

Перестройка частоты непрерывных микродисковых терагерцовых квантово-каскадных лазеров

Белов Д.А.^{1*}, Иконников А.В.¹, Ушаков Д.В.², Афоненко А.А.², Павлов А.Ю.³, Галиев Р.Р.³, Кузьменков А.Г.⁴, Малеев Н.А.⁴, Васильев А.П.⁵, Зубов Ф.И.⁶, Максимов М.В.⁶, Хохлов Д.Р.¹, Хабибуллин Р.А.^{3,7}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

²БГУ, 220030, Минск, пр. Независимости, 4

³ИСВЧПЭ РАН, 117105, Москва, Нагорный пр., 7/5

⁴ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

⁵НТЦ Микроэлектроника РАН, 19021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

⁶СПб АУ РАН, 194021, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8

⁷МФТИ, Физтех, 141701, Долгопрудный, Институтский пер., 9.

* belov.da17@physics.msu.ru

Аннотация

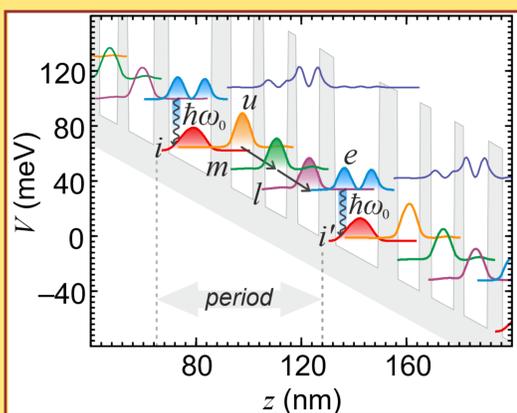
Проведены исследования микродисковых квантово-каскадных лазеров (ККЛ) терагерцового диапазона диаметром 50–100 мкм, работающих в **непрерывном режиме**. Исследуемые ККЛ на основе двухфотонного дизайна активной области с двойным металлическим волноводом **полностью изготовлены в России**. Измерены спектральные характеристики лазеров в диапазоне температур 5–90 К со сканированием по рабочему току в диапазоне 2,4–16 мА. Продemonстрирована непрерывная собственная перестройка частоты в одномодовом режиме с увеличением рабочего тока в диапазоне до 10 ГГц, которая связывается с эффектом затягивания мод.

Эксперимент

В работе изучались ККЛ, изготовленные в ИСВЧПЭ РАН на основе двухфотонного дизайна активной области GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As в структуре с двойным металлическим волноводом Au-Au. Измерения спектральных характеристик ККЛ проводились в непрерывном режиме, излучение регистрировалось штатным DLa-TGS приемником инфракрасного фурье-спектрометра Bruker Vertex 70v. При измерениях мощностных характеристик и ВАХ на вход ККЛ подавался меандр с частотой 2 Гц. Сигнал регистрировался при помощи ячейки Голея и синхродетектора SR 830. Для оптического согласования лазера с измерительным оборудованием использовалась металлическая трубка, которая исполняла роль волновода.

ККЛ: активная область

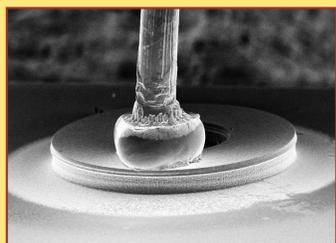
Активные области всех трех ККЛ были изготовлены на основе структуры с двухфотонным дизайном. Широкие возможности зонной инженерии ККЛ позволяют реализовать такую конфигурацию уровней, при которой транспорт электронов сквозь структуру сопровождается испусканием двух фотонов в пределах одного периода активной области. Для минимизации рабочего тока и тепловыделения, напрямую влияющих на возможность работы лазеров в непрерывном режиме, барьерный слой между уровнем инжектора и верхним лазерным уровнем был существенно утолщен (до 7.34 нм). Необходимую величину усиления при сопутствующем уменьшении туннельного тока удается обеспечить за счет уменьшения спектрального уширения излучательных переходов, возникающих из-за влияния безизлучательных каналов релаксации, путем утолщения барьеров между излучательными уровнями.



Зонная диаграмма двух периодов активной области ТГц ККЛ с двухфотонным дизайном и схематическое изображение транспорта электронов сквозь структуру.

ККЛ: резонатор

В работе использовались три ККЛ, выполненные в виде дисков диаметром 100 (**D1**) и 50 (**D2**) мкм и кольца (**R1**) с внешним (внутренним) диаметром 90 (30) мкм с двойным металлическим волноводом из золота. Полученные таким образом резонаторы с осевой симметрией наряду с продольными (радиальными) модами способны поддерживать моды шепчущей галереи [1]. Высокая добротность этих мод в сочетании с малыми размерами резонатора дает возможность существенно снизить порог генерации, что, в свою очередь, делает лазер пригодным к работе в непрерывном режиме.



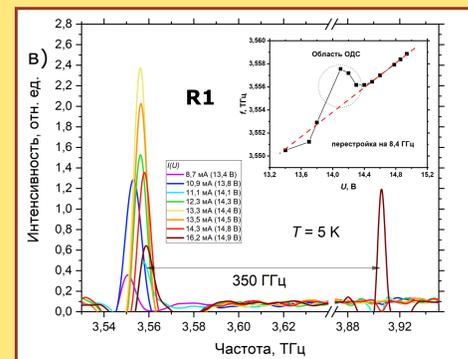
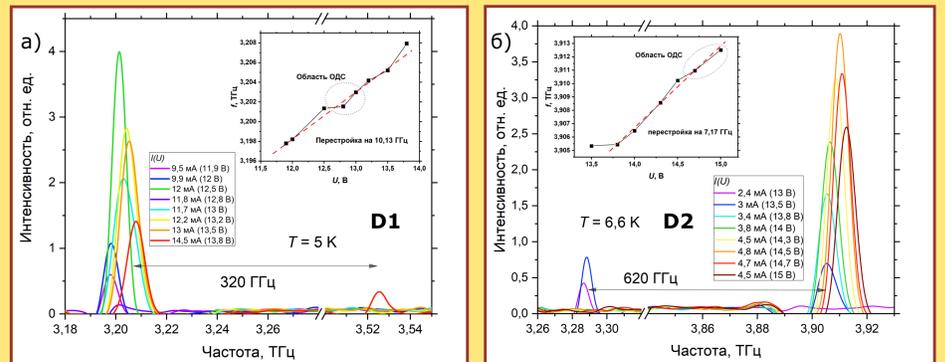
Изображение ТГц ККЛ с резонатором в форме кольца (**R1**), полученное на сканирующем электронном микроскопе.

Литература

[1] G. Fasching et al., IEEE journal of quantum electronics, 43, 687-697 (2007).

Спектральные характеристики

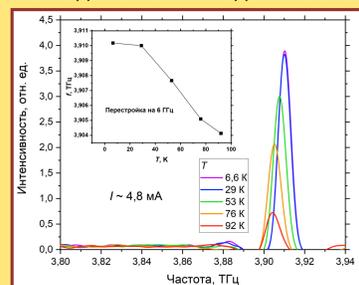
В спектрах исследованных лазеров в основном наблюдается генерация на одной моде, по всей видимости, являющейся модой шепчущей галереи. В пользу этого свидетельствует значительная величина межмодового расстояния порядка нескольких сотен ГГц, по порядку величины соответствующая данным, приведенным в [1].



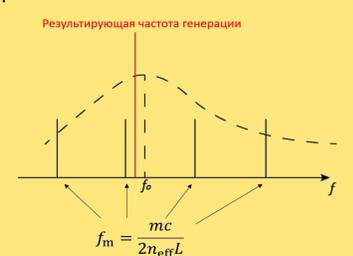
Спектральные характеристики лазеров D1 (а), D2 (б) и R1 (в) при температурах 5 и 6,6 К со сканированием по току с указанным межмодовым расстоянием. На вставках: картина перестройки частоты излучения основной моды лазеров при изменении напряжения.

Перестройка частоты излучения

При изменении рабочего напряжения во всех лазерах наблюдается значительная перестройка частоты генерации в диапазоне до 10 ГГц. В отличие от известного механизма красного сдвига частоты при изменении температуры, связанного с температурной зависимостью показателя преломления структуры (для исследуемых ККЛ диапазон такой перестройки составлял ~4 ГГц), в этом случае наблюдался синий сдвиг частоты, линейный по напряжению.

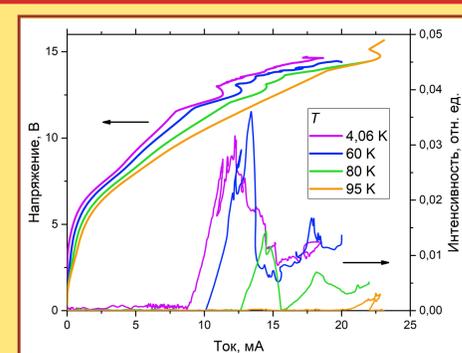


Перестройка частоты лазера **D2** с температурой



Эта перестройка связывается с эффектом затягивания мод, проявляющемся в «подтягивании» частоты излучения от собственной частоты резонатора к максимуму усиления. Вследствие диагональности лазерных переходов в исследуемых ККЛ квантоворазмерный эффект Штарка приводит к синему сдвигу максимума усиления, увлекая за собой частоту генерации. Механизм в этом случае состоит в связи усиления с показателем преломления среды через соотношения Крамерса–Кронига.

ВАХ и LI



Характерная особенность ККЛ, представленных в работе – наличие области с отрицательным дифференциальным сопротивлением внутри рабочего диапазона лазера. Причина возникновения этой области и её влияние на модовый состав излучения являются темами для дальнейшего исследования.

Мощностные характеристики и ВАХ для лазера **D1**.