

Гистерезис вольт-амперной характеристики лазерной квантоворазмерной гетероструктуры с обогащенным электронами слоем

А. А. Афоненко^{1,*}, Д. В. Ушаков¹, А. А. Дубинов²

¹ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь

² Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, 7, д. Афоново, Кстовский р-н, Нижегородская обл., 607680.

*afonenko@bsu.by

Проведено моделирование межподзонного однокаскадного лазера ТГц диапазона с плазмонным волноводом на основе обогащенного электронами слоя на гетеропереходе GaAs/AlGaAs. На основе самосогласованных расчетов электронных состояний с учетом влияния пространственного распределения заряда на профиль зоны проводимости показано, что вольт-амперная характеристика лазера имеет гистерезисный вид. Генерация плазмонной моды возникает преимущественно на нижнем участке гистерезиса.

Введение

В настоящее время для квантово-каскадных лазеров ТГц-диапазона (ТГц ККЛ) в основном используется двойной металлический волновод. При этом для компенсации потерь необходимо выращивать множество каскадов, общая толщина которых достигает 5–10 мкм. Недавно предложено использовать 2D-плазмон в качестве моды, генерируемой ТГц ККЛ [1]. В работе [2] рассмотрена возможность использования обогащенного слоя на гетерогранице в качестве верхнего лазерного уровня, предложена соответствующая лазерная структура и проведены расчеты зонной диаграммы и генерирующей плазмонной моды.

В настоящей работе исследованы особенности вольт-амперных характеристик квантоворазмерных гетероструктур с обогащенным электронами слоем и показано наличие в них гистерезисов.

Результаты расчетов

Плазмонная мода возникает на границе материалов с положительной и отрицательной диэлектрической проницаемостью. Отрицательная диэлектрическая проницаемость возникает в полупроводнике при достаточно большой концентрации электронов. Большую концентрацию электронов можно получить на гетерогранице. Преимуществом такого обогащенного слоя по сравнению с легированными полупроводниковыми структурами является малое рассеяние на примесях, и соответственно малая величина поглощения на свободных носителях. Огромная, по сравнению с традиционными ККЛ, концентрация электронов в обогащенном слое делает целесообразным его использование в качестве верхнего лазерного уровня.

Расчеты выполнялись для гетероструктуры GaAs/Al_xGa_{1-x}As (рис. 1). Последовательность слоев структуры в нанометрах составляла 230/1,98/5,64/2,26/4,23/2,54/3,67/1,69/200/40, где обычным шрифтом указаны толщины слоев GaAs, жирным шрифтом выделены толщины барьерных слоев Al_{0,45}Ga_{0,55}As, подчеркнут легированный слой до концентрации $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Легированный слой позволял распределить падение напряжения в основном на центральную часть структуры. Расстояние между легированным слоем и активной зоной выбиралось таким образом,

чтобы плазмонная мода значительно не проникала в этот слой и не поглощалась там.

Алгоритм расчета включал решение уравнения Шредингера для центральной части структуры **k-p** методом, расчет вероятностей переходов и населенности уровней [3], решение уравнения Пуассона для всей структуры и перерасчет профиля зоны проводимости с учетом потенциала заряженных областей. При этом эмиттерные области рассчитывались в приближении полупроводников с объемными свойствами в состоянии термодинамического равновесия при постоянных значениях квазиуровней Ферми. Алгоритм повторялся до полной сходимости.

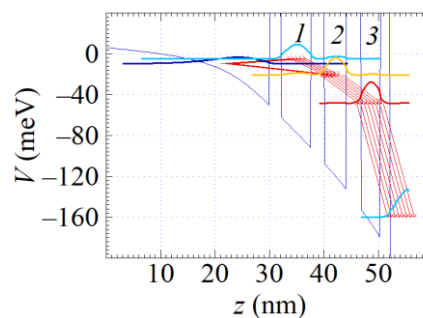


Рис. 1. Профиль зоны проводимости центральной части структуры, уровни энергии и квадраты волновых функций при напряжении 0,6 В. Стрелками показан перенос носителей заряда

На гетерогранице GaAs–Al_{0,45}Ga_{0,55}As возникает обогащенный электронами слой. При приложении напряжения 0,6 В концентрация электронов в нем возрастает до $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. При этом искривленная зона проводимости формирует потенциальную яму с уровнем размерного квантования, который выполняет функции инжектора и верхнего лазерного уровня. Четыре барьера создают 3 квантовые ямы (КЯ), пронумерованные последовательно 1, 2, 3. КЯ 1 создает уровень выше инжектора только для получения положительной ВАХ. Чтобы обеспечить достаточный дипольный матричный элемент между волновыми функциями инжектора и нижнего лазерного уровня во 2-й КЯ барьеры между ними делаются узкими. Опустошение нижнего лазерного уровня из КЯ 2 в КЯ 3 осуществляется при испускании оптического фотона и рассеянии на шероховатостях гетерограниц. Далее электроны из КЯ 3 туннелируют в континуум.

Как видно на рис. 2, плотность тока через структуру имеет гистерезисные участки. При увеличении напряжения энергия уровней в КЯ 3 и 2 последовательно уменьшается до энергии уровня инжектора в обогащенном слое. При энергетическом резонансе возрастает туннелирование электронов на выбранный уровень и растет заселение соответствующей КЯ. Перераспределение электронной плотности снижает величину электрического поля между КЯ и инжектором и замедляет изменение энергии уровня при увеличении напряжения на структуре (рис. 3). При некотором критическом напряжении энергия уровня становится ниже уровня инжектора, и система становится неустойчивой: уменьшение энергии уровня приводит к снижению туннельного тока, уменьшается населенность КЯ и возрастает напряженность поля между КЯ и инжектором, что, в свою очередь, уменьшает энергию уровня. Это происходит, пока не будет достигнуто новое устойчивое состояние. При уменьшении напряжения перескок происходит при сближении уровней, когда существенным механизмом переноса становится туннельный ток.

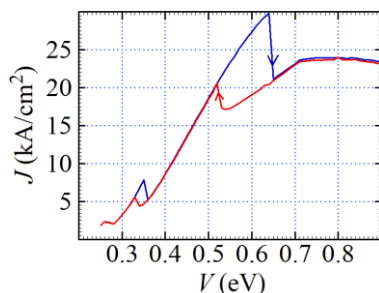


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика при увеличении и уменьшении напряжения на структуре

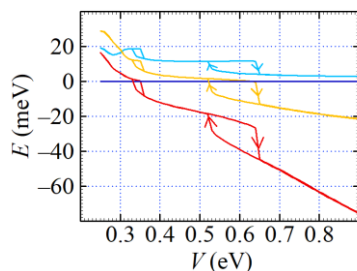


Рис. 3. Зависимость энергии уровней от приложенного напряжения. Цвета соответствуют волновым функциям на рис. 1

В выбранной структуре плазмонный волновод и генерация плазмонной моды возникает на интервале напряжений 0,55–0,69 В и захватывает нижний участок гистерезиса вольт-амперной характеристики. При этом частота моды изменяется в диапазоне 2,0–3,6 ТГц. При расчете комплексной диэлектрической проницаемости учитывались эффекты взаимодействия с фононами кристаллической решетки, плазмен-

ные эффекты электронного газа в модели Друде и дипольное взаимодействие излучения с локализованными состояниями. Пространственное распределение диэлектрической проницаемости учитывало распределение электронной плотности и распределение плотности соответствующих диполей.

Как видно на рис. 4, плазмонная мода преимущественно локализуется в области обогащенных слоев. Ширина моды составляет около 30 нм. Мнимая часть диэлектрической проницаемости в области между волновыми функциями верхнего и нижнего лазерных уровней отрицательная. Рассчитанная постоянная распространения имеет отрицательную мнимую часть, что соответствует режиму генерации этой моды. Эффективный показатель преломления моды составил 1230.

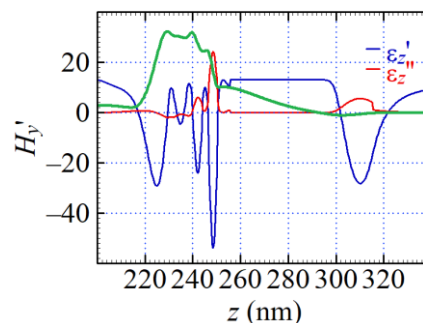


Рис. 4. Профиль диэлектрической проницаемости (действительная и мнимая части) и распределение напряженности магнитного поля генерирующей моды (зеленая кривая) на частоте 2,7 ТГц при $V = 0,6$ В

Заключение

Таким образом, проанализирована структура однокаскадного лазера ТГц-диапазона с плазмонным волноводом на основе обогащенного электронами слоя на гетеропереходе GaAs/AlGaAs. Проведены самосогласованные расчеты электронных состояний с учетом влияния пространственного распределения заряда на профиль зоны проводимости. Показано, что вольт-амперная характеристика лазера имеет гистерезисный вид.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 23-19-00436.

Литература

1. А. А. Дубинов, В. Я. Алешкин // ФТП. 2021. Т. 55, № 10. С. 869–871.
2. А. А. Афоненко, Д. В. Ушаков, А. А. Дубинов // Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции. (Минск, 21–23 ноября 2023 г.). Минск: БГУ, 2023. С. 232–234.
3. Д. В. Ушаков, А. А. Афоненко, А. А. Дубинов и др. // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. С. 913–918.