

УДК 535.41; 535.391

ВИСМУТОВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ С НАКАЧКОЙ ПО ОБОЛОЧКЕ, ИЗЛУЧАЮЩИЕ В ОБЛАСТИ ДЛИН ВОЛН 1.4–1.5 мкм

© 2024 г. А. С. Вахрушев^{1,*}, А. В. Харахордин¹, С. В. Алышев¹, А. М. Хегай¹,
Е. Г. Фирстова¹, М. А. Мелькумов¹, С. В. Фирстов¹

Представлено академиком РАН И.А. Щербаковым 19.04.2023 г.

Поступило 19.04.2023 г.

После доработки 19.04.2023 г.

Принято к публикации 14.11.2023 г.

Представлены результаты по разработке и изучению выходных характеристик висмутовых волоконных лазеров для ближнего ИК-диапазона, накачиваемых в оболочку с использованием многомодовых лазерных диодов, излучающих на длине волны 808 нм. Активной средой таких лазеров служили световоды с сердцевинной из германосиликатного стекла, легированного висмутом, с различной формой (круглым и квадратным сечением) внутренней оболочки, покрытой полимером с показателем преломления 1.396. На основе таких световодов была разработана серия волоконных лазеров, генерирующих излучение в области длин волн 1.4–1.5 мкм, и изучены их спектральные и мощностные характеристики. Было выполнено численное моделирование, направленное на поиск оптимальной конфигурации таких лазеров, с целью определения предельно-достижимых характеристик получаемых устройств. Получено хорошее согласование расчетных данных с экспериментальными результатами. Используя активный световод с квадратным сечением со стороной ~80 мкм и диаметром сердцевины ~11 мкм, легированной висмутом, был создан волоконный лазер, генерирующий на длине волны ~1460 нм, с дифференциальной эффективностью около 5% и максимальной выходной мощностью более 250 мВт.

Ключевые слова: висмут, волоконный световод, активный центр, волоконный лазер, оптические переходы

DOI: 10.31857/S2686740024010014, **EDN:** OWDAIJ

Лазерные технологии внедрены сегодня во многие сферы деятельности и могут решать множество задач, которые важны как в технологическом аспекте, так и в повседневной деятельности, позволяя обрабатывать материалы, осуществлять дистанционное зондирование, проводить медицинские процедуры и обеспечивать передачу данных даже в труднодоступных местах (в космосе, ядерных реакторах и др.) [1–4]. Существуют разные типы лазеров, среди которых одними из наиболее востребованных

являются лазеры на основе оптического волокна, имеющего световедущую структуру, состоящую из сердцевины с добавками активных элементов и солегирующих примесей; внутренней оболочки из кварцевого стекла с более низким показателем преломления, чем в сердцевине, а также внешней полимерной оболочки. Легирование активными ионами центральной части (сердцевины) в оптических волокнах позволяет получить лазерную среду, которая может осуществлять усиление или генерацию оптического излучения. В качестве активных ионов, как правило, применяются редкоземельные элементы (РЗЭ): Er, Yb, Tm, Ho и т.д. В настоящее время благодаря своим уникальным характеристикам волоконные лазеры на переходах РЗЭ получили широкое распространение, вытеснив

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

*E-mail: as.vahrush@yandex.ru

некоторые разновидности других лазерных систем. Тем не менее дальнейший прогресс в направлении развития волоконных лазеров был связан с расширением рабочей области длин волн, что было продиктовано новыми прикладными задачами. С помощью световодов с РЗЭ освоение новых областей было невозможно, поскольку положение их уровней и энергий переходов практически не зависят от используемой стеклянной матрицы.

В этом отношении разработка световодов с висмутом, который по свойствам отличается от РЗЭ, стало новым этапом в освоении волоконными лазерами ближнего ИК-диапазона. Первый волоконный лазер на основе легированного висмутом световода (висмутовый лазер) был создан в 2005 г. [5]. Однако спектральная область генерации такого лазера была сосредоточена примерно от 1.14 до 1.21 мкм, что снижало потенциал практического использования таких устройств. Позже оказалось, что можно использовать легирующие добавки (фосфор, германий) для смещения энергии оптических переходов, позволяя обеспечить оптическое усиление висмутовых световодов в диапазоне длин волн от 1250 до 1775 нм [6–8]. Это стало возможным благодаря формированию различных типов висмутовых активных центров (ВАЦ), ассоциированных с кремнием (ВАЦ-Si), фосфором (ВАЦ-P), германием (ВАЦ-Ge).

Одной из особенностей висмутовых лазерно-активных световодов является низкая концентрация висмута, а следовательно, и ВАЦ, что, в свою очередь, обуславливает низкое погонное поглощение. По этой причине все висмутовые лазеры до настоящего времени работали при накачке в верхний лазерный уровень с использованием одномодовых источников накачки [9–12]. Это существенным образом ограничивало их широкое распространение. Например, для такого типа лазеров по сравнению с лазерами, накачиваемыми в оболочку, является невозможность ввода излучения одновременно от нескольких одномодовых источников накачки, что создает сложности для масштабирования выходной мощности. Недавно был предложен подход и успешно осуществлен его практическая реализация, в результате которой было продемонстрировано получение первых висмутовых ИК-лазеров с накачкой

от недорогих многомодовых диодов [13, 14]. Следует отметить, что рядом исследователей и ранее предпринимались попытки получения лазерной генерации с использованием висмутовых световодов, возбуждаемых многомодовыми источниками накачки, однако в силу разных обстоятельств они оказывались неудачными [15].

В данной работе сообщается о результатах исследований работы висмутовых лазеров с диодной накачкой, вводимой в оболочку активного световода, а также об изучении возможностей оптимизации конструкции таких лазеров и дизайна висмутового световода, являющегося активным элементом лазеров такого типа. Представлены результаты численных расчетов по оптимизации параметров лазеров на основе висмутовых световодов с сердцевинной из германо-силикатного (<8 мол.% GeO_2) стекла, в которой происходит формирование ВАЦ-Si, являющихся ответственными за излучательные переходы в ближней ИК-области.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изготовление преформы исследуемых световодов осуществлялось методом модифицированного химического осаждения из газовой фазы (Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD)). В процессе получения преформы волоконного световода использовалась опорная кварцевая труба фирмы Heraeus Suprasil F-300, на внутреннюю поверхность которой осаждались стеклообразные слои сердцевинного световода. Данный процесс состоял из следующих этапов: осаждение пористых слоев с оксидом германия GeO_2 при температуре 1300 °C; газофазное введение висмута из BiBr_3 в результате процесса химического разложения при температуре 1800 °C с последующим их стеклованием; сплавление трубы со слоями в стержень-преформу при повышенной температуре ~2000 °C. Разница в показателях преломления сердцевин и оболочки преформы составляла ~0.01, что было обусловлено введением оксида германия в количестве ~8 мол.%. Технологический процесс получения был оптимизирован, с одной стороны, для достижения заданных параметров по концентрации Bi и GeO_2 , а с другой — для минимизации различий показателя преломления и химического состава стекла сердцевин по длине преформы. После получения

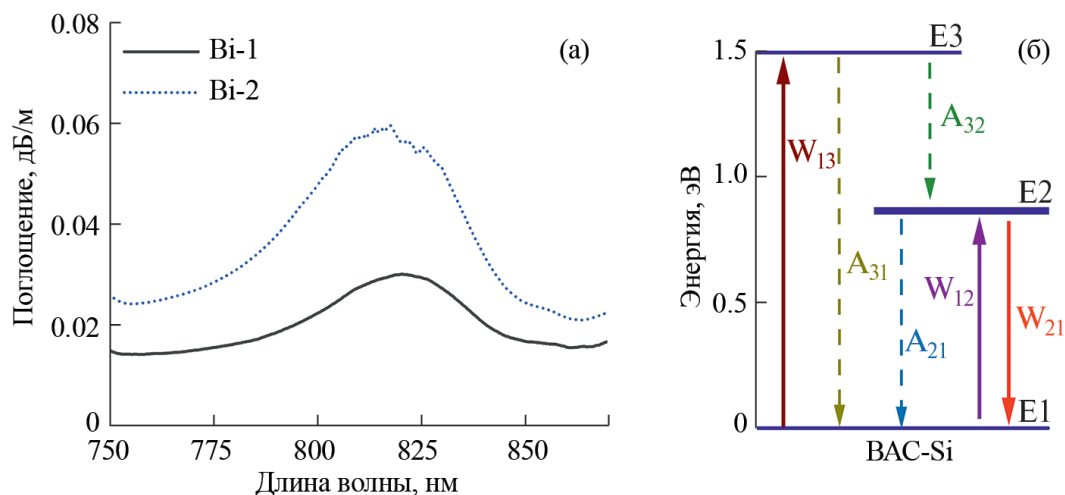


Рис. 1. Спектры поглощения, полученные при вводе слабого оптического сигнала в оболочку исследуемых световодов (а); схема энергетических переходов ВАЦ-Si при возбуждении излучением на длине волны 800 нм с указанием основных переходов (б).

преформы она делилась на две части, а затем каждая часть проходила процесс жакетирования (осаждение дополнительной кварцевой трубы) для получения заготовки с необходимой расчетной длиной волны отсечки высших мод в одномодовом световоде. Для получения световода с оболочкой квадратного сечения требовался дополнительный этап, связанный с механической обработкой и полировкой одной из частей преформы. После получения преформ с требуемой геометрией из них были вытянуты одномодовые висмутовые световоды в полимерном покрытии, которое имеет более низкий показатель преломления 1.396, чем кварцевое стекло 1.456, что позволяло в обоих случаях сформировать световедущую структуру во внутренней кварцевой оболочке световода. В результате были получены два образца оптического волокна с оболочкой круглого сечения (диаметр 125 мкм) (Bi-1, диаметр сердцевины 8 мкм) и квадратного сечения (80×80 мкм) (Bi-2, диаметр сердцевины 11 мкм).

Измерение спектров поглощения изучаемых световодов проводилось методом “облома”, т.е. путем сравнения интенсивностей введенного в оболочку сигнального излучения, проходящего через активный световод различной длины. В качестве источника сигнала использовалась галогенная лампа (Mikropack DH-2000). Регистрация сигнала осуществлялась оптическим спектроанализатором Ocean Optics USB2000.

На рис. 1а представлены типичные спектры поглощения исследуемых световодов. Видно, что модификация дизайна световода (изменение формы сечения оболочки и увеличение соотношения диаметров сердцевины и оболочки) позволило вдвое повысить уровень поглощения с 30 дБ/км (Bi-1) до 60 дБ/км (Bi-2) на длине волны 820 нм. Это было ожидаемо, поскольку в таком случае (при устранении цилиндрической симметрии) происходит лучшее перекрытие мод оболочки с легированной висмутом сердцевиной по сравнению со световодом круглого сечения. Также важно отметить, что спектральное положение полосы поглощения ВАЦ-Si хорошо перекрывается с длиной волны генерации коммерчески доступных диодов накачки, работающих на длине волны 808 нм, позволяя эффективно возбуждать активные центры.

Схема основных энергетических уровней ВАЦ-Si с оптическими переходами при использовании возбуждения на 808 нм показана на рис. 1б. Накачка лазерной среды соответствует вынужденному переходу ВАЦ-Si с уровня E1 на уровень E3 (W_{13}), откуда происходит преимущественно безызлучательная спонтанная релаксация A_{32} на уровень E2. Вынужденный переход W_{21} с E2 на E1 сопровождается испусканием фотона в области длин волн 1400–1500 нм. При рассмотрении работы данной лазерной системы следует отметить, что спонтанная релаксация $A_{32} \gg A_{31}$ доминирует над переходом

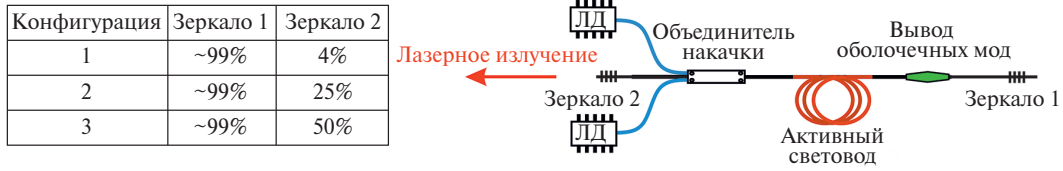


Рис. 2. Схема висмутового лазера с накачкой в оболочку в разных конфигурациях.

с уровня E2 в основное состояние, а также что возможен процесс поглощения испускаемых фотонов ВАЦ-Si (W_{12}). Все вышеописанное позволило построить рабочую модель лазерной системы, которая приводится ниже.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ РАБОТЫ ЛАЗЕРА

Эксперимент

Висмутовые волоконные лазеры были собраны на основе резонатора Фабри–Перо, образованного активной средой и двумя зеркалами (рис. 2). Исследовались различные конфигурации резонаторов, в которых в качестве зеркала 1 использовалась волоконная брэгговская решетка (ВБР) с отражением ~99%, расположенная за волоконным стриппером (устройством для устранения непоглощенных оболочечных мод накачки). В качестве выходного зеркала (зеркало 2) использовались сколотый торец световода под прямым углом, обеспечивая 4%-ное отражение (конфигурация № 1), а в конфигурациях № 2 и 3 – волоконные зеркала Саньяка с коэффициентами отражения ~25 и 50% соответственно. Накачка лазерной среды осуществлялась с помощью полупроводниковых многомодовых лазерных диодов (ЛД) SkyEra, излучающих на длине волны 808 нм с максимальной выходной мощностью 25 Вт (рис. 2). Излучение диодов вводилось в активный световод с помощью коммерчески доступного объединителя накачки и сигнала $(2 + 1) \times 1$. В рамках экспериментов проводились измерения спектров лазерной генерации с помощью оптического спектроанализатора Agilent 86140B, зависимостей выходной мощности от введенной мощности накачки (измеритель мощности Ophir с детектором 3A-FS-SH). Все эксперименты были выполнены при комнатной температуре. Висмутовые лазеры также находились в обычных условиях и не требовали дополнительного охлаждения.

Модель работы висмутового лазера

Для оптимизации волоконной схемы рассматриваемых лазеров и проведения сопоставления с экспериментальными данными использовалась численная модель, базирующаяся на решении системы связанных скоростных уравнений населенностей уровня накачки и верхнего лазерного уровня (1), а также дифференциальных уравнений, описывающих изменения мощности накачки и сигнала (2), распространяющегося в прямом и обратном направлении, вдоль активного световода с учетом граничных условий:

$$\begin{aligned} \frac{dN_3}{dt} &= 0 = W_{13}N_1 - A_{31}N_3 - A_{32}N_3, \\ \frac{dN_2}{dt} &= 0 = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 + A_{32}N_3 - A_{21}N_2, \end{aligned} \quad (1)$$

$$N_{tot} = N_1 + N_2 + N_3,$$

где N_i – населенность E_i уровня; N_{tot} – общая концентрация ВАЦ в сердцевине волокна; W_{ij} и A_{ij} – вынужденные и спонтанные переходы с уровня i на уровень j ($i, j = 1, 2, 3$) соответственно.

$$\begin{aligned} \frac{dP_p}{dz} &= -\sigma_a^p \cdot N_1 \cdot \Gamma_p \cdot P_p - \alpha_p^{BG} \cdot P_p = \\ &= -\left(n_1 \cdot \alpha_p^{clad} + \alpha_p^{BG}\right) \cdot P_p, \\ \frac{dP_s^+}{dz} &= \left\{\sigma_e^s \cdot N_2 - \sigma_a^s \cdot N_1\right\} \cdot \Gamma_s \cdot P_s^+ - \\ &- \alpha_s^{BG} \cdot P_s^+ = \left\{\eta \cdot n_2 - n_1\right\} \cdot \alpha_s^{core} - \alpha_s^{BG} \cdot P_s^+, \\ \frac{dP_s^-}{dz} &= -\left\{\sigma_e^s \cdot N_2 - \sigma_a^s \cdot N_1\right\} \cdot \Gamma_s \cdot P_s^- + \\ &+ \alpha_s^{BG} \cdot P_s^- = \left\{-\eta \cdot n_2 - n_1\right\} \cdot \alpha_s^{core} + \alpha_s^{BG} \cdot P_s^-, \end{aligned} \quad (2)$$

$$P_p(z=0) = \epsilon \cdot P_0, P_s^+(z=0) = P_s^-(z=0),$$

$$\frac{P_s^-(z=L)}{P_s^+(z=L)} \cdot 100\% = T_\lambda,$$

Таблица 1. Основные параметры и их обозначение, используемые для численных расчетов модели

Параметр	Обозначение	Величина
Радиус сердцевины, мкм	r	4
Радиус оболочки, мкм	R	62.5
Длина активного световода, м	L	232
Ненасыщаемые потери λ_s , дБ/м	α_s^{BG}	0.02
Ненасыщаемые потери λ_p , дБ/м	α_p^{BG}	2
Активное поглощение λ_s , дБ/м	α_s^{core}	0.41
Активное поглощение λ_p , дБ/м	α_p^{core}	5.8
Поглощение накачки по оболочке, дБ/м	α_p^{clad}	0.017
Радиус поля моды, мкм	Ψ_s	3
Сечение поглощения λ_p , пм^2	σ_a^p	16.8
Сечение поглощения λ_s , пм^2	σ_a^s	0.9
Сечение излучения λ_s , пм^2	σ_e^s	2.3
Время жизни ВАЦ на уровне E3, мкс	$\tau_3 \equiv \tau_p$	45
Время жизни ВАЦ на уровне E2, мкс	$\tau_2 \equiv \tau$	600
Коэффициент ветвления [16]	β	0.8
λ_s , нм	λ_s	808
λ_p , нм	λ_p	1460
Коэффициент отражения выходной ВБР, %	T_λ	4–95

где P_p , P_s^+ и P_s^- — мощность излучения накачки, сигналов в прямом и обратном направлениях соответственно; $\eta = \frac{\sigma_e^s}{\sigma_a^s}$; $n_i = \frac{N_i}{N_{tot}}$; $\alpha_p^{clad} = \sigma_a^p \cdot \Gamma_p \cdot N_{tot}$ и $\alpha_s^{core} = \sigma_a^s \cdot \Gamma_s \cdot N_{tot}$ — поглощение ВАЦ в сердцевине световода на длине волны накачки и длине волны сигнала соответственно; Γ_p , Γ_s — соответствующие коэффициенты перекрытия основной моды с профилем легирования ВАЦ, которые для простоты считаются независимыми от мощности накачки и сигнала. Ненасыщаемые потери, определяемые как остаточный уровень

оптических потерь в просветленной лазерной среде, в активном световоде на длине волны накачки/сигнала обозначены как $\alpha_p^{BG} / \alpha_s^{BG}$ соответственно. Входная мощность накачки в данной модели лазера обозначается как P_0 , а L — длина волокна, ϵ — дискретные вносимые потери (0.5–2.5 дБ), которые учитывают неэффективность передачи мощности накачки в активный световод. При моделировании работы висмутового лазера использовались параметры, представленные в табл. 1. Численные расчеты осуществлялись для конфигурации лазера с высокоотражающей ВБР (~99%) при вариации коэффициента отражения (T_λ) от 4 до 95% выходной ВБР. В результате были построены зависимости выходной мощности висмутовых лазеров от параметров резонатора (коэффициента отражения выходного зеркала и длины активного световода/мощности накачки) (рис. 3а, б). Численное моделирование выполнялось с использованием собственного программного кода, который был реализован с применением известных пакетов экосистемы SciPy на основе Python.

В результате были построены зависимости выходной мощности висмутовых лазеров от параметров резонатора (коэффициента отражения выходного зеркала и длины активного световода/мощности накачки (рис. 3а и б соответственно).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 4а изображены экспериментально полученные зависимости выходной мощности лазеров различных конфигураций на основе образца Vi-1 от поглощенной мощности накачки. Длина активного световода около 200 м. Видно, что реализованные конфигурации лазеров обладали сравнимыми пороговыми значениями мощности накачки для получения лазерной генерации. На начальном участке полученные зависимости были близки к линейным, тогда как при дальнейшем увеличении мощности накачки происходило насыщение мощности на выходе лазера. Данный эффект заметнее всего наблюдался для резонатора с высоким коэффициентом отражения выходного зеркала (конфигурация № 3). Причиной наблюдаемого явления, как уже было показано в работе [17], была относительно медленная спонтанная релаксация ВАЦ-Si с уровня E3 на уровень E2,

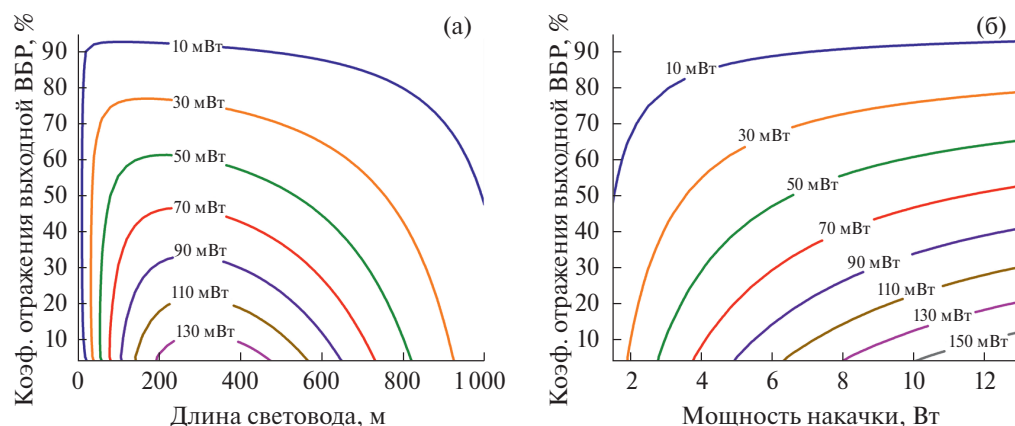


Рис. 3. Расчетные значения выходной мощности висмутовых лазеров, работающих на длине волны 1460 нм: а — от коэффициента отражения выходного зеркала и длины активного световода, при фиксированной поглощенной мощности накачки 8.5 Вт; б — от коэффициента отражения выходного зеркала и мощности накачки, при длине активного световода 200 м.

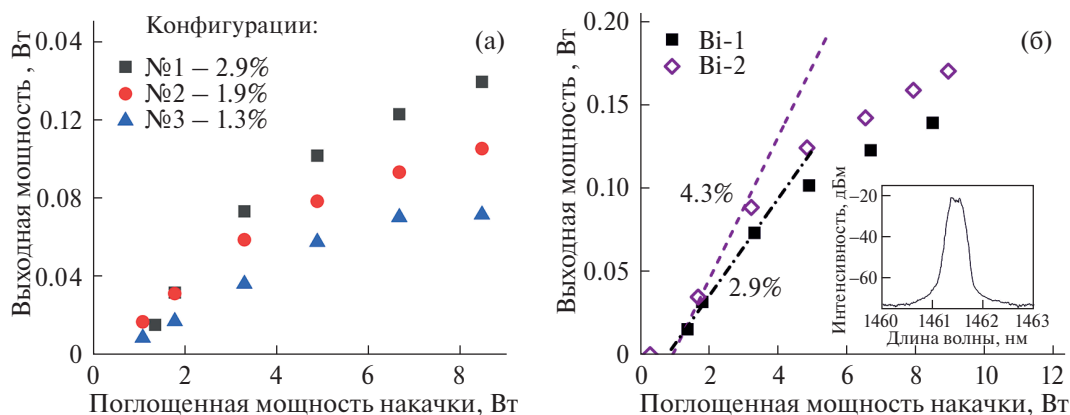


Рис. 4. Зависимости выходной мощности висмутового лазера от поглощенной мощности накачки: а — для образца Bi-1 в разных конфигурациях резонатора; б — для образцов Bi-1 и Bi-2 в одинаковых условиях. Вставка — типичный спектр лазерной генерации.

становясь “bottleneck” при относительно высоких значениях мощности накачки. Для общего анализа работы лазерной системы проводилась оценка дифференциальной эффективности рассматриваемых конфигураций. Используя начальный (линейный) участок полученных зависимостей, было определено, что эффективность созданных висмутовых лазеров может достигать от 1 до ~3% для разных конфигураций. Максимальное значение эффективности устройства достигалось для лазеров с наиболее прозрачным выходным зеркалом. В таком случае выходная мощность лазера могла достигать почти 140 мВт.

Результаты расчетов, показанные на рис. 3а, б, достаточно хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными. В частности, результаты расчетов подтверждают, что оптимальная длина активного световода в таких лазерах составляет от 200 до 500 м, а выходная мощность может достигать 130–150 мВт для лазеров с 4%-ным отражением выходного зеркала. Таким образом, результаты численных расчетов показывают, что полученные конфигурации лазеров являются вполне оптимальными с точки зрения получения максимально достижимых параметров, а дальнейший прогресс по масштабированию выходной мощности таких систем, прежде всего, должен быть

связан с оптимизацией дизайна и химического состава стекла световода.

В следующих экспериментах мы использовали световод Bi-2 с измененным дизайном для повышения эффективности поглощения излучения накачки сердцевинной из оболочки за счет радиально-несимметричной формы внутренней оболочки и изменения соотношения диаметров сердцевины и оболочки. На рис. 4б показана зависимость выходной мощности лазера от поглощенной мощности накачки, а на вставке — типичный спектр лазерной генерации. Исходя из полученной зависимости и сравнительного анализа с аналогичной зависимостью для лазера на световоде Bi-1 можно сделать вывод о том, что изменение дизайна световода стало причиной повышения дифференциальной эффективности >4% и выходной мощности до 170 мВт. Заметное изменение выходной мощности также удалось достигнуть благодаря выбору оптимальной длины активного световода Bi-2. На рис. 5 показано, что с увеличением длины активного световода наблюдается заметный прирост выходной мощности >250 мВт при одинаковой вводимой мощности накачки. При достаточно длинном резонаторе (200–300 м) эффект насыщения выходной мощности становился менее заметным, но сохранялся для всех конфигураций висмутовых лазеров. В итоге максимально достигнутая эффективность висмутовых лазеров составила около 5%, а выходная мощность превысила 270 мВт при поглощенной мощности накачки 11 Вт.

ВЫВОДЫ

В данной работе показано, что световоды с сердцевинной из германосиликатного стекла, легированного висмутом, могут быть использованы в качестве активных элементов волоконных лазеров ближнего ИК-диапазона с многомодовой диодной накачкой. Была достигнута лазерная генерация в области длин волн 1400–1500 нм на основном переходе ВАЦ-Si при возбуждении излучением на длине волны 808 нм. В рамках данного исследования была построена модель работы такого типа лазеров и проведены численные расчеты их выходных характеристик. В результате были определены параметры конфигурации лазеров для достижения улучшенных выходных характеристик, что

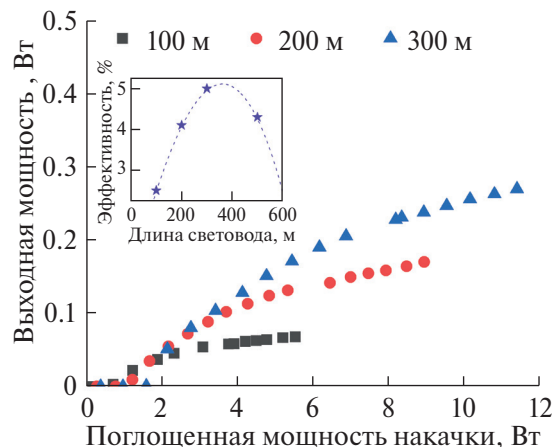


Рис. 5. Зависимости выходной мощности висмутового лазера с разной длиной активного световода от поглощенной мощности. Вставка — дифференциальная эффективность лазеров от длины световода.

подтверждалось результатами прямых экспериментов. Таким образом, висмутовые волоконные лазеры с накачкой по оболочке показали дифференциальную эффективность ~5% при выходной мощности более 250 мВт, что было достигнуто изменением конструкции активного световода, в частности, изменением формы сечения оболочки и соотношения размеров сердцевины и оболочки. Полученные данные указывают на то, что дальнейший прогресс по масштабированию выходной мощности лазеров такого типа должен быть связан, прежде всего, с оптимизацией параметров активной среды, в частности, с выбором химического состава стеклянной матрицы для сокращения времени релаксации ВАЦ-Si на метастабильный уровень, определением максимально возможных концентраций Bi и его радиального распределения, минимизации уровня ненасыщаемых потерь и др.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы работы благодарят сотрудника ИОФ РАН А.Г. Климанова за помощь в изготовлении преформ квадратного сечения, а также коллег ИХВВ РАН А.А. Умникова, А.Н. Абрамова, Н.Н. Вечканова за помощь в изготовлении, экспресс-анализе преформ и вытяжке одномодовых световодов.

Сообщение написано по материалам одноименного доклада на 5-й школе-конференции молодых ученых ИОФ РАН “Прохоровские недели”, 2022 г.

Доклад был рекомендован к публикации по результатам экспертных оценок как один из лучших.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00708).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Galvanauskas A. High power fiber lasers // Optics and Photonics News. 2004. V. 15. Is. 7. P. 42–47.
2. Shi W. et al. Fiber lasers and their applications // Applied Optics. 2014. V. 53. Is. 28. P. 6554–6568.
3. Richardson D.J., Nilsson J., Clarkson W.A. High power fiber lasers: current status and future perspectives // JOSA B. 2010. V. 27. Is. 11. P. B63–B92.
4. Zervas M.N., Codemard C.A. High power fiber lasers: a review // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics. 2014. V. 20. Is. 5. P. 219–241.
5. Дианов Е.М., Двойрин В.В., Машинский В.М., Умников А.А., Яшков М.В., Гурьянов А.Н. Непрерывный висмутовый волоконный лазер // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. №. 12. С. 1083–1084.
6. Bufetov I.A. et al. Bi-doped optical fibers and fiber lasers // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics. 2014. V. 20. Is. 5. P. 111–125.
7. Wang Y. et al. Bi-doped optical fibers and fiber amplifiers // Optical Materials: X. 2023. V. 17. P. 100219.
8. Firstov S.V. et al. Laser-active fibers doped with bismuth for a wavelength region of 1.6–1.8 μm // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics. 2018. V. 24. Is. 5. P. 1–15.
9. Bufetov I.A., Firstov S.V., Khopin V.F., Medvedkov O.I., Guryanov A.N., Dianov E.M. Bi-doped fiber lasers and amplifiers for a spectral region of 1300–1470 nm // Optics Letters. 2008. V. 33. Is. 19. P. 2227–2229.
10. Thipparapu N.K. et al. Bi-doped fiber amplifiers and lasers // Optical Materials Express. 2019. V. 9. Is. 6. P. 2446–2465.
11. Shubin A.V. et al. Bismuth-doped silica-based fiber lasers operating between 1389 and 1538 nm with output power of up to 22 W // Optics Letters. 2012. V. 37. Is. 13. P. 2589–2591.
12. Vakhrushev A.S. et al. W-type and Graded-index bismuth-doped fibers for efficient lasers and amplifiers operating in E-band // Optics Express. 2022. V. 30. Is. 2. P. 1490–1498.
13. Firstov S. et al. Cladding-pumped bismuth-doped fiber laser // Optics Letters. 2022. V. 47. Is. 4. P. 778–781.
14. Vakhrushev A.S. et al. Cladding-Pumped Bismuth-Doped Fiber Laser Emitting in the Wavelength Range 1.3–1.4 μm // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2022. V. 49. Suppl 1. P. S1–S6.
15. Kobayashi S., Takahashi M., Ohara M., Kondo I., Fujii Y. Broadband optical amplification with water-free hexagonal double-clad Bi doped silica fiber // Proc. SPIE. Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications. 2016. V. 9728. P. 338–343.
16. Quimby R.S., Shubochkin R.L., Morse T.F. High quantum efficiency of near-infrared emission in bismuth doped AlGeP-silica fiber // Optics Letters. 2009. V. 34. №. 20. P. 3181–3183.
17. Vakhrushev A. et al. Output power saturation effect in cladding-pumped bismuth-doped fiber lasers // J. Lightwave Technology. 2023. Vol. 41. Is. 2. P. 709–715.

CLADDING-PUMPED BISMUTH-DOPED FIBER LASERS OPERATING AT A WAVELENGTH REGION OF 1.4–1.5 μm

A. S. Vakhrushev^a, A. V. Kharakhordin^a, S. V. Alyshev^a, A. M. Khagai^a,
E. G. Firstova^a, M. A. Melkumov^a, S. V. Firstov^a

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

Presented by Academician of the RAS I.A. Shcherbakov

This article reports the results on development and study of the output characteristics of bismuth-doped fiber lasers for the near-IR range, which are pumped into a cladding using multimode laser diodes emitting at a wavelength of 808 nm. The active medium of such lasers was bismuth-doped germanosilicate glass fibers with various shapes (circular and square sections) of the inner cladding coated with a polymer having a refractive index of 1.396. On the basis of such fibers, a series of lasers generating radiation in the wavelength range 1.4–1.5 μm was developed, and their spectral and power characteristics were studied. Numerical simulation was also carried out aimed at finding the optimal configuration of such lasers in order to determine the maximum achievable characteristics of these devices. A good agreement between the calculated data and the experimental results has been obtained. As a result, using a bismuth-doped active fiber with a square cross section of $\sim 80 \mu\text{m}$ and a core diameter of $\sim 11 \mu\text{m}$, a fiber laser was created that operated at a wavelength of $\sim 1460 \text{ nm}$, with a slope efficiency of about 5% and a maximum output power of more than 250 mW.

Keywords: bismuth, optical fiber, active center, fiber laser, optical transitions