

Мощные полупроводниковые гибридные импульсные лазерные излучатели в диапазоне длин волн 900–920 нм

Т.А.Багаев, Н.В.Гультиков, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, Ю.В.Курнявко, В.В.Кричевский, А.М.Морозюк, В.П.Коняев, В.А.Симаков, С.О.Слипченко, А.А.Подоскин, Н.А.Пихтин, А.Е.Казакова, Д.Н.Романович, В.А.Крючков

Исследованы мощные полупроводниковые лазерные излучатели ($\lambda = 900–920$ нм) в виде гибридных лазер-тиристоров, представляющих собой последовательно соединенные посредством припойного контакта кристаллы тиристора и интегрированного полупроводникового лазера с тремя излучающими областями. В качестве образца для сравнения использовался монолитный лазер-тиристор с тремя излучающими областями. Выходная мощность тройного монолитно-интегрированного лазера-тиристора составила ~ 120 Вт при напряжении включения 18 В. Напряжение включения гибридного лазера-тиристора с тремя излучающими областями было равно 28 В, а выходная пиковая мощность достигала ~ 170 Вт.

Ключевые слова: интегрированный лазер-тиристор, гибридный лазер-тиристор, выходная мощность.

1. Введение

Источники мощного лазерного излучения спектрального диапазона 900–920 нм могут применяться для решения многих прикладных задач, среди которых в последнее время получило стремительное развитие направление, связанное с созданием мобильных лидарных комплексов [1]. Для обеспечения работы полупроводниковых лазеров в импульсном режиме генерации принято использовать схему управляемого включения с конденсатором и электронным ключом (транзистором, динистором или тиристором). Эпитаксиальная монолитная интеграция в одном полупроводниковом кристалле является следующим шагом на пути увеличения функциональных характеристик данных излучателей. Продемонстрированы лазеры-тиристоры, созданные по указанной схеме и обеспечивающие выходную мощность ~ 50 Вт в режиме коротких импульсов (100 нс, 10 кГц) [2]. Переход в лазерной части к двум и трем туннельно-связанным излучающим областям позволяет увеличить квантовую эффективность таких приборов и довести их выходную мощность до 90 и 120 Вт соответственно [3,4]. Вместе с тем для монолитно-интегрированных лазер-тиристоров наблюдается эффект снижения напряжения включения за счет поглощения обратносмещенной базовой областью тиристорной части спонтанного излучения активной области лазерной сек-

ции [5]. Это уменьшает величину проходящего через прибор тока накачки и, следовательно, ограничивает его выходную мощность. Также в монолитном лазере-тиристоре наблюдается эффект включения тока в локальной области плоскости гетероструктуры, что приводит к увеличению дополнительных оптических потерь и влечет за собой уменьшение наклона ватт-амперной характеристики [2]. Одним из путей снижения негативного влияния данных эффектов является создание гибридного лазера-тиристора, в котором тиристорный элемент и полупроводниковый лазер используются как дискретные независимые компоненты, последовательно соединенные посредством припойного контакта и не имеющие оптической связи. В работе [6] приведены результаты управления микролинейками лазеров (три лазерных диода) с помощью трех тиристоров в гибридном исполнении. Достигнута выходная пиковая мощность 78 Вт на длине волны 1060 нм при напряжении включения до 22 В. Однако в гибридных приборах растет тепловыделение и увеличиваются массогабаритные параметры, что может накладывать ограничения на их возможные применения.

Настоящая работа посвящена экспериментальному сравнению указанных подходов к созданию мощных полупроводниковых лазер-тиристоров, работающих в импульсном режиме генерации.

2. Экспериментальная часть

Для изготовления гибридных и монолитно-интегрированных полупроводниковых лазерных излучателей формировались гетероструктуры (In)GaAs/AlGaAs/GaAs методом МОС-гибридной эпитаксии на подложках GaAs. Гибридный излучатель типа лазер-тиристор состоял из лазерной гетероструктуры с тремя излучающими областями и тиристорной гетероструктуры, выращенных по отдельности. Послойное изображение указанных гетероструктур схематично представлено на рис.1,а и б. Для формирования гибридного лазера-тиристора данные гетероструктуры соединялись последовательно посредством припойного контакта, как изображено на рис.1,в.

Т.А.Багаев, АО «НИИ “Полус” им. М.Ф.Степеля», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; Российский университет дружбы народов, Россия, 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6; e-mail: tim_himik@mail.ru

Н.В.Гультиков, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, Ю.В.Курнявко, В.В.Кричевский, А.М.Морозюк, В.П.Коняев, В.А.Симаков, АО «НИИ “Полус” им. М.Ф.Степеля», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3

С.О.Слипченко, А.А.Подоскин, Н.А.Пихтин, А.Е.Казакова, Д.Н.Романович, В.А.Крючков, Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, ул. Политехническая, 26

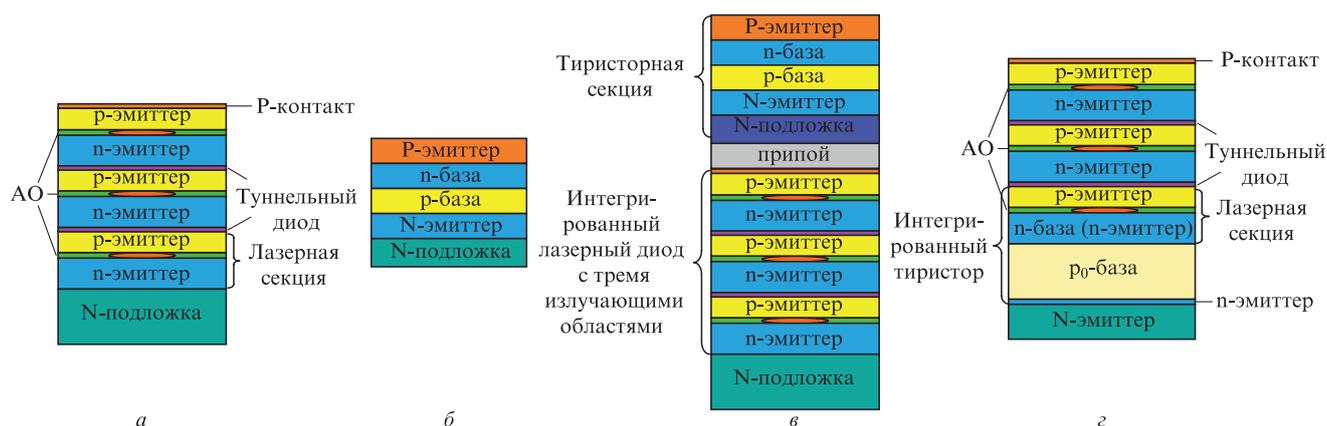


Рис.1. Схематические изображения гетероструктуры тройного интегрированного лазера (а), тиристора (б), гибридного тройного (в) и интегрированного тройного (г) лазеров-тиристор; АО – активная область.

Для получения микроструктуры тройного монолитно-интегрированного лазера-тиристора к одиночному лазеру-тиристор через туннельные переходы добавлялись вторая и третья излучающие лазерные секции рис.1,г.

Использовались конструкции тройных интегрированных лазерных гетероструктур [7], монолитно-интегрированного тройного лазера-тиристора [4] и тиристорной гетероструктуры в виде самостоятельного изделия [4].

На основе полученных гетероструктур изготавливались гибридные и монолитные лазеры-тиристоры и проводились их исследования в импульсном режиме работы (100 нс, 10 кГц) в контуре с емкостью 0.47 мкФ.

3. Результаты и их обсуждение

Идея повышения эффективности работы лазерных диодов в импульсном режиме генерации привела к созданию монолитно-интегрированных лазеров-тиристоров с высокой эффективностью малосигнального управления и широким диапазоном режимов работы [8]. Для увеличения выходной мощности таких приборов в лазерной части было использовано несколько туннельно-связанных излучающих секций, что позволило увеличить квантовую эффективность для приборов с двумя секциями в 1.5–1.8 раза, а для приборов с тремя секциями – в 2.2–2.4 раза [3,4]. Однако поглощение спонтанного излучения активной области лазерной секции в обратнсмещенной базовой области тиристорной части данного прибора ведет к снижению напряжения переключения, что, в свою очередь, ограничивает максимальный ток накачки и сдерживает рост выходной мощности [9,10]. Схематическое изображение процесса фотоактивации носителей в базе интегрированного лазера-тиристора представлено на рис.2.

Такие факторы локализации областей протекания тока, как остаточное поглощение в неаккачиваемой области, рост плотности тока в области локализации и уменьшение фактора оптического ограничения в области усиления, снижают эффективность лазера-тиристора по сравнению с лазером, в котором может быть осуществлена равномерная накачка [2].

Использование гибридной конструкции лазера-тиристора, в которой отсутствуют оптическая связь между излучателем и электронным ключом и локализация тока в самом лазере, должно позволить устранить указанные эффекты. Для этого нами были созданы гибридные лазеры-тиристоры, состоящие из дискретных кристаллов ла-

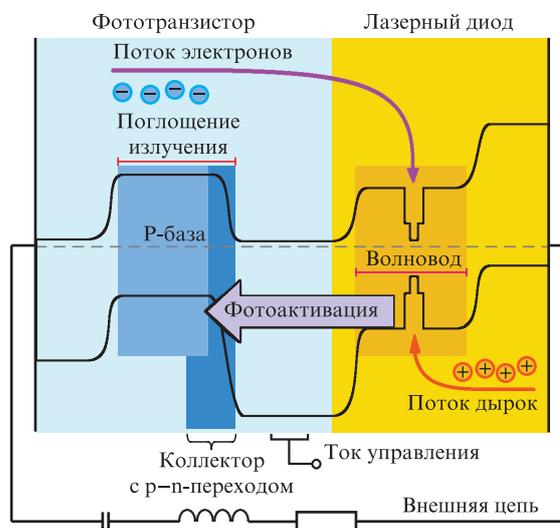


Рис.2. Схема фотоактивации дополнительных носителей в базе интегрированного лазера-тиристора.

зера с тремя излучающими секциями и тиристора, соединенных припоем. Выходные характеристики таких приборов сравнивались с аналогичными характеристиками монолитно-интегрированных тройных лазеров-тиристоров. При этом отдельные гетероструктуры тиристора и тройного интегрированного лазера были идентичны по составу, легированию и толщине слоев тиристорной и лазерной частей в монолитно-интегрированном лазере-тиристор. Ожидалось увеличение напряжения включения и выходной оптической мощности гибридного лазера-тиристора.

На рис.3 представлены вольт-амперные характеристики исследованных образцов. Видно, что устранение оптической связи между излучающей и управляющей частями в гибридном лазере-тиристоре дало возможность увеличить напряжение включения в 1.4–1.5 раза по сравнению с монолитным лазером-тиристором.

Переход от монолитной к гибридной интеграции лазерной и управляющей секций позволил получить выходную пиковую мощность $P_{imp} = 170$ Вт при токе накачки 80 А в режиме коротких импульсов, что в 1.4 раза превышает значения для монолитно-интегрированных лазеров-тиристоров (рис.4). Важной составляющей достигнутого эффекта, на наш взгляд, является повышение эффективности работы тиристорной части в гибридных приборах.

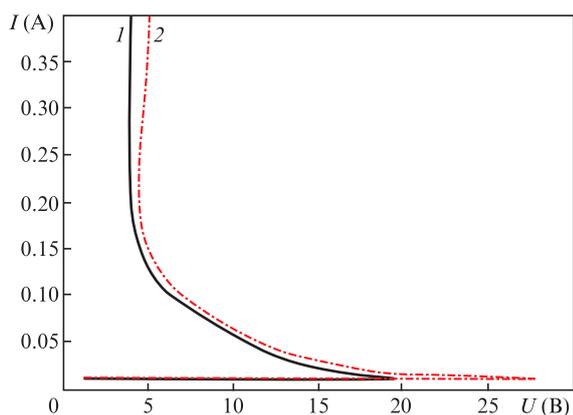


Рис.3. Вольт-амперные характеристики тройного монолитного (1) и тройного гибридного (2) лазеров-тиристоров.

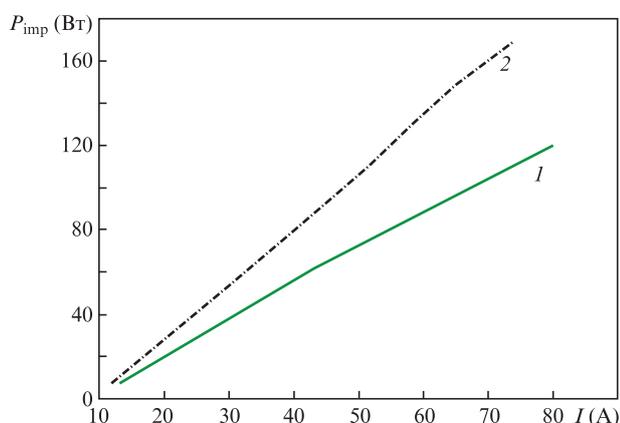


Рис.4. Ватт-амперные характеристики тройного монолитного (1) и тройного гибридного (2) лазеров-тиристоров (100 нс, 10 кГц).

Следует отметить, что наклон ватт-амперной характеристики тройного гибридного лазера-тиристора (рис.5) близок к аналогичному параметру для монолитно-интегрированного тройного лазера без управляющей секции (данные взяты из работы [7]). Из рис.5 видно, что отсутствие оптической связи между лазерной и тиристорной частями гибридного лазера-тиристора благоприятно сказывается на сохранении роста выходной мощности при увеличении тока накачки.

Особенности включения интегрированных лазеров-тиристоров, связанные с локализацией областей проте-

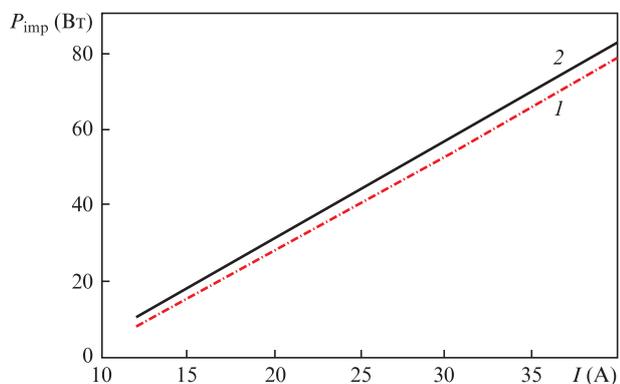


Рис.5. Ватт-амперные характеристики тройного гибридного лазера-тиристора (1) и монолитно-интегрированного тройного лазера (2) (100 нс, 10 кГц).

кания тока при переключении прибора из закрытого состояния в открытое, приводят к снижению эффективности их излучения [11]. В настоящей работе переход от монолитной к гибридной интеграции позволил увеличить выходную мощность на 40%. Вместе с тем авторы [11] отмечают высокую чувствительность эффектов локализации тока в интегрированных лазерах-тиристорах к размерам контактной площадки и конструкции активного элемента, что дает возможность надеяться на увеличение выходных характеристик данных приборов при изменении конструкции как гетероструктуры, так и излучателя в целом.

4. Заключение

В настоящей работе показано, что переход от монолитно-интегрированных лазеров-тиристоров к гибридно-интегрированным таким приборам способствует повышению их выходной мощности. Так, созданные гибридные лазеры-тиристоры с тремя излучающими секциями позволили получить выходную пиковую мощность 170 Вт в импульсном режиме генерации (100 нс, 10 кГц) в спектральном диапазоне 900–920 нм.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.

1. Samman A., Rimai L., McBride J.R., Carter R.O., Weber W.H., Gmachl C., Capasso F., Hutchinson A.L., Sivco D.L., Cho A.Y. *Proc. 52nd Veh. Technol. Conf. Fall* (Boston, 2000, pp 2084–2089). DOI:10.1109/VETECF.2000.883239.
2. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Soboleva O.S., Pikhtin N.A., Tarasov I.S., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A. *J. Appl. Phys.*, **121**, 054502 (2017).
3. Багаев Т.А., Ладугин М.А., Падалица А.А., Мармалюк А.А., Курняк Ю.В., Лобинцов А.В., Данилов А.И., Сапожников С.М., Кричевский В.В., Зверков М.В., Коняев В.П., Симаков В.А., Слипенченко С.О., Подоскин А.А., Пихтин Н.А. *Квантовая электроника*, **49** (11), 1011 (2019) [*Quantum Electron.*, **49** (11), 1011 (2019)].
4. Багаев Т.А., Ладугин М.А., Падалица А.А., Мармалюк А.А., Курняк Ю.В., Лобинцов А.В., Данилов А.И., Сапожников С.М., Кричевский В.В., Коняев В.П., Симаков В.А., Слипенченко С.О., Подоскин А.А., Пихтин Н.А. *Квантовая электроника*, **50** (11), 1001 (2020) [*Quantum Electron.*, **50** (11), 1001 (2020)].
5. Podoskin A.A., Soboleva O.S., Zakharov M.S., Veselov D.A., Zolotarev V.V., Pikhtin N.A., Tarasov I.S., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A., Slipchenko S.O. *Semicond. Sci. Technol.*, **30**, 125011 (2015).
6. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Golovin V.S., Gavrina P.S., Shamakhov V.V., Nikolaev D.N., Zolotarev V.V., Pikhtin N.A., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A. *IEEE Trans. Electron Devices*, **67** (1), 193 (2020).
7. 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)].
8. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Rozhkov A.V., Pikhtin N.A., Tarasov I.S., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Padalitsa A.A., Simakov V.A. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **27** (3), 307 (2015).
9. Podoskin A.A., Soboleva O.S., Zakharov M.S., Veselov D.A., Zolotarev V.V., Pikhtin N.A., Tarasov I.S., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A., Slipchenko S.O. *Semicond. Sci. Technol.*, **30** (12), 125011 (2015).
10. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Soboleva O.S., Pikhtin N.A., Tarasov I.S., Yuferev V.P. *Proc. SPIE*, **9742**, 97420I (2016).
11. Подоскин А.А., Гаврина П.С., Головин В.С., Слипенченко С.О., Романович Д.Н., Капитонов В.А., Мирошников И.В., Пихтин Н.А., Багаев Т.А., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Симаков В.А. *ФТИ*, **55** (5), 466 (2021).