

содержит 139 страниц текста, 48 иллюстраций. Список цитируемой литературы включает 218 наименований. Материалы диссертации опубликованы в 24 работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, 6 статьях в журналах ВАК, индексируемых в библиографической базе данных РИНЦ, и 18 публикациях в сборниках материалов международных и всероссийских конференций. По результатам научных исследований в соавторстве получен один патент РФ на изобретение.

3. Научная новизна полученных результатов

Впервые показано, что при большой разнице концентраций электронов и дырок в полупроводнике бимолекулярная модель излучательной рекомбинации сменяется моделью рекомбинации, в которой скорость рекомбинации не зависит от концентрации легирующей примеси и определяется концентрацией неосновных носителей заряда.

Впервые составлена эквивалентная схема светоизлучающей гетероструктуры с квантовыми ямами, которая учитывает захват носителей заряда ямой, их излучательную рекомбинацию, а также протекание не взаимодействующего с ямами сквозного тока. Вычислены все элементы эквивалентной схемы.

Разработана математическая модель и экспериментально апробирован новый метод исследования свойств полупроводниковых приборов с р-п переходом – метод резистивного профилирования, потенциально обладающий более высокой информативностью по сравнению с емкостным методом.

Предложена феноменологическая модель захвата носителей заряда квантовой ямой, основанная на модели рекомбинации Шокли-Рида-Холла. Модель позволяет рассчитать скорость генерации оптического излучения. В гетероструктурах из InGaN/GaN экспериментально определены энергии оптических фононов, участвующих в захвате электронов и дырок квантовой ямой.

Предложен профиль прямоугольной квантовой ямы, полученный совмещением прямоугольных ям разной ширины и глубины, позволяющий увеличить число захватываемых носителей заряда и тем самым увеличить интенсивность излучения гетероструктуры. Комбинирование ям треугольного профиля также может увеличивать интенсивность излучения, но меньше, чем комбинирование прямоугольных квантовых ям.

4. Практическая значимость работы

Разработана методика комбинирования квантовых ям прямоугольного и треугольного профилей, позволяющая повысить эффективность светоизлучающих ГС до нескольких раз.

Предложен и экспериментально апробирован новый метод исследования свойств полупроводниковых приборов с р-п переходом – метод резистивного профилирования, потенциально обладающий более высокой информативностью по сравнению с емкостными методами исследования.

Составлена эквивалентная схема гетероструктуры с квантовыми ямами, учитывающая значимые электронные процессы в гетероструктуре и позволяющая исследовать электрофизические, полевые и оптические свойства наноразмерных объектов методами теории электрических цепей.

5. Степень достоверности и апробация работы

Достоверность выносимых на защиту теоретических и экспериментальных результатов обеспечивается их воспроизводимостью, внутренней непротиворечивостью и согласованностью с результатами исследований других авторов. Результаты экспериментальных исследований получены с использованием стандартных измерительных методик и сертифицированного контрольно-измерительного оборудования. Выполненные в диссертационной работе теоретические расчеты базируются на базовых принципах и моделях физики полупроводников и теории низкоразмерных объектов в микро- и оптоэлектронике. Все результаты диссертационной работы при их опубликовании в научных журналах и выступлениях на научных конференциях различного уровня прошли рецензирование и обсуждения научной общественностью.

Результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2018-2020 гг; Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» г. Томск, 2018-2021 гг; Международном научном конгрессе научная сессия «Первые шаги в науке» г. Новосибирск, 2019 г; 57-й Международной научной студенческой конференции, г. Новосибирск, 2019 г; Международной конференции по фотонике и информационной оптике г. М., 2019-2021 гг; Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых ТПУ, Томск, 2021 г; Всероссийской научно-технической конференции СФУ, г. Красноярск, 2022 г.

6. Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать для создания гетероструктур с множественными квантовыми ямами. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в научных организациях и научно-производственных предприятиях, занимающихся разработкой и производством полупроводниковых приборов.

7. Замечания по диссертации

Имеющиеся замечания и недостатки по диссертационной работе Задорожного О.Ф. представлены ниже.

1. В работе практически не анализируются сделанные допущения и не оценивается их влияние на результаты:

1.1. Оценка положения уровней и их заселенности делается на основе модели квантовой ямы бесконечной глубины, хотя в работе рассматриваются ямы конечной глубины.

1.2. Используется модель квантовой ямы с параболическим законом дисперсии, нет оценки влияния непараболичности спектра особенно в материалах с In .

1.3. При построении потенциального профиля зоны проводимости учитывается только основной Γ -минимум и не оговаривается проявление дополнительных минимумов. В то же время известно, что в гетеропереходах и сверхрешетках на основе материалов A_3B_5 при

варьировании ширины КЯ и потенциальных барьеров могут проявляться дополнительные минимумы. При этом, сверхрешетка 1-го типа может превратиться в сверхрешетку 2-го типа и вместо прямых оптических переходов могут наблюдаться непрямые оптические переходы и т.п.

1.4. Никак не рассматривается вопрос о влиянии легких дырок на положение и структуру энергетических уровней в валентной зоне. Несмотря на маленькую эффективную массу легких дырок, наличие вырождения подзон в Γ -точке зоны Бриллюэна может существенно сказаться на квантовании дырочных подзон.

1.5. Не оценивается влияние наклона энергетических зон в электрическом поле, накопление заряда в области ямы и взаимодействие с соседними КЯ.

2. Материал диссертации изложен несколько небрежно, что затрудняет понимание:

2.1. Стр. 27 (диссертации) сделана запись: $p = mv$, mv – импульс частицы. Не сказано что такое v ? На этой же стр. $E_k = m_n^* v^2 / 2$, $E_w = \hbar k$, где $k = 2\pi / \lambda_B$ (k – сначала индекс у E_k , хотя в самой формуле k нет, а затем k сомножитель следующая формула. Сама формула $E_w = \hbar k$? Что такое E_w и само w ?).

2.2. В формуле (1.5), и на стр. 27 используется обозначение λ_B , а на стр. 29. – λ_B ?

2.3. Параграф 1.3.3. «Расчет энергетического спектра квантовой ямы различной формы» начинается с уравнения Шредингера для эффективной массы, независимой от координаты, а затем изложение ведется для случая с эффективной массой зависящей от координаты?

2.4. Стр. 28 «– первое состояние (в треугольной КЯ) с $E = E_1$ лежит выше, чем в прямоугольной КЯ» – всегда? При любой напряженности электрического поля?

2.5. На стр. 32. (1.17) массы одинаковые? А далее в (1.18) они разные?

2.6. Стр. 34. В тексте написано: «Поскольку вне ямы, в области бесконечно высоких барьеров волновая функция равна ($x = 0, L = 0$?) нулю справедливы граничные условия:

$$V(x) = \begin{cases} |q|Fx, & x > 0 \\ +\infty & x < 0 \end{cases} \quad (1.26) \gg$$

Скорее наоборот из-за такого потенциала волновые функции на границах равны нулю? И (1.26) обычно не называют граничными условиями?

2.7. Что такое ξ в (1.28)?

2.8. Не правильно записано выражение (1.31)? В результате не совпадает размерность?

2.9. Правое неравенство в (2.2) на самом деле точное равенство?

2.10. Начало параграфа 2.1.1. «Для того чтобы в потенциальной квантовой яме прямоугольной формы размером a наблюдался эффект РК, необходимо, чтобы размеры ямы были больше некоторого характеристического размера, определяемого параметрами находящегося в ней свободным носителем заряда (электрона), именуемого длиной волны де Бройля λ_B ».

Не ясно, что в данном случае значит «наблюдался эффект РК»? Как правило для наблюдения эффектов размерного квантования требуется уменьшение ширины КЯ. Кроме того,

оценки делаются для бесконечной КЯ, а у КЯ конечной глубины волновая функция проникает в область барьера и область локализации электрона становится плохо обусловленной?

2.11. Тоже самое относится к параграфу 2.1.2. Приводится выражение для оценки энергии разрешенных состояний в треугольной КЯ («бесконечной»), а далее утверждается: «...величина поля обратно пропорциональна ширине квантовой ямы a и прямо пропорциональна энергетической глубине КЯ». При этом никаких пояснений, допущений и ограничений возникающих при переходе от «бесконечной» треугольной КЯ к треугольной КЯ «конечной глубины» не приводится? Да и расшифровка термина ширина ТРЕУГОЛЬНОЙ квантовой ямы a – отсутствует.

2.12. Стр. 47. Подпись под рис. 2.1 перепутана.

2.13. Не ясно также, что значит фраза на стр. 48: «...условие размерного квантования выполняется, начиная с $n=1$ »?

2.14. На стр. 49 сделан вывод: «Таким образом, на основании проведенного рассмотрения можно сделать вывод, что ... , а количество энергетических уровней определяется как глубиной потенциальной ямы, так и её шириной.» Но это можно было констатировать и без проводимого рассмотрения – это очевидно.

2.15. Стр. 49. ... повышая, тем самым увеличения внутренней квантовой эффективности излучения света.

2.16. Стр. 51. Рис. 2.3. Исходя из поведения уровня Ферми это диаграмма без приложенного напряжения, а на рис. есть V ? Тоже и на рис. 3.5.а.

2.17. Стр. 58. В исследовании приняло участия около десятка СДГС с КЯ.

2.18. На рисунке 3.1 представлена энергетическая диаграмма КЯ, состоящей из двух минизон. А на рис. дискретный спектр? Не стандартное употребление терминов.

2.19. Стр. 63 «... перевод ЭС в схему замещения. Для исследования свойств полупроводниковой ГС с помощью её ЭС замещения... » Сначала ЭС и схема замещения разные понятия, а потом единое?

2.20. Стр. 66 «Получившиеся в результате такого эксперимента зависимости представляют из себя, по меньшей мере, сумму двух измерений (видимо – двух эффектов?), которая одновременно содержит информацию о сопротивлении p - n перехода и последовательно соединенных сопротивлений, характеризующих механизм поставки свободных носителей заряда к КЯ с последующим их захватом».

Заключение

Тем не менее, несмотря на отмеченные выше недостатки работы, при построении инженерных моделей они не являются критичными. Считаем, что диссертационная работа «Повышение эффективности светодиодных источников излучения на основе InGaN/GaN», полностью отвечает требованиям, указанным в п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а ее

автор, Задорожный Олег Федорович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.5 – Физическая электроника.

Диссертация рассмотрена, доклад соискателя заслушан, отзыв на диссертационную работу обсужден и одобрен на расширенном заседании кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета (протокол № 7 от 14 ноября 2023 года).

Председатель расширенного заседания кафедры,
заведующий кафедрой полупроводниковых
приборов и микроэлектроники
к.т.н., доцент
Тел.: +7 (383) 346-08-77
E-mail: ostertak@corp.nstu.ru

Остертак Дмитрий Иванович

Ученый секретарь расширенного заседания кафедры,
доцент кафедры полупроводниковых
приборов и микроэлектроники
к.т.н., доцент

Новиков Илья Леонидович

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ)

Адрес: 630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20.

Тел.: +7 (383) 346-50-01, факс.: +7 (383) 346-02-09

E-mail: rector@nstu.ru

Официальный сайт: www.nstu.ru

Подписи Остертака Д.И. и Новикова И.Л. заверяю

Начальник отдела кадров ФГБОУ ВО НГТУ



Пустовалова Ольга Константиновна