Однокаскадный лазер ТГц диапазона с плазмонным волноводом на основе обогащенного электронами слоя на гетеропереходе GaAs/AlGaAs

А. А. Афоненко¹⁾, Д. В. Ушаков¹⁾, А. А. Дубинов²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: <u>afonenko@bsu.by</u> ²⁾Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

Предложена структура и проведено моделирование однокаскадного лазера ТГц диапазона с плазмонным волноводом на основе обогащенного электронами слоя на гетеропереходе GaAs/AlGaAs. Показано, что в структуре реализуется генерация плазмонной моды на частоте 2.5 ТГц с эффективным показателем преломления 1650. При этом пространственная ширина моды составляет несколько десятков нм.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер; ТГц диапазон; плазмонный волновод, гетеропереход GaAs/AlGaAs, обогащенный слой.

Single-cascade THz laser with plasmon waveguide based on electron-enriched layer on GaAs/AlGaAs heterojunction

A. A. Afonenko¹, D. V. Ushakov¹, A. A. Dubinov²

¹⁾Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: <u>afonenko@bsu.by</u> ²⁾Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhny Novgorod, Russia

The structure of a single- cascade THz laser with a plasmon waveguide based on an electronenriched layer on a GaAs/AlGaAs heterojunction is proposed and modeled. It is shown that the structure realizes the generation of a plasmon mode at a frequency of 2.5 THz with an effective refractive index of 1650. The spatial width of the mode is a few tens of nm.

Keywords: quantum-cascade laser; mid infrared range; GaAs/AlGaAs heterojunction, enriched layer.

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 было предложено использовать 2D плазмон в качестве моды, генерируемой ТГц ККЛ, и проведен расчет необходимых характеристик структуры в простой модели [1]. В настоящей работе исследуется более реалистичная возможность получения генерации в плазменном волноводе, который образуется вблизи обогащенного слоя на гетерогранице двух полупроводниковых материалов. Преимуществом такого обогащенного слоя по сравнению с легированными полупроводниковыми структурами является малое рассеяние на примесях и, соответственно, малая величина поглощения на свободных носителях.

Расчеты выполнялись для гетероструктур GaAs/Al_xGa_{1-x}As (рис. 1). Последовательность слоев оптимизированной структуры в нанометрах составляла 230/2.54/ 5.36/2.54/3.95/2.82/3.39/2.54/42/20/100, где обычным шрифтом указаны толщины слоев GaAs, жирным шрифтом выделены толщины барьерных слоев Al_{0.45}Ga_{0.55}As,

Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2023 г.

подчеркнут легированный слой до концентрации 5.10¹⁷ 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 [2], 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.

На гетерогранице GaAs–Al_{0.45}Ga_{0.55}As возникает обогащенный электронами слой с двухмерной концентрацией более 10^{11} см⁻². При приложении напряжения 1 В эта концентрация возрастает до 10^{12} см⁻². Большая концентрация электронов приводит к отрицательной диэлектрической проницаемости и возникновению плазмонной моды вблизи гетерограницы. Огромная, по сравнению с традиционными ККЛ, концентрация электронов позволяет использовать этот уровень одновременно в качестве инжектора и верхнего лазерного уровня даже при сравнительно небольшом дипольном матричном элементе (рис. 2). 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 из КЯ 2 в КЯ 3 осуществляется при испускании оптического фонона. Далее электроны из КЯ 3 туннелируют в континуум.



Рис.1. Профиль зоны проводимости структуры при напряжении 0.9 В



Рис.2. Профиль зоны проводимости, уровни энергий и квадраты волновых функций при напряжении 0.9 В. Стрелками показаны излучательные переходы.

Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2023 г.







Рис.4. Профиль диэлектрической проницаемости (действительная и мнимая части) и распределение напряженности магнитного поля генерирующей моды (зеленая кривая)

В выбранной структуре максимум усиления попадает на частоту 2.5 ТГц (рис. 3). При расчете комплексной диэлектрической проницаемости учитывались эффекты взаимодействия с фононами кристаллической решетки, плазменные 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 попадает в область между волновыми функциями верхнего и нижнего лазерных уровней, где мнимая часть диэлектрической проницаемости отрицательная. Ширина моды составляет около 40 нм. Рассчитанная постоянная распространения имеет отрицательную мнимую часть, что соответствует режиму генерации этой моды. Эффективный показатель преломления моды составил 1650.

Таким образом, предложена 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. Получен профиль комплексной диэлектрической проницаемости с учетом распределения электронной плотности. Найдено пространственное распределение и эффективный показатель преломления генерирующей плазмонной моды.

Библиографические ссылки

- 1. Дубинов А. А., Алешкин В. Я. Модель терагерцового квантово-каскадного лазера на основе двумерного плазмона // Физика и техника полупроводников. 2021. Т. 55, № 10. С. 869–871.
- Моделирование квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона частот методом балансных уравнений на основе базиса волновых функций со сниженными дипольными моментами туннельно-связанных состояний / Д. В. Ушаков [и др.] // Квантовая электроника. 2019. Т. 49, № 10. С. 913–918.

Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2023 г.