

УДК 537.525.99

ПОДДЕРЖАНИЕ СВЧ-РАЗРЯДА В ПОЛОЙ СЕРДЦЕВИНЕ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ ДЛЯ ГАЗОВЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

© 2023 г. Член-корреспондент РАН И. А. Буфетов^{1,*}, А. В. Гладышев¹, С. М. Нефедов², А. Ф. Косолапов¹, В. В. Вельмискин¹, П. А. Гончаров², А. П. Минеев²

Поступило 02.12.2022 г.

После доработки 02.12.2022 г.

Принято к публикации 09.12.2022 г.

Впервые измерены минимальные значения напряженности электрического СВЧ-поля частотой 2.45 ГГц, необходимые для поддержания разряда в ряде благородных газов (аргон, неон и гелий) в волоконных световодах с полыми сердцевинами малого диаметра вплоть до 100 мкм. Минимальные значения напряженности составляют для всех трех газов (2.5–2.8) кВ/см при давлении аргона ~50 торр, неона ~300 торр и гелия ~500 торр.

Ключевые слова: световоды с поллой сердцевиной, газоразрядный волоконный лазер, СВЧ-разряд

DOI: 10.31857/S2686740023020037, **EDN:** UOZEIC

ВВЕДЕНИЕ

Волоконные световоды с поллой сердцевиной (СПС) позволили существенно расширить возможности волоконных лазеров, обычно создаваемых на основе световодов с твердотельной сердцевиной. Например, следствием бурного развития СПС стало создание газовых волоконных лазеров, генерирующих в УФ- [1] и среднем ИК-диапазонах [1–4], даже несмотря на то, что оболочка СПС изготовлена из кварцевого стекла, имеющего сильное фундаментальное поглощение в этих областях спектра. При заполнении поллой сердцевины рамановски-активными газами была продемонстрирована генерация одномодового излучения в среднем ИК-диапазоне [2]. При этом большая величина рамановского сдвига частоты в легких молекулярных газах позволяет преобразовывать излучение из ближнего в средний ИК-диапазон всего лишь за 1–2 каскада (например, 1.56 → 4.4 мкм [2] или 1.03 → 1.49 → 2.68 мкм [3]). Появилась также возможность использовать газы, заполняющие полую сердцевину, в качестве активной среды путем создания в них инверсной заселенности (например, [4]). Но подобные схемы лазеров до настоящего времени удалось реа-

лизовать с использованием только оптической накачки. Учитывая многие положительные качества волоконных лазеров, в качестве источников накачки часто используются именно волоконные лазеры, но со стеклянной сердцевиной. Поэтому характеристики газовых волоконных лазеров (ГВЛ) 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 СПС, не используя в качестве источника накачки другие волоконные лазеры на световодах с твердотельной сердцевиной с присущими им ограничениями.

Возможным решением этой задачи является создание газоразрядных волоконных лазеров (ГРВЛ) [5]. Но здесь возникает противоречие: для обеспечения световодных свойств СПС в среднем ИК-диапазоне диаметр их поллой сердцевины должен быть порядка 100 мкм, а уменьшение диаметра газоразрядного канала до величин менее примерно 500 мкм приводит к резкому возрастанию потерь электронов из разряда и, как следствие, к значительному увеличению необходимых значений электрического поля для поддержания разряда. Например, для поддержания разряда постоянного тока в световоде с диаметром поллой сердцевины $d_c = 120$ мкм и длиной до 1 м оказалось необходимым использовать напряжение порядка 40 кВ [6]. Первые исследования возбуждения плазмы СВЧ-разряда в СПС продемон-

¹ Федеральный исследовательский центр “Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук”, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва, Россия

² Федеральный исследовательский центр “Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук”, Москва, Россия

*E-mail: iabuf@fo.gpi.ru

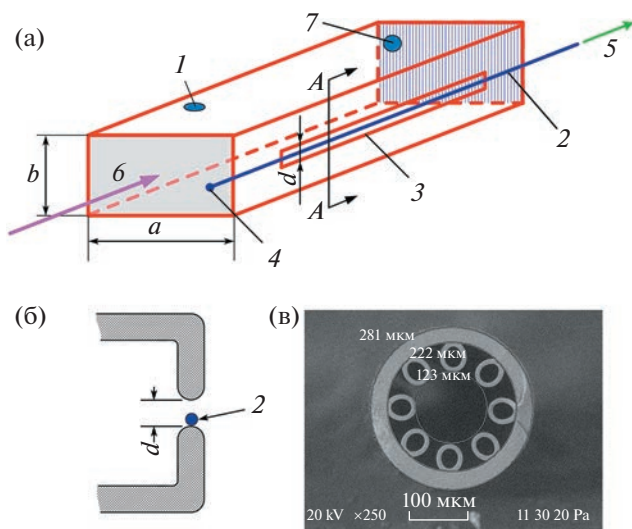


Рис. 1. а – Схема эксперимента. 1 – секция прямоугольного СВЧ-волновода, $a = 9$ см, $b = 4.5$ см, 2 – СПС, 3 – продольная щель в узкой стороне волновода длиной 30 см, 4 – запаянный конец СПС, 5 – подсоединение СПС к вакуумной системе и к системе заполнения газами, 6 – направление распространения H_{10} волны по волноводу от магнетрона, 7 – закорачивающий поршень для отражения излучения и формирования стоячей волны в волновод; б – частичное сечение СВЧ-волновода по А–А, показывающее закругленную форму краев щели и положение СПС в щели во время эксперимента; в – изображение поперечного сечения СПС, полученное на сканирующем электронном микроскопе, $d_c = 125$ мкм.

стрировали возможность такого подхода [7]. Но с помощью выбранной в работе [7] схемы, основанной на передаче энергии в разряд за счет возбуждения поверхностной электромагнитной волны, распространяющейся вдоль СПС, не удалось возбудить разряд в СПС на длине более 4 см [8]. По-видимому, причиной этого являются потери энергии при распространении поверхностной волны вдоль плазменного столба в СПС. Наконец, совсем недавно было предложено использовать схему, подобную щелевой антенне в СВЧ-волновод, для возбуждения разряда в СПС. С помощью этой схемы была продемонстрирована возможность поддерживать СВЧ-разряд длиной 25 см при средней мощности СВЧ-накачки менее 20 Вт и указана очевидная возможность кратного увеличения длины разряда в СПС с использованием той же схемы [9].

Для дальнейших работ по реализации схемы ГРВЛ необходимо определить диапазон параметров (давление, напряженность электрического поля), при которых возможно поддержание СВЧ-разряда в СПС для различных газов, перспективных с точки зрения использования в качестве активной среды ГРВЛ.

Основы теории СВЧ-разрядов хорошо известны (см., например, [10]). Условия электрического пробоя и поддержания разряда определяются равновесием между процессами рождения и ухода свободных электронов из разрядного объема. При сравнительно высоких давлениях и малых диаметрах цилиндрического разрядного объема потери электронов из разряда обусловлены, главным образом, процессом диффузии электронов. Этот процесс характеризуется коэффициентом диффузии электронов, определяемым свойствами газа, и диффузионной длиной Λ , определяемой геометрией разрядного объема. Для длинных цилиндрических объемов (к которым близки рассматриваемые СПС) диффузионная длина пропорциональна радиусу цилиндра R : $\Lambda = R/2.405$ [10]. В случае СПС в качестве начального приближения можно считать, что диаметр полый сердцевины d_c и является диаметром соответствующего цилиндрического объема ($d_c = 2R$). Уменьшение величины Λ ведет к повышению потерь электронов из разряда и, соответственно, к повышению минимальной величины напряженности (E) электрического поля, достаточного как для пробоя газа (E_{BD}), так и для поддержания уже инициированного СВЧ-разряда (E_M). Как правило, для поддержания разряда требуется меньшая напряженность поля, чем для пробоя ($E_M < E_{BD}$) [11].

В литературе имеется большой объем данных о величинах напряженности электрического СВЧ-поля, достаточного для формирования плазмы (иначе говоря, для пробоя) в зависимости от давления для различных газов (см., например, [10]). Но все они получены для геометрии разряда, характеризующейся величиной диффузионной длины не менее 0.5 мм. В случае же СПС с диаметром полый сердцевины порядка 100 мкм диффузионная длина значительно меньше – $\Lambda \sim 20$ мкм, что существенно ужесточает требования к величине электрического поля для поддержания разряда по сравнению с ранее полученными данными.

Поэтому целью настоящей работы явилось экспериментальное исследование условий поддержания СВЧ-разряда в схеме, реализованной в работе [9], в различных благородных газах (аргон, неон, гелий) при различном давлении и в СПС с различными величинами d_c .

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В наших экспериментах СПС, заполненный чистым инертным газом (гелий, неон или аргон, количество примесей в которых не превышало $10^{-3}\%$), размещался в щели на короткой стороне прямоугольного СВЧ-волновода (см. рис. 1а, б).

В качестве источника СВЧ-излучения, направляемого в волновод со щелью, 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 в данных экспериментах не превышала 6 кВт. Более подробное описание источника СВЧ-излучения можно найти в [12].

СВЧ-волновод с размерами 90×45 мм являлся одномодовым для излучения магнетрона, и по нему распространялась только волна типа H_{10} . Поперечные размеры волновода слишком велики по сравнению с диаметром сердцевины СПС ($d_c \ll a, b$), чтобы плазма в сердцевине световода могла эффективно поглощать энергию СВЧ-поля. Поэтому для своеобразной фокусировки СВЧ-излучения на СПС мы использовали структуру типа щелевой антенны: продольную щель в узкой боковой стенке прямоугольного волновода, по которому распространялось СВЧ-излучение от магнетрона. Описание щелевых антенн можно найти, например, в [13]. Электрическое поле в щели направлено перпендикулярно ее длинной стороне, и поэтому необходимая разность потенциалов для поддержания разряда должна быть значительно ниже, чем в случае, если бы поле было направлено вдоль СПС.

В каждом эксперименте измерялась мощность СВЧ-излучения P , распространяющаяся по волноводу l (рис. 1а). Затем, в соответствии с выбранным приближением для расчета электрического поля в щели в зависимости от мощности, описанного в [9], определялась величина поля $E(P)$ в отсутствие СВЧ-разряда. Разумеется, после зажигания разряда из-за электропроводности плазмы разряда поле в щели изменяется. Но в качестве характеристики каждого эксперимента по определению минимального значения электрического поля, необходимого для поддержания разряда в СПС, нами использовалась именно указанная выше величина $E(P)$. Дополнительную информацию об экспериментальной установке можно найти в [9].

В большинстве работ по изучению формирования плазмы под действием СВЧ-поля рассматривается процесс пробоя газа и определяется минимальное значение напряженности электрического поля, достаточное для достижения пробоя (E_{BD}) (см., например, [14]). Нашей задачей в данной работе являлось определение минимально необходимых значений электрического поля СВЧ-излучения не для пробоя, а для поддержания плазмы в полости сердцевине световода (E_M), что является необходимым условием для реализации ГРВЛ. Для всех типов разрядов, в том числе и СВЧ, $E_M < E_{BD}$ [11]. Данное обстоятельство снижает требования к источнику СВЧ, что является благоприятным фактором. Поэтому мы после помещения СПС в СВЧ-поле с интенсивностью, недостаточной для пробоя, для инициирования

разряда кратковременно (в течение ~ 1 с) облучали СПС УФ-излучением ртутной газоразрядной лампы. В результате, если напряженность электрического поля E превышала E_M , то разряд загорался. В противном случае величина поля еще несколько увеличивалась и облучение УФ-лампой повторялось. Величина поля E в щели регулировалась изменением мощности магнетрона, дополнительно величина E могла регулироваться за счет изменения ширины щели от 0.5 до 4 мм с помощью специальных накладок. В качестве порогового поля E_M , поддерживающего СВЧ-разряд, фиксировалось минимальное значение из определенных таким образом величин E .

На рис. 2 представлены фотографии СВЧ-разряда в СПС с $d_c = 110$ мкм, заполненном неоном при давлении 30 торр. На рис. 2а, сделанном в более мелком масштабе, разряд в СПС отображает распределение поля в щели, обусловленное интерференцией падающей и отраженной волн в волновode. На рис. 2б, сделанном в более крупном масштабе, видно положение СПС на нижнем крае щели.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате выполненных экспериментов были определены значения электрических полей E_M для СПС, заполненных аргоном, неоном и гелием, в зависимости от давления газа p в сердцевине световода. Измерения проведены для СПС, диаметры сердцевин которых составляли $d_c = 100$ мкм (соответствующий диффузионный параметр $\Lambda = 21$ мкм), 110 мкм ($\Lambda = 23$ мкм) и 125 мкм ($\Lambda = 26$ мкм). Полученные данные для Ar, Ne и He приведены на рис. 3–5 соответственно. Кроме того, на каждом из этих рисунков, для сравнения, приведены ранее опубликованные данные по напряженности пробоя E_{BD} для тех же газов под действием СВЧ-излучения близкой частоты (2.8 ГГц) в экспериментах с геометрией, соответствующей, насколько нам известно, наименьшим имеющимся в литературе значениям диффузионного параметра. Но все эти значения $\Lambda > 500$ мкм, и поэтому превышают значения Λ в наших экспериментах не менее чем в 20 раз.

Полученные данные, приведенные на рис. 3–5, показывают, что при переходе от больших разрядных объемов (с $\Lambda \approx 1$ мм) к СПС ($\Lambda \approx 20$ мкм) минимальное необходимое для поддержания разряда значение электрического поля E_M увеличивается с величин порядка 250 В/см до 2.5–2.8 кВ/см (т.е. примерно на порядок величины) во всех исследованных газах. Отметим, что для оценки величины E_M при больших Λ мы используем имеющиеся в литературе данные по E_{BD} , полагая $E_M \approx E_{BD}$. Кроме того, минимум функции $E_M(p)$ в СПС наблюдается при больших давлениях, чем в разрядных

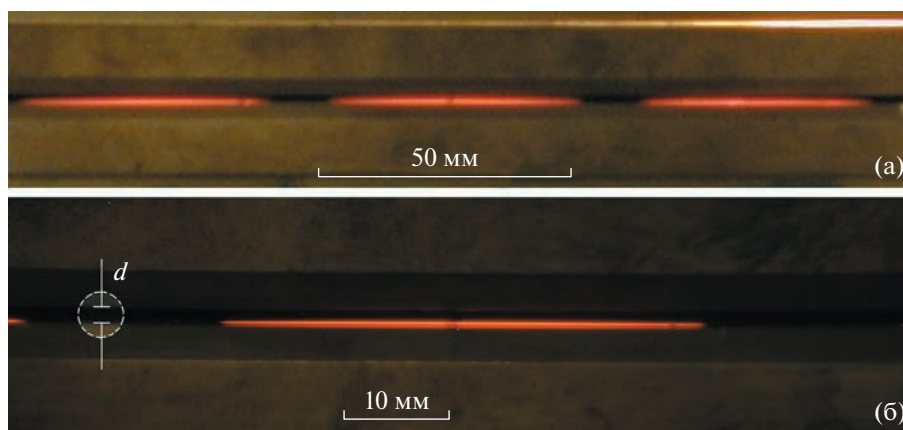


Рис. 2. Фотографии СВЧ-разряда в СПС с диаметром сердцевины 110 мкм, заполненном неоном при давлении 30 торр и расположенном в щели стенки СВЧ-волновода: а – обзорное фото со сравнительно низким пространственным разрешением. Периодическая структура свечения связана с интерференцией распространяющихся СВЧ-волн; б – фотография с улучшенным пространственным разрешением. СПС расположен на нижнем крае щели. В левой части показана ширина щели в этом эксперименте, $d = 1.5$ мм.

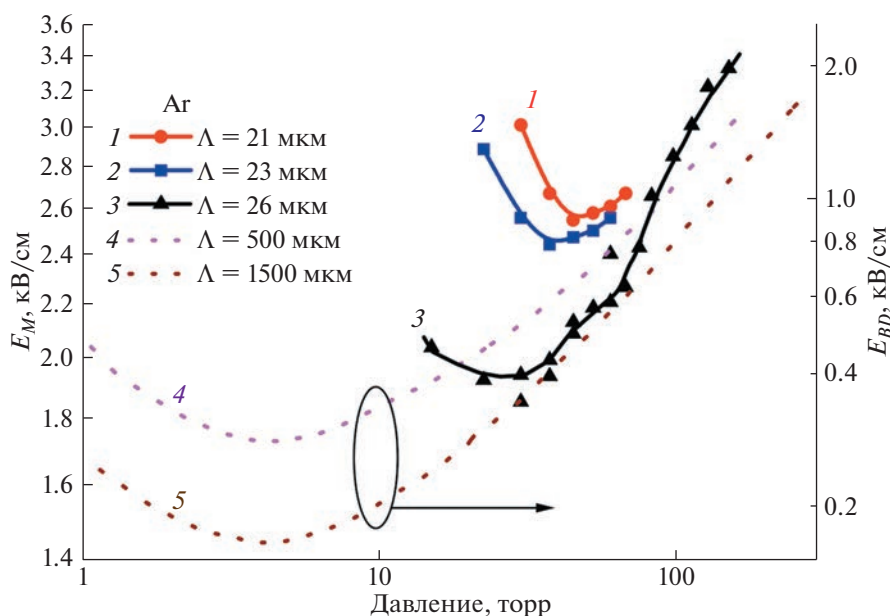


Рис. 3. Линии 1–3 (относятся к левой вертикальной оси): зависимости $E_M(p)$ для СПС, заполненных аргонem, с указанными параметрами Λ . Линии 4–5 (относятся к правой вертикальной оси): зависимости $E_{BD}(p)$ для аргона, приведенные в [10], но для геометрии эксперимента со значительно большими величинами Λ .

объемах с характерным размером порядка сантиметра. Для аргона оптимальное давление возрастает примерно на порядок, от 5 до 50 торр. Для неона и гелия это увеличение еще больше: от примерно 10 до 300 торр (неон) и до 500 торр (гелий).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе впервые экспериментально определены области поддержания СВЧ-разряда в СПС с сердцевинами диаметром около 100 мкм, за-

полненными аргонem, неоном и гелием, в координатах “напряженность электрического поля” – “давление”. Определены оптимальные параметры СВЧ-поля и давления газа в сердцевине полых световодов для реализации накачки ГРВЛ на их основе. Для аргона это примерно 2.5 кВ/см – 50 торр, для неона: 2.5 кВ/см – 300 торр и для гелия: 2.8 кВ/см – 500 торр. Полученные высокие величины необходимых значений напряженности электрического поля однозначно указывают на необходимость использования для возбуждения газо-

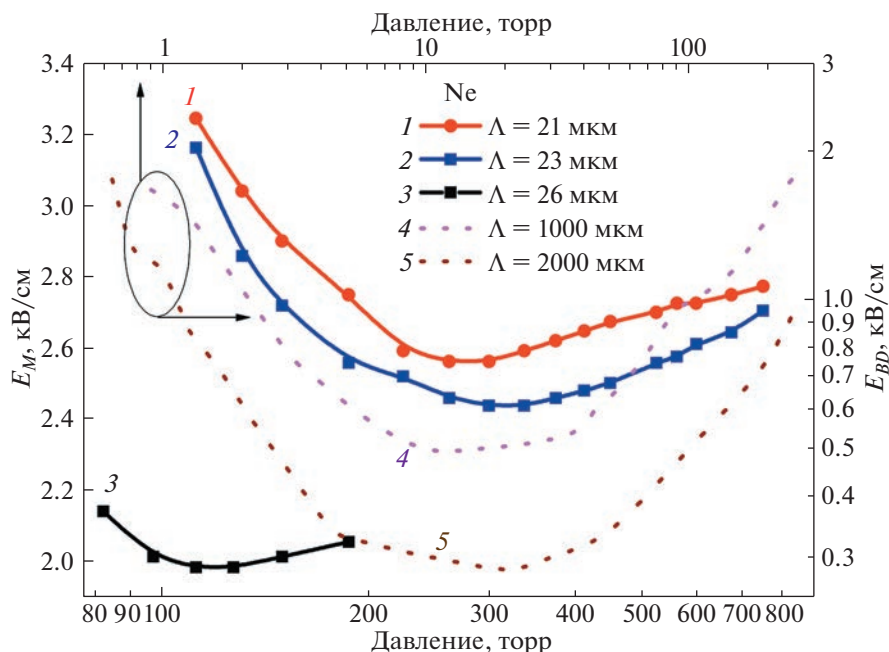


Рис. 4. Линии 1–3 (относятся к левой и нижней осям): зависимости $E_M(p)$ для СПС, заполненных неоном, с указанными параметрами Λ . Линии 4–5 (относятся к правой и верхней осям): зависимости $E_{BD}(p)$ для неона, приведенные в [10], но для геометрии эксперимента со значительно большими величинами Λ .

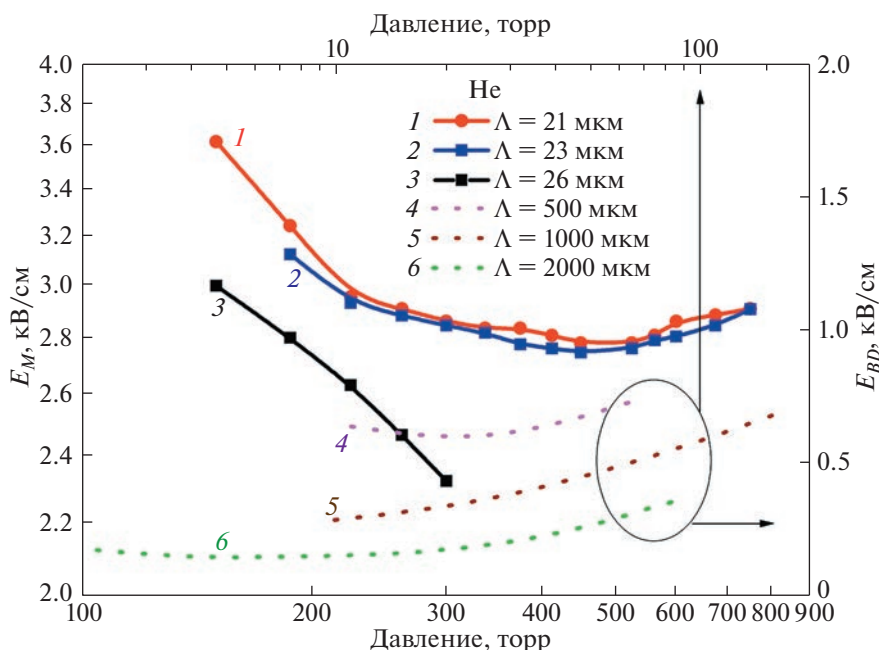


Рис. 5. Линии 1–3 (относятся к левой и нижней осям): зависимости $E_M(p)$ для СПС, заполненных гелием, с указанными параметрами Λ . Линии 4–6 (относятся к правой и верхней осям): зависимости $E_{BD}(p)$ для гелия, приведенные в [10], но для геометрии эксперимента со значительно большими величинами Λ .

вого разряда электрического поля, направленного поперек световода, а не вдоль него. В противном случае необходимая разность потенциалов на половине длины волны СВЧ-излучения может составлять 15 кВ и более, что ограничит возможно-

сти применения таких ГРВЛ. Если же электрическое поле будет направлено поперек СПС (как в наших экспериментах), то при выборе ширины щели, равной диаметру полимерной оболочки СПС (в нашем случае для $d_c = 100$ мкм это 360 мкм) раз-

ность потенциалов между верхней и нижней краями щели (см. рис. 2) не превысит 100 В.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам УНУ “Волокно” ФИЦ ИОФ РАН за помощь в изготовлении и характеристике световодов с поллой сердцевинной.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Joly N.Y., Nold J., Chang W., Hölzer P., Nazarkin A., Wong G.K.L., Biancalana F., Russell P. St. J. Bright Spatially Coherent Wavelength-Tunable Deep-UV Laser Source Using an Ar-Filled Photonic Crystal Fiber // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 106. 203901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.203901>
2. Astapovich M.S., Gladyshev A.V., Khudyakov M.M., Kosolapov A.F., Likhachev M.E., Bufetov I.A. Watt-Level Nanosecond 4.42-um Raman Laser Based on Silica Fiber // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2019. V. 31. P. 78–81.
3. Gladyshev A., Yatsenko Yu., Kolyadin A., Kompanets V., Bufetov I. Mid-infrared 10-μJ-level sub-picosecond pulse generation via stimulated Raman scattering in a gas-filled revolver fiber // *Opt. Mater. Express.* 2020. V. 10. P. 3081–3089. <https://doi.org/10.1364/OME.411364>
4. Jones A.M., Fourcade-Dutin C., Mao C., Baumgart B., Nampoothiri A.V.V., Campbell N., Wang Y., Benabid F., Rudolph W., Washburn B.R., Corvin K.L. Characterization of mid-infrared emissions from C₂H₂, CO, CO₂, and HCN-filled hollow fiber lasers // *Proc. SPIE.* 2012. V. 8237. 82373Y. <https://doi.org/10.1117/12.909254>
5. Shi X., Wang X.B., Jin W., Demokan M.S., Zhang X.L. Progress toward a novel hollow-core fiber gas laser // *Proc. SPIE.* 2007. V. 6767. 67670H. <https://doi.org/10.1117/12.749510>
6. Bateman S.A., Belardi W., Yu F., Webb C.E., Wadsworth W.J. Gain from Helium-Xenon Discharges in Hollow Optical Fibres at 3 to 3.5 μm // In *Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. San Jose, CA, USA. 8–13 June 2014. STh5C.10. https://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2014.STh5C.10
7. Debord B., Gérôme F., Jamier R., Boisse-Laporte C., Leprince P., Leroy O., Blondy J.-M., Benabid F. First Ignition of an UV Microwave Microplasma in Ar-filled Hollow-Core Photonic Crystal Fibers. ECOC. 2011. Mo.2.LeCervin.5. <https://doi.org/10.1364/ECOC.2011.Mo.2.LeCervin.5>
8. Debord B., Amrani F., Vincetti L., Gérôme F., Benabid F. Hollow-Core Fiber Technology: The Rising of “Gas Photonics” // *Fibers.* 2019. V. 7. 16. <https://doi.org/10.3390/fib7020016>
9. Gladyshev A., Nefedov S., Kolyadin A., Kosolapov A., Velmiskin V., Mineev A., Bufetov I. Microwave Discharge in Hollow Optical Fibers as a Pump for Gas Fiber Lasers // *Photonics.* 2022. V. 9. 752. <https://doi.org/10.3390/photonics9100752>
10. Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. М.: Мир, 1969. 210 с.
11. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974. 308 с.
12. Минеев А.П., Неведов С.М., Пашинин П.П., Гончаров П.А., Киселев В.В., Стельмах О.М. Многочастотные планарные лазеры среднего ИК-диапазона с импульсной СВЧ-накачкой // *Квантовая электроника.* 2020. Т. 50. С. 277–283.
13. Silver S. Microwave Antenna Theory and Design / Silver S., Ed. McGraw-Hill Book Co., Inc.: New York, NY, USA; Toronto, ON, Canada; London, UK, 1949. P. 257–333.
14. Френсис Г. Ионизационные явления в газах. М.: Атомиздат, 1964. 304 с.

MICROWAVE DISCHARGE MAINTAINING IN THE HOLLOW CORE OPTICAL FIBERS FOR GAS FIBER LASERS

Corresponding Member of the RAS I. A. Bufetov^a, A. V. Gladyshev^a, S. M. Nefedov^b,
A. F. Kosolapov^a, V. V. Velmiskin^a, P. A. Goncharov^b, and A. P. Mineev^b

^a Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Dianov Fiber Optics Research Center, Moscow, Russia

^b Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The minimal values of the electric 2.45 GHz microwave field, which are necessary to maintain a discharge in a number of noble gases (argon, neon, and helium) in optical fibers with hollow cores of small diameter up to 100 μm, have been measured for the first time. The minimal electric field values for all three gases are (2.5–2.8) kV/cm at a pressure of argon ~50 Torr, neon ~300 Torr, and helium ~500 Torr.

Keywords: hollow-core fibers, gas-discharge fiber laser, microwave discharge