

ВНУТРИРЕЗОНАТОРНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

В.Л.Величанский, С.Е.Виноградов, Э.А.Свириденков, Г.Г.Харисов

*Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН
117924 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 15 декабря 1994 г.

Получены спектры внутрирезонаторного поглощения с использованием диодных лазеров с устраненной селекцией потерь. Ослабление селекции достигнуто за счет применения специально разработанных лазерных диодов с бростеровскими поверхностями. Экспериментально полученная чувствительность оказалась ниже теоретически ожидаемой. Обсуждаются пути повышения чувствительности.

Внутрирезонаторная лазерная спектроскопия (ВРЛС) в настоящее время является наиболее чувствительным методом абсорбционного спектрального анализа. Чувствительность обнаружения слабых линий поглощения составляет 10^{-11} см^{-1} [1]. Внутрирезонаторные спектрометры находят широкое применение для спектроскопических исследований запрещенных и многофотонных переходов [2], исследования кинетики химических реакций [3], исследования плазмы и т.д. Метод ВРЛС основан на высокой чувствительности спектрального распределения излучения широкополосного лазера к спектральному распределению потерь в резонаторе. Эта чувствительность характерна для лазеров, у которых однородная ширина полосы усиления много больше характерного периода спектральной зависимости потерь, вызванных поглощением помещенного в резонатор исследуемого вещества. Для проявления в спектре генерации провала в e раз в линии поглощения с коэффициентом $k \text{ см}^{-1}$ необходима длительность импульса генерации $t = 1/kc$, где c – скорость света. Например, при длительности импульса генерации 1нс провал в спектре в e раз проявится на линии с коэффициентом поглощения $3 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$, то есть резонатор лазера при исследовании внутрирезонаторного поглощения эквивалентен кювете с эффективной длиной $l = ct$. Ограничение на увеличение чувствительности с ростом длительности импульса генерации обусловлено влиянием нелинейных процессов и спонтанным излучением активной среды. В различных типах лазеров достигнута чувствительность обнаружения поглощения от 10^{-5} до 10^{-11} см^{-1} . В частности, для непрерывных лазеров на красителях сегодня эта величина составляет 10^{-11} см^{-1} .

До сих пор в методе ВРЛС применялись лазеры на стекле с неодимом, растворах органических красителей, щелочногалоидных кристаллах с центрами окраски. Все эти лазеры требуют либо мощной ламповой накачки, либо когерентной, что в принципе затрудняет создание приборного варианта внутрирезонаторного спектрометра.

Перспективным кажется применение в методе внутрирезонаторной спектроскопии полупроводниковых лазеров. Эти лазеры обладают широкой полосой усиления с малым временем поперечной релаксации, что позволяет считать ее однородноуширенной. Полупроводниковые лазеры перекрывают широкий диапазон в инфракрасной области спектра, который не может быть перекрыт другими лазерами на конденсированных средах и в котором лежат основные

полосы поглощения молекул. Работа в области основных полос по сравнению с обертонами может повысить концентрационную чувствительность при одинаковой чувствительности по поглощению. В первые годы развития метода ВРЛС были предприняты попытки применить в нем полупроводниковые лазеры. Осуществление этих попыток осложнено особенностями свойств резонатора полупроводниковых лазеров. Активная среда полупроводникового лазера имеет показатель преломления $\sim 3,5$ и грани кристалла являются зеркалами резонатора. Наличие дополнительного зеркала внешнего резонатора не существенно меняет добротность резонатора. Малые дополнительные потери из-за исследуемого поглощения во внешнем резонаторе слабо сказываются на спектре излучения, который определяется структурой мод резонатора, образованного кристаллом. Поэтому спектр излучения представлял собой структуру мод полупроводникового кристалла. В работе [4] для устранения влияния отражения от граней полупроводникового кристалла на них наносилось просветляющее покрытие, которое уменьшало коэффициент отражения до нескольких сотых процента. Но вследствие разности кривых дисперсии полупроводника и просветляющего слоя из двуокиси титана точное просветление могло быть достигнуто только для одной точки спектра и только для нормального падения, в то время как выходящий пучок имел расходимость более 10° . Поэтому выходной спектр излучения лазера в работе [4] состоял из дискретных линий, соответствующих собственным модам внутреннего резонатора. Те моды, на которые попадали линии поглощения паров калия, в спектре не проявлялись.

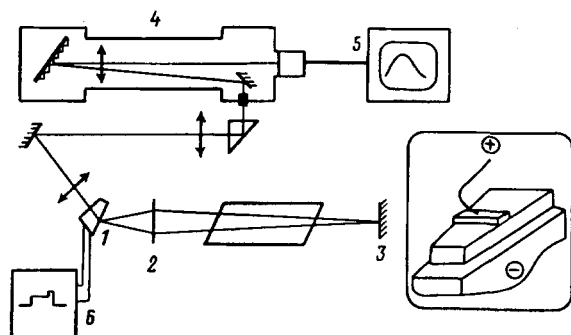


Рис.1. Схема экспериментальной установки. На вставке - схема излучающего диода

В настоящей работе сообщается о первых наблюдениях спектра внутрирезонаторного поглощения с использованием полупроводникового лазера. Для уменьшения селективирующих свойств поверхности кристалла были разработаны специальные лазерные диоды, у которых выходная поверхность была наклонена под углом Брюстера к активной области $p-n$ -перехода. Кроме того, у части кристаллов на выходную поверхность наносилось просветляющее покрытие. Были исследованы различные схемы резонаторов, как двухзеркальных, так и трех- и четырехзеркальных, а также с применением микрообъективов внутри резонатора. Несмотря на то, что выходные грани кристалла скошены под углом Брюстера, "паразитная" структура, вызванная, очевидно, рассеянием на микронеоднородностях на поверхности кристалла, проявлялась в спектре генерации лазера. Варьируя геометрию резонатора и режимы накачки, можно было изменять глубину этой паразитной модуляции. Оптимальной в наших условиях оказалась геометрия резонатора, представленная на рис.1. Кристалл GaAs 1

(показан на вставке рис.1 в увеличенном масштабе) был отполирован в форме трапециидальной призмы, задняя грань которой была перпендикулярна каналу $p-n$ -перехода и служила выходным зеркалом. Вторая грань была скошена под углом Брюстера к активной области. Излучение, выходявшее через эту грань, микроскопическим объективом 2 фокусировалось на плоское диэлектрическое зеркало 3 с коэффициентом отражения 99%. Астигматизм наклонной брюстеровской поверхности частично компенсировался поворотом микрообъектива. В такой схеме порог генерации различных диодов составлял 40–100 мА. Удавалось достигнуть двух-трехкратного превышения накачки над порогом. Излучение генерации, выходящее через нормальную поверхность кристалла, фокусировалось на щель спектрографа 4, выполненного на базе автоколлимационной камеры УФ-90 ($F = 130$ мм) и дифракционной решетки 300 штр/мм, работавшей в 8 порядке дифракции. Спектр регистрировался многоканальным оптическим анализатором ОМА фирмы PRINCETON APPLIED RESEARCH 5. Дисперсия составляла 0,046 Å/канал, разрешение – два канала.



Рис.2. *a* – Спектр внутриврезонаторного поглощения калия, *b* – спектр поглощения калия вне резонатора

Чувствительность ВРЛС определяется длительностью импульса генерации в окрестности исследуемой линии поглощения. Мы использовали импульсную накачку с длительностью импульса порядка 1 мкс. Однако в процессе генерации кристалл разогревается, что приводит к смещению как частот отдельных мод, так и всей спектральной полосы генерации. Для частичной компенсации температурного сдвига была разработана специальная схема накачки *b* лазера, при которой импульс накачки был двухступенчатым. Сначала кристалл разогревался допороговым импульсом тока до квазиравновесной температуры, затем ток увеличивался до надпороговых значений. Как уже упоминалось, в спектре генерации проявлялась остаточная структура, связанная, по нашему мнению, с рассеянием света на брюстеровской грани кристалла. Глубина модуляции, связанная с этой структурой, в отличие от всех ранее проводившихся исследований, была меньше 50% и в лучших образцах была меньше 20%. Таким образом, нам удалось получить спектр внутриврезонаторного поглощения с использованием полупроводникового лазера.

На рис.2*a* представлен спектр поглощения паров калия в кювете, помещенной в резонатор лазера на AsGa. Для сравнения на рис.2*b* приведен спектр поглощения той же кюветы при внерезонаторном положении. Видно, что внутриврезонаторное расположение на два порядка повышает чувствительность.

Однако это увеличение чувствительности существенно меньше теоретически ожидаемого. Сравнение с однопроходным поглощением показывает, что эффективная длина поглощающего слоя составляет величину порядка 10^3 см, что соответствует длительности порядка 30 нс, а это гораздо меньше длительности импульса генерации 1 мкс и меньше длительности генерации в окрестности линии поглощения. Возможными причинами этого ограничения могут являться высокий уровень спонтанного шума, связанный с малой добротностью резонатора, большими потерями при фокусировке отраженного от внешнего зеркала астигматичного пучка в активную область кристалла, и нелинейные эффекты в активной области. Малая величина обратной связи от внешнего зеркала, несущей информацию о внутрирезонаторном поглощении, и большой уровень однопроходного усиления, сопровождаемый большим уровнем спонтанного излучения, приводят к замазыванию провалов в спектре. Для выяснения причин ограничения чувствительности и путей ее повышения проводятся дальнейшие исследования.

Авторы выражают благодарность А.К.Чернышеву, Н.А.Распопову и А.Н.Савченко за помощь в работе.

Работа выполняется при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 94-02-05815а.

-
1. С.Е.Виноградов, А.А.Качанов, С.А.Коваленко, Э.А.Свириденков, Письма в ЖЭТФ **55**, 560 (1992).
 2. В.М.Баев, Е.П.Беликова, В.Ф.Гамалий и др., Квантовая электроника **11**, 2413 (1984).
 3. О.М.Саркисов, Э.А.Свириденков, А.Ф.Сучков, Химическая физика **9**, 1155 (1982).
 4. V.M.Baev, J.Eschner, E.Paeth et al., Appl. Phys. **B55**, 463 (1992).