

УДК 535.375.54

НИЗКОПороГОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ С ВЫСОКОДОБРОТНЫХ СУБВОЛНОВЫХ НАНОЧАСТИЦ, ОСНОВАННАЯ НА МЕХАНИЗМЕ ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

Рябов Д.Р. (Университет ИТМО), **Гладков Р.А.** (Университет ИТМО)

Научный руководитель – д.ф.-м.н., гл. науч. сотр. Макаров С.В. (Университет ИТМО)

В данной работе мы описываем концепт лазерного устройства с оптической накачкой, основанный на механизме вынужденного комбинационного рассеяния. Проведённая многостадийная оптимизация геометрических и материальных параметров резонатора позволяет обеспечить сверхнизкие пороги лазерной генерации с высокодобротной наночастицы, все пространственные измерения которой не превышают длину волны оптического излучения.

Введение. В наше время в связи со значительным увеличением потока передачи данных элементы классической электроники всё чаще заменяются оптоэлектронными и оптическими преобразователями сигналов. Однако несмотря на значительный прогресс нанофотоники в области создания устройств для детектирования и преобразования падающего излучения, реализация стабильных наноразмерных лазерных источников по-прежнему остаётся актуальной проблемой. Существующие примеры лазерных устройств на комбинационном рассеянии имеют размеры, значительно превышающие длину оптического излучения, что затрудняет их интеграцию в действующие оптоэлектронные системы. Тем не менее, переход к режиму вынужденного комбинационного рассеяния был экспериментально осуществлён на субволновых структурах из кремния и фосфида галлия, что позволяет говорить о возможности реализации лазерного устройства на основе полупроводниковых наночастиц.

Основная часть. В качестве материала оптического резонатора был рассмотрен фосфид галлия (GaP), так как он обладает нулевыми оптическими потерями в видимом диапазоне (633 нм – длина волны излучения He-Ne лазера оптической накачки) и сравнительно высоким коэффициентом усиления комбинационного рассеяния. Отсутствие оптических потерь позволяет добиться высоких значений добротности собственных мод резонатора путём оптимизации радиационных потерь в системе, что особенно важно для минимизации порога лазерной генерации. Помимо прочего, фосфид галлия имеет две линии в спектре комбинационного рассеяния, что обеспечивает дополнительную степень свободы в выборе оптических мод на длине волны излучения.

Для оценки оптимальных геометрических параметров полупроводниковой наночастицы мы воспользовались моделью перекачки электромагнитной энергии с фундаментальной моды (на частоте накачки) на стоксову моду комбинационного рассеяния (на частоте излучения). Данная модель подразумевает уменьшение пороговой мощности лазерной генерации при увеличении добротности взаимодействующих мод и усилении их связи. Как известно, концепт квази-связанных состояний в континууме в одиночных оптических резонаторах цилиндрической формы позволяет значительно увеличить радиационную добротность возбуждаемых мод, что было использовано в нашей работе. Среди найденных высокодобротных состояний на длине волны накачки (633 нм) в цилиндрической частице из фосфида галлия на сапфировой подложке были отобраны те, что обладали также высокодобротными модами на длине волны излучения с целью обеспечения наилучшей перекачки энергии. Поиск осуществлялся только среди конфигураций с азимутально симметричным распределением электромагнитного поля, так как данный тип мод может быть эффективно возбуждён с помощью азимутально поляризованного цилиндрического векторного пучка. Проведённый анализ позволил выявить частицу с оптимальными геометрическими параметрами.

Для точной оценки пороговых значений лазерной генерации в исследуемой системе была также построена полуаналитическая модель вынужденного комбинационного рассеяния с учётом модуляции мнимой части диэлектрической проницаемости материала. Режим лазирования обеспечивается условием энергетического баланса, когда потери в системе полностью компенсируются энергией падающей волны, что характеризуется обнулением мнимой части собственной моды на длине волны излучения. Численное моделирование в пакете COMSOL Multiphysics позволяет таким образом оценить пороговую величину интенсивности накачки для перехода в описанный режим, которая для исследуемой частицы составляет порядка 10 mW/mkm^2 , что может быть осуществлено в режиме непрерывной оптической накачки.

Выводы. Таким образом, в данной работе мы продемонстрировали концепт наноразмерного лазерного устройства, основанного на механизме вынужденного комбинационного рассеяния со сверхнизкими пороговыми интенсивностями. Проведённая оптимизация позволяет рассчитывать на экспериментальную реализацию описанного источника в режиме непрерывной оптической накачки. Наконец, размер такого устройства во всех трёх измерениях не превышает длину волны оптического излучения, что позволяет говорить о перспективах его дальнейшего применения в оптических микросхемах.