

Зондовый метод для картирования интенсивности и спектра излучения полупроводниковых лазерных структур

М.С. Дунаевский^{1,2}, П.А. Алексеев¹, А.М. Монахов¹, А. Baranov³, R. Teissier³

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Россия
Mike.Dunaevsky@mail.ioffe.ru

²Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

³Институт электроники и систем, Университет Монпелье, 34095 Монпелье, Франция

В работе предложен зондовый метод, позволяющий визуализировать области выхода излучения из поверхности сколотых полупроводниковых лазеров с субволновым разрешением. Метод основан на детектировании в вакуумных условиях сдвига резонансной частоты зонда, связанной с нагревом балки либо кончика зонда излучением.

Scanning probe method for mapping the intensity and emission spectrum of semiconductor laser structures

M.S. Dunaevskiy^{1,2}, P.A. Alekseev¹, A.M. Monakhov¹, A. Baranov³, R. Teissier³

¹Ioffe Institute, 194021, Saint-Petersburg, Russia

²ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia

³Institute of Electronics and Systems, CNRS UMR 5214, University of Montpellier, 34095, Montpellier, France

Scanning probe method is proposed that allows to visualize regions of light emission on the cleavage surface of semiconductor lasers with a subwavelength resolution. The method is based on detecting under vacuum conditions of a shift in the resonant frequency of the probe related with the cantilever or probe tip heating by laser radiation.

В данной работе на сколах полупроводниковых лазерных структур были выполнены измерения пространственного распределения интенсивности светоизлучения с помощью разработанного метода измерения светочувствительного сдвига частоты (ИССЧ). При измерении малых областей излучения на сколах WGM-лазеров экспериментально установлено, что латеральное разрешение метода ИССЧ составляет менее 150 нм.

Экспериментально установлено, что основной механизм, объясняющий сдвиг частоты АСМ-зонда при взаимодействии со светом – нагрев кантилевера при поглощении света. Разработана модель поглощения света в зонде и его нагрева с учётом: (i) - множественных переотражений световой волны в резонаторе “поверхность лазера – кантилевер”, (ii) – переноса тепла и установления стационарного распределения температуры вдоль кантилевера. Для метода ИССЧ получена формула чувствительности [1] зонда при поглощении излучения:

$$\Delta\omega/\omega = P \frac{\beta}{4\chi} \frac{L}{S} k \quad (1)$$

Эта формула связывает наблюдаемый в эксперименте сдвиг резонансной частоты ($\Delta\omega/\omega$) с величиной излучаемой мощности P , материальными параметрами зонда (β - коэффициент температурной зависимости модуля Юнга, χ - теплопроводность), геометрическими параметрами зонда (L – длина, S - площадь сечения зонда) и коэффициентом поглощения k . Оценки нагревов СЗМ-зонда и сдвигов частоты кантилевера в рамках данной модели согласуются с экспериментальными результатами.

Обнаружено, что для максимизации детектируемого ИССЧ-сигнала необходимо использовать зонды из материала с низкой теплопроводностью и с малым поперечным сечением кантилевера СЗМ-зонда. Кроме того, установлено, что уменьшение угла наклона кантилевера СЗМ-зонда позволяет усилить детектируемый сигнал за счёт образования

полости резонатора между поверхностью лазера и кантилевером и множественных переотражений световой волны. Совокупность вышеуказанных факторов позволяет более чем на порядок усилить детектируемый ИССЧ-сигнал.

Методом ИССЧ в допороговых ($I < I_{th}$) и запороговых ($I > I_{th}$) токовых режимах исследовалась радиальная структура мод излучения на сколах WGM-лазеров. Показано, что при токах меньших порогового значения ($I < I_{th}$) имеет место слабое спонтанное излучение, интенсивность которого описывается пологой функцией с максимумами вблизи краёв рассеченного диска. При повышении тока накачки выше порогового значения ($I > I_{th}$) на поверхности вблизи краёв диска возникает сложная серия пятен светоизлучения WGM-моды, симметричная относительно центра рассеченного WGM-лазера. В рамках геометрической оптики дано модельное качественное объяснение наблюдаемой картины областей светоизлучения в полудисковых WGM-лазерах. Расположение и форма областей светоизлучения соответствует модам “низкого порядка” с $n < 8$ (где n число внутренних отражений внутри резонатора).

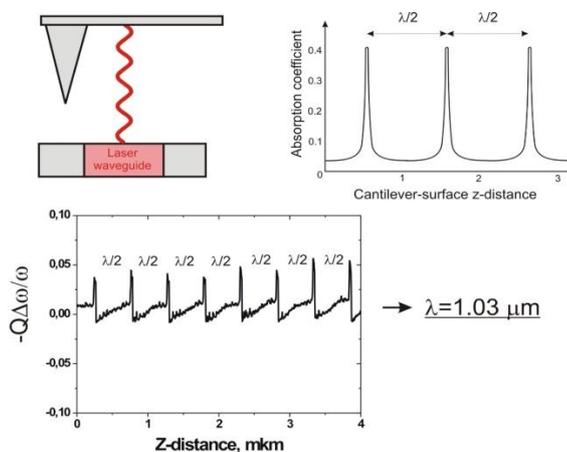


Рисунок 1. (a) Схема эксперимента с формированием резонатора “лазер - АСМ зонд”; (b) расчёт зависимости поглощения ИК-света в АСМ-зонде при изменении z-расстояния зонд-поверхность; (c) экспериментальная АСМ зависимость $\Delta\omega(z)$ при исследовании лазера излучавшего на длине волн $\lambda = 1.03$ мкм.

При выполнении измерений на сколах полосковых лазеров был обнаружен эффект интерференции выходящей световой волны с волной отраженной от кантилевера АСМ-зонда. В результате при расстояниях зонд-поверхность равном целому числу длин полуволн возникало многократное усиление детектируемого сигнала. Это позволяет использовать данный эффект для повышения чувствительности при детектировании светоизлучения и проведения спектроскопии. Метод спектроскопии (Рис. 1) заключается в измерении z-зависимости светочувствительного сдвига частоты $\Delta\omega(z)$ при удалении АСМ-зонда от поверхности лазера. При этом (для полупроводникового лазера с узкой линией излучения) наблюдается наличие периодических “пиков поглощения”, соответствующих расстояниям равным целому числу длин полуволн $z_n = n\lambda/2$ в резонаторе “лазер - АСМ зонд”. Измеряя расстояние между пиками поглощения можно определить длину волны излучения лазера. Для лазера, излучающего на нескольких длинах волн λ_i , будут наблюдаться несколько серий изопериодичных “пиков поглощения”, соответствующих этим длинам волн. Расшифровка этих серий позволяет выявить все длины волн излучения λ_i и таким образом осуществить спектроскопийное исследование излучения лазера. Предел Z-перемещений АСМ-сканера составляет величину около 7 микрон, что налагает ограничение на диапазон детектируемых таким образом длин волн излучения $\lambda < 14$ мкм.

1. M. Dunaevskiy et.al., *Appl.Phys.Lett.*, **106**, 171105 (2015)