

# Тройной 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, В.П.Коняев, В.А.Симаков, С.О.Слипченко, А.А.Подоскин, Н.А.Пихтин

*Представлены результаты экспериментальных исследований тройного лазера-тиристора – полупроводникового лазера с тремя излучающими секциями, монолитно интегрированного с электронным ключом (тиристором). Для сравнения представлены выходные характеристики одиночного и двойного лазеров-тиристор. Показано, что функциональная интеграция лазера и тиристора в рамках одной гетероструктуры обеспечивает эффективное функционирование излучателя в импульсном режиме работы (мощность излучения  $\sim 50$  Вт), использование вертикальной интеграции двух лазерных секций повышает мощность до  $\sim 90$  Вт, а переход к интеграции трех лазерных секций позволяет довести выходную оптическую мощность до  $\sim 120$  Вт при прочих равных условиях.*

**Ключевые слова:** интегрированный лазер-тиристор, выходная мощность, гетероструктура, квантовая яма.

## 1. Введение

Формирование комбинированных гетероструктур, содержащих несколько функционально различающихся компонентов, в рамках одного ростового процесса – перспективный путь к созданию монолитно-интегрированных компактных приборов с улучшенными характеристиками. В последнее время активно исследуются интегрированные лазеры-тиристоры, использующие гетероструктуры, одновременно содержащие тиристорную и лазерную части. Такая интеграция, благодаря введению в состав излучателя электронного ключа, облегчает решение задачи управления световыми импульсами [1, 2]. Подобные лазеры-тиристоры при напряжении включения 15–25 В демонстрировали выходную мощность до 50 Вт в импульсном режиме [3, 4].

Известны успешные попытки создания вертикально интегрированных полупроводниковых лазеров с несколькими излучающими областями. В таких приборах самостоятельные лазерные секции последовательно соединяются посредством туннельных переходов, что позволяетратно увеличить квантовую эффективность. Так, сообщается об увеличении квантовой эффективности лазеров с двумя активными областями в 1.7–2.0 раза, а с тремя – в 2.5–3.0 раза [5–7].

Объединяя описанные приемы, авторы [8] продемонстрировали двойной лазер-тиристор, содержащий две лазерные излучающие части и тиристорную (управляющую) часть. Указанный прибор при напряжении включе-

ния  $\sim 20$  В достигал выходной мощности  $\sim 90$  Вт в режиме коротких импульсов (100 нс, 10 кГц). По сравнению с одиночным лазером-тиристором квантовая эффективность увеличилась в 1.5–1.8 раза при прочих равных условиях.

Настоящая работа посвящена дальнейшему развитию указанных подходов и направлена на исследование возможности создания тройного лазера-тиристора с использованием эпитаксиальной интеграции в рамках одной гетероструктуры трех лазерных излучающих областей с тиристором, обеспечивающим работу прибора в импульсном режиме генерации.

## 2. Эксперимент

Полупроводниковые гетероструктуры InGaAs/AlGaAs/GaAs формировались методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках GaAs. Активной областью лазерной части служила одна квантовая яма InGaAs, помещенная в центр волновода AlGaAs толщиной 0.4 мкм. Волновод с двух сторон ограничивался широкозонными эмиттерными слоями AlGaAs. Тиристорная часть содержала широкозонный эмиттер AlGaAs и узкозонную базу GaAs толщиной 4 мкм. Слой N-эмиттера лазерной части одновременно выполнял роль широкозонного N-коллектора тиристорной части. Подробнее конструкция гетероструктуры одиночного лазера-тиристора описана в [4], а ее зонная диаграмма схематично представлена на рис.1,а.

Для формирования двойного лазера-тиристора к одиночному лазеру-тиристор через туннельный переход добавлена вторая излучающая лазерная секция такой же геометрии (рис.1,б) [8]. На рис.1,б представлена зонная диаграмма тройного лазера-тиристора, в котором к двойному лазеру-тиристор добавлена еще одна лазерная секция, как и ранее, посредством туннельного перехода. На основе полученных гетероструктур изготавливались лазеры-тиристоры полосковой геометрии с управляющим контактом к n-коллектору [4]. Измерения проводили в контуре емкостью 0.47 мкФ в импульсном режиме работы (100 нс, 10 кГц).

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, В.П.Коняев, В.А.Симаков. АО «НИИ «Полус» им. М.Ф.Степеля», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; e-mail: bagaevtimur@mail.ru

С.О.Слипченко, А.А.Подоскин, Н.А.Пихтин. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, ул. Политехническая, 26

Поступила в редакцию 14 июля 2020 г., после доработки – 24 августа 2020 г.

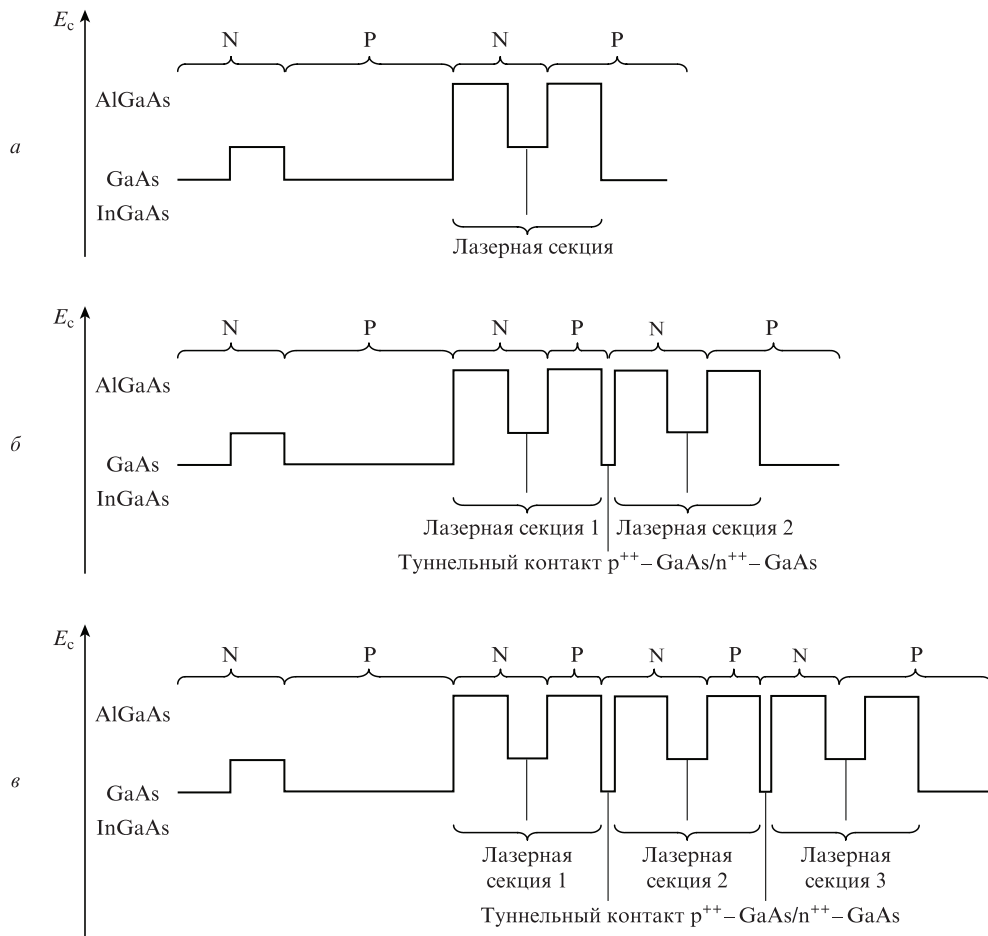


Рис.1. Схематическое изображение зонной диаграммы одиночного (а), двойного (б) и тройного (в) лазер-тиристоров.

### 3. Результаты и их обсуждение

Успешный опыт создания двойных лазер-тиристоров [8], продемонстрировавших почти вдвое большую дифференциальную квантовую эффективность, чем одиночные лазеры-тиристоры, стимулировал проведение настоящего исследования, нацеленного на поиск путей дальнейшего увеличения выходной мощности таких приборов. Опираясь на результаты создания интегрированных лазерных диодов с несколькими излучающими областями [6], мы вырастили гетероструктуры, на основе которых были изготовлены лазеры-тиристоры, содержащие в лазерной части три излучающие области. Для сравнения изготавливались одиночные и двойные лазеры-тиристоры с такими же размерами активного излучающего элемента. На рис.2 представлены вольт-амперные характеристики исследованных лазер-тиристоров в отсутствие пропускающей сигнала через управляющую секцию.

Видно, что все приборы демонстрируют близкие напряжения включения (18–20 В), поскольку все они имеют одинаковую тиристорную часть, отвечающую за этот параметр. Напряжение в открытом состоянии в двойном лазере-тиристоре приблизительно в 2 раза ( $\sim 2.75$  В), а в тройном лазере-тиристоре – приблизительно в 3 раза выше ( $\sim 4.1$  В), чем у одиночного лазера-тиристора ( $\sim 1.37$  В), что обусловлено наличием соответственно двух и трех р–n-переходов в лазерной части. Важно отметить, что в случае как двойного, так и тройного лазера-тиристора наличие туннельных переходов не сказалось отрицательно на величине напряжения в открытом состоянии.

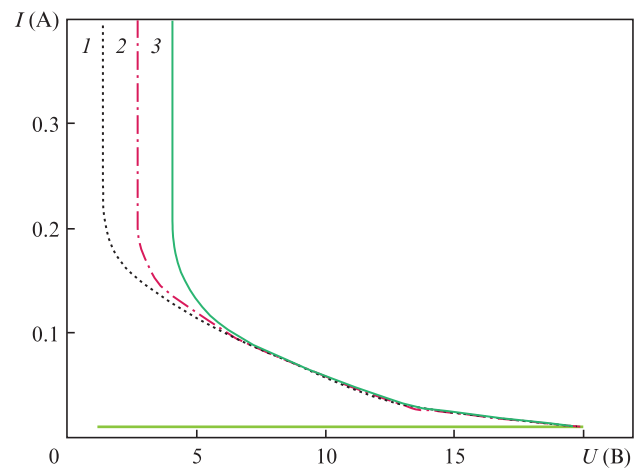


Рис.2. Вольт-амперные характеристики одиночного (1), двойного (2) и тройного (3) лазер-тиристоров.

Ватт-амперные характеристики (ВтАХ) исследованных лазер-тиристоров представлены на рис.3. Для их получения варьировалась величина напряжения включения лазер-тиристоров путем подачи сигнала на управляющую секцию. Пиковый ток определялся по вариации напряжения на конденсаторе. Хорошо видно изменение наклона кривых в зависимости от числа интегрированных лазерных секций. Так, наклон ВтАХ двойного лазера-тиристора на начальном участке в 1.7 раза превышает наклон ВтАХ одиночного прибора, а наклон ВтАХ тройного лазера-тиристора больше уже 2.3 раза. В инте-

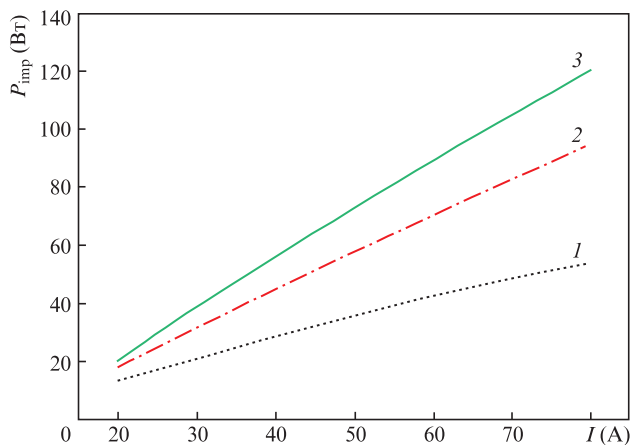


Рис. 3. Ватт-амперные характеристики одиночного (1), двойного (2) и тройного (3) лазеров-тиристоров в импульсном режиме работы (100 нс, 10 кГц).

рированных лазерах без тиристорной части это изменение было несколько выше и составляло 1.7–2.0 раза для двойных и 2.5–3.0 раза для тройных излучателей [5–7]. Такое различие, вероятно, связано с потерями носителей в управляющей секции. Выходная оптическая мощность тройного лазера-тиристора достигала 120 Вт в импульсном режиме работы (100 нс, 10 кГц).

Отметим особенность поведения ВТАХ в зависимости от числа излучающих секций. Так, хотя на начальном участке наклон ВТАХ для тройного лазера-тиристора в 2.2–2.4 раза превышает наклон для одиночного лазера-тиристора, при больших токах накачки (80 А) выходная мощность тройного лазера-тиристора уже приблизительно в 3 раза превышает выходную мощность одиночного прибора. Это связано с более быстрым насыщением ВТАХ одиночного лазера-тиристора при росте тока накачки по сравнению с приборами с несколькими излучающими секциями, что хорошо видно на рис. 3 по наклону кривой 1. Подобное поведение ВТАХ не наблюдалось у интегрированных лазеров без управляющей секции [9], с наличием которой, возможно, связан наблюдаемый эффект.

Все образцы излучали в районе 900 нм, поскольку в их составе были идентичные квантовые ямы InGaAs. Расходимость излучения лазеров-тиристоров в дальней зоне по уровню 0.5 в плоскости, перпендикулярной р–п-переходу, составляла 26–29°, а в плоскости, параллельной р–п-переходу, она была равна 6–8°. Диаграмма направленности таких приборов определяется конструкцией ла-

зерной секции. При этом расходимость не зависит от числа лазерных секций и наличия тиристорной части.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что увеличение числа излучающих лазерных областей благоприятно сказывается на повышении выходной мощности лазеров-тиристоров: тройные лазеры-тиристоры продемонстрировали трехкратный рост выходной мощности (120 Вт) по сравнению с одиночными лазерами-тиристорами (40 Вт).

Итак, в настоящей работе представлены результаты исследования созданного тройного интегрированного лазера-тиристора. В рамках одной гетероструктуры сочетаются тиристорная (управляющая) и три лазерных (излучающих) секции. Показано, что такой прибор при прочих равных условиях характеризуется увеличенной в 2.2–2.4 раза квантовой эффективностью по сравнению с одиночным лазером-тиристором в импульсном режиме генерации и позволяет достигать выходной оптической мощности 120 Вт.

- Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Rozhkov A.V., Pikhtin N.A., Tarasov I.S., Bagaev T.A., Zverkov M.V., Konyaev V.P., Kurniavko Y.V., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Padalitsa A.A., Simakov V.A. *IEEE Phot. Technol. Lett.*, **25**, 1664 (2013).
- Wang H., Mi J., Zhou X., Meriggi L., Steer M., Cui B., Chen W., Pan J., Ding Y. *Opt. Lett.*, **38**, 4868 (2013).
- Soboleva O.S., Podoskin A.A., Golovin V.S., Gavrina P.S., Zolotarev V.V., Pikhtin N.A., Slipchenko S.O., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **66**, 1827 (2019).
- 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**, 054502 (2017).
- Acklin B.D., Behringer M., Herrmann G., Luft J., Hanke C., Korte L., Marchiano M., Wilhelmi J., Odorico B.D. *Proc. SPIE*, **3889**, 128 (2000).
- 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**, 528 (2011) [*Semiconductors*, **45**, 519 (2011)].
- Kanskar M., Chen Z., Dong W., Guan X., Zhang S., Elim S., Bao L., Grimshaw M., DeVito M. *J. Photon. Energy*, **7**, 016003 (2017).
- Багаев Т.А., Ладугин М.А., Падалица А.А., Мармалюк А.А., Курнявко Ю.В., Лобинцов А.В., Данилов А.И., Сапожников С.М., Кричевский В.В., Зверков М.В., Коняев В.П., Симаков В.А., Слипченко С.О., Подоскин А.А., Пихтин Н.А. *Квантовая электроника*, **49**, 1011 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 1011 (2019)].
- 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**, 723 (2009) [*Quantum Electron.*, **39**, 723 (2009)].