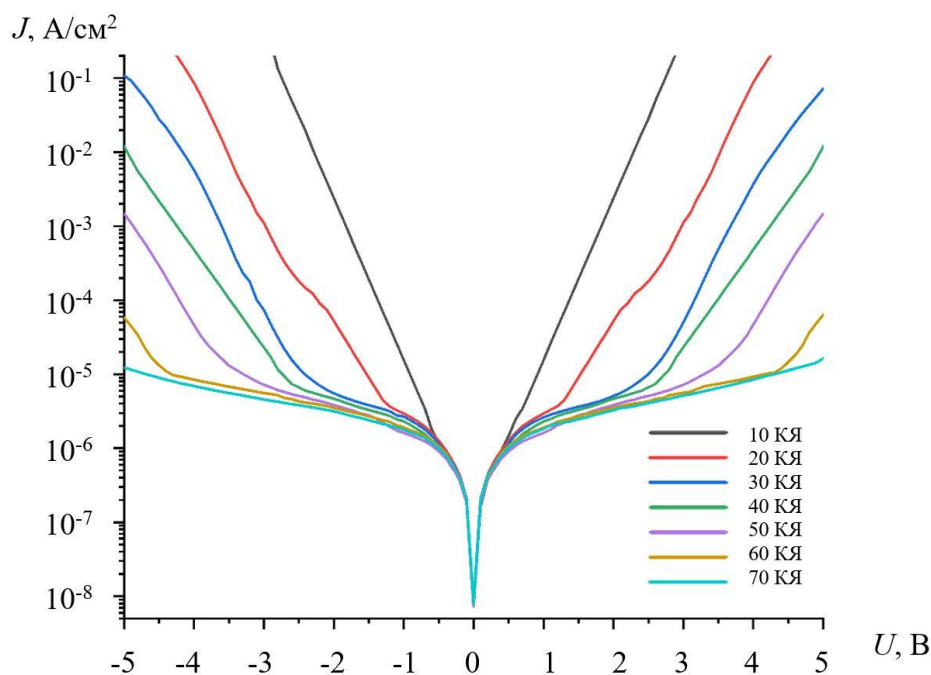


Рисунок 2. Модельные ВАХ структур с вариацией количества квантовых ям от 10 до 70 КЯ. По вертикали приведены значения темнового тока, по горизонтали – значения приложенного напряжения

4. Заключение

Проведено моделирование и экспериментальное подтверждение поведения темнового тока при различном количественном составе активной области QWIP. Установлено, что при заданных параметрах квантовых ям их оптимальное количество составляет от 30 до 50.

Совпадение формы модельных ВАХ с экспериментальными позволяет перейти к следующему шагу – апробации модели с вариацией параметров непосредственно квантовых ям – шириной и высотой барьеров, шириной и степенью легирования квантовых ям, резкостью гетерограниц.

Список литературы

1. Khoshakhlagh A., Gunapala S. D. Infrared imaging: a potential powerful tool for neuroimaging and neurodiagnostics //Neurophotonics. – 2017. – Т. 4. – №. 1. – С. 011014-011014.
2. Sun J. et al. Design and fabrication of resonator-QWIP for SF6 gas sensor application //Advanced Etch Technology for Nanopatterning VI. – SPIE, 2017. – Т. 10149. – С. 96-103.
3. Fastenau J. M. et al. Commercial production of QWIP wafers by molecular beam epitaxy //Infrared physics & technology. – 2001. – Т. 42. – №. 3-5. – С. 407-415.
4. Dhar N. K., Ganguly S., Krishnamurthy S. Physics of Nanostructure Design for Infrared Detectors //21st Century Nanostructured Materials-Physics, Chemistry, Classification, and Emerging Applications in Industry, Biomedicine, and Agriculture. – IntechOpen, 2021.
5. Pedrosa D. M. et al. Computation of dark current in QWIPs using a modelling based on Ehrenfest theorem //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2015. – Т. 48. – №. 36. – С. 365102.
6. Nejad S. M., Pourmahyabadi M., Amidian A. A. Optimal dark current reduction in quantum well 9 μm GaAs/AlGaAs infrared photodetectors with improved detectivity //2006 13th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. – IEEE, 2006. – С. 918-921.
7. Chang L. L., Ploog K. (ed.). Molecular beam epitaxy and heterostructures. – Springer Science & Business Media, 2012.

8. Сапожников А.В., Пушница И.С., Дудин А.Л., Перепеловский В.В. Численный анализ AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT. Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2025;28(3):116-128. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2025-28-3-116-128>
9. SentaurusTM Device User Guide, Ver. T-2022. 03, Synopsys TCAD Sentaurus, San Jose, CA, USA, 2022.
10. Dem'yanenko M. A. et al. AlGaAs/GaAs Quantum Well Infrared Photodetectors //Two-dimensional Materials for Photodetector. – IntechOpen, 2017.
11. Rogalski A. Quantum well photoconductors in infrared detector technology //Journal of Applied Physics. – 2003. – Т. 93. – №. 8. – С. 4355-4391.
12. Tidrow M. Z. QWIP and MCT for long wavelength and multicolor focal plane array applications. – 1998. – №. ARLTR1534.