

Одномодовый режим генерации ТГц квантово-каскадных лазеров: новые подходы и экспериментальные результаты

Р.А. Хабибуллин¹, Р.Р. Галиев¹, А.Ю. Павлов¹, Н.В. Щаврук¹, Д.С. Пономарев¹,
Д.В. Ушаков², А.А. Афоненко², О.Ю. Волков³, И.Н. Дюжиков³, В.В. Павловский³

¹ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Нагорный пр., 7/5, Москва, 117105, Россия

² Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь

³ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая, 11, Москва, 125009, Россия

§ khabibullin@isvch.ru

В работе проведено исследование возможности достижения одномодового режима генерации ТГц квантово-каскадного лазера (ККЛ) за счет использования распределенной обратной связи (РОС) на основе латеральной решетки и подхода двухсекционных ККЛ, когда активный и пассивный резонаторы отделены воздушным зазором 3 мкм. Для указанных подходов были изготовлены ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом, измерены спектры генерации и определены диапазоны температуры и тока, когда наблюдается одномодовая генерация. Впервые предложено использовать распределенную обратную связь на основе модуляции усиления вдоль лазерного полоска для одномодовых ТГц ККЛ.

Введение

Использование ККЛ в качестве ТГц источника для высокоразрешающей спектроскопии накладывает определенные требования на работу лазера, что в первую очередь связано с необходимостью обеспечить одномодовый режим генерации с максимально возможной перестройкой частоты излучения [1]. Традиционно для реализации одномодового режима генерации в ТГц ККЛ используется два подхода: 1) формирование распределенной обратной связи (РОС) на основе латеральной решетки; 2) использование двухсекционных связанных резонаторов Фабри-Перо. Использование РОС ТГц ККЛ позволило обеспечить подавление боковых мод на ~ 20-30 дБ и существенно уменьшить расходимость пучка до значения 10° [2]. В лазерах с использованием двухсекционных связанных резонаторов Фабри-Перо, подавление боковых мод составляет более 25 дБ и появляется возможность перестройки частоты излучения лазера на ~5 и ~12 ГГц в непрерывном и импульсном режимах работы, соответственно, за счет накачки одной секции резонатора излучением с длиной волны ~800 нм

В работе проведено исследование возможности достижения одномодового режима генерации для 2.3 ТГц ККЛ с каскадом на основе четырех квантовых ям GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As и с использованием двойного металлического волновода на основе золота. Ранее на основе рассматриваемой гетероструктуры были изготовлены ТГц ККЛ в полоско-

вой геометрии, у которых наблюдался многомодовый режим генерации с более чем десятью продольными модами Фабри-Перо, отстоящими друг от друга на ~ 19 ГГц для резонатора с длиной ~ 2.4 мм.

Распределенная модель резонатора

Для построения распределенной модели резонатора ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом решалась система уравнений связанных волн. Для этого в каждой точке лазерного резонатора представляем напряженность электромагнитного поля в виде суммы напряженностей двух электромагнитных волн, распространяющихся в противоположных направлениях. В лазерных структурах с РОС удобно выбрать базовую постоянную распространения k_b в соответствии с пространственной зависимостью показателя преломления.

На основе построенной зависимости эффективного показателя преломления от частоты были определены три периода РОС $\Lambda = 19.5, 20.0$ и 20.5 мкм в соответствии с рассчитанным спектром усиления активной области ТГц ККЛ. Данный набор Λ использовался, как для РОС на основе модуляции показателя преломления (index-coupled) за счет латеральной решетки, так и для модуляции усиления (gain-coupled) за счет селективной инжекции тока вдоль лазерного полоска. Для двухсекционного ТГц ККЛ была выбрана геометрия “активный резонатор/воздушный зазор/пассивный резонатор” с длинами 1.8 мм/3 мкм/0.25 мм.

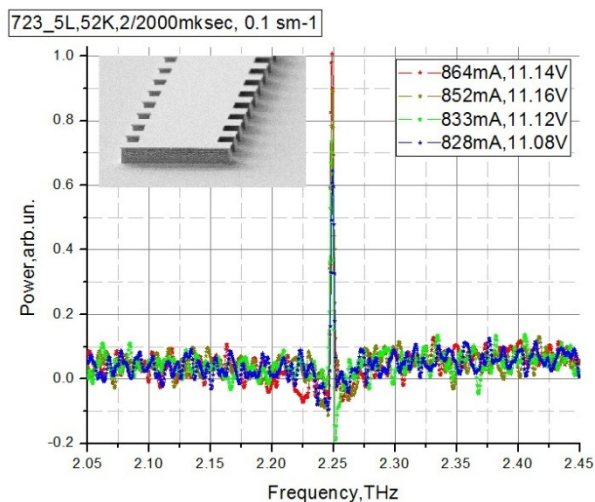


Рис. 1. Спектр генерации РОС ТГц ККЛ, измеренный при температуре 52 К и при четырех значениях тока инжекции. На вставке приведен РЭМ снимок изменяемого лазерного полоска с РОС на основе модуляции показателя преломления

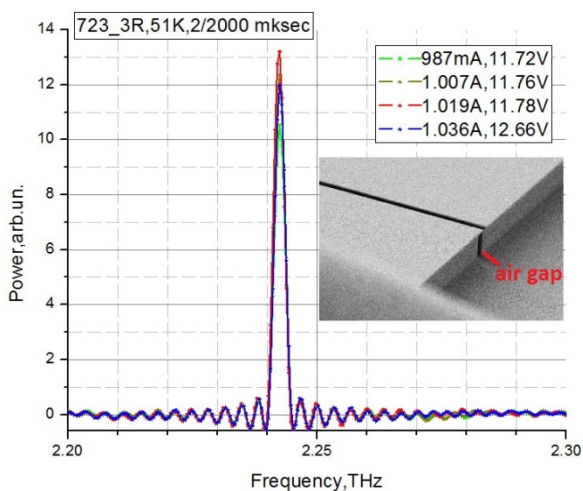


Рис. 2. Спектр генерации двухсекционных ТГц ККЛ со связанными резонаторами при 51 К и четырех значениях тока инжекции. На вставке приведен РЭМ снимок области измеряемого ТГц ККЛ, где активный и пассивный резонаторы разделены воздушным зазором 3 мкм

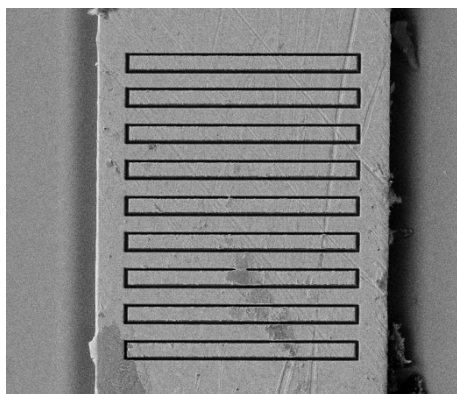


Рис. 3. РЭМ изображение лазерного полоска ТГц ККЛ с модуляцией усиления, где области с отсутствием инжекции тока электрически изолированы от областей с инжекцией тока

Экспериментальные результаты

При изготовлении РОС ТГц ККЛ на основе латеральной решетки была использована самосовмещенная технология, когда форма верхней металлизации полоска определяла геометрию резонатора. На рис. 1 представлен одномодовый спектр генерации РОС ТГц ККЛ с $\Lambda = 20.5$ мкм. На рис. 2 представлен спектр генерации двухсекционного ТГц ККЛ с одной интенсивной спектральной линией. Было обнаружено, что одномодовая генерация двухсекционного ТГц ККЛ существует в ограниченном диапазоне температур и тока.

На рис. 3 приведен РЭМ снимок области лазерного полоска ТГц ККЛ со специально сформированной топологией, которая позволяет осуществить селективную инжекцию тока.

Таким образом, в работе продемонстрирована одномодовая генерация ТГц ККЛ за счет использования РОС на основе латеральной решетки и за счет использования двухсекционного резонатора, состоящего из активного резонатора/воздушного зазора/пассивного резонатора. Обнаружено, что в случае РОС на основе латеральной решетки необходимо более точно экспериментально подбирать период Λ , так как выбранный шаг в 0.5 мкм является достаточно грубым. Подход двухсекционного резонатора оказался проще с точки зрения точности попадания в геометрические размеры данной конструкции.

Однако двухсекционные ТГц ККЛ оказались крайне чувствительными к внешним факторам (температура и ток инжекции). Впервые предложен и апробирован подход по созданию одномодовых ТГц ККЛ на основе модуляции усиления за счет селективной инжекции тока вдоль лазерного полоска.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-02-00363, а также в рамках Государственного задания Минобрнауки РФ ИСВЧПЭ РАН и ИРЭ РАН.

Литература

1. Hübers H.-W., Richter H. *et al.* // J. Appl. Phys. 125, 151401 (2019).
2. Biasco S., Garrasi K. *et al.* // Nat. Commun., 9, 1 (2018).