

Исследование импульсных характеристик полупроводниковых лазеров с расширенным волноводом при низких температурах (110–120 К)

© Д.А. Веселов, И.С. Шашкин, Ю.К. Бобрецова, К.В. Бахвалов, А.В. Лютецкий, В.А. Капитонов, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Zina.Sokolova@mail.ioffe.ru

(Получена 18 апреля 2016 г. Принята к печати 22 апреля 2016 г.)

Исследованы импульсные полупроводниковые лазеры, излучающие в спектральных диапазонах 1000–1100 и 1400–1600 нм при температурах 110–120 К, изготовленные методом МОС-гидридной эпитаксии. Установлено, что охлаждение до температур лазеров обоих спектральных диапазонов приводит к приближению ватт-амперных характеристик к линейным и достижению оптических мощностей 110 и 20 Вт соответственно. В лазерах, излучающих в спектральном диапазоне 1400–1600 нм, эффект низких температур ослаблен. Рассмотрены процессы, влияющие на увеличение внутренних оптических потерь в полупроводниковых лазерах. Показано, что рост концентрации носителей заряда в волноводе лазерной структуры сильно зависит от температуры и определяется не мгновенным захватом (скоростью захвата) носителей заряда из волновода в активную область. Показано, что при понижении температуры до 115 К концентрация электронов и дырок в волноводе понижается, что приводит к существенному снижению внутренних оптических потерь и увеличению выходной оптической мощности полупроводникового лазера.

1. Введение

Настоящая работа продолжает исследования причин насыщения ватт-амперной характеристики (ВтАХ) лазеров в импульсном режиме генерации (длительность импульса 100 нс, частота следования 1 кГц) [1–5]. В импульсном режиме генерации практически удается исключить разогрев лазерного диода и, как следствие, температурный рост внутренних оптических потерь [3,6]. Однако в лазерах, излучающих в различных диапазонах длин волн, наблюдается насыщение ВтАХ, обусловленное не температурными причинами [3–6]. В импульсном режиме генерации основными являются следующие причины насыщения ВтАХ: рост внутренних оптических потерь при увеличении плотности тока накачки [3–5,7], увеличение оптических потерь из-за роста концентрации носителей заряда в волноводе [8] и увеличение концентрации носителей заряда в активной области для компенсации дефицита усиления [3]. Доля внутренних оптических потерь из-за увеличения концентрации носителей заряда в активной области практически нивелирована в лазерных двойных гетероструктурах раздельного ограничения (РО ДГС) с расширенным волноводом [6,9]. Поэтому основная доля увеличения внутренних оптических потерь в лазерах РО ДГС с расширенным волноводом в импульсном режиме генерации при увеличении тока накачки приходится на первые два механизма роста внутренних оптических потерь. Необходимо отметить, что в полупроводниковых лазерах, излучающих в диапазоне 1400–1600 нм, вместе с основными причинами насыщения ВтАХ работают дополнительные механизмы, ограничивающие максимальную оптическую мощность: токовая утечка из активной области [10,11], ожереккомбинация в активной области [2,10,12].

Известно, что снижение температуры приводит к улучшению лазерных характеристик: к уменьшению пороговой плотности тока и увеличению максимально достижимой мощности излучения. Поэтому в настоящей работе была предпринята попытка исследовать влияние низких температур на механизмы роста внутренних оптических потерь в полупроводниковых лазерах на основе РО ДГС с расширенным волноводом.

Цель работы состояла в исследовании импульсных ВтАХ полупроводниковых лазеров, излучающих в спектральных диапазонах 1000–1100 и 1400–1600 нм при низкой температуре, \sim (110–120) К.

2. Экспериментальные образцы

Для исследований были изготовлены лазеры на основе РО ДГС с квантово-размерной активной областью и асимметричным волноводом, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений).

Лазеры спектрального диапазона 1000–1100 нм изготавливались на основе РО ДГС в системе твердых растворов AlGaAs/GaAs/InGaAs на подложке GaAs (табл. 1). Структура содержит две напряженные квантовые ямы из InGaAs и волноводный слой из GaAs толщиной 3 мкм для снижения оптических потерь. Волновод слабо легирован для более эффективного транспорта носителей заряда, концентрация легирующей примеси $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в *p*- и *n*-частях волновода. Конструкция волновода и эмиттеров выбиралась из соображений обеспечения генерации на нулевой поперечной моде во всем диапазоне температур и токов накачки.

Таблица 1. Параметры лазерной наногетероструктуры спектрального диапазона 1000–1100 нм

Слой	Толщина слоя, мкм	Материал слоя	Легирование слоя
Подложка	100	GaAs	<i>n</i> -тип
Эмиттер	1.5	Al _{0.1} Ga _{0.9} As	<i>n</i> -тип
Волновод	1.73	GaAs	Слабое, <i>n</i> -тип
Волновод	0.2	GaAs	Не легирован
Квантовая яма	0.009	InGaAs	Не легирован
Спейсер	0.03	GaAs	Не легирован
Квантовая яма	0.009	InGaAs	Не легирован
Волновод	0.2	GaAs	Не легирован
Волновод	1	GaAs	Слабое, <i>p</i> -тип
Эмиттер	1	Al _{0.3} Ga _{0.7} As	<i>p</i> -тип
Контактный	0.3	GaAs	<i>p</i> -тип

Лазеры спектрального диапазона 1400–1600 нм изготавливались на основе РО ДГС в системе твердых растворов AlGaInAs/AlInAs/InP на подложке InP (табл. 2) [11]. РО ДГС содержит две квантовые ямы из AlGaInAs, расширенный до 1.5 мкм AlGaInAs-волновод и барьерные AlInAs-слои на границе волновод–эмиттер, блокирующие утечку носителей заряда из волновода в эмиттер. Свойства лазеров на основе представленной наногетероструктуры подробно исследованы в работе [11]. Введение в конструкцию наногетероструктуры дополнительных потенциальных AlInAs-барьеров позволило практически исключить токовые утечки в эмиттерные слои, но создало условия для дополнительного роста концентрации носителей заряда в волноводе [11].

Лазеры изготавливались по стандартной технологии „глубокая меза“ с шириной апертуры 100 мкм, ограниченной протравленными сквозь гетероструктуру под наклоном мезами, обеспечивающими срыв замкнутой моды. Для исследований изготавливались лазеры с различными длинами резонатора ($L = 2–4$ мм) и зеркалами, образованными естественными сколами кристалла

или диэлектрическими зеркалами с коэффициентами отражения 5 и 95%.

Лазеры исследовались стандартным методом для определения внутренних оптических потерь и внутреннего квантового выхода стимулированного излучения вблизи порога лазерной генерации.

Лазеры спектрального диапазона 1000–1100 нм имели внутренние оптические потери $\sim 0.7 \text{ см}^{-1}$, внутренний квантовый выход стимулированного излучения, близкий к 100%, оптическую мощность 10–11 Вт в непрерывном режиме генерации при токе 13 А при температуре 25°C.

Лазеры спектрального диапазона 1400–1600 нм имели внутренние оптические потери $\sim 2.4 \text{ см}^{-1}$, внутренний квантовый выход стимулированного излучения до 90%, максимальную оптическую мощность 3.2 Вт в непрерывном режиме генерации при токе 13 А и температуре 25°C [11].

3. Методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились в два этапа: на первом этапе импульсные ватт-амперные характеристики и спектры генерации лазеров регистрировались при комнатной температуре. На втором этапе производился аналогичный комплекс измерений лазерных характеристик при низких температурах ($T = 110–120 \text{ К}$).

Измерения при комнатной температуре проводились по методике, изложенной в [3]. Для измерений спектров лазерной генерации в импульсном режиме использовался спектроанализатор Advantest Q 8384.

Для охлаждения лазера до низких температур применялась установка, представленная на рис. 1. Исследуемый образец устанавливался на медный теплоотвод, охлаждаемый жидким азотом. Температура теплоотвода регистрировалась термопарой. Образец с теплоотводом находился в камере из оргстекла, которая продувалась

Таблица 2. Параметры лазерной наногетероструктуры спектрального диапазона 1400–1600 нм

Слой	Толщина слоя, мкм	Материал слоя, легирование слоя	Длина волны края поглощения материала, мкм
Подложка	350	InP, <i>n</i> -тип	–
Эмиттер	0.3	InP, <i>n</i> -тип	–
Барьер	0.05	AlInAs, <i>n</i> -тип	0.828
Барьер	0.05	AlInAs, не легирован	0.828
Градиентный слой	0.05	AlInAs–AlGaInAs, не легирован	0.828–1.14
Волновод	0.73	AlGaInAs, не легирован	1.14
Квантовая яма	0.008	AlGaInAs, не легирован	1.53
Волновод	0.0125	AlGaInAs, не легирован	1.14
Квантовая яма	0.008	AlGaInAs, не легирован	1.53
Волновод	0.73	AlGaInAs, не легирован	1.14
Градиентный слой	0.05	AlGaInAs–AlInAs, не легирован	1.14–0.828
Барьер	0.05	AlInAs, <i>p</i> -тип	0.828
Эмиттер	1.25	InP, <i>p</i> -тип	–
Контактный	0.3	InGaAs	1.68

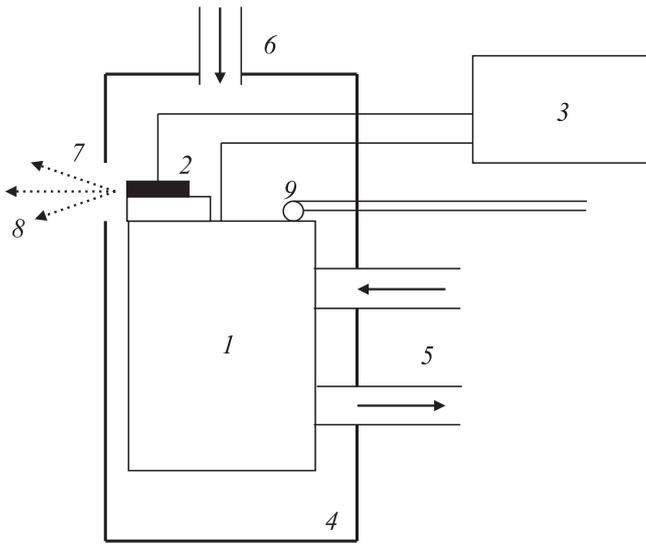


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — медный теплоотвод, 2 — исследуемый лазер на теплоотводе, 3 — импульсный блок токовой накачки, 4 — камера из оргстекла, 5 — подача жидкого азота, 6 — подача газообразного азота, 7 — отверстие в камере, 8 — лазерное излучение, 9 — термопара.

потоком газообразного азота для исключения обмерзания образца и теплоотвода. Во фронтальной стенке камеры располагалось отверстие с диаметром, достаточным для пропускания расходящегося лазерного излучения. Данная схема охлаждения позволяла достигать температуры полупроводникового лазера 110–120 К.

Измерения при низких температурах потребовали удаления блока токовой накачки от экспериментальных образцов полупроводниковых лазеров. Это привело к резкому увеличению обратного выброса основного импульса токовой накачки. Для электрической защиты от обратного выброса на теплоотвод вместе с лазерным кристаллом монтировался второй лазерный кристалл, включенный в обратном направлении. Такая схема позволяла шунтировать выброс обратного напряжения, защищая исследуемый полупроводниковый лазер.

В ходе эксперимента применялась импульсная токовая накачка: длительность импульсов (100 ± 20) нс, частота 1 кГц. Максимальная амплитуда тока накачки достигала 130 А при температуре 110 К; ограничение было обусловлено большой длиной подводящих проводников импульсного тока. Для лазеров спектрального диапазона 1400–1600 нм максимальная амплитуда тока накачки достигала 80 А.

Измерения ватт-амперных характеристик в импульсном режиме генерации проводились с помощью интегрирующей сферы IS 200-4 фирмы Thorlabs с быстродействующим InGaAs-фотоприемником фирмы Hamamatsu. При комнатной температуре регистрировалась зависимость амплитуды фотоответа от тока накачки. Затем лазер охлаждался до температуры 115 К и снова про-

водились измерения зависимости амплитуды фотоответа от тока накачки.

В лазерах спектрального диапазона 1000–1100 нм излучение собиралось просветленной асферической линзой для измерения средней мощности болометром (Ophir 3A-P-FS-12), расположенным на расстоянии от охлаждаемых элементов. Линза обдувалась вентилятором для предотвращения запотевания. Пиковая мощность рассчитывалась по известным значениям частоты и длительности импульса.

4. Обсуждение экспериментальных результатов

На рис. 2 представлены типичные ВтАХ лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 1000–1100 нм, измеренные при комнатной температуре и вблизи температуры жидкого азота. Длина резонатора исследуемых лазеров составляла 3375 мкм, а зеркала резонатора имели диэлектрические покрытия с коэффициентами отражения ~ 5 и 95%. Понижение температуры до 110–120 К значительно приближает ВтАХ к линейным и позволяет увеличить максимальную оптическую мощность до 110 Вт (рис. 2, кривая 1).

На рис. 3 приведены спектры излучения исследуемых лазеров в зависимости от уровня токовой накачки при температурах 300 и 115 К. При понижении температуры наблюдался сдвиг спектров излучения в коротковолновую область на величину 65–70 нм, что обусловлено увеличением ширины запрещенной зоны активной области с уменьшением температуры. Необходимо отметить, что в зарегистрированных спектрах излучения при комнатной температуре спектр лазерной генерации с ростом тока накачки заметно расширяется (особенно в коротковолновую область) (рис. 3). Это связано с ростом концентрации носителей заряда в активной области, обеспечивающей дополнительное

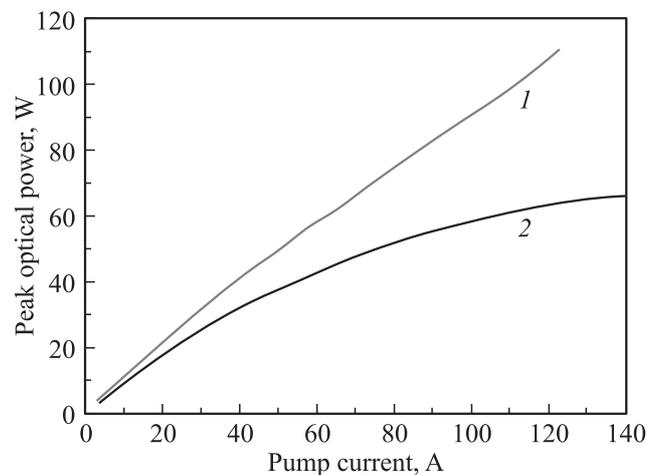


Рис. 2. Ватт-амперные характеристики лазера спектрального диапазона 1000–1100 нм, работающего в импульсном режиме при температурах 115 (1), 300 К (2).

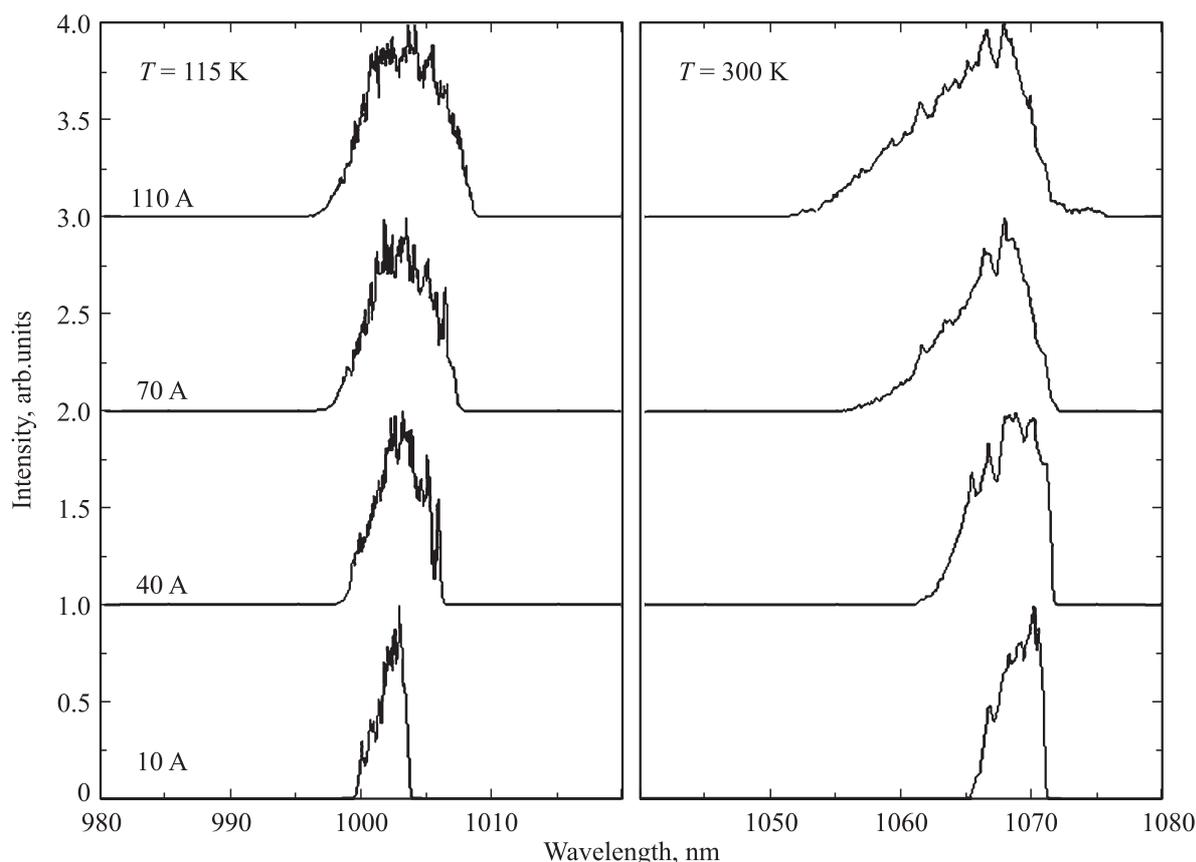


Рис. 3. Спектры генерации лазера диапазона длин волн 1000–1100 нм, работающего в импульсном режиме при температурах, токах 10, 40, 70, 110 А.

усиление, необходимое для компенсации возрастающих внутренних оптических потерь. При температуре 115 К расширение спектра лазерной генерации выражено в меньшей степени, что говорит о более слабом росте внутренних оптических потерь с ростом тока накачки.

На рис. 4 представлены типичные ВтАХ лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 1400–1600 нм при комнатной и азотной температурах. Длина резонатора исследуемых лазеров составляла $L = 2560 \text{ мкм}$; коэффициенты отражения диэлектрических зеркал были ~ 5 и $\sim 95\%$. При понижении температуры до 115 К значительно возросла пиковая оптическая мощность, а насыщение ВтАХ было ослаблено (рис. 4, кривая 1). В спектрах излучения полупроводниковых лазеров диапазона длин волн 1400–1600 нм наблюдался значительный сдвиг в коротковолновую область ($\sim 100 \text{ нм}$) (рис. 5). При комнатной температуре происходит существенное расширение спектра генерации с ростом тока накачки; при температуре 115 К расширение спектра значительно меньше (рис. 5).

Как уже отмечалось во Введении, в полупроводниковых лазерах рост внутренних оптических потерь и насыщение ВтАХ в основном связаны с двумя процессами: увеличением плотности тока через лазер и ростом концентрации носителей заряда в волноводе. Концентрация

носителей заряда в волноводе сильно зависит от температуры. Зависимость концентрации носителей заряда (электронов и дырок) в волноводе от тока накачки через лазер рассчитывалась по методике [13], в которой учитывалась конечная скорость захвата носителей заряда из

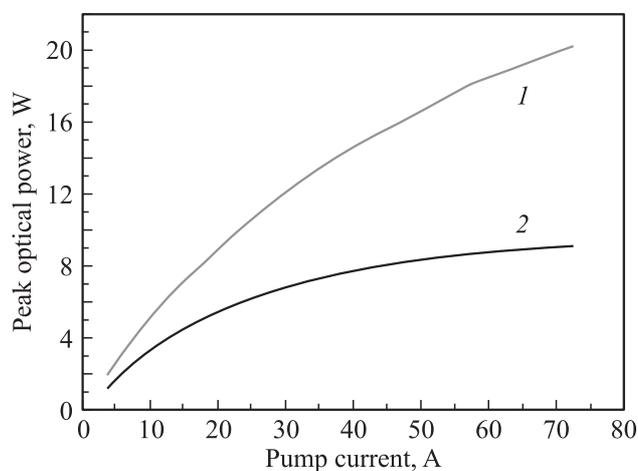


Рис. 4. Вт-амперные характеристики лазера спектрального диапазона 1400–1600 нм, работающего в импульсном режиме при температурах 115 (1), 300 К (2).

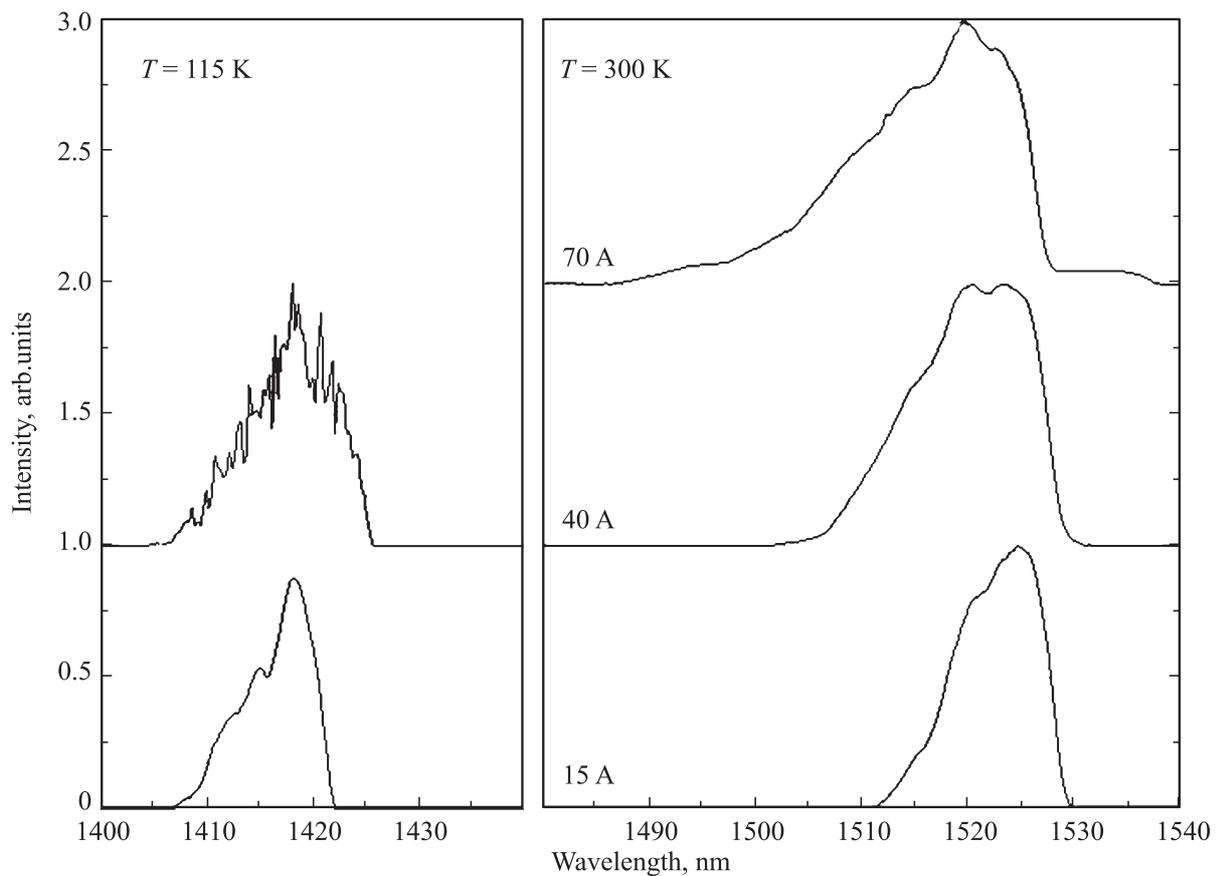


Рис. 5. Спектры генерации лазера диапазона длин волн 1400–1600 нм, работающего в импульсном режиме при температуре 115 и 300 К, токах 15, 40, 70 А.

волновода в активную область. Расчет проводился для лазерной структуры, параметры которой приведены в табл. 1 до токов накачки 150 А и для температур 115 и 300 К (рис. 6). При этом в расчетах скорость захвата электронов и дырок в квантовую яму составляла величину $\sim 3 \cdot 10^5$ см/с при $T = 300$ К и $\sim 1 \cdot 10^6$ см/с при $T = 115$ К.

Из расчетов следует, что снижение температуры до 115 К приводит к существенному падению концентрации носителей заряда (электронов и дырок) в волноводе по сравнению с комнатной температурой, что является причиной резкого уменьшения внутренних оптических потерь в полупроводниковых лазерах.

Процессы, происходящие при снижении температуры, приводят к улучшению характеристик в исследуемых лазерах, излучающих в диапазонах длин волн 1000–1100 и 1400–1600 нм, а именно к увеличению оптической мощности и ослаблению насыщения ВтАХ. Однако в лазерах, излучающих в спектральном диапазоне 1400–1600 нм, помимо процессов, увеличивающих внутренние оптические потери, существуют другие причины, ограничивающие оптическую мощность: процессы оже-рекомбинации, токовые утечки и конструктивные потенциальные AlInAs-барьеры, с одной стороны, снижающие токовые утечки, а с другой стороны, увеличива-

ющие концентрацию носителей заряда в волноводе [11]. Поэтому приближение ватт-амперной характеристики к линейной при снижении температуры в лазерах, излучающих в диапазоне длин волн 1400–1600 нм, менее выражено, чем в лазерах, излучающих в диапазоне длин волн 1000–1100 нм.

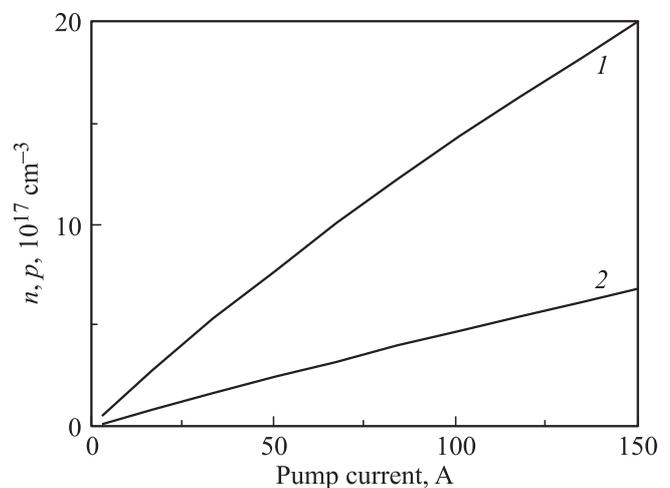


Рис. 6. Концентрация электронов n в волноводе лазерной структуры (табл. 1) при температурах: 300 (1) и 115 К (2).

5. Заключение

В работе исследовались мощные полупроводниковые лазеры спектральных диапазонов 1000–1100 и 1400–1600 нм в импульсном режиме при охлаждении жидким азотом до температуры 115 К. Были разработаны методики измерений ВТАХ полупроводниковых лазеров при низких температурах (110–120 К).

Установлено, что при понижении температуры в лазерах обоих спектральных диапазонов наблюдается тенденция к линейному закону ВТАХ и поэтому достигаются более высокие пиковые оптические мощности: 110 и 20 Вт соответственно. В лазерах, излучающих в спектральном диапазоне 1400–1600 нм, существуют дополнительные механизмы, которые ослабляют влияние низких температур. К ним относятся процесс накопления носителей заряда в волноводе из-за дополнительных потенциальных барьеров и процесс оже-рекомбинации, присущий твердым растворам, изопериодическим с подложкой InP.

Улучшение ВТАХ при понижении температуры в полупроводниковых лазерах на основе РО ДГС с расширенным волноводом связано, в частности, с уменьшением концентрации носителей заряда в волноводе, что приводит к резкому снижению внутренних оптических потерь.

Проведенные исследования показали возможность управления процессами, влияющими на уменьшение внутренних оптических потерь в полупроводниковых лазерах на основе РО ДГС с расширенным волноводом.

Авторы благодарят Б.С. Рывкина за интерес к работе и за плодотворное ее обсуждение.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы“, прикладные научные исследования по теме „Разработка МОС-гидридной технологии наногетероструктур и мощных непрерывных и импульсных полупроводниковых лазеров на их основе, излучающих в диапазоне длин волн 1400–1600 нм“, шифр 2014-14-579-0066-003; соглашение № 14.607.21.0048, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI60714X0048.

Список литературы

- [1] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, М.А. Хомылев, В.В. Шамахов, К.С. Борщев, И.Н. Арсентьев, И.С. Тарасов. ФТП, **41** (8), 1003 (2007).
- [2] А.В. Лютецкий, К.С. Борщев, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов. ФТП, **42** (1), 106 (2008).
- [3] Д.А. Веселов, В.А. Капитонов, Н.А. Пихтин, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, В.В. Шамахов, И.С. Шашкин, И.С. Тарасов. Квант. электрон., **44** (11), 993 (2014).
- [4] Д.А. Веселов, Н.А. Пихтин, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, В.В. Шамахов, И.С. Шашкин, В.А. Капитонов, И.С. Тарасов. Квант. электрон., **45** (7), 597 (2015).
- [5] Д.А. Веселов, Н.А. Пихтин, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, В.В. Шамахов, И.С. Шашкин, Н.В. Воронкова, И.С. Тарасов. Квант. электрон., **45** (7), 604 (2015).
- [6] X. Wang, P. Crump, H. Wenzel, A. Liero, T. Hoffmann, A. Pietrzak, C.M. Schultz, A. Klehr, A. Ginolas, S. Einfeldt, F. Bugge, G. Erbert, G. Tränkle. IEEE J. Quant. Electron., **46** (5), 658 (2010).
- [7] B.S. Ryvkin, E.A. Avrutin. Electron. Lett., **42** (22), 1283 (2006).
- [8] Д.З. Гарбузов, А.В. Овчинников, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов, В.Б. Халфин. ФТП, **25** (5), 928 (1991).
- [9] С.О. Слипченко, Д.А. Винокуров, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов, Ж.И. Алфёров. ФТП, **38** (12), 1477 (2004).
- [10] J. Piprek, K. White, A. SpringThorpe. IEEE J. Quant. Electron., **38** (9), 1253 (2002).
- [11] Д.А. Веселов, И.С. Шашкин, К.В. Бахвалов, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, М.Г. Растегаева, С.О. Слипченко, Е.А. Бечвай, В.А. Стрелец, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов. ФТП, в печати.
- [12] Б.Л. Гельмонт, З.Н. Соколова, И.Н. Ясиевич. ФТП, **16** (4), 592 (1982).
- [13] L.V. Asryan, Z.N. Sokolova. J. Appl. Phys., **115**, 023107 (2014).

Редактор Л.В. Шаронова

The investigation of pulse characteristics of semiconductor lasers with broadened waveguide at low temperatures (110–120 K)

D.A. Veselov, I.S. Shashkin, Y.K. Bobretsova, K.V. Bakhvalov, A.V. Lutetskiy, V.A. Kapitonov, N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, I.S. Tarasov

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Pulse-pumped semiconductor lasers based on MOCVD-grown separate confinement heterostructures emitting in the spectral ranges 1000–1100 and 1400–1600 nm are investigated at temperatures 110–120 K. It is determined that cooling to nitrogen temperature improves the light-current curve linearity of lasers of both spectral ranges and allows to reach optical power of 110 and 20 W, correspondingly. The effect of low temperatures for lasers emitting in the spectral range 1400–1600 nm is reduced. The processes increasing internal optical losses have been considered. It is shown that charge carrier concentration rise in the waveguide strongly depends on temperature and is determined by the non-instant capture (capture rate) of the charge carriers into active region. It is demonstrated that after cooling to 115 K the charge carrier concentration in the waveguide decreases resulting in significant reduce of internal optical loss and increase of the semiconductor laser output optical power.