

# Аргоновый газоразрядный волоконный лазер

А.В.Гладышев, Д.Г.Комиссаров, С.М.Нефедов,  
А.Ф.Косолапов, В.В.Вельмискин, А.П.Минеев, И.А.Буфетов

*Впервые продемонстрирован аргоновый газоразрядный волоконный лазер. Используя СВЧ излучение (2.45 ГГц) для поддержания газового разряда в полой световоде револьверного типа, заполненном газовой смесью He–Ar, достигнута лазерная генерация на длинах волн 2208 и 2397 нм, соответствующих переходам  $3d \rightarrow 4p'$  в атомах аргона. Исследованы спектральные и временные характеристики выходного излучения лазера в зависимости от мощности накачки и давления газовой смеси.*

**Ключевые слова:** волоконный лазер, световод с полой сердцевиной, газоразрядный лазер.

## 1. Введение

Волоконные лазеры на основе кварцевых световодов с твердотельной сердцевиной находят многочисленные применения в различных областях от биомедицины до прецизионной обработки материалов. Востребованность именно волоконных лазеров обусловлена хорошо известными преимуществами волоконного формата, такими как высокое качество пучка, компактность, отсутствие механических юстировок, долговременная стабильность и т. д. Однако спектральный диапазон, в котором могут быть реализованы такие лазеры, принципиально ограничен областью пропускания кварцевого стекла (0.4–2.2 мкм). Кроме того, даже в этой спектральной области прямая лазерная генерация доступна лишь в некоторых спектральных полосах, связанных с ограниченным набором активных ионов редкоземельных элементов (Nd, Yb, Er, Tm, Ho), которыми легируется твердотельная сердцевина. Таким образом, разработка волоконных лазеров, способных генерировать на новых длинах волн, является актуальной задачей.

Значительный прогресс в расширении спектрального диапазона генерации волоконных лазеров был достигнут благодаря развитию активных световодов с твердотельной сердцевиной, таких как 1) кварцевые световоды, легированные висмутом [1–3], 2) флюоридные световоды, легированные редкоземельными ионами Er<sup>3+</sup> и Ho<sup>3+</sup> [4–7], а так же 3) халькогенидные световоды, легированные редкоземельными ионами Tb<sup>3+</sup> и Ce<sup>3+</sup> [8–10]. Однако существенно большую свободу выбора активных сред предоставляют световоды с полой сердцевиной (СПС), позволяющие создавать новый тип лазеров – газовые волоконные лазеры (ГВЛ), активной средой которых могут служить многочисленные газовые смеси, вводимые в полую сердцевину.

За последние годы был получен целый ряд новых результатов, продемонстрировавших возможность создания в спектральном диапазоне 1–5 мкм эффективных

ГВЛ на основе полых световодов из кварцевого стекла. Используя такие газы, как C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> и HBr, были продемонстрированы ГВЛ, работающие в непрерывном режиме с выходной мощностью на уровне до ~20 Вт в среднем ИК диапазоне. В частности, на длине волны  $\lambda = 3.1$  мкм была достигнута генерация с выходной мощностью ~22 Вт [11]. В более длинноволновом диапазоне  $\lambda = 4.16$  и 4.3 мкм выходная мощность достигает значений 3.1 [12] и 6.6 Вт [13] соответственно. Кроме того, реализованы рамановские ГВЛ на основе легких молекулярных газов (H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>). При этом достигнута средняя выходная мощность более 100 Вт на длине волны  $\lambda = 1.15$  мкм [14], более 6 Вт на длине волны  $\lambda = 2.9$  мкм [15] и более 1 Вт на длине волны  $\lambda = 4.4$  мкм [16]. Несмотря на то что большинство рамановских ГВЛ генерируют лазерные импульсы длительностью в несколько наносекунд, в последние годы удалось получить генерацию субпикосекундных импульсов в среднем ИК диапазоне [17], а также генерацию суперконтинуума с эффективной передачей энергии в средний ИК диапазон до длины волны  $\lambda \approx 4.2$  мкм [18].

Принципиально новым результатом явилась недавняя демонстрация первого в мире газоразрядного волоконного лазера (ГРВЛ) [19, 20]. Лазерная генерация была получена на длине волны 2.03 мкм на переходах атомов ксенона в газовых смесях He–Ar–Xe и He–Xe, при этом проблема поддержания газового разряда в полой сердцеvine малого диаметра (~130 мкм) была решена благодаря накачке сверхвысококачественным (СВЧ) излучением с частотой 2.45 ГГц [21]. В отличие от всех ранее продемонстрированных ГВЛ, являющихся, строго говоря, всего лишь преобразователями лазерного излучения накачки, ГРВЛ реализуют именно генерацию когерентного оптического излучения непосредственно в световоде без использования других лазерных источников.

Следует отметить, что концептуально близкими предшественниками ГРВЛ можно считать волноводные газовые лазеры, конструкция которых основывалась на капиллярах с миллиметровым и субмиллиметровым внутренним диаметром [22–25]. Важно, что капилляр не только служил контейнером для активной газовой смеси, но и выполнял функцию волновода для оптического излучения. При этом высокие оптические потери при изгибе таких капилляров вынуждали разрабатывать волноводные газовые лазеры исключительно в геометрии с прямыми капиллярами, что ограничивало возможности

А.В.Гладышев, Д.Г.Комиссаров, С.М.Нефедов, А.Ф.Косолапов, В.В.Вельмискин, А.П.Минеев, И.А.Буфетов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: alexglad@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 23 октября 2024 г.

по наращиванию длины, а, следовательно, и выходной мощности таких лазеров. Однако современные микроструктурированные световоды с диаметром полый сердцевины  $\sim 10\text{--}100$  мкм позволяют использовать километровые длины световода, компактно намотанного с радиусом изгиба в десятки сантиметров [26, 27]. Таким образом, полые световоды открывают новые возможности для создания мощных компактных волоконных лазеров, способных генерировать на различных длинах волн, которые труднодоступны другими методами и перекрывают широкий спектральный диапазон от УФ до средней ИК области спектра.

В многочисленных исследованиях объемных газоразрядных лазеров на основе смесей He–Rg (Rg = Ne, Xe, Kr, Ar) [28–33] отмечается, что механизмы генерации в этом семействе лазеров во многом аналогичны, благодаря схожей структуре энергетических уровней в атомах благородных газов. Таким образом, недавняя реализация газоразрядного лазера в полом световоде, заполненном смесью He–Xe [19, 20], позволяет рассчитывать на создание газоразрядного волоконного лазера и в смесях гелия с другими благородными газами.

В настоящей работе возможность получения лазерной генерации в ГРВЛ, заполненном смесью He–Ar, была исследована экспериментально, что в результате позволило впервые продемонстрировать аргоновый газоразрядный волоконный лазер.

## 2. Экспериментальная установка

Общий вид конструкции газоразрядного волоконного лазера представлен на рис.1. За исключением состава газовой смеси, конструкция ГРВЛ полностью совпадала с той, которая использовалась в работах [19, 20]. В качестве источника СВЧ излучения применялся магнетрон (на рис.1 не показан), генерирующий на несущей частоте 2.45 ГГц импульсы длительностью 20–80 мкс с частотой следования 400 Гц. Импульсы СВЧ излучения поступали в металлический волновод 1 прямоугольного сечения  $9 \times 4.5$  см, который является одномодовым для излучения магнетрона. Противоположный конец волновода был закорочен металлическим поршнем 3, что приводило к образованию в волноводе стоячей волны. Электрическое СВЧ поле, поперечное оси световода, подавалось на полый световод путем размещения полого световода в продольной щели в узкой боковой стенке СВЧ волновода, к

которой плотно прижимались два параллельных медных электрода 2. Медные электроды, расстояние между которыми составляло 2 мм, образовывали щелевую антенну длиной 32 см. Амплитуда электрического СВЧ поля в центре щели менялась, по нашим оценкам, в диапазоне 3.6–5.3 кВ/см при изменении пиковой мощности магнетрона от 1.4 до 3.2 кВт. Средняя СВЧ мощность, генерируемая магнетроном, составляла  $\sim 20$  Вт.

Револьверный световод 4 размещался на нижнем медном электроде. При общей длине револьверного световода 1.2 м воздействию СВЧ поля подвергался только участок световода длиной 0.3 м, установленный в щели. Диаметр полый сердцевины револьверного световода составлял 130 мкм, а толщина стенки капилляров в оболочке световода составляла 2.7 мкм. Свободные концы световода были помещены в миниатюрные газовые ячейки 5 и 6, содержащие зеркала оптического резонатора и допускающие их юстировку. Газовые ячейки подсоединялись к газонаполнительной системе, позволяющей откачивать полую сердцевину световода и напускать в нее различные газовые смеси. В настоящей работе в качестве активной среды ГРВЛ использовалась смесь He–Ar.

После подачи излучения накачки в СВЧ волновод зажигание разряда внутри полого световода инициировалось при помощи кратковременного ( $\sim 1$  с) облучения световода излучением УФ лампы. УФ излучение проникало внутрь полый сердцевины через боковую поверхность световода, зачищенную от полимерного покрытия на участке длиной 1 см, расположенном в щели. После зажигания газового разряда УФ лампа выключалась.

Схема установки для регистрации излучения ГРВЛ показана на рис.2. Оптическое излучение после выходного зеркала резонатора (ОЗ) регистрировалось фотодетектором на основе фотосопротивления (ФД), сигнал с которого наблюдался на осциллографе. К осциллографу также был подсоединен датчик СВЧ излучения (MWA). Перпендикулярно к боковой поверхности полого световода подводился многомодовый кварцевый световод, который захватывал излучение плазмы и доставлял его к спектрометру Ocean Optics (С), работающему в диапазоне длин волн 200–1100 нм.

Регистрация выходного излучения ГРВЛ в спектральном диапазоне 1200–2400 нм проводилась при помощи оптического анализатора спектра Yokogawa (ОСА). На длинах волн более 2400 нм спектральный состав излучения исследовался при помощи монохроматора и фотодетектора.

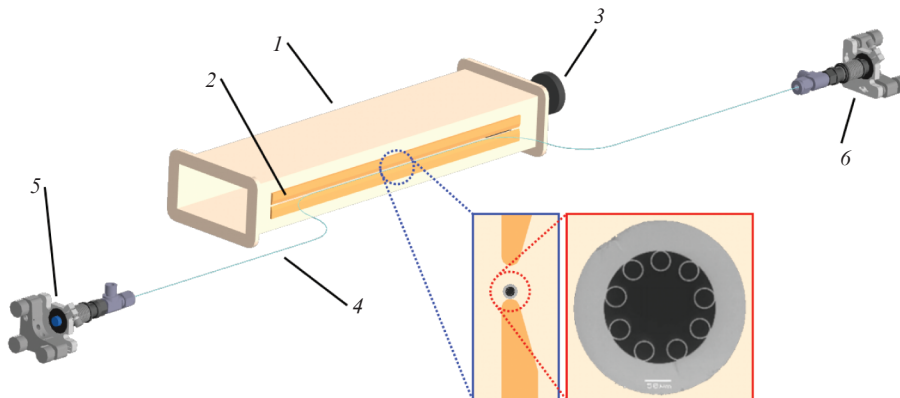


Рис.1. Общий вид конструкции газоразрядного волоконного лазера:

1 – СВЧ волновод; 2 – медные полосковые электроды; 3 – закорачивающий поршень; 4 – полый револьверный световод; 5 – газовая кювета с глуким зеркалом; 6 – газовая кювета с выходным зеркалом.

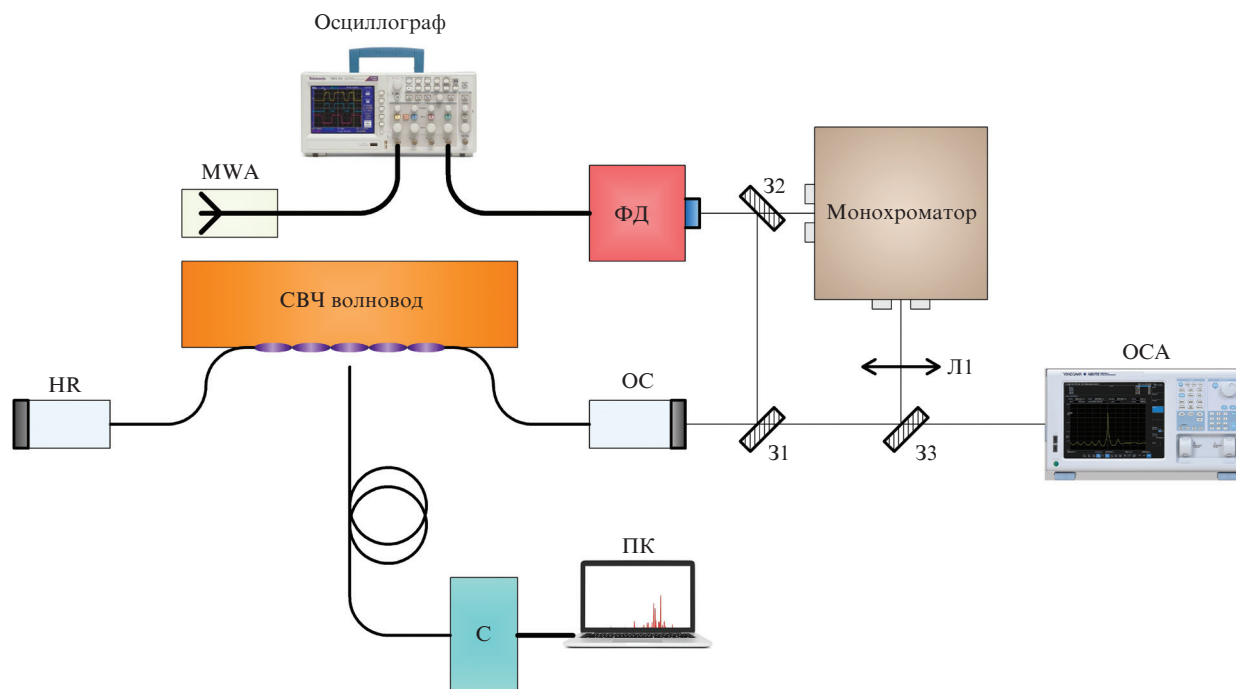


Рис.2. Схема регистрации лазерной генерации и излучения плазмы: HR и ОС – узлы глухого и выходного зеркала соответственно; MWA – антенна-детектор СВЧ излучения; ФД – ИК-фоторезистор; С – спектрометр 200–1100 нм; ПК – компьютер; ОСА – оптический спектроанализатор 1200–2400 нм; Л1 – линза; 31–33 – съемные зеркала.

тектора. Кроме того, монохроматор позволял выделять различные линии генерации и по отдельности исследовать форму лазерных импульсов на этих длинах волн. Съемные зеркала (31–33) использовались в различных конфигурациях для подачи выходного излучения ГРВЛ на один из регистрирующих приборов (ОСА, монохроматор, ФД).

### 3. Результаты и их обсуждение

Эксперименты по поиску условий генерации в аргонном ГРВЛ проводились при заполнении полого световода смесью He–Ar в соотношении 10:1, которое было выбрано на основе литературных данных по объемным газовым He–Ar-лазерам [30, 32]. Общее давление газовой смеси в первых экспериментах составляло 67.5 Торр. Пиковая мощность СВЧ излучения составляла 3.2 кВт, что в наших условиях соответствует воздействию на полый световод электрического СВЧ поля с амплитудой  $E \approx 5.3$  кВ/см.

Для того чтобы облегчить поиск условий генерации в ГРВЛ, заполняемом новой газовой смесью (He–Ar), оптический резонатор ГРВЛ был предварительно съюстирован. С этой целью полый световод заполнялся газовой смесью He–Xe, гарантирующей получение лазерной генерации в соответствии с предыдущими работами [19, 20], в которых применялись тот же полый световод и те же зеркала оптического резонатора, что и в настоящей работе. После получения лазерной генерации в смеси He–Xe зеркала резонатора юстировались на максимум выходной мощности ГРВЛ. Затем газовая смесь He–Xe откачивалась до остаточного давления менее 10 мТорр, и полая сердцевина заполнялась исследуемой смесью He–Ar.

Стабильное горение газового разряда в полом световоде, заполненном смесью He–Ar, возникало после кратковременного (~1 с) облучения боковой поверхности

световода УФ излучением при включенной СВЧ накачке, однако лазерная генерация отсутствовала, несмотря на съюстированный резонатор.

Первые признаки возникновения лазерной генерации возникли примерно через 1 ч горения разряда. Фотодетектор, расположенный за выходным зеркалом резонатора ГРВЛ, регистрировал выделяющиеся на фоне шума оптические импульсы, амплитуда которых постепенно нарастала и за время ~1 ч после появления первых признаков генерации достигала стационарного значения (рис.3, кривая 1).

Напряженность электрического СВЧ поля накачки  $E_{MW}$ , действующего на газонаполненный световод, ока-

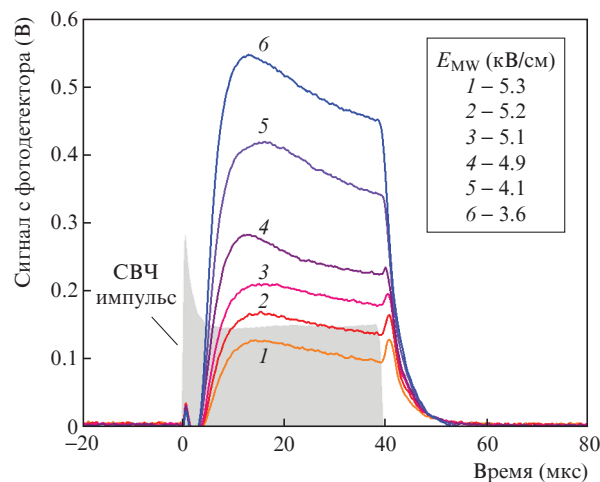


Рис.3. Форма оптических импульсов, генерируемых газоразрядным волоконным He–Ar-лазером, при различной амплитуде СВЧ поля накачки  $E_{MW}$ . Форма СВЧ импульса накачки показана закрашенной серой областью. Соотношение парциальных давлений He и Ar составляло 10:1 при суммарном давлении 67.5 Торр.

зывала существенное влияние как на амплитуду, так и на форму лазерных импульсов (рис.3). Используемое на начальном этапе эксперимента значение  $E_{MW} = 5.3$  кВ/см оказалось избыточным, и его уменьшение до минимально возможного в нашей установке значения  $E_{MW} = 3.6$  кВ/см позволило увеличить амплитуду лазерных импульсов более чем в четыре раза. При этом форма импульсов качественно изменялась, что можно видеть по

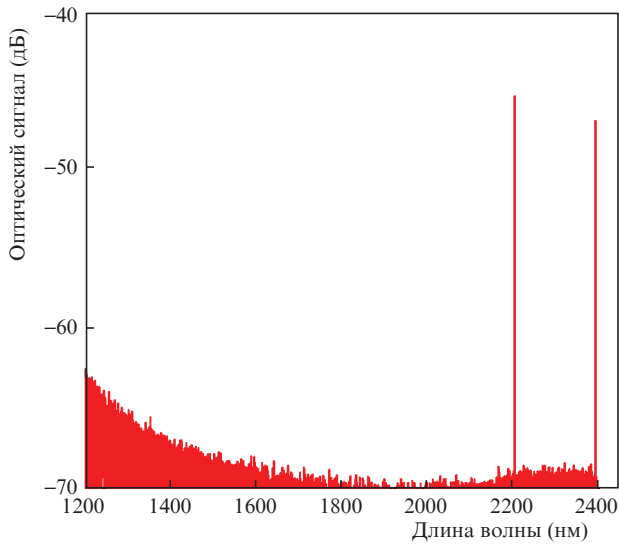


Рис.4. Характерный спектр выходного излучения гелий-аргонового ГРВЛ. Соотношение парциальных давлений He и Ar составляло 10:1 при суммарном давлении 67.5 Торр. Амплитуда напряженности СВЧ поля накачки составляла  $E_{MW} = 3.6$  кВ/см.

дополнительному всплеску оптической мощности, возникающему уже после окончания СВЧ импульса накачки при высоких напряженностях поля  $E_{MW} \rightarrow 5.3$  кВ/см (рис.3). Наличие такого дополнительного пика генерации указывает на то, что при высоких значениях  $E_{MW}$  в послесвечении распадающейся плазмы создаются благоприятные условия для достижения инверсной населенности между некоторыми энергетическими уровнями Ar, которые, вообще говоря, могут не совпадать с уровнями, участвующими в лазерной генерации в течение импульса накачки. Таким образом, наблюдаемый всплеск лазерной генерации на заднем фронте импульса накачки мог указывать на изменение длины волны генерации.

Исследование выходного спектра ГРВЛ в диапазоне длин волн 1200–2400 нм показало, что лазерная генерация наблюдалась на двух длинах волн  $\lambda_1 = 2208$  нм и  $\lambda_2 = 2397$  нм (рис.4). Обе длины волны генерации попадают в одну из полос пропускания используемого полого световода, простирающуюся от 1900 до 2500 нм [19, 20]. Отсутствие линий генерации в более длинноволновом диапазоне ( $\lambda > 2400$  нм) было проконтролировано при регистрации выходного спектра с помощью монохроматора и фотодетектора.

Суммарная мощность лазерного излучения на выходе аргонового ГРВЛ измерялась фотодетектором, чувствительность которого в области обнаруженных длин волн генерации составляет 2.45 мВт/В. Таким образом, амплитуда зарегистрированного оптического сигнала (рис.3, кривая б) соответствует выходной мощности ГРВЛ порядка 1.3 мВт.

Наблюдаемые линии генерации (рис.5) отвечают переходам  $3d \rightarrow 4p'$  в атомах аргона [34]. В частности, пере-

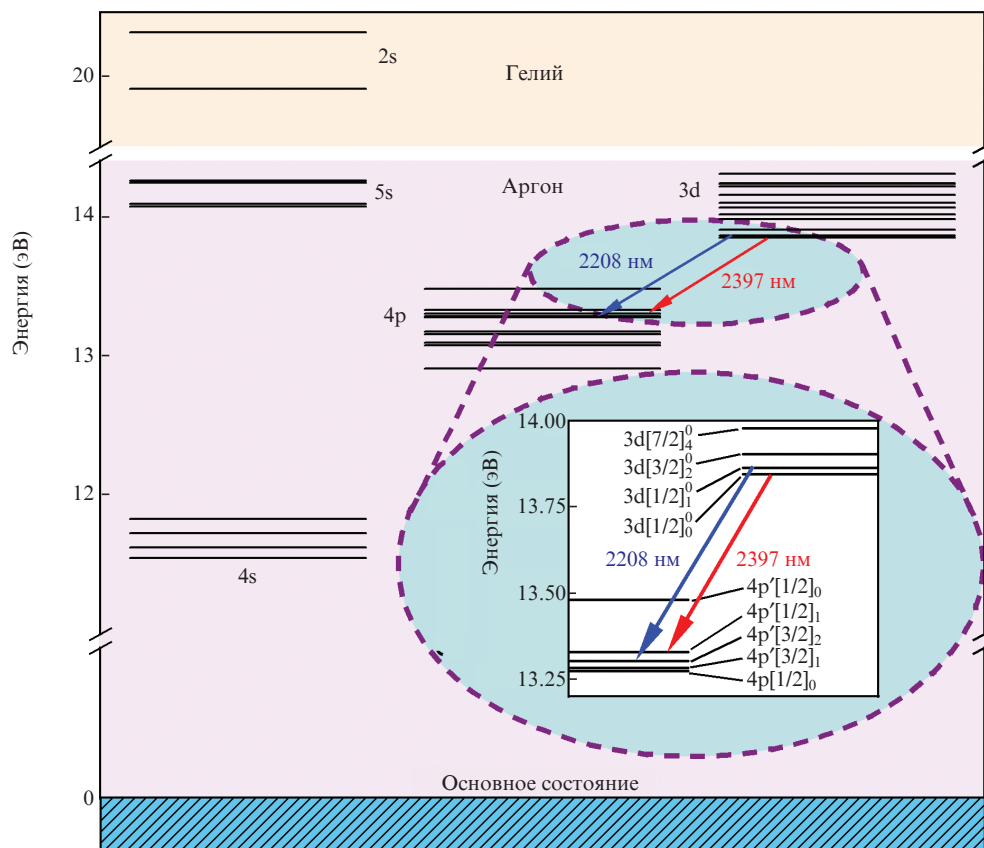


Рис.5. Схема уровней энергии атома аргона с указанием переходов, на которых наблюдается лазерная генерация в гелий-аргоновом ГРВЛ.

ход с верхнего лазерного уровня  $3d[1/2]_0^0$  на нижний лазерный уровень  $4p[3/2]_2$  приводит к генерации на длине волны 2208 нм, а переход между уровнями  $3d[1/2]_0^0 \rightarrow 4p[1/2]_1$  соответствует генерации на длине волны 2397 нм.

Зависимость формы лазерных импульсов от мощности СВЧ накачки и от давления газовой смеси He–Ar (10:1) была исследована на каждой из длин волн генерации по отдельности. Для этого требуемая длина волны выделялась с помощью монохроматора, на выходе которого устанавливался фотодетектор. Полученные результаты свидетельствуют о том, что всплеск оптической мощности, обнаруженный ранее по окончании СВЧ импульса накачки (рис.3), не связан с перескоком длины волны и наблюдается как для линии генерации 2208 нм (рис.6,б), так и для линии генерации 2397 нм (рис.7,б). Определяющим фактором здесь является мощность СВЧ накачки, при достаточном повышении которой всплеск генерации по окончании СВЧ импульса проявляется все более значительно.

Повышение мощности СВЧ накачки приводит к увеличению температуры электронов, что подтверждается очевидным ростом люминесценции возбужденных атомов гелия, наблюдаемой через боковую поверхность полого световода при возрастании  $E_{MW}$  от 3.6 до 5.3 кВ/см (рис.8).

Полученные результаты указывают на то, что повышение электронной температуры, имеющее место с ростом  $E_{MW}$ , затрудняет создание инверсной населенности на переходах  $3d \rightarrow 4p'$  в аргоне, и только по окончании СВЧ импульса накачки электроны охлаждаются и эффективно рекомбинируют с ионами, вновь повышая инверсную населенность, приводящую к наблюдаемому всплеску лазерной генерации (рис.6,б, 7,б). На данном этапе затруднительно дать детальное описание процессов созда-

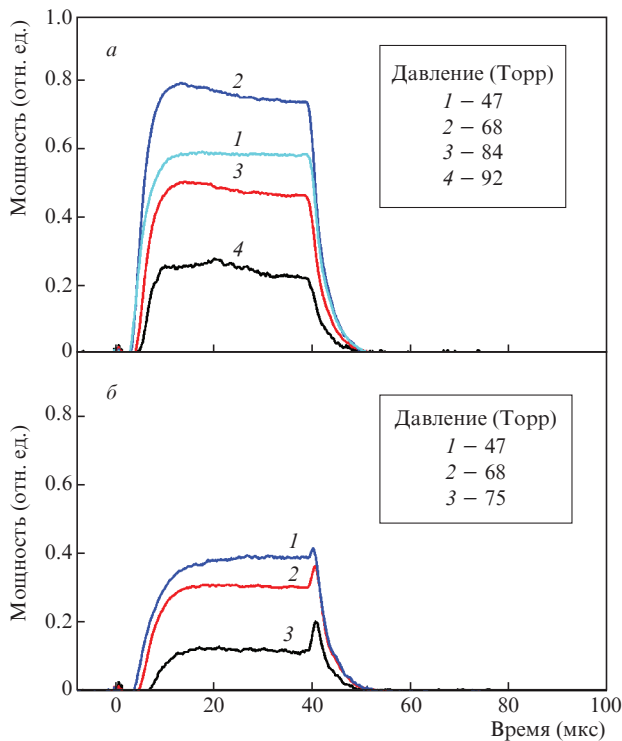


Рис.6. Форма выходных лазерных импульсов на длине волны 2208 нм при различных давлениях. Напряженность СВЧ поля накачки  $E_{MW}$  составляла 3.6 (а) и 5.3 кВ/см (б).

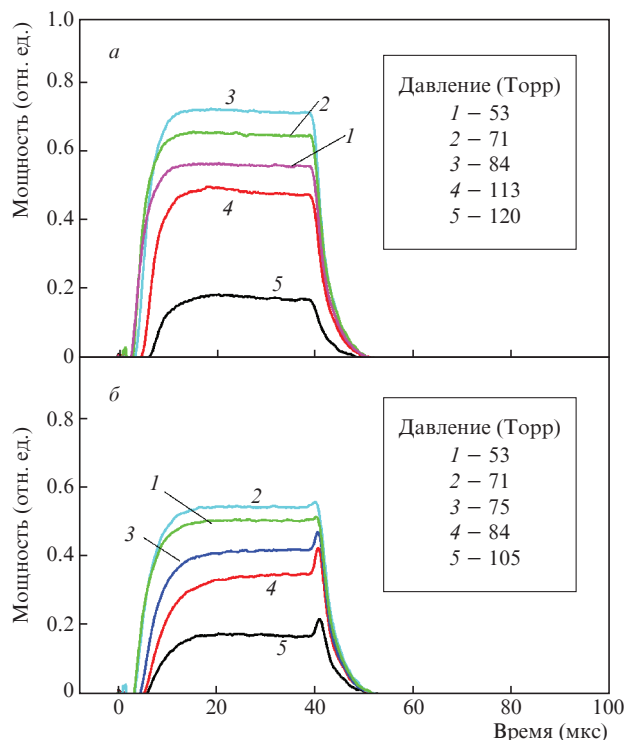


Рис.7. Форма выходных лазерных импульсов на длине волны 2397 нм при различных давлениях. Напряженность СВЧ поля накачки  $E_{MW}$  составляла 3.6 (а) и 5.3 кВ/см (б).

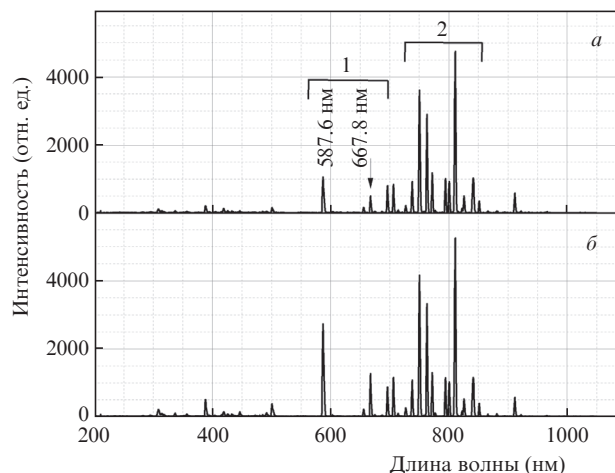


Рис.8. Характерные спектры свечения плазмы гелий-аргонового ГРВЛ, измеренные через боковую поверхность полого световода. Соотношение парциальных давлений He и Ar составляло 10:1 при суммарном давлении 52.5 Торр. Напряженность СВЧ поля накачки  $E_{MW}$  составляла 3.6 (а) и 5.3 кВ/см (б). Квадратные скобки, обозначенные цифрами 1 и 2, показывают положение основных линий излучения атомов гелия и аргона соответственно.

ния инверсной населенности в гелий-аргоновом ГРВЛ. Основные механизмы заселения различных уровней энергии в плазме двухкомпонентных смесей благородных газов обсуждаются в обширной литературе по объемным газовым лазерам [28–38]. При этом рассматривается заселение высоколежащих уровней энергии за счет таких процессов, как возбуждение электронным ударом (в том числе из метастабильных состояний), диссоциативная рекомбинация гомоядерных и гетероядерных молекулярных ионов, передача энергии возбуждения при атомных

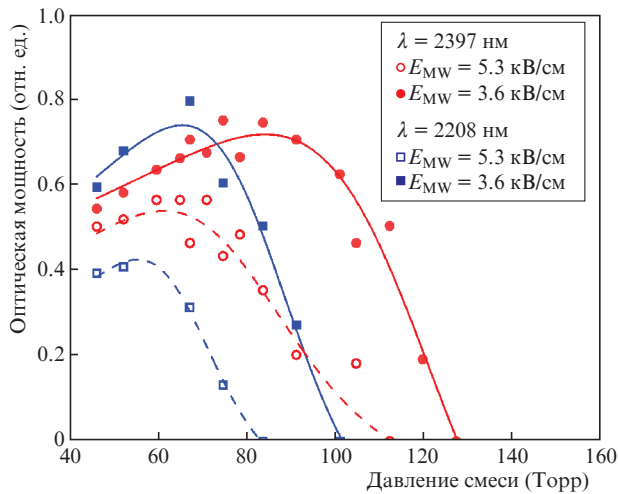


Рис. 9. Зависимости мощности лазерной генерации на длинах волн 2208 (синие квадраты) и 2397 нм (красные точки) от суммарного давления смеси He–Ar. Зависимости построены на основе амплитуд лазерных импульсов, показанных на рис. 6 и 7. Приведены данные, полученные как при напряженности СВЧ поля накачки  $E_{MW} = 3.6$  кВ/см (закрашенные символы), так и при  $E_{MW} = 5.3$  кВ/см (полые символы). Соотношение парциальных давлений He и Ar составляло 10:1. Аппроксимирующие кривые проведены для наглядности.

столкновениях. Однако вопрос о вкладе каждого из упомянутых процессов в общую населенность конкретного уровня остается дискуссионным, особенно в части заселения d-уровней активного газа.

Данные о зависимости выходной мощности ГРВЛ от давления газовой смеси, извлеченные из рис. 6 и 7, обобщены на рис. 9. При низких давлениях (~50 Торр) газовый разряд проявлял нестабильность и полностью затухал при давлениях менее 45 Торр. Причиной такого поведения является, по-видимому, слишком низкая концентрация аргона, которая не может обеспечить достаточно высокую скорость ионизации атомов Ar за счет столкновений с электронами или возбужденными атомами гелия. Отметим, что при низких давлениях генерация имела место на обеих длинах волн 2208 и 2397 нм вплоть до полного погасания разряда.

Зависимости мощности генерации от давления (рис. 9) демонстрируют похожее поведение для обеих длин волн генерации и для различных мощностей СВЧ накачки. Рассмотрим для определенности мощность генерации на длине волны 2397 нм при напряженности электрического СВЧ поля накачки  $E_{MW} = 5.3$  кВ/см (рис. 9, красные окружности). При повышении давления газовой смеси выше 45 Торр выходная мощность незначительно возрастает, достигая максимального значения при некотором давлении (в данном случае ~65 Торр), после которого наблюдается спад выходной мощности вплоть до полного затухания лазерной генерации (в данном случае при ~115 Торр). При этом газовый разряд продолжал стабильно гореть вплоть до максимального давления смеси (180 Торр), использовавшегося в наших экспериментах. Подавление лазерной генерации, наблюдаемое при повышении давления, возможно, связано с релаксацией населенности верхнего лазерного уровня, вызываемой атомными столкновениями.

При постоянном давлении газовой смеси, а следовательно при фиксированной скорости столкновительной релаксации, мощность генерации повышалась при умень-

шении мощности СВЧ накачки. Однако вопрос о конкретных механизмах, способствующих при этом росту инверсной населенности на переходах  $3d \rightarrow 4p'$ , остается открытым. Дальнейшие исследования в этом направлении могут выявить новые возможности по увеличению выходной мощности гелий-аргонового ГРВЛ.

## 4. Заключение

Впервые продемонстрирован гелий-аргоновый газоразрядный волоконный лазер. Используя СВЧ излучение на несущей частоте 2.45 ГГц для поддержания газового разряда в револьверном световоде, заполненном газовой смесью He–Ar в соотношении 10:1, достигнута лазерная генерация на длинах волн 2208 и 2397 нм, соответствующих переходам  $3d \rightarrow 4p'$  в атомах аргона. Суммарная выходная мощность гелий-аргонового ГРВЛ составила ~1.3 мВт. Проведенные в настоящей работе исследования формы лазерных импульсов в зависимости от мощности СВЧ накачки и от давления газовой смеси He–Ar продемонстрировали возможность повышения выходной мощности ГРВЛ и необходимость дальнейших исследований касающихся как оптимизации схемы накачки, так и выяснения механизмов создания инверсной населенности в ГРВЛ с малым (~100 мкм) диаметром плазменного канала.

Достигнутые результаты указывают на большие перспективы газоразрядных волоконных лазеров для получения лазерной генерации на новых длинах волн, перекрывающих широкий спектральный диапазон от УФ до средней ИК области.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-19-00542, <https://rscf.ru/project/22-19-00542/>.

- Vakhrushev A.S., Umnikov A.A., Oleinik D.I., Khagai A.M., Alyshev S.V., Firstova E.G., Kharakhordin A.V., Iskhakova L.D., Melkumov M.A., Firstov S.V. *Opt. Laser Technol.*, **180**, 111526 (2025).
- Alyshev S., Khagai A., Umnikov A., Firstov S. *Photonics*, **11**, 663 (2024).
- Khagai A.M., Alyshev S.V., Vakhrushev A.S., Riumkin K.E., Umnikov A.A., Firstov S.V. *J. Non-Cryst. Solids*, **16**, 100126 (2022).
- Aydin Y.O., Fortin V., Vallée R., Bernier M. *Opt. Lett.*, **43**, 4542 (2018).
- Lemieux-Tanguay M., Fortin V., Boilard T., Paradis P., Maes F., Talbot L., Vallée R., Bernier M. *Opt. Lett.*, **47**, 289 (2022).
- Lemieux-Tanguay M., Boilard T., Paradis P., Vallée R., Bernier M. *APL Photonics*, **9**, 071301 (2024).
- Boilard T., Fortin V., Lemieux-Tanguay M., Paradis P., Du Teilleul P., Carrée J.-Y., Vallée R., Bernier M. *Opt. Lett.*, **49**, 2677 (2024).
- Koltashev V.V., Denker B.I., Galagan B.I., Snopatin G.E., Sukhanov M.V., Sverchkov S.E., Velmuzhov A.P., Plotnichenko V.G. *Opt. Laser Technol.*, **161**, 109233 (2023).
- Галаган Б.И., Вельмузов А.П., Денкер Б.И., Колташев В.В., Плотниченко В.Г., Свэрчков С.Е., Снопатин Г.Е., Суханов М.В., Фролов М.П. *Прикладная фотоника*, **10**, 42 (2023).
- Koltashev V.V., Frolov M.P., Leonov S.O., Sverchkov S.E., Galagan B.I., Korostelin Yu.V., Skasyrsky Ya.K., Snopatin G.E., Sukhanov M.V., Velmuzhov A.P., Kozlovsky V.I., Denker B.I., Plotnichenko V.G. *Opt. Lett.*, **49**, 2737 (2024).
- Song W., Zhang X., Zhang Q., Hou Y., Wang P. *Opt. Lett.*, **49**, 3636 (2024).
- Zhou Z., Huang W., Cui Y., Li H., Pei W., Li X., Li Z., Wang M., Wang Z. *Opt. Lett.*, **47**, 5785 (2022).
- Song W., Yao J., Zhang X., Zhang Q., Hou Y., Wu J., Wang P. *Opt. Express*, **32**, 14532 (2024).

14. Cui Y., Tian X., Rao B., Li H., Huang W., Pei W., Wang M., Chen Z., Wang Z. *High Power Laser Sci. Engineering*, **11**, e10 (2023).
15. Huang W., Wang Z., Zhou Z., Pei W., Cui Y., Li X., Li Z., Chen J. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **30**, 1400107 (2024).
16. Astapovich M.S., Gladyshev A.V., Khudyakov M.M., Kosolapov A.F., Likhachev M.E., Bufetov I.A. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **31**, 78 (2019).
17. Gladyshev A., Yatsenko Y., Kolyadin A., Kompanets V., Bufetov I. *Opt. Mater. Express*, **10**, 3081 (2020).
18. Gladyshev A.V., Dubrovskii D.S., Kosolapov A.F., et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **30**, 1400207 (2024).
19. Гладышев А.В., Комиссаров Д.Г., Нефедов С.М., Косолапов А.Ф., Вельмискин В.В., Минеев А.П., Буфетов И.А. *Краткие сообщения по физике ФИАН*, № 9, 62 (2023) [*Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **50**, 403 (2023)].
20. Gladyshev A.V., Komissarov D.G., Nefedov S.M., Kosolapov A.F., Velmiskin V.V., Mineev A.P., Bufetov I.A. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **30**, 0900107 (2024).
21. Буфетов И.А., Гладышев А.В., Нефедов С.М. и др. *Доклады РАН. Физика, технические науки*, **509**, 3 (2023).
22. Smith P.W. *Appl. Phys. Lett.*, **19**, 132 (1971).
23. Jensen R.E., Tobin M.S. *Appl. Phys. Lett.*, **20**, 508 (1972).
24. Гончуков С.А., Корнилов С.Т., Петровский В.Н., Проценко Е.Д., Рубежный Ю.Г. *Квантовая электроника*, **2**, 406 (1975) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **5**, 232 (1975)].
25. Degnan J.J. *Appl. Phys.*, **11**, 1 (1976).
26. Chen Y., Petrovich M.N., Fokoua E.N., et al. *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2024, Technical Digest Series* (Optica Publishing Group, 2024, paper Th4A.8).
27. Adamu A.I., Hassan M.R.A., Chen Y. et al. *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2024, Technical Digest Series* (Optica Publishing Group, 2024, paper M3J.1).
28. Сорокин А.Р. *Квантовая электроника*, **10**, 308 (1983) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **13**, 165 (1983)].
29. Басов Н.Г., Баранов В.В., Данилычев В.А., Дудин А.Ю., Заярный Д.А., Семенова Л.В., Устиновский Н.Н., Холин И.В., Чугунов А.Ю. *Квантовая электроника*, **13**, 482 (1986) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **16**, 316 (1986)].
30. Дудин А.Ю., Заярный Д.А., Семенова Л.В., Устиновский Н.Н., Холин И.В., Чугунов А.Ю. *Квантовая электроника*, **18**, 921 (1991) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **21**, 833 (1991)].
31. Мельников С.П., Синянский А.А. *ЖТФ*, **62**, 159 (1992).
32. Shon J.W., Kushner M.J. *J. Appl. Phys.*, **75**, 1883 (1994).
33. Заярный Д.А., Дракин А.Е., Ионин А.А., Льдов А.Ю., Сеницын Д.В., Устиновский Н.Н., Холин И.В. *Квантовая электроника*, **48**, 1174 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 1174 (2018)].
34. Weber M.J. *Handbook of Lasers* (CRC Press, 2001).
35. Иванов В.А. *УФН*, **162**, 35 (1992) [*Phys. Usp.*, **35**, 17 (1992)].
36. Hoskinson A.R., Gregorio J., Hopwood J., Galbally-Kinney K., Davis S.J., Rawlins W.T. *J. Appl. Phys.*, **119**, 233301 (2016).
37. Emmons D.J., Weeks D.E. *J. Appl. Phys.*, **121**, 203301 (2017).
38. Eshel B., Perram G.P. *J. Opt. Soc. Am. B*, **35**, 164 (2018).