

Некаскадный межподзонный инжекционный лазер среднего ИК-диапазона на основе HgCdTe

А. А. Афоненко^{1,*}, Д. В. Ушаков¹, А. А. Дубинов², В. Я. Алешкин², С. В. Морозов², В. И. Гавриленко²

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

² Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Кстовский район, Нижегородская обл., 603087
*afonenko@bsu.by

В работе проанализирована возможность создания некаскадного межподзонного инжекционного лазера среднего ИК-диапазона на основе HgCdTe с минимальным количеством квантовых ям. Предложена структура лазера с тремя квантовыми ямами, в которой при температуре 77 К достигается модовое усиление около 35 см^{-1} на длине волны около 9.2 мкм.

Введение

Основными факторами, ограничивающими температурные характеристики межзонных полупроводниковых лазеров среднего инфракрасного диапазона (ИК), являются оже-рекомбинация, неравновесный нагрев носителей и поглощение свободными носителями. Экспериментальные [1] и теоретические [2] исследования показывают, что в межзонных лазерах на основе HgCdTe-гетероструктур максимальная длина волны генерации при комнатной температуре составляет около 3 мкм. Для больших длин волн более перспективными являются дизайны лазерных гетероструктур с межподзонными переходами. При том лазерная генерация может быть реализована в некаскадной структуре с одним лазерным переходом [3].

Целью работы являлся анализ возможности создания межподзонного инжекционного лазера среднего ИК диапазона на основе HgCdTe с минимальным количеством квантовых ям.

Дизайн структуры

Предложенная структура лазера $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}/\text{Hg}_{0.2}\text{Cd}_{0.8}\text{Te}$ включает три квантовые ямы (КЯ) (толщины слоев 4.2/4.2/2.6/10.0/1.6/7.1/3.6 нм) (рис. 1). Для уменьшения количества КЯ в инжекторе использован материал $\text{Hg}_{0.6}\text{Cd}_{0.4}\text{Te}$ с большей шириной запрещенной зоны, чем материал КЯ. Все слои структуры слабо легированы до концентрации 10^{16} см^{-3} . Для увеличения усиления область инжектора (30 нм) легирована до концентрации $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Волновод структуры образован слоями $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ суммарной толщиной около 2 мкм, обкладки волновода — буферным слоем CdTe толщиной 5 мкм и покровным слоем CdTe толщиной 8 мкм для исключения потерь в металлических контактах (рис. 2). Оптическое ограничение в КЯ толщиной 10 нм составляет 0.0056.

В качестве инжектора выступает слой объемного материала, с одной стороны, ограниченный барьерным слоем (рис. 1). Основной уровень объемного слоя туннельно связан с основным уровнем примыкающей КЯ 1, который является верхним лазерным уровнем. Энергия верхнего лазерного уровня близка к энергии второго уровня КЯ 2. Это приводит к эффективному проникновению соответствующей волновой функции в КЯ 2 и увеличивает матричный элемент дипольных переходов. Нижние уровни КЯ 2 и 3 туннельно связаны, что обеспечивает эффективное опустошение

нижнего лазерного уровня при испускании оптических фононов и переходе электронов в КЯ 3. Основное состояние КЯ 3 туннельно связано с состояниями объемного материала.

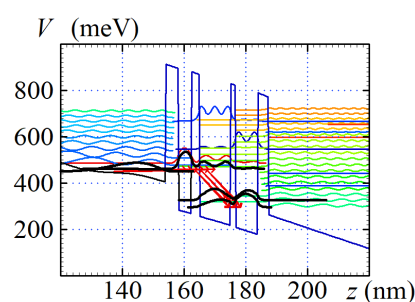


Рис. 1. Профиль зоны проводимости и квадраты волновых функций. Стрелками показан перенос электронов

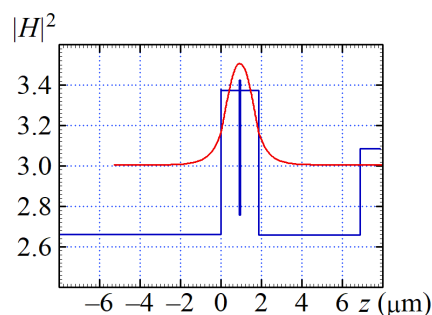


Рис. 2. Профиль показателя преломления и распределение квадрата напряженности магнитного поля

Результаты моделирования

Расчеты волновых функций, матричных элементов дипольных переходов и энергий состояний проводились с использованием 3-зонного $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ -метода на основе самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона. Населенность подзон находилась путем численного решения системы балансных уравнений [4].

Возрастающая ВАХ на рабочем участке обеспечивается схемой с туннельной связью инжекторного и верхнего лазерного уровня (см. рис. 1). Верхний лазерный уровень находится выше уровня инжектора, поэтому при увеличении напряжения на структуре происходит сближение энергий уровней и увеличение туннельного тока (рис. 3). Осцилляции плотности тока в численных расчетах связаны с резонансным туннелированием из КЯ 3 в состояния континуума,

которые из-за ограниченных размеров области объемного полупроводника в расчетах (80 нм) также были дискретными.

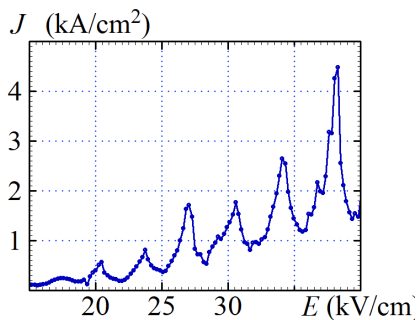


Рис. 3. ВАХ лазерной структуры при температуре 77 К

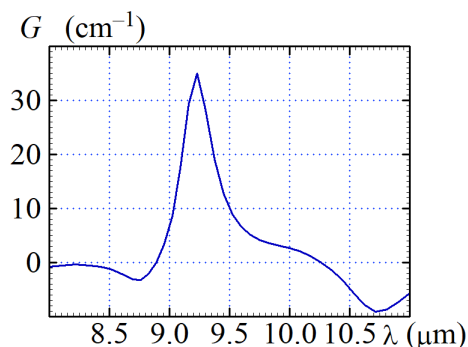


Рис. 4. Спектр модового усиления лазерной структуры при напряженности электрического поля 38 кВ/см и температуре 77 К

Численное моделирование показало, что при температуре 77 К в анализируемой структуре оцененные

внутренние потери на поглощение свободными носителями составляют менее 10 см^{-1} , а модовое усиление достигает величины 35 см^{-1} на длине волны около 9.2 мкм (рис. 4). Этого с запасом достаточно для получения лазерной генерации.

Таким образом, предложенный дизайн имеет только один туннельно-связанный переход, который подстраивается приложенным электрическим полем, фоновый резонанс имеет энергетическую ширину, близкую к энергии теплового кванта kT и мало чувствителен к рассогласованию энергии уровней. Такой дизайн наиболее толерантен к ошибкам в толщинах КЯ и барьеров и может быть использован для демонстрации лазерной генерации при низких температурах.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке НЦМУ «Центр фотоники», при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2022-316.

Литература

1. К.Е. Kudryavtsev, V.V. Rummyantsev, V.Ya. Aleshkin, et al. // Appl. Phys. Lett. **117**, 083103 (2020).
2. А.А. Afonenko, D. V. Ushakov, A. A. Dubinov, et al. // J. Appl. Phys. **132**, No. 7. 073103 (2022).
3. C. Gmachl, F. Capasso, A. Tredicucci, et al. // Appl. Phys. Lett. **73**, 3830 (1998).
4. Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, А.А. Дубинов и др. // Квантовая электроника, **49**, № 10, 913 (2019).