

07:09

## Полностью оптическая ячейка-модулятор на основе AlGaAs/GaAs/InGaAs-гетероструктур на длину волны 905 nm

© А.А. Подоскин, И.С. Шашкин, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин,  
И.С. Тарасов

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

Поступило в Редакцию 22 марта 2016 г.

Продемонстрирована полностью оптическая ячейка на основе лазерных гетероструктур на длину волны 905 nm, работающая в режиме модулятора выходной оптической мощности за счет управляемого переключения генерации между модами резонатора Фабри–Перо и высокодобротной замкнутой модой. Достигнуты времена переключения 1.2 ns и менее при модулируемой мощности 1.6 W.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.02.44184.16247

Одной из актуальных задач современной физики полупроводниковых лазеров является развитие методов эффективного управления лазерными потоками с целью формирования управляемых последовательностей лазерных импульсов. Наиболее интересно направление создания оптически управляемых импульсных лазерных источников с возможностью исполнения как в виде отдельного прибора, так и в интегральных оптических схемах. Существует ряд подходов, которые позволяют реализовать принцип внешнего оптического управления для генерации лазерных импульсов. В работах [1,2] показана возможность эффективной генерации лазерных импульсов в многопереходных  $N-p-N-i-P$ -гетероструктурах с электрической бистабильностью (так называемых лазерах-тиристорах). Высокоэффективная оптическая обратная связь между  $N-p-N$ - и  $N-i-P$ -частями гетероструктуры позволяет реализовать в том числе и внешнее оптическое управление. Другой подход для создания оптически управляемых импульсных лазерных источников основан на принципе управления внутррезонаторной модовой структурой [3].

Реализация оптического метода управления процессом конкуренции модовых структур различной добротности (моды резонатора Фабри–Перо (ФПМ) и высокодобротная замкнутая мода (ЗМ), возникающая за счет эффекта полного внутреннего отражения) в лазерах на основе полупроводниковых РОДГС [4] позволяет создать высокоэффективные импульсные лазерные источники с широким диапазоном длин волн лазерной генерации, размеров, выходных мощностей и длительностей импульсов, пригодные для дальнейшей оптической интеграции.

В работе рассмотрены особенности модуляции излучения полупроводникового лазера Фабри–Перо за счет конкуренции модовых структур различной добротности на примере оптической ячейки на основе полупроводниковой лазерной РОДГС в системе твердых растворов AlGaAs/GaAs/InGaAs, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке *n*-GaAs [100]. Лазерная гетероструктура включала в себя: эпитаксиальный эмиттерный слой Al<sub>0,5</sub>Ga<sub>0,5</sub>As толщиной 1,68 μm *n*-типа проводимости с концентрацией легирующей примеси  $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; нелегированные волноводные слои Al<sub>0,31</sub>Ga<sub>0,69</sub>As общей толщиной 1,35 μm с фоновой концентрацией примеси *n*-типа на уровне  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ; слой Al<sub>0,5</sub>Ga<sub>0,5</sub>As толщиной 1,61 μm *p*-типа проводимости с концентрацией легирующей примеси  $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; активную область, состоящую из четырех квантовых ям InGaAs толщиной по 5 nm на длину волны 905 nm, разделенных барьерами Al<sub>0,31</sub>Ga<sub>0,69</sub>As по 30 nm, смещенную от центра волновода на 0,2 μm в сторону слоя Al<sub>0,5</sub>Ga<sub>0,5</sub>As *p*-типа проводимости. Поверх *p*-эмиттера выращивался высоколегированный контактный слой GaAs толщиной 0,46 μm *p*-типа проводимости с концентрацией легирующей примеси  $4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Из описанной гетероструктуры изготавливались образцы оптических ячеек и полупроводниковые лазеры для управляющей засветки. Для этого формировалась мезаполосковая конструкция, представлявшая собой чередующиеся полосы омических контактов шириной 200 и 400 μm, разделенные мезаканавками. Мезаканавки травились до границы волноводного слоя с *p*-эмиттером, обеспечивая электрическую изоляцию соседних контактных полосков. Далее из гетероструктуры выкалывались образцы оптических ячеек и лазеров управляющей засветки. Раскальвание производилось таким образом, чтобы будущие кристаллы лазера и ячейки были как можно ближе друг к другу и имели минимальные различия в толщинах кристаллов. Конструкция оптической ячейки схематично изображена на рис. 1. Лазер засветки имел ширину полоскового контакта 400 μm и длину Фабри–Перо

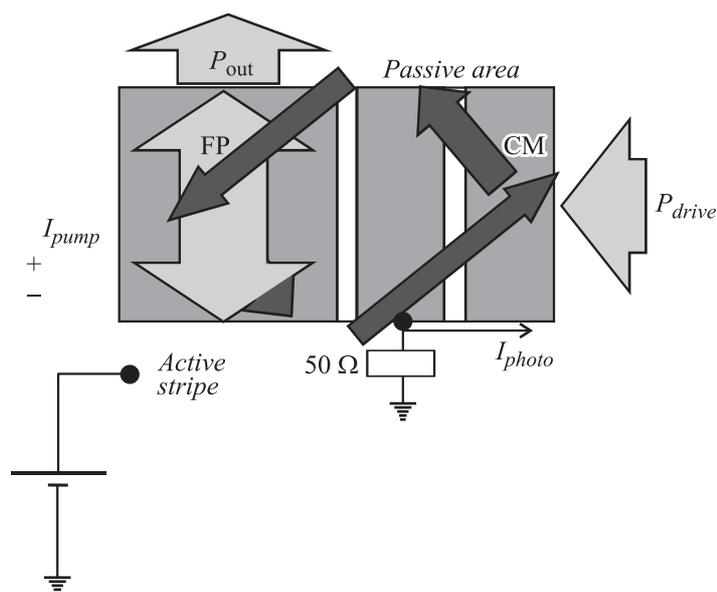
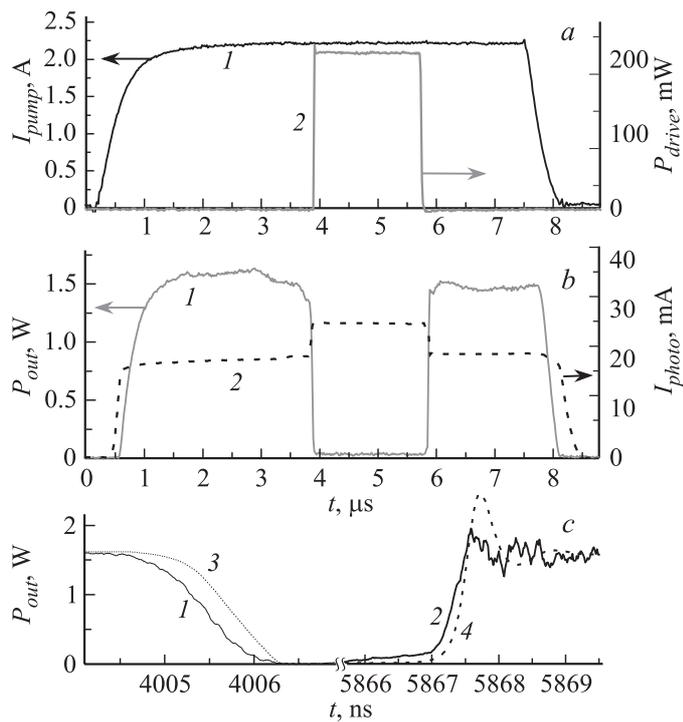


Рис. 1. Схема оптической ячейки.

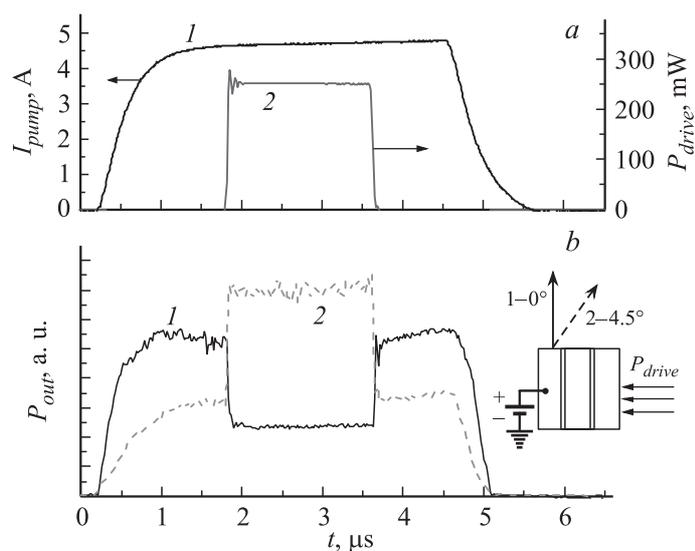
резонатора 1.5 mm. Полученные кристаллы спаивались *n*-стороной вниз на медные теплоотводы с помощью индиевого припоя. При этом выходной торец лазера засветки вплотную стыковался с боковой гранью оптической ячейки.

Размеры оптической ячейки, изготавливаемой для проведения эксперимента, подбирались исходя из требования невыполнения пороговых условий ЗМ [5]. На первом этапе эксперимента активный полосок оптической ячейки накачивался импульсами тока длительностью 5–8  $\mu$ s и частотой до 3 kHz для минимизации эффектов разогрева. Срыва генерации ФПМ в диапазоне амплитуд тока до 5 A не наблюдалось. На втором этапе эксперимента синхронно с накачкой активного полоска оптической ячейки импульсами тока амплитудой до 2.1 A накачивался лазер засветки импульсами длительностью 1–2  $\mu$ s. Амплитуда тока накачки лазера засветки регулировалась в диапазоне, необходимом для получения выходной оптической мощности управляющего импульса засветки в 200 mW, фронты оптического импульса при этом были



**Рис. 2.** Работа оптической ячейки в режиме модулятора. *a*: 1 — импульс тока накачки, 2 — импульс засветки управления. *b*: 1 — выходная оптическая мощность ФПМ из активного полоска, 2 — фототок в пассивной секции, нагруженной на  $50 \Omega$ . *c* — фронты выключения и включения генерации ФПМ: 1 и 2 — экспериментальные, 3 и 4 — расчетные по модели [7].

менее 3 ns. При подаче управляющего импульса засветки наблюдался срыв генерации ФПМ в активном полоске оптической ячейки (рис. 1). По окончании управляющего импульса засветки генерация ФПМ восстанавливалась (рис. 2, *a*). Фронт выключения генерации ФПМ составлял 1–1.2 ns; фронт включения — менее 500 ps с характерным выбросом, что обусловлено колебательным характером динамики включения генерации лазерных мод в полупроводниковых лазерах [6]. Промонстрированные фронты (рис. 2, *c*) хорошо согласуются с расчетными



**Рис. 3.** Работа оптической ячейки в режиме конкуренции мод ФПМ. *a*: 1 — импульс тока накачки, 2 — оптический импульс засветки управления. *b* — динамика интенсивности лазерного излучения в различных зонах параллельной диаграммы направленности: 1 — вдоль оптической оси резонатора Фабри–Перо, 2 — под углом  $4.5^\circ$  к оптической оси. На врезке: схематически изображена оптическая ячейка и стрелками показаны зоны диаграммы направленности.

значениями, вычисленными по сосредоточенной модели конкуренции модовых структур различной добротности [7]. Состояние оптической ячейки дополнительно контролировалось по фототоку в одной из пассивных секций оптической ячейки, нагруженных на сопротивление  $50 \Omega$  (рис. 2, *b*). Во время срыва генерации ФПМ активного полоска наблюдался рост фототока до уровня насыщения, что свидетельствует о возникновении потока мощного лазерного излучения через пассивную секцию оптической ячейки, соответствующего замкнутой моде [4]. Таким образом, оптическая ячейка в диапазоне токов накачки активного полоска до 2.1 А продемонстрировала режим оптически управляемого

модулятора, при котором происходит обратимый срыв генерации ФПМ за счет переключения в режим генерации ЗМ.

При повышении тока накачки активного полоска оптической ячейки происходил неполный срыв генерации ФПМ, выражавшийся в падении выходной оптической мощности на 30–70% в зависимости от амплитуды тока накачки и мощности импульса управляющей засветки (рис. 3). Неполный срыв генерации ФПМ также сопровождался изменением диаграммы направленности излучения в плоскости, параллельной слоям гетероструктуры (рис. 3, *b*). При этом сохранялись характерные времена динамики переключения (1.2 ns и меньше) как для общего изменения выходной мощности ФПМ, так и для переключения между различными лепестками диаграммы направленности ФПМ. Подобный характер поведения оптической ячейки можно объяснить конкуренцией основной (первоначальной) моды ФПМ и мод ФПМ, вытекающих в пассивные области, возникновение которых происходит из-за частичного просветления активной области непрокачиваемой части кристалла оптической ячейки внешним импульсом засветки. При этом возникновение полноценной ЗМ в оптической ячейке не происходит, о чем свидетельствует фототок пассивных секций, не достигающий уровня насыщения [4]. Причиной этого может быть недостаточная мощность импульса засветки вследствие низкой эффективности ввода излучения лазера засветки в волновод кристалла оптической ячейки.

В результате продемонстрирована полностью оптическая ячейка, работающая в режиме модулятора выходной оптической мощности на длину волны 905 nm. Достигнуты времена переключения генерации между модами резонатора Фабри–Перо и высокочастотной замкнутой модой 1.2 ns и меньше, что находится в согласии с результатами численного моделирования по сосредоточенной модели конкуренции ФПМ и ЗМ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-02-31734).

## Список литературы

- [1] Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Rozhkov A.V. et al. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2015. V. 27. N 3. P. 307–310.
- [2] Слипченко С.О., Подоскин А.А., Васильева В.В. и др. // ФТП. 2014. Т. 48. В. 5. С. 716–718. [Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Vasil'eva V.V. et al. // Semiconductors. 2014. V. 48. N 5. P. 686–690].

- [3] *Kosonocky W.F., Cornely R.H.* // IEEE Wescon Techn. Papers. Western Electronic Show and Convention. Session 16/4. 1968.
- [4] *Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Pikhtin N.A., Tarasov I.S.* // Laser Phys. 2014. V. 24. N 10. P. 105001.
- [5] *Слипченко С.О., Подоскин А.А., Пихтин Н.А.* и др. // ФТП. 2011. Т. 45. В. 5. С. 672–676. [*Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Pikhtin N.A.* et al. // Semiconductors. 2011. V. 45. N 5. P. 663–667].
- [6] *Coldren L.A., Corsine S.W., Mashanovitch M.L.* // Diode lasers and photonic integrated circuits. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2012.
- [7] *Подоскин А.А., Шашкин И.С., Слипченко С.О.* и др. // ФТП. 2015. Т. 49. В. 8. С. 1108–1114. [*Podoskin A.A., Shashkin I.S., Slipchenko S.O.* et al. // Semiconductors. 2015. V. 49. N 8. P. 1083–1089].