

Двойной интегрированный лазер-тиристор

Т.А.Багаев, М.А.Ладугин, А.А.Падалица, А.А.Мармалюк, Ю.В.Курнявко,
А.В.Лобинцов, А.И.Данилов, С.М.Сапожников, В.В.Кричевский, М.В.Зверков,
В.П.Коняев, В.А.Симаков, С.О.Слипченко, А.А.Подоскин, Н.А.Пихтин

Представлены результаты сравнительных экспериментальных исследований полупроводникового лазера с различным числом излучающих секций (одной и двумя), монолитно интегрированного с электронным ключом (тиристором). Показано, что функциональная интеграция лазера и тиристора в рамках одной гетероструктуры позволяет обеспечить эффективное функционирование излучателя в импульсном режиме работы (до 50 Вт), а использование вертикальной интеграции двух лазерных секций в таком приборе дополнительно повышает выходную оптическую мощность (до 90 Вт) при прочих равных условиях.

Ключевые слова: полупроводниковая гетероструктура, эпитаксиальная интеграция, интегрированный лазер-тиристор, выходная мощность.

1. Введение

Современные достижения эпитаксиальных технологий, в частности МОС-гидридной эпитаксии, делают возможным получение полупроводниковых гетероструктур высокой сложности, что востребовано при создании приборов с улучшенными характеристиками [1]. Одним из примеров успешной практической реализации новых типов гетероструктур в квантовой электронике может служить создание вертикально интегрированных полупроводниковых лазеров с несколькими излучающими областями. В таких приборах ряд самостоятельных лазерных секций последовательно соединяются посредством туннельных переходов, что позволяет кратно увеличить квантовую эффективность. После демонстрации принципиальной возможности эпитаксиальной интеграции нескольких излучающих областей [2, 3] развитие данного подхода позволило создать разнообразные приборы с высокими выходными характеристиками [4–6]. Так, достигнуто увеличение квантовой эффективности лазеров с двумя активными областями в 1.7–2.0 раза, с тремя – в 2.5–3.0 раза, с четырьмя – в 3.4–4.0 раз [7–9]. Решетки лазерных диодов, изготовленные из указанных гетероструктур, позволили получить более 1 кВт выходной мощности в импульсном режиме [6, 10]. Как правило, в таких приборах излучающие области создаются идентичными, однако нет препятствий к созданию прибора, в котором каждая из лазерных секций будет генерировать на своей длине волны, что расширяет спектр возможных применений таких излучателей [11, 12].

Т.А.Багаев, М.А.Ладугин, А.А.Падалица, А.А.Мармалюк, Ю.В.Курнявко, А.В.Лобинцов, А.И.Данилов, С.М.Сапожников, В.В.Кричевский, М.В.Зверков, В.П.Коняев, В.А.Симаков. ОАО «НИИ “Полос” им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; e-mail: maximladugin@mail.ru
С.О.Слипченко, А.А.Подоскин, Н.А.Пихтин. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26

Поступила в редакцию 6 августа 2019 г.

Эпитаксиальная интеграция также открывает путь к объединению нескольких функционально различных компонентов в рамках одного кристалла. Например, для управления световыми импульсами в состав излучателя необходимо ввести электронный ключ (динистор, тиристор, транзистор) [13–16]. Показано, что для миниатюризации и повышения надежности работы, удобства управления выходными характеристиками мощных излучателей перспективно осуществлять интеграцию в едином процессе роста двух последовательно формируемых структур – лазера и тиристора. Хотя идея создания таких интегральных приборов – лазеров-тиристоров – была предложена достаточно давно [17, 18], успешная практическая реализация стала возможной только по мере развития эпитаксиальных технологий [19, 20]. Такие лазеры-тиристоры при напряжении включения 15–25 В демонстрировали в импульсном режиме выходную мощность 50–60 Вт.

Настоящая работа посвящена дальнейшему развитию указанных подходов и направлена на исследование возможности эпитаксиальной интеграции в рамках одной гетероструктуры нескольких лазерных излучающих областей с электронным ключом (тиристором), обеспечивающим работу в импульсном режиме генерации.

2. Экспериментальная часть

Полупроводниковые гетероструктуры InGaAs/AlGaAs/GaAs формировались методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках GaAs. Конструкция гетероструктуры одиночного лазера-тиристора описана в [20], ее зонная диаграмма схематично представлена на рис.1,а. По аналогии с [7] к структуре одиночного лазера-тиристора через туннельный переход была добавлена вторая излучающая лазерная секция (рис.1,б). На основе полученных гетероструктур изготавливались лазеры-тиристоры полосковой геометрии с управляющим контактом к *n*-коллектору [20]. Измерения проводились в контуре с емкостью 0.47 мкФ в импульсном режиме (100 нс, 10 кГц).

Основная цель настоящего исследования направлена на увеличение выходной мощности импульсных лазеро-

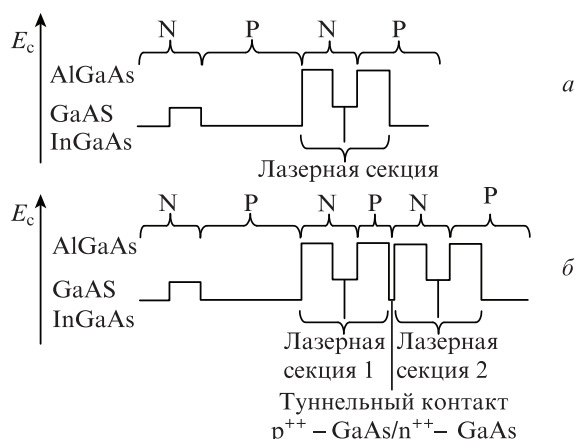


Рис.1. Схематическое изображение зонной диаграммы одиночного (а) и двойного (б) лазера-тиристора.

тиристор. Опираясь на успешный опыт создания интегрированных лазерных диодов с несколькими излучающими областями [7–9], нами были созданы гетероструктуры и на их основе изготовлены лазеры-тиристоры, содержащие в лазерной части две излучающие области. По аналогии с двойными интегрированными лазерными диодами [7] назовем их двойными интегрированными лазерами-тиристорами или, для краткости, двойными лазерами-тиристорами. На рис.2 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) одиночного и двойного лазера-тиристора без пропуска сигнала через управляющую секцию.

Видно, что оба прибора демонстрируют близкие напряжения включения (18–20 В), поскольку они имеют одинаковую тиристорную часть, отвечающую за этот параметр. Напряжение в открытом состоянии в случае двойного лазера-тиристора приблизительно в два раза выше (~2.6 В), чем у одиночного лазера-тиристора (~1.3 В), что обусловлено наличием двух р–п-переходов в лазерной части. Важно отметить, что туннельный переход, соединяющий две излучающие лазерные области, не вносит существенного вклада в повышение напряжения открытого состояния двойного лазера-тиристора.

При этом наклон вольт-амперной характеристики (ВгАХ) (рис.3) двойного лазера-тиристора в 1.5–1.8 раз больше наклона ВгАХ одиночного прибора. В двойных интегрированных лазерах без тиристорной части увеличение наклона было несколько больше и составляло

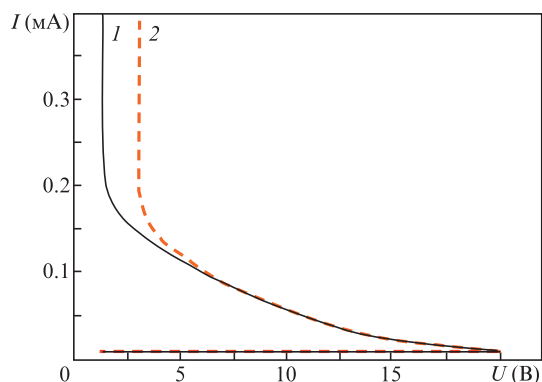


Рис.2. Вольт-амперная характеристика одиночного (1) и двойного (2) лазера-тиристора.

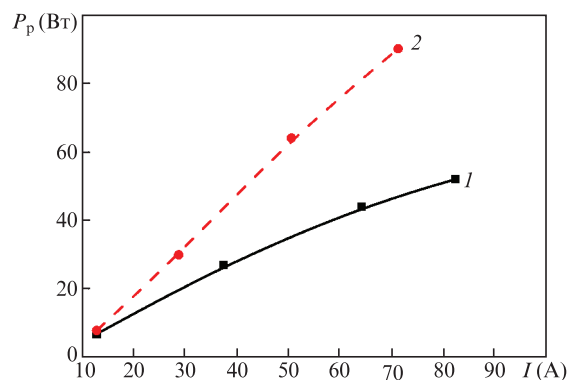


Рис.3. Ватт-амперная характеристика одиночного (1) и двойного (2) лазера-тиристора в импульсном режиме работы (100 нс, 10 кГц).

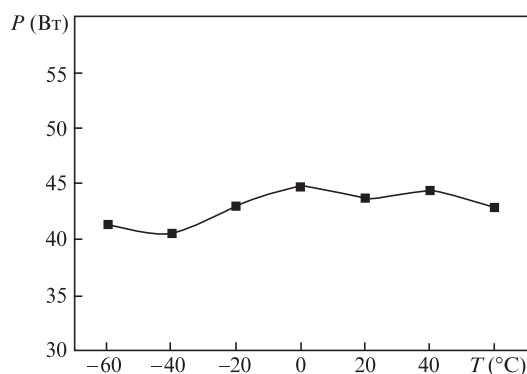


Рис.4. Температурная зависимость выходной мощности двойного лазера-тиристора при различных напряжениях включения.

1.7–2.0 раза. Разница указанных величин обусловлена потерями носителей в управляющей секции. Выходная оптическая мощность двойного лазера-тиристора достигала 90 Вт в импульсном режиме (100 нс, 10 кГц).

Данные по температурной стабильности работы двойного лазера-тиристора представлены на рис.4. Видно, что прибор устойчиво работает в температурном диапазоне от –60 °С до +60 °С.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что увеличение числа излучающих лазерных областей положительно сказывается на повышении выходной мощности лазера-тиристора и открывает путь к дальнейшему наращиванию мощности, например путем создания тройного лазера-тиристора.

Итак, в настоящей работе представлены результаты создания и исследования двойного интегрированного лазера-тиристора. В рамках одной гетероструктуры сочетаются тиристорная (управляющая) и две лазерных (излучающих) части. Показано, что такой прибор при прочих равных условиях характеризуется увеличенной в 1.5–1.8 раз квантовой эффективностью, по сравнению с одиночным лазером-тиристором в импульсном режиме генерации, и надежной работой в широком температурном диапазоне.

1. Акчурин Р.Х., Мармалюк А.А. *МОС-гидридная эпитаксия в технологии материалов фотоники и электроники* (М.: Техносфера, 2018).
2. Van der Ziel J.P., Tsang W.T. *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 499 (1982).
3. Garcia Ch., Rosencher E., Collot Ph., Laurent N., Guyaux J.L., Vinter B., Nagle J. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 3752 (1997).
4. Boucher J.-F., Vilokinen V., Rainbow P., Uusimaa P., Lyytikainen J., Ranta S. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7480**, 74800K (2009).

5. Винокуров Д.А., Коняев В.П., Ладугин М.А., Лютецкий А.В., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Петрунов А.Н., Пихтин Н.А., Симаков В.А., Слипенченко С.О., Сухарев А.В., Фетисова Н.В., Шамахов В.В., Тарасов И.С. *ФТП*, **44** (2), 251 (2010) [*Semiconductors*, **44**, 238 (2010)].
6. Коняев В.П., Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Багаев Т.А., Зверков М.В., Кричевский В.В., Падалица А.А., Сапожников С.М., Симаков В.А. *ФТП*, **48** (1), 104 (2014) [*Semiconductors*, **48**, 99 (2014)].
7. Зверков М.В., Коняев В.П., Кричевский В.В., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Симаков В.А., Сухарев А.В. *Квантовая электроника*, **38** (11), 989 (2008) [*Quantum Electron.*, **38** (11), 989 (2008)].
8. Давыдова Е.И., Зверков М.В., Коняев В.П., Кричевский В.В., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Симаков В.А., Сухарев А.В., Успенский М.Б. *Квантовая электроника*, **39** (8), 723 (2009) [*Quantum Electron.*, **39** (8), 723 (2009)].
9. Мармалюк А.А., Давыдова Е.И., Зверков М.В., Коняев В.П., Кричевский В.В., Ладугин М.А., Лебедева Е.И., Петров С.В., Сапожников С.М., Симаков В.А., Успенский М.Б., Яроцкая И.В., Пихтин Н.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **45** (4), 528 (2011) [*Semiconductors*, **45**, 519 (2011)].
10. Ладугин М.А., Багаев Т.А., Мармалюк А.А., Коваль Ю.П., Коняев В.П., Сапожников С.М., Лобинцов А.В., Симаков В.А. *Квантовая электроника*, **48** (11), 993 (2018) [*Quantum Electron.*, **48** (11), 993 (2018)].
11. Guo W., Shen G., Li J., Wang T., Gao G., Zou D. *Proc. SPIE*, **5624**, 217 (2005).
12. Давыдова Е.И., Коняев В.П., Ладугин М.А., Лебедева Е.И., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Петров С.В., Сапожников С.М., Симаков В.А., Успенский М.Б., Яроцкая И.В. *Квантовая электроника*, **40** (8), 697 (2010) [*Quantum Electron.*, **40** (8), 697 (2010)].
13. Katz F., Bar-Chain N., Chen P.C., Margalit S., Ury L., Wilt. D., Yust M., Varov A. *Appl. Phys. Lett.*, **37**, 211 (1980).
14. Wang S.-W., Wu R.-H., Zhu Q.-G., Zhang Q.-S., Li Z.-Y., Tian H.-L. *IEE Proc.*, **129** (6), 306 (1982).
15. Mori Y., Shibata J., Sasai Y., Serizawa H., Kajiwara T. *Appl. Phys. Lett.*, **47** (7), 649 (1985).
16. Walter G., Holonyak N., Jr., Feng M., Chan R. *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 4768 (2004).
17. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Корольков В.И., Никитин В.Г., Портной Е.Л., Яковенко А.А. *ФТП*, **6** (4), 739 (1972) [*Semiconductors*, **6**, 739 (1972)].
18. Lockwood H.F., Etzold K.-F., Stockton T.E., Marinelli D.P. *IEEE J. Quantum. Electron.*, **10**, 567 (1974).
19. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Rozhkov A.V., Pikhtin N.A., Tarasov I.S., Bagaev T.A., Zverkov M.V., Konyayev V.P., Kurniavko Y.V., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Padalitsa A.A., Simakov V.A. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **25** (17), 1664 (2013).
20. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Soboleva O.S., Pikhtin N.A., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A., Tarasov I.S. *J. Appl. Phys.*, **121** (5), 054502 (2017).