

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
Лаборатория «*Физики полупроводниковых гетероструктур*»

Бекман Артем Александрович

Полупроводниковые лазеры на основе систем волноводов

специальность:

1.3.11 — физика полупроводников

Научный доклад

Санкт-Петербург

2022

Научный руководитель:

кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник

Паюсов Алексей Сергеевич

Рецензент:

к. ф.-м. н., старший научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Дюделев Владислав Викторович

Рецензент:

д. ф.-м. н., профессор СПб ПУ

Фирсов Дмитрий Анатольевич

Оглавление

Общая характеристика работы	4
Введение	10
Часть первая	12
1.1 Исследование свойств лазера с составными латеральными волноводами.	12
1.2. Исследование влияния травления с помощью СИП. Разделение волноводов.....	14
1.3 Травления области, прилегающей к гребневому волноводу с помощью СИП	18
1.4 Травление области между связанными гребневыми волноводами. Влияние на модовый состав.....	20
1.5 Прямое травление СИП пассивного волновода лазеров со связанными волноводами.	21
Часть вторая.....	24
2.1 Исследование мощностных характеристик лазеров со связанными волноводами	25
2.2 Тепловые свойства лазеров со связанными волноводами.....	27
Заключение	31
Список литературы	32
Список литературы по теме проекта.....	33

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

В настоящее время лазерные диоды (ЛД) широко применяются в разных устройствах. Это стало возможным благодаря их компактности и высокому КПД. Важным параметром ЛД является качество выходного пучка, от которого зависит эффективность ввода излучения в волокно. Наиболее оптимальным с этой точки зрения является пучок в котором интенсивность распределена в соответствии с распределением Гаусса.

Параметры излучения ЛД в основном определяются конструкцией его волновода. Волновод ограничивает распространение излучения в структуре полупроводникового лазера благодаря разнице в показателях преломления с контактными слоями (обкладками). Свет, распространяясь в волноводе, меньше поглощается в высоколегированных слоях гетероструктуры, вследствие чего снижается пороговая плотность тока. Если в вертикальном направлении волновод создаётся благодаря эпитаксиальному росту слоёв гетероструктуры с нужными свойствами, то в латеральном направлении используется подход, основанный на формировании волновода гребневого типа, получаемого в процессе пост-ростовой обработки эпитаксиальной гетероструктуры. В лазерах с гребневым волноводом область протекания электрического тока ограничена его шириной. Чаще всего для создания пространственно-одномодового лазера с длиной волны излучения в районе 1 мкм используют ширину волновода в латеральном направлении примерно 3-5 мкм, а в вертикальном направлении порядка длины волны излучения. Вследствие такой разницы в размерах излучение из такого лазера имеет различную расходимость в вертикальном и латеральном направлениях.

Максимальная выходная оптическая мощность зависит от ширины волновода и размера области излучения. Ширина волновода мощных ЛД составляет ~100 мкм, а толщина до 10 мкм. Расширяя волновод можно

частично преодолеть такие физические ограничения максимальной мощности, как катастрофическая деградация зеркал. Однако, следствием увеличения ширины волновода является появление мод высокого порядка и переход лазера в многомодовой режим генерации ЛД. Таким образом, увеличение выходной мощности при сохранении пространственно одномодовой генерации требует разработки методов подавления паразитных мод высоких порядков.

Недавно мы предложили конструкцию которая позволяет селективно подавлять моды высоких порядков за счёт использования дополнительных волноводов, связанных с основным широким волноводом [1]. Применение связанных волноводов принципиально возможно, как в вертикальном, так и в латеральном направлениях. К настоящему моменту продемонстрирована работа ЛД с расширенным волноводом на фундаментальной моде в вертикальном направлении. Также показана возможность создания лазеров с горизонтально связанными волноводами, однако генерации на фундаментальной моде получить не удалось.

Настоящая работа состоит из двух частей. Первая часть посвящена экспериментальным исследованиям свойств лазеров с составными латеральными волноводами, а именно поиску возможности получения лазерной генерации из расширенного до 10 мкм гребневого волновода с использованием дополнительных гребней для селективного подавления генерации паразитных мод. Для этого предлагается использовать обработку готовых лазеров методом сфокусированного ионного пучка (СИП). Системы СИП в настоящее время получают большое распространение, но их возможности для модификации свойств полупроводниковых лазеров пока мало изучены.

Вторая часть работы посвящена исследованиям влияния положения активной области в волноводе на тепловые свойства и мощностные характеристики лазеров со связанными вертикальными волноводами.

Селективное подавление паразитных мод позволяет варьировать положение активной области в волноводе в большей степени, чем в других часто используемых конструкциях мощных ЛД [2]. Известно, что смещение активной области в сторону р-контакта помогает снизить внутренние потери, связанные с накоплением зарядов в волноводе при высоких плотностях тока накачки, а также снизить теплосоппротивление лазерной гетероструктуры [3]. До начала работы экспериментальные исследования, посвящённые изучению положения активной области в волноводе для лазеров со связанными волноводами отсутствовали.

Таким образом, полученные в ходе работы результаты, имеют важное значение для дальнейшего совершенствования конструкций ЛД.

Цели.

Целью первой части работы было экспериментальное исследование возможности создания расширенного составного горизонтального волновода, работающего на фундаментальной моде.

Целью второй части работы было экспериментальное исследование характеристик лазеров усовершенствованной конструкции на основе связанных вертикальных волноводов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые экспериментально показано, что применение расширенного волновода позволяет значительно снизить внутренние потери и тепловое сопротивление лазерной гетероструктуры по сравнению с традиционными конструкциями.
2. Экспериментально показана возможность прямого травления методом СИП гребневых волноводов без существенной деградации характеристик ЛД.

3. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность настройки мод составного волновода используя травление методом СИП области между волноводами.
4. Показано, что использование составного расширенного вертикального волновода позволяет существенно снизить разогрев активной области при высоких плотностях тока импульсной накачки.
5. Предложен оригинальный метод измерения теплового сопротивления, позволяющий измерять разницу в теплосоппротивлении, обусловленную смещением активной области к поверхности
6. Показано что лазеры с составным вертикальным воноводом перспективны для получения высоких оптических мощностей

Практическая значимость работы:

- Лазеры с составными гребневыми волноводами позволяют получать пространственно одномодовое излучение без применения сложных в изготовлении и высоких по стоимости фильтрующих элементов таких как распределенные брэгговские отражатели и пр.
- Лазеры со связанными вертикальными волноводами позволяют получать высокую оптическую мощность (>13 Вт) при непрерывной накачке и являются перспективными для создания систем обработки материалов, накачки твердотельных лазеров

Используемые методы исследования. Расчёт оптических мод связанных волноводов производился в пакете FIMWAVE. Исследуемые структуры были выращены методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОСVD). Постростовая обработка проводилась с использованием стандартных методик травления (фотолитография, сухое травление) и формирования контактов (напыление диэлектрика и металлических

контактов). Монтаж ЛД осуществлялся на медные теплоотводы с использованием индиевого припоя.

Измерения в импульсном режиме проводились при длительностях импульсов тока 300-400 нс на частоте 10кГц. В качестве приемника оптического излучения использовался InGaAs фотодиод Thorlabs с широкополосным предусилителем (150 МГц). Для увеличения амплитуды сигнала в измерительный тракт также включался усилитель +40 дБ с полосой ~50 МГц. Регистрация сигнала производилась с помощью стробирующего интегратора (Stanford research SR250) который позволяет проводить усреднение по 10^5 импульсам, а также имеет режим автокоррекции постоянной составляющей сигнала (подставки). Исследование характеристик с временным разрешением достигается путём смещения строба. При записи ватт-амперных характеристик регистрация сигналов осуществлялась широкополосным цифровым стробоскопическим осциллографом. При измерениях в непрерывном режиме регистрация сигнала осуществлялась синхронным детектором. Для записи спектров излучение вводилось в монохроматор ЛОМО МДР-41.

Для изучения картин дальних полей была использована установка с поворотными подвижками. Излучение регистрировалось германиевым фотодиодом, расположенным на расстоянии 50 см от точки вращения.

Для изучения картин ближнего поля была разработана установка, использующая пространственную фильтрацию в плоскости изображения. За фильтрующим элементом (20-30 мкм диафрагмой) располагалось оптическое волокно. Фильтрующий элемент укреплялся на прецизионной механической подвижке с приводом от мотора постоянного тока, обеспечивающей пространственное разрешение 10 мкм. Излучение, введённое в волокно, далее направлялось на детектор, для исследований со спектральным разрешением излучения вводилось в монохроматор.

Травление СИП проводилось в условиях сверхвысокого вакуума с помощью сфокусированного пучка ионов Ga⁺ с энергией 35 кэВ и током пучка 500 пА. Сверхвысокий вакуум необходим для предотвращения нежелательного окисления в процессе травления.

Апробация работы. Результаты работы опубликованы в рецензируемых российских и международных журналах и обсуждались на следующих российских и международных конференциях: 5th International School and Conference “Saint-Petersburg OPEN 2018”, 6th International School and Conference “Saint-Petersburg OPEN 2019”, Nanostructures: Physics and Technology, 28th International Symposium, (2020, Minsk, Belarus). Также приняты тезисы на “20th International Conference Laser Optic” (ICLO 2022) 20-24 июня 2022.

Введение

Принцип, применяемый в данной работе для подавления паразитных мод в полупроводниковых лазерах основан на взаимодействии связанных волноводов. Связанными называют волноводы, между которыми возможно перераспределение фотонов благодаря оптическому туннелированию (рис. 1). Последнее возникает, когда расстояние между волноводами становится порядка длины волны излучения, а эффективные показатели преломления взаимодействующих мод совпадают.

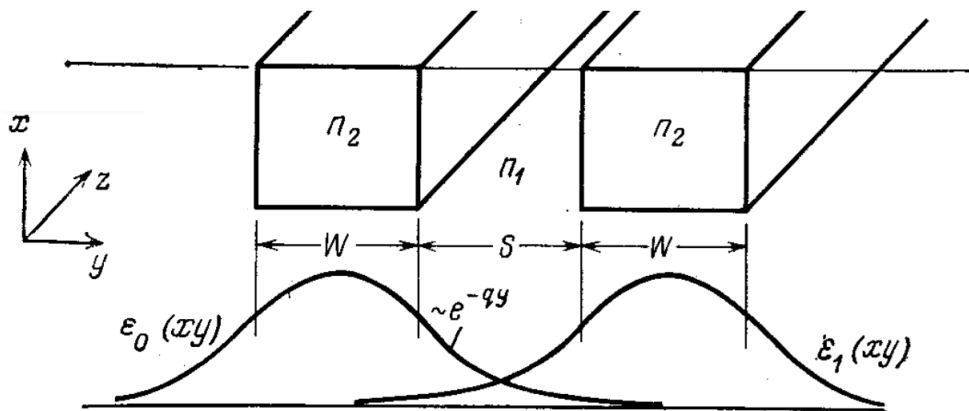


Рис. 1 Графическое изображение связанных волноводов

Применяема в работе конструкция составного волновода называется coupled large optical cavity (CLOC) [1]. Принцип её работы показан на рисунке 2. Параметры волноводов подбираются таким образом, чтобы фундаментальная мода дополнительного волновода имела тот же эффективный показатель преломления, что и паразитная мода основного расширенного волновода с активной областью. Благодаря оптическому туннелированию моды гибридизуются, и для них не выполняется пороговое условие из-за низкого фактора оптического ограничения. Также дополнительные волноводы можно легировать, внося дополнительные потери для гибридных мод. Таким образом лазер с CLOC работает на фундаментальной моде. Важной особенностью рассматриваемой

конструкции является то, что для фундаментальной моды не вносятся дополнительных потерь.

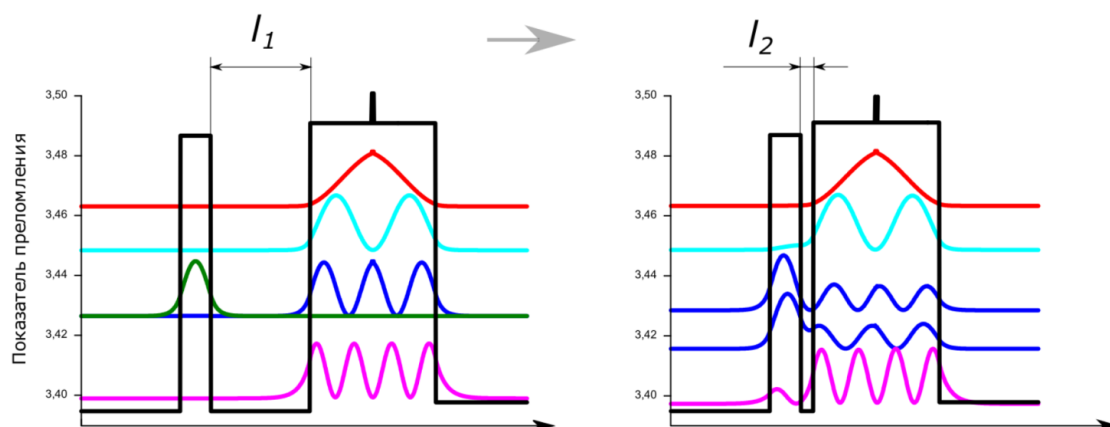


Рис. 2. Схематическое представление работы CLOC волновода.

Часть первая

1.1 Исследование свойств лазера с составными латеральными волноводами.

В работе [4] нами было предложено использовать принцип селективного подавления паразитных мод для полоскового лазера на квантовых точках (КТ) InAs/GaAs с длиной волны 1,26 мкм с расширенным составным латеральным волноводом .

Предложенный метод рассматривался и другими научными группами [5].

Лазерная гетероструктура с активной областью, содержащей 10 слоёв КТ была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Каждый слой КТ зарращивался InGaAs с содержанием индия ~15%. Толщина GaAs прослойки между слоями КТ составляла 35 нм. Активная область помещена между обкладками из p - и n - легированного $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ толщиной 1.5 мкм. Из выращенной гетероструктуры были изготовлены лазеры полосковой геометрии, в которых для подавления мод параллельно широкому 10 мкм гребню формировался дополнительный одномодовый шириной 3 мкм. Рассчитанные профили интенсивности мод для этой системы приведены на рисунке 3. Дополнительный гребень был покрыт диэлектриком, чтобы избежать усиления в нем. Поэтому активная область в не прокачиваемом гребне также выступает в роли поглотителя, внося дополнительные потери для гибридной моды.

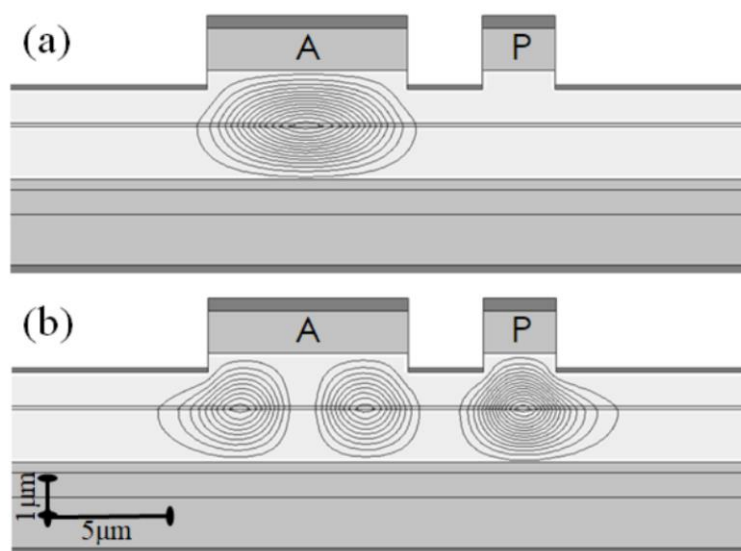


Рисунок 3. Рассчитанные профили мод для системы из двух полосковых волноводов А - активный многомодовый волновод, Р - пассивный одномодовый волновод.

Все измерения проводились в импульсном режиме, для снижения разогрева активной области. Температура теплоотвода лазеров поддерживалась 20°C. Сперва мы исследовали основные характеристики лазеров, а для оценки модового состава измерялись распределения интенсивности излучения в ближнем и дальнем поле.

При создании установки для измерений ближнего поля возникли трудности с настройкой фокусировки, так как используемая для визуализации изображения кремниевая матрица камеры была ограничена диапазоном ~ 1.1 мкм, а исследованный лазер имел длину волны излучения ~ 1.3 мкм. Следовательно, чтобы точно настроиться диафрагмой на увеличенное изображение потребовалось применить метод настройки с помощью эталона. Для этого использовалось высоко контрастное освещение эталона по методу Келлеру. В качестве эталона использовалась мирра, которая подсвечивалась рассеянным светом галогенной лампы. Диапазон длин волн равный излучению лазера “вырезался” из спектра лампы несколькими оптическими фильтрами. После серии измерений на разных

расстояниях между микромirrorой и диафрагмой и обработки данных было определено увеличение и рассчитано положение волокна.

Исследование диаграмм направленности и распределения интенсивности света на зеркале (ближнего поля) показали, что часть излучения покидает резонатор из области пассивного волновода (Рис. 10). Мы предположили, что это связано с растеканием тока, которое приводит к возникновению усиления в дополнительном волноводе (рис. 4). В результате с увеличением тока накачки “зажигаются” комбинированные моды.

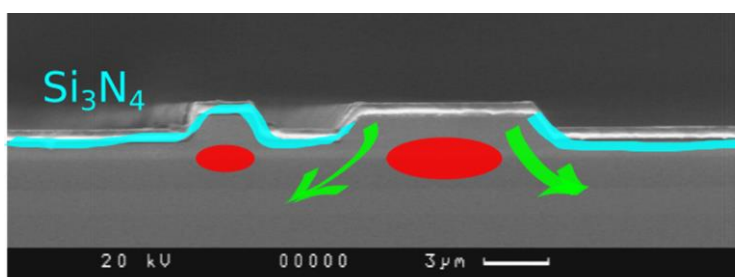


Рисунок 4. Изображение сканирующего электронного микроскопа лазерной структуры со схематичным направлением растекания тока.

1.2. Исследование влияния травления с помощью СИП. Разделение волноводов.

Для подавления растекания тока нами был предложен способ ограничения растекания носителей за счёт травления области вдоль полоска с помощью СИП. Внесённые СИП дефекты уменьшают подвижность носителей, увеличивая сопротивление травленной области.

Для того чтобы подобрать параметры травления, при котором в активную область вносилось как можно меньше радиационных дефектов был произведён ряд дополнительных экспериментов. Проводилось травление методом СИП лазерных чипов с одиночным волноводом (после пост-ростовой обработки), которые были уже смонтированы на теплоотвод. Эти эксперименты включали:

- 1 исследование влияния травления СИП на основные характеристики лазеров, пороговую плотность тока и дифференциальную эффективность;
- 2 травление гребня с помощью СИП, исследование зависимости глубины травления ЛД и влияния на его модовый состав излучения;
- 3 исследование влияния травления прилежащих к гребневому волноводу областей на модовый состав излучения лазеров с одиночным и составным волноводами.

Было изучено влияние травления методом СИП гребневых волноводов на характеристики торцевых полупроводниковых лазеров [6]. Пример такого травления показан на рисунке 5. На рисунке 5а приведена визуализация измерений поверхности, полученных с помощью сканирующего атомно силового микроскопа (АСМ). На рисунке 5б показан профиль травления с изображением глубин залегания волновода. Было произведено травление гребня на разные глубины вплоть до разделения волновода на два продольно связанных.

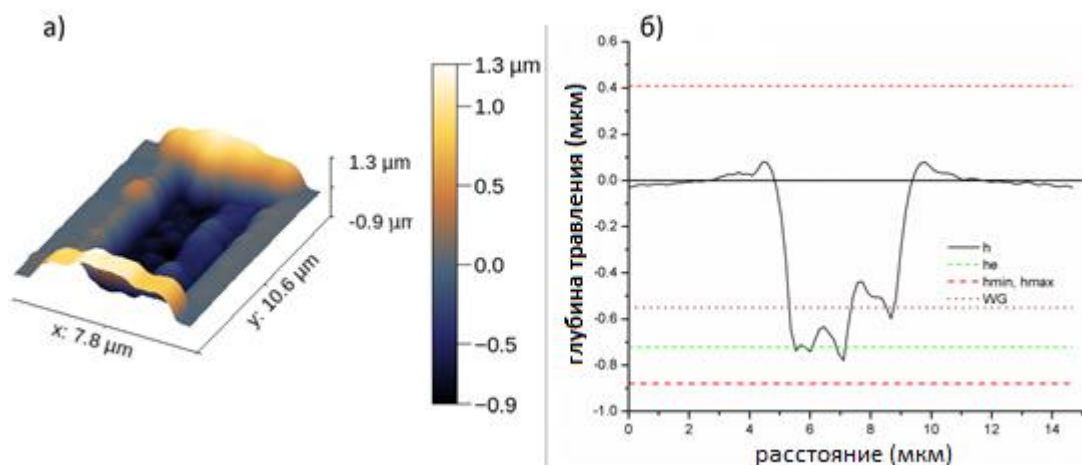


Рисунок 5. а) - АСМ изображение протравленного полоска слева, б) - профиль травления.

Спектры излучения после травления, приводящего к разделению волновода, приведены на рисунке 6. Анализ спектров показал, что после протравливания они становятся уже и скорость их сдвига с температурой меняется скачкообразно в диапазоне температур 20-25°C. Такой эффект хорошо изучен и обусловлен переключением с одной гибридной моды резонатора на другую [7][8].

Исследования свойств лазеров от глубины травления показали (таблица 1), что можно выделить три области. При остановке травления более чем за 400 нм до активной области плотность порогового тока и дифференциальная квантовая эффективность (ДКЭ) практически не изменяются. При такой глубине, травление модифицирует волноводные свойства лазера за счёт удаления материала и изменения условий прокачки. Увеличение глубины травления до расстояний около 200 нм до активной области практически не меняет пороговый ток, но уменьшает ДКЭ. При глубине травления, при которой резонатор лазера начинает разделяться на два оптически-связанных резонатора, наблюдается увеличение плотности порогового тока, обусловленного тем, что в активной области начинают формироваться радиационные дефекты.

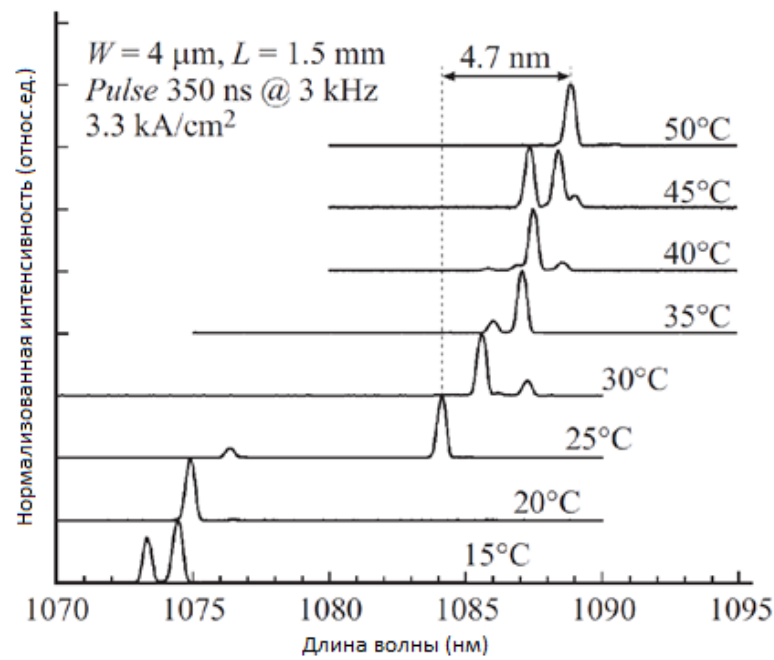


Рисунок 6. Спектры разделенного волновода, измеренные при разных температурах.

Образец	$L_{\text{fib}}, \mu\text{m}$	Ионная доза, $\cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$	$h_e, \mu\text{m}$	$h_{\text{min}}, \mu\text{m}$	$I_{\text{th_fib}}/I_{\text{th}}$	η_D/η_{D_fib}
1	10	1.68	+1.4	+0.84	1	1
2	50	1.76	+0.66	+0.21	1	1.55
3	50	1.76	+0.71	+0.08	1	2.07
4	10	7.02	-0.17	-0.33	1.42	3.57
5	10	7.02	+0.08	-0.43	1.53	2.55
6	10	9.78	-0.25	-0.73	1.61	3.33

Таблица 1. Параметры травления и изменения основных характеристик приборов.

1.3 Травления области, прилегающей к гребневому волноводу с помощью СИП

Следующим шагом было исследовано влияние травления методом СИП, области прилегающей к волноводу. Для этого использовались референсные маломодовые лазеры с одиночным волноводом шириной 10 мкм. На рисунке 7 слева схематично показана область травления, а справа фотография, сделанная в микроскоп после травления.

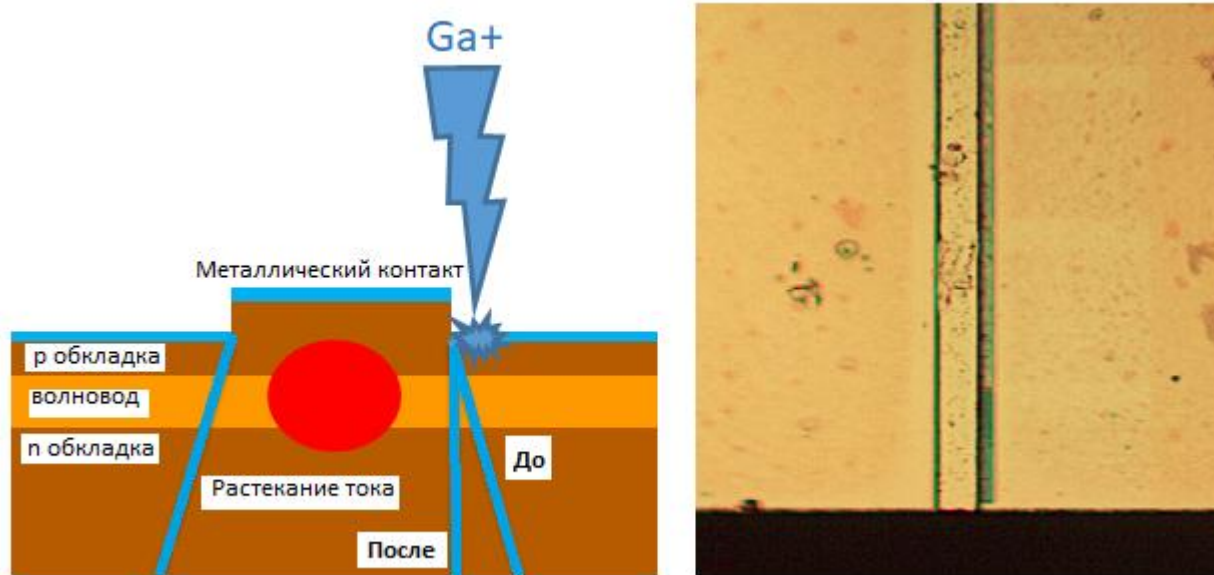


Рисунок 7. Слева схема травления СИП области прилегающей к полоску, справа фото протравленного полоска.

Глубина травления от поверхности металл была выбрана порядка 0.4 мкм, только для ограничения растекания тока. Такая глубина травления позволила не затрагивать эмиттерные слои ЛД. Травление останавливалось в слое диэлектрика Si_3N_4 , доза ионов составила $1.25 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Глубина травления измерялась с помощью АСМ.

На рисунке 8 показана ватт-амперная характеристика ЛД с одиночным гребнем. Измерения проводились до и после травления. Из выполненных экспериментов следует, что проведённая обработка СИП слабо повлияла на характеристики лазерных диодов. Эти эффекты связаны с изменением модового состава и как следствие изменением распределения электромагнитного поля в структуре (Рис. 9).

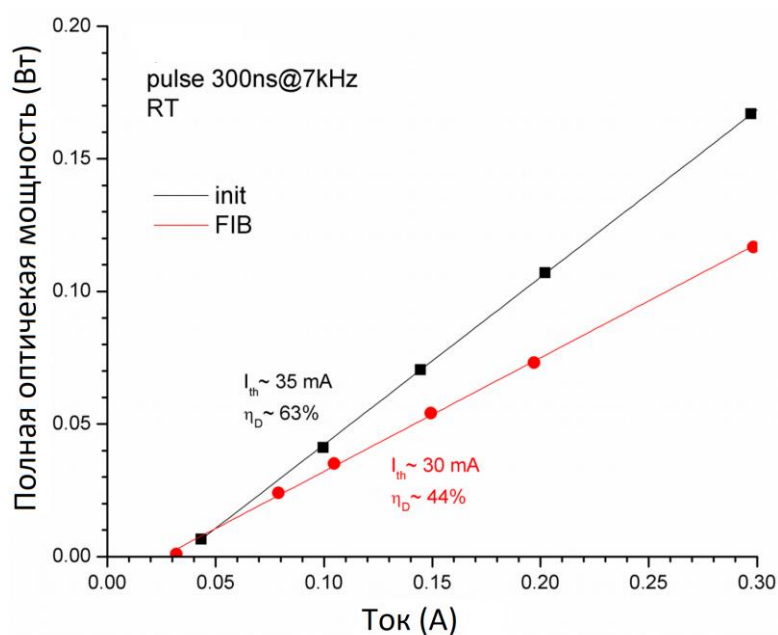


Рисунок 8. Ватт-амперная характеристика ЛД до и после травления СИП.

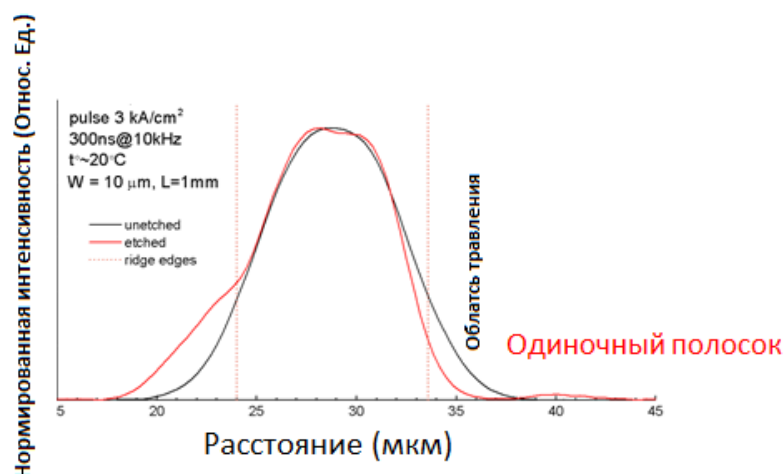


Рисунок 9. Картина ближнего поля до и после травления ЛД методом СИП.

Измерения ближнего поля структуры с одиночным волноводом показаны на рисунке 9. Из них следует, что распределение интенсивности асимметричное. Вероятно, в области травления СИП возникает скачок эффективного показателя преломления, что приводит к усилению волноводного эффекта.

1.4 Травление области между связанными гребневыми волноводами. Влияние на модовый состав.

Опираясь на полученные данные предыдущих экспериментов, было произведено травление области между основным и дополнительным волноводами. В качестве основного критерия эффективности применённого метода исследовались ближние поля ЛД с составными волноводами. На рисунке 10а показана схема области травления, а на рисунке 10б определение глубины травления с помощью АСМ.

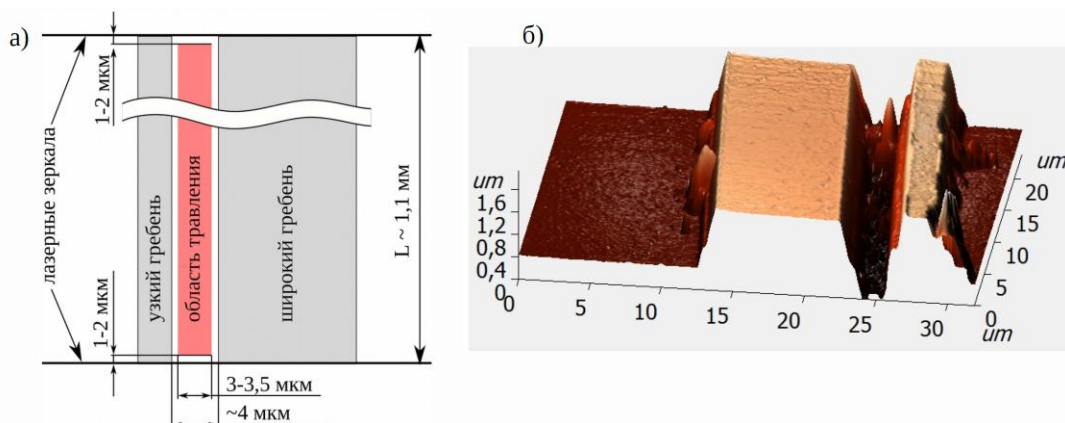


Рисунок 10. Травление области между составными волноводами. а) - схема травления, б) - визуализация АСМ с глубинами травления.

Результаты экспериментов были схожи с предыдущими исследованиями. Травление СИП повлияло на основные характеристики ЛД. Пороговый ток вырос с 20 мА до 35 мА, ДКЭ снизилась с 65% до 52%, но катастрофической деградации характеристик не произошло.

На рисунке 11 показаны измерения ближнего поля ЛД со связанными полосками в латеральном направлении. Черная линия соответствует измерению до, а красная после травления. Из картин ближнего поля следует, что интенсивность излучения дополнительного полоска снизилась, но не была подавлена полностью. Это, в свою очередь, опровергает предположение о том, что излучение связано с растеканием носителей из широкого полоска. Тем не менее, впервые удалось осуществить подстройку мод связанных волноводов с помощью травления СИП. Ширина ближнего поля в образцах после травления уменьшилась, что связано с частичным подавлением генерации гибридных мод составного волновода.

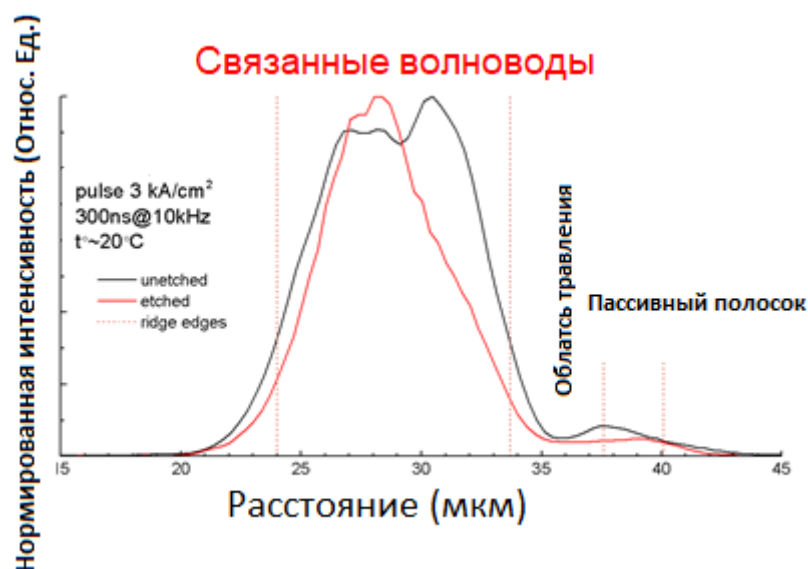


Рисунок 11. Картина ближнего поля до и после травления ЛД методом СИП, лазер со связанными полосками.

1.5 Прямое травление СИП пассивного волновода лазеров со связанными волноводами.

Предыдущие эксперименты показали, что с помощью травления области между волноводами не удалось подавить полностью излучение из пассивного волновода. Поэтому мы провели эксперимент, в котором для

нескольких лазеров протравили узкую полосу шириной 300 нм по всей длине пассивного волновода (рис. 12а).

Глубина травления (рис. 12б) была выбрана такой, чтобы внести в кристаллическую структуру максимальное количество радиационных дефектов для того чтобы подавить люминесценцию. При этом внесённые СИП дефекты (вакансии, междоузельные атомы и их комплексы) не влияют на распространение света в дополнительном волноводе.

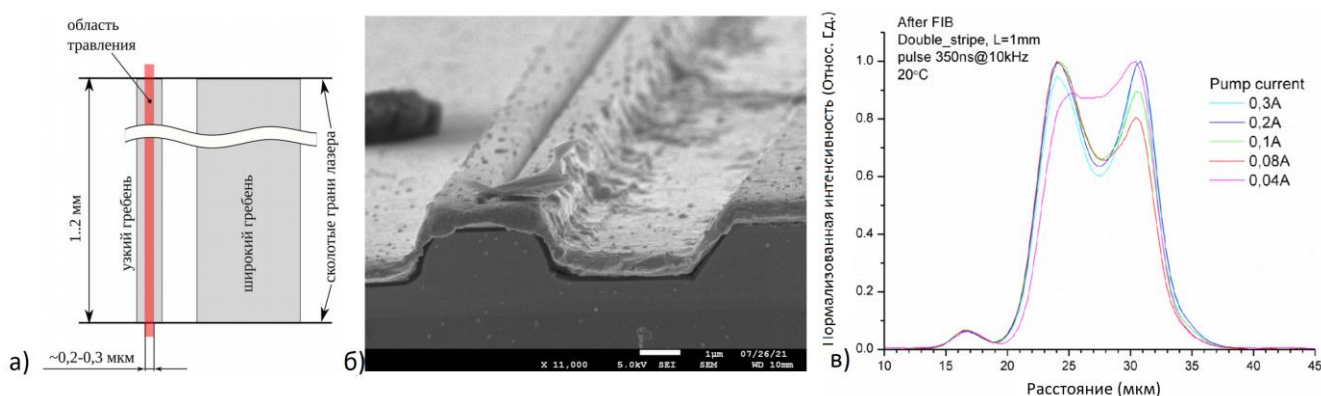


Рисунок 12. а) схематичное изображение области травления, б) СЭМ изображение потравленного лазера, в) ближнее поле ЛД.

Проведённые исследования распределения интенсивности излучения на зеркалах показали, что уменьшения интенсивности излучения из области пассивного волновода не произошло (рис. 12с) то есть “прокачки” пассивного волновода не происходит. Следовательно, влияние травления областей, между активным и пассивным волноводами, сводится к изменению скачка эффективного показателя преломления за счёт удаления металла (и частично диэлектрика).

Таким образом, для получения реализации пространственно-одномодового режима работы лазера на латерально связанных волноводах требуется существенно увеличивать контраст эффективного показателя преломления в латеральном направлении. Это возможно обеспечить только в

новой лазерной гетероструктуре с уменьшенной толщиной волновода и, соответственно, активной областью на одной или двух квантовых ямах.

Выводы к главе 3:

- показано что травление СИП позволяет производить подстройку у уже готового ЛД, при этом основные параметры ЛД не ухудшаются.
- экспериментально была доказана возможность разделения волновода с помощью травления СИП на два взаимосвязанных резонатора
- продемонстрировано уменьшение ширины линии ближнего поля в образцах после травления СИП, что связано с частичным подавлением генерации латеральных мод составного волновода высоких порядков;
- доказана возможность тонкой настройки латерального модового состава с помощью изменения показателя преломления при травлении СИП канавки вдоль полоска.

Часть вторая

Всего было исследовано три различные конструкции ЛД. Активная область всех трех типов ЛД состояла из двух слоёв новых квантовых ям-точек (КЯТ) $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$, излучающих на длине волны ~ 1.1 мкм [9].

Главными отличиями между исследуемыми ЛД были различная глубина залегания активной области, толщина и состав p -обкладок. Лазерные гетероструктуры были выращены методом MOCVD на подложках n -GaAs (100). Волновод гетероструктуры ЛД традиционной конструкции изготовлен из слоя GaAs толщиной 0.68 мкм, заключенного между обкладками $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ с толщинами 1,5 мкм. Благодаря распределению электромагнитной волны почти целиком внутри широкого волновода в CLOC лазерах, можно снизить толщину p -обкладки до 0.5 мкм и сделать волновод менее контрастным используя $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ обкладки. Толщина активного волновода CLOC лазера составляла 1.3 мкм. Пассивный волновод располагается на расстоянии 0.22 мкм со стороны n -контакта [9]. Другая конструкция ЛД получила название усовершенствованный CLOC лазер, и во многом его конструкция была аналогична конструкции, о которой сообщалось ранее [2]. В усовершенствованном CLOC лазере удалось экстремально близко пододвинуть активную область к p контакту с сохранением работы на фундаментальной моде. Глубины залегания активной области представлены в таблице 2. Дизайн традиционной структуры описан в [10].

Дизайн лазерной структуры	Традиционная конструкция	CLOC дизайн	Усовершенствованный CLOC дизайн
Расположение активной области от p контакта	2.27 мкм	1.32 мкм	0.93 мкм

Таблица 2. Глубина залегания активной области исследуемых устройств.

2.1 Исследование мощностных характеристик лазеров со связанными волноводами

Связанные волноводы перспективны для создания мощных ЛД. Резонансное подавление паразитных мод расширенного волновода позволяет свободно выбирать положение АО (Рис. 13а) поскольку возможно снизить фактор оптического ограничения одних мод за счет положения АО, а другие резонансно подавить. На рисунке 4 слева приведены профили интенсивности оптических мод составного волновода со смещённой активной областью. Видно, что 2-я мода исключается из генерации за счет малого фактора оптического ограничения, а вместо первой моды имеются две гибридных которые также исключаются из лазерной генерации. При этом ухудшения параметров излучения не происходит, а расширение волновода позволяет снизить внутренние оптические потери до 0.4 см^{-1} (Рис. 13б) [11].

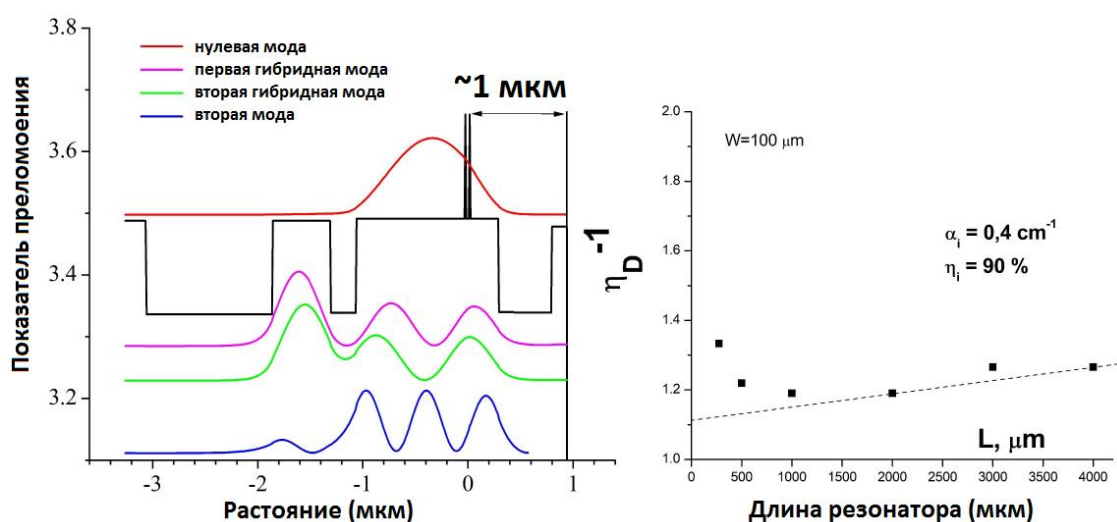


Рисунок 13. Слева схематичное изображение распределения мод в лазере со связанными волноводами и смещенной АО, справа измеренные характеристики.

Для определения максимальной оптической мощности лазера со связанными волноводами были произведены исследования ватт-амперных характеристик в импульсном и в непрерывном режимах (рисунок 14). Также производились измерения разогрева активной области с помощью измерения спектров излучения ЛД с временным разрешением.

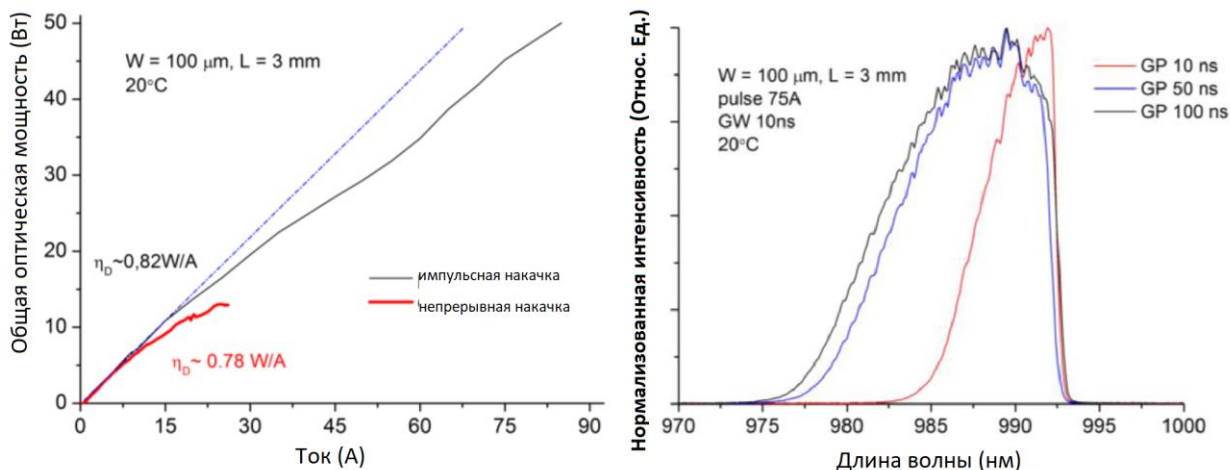


Рисунок 14. Слева ватт-амперная характеристика в импульсном и непрерывных режимах, справа спектр лазерной генерации при различных плотностях тока. GP- положение строба, GW- ширина строба.

Из измерения ватт-амперных характеристик следует, что CLOC лазеры способны обеспечить до 50 Ватт оптической мощности в импульсном режиме (в нашем случае она ограничена источником тока). В режиме непрерывной накачки ЛД продемонстрировал мощность более 13 Ватт.

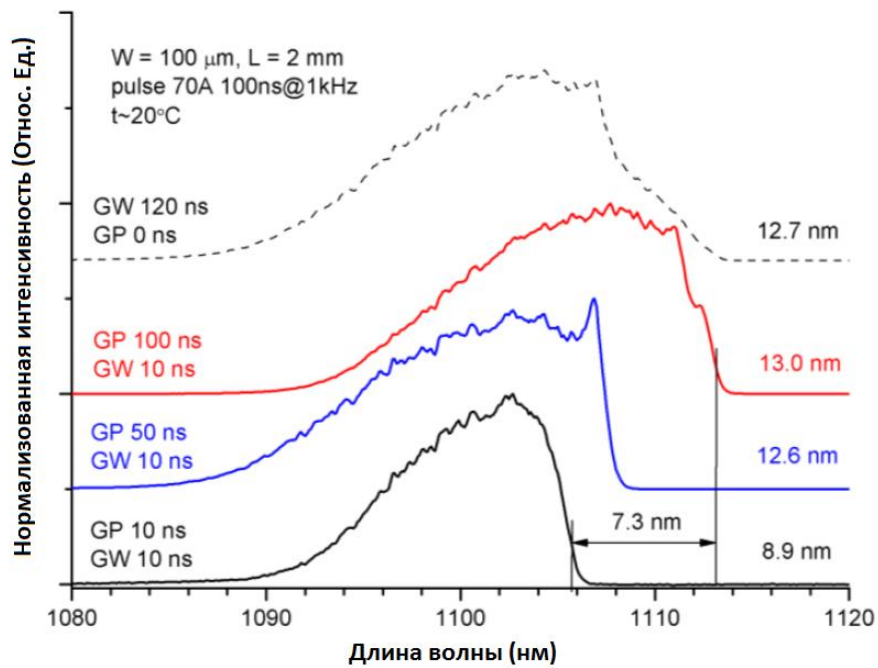


Рисунок 15. Разогрев активной области ЛД при больших плотностях тока.

Справа на рисунке 14 показан спектр лазерной генерации в зависимости от плотности тока. Из полученных результатов следует, что при высоких плотностях тока АО в CLOC лазерах не разогревается, в отличие от референсной структуры (Рис. 15) [10]. Как видно из рисунка 15 спектр уширяется в область длинных волн.

Отсутствие разогрева свидетельствует о преимуществах конструкции CLOC, в которой возможно уменьшить толщину р-обкладки не внося потерь для фундаментальной моды за счёт её сильной локализации (Рис. 13) в расширенном волноводе. [12].

2.2 Тепловые свойства лазеров со связанными волноводами.

Естественной мерой эффективности отвода тепла от активной области является тепловое сопротивление лазерного диода (R_{th}).

Было исследовано тепловое сопротивление ЛД с резонансно связанными волноводами, и проведено их сравнение с ЛД «традиционной» конструкции.

Были измерены основные характеристики изучаемых ЛД. Лазеры традиционной конструкции с резонатором длиной 3 мм продемонстрировали пороговую плотность тока 120 А/см^2 . CLOC лазеры такой же длины имели несколько более высокий порог 170 А/см^2 (200 А/см^2 для усовершенствованной конструкции CLOC) из-за меньшего коэффициента оптического ограничения в расширенных волноводах. Внутренние оптические потери ЛД уменьшались при увеличении ширины волновода от 1.1 см^{-1} до $0,4 \text{ см}^{-1}$.

Были проведены исследования влияния положения активной области на тепловое сопротивление (R_{th}) диодных лазеров с помощью измерения спектров их излучения. Мы повысили точность измерения перегрева активной области. Наш метод основан на измерении так называемого истинного спонтанного излучения, который собирается с окна в n контакте ЛД. Мы полагаем, что такой способ более точно характеризует изменение температуры активной области.

Для измерения теплового сопротивления сначала определялся сдвиг длины волны истинного спонтанного излучения [13] от температуры (нм/К) в импульсном режиме, что позволило пренебречь перегревом активной области. Параметры импульсного тока накачки в эксперименте составляли - 350 нс при частоте импульсов 10 кГц . Следующим шагом являлось измерение сдвига длины волны истинного спонтанного излучения относительно рассеиваемой мощности (нм/Вт) в непрерывном режиме. Температура теплоотвода была фиксирована. Рассеиваемая мощность рассчитывалась из общей электрической мощности, поданной на диод, вычитанием выходной оптической мощности. Тепловое сопротивление считалось как отношение скорости сдвига истинного спонтанного излучения с рассеиваемой мощностью к скорости сдвига длины волны с температурой.

Установка для измерения теплового сопротивления показана на рисунке 16. Напряжение и протекающий через ЛД ток регулировались

источником. Параллельно измерялась ватт-амперная характеристика. Датчик температуры располагался непосредственно на теплоотводе, максимально близко к чипу ЛД. Истинное спонтанное излучение собиралось с помощью 100 мкм оптического волокна.

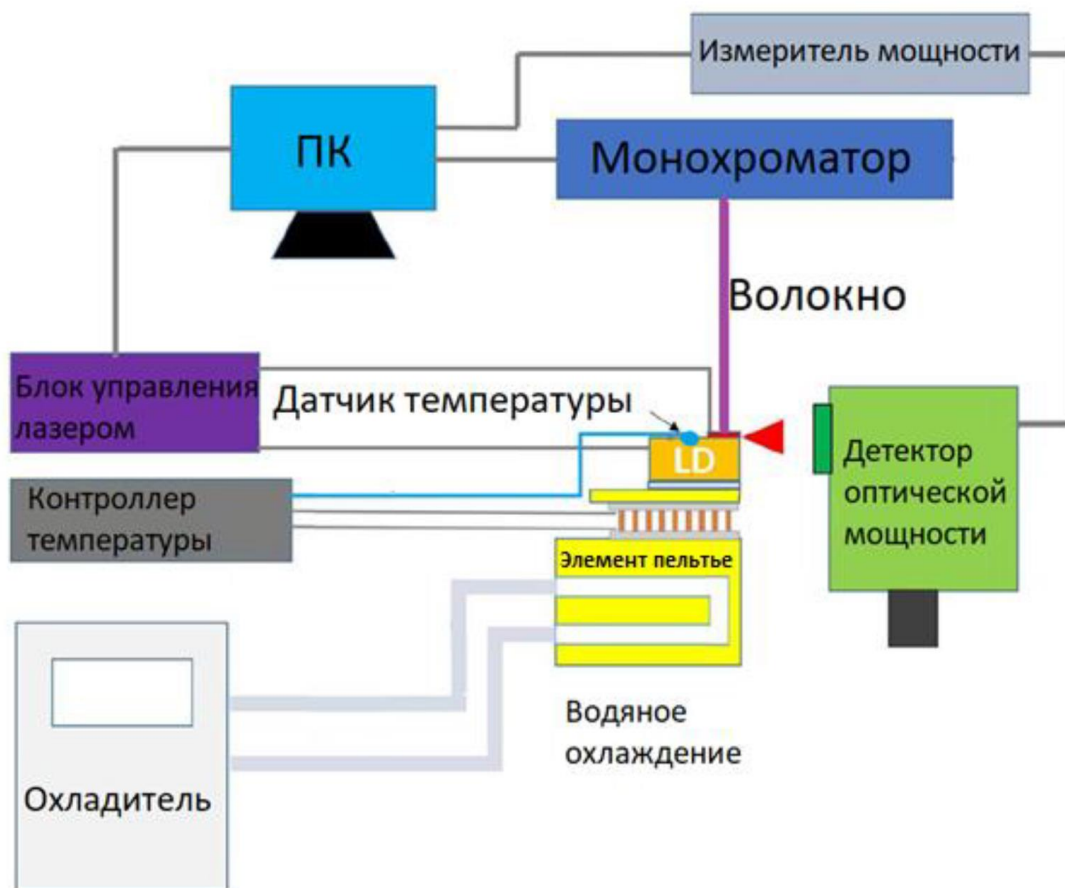


Рисунок 16. Блок-схема установки исследования теплового сопротивления.

При определении теплового сопротивления сдвиг истинного спонтанного излучения составил порядка $0.28 \text{ нм}/^\circ\text{C}$, что соответствует данной системе материалов [14][15].

Из данных, приведенных на рисунке 17 следует, что использование конструкций CLOC снижает удельное тепловое сопротивление примерно на $0,8 ((\text{мм} \times ^\circ\text{C})/\text{Вт})$ по сравнению с традиционной конструкцией ЛД.

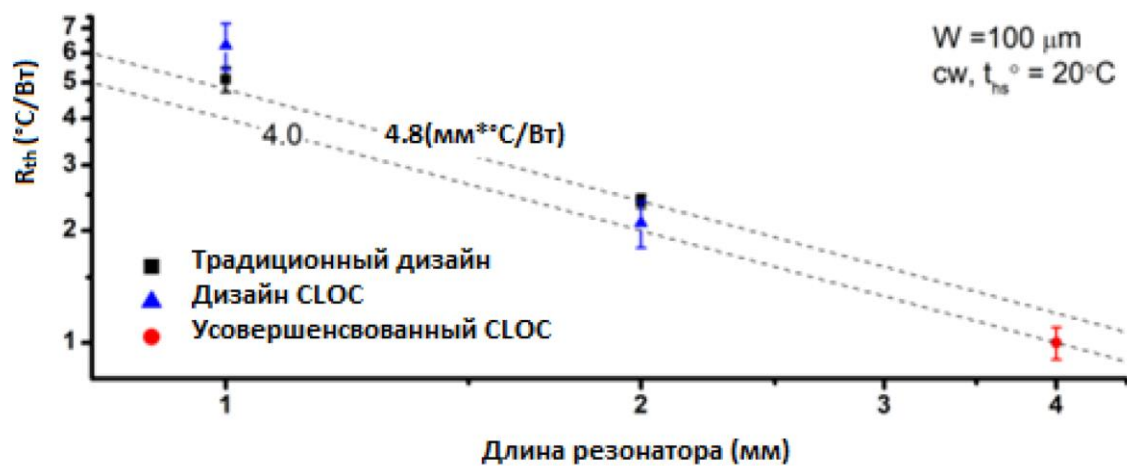


Рис.17. Зависимость теплового сопротивления различных конструкций ЛД от длины резонатора.

Таким образом, показано преимущество смещения активной области в широком волноводе лазеров со связанными волноводами, что улучшает мощностные и тепловые характеристики ЛД и продемонстрирована перспектива использования дизайна CLOC в мощных ЛД.

Заключение

В работе представлены способы по получению одномодовой лазерной генерации в ЛД с латерально связанными волноводами. Показан способ, который позволяет изменять модовый состав полосковых ЛД с помощью травления СИП. Метод травления СИП позволяет разделить волновод на два продольно связанных резонатора. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность настройки мод составного волновода используя травление методом СИП области между волноводами. При этом не происходит катастрофической деградации основных параметров ЛД.

Во второй части работы исследованы мощностные и тепловые характеристики ЛД с вертикально связанными волноводами. Показано, что такие лазеры обладают преимуществом расширенной области излучения, следствием чего является высокая оптическая мощность и сниженные внутренние оптические потери. Оптимизация конструкции ЛД, заключающаяся в смещении активной области в сторону р-обкладки, позволяет снизить тепловое сопротивление ЛД.

Список литературы

- [1] N. Y. Gordeev *et al.*, “Transverse single-mode edge-emitting lasers based on coupled waveguides,” *Opt. Lett.*, vol. 40, no. 9, p. 2150, May 2015.
- [2] A. S. Payusov *et al.*, “Diode Lasers with Near-Surface Active Region,” *Semiconductors*, vol. 52, no. 14, pp. 1901–1904, 2018.
- [3] A. E. Zhukov *et al.*, “Reduction of Internal Loss and Thermal Resistance in Diode Lasers with Coupled Waveguides,” *Semiconductors*, vol. 52, no. 11, pp. 1462–1467, 2018.
- [4] A. S. Payusov *et al.*, “Resonance inhibiting of high-order lateral modes in few-stripe diode lasers,” *Proc. - Int. Conf. Laser Opt. 2018, ICLO 2018*, no. 17, p. 140, 2018.
- [5] K. Dadashi, E. Şeker, and A. Demir, “Single lateral mode edge-emitting lasers using coupled waveguides,” in *Laser Congress 2020 (ASSL, LAC)*, 2020, vol. 2020, no. c, p. JTh2A.31.
- [6] А. С. Паюсов *et al.*, “Модификация Гребневых Волноводов Полупроводниковых Лазеров Фокусированным Ионным Пучком,” *Письма В Журнал Технической Физики*, vol. 47, no. 24, p. 51, 2021.
- [7] D. Marcuse and Tien-Pei Lee, “Rate equation model of a coupled-cavity laser,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 20, no. 2, pp. 166–176, Feb. 1984.
- [8] H. Temkin, J. P. van der Ziel, R. A. Linke, and R. A. Logan, “Single mode operation of 1.5- μm cleaved- coupled- cavity InGaAsP lasers,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 43, no. 8, pp. 723–725, Oct. 1983.
- [9] M. V. Maximov *et al.*, “Light emitting devices based on quantum well-dots,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 3, 2020.
- [10] A. A. Serin *et al.*, “Experimental study of power-limiting factors of 1.1 μm range edge-emitting lasers based on InGaAs/GaAs quantum well-dot

- nanostructures,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1410, no. 1.
- [11] A. A. Serin *et al.*, “Reducing of thermal resistance of edge-emitting lasers based on coupled waveguides,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1124, no. 4, pp. 3–7, 2018.
- [12] G. O. Kornyshev *et al.*, “High-power 0.98 μm range diode lasers based on InGaAs/GaAs quantum well-dot active region,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1400, no. 6.
- [13] M. P. Kesler and C. Harder, “Spontaneous emission and gain in GaAlAs quantum well lasers,” in *12th IEEE International Conference on Semiconductor Laser*, 1990, vol. 21, no. 6, pp. 94–95.
- [14] H. Wang, L. Zhong, J. Hou, S. Liu, and X. Ma, “1.06 μm high-power InGaAs/GaAsP quantum well lasers,” *J. Semicond.*, vol. 38, no. 11, p. 114005, Nov. 2017.
- [15] M. Maximov *et al.*, “Modification of InGaAs/GaAs heterostructure density of states and optical gain using hybrid quantum well-dots,” *Laser Phys. Lett.*, vol. 17, no. 9, pp. 2–6, 2020.

Список литературы по теме проекта

- A. S. Payusov *et al.*, “Diode Lasers with Near-Surface Active Region,” *Semiconductors*, vol. 52, no. 14, pp. 1901–1904, 2018.
- A. E. Zhukov *et al.*, “Reduction of Internal Loss and Thermal Resistance in Diode Lasers with Coupled Waveguides,” *Semiconductors*, vol. 52, no. 11, pp. 1462–1467, 2018.
- A. S. Payusov *et al.*, “Resonance inhibiting of high-order lateral modes in few-stripe diode lasers,” *Proc. - Int. Conf. Laser Opt. 2018, ICLO 2018*, no. 17, p. 140, 2018.
- A. С. Паюсов *et al.*, “Модификация Гребневых Волноводов Полупроводниковых Лазеров Фокусированным Ионным Пучком,” *Письма В Журнал Технической Физики*, vol. 47, no. 24, p. 51, 2021.
- A. A. Serin *et al.*, “Experimental study of power-limiting factors of 1.1 μm range edge-emitting lasers based on InGaAs/GaAs quantum well-dot nanostructures,” in *Journal of*

Physics: Conference Series, 2019, vol. 1410, no. 1.

- A. A. Serin *et al.*, “Reducing of thermal resistance of edge-emitting lasers based on coupled waveguides,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1124, no. 4, pp. 3–7, 2018.
- G. O. Kornyshev *et al.*, “High-power 0.98 μm range diode lasers based on InGaAs/GaAs quantum well-dot active region,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1400, no. 6.
- N. Y. Gordeev *et al.*, “High-performance diode lasers based on coupled-large-optical-cavity design,” *Proc. - Int. Conf. Laser Opt. 2018, ICLO 2018*, vol. 27, no. 4, p. 139, 2018.
- A. E. Zhukov *et al.*, “Power Characteristics and Temperature Dependence of the Angular Beam Divergence of Lasers with a Near-Surface Active Region,” *Tech. Phys. Lett.*, vol. 44, no. 8, pp. 675–677, 2018.
- A. A. Epanchinova *et al.*, “Lateral mode behaviour in diode lasers based on coupled ridges,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1695, no. 1, 2020.
- A. S. Payusov *et al.*, “Lateral Mode Tuning in Coupled Ridge Waveguides Using Focused Ion Beam,” *Semiconductors*, vol. 54, no. 14, pp. 1811–1813, 2020.