

06

Сверхбыстрая частотная перестройка диодных лазеров на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP, работающих в спектральном диапазоне 3–4 μm

© А.П. Астахова, Т.Н. Данилова, А.Н. Именков, К.В. Калинина,
М.А. Сиповская, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: dap@iropt4.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 17 февраля 2008 г.

Исучено качество частотной перестройки диодного лазера на основе двойной гетероструктуры $n\text{-InAsSbP}/n\text{-InAsSb}/p\text{-InAsSbP}$ при питании короткими импульсами тока с наклонной вершиной положительной крутизны. Обнаружено, что монотонность увеличения частоты перестраиваемой моды со временем сохраняется в течение первых 30 μm роста тока. Далее зависимость частоты от тока ослабляется из-за появления неперестраиваемых мод. Максимальный диапазон одночастотной монотонной перестройки достигается при малой длительности импульса ($< 30 \mu\text{s}$), что открывает перспективу для создания сверхбыстрой диодной лазерной спектроскопии.

PACS: 85.60.Bt, 78.60.Fi

Перестраиваемые диодные лазеры на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP становятся в последнее время ключевым элементом диоднолазерной спектроскопии высокого разрешения [1]. Они имеют широкий диапазон перестройки длины волны излучения ($\sim 100 \text{ \AA}$) [2] и узкую линию излучения (3.5 MHz) [3]. В их спектральном диапазоне (3–4 μm) находятся основные линии поглощения природных и промышленных газов, таких как метан CH_4 , сероводород H_2S , аммиак NH_3 , пропан C_2H_6 и др. [4]. В этом диапазоне отсутствуют сильные линии поглощения воды, что важно для дальнометрии. В работе [5] было показано экспериментально и теоретически, что инерционность перестройки длины волны с током, происходящей вследствие изменения

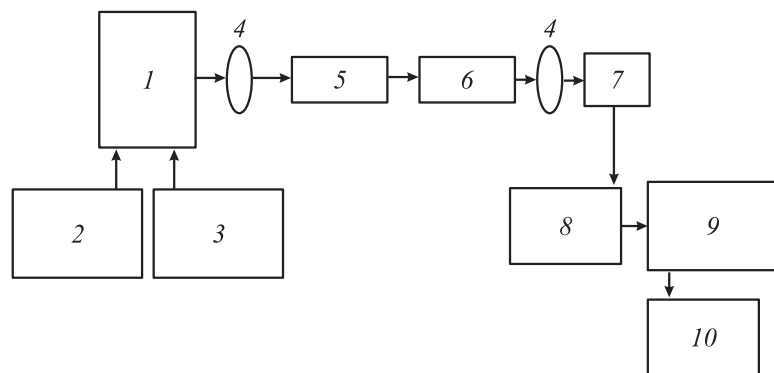


Рис. 1. Схема быстродействующего анализатора спектра лазерного диода: 1 — сосуд Дьюара с диодным лазером, 2 — блок контроля температуры, 3 — генератор пилообразных импульсов тока, 4 — линзы, 5 — эталон Фабри–Перо или кювета с известным газом, 6 — кювета с исследуемым газом, 7 — ИК фотодетектор, 8 — электронный фильтр, 9 — цифровой запоминающий осциллограф, 10 — персональный компьютер.

концентрации неравновесных носителей заряда, составляет 10^{-7} – 10^9 s. Однако изменение температуры лазера с током делает длину волны зависящей не только от тока, но и от скорости его изменения. Целью данной работы является определение интервала длительностей импульсов тока, в котором длина волны излучения монотонно зависит от тока.

Лазерная гетероструктура $n\text{-InAsSb}_{0.17}\text{P}_{0.35}/n\text{-InAsSb}_{0.05}/p\text{-InAsSb}_{0.17}\text{P}_{0.35}$ выращивалась методом жидкофазной эпитаксии на подложках $n\text{-InAs}$ (100). Активный слой $n\text{-InAsSb}_{0.05}$ специально не легировался и имел концентрацию электронов 10^{16} cm^{-3} . Его толщина составила $1\ \mu\text{m}$. Методом стандартной фотолитографии из выращенных структур были изготовлены лазеры с шириной полоска $18\ \mu\text{m}$. В качестве изолятора использовался нитрид кремния, как обеспечивающий наиболее тонкое и надежное покрытие с хорошей адгезией. Лазерные чипы с длиной резонатора $250\ \mu\text{m}$ получались скалыванием и были смонтированы на медном держателе подложкой к держателю.

Принципиальная схема измерительной установки представлена на рис. 1. Диодный лазер с изменяемой длиной волны излучения разме-

шен в сосуде Дьюара с регулируемой температурой. Лазер питается импульсами тока с наклонной вершиной положительной крутизны. Длина волны излучения уменьшается во время импульса из-за роста тока [2,3]. Кварцевая линза преобразует расходящийся поток излучения лазера в параллельный. Далее поток излучения проходит через эталон (кремниевый резонатор Фабри-Перо) и фокусируется еще одной кварцевой линзой на инфракрасный фотодетектор. Электрический сигнал из фотодетектора подается через электронный фильтр на цифровой запоминающий осциллограф и далее на компьютер. Температуру диодного лазера можно регулировать от 78 до 200 К и тем самым изменять начальную длину волны излучения. Длительность импульсов можно было измерять от единиц до сотен μs , а пилообразную форму сохранять одинаковой.

При изучении спектров излучения лазер питался импульсным током длительностью $20\mu\text{s}$ и скважностью 50. На рис. 2 показаны спектры излучения при температуре лазера 80 К и различных токах. При токе $I = 100\text{ mA}$, превышающем на 10% пороговый ток I_{th} , лазер излучает одну спектральную линию на длине волны $\lambda = 3.25\mu\text{m}$. При дальнейшем увеличении тока длина волны уменьшается со скоростью 0.25 \AA на 1% превышения тока над пороговым значением. Эта мода является перестраиваемой. Вместе с ней могут генерироваться неперестраиваемые моды. При токе $I = 125\text{ mA}$ это более слабые моды. При этом генерируется и самая длинноволновая мода с длиной волны $3.275\mu\text{m}$ (рис. 2), которой соответствует энергия фотона, близкая к ширине запрещенной зоны $E_g = 0.378\text{ eV}$. Длинноволновая мода возникает из-за появления в волноводе наведенной более коротковолновыми модами динамической фазовой диэлектрической решетки, предсказанной П.Г. Елисеевым и А.П. Богатовым [6,7]. Упомянутая выше перестраиваемая мода, оставаясь наиболее интенсивной, сглаживает эту фазовую диэлектрическую решетку при поперечных пространственных колебаниях излучаемого потока [8]. При токе 150 mA длинноволновые моды становятся почти незаметными.

Однако неперестраиваемые моды влияют на перестраиваемую моду, что можно наблюдать при питании лазера импульсами тока с наклонной вершиной положительной крутизны. На рис. 3 показан рост интенсивности всего лазерного излучения во время импульса, когда ток увеличивается от 100 до 200 mA. Кривая 1 соответствует длительности импульса $4.5\mu\text{s}$, кривая 2 — $90\mu\text{s}$. Лазерное излучение промодулировано синусоидой, так как на оптической оси спектрометра

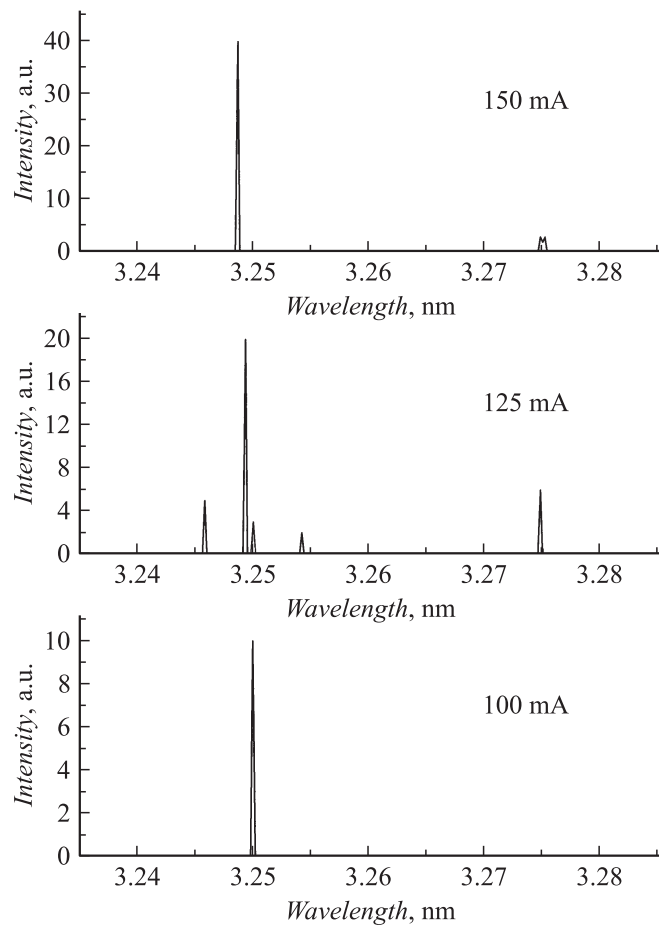


Рис. 2. Спектры излучения частотно-перестраиваемого $n\text{-InAsSbP}/n\text{-InAsSb}/p\text{-InAsSbP}$ лазера при температуре 80 К и питании прямоугольными импульсами тока длительностью $20\ \mu\text{s}$ со скважностью 50.

имеется кремниевый резонатор Фабри-Перо толщиной 1.1 см. Синусоида показывает изменение длины волны излучения на $2.5\ \text{\AA}$ за один свой период. На переднем фронте импульса лазерного излучения (рис. 3, кривая 1) наблюдается переходный процесс установления одномодовой

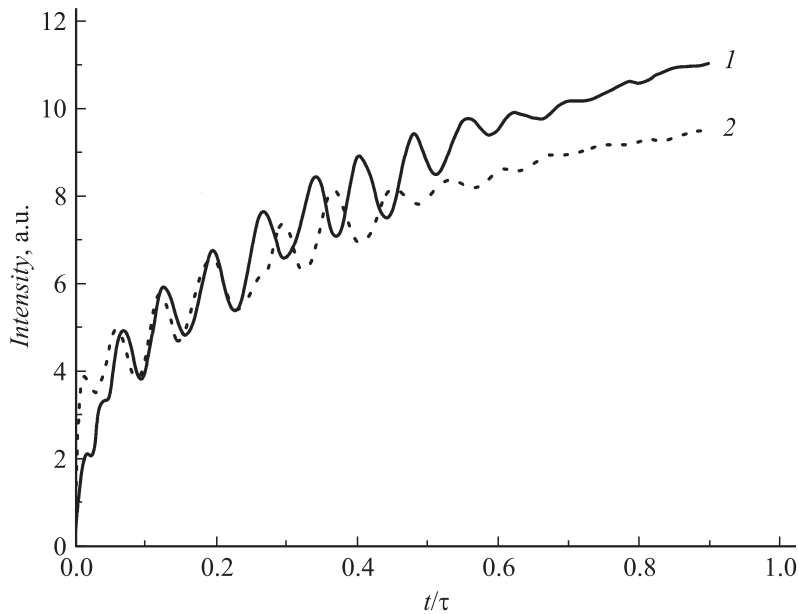


Рис. 3. Осциллограммы излучения $n\text{-InAsSbP}/n\text{-InAsSb}/p\text{-InAsSbP}$ лазера, снятые при температуре лазера 80 К и при различной длительности импульсов тока τ , μs : 1 — 4.5, 2 — 90. Питаящий ток возрастал в процессе импульсов от 100 до 200 мА.

генерации. Постоянная времени в экспоненциальном приближении составляет около $1 \mu\text{s}$. В нашей работе [1] показано, что это связано с выделением тепла в активной области лазера и распространением его в кристалл. В течение этого времени длина волны излучения уменьшается, в основном, за счет увеличения пороговой концентрации носителей заряда с ростом температуры и соответствующего уменьшения коэффициента преломления. Далее длина волны излучения уменьшается из-за увеличения концентрации носителей заряда на боковых краях волновода при увеличении тока в процессе импульса. Концентрация носителей заряда увеличивается на боковых краях волновода по двум причинам: во-первых, из-за повышенной плотности тока относительно середины полоски и, во-вторых, из-за практического отсутствия на них лазерного излучения. При длительности импульса $4.5 \mu\text{s}$ (кривая 1) нет

резких изменений периода синусоиды. При длительности импульса $90 \mu\text{s}$ (кривая 2) в интервале от 0.2 до 0.3 всей длительности, когда ток достигает $\sim 125 \text{ mA}$, происходит как бы растяжение синусоиды, увеличение длительности одного периода. Далее длительность периода восстанавливается, но интенсивность излучения становится меньше, чем на коротких импульсах, и амплитуда синусоиды тоже уменьшается. Уменьшение интенсивности излучения можно объяснить нагреванием лазера и появлением разности температур между кристаллом лазера и кристаллодержателем. Нагревание уменьшает интенсивность основной перестраиваемой моды и снижает роль пространственных колебаний потока излучения в стирании наводимой диэлектрической решетки и создании условий одномодовой генерации. Оценки показали, что постоянная времени этого теплового процесса в экспоненциальном приближении составляет $\sim 40 \mu\text{s}$, то есть близка к длительности плавного уменьшения длины волны. Измерения в более широком интервале токов показали, что при длительностях импульса $90 \mu\text{s}$ перестраиваемая мода является преимущественной до токов 180 mA . Изменение ее длины волны составляет 22 \AA . При длительностях импульса $4.5 \mu\text{s}$ оказывается преимущественной до тока 600 mA и ее длина волны изменяется на 60 \AA . Исследования лазеров при других импульсах показали, что оптимальными для одномодовой генерации и наибольшего диапазона перестройки частоты излучения лазера являются длительности $20\text{--}30 \mu\text{s}$. При этом обеспечивается монотонность зависимости длины волны излучения перестраиваемой моды от тока.

Ослабление перестройки при длительностях более $30 \mu\text{s}$ можно связать с присутствием неперестраиваемых мод (рис. 3, кривая 2), так как неперестраиваемые моды разрушают плавный волновод, создаваемый пространственными поперечными колебаниями лазерного потока. Важно еще и однородность отвода тепла. Тепло отводится хуже от тех участков кристалла, которые ближе к краю медного держателя. Это ухудшает монохроматичность перестраиваемой моды при больших токах, что проявляется в уменьшении амплитуды синусоиды, модулирующей импульс излучения, прошедшего через резонатор Фабри-Перо.

При питании частотно-перестраиваемого диодного лазера импульсами тока с вершиной положительной крутизны частота лазерного излучения увеличивается.

Процессы передачи тепла от активной области в кристалл и от кристалла в медный держатель влияют на качество перестройки частоты. Эффективное время установления в первом процессе составляет

около $1 \mu\text{s}$, во втором — $40 \mu\text{s}$. В промежутке между этими временами происходит однозначное почти линейное увеличение частоты. Такое питание перестраиваемого лазера перспективно в диодно-лазерной спектроскопии высокого разрешения.

Работа поддержана грантами РФФИ 06-02-01364 и 06-02-08279-офи.

Авторы выражают благодарность Шерстневу В.В. за выращивание лазерных структур.

Список литературы

- [1] Астахова А.П., Данилова Т.Н., Именков А.Н., Колчанова Н.М., Яковлев Ю.П. // ФТП. 2003. Т. 37. С. 985.
- [2] Astakhova A.P., Imenkov A.N., Kolchanova N.M., Yakovlev Yu.P., Kubat P., Cìvis S., Walters A. // IEEE Proc. Optoelectron. 2002. V. 149. N 1. P. 27.
- [3] Cìvis S., Kubat P., Zelinger Z., Horka V., Imenkov A.N., Kolchanova N.M., Yakovlev Yu.P. // Appl. Phys. 2003. V. 76. P. 633.
- [4] Arthur G. Maki, Joseph S. Wells. „Wavenumber Calibration Tables From Heterodine Frequency Measurements“ NIST Special Publication 821, Washington, DC 20548, December 1991.
- [5] Данилова А.П., Данилова Т.Н., Именков А.Н., Колчанова Н.М., Степанов М.В., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1999. Т. 33. С. 1088.
- [6] Елисеев П.Г., Богатов А.П. // Труды ФИАН. 1985. Т. 116. С. 15.
- [7] Богатов А.П., Елисеев П.Г., Свердлов Б.Н. // Квант. электрон. 1974. Т. 1. С. 2286.
- [8] Астахова А.П., Данилова Т.Н., Именков А.Н., Колчанова Н.М., Яковлев Ю.П. // ФТП. 2002. Т. 36. С. 1388.