

УДК 621.373.8

ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С СВЧ НАКАЧКОЙ

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

Впервые создан газоразрядный волоконный лазер на световоде с полой сердцевиной. Диаметр сердцевины составлял 130 мкм. В качестве накачки использовалось СВЧ излучение с частотой 2.45 ГГц. В качестве активной среды использовалась смесь газов He:Ar:Xe в соотношении 100:10:1. Суммарное давление газа в сердцевине световода составляло 130 Торр. На выходе из волоконного резонатора, образованного широкополосными зеркалами, наблюдалась лазерная генерация на длине волны линии атома ксенона 2027 нм. Полученный результат открывает новые перспективы для создания газоразрядных волоконных лазеров, которые сочетают в себе преимущества как волоконных, так и газоразрядных лазеров, и могут найти применение в различных областях науки и техники.

Ключевые слова: полый световод, волоконный лазер, газовый лазер, газовый разряд, СВЧ.

Введение. Создание световодов с полой сердцевиной открыло путь к разработке лазеров нового типа – газовых волоконных лазеров (ГВЛ). Используя в качестве активной среды газ, заполняющий полую сердцевину световода, такие источники излучения могут объединить в себе преимущества как волоконных лазеров (компактность, низкий порог генерации, одномодовое излучение), так и газовых лазеров (высокая выходная мощность, малая ширина линии генерации).

За последние ~10 лет наиболее активно шло развитие ГВЛ, генерирующих в среднем ИК диапазоне на длинах волн более 2 мкм, что обусловлено сочетанием несколь-

ИОФ РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е. М. Дианова, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: alexglad@fo.gpi.ru.

ких факторов. Во-первых, средний ИК диапазон представляет большой интерес для практических применений благодаря наличию в нём линий поглощения многих химических соединений. Во-вторых, современное состояние технологии полых световодов (ПС) уже позволяет изготавливать световоды с достаточно низкими оптическими потерями в спектральном диапазоне 2–5 мкм. При этом важно, что изготовление микроструктурированной оболочки ПС основывается на хорошо освоенной технологии кварцевого стекла. И, в-третьих, газовые смеси, как активная среда ГВЛ, предоставляют широкий выбор лазерных переходов в среднем ИК диапазоне.

Накачка газовых активных сред может в принципе осуществляться различными методами, включающими накачку оптическим (лазерным) излучением, газовый разряд или химические реакции. До настоящего времени все ГВЛ, реализованные на практике, использовали оптическую накачку.

В настоящее время продемонстрированы две разновидности волоконных лазеров с оптической накачкой. Следуя хронологии, это, во-первых, рамановские ГВЛ, в которых усиление достигается за счет нелинейного взаимодействия излучения с газовой средой, в данном случае за счет вынужденного комбинационного (или рамановского) рассеяния. И, во-вторых, ГВЛ, в которых усиление достигается за счет инверсии населенностей между рабочими лазерными уровнями в атомах или молекулах газа, созданной оптической накачкой. Длины волн генерации лазеров обоих типов достигают примерно 4.5 мкм. Дальнейшее продвижение в средний ИК диапазон ограничено резким возрастанием оптических потерь в кварцевом стекле, из которого обычно изготавливается оболочка полых световодов.

Но характеристики ГВЛ с оптической накачкой ограничиваются предельными характеристиками лазера накачки. Для того чтобы в полной мере реализовать возможности полых световодов (устойчивость к высокоинтенсивному излучению, широкий спектральный диапазон пропускания и т. д.) в полностью волоконных оптических схемах, необходимо решить задачу генерации лазерного излучения непосредственно в ПС, не используя в качестве источника накачки другие волоконные лазеры на световодах с твердотельной сердцевиной с присущими им ограничениями. Одним из возможных подходов к решению данной задачи является создание газоразрядных волоконных лазеров (ГРВЛ) на волоконных световодах с полый сердцевиной.

Конструкция волноводного газоразрядного лазера (но еще не в волоконном исполнении) была впервые реализована в 1971 году в виде гелий-неонового лазера на 633 нм [1], в 1972 году в виде CO_2 лазера [2]. Отметим также демонстрацию волноводного

гелий-неонового лазера на 3.39 мкм в 1975 году [3]. Во всех этих случаях в качестве волновода для генерируемого излучения использовался стеклянный капилляр с внутренним диаметром 3.3 мм [2], 430 мкм [1] и 510 мкм [3]. Уменьшение диаметра волновода способствует снижению изгибных оптических потерь в нем. Кроме того, уменьшение диаметра разрядной трубки обычно приводит к росту оптического усиления в плазме газового разряда за счет опустошения нижнего лазерного уровня при столкновении атомов со стенками. Но уже при внутреннем диаметре капилляров около 0.5 мм начинает проявляться неустойчивость электрического разряда в них, а при дальнейшем уменьшении диаметра капилляра поддержание разряда становится крайне проблематичным из-за больших потерь электронов из разряда вследствие их ухода на стенки капилляра. В итоге волноводные газовые лазеры на капиллярных жестких волноводах с внутренним диаметром порядка 0.5 мм применяются и в настоящее время, но использование в них капилляров в качестве волноводов и связанное с этим требование прямолинейности волновода (для обеспечения низкого уровня оптических потерь [4]) ограничивает их длину обычно несколькими десятками сантиметров.

Изучение возможностей создания волоконных газоразрядных лазеров началось около 15 лет тому назад, вскоре после создания волоконных световодов с поллой сердцевинной. Основной проблемой здесь является сложность поддержания плазмы в тонкой (диаметром порядка 100 мкм) сердцевине. Такой порядок величины диаметра сердцевины используется практически во всех исследованиях ПС и определяется требованием приемлемого уровня изгибных оптических потерь ПС. Первые исследования на пути к ГРВЛ были выполнены в 2007–2008 г.г. в Политехническом университете Гонконга [5]. Затем попытка создания ГРВЛ была предпринята в серии работ в университете г. Бат (Великобритания) [6]. В обоих случаях разряд в ПС возбуждался постоянным напряжением величиной в десятки киловольт. Сообщалось о получении оптического усиления в ПС с электрической накачкой [7]. Для накачки использовался электрический разряд постоянного тока с напряжением до 40 кВ. Сердцевина ПС заполнялась He-Xe смесью в соотношении 5:1 при полном давлении ~ 10 Торр. Диаметр сердцевины ПС револьверного типа [7] составлял $d_C = 120$ мкм. При добавлении 100% отражающего зеркала с одной стороны световода, на выходе с другой стороны световода уровень люминесценции на переходах нейтральных атомов Хе на длинах волн 3.11, 3.37 и 3.51 мкм возрастал более чем в 2 раза, что интерпретировалось авторами как усиление излучения. Но ГРВЛ не были продемонстрированы, и данный результат до настоящего времени не получил дальнейшего развития.

Наконец, в ряде работ, выполненных в университете г. Лимож (Франция) исследовались возможности возбуждения электрического разряда в полых волоконных световодах с помощью электромагнитного поля СВЧ-диапазона [см. обзор 8]. Действительно, по ряду параметров схемы газовых лазеров с возбуждением СВЧ-разрядом могут иметь существенное преимущество по сравнению с возбуждением постоянным напряжением или полями высокой частоты (ВЧ). Но выбранная в [8] схема накачки, включающая поверхностные электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль плазменного столба в сердцевине ПС, устанавливает нижнюю границу концентрации электронов в сердцевине, определяемую частотой СВЧ-излучения ν (плазменная частота разряда должна превышать ν для существования поверхностных волн). В результате плазма разряда имеет повышенную электронную температуру, что дополнительно увеличивает потери энергии из разряда в полую сердцевину малого диаметра.

Анализ вышеупомянутых работ позволяет сделать следующие выводы. Применение постоянного напряжения для возбуждения электрического разряда в ПС с диаметрами полых сердцевины порядка 100 мкм требует высоких значений напряжения (порядка десятков кВ), что существенно ограничивает возможности применения подобных устройств. Кроме того, использование постоянного напряжения сопровождается необходимостью расположения электродов внутри газового объема ГРВЛ, что повышает вероятность нарушения волноводных свойств полых сердцевины световода частицами, формирующимися при деградации электродов в процессе работы. Применение полей диапазона ВЧ позволяет обойтись без электродов, но в остальном мало отличается от постоянного тока [9]. Кроме того, генерация необходимых значений напряженности поля в ВЧ диапазоне представляет существенно большие трудности, чем при постоянном напряжении или в диапазоне СВЧ.

Применение же для поддержания разряда электромагнитных волн в диапазоне СВЧ, в частности на частоте порядка 3 ГГц, приводит к тому, что амплитуда колебаний электронов в поле становится порядка или меньше диаметра полых сердцевины, что снижает вероятность гибели электронов на стенках световода по сравнению с полями более низких частот. Кроме того, широкое использование магнетронов, работающих на частоте 2.45 ГГц, в бытовой технике (в широко распространенных микроволновых печах) сделало источники такого излучения сравнительно дешевыми и широко доступными. Возможность поддержания СВЧ-разряда в инертных газах, заполняющих полую сердцевину револьверных световодов (РС) [7], была недавно продемонстрирована в [10, 11]. Таким образом, на основании результатов рассмотренных выше исследований

представляется целесообразным выполнить экспериментальную проверку возможности получения лазерной генерации, используя в качестве активной среды плазму газового СВЧ-разряда в сердцевине полого волоконного световода. Эта задача и явилась целью настоящей работы.

Экспериментальная установка: СВЧ накачка. Для доставки СВЧ-излучения в сердцевину световода была выбрана схема ввода СВЧ-излучения в ПС через его боковую поверхность (при направлении вектора электрического поля перпендикулярно оси ПС). Очевидным преимуществом такой схемы является отсутствие необходимости использования высоких напряжений (порядка десятка киловольт) для поддержания разряда. Предварительные эксперименты, показавшие возможность подобного возбуждения СВЧ-разряда в ПС, были выполнены в [10, 11].

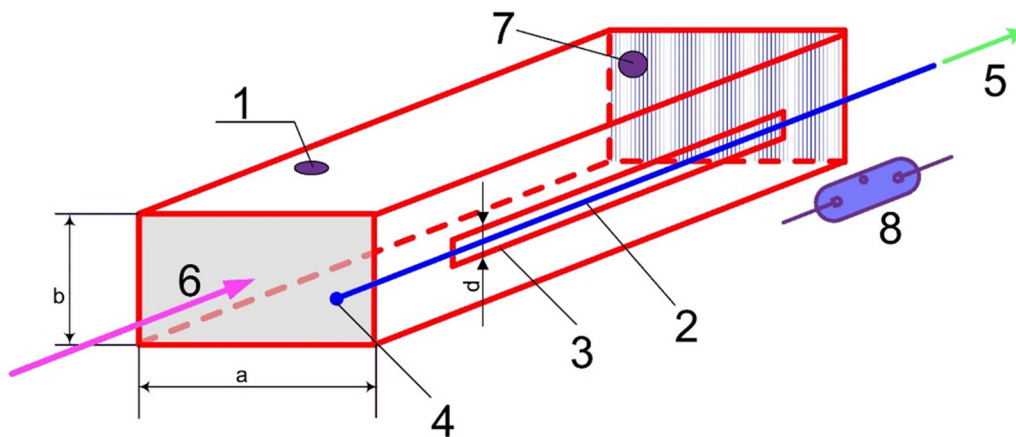


Рис. 1: *Схема эксперимента: 1 – участок прямоугольного СВЧ-волновода, $a = 9$ см, $b = 4.5$ см, 2 – волоконный световод с поллой сердцевиной, 3 – продольная щель в боковой стенке волновода, 4 – запаянный конец волоконного световода, 5 – подсоединение волоконного световода к вакуумной системе и к системе заполнения газом, 6 – направление распространения электромагнитного излучения по волноводу от магнетрона, 7 – поршень, отражающий СВЧ-излучение назад и формирующий таким образом стоячую волну; 8 – ртутная лампа для инициирования СВЧ-разряда.*

В качестве источника СВЧ-поля в экспериментах для поддержания газового разряда нами использовался магнетрон, работающий на частоте $\nu = 2.45$ ГГц в импульсном режиме. Частота следования импульсов составляла ~ 400 Гц, длительность импульса ~ 20 мкс. Максимальная пиковая мощность могла достигать 8 кВт. Излучение магнетрона вводилось в волновод прямоугольного сечения 9 см \times 4.5 см, который являлся

одномодовым для излучения магнетрона, и по нему распространялась только волна типа H_{10} . Поперечные размеры волновода слишком велики по сравнению с диаметром сердцевины ПС, чтобы плазма в сердцевине световода могла эффективно поглощать энергию СВЧ-поля. Поэтому для своеобразной фокусировки СВЧ излучения на ПС использовалась структура типа щелевой антенны (рис. 1). При этом РС с полый сердцевинной размещался в щели на меньшей боковой поверхности волновода. Более подробно описание схемы возбуждения СВЧ-разряда в ПС можно найти в [10].

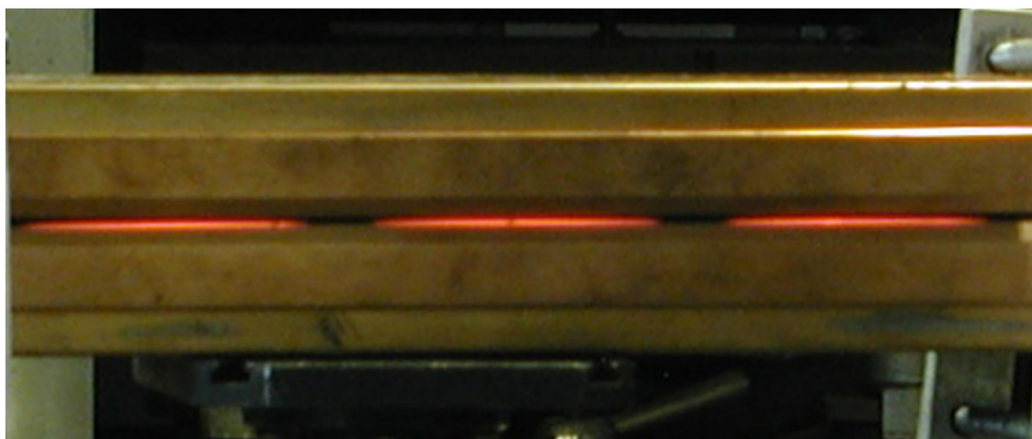


Рис. 2: СВЧ-разряд в РС, заполненном Ne под давлением 20 Торр на фоне боковой поверхности СВЧ-волновода со щелью посередине. РС с диаметром полый сердцевины 100 мкм размещен между специальными накладками, уменьшающими эффективную ширину щели. В СВЧ-волноводе формировалась стоячая волна за счет интерференции падающей и отраженной от короткозамыкающего поршня волн.

Известно, что для поджигания (или инициирования) разрядов всех типов (в том числе и под действием СВЧ-поля) требуются значительно более высокие значения электрического поля, чем для поддержания уже горящего разряда. Поэтому в настоящей работе, аналогично [10], для инициирования электрического разряда в волноводе под действием СВЧ-поля создавалась предварительная ионизация в сердцевине ПС с помощью УФ-излучения (использовалось излучение ртутной лампы с мощной линией на $\lambda = 253$ нм). В результате электрический разряд зажигался и поддерживался СВЧ-излучением во всем отрезке ПС, расположенном в щели на боковой поверхности СВЧ-волновода, т. е. на длине около 300 мм. Типичная фотография волоконного световода с горящим в нем разрядом представлена на рис. 2.

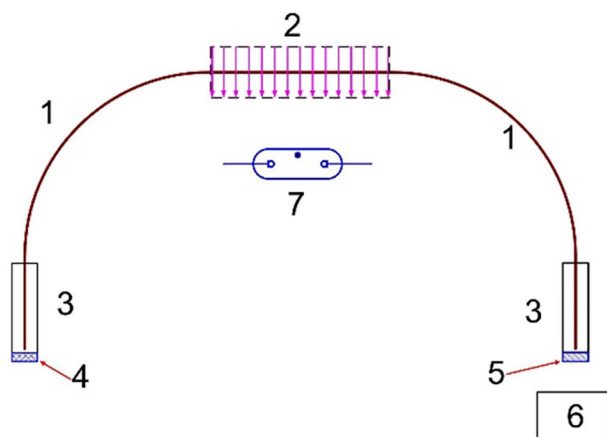


Рис. 3: Схема эксперимента: 1 – РС револьверного типа, длина 120 см; 2 – область СВЧ-поля, длина 32 см; 3 – миниатюрные вакуумные камеры, подключенные к системе заполнения газом; 4 – глухое лазерное зеркало; 5 – выходное лазерное зеркало; 6 – регистрирующая аппаратура (фотоприемник, спектроанализатор); 7 – ртутная лампа для иницирования СВЧ-разряда.

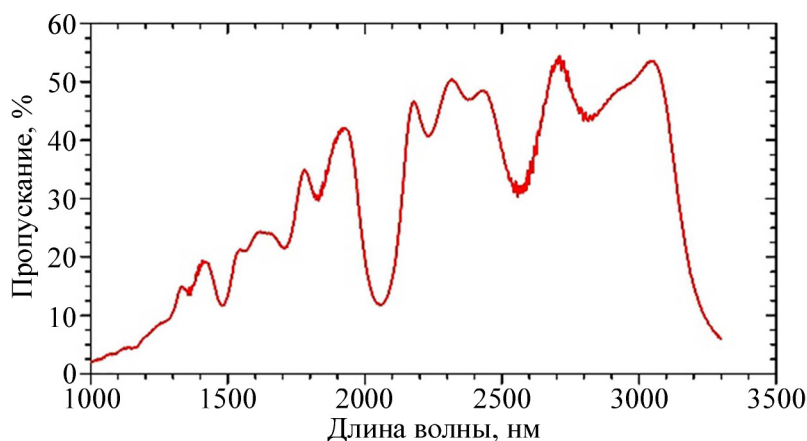


Рис. 4: Спектр пропускания выходного лазерного зеркала (п. 5 на рис. 3).

Ксеноновый ГРВЛ и полученные результаты. Схема созданного в настоящей работе волоконного лазерного резонатора представлена на рис. 3. Исходя из известных данных по газовому составу смеси для ксенонового лазера, для первых экспериментов была выбрана смесь He:Ar:Xe в соотношении 100:10:1 при суммарном давлении 130 Торр. Концы РС герметично вводились в миниатюрные вакуумные камеры (3), подключенные к вакуумной системе и к системе заполнения газами. Конструкции вакуумных камер

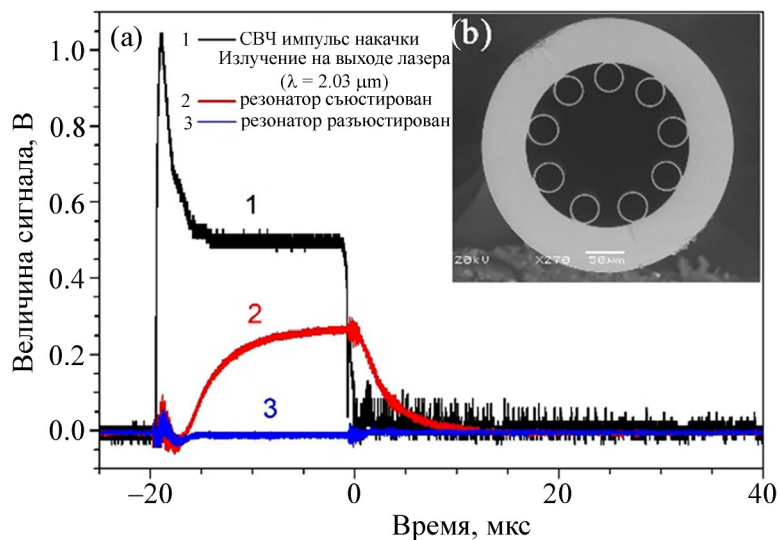


Рис. 5: (а) Осциллограммы СВЧ-импульса накачки и излучения ксенонового ГРВЛ в различных условиях; (б) Поперечное сечение РС, на котором получена генерация ГРВЛ.

также включали зеркала лазерного резонатора (4) и (5) и допускали их юстировку. Глухое зеркало (4) резонатора представляло собой полированную алюминиевую пластину. Выходное зеркало (5) имело высокий коэффициент отражения на возможных длинах волн генерации ксенонового лазера за счет использования многослойного интерференционного покрытия. Спектр пропускания выходного зеркала представлен на рис. 4. Часть лазерного РС длиной 32 см помещалась в область импульсного СВЧ-поля (рис. 3, (2)). Максимальная напряженность электрического СВЧ-поля, направленного перпендикулярно оси РС, достигала в экспериментах величины ~ 1 кВ/см. Вид поперечного сечения РС показан на рис. 5(b). РС изготавливался из чистого кварцевого стекла (марки F300 фирмы Heraeus). Диаметр полый сердцевины РС в данных экспериментах составлял 130 мкм.

Непосредственно после включения магнетрона разряд самостоятельно не загорался. При включенном магнетроне разряд в РС инициировался с помощью кратковременного (~ 1 с) облучения УФ-излучением ртутной лампы (рис. 3, (7)). На выходе лазера в позиции 6 (рис. 3) сначала располагался фотодетектор (фотосопротивление), чувствительный в спектральном диапазоне от 1 до 5 мкм. С помощью осциллографа одновременно регистрировались осциллограммы огибающей СВЧ-импульса накачки (рис. 5, (1)) и сигнал с фотодетектора (рис. 5, (2) или (3)). Из-за высокого уровня помех со стороны

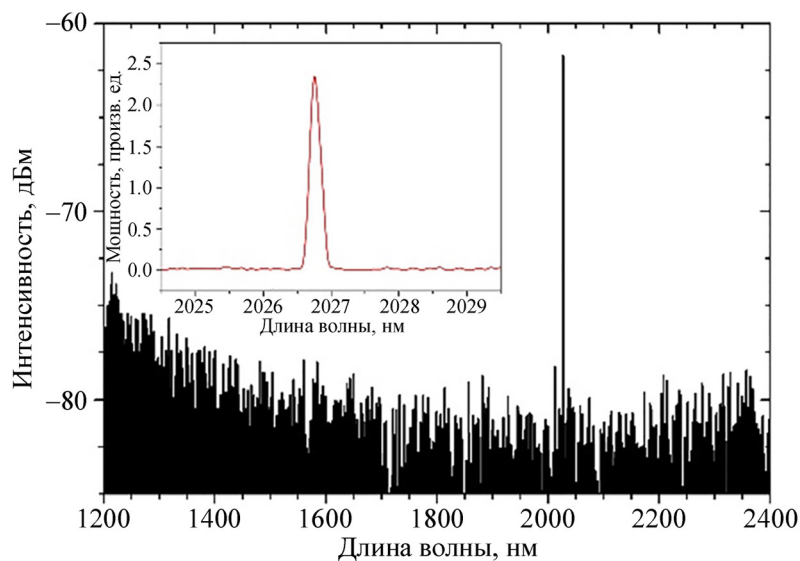


Рис. 6: Спектр излучения ксенонового газоразрядного волоконного лазера.

СВЧ, на сигнале с фотодетектора наблюдались наведенные помехи, особенно в начале и по окончании импульсов СВЧ. При разъюстированных зеркалах оптический сигнал на фотодетекторе не наблюдался (рис. 5, (3)). Но после их юстировки на фотодетекторе наблюдался оптический сигнал, форма которого представлена на рис. 5, (2). С помощью сравнительно широкополосных светофильтров было определено, что длина волны регистрируемого излучения в диапазоне чувствительности фотосопротивления (1–5 мкм) принадлежит только интервалу 1.75–2.25 мкм. После чего спектр излучения на выходе лазера был измерен с помощью спектроанализатора Yokogawa AQ6375B (рис. 6). Длина волны генерации составила 2026.8 нм, что с точностью до сотых нанометра совпадает с длиной волны линии люминесценции ксенона. Ширина линии генерации составила ≈ 0.2 нм по уровню $1/2$, т. е. порядка величины спектрального разрешения спектроанализатора. Максимальная мощность генерации составила ~ 1 мВт.

Заключение. Впервые создан лазер нового типа – газоразрядный волоконный лазер. Полученные результаты открывают возможности совершенствования конструкции таких лазеров с целью создания более компактных и эффективных ГРВЛ. В ходе дальнейших исследований возможно, варьируя газовый состав и интенсивность накачки, а также используя спектрально-селективные резонаторы, получить генерацию ксенонового лазера и на других длинах волн, прежде всего в диапазоне 3–3.5 мкм. И, наконец, предстоит изучить возможности использования других газов (например, неона) для создания ГРВЛ.

Мы полагаем, что ГРВЛ, используя сочетание преимуществ волоконных и газоразрядных лазеров, найдут многочисленные применения в различных областях науки и техники.

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

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] P. W. Smith, *Applied Physics Letters* **19**, 132 (1971). DOI: 10.1063/1.1653855.
- [2] R. E. Jensen, M. S. Tobin, *Applied Physics Letters* **20**, 508 (1972). DOI: 10.1063/1.1654037.
- [3] С. А. Гончуков, С. Т. Корнилов, В. Н. Петровский и др., *Квантовая электроника* **2**, 406 (1975). DOI: 10.1070/QE1975v005n02ABEH010916.
- [4] E. A. J. Marcatili, R. A. Schmelzter, *Bell Syst. Tech. J.* **43**, 1783 (1964). DOI: 10.1002/j.1538-7305.1964.tb04108.x.
- [5] X. Shi, X. B. Wang, W. Jin, M. S. Demokan, *Applied Physics B* **91**, 377 (2008). DOI: 10.1007/s00340-008-3007-5.
- [6] S. A. Bateman, W. Belardi, F. Yu, et al., In *Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San Jose, CA, USA, 8–13 June 2014. Postdeadline Paper Digest, paper STh5C.10.
- [7] I. A. Bufetov, A. F. Kosolapov, A. D. Pryamikov, et al., *Fibers* **6**, 39 (2018). DOI: 10.3390/fib6020039.
- [8] B. Debord, F. Amrani, L. Vincetti, et al., *Fibers* **7**, 16 (2019). DOI: 10.3390/fib702001.
- [9] Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда* (М., Наука, 1987).
- [10] A. Gladyshev, S. Nefedov, A. Kolyadin, et al., *Photonics* **9**, 752 (2022). DOI: 10.3390/photonics9100752.
- [11] И. А. Буфетов, А. В. Гладышев, С. М. Нефедов и др., *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки* **509**, 3 (2023).

Поступила в редакцию 3 августа 2023 г.

После доработки 7 августа 2023 г.

Принята к публикации 8 августа 2023 г.