

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.Wt, 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

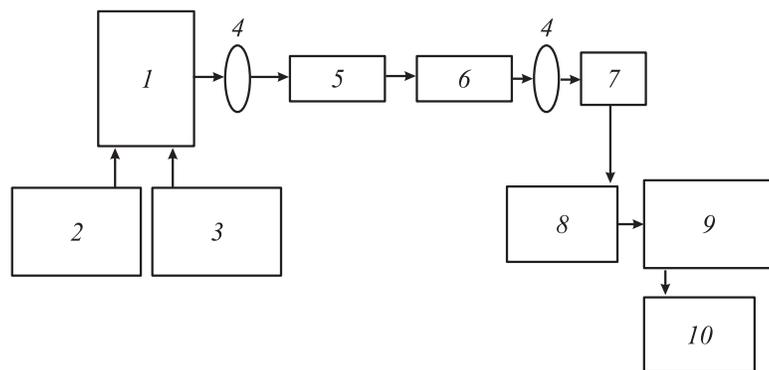


Рис. 1. Схема быстродействующего анализатора спектра лазерного диода: 1 — сосуд Дьюара с диодным лазером, 2 — блок контроля температуры, 3 — генератор пилообразных импульсов тока, 4 — линзы, 5 — эталон Фабри–Перо или кювета с известным газом, 6 — кювета с исследуемым газом, 7 — ИК фотодетектор, 8 — электронный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

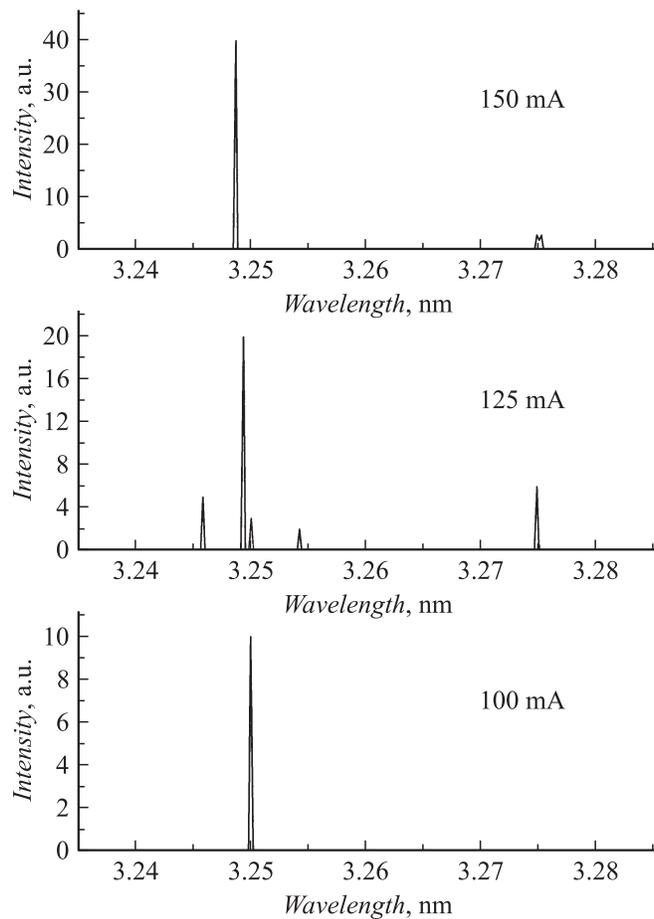


Рис. 2. Спектры излучения частотно-перестраиваемого n -InAsSbP/ n -InAsSb/ p -InAsSbP лазера при температуре 80 К и питании прямоугольными импульсами тока длительностью $20 \mu\text{s}$ со скважностью 50.

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

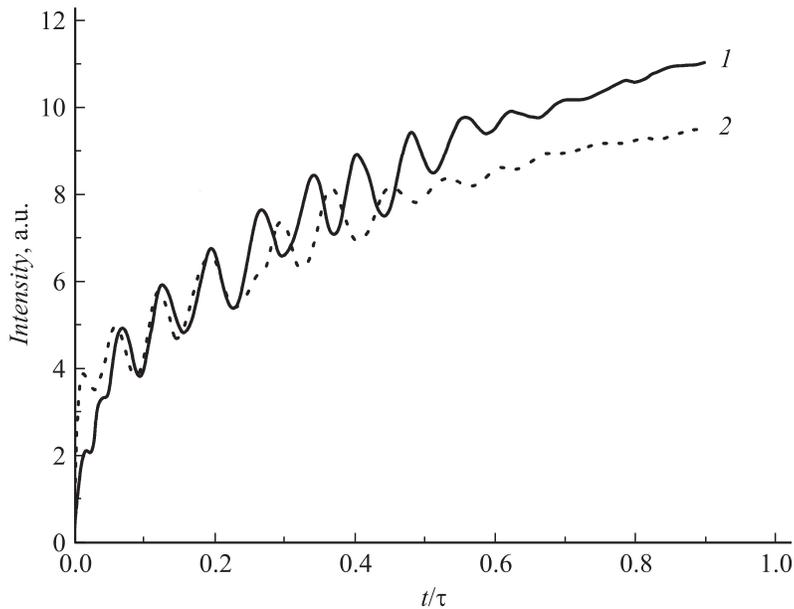


Рис. 3. Осциллограммы излучения $n\text{-InAsSbP}/n\text{-InAsSb}/p\text{-InAsSbP}$ лазера, снятые при температуре лазера 80 К и при различной длительности импульсов тока τ , μs : 1 — 4.5, 2 — 90. Питаящий ток возрастал в процессе импульсов от 100 до 200 мА.

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 полоска 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.