

ФОТОНИКА: МЕТОДЫ, КОМПОНЕНТЫ, СИСТЕМЫ

УДК 535.41; 535.391

НЕПРЕРЫВНЫЕ ВИСМУТОВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ
С МНОГОМОДОВОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

© А. С. Вахрушев¹, С. В. Альшев¹, А. А. Хегай¹, Е. Г. Фирстова¹,
А. В. Харахордин¹, К. Е. Рюмкин¹, М. А. Мелькумов¹,
А. А. Умников², Ф. В. Афанасьев², А. Н. Гурьянов², С. В. Фирстов¹

¹Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,
Научный центр волоконной оптики им. Е. М. Дианова,
119333, Москва, ул. Вавилова, 38

²Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девятых РАН,
603951, г. Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49
E-mail: fir@fo.gpi.ru

Представлены результаты в области создания непрерывных висмутовых лазеров в интервале длин волн 1,3–1,5 мкм с диодной накачкой (с помощью многомодовых полупроводниковых лазерных диодов). Рассматривается концепция разработки таких устройств на примере лазерной схемы. Обсуждаются вопросы, касающиеся особенностей работы висмутовых лазеров с накачкой в оболочку, их основных параметров (эффективности, мощности генерации, стабильности). Также рассматриваются возможности оптимизации параметров таких устройств путём изменения геометрии внутренней оболочки и использования двухволновой накачки.

Ключевые слова: висмут, люминесценция, световод, лазер.

DOI: 10.15372/AUT20230101

Введение. Волоконные лазеры обладают уникальными для твердотельных лазеров свойствами (высокой стабильностью выходной мощности, хорошим качеством луча, простотой конструкции, компактностью и др.), благодаря которым произошло интенсивное внедрение таких лазеров в различные области практического применения с вытеснением других разновидностей лазерных систем [1–5]. Функциональность, производительность и практичность стали основными преимуществами, которые привели к наиболее широкому распространению волоконных лазеров на основе стеклянных световодов, легированных редкоземельными элементами, особенно иттербием (Yb), эрбием (Er) и тулием (Tm), работающих в диапазонах длин волн около 1, 1,5 и 2 мкм. На рис. 1 отражено развитие одномодовых волоконных лазеров с высокой выходной мощностью для указанных областей длин волн. Видно, что за десятилетие (с 1999 по 2009 гг.) выходная мощность одномодовых иттербиевых волоконных лазеров была увеличена более чем на два порядка и достигала 10 кВт. Для волоконных лазеров, излучающих в более длинноволновом диапазоне 1,5–2,0 мкм, за аналогичный период прогресс заметно скромнее. Стремительное масштабирование мощности волоконных лазеров было вызвано технологическим прогрессом в сферах, связанных с разработкой мощных пассивных компонентов полностью волоконных систем объединения излучения, волоконных брэгговских решёток (ВБР), изоляторов, стрипперов мод оболочки, полупроводниковых диодов накачки, а также применением новейших подходов накачивания таких лазеров, в частности tandem-pumping [6], которые в совокупности позволили достичь рекордной (до сих пор) мощности в 10 кВт.

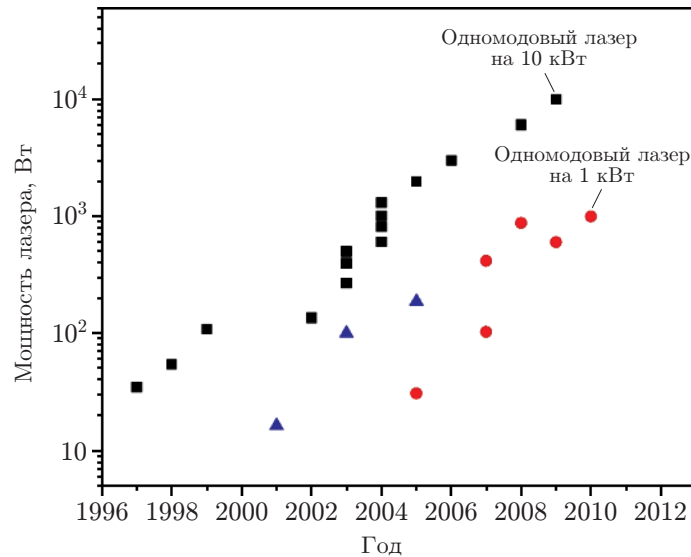


Рис. 1. Прогресс в области масштабирования выходной мощности одномодовых волоконных лазеров, излучающих в разных спектральных областях [7]: вблизи 1 мкм (квадраты), вблизи 1,5 мкм (треугольники), вблизи 2 мкм (кружки)

Одним из главных достижений с точки зрения усовершенствования активных световодов для создания мощных лазеров, несомненно, стала разработка [8] нового дизайна световода, которая позволила отказаться от необходимости ввода излучения накачки непосредственно в небольшую сердцевину световода, как это осуществлялось изначально. Основное изменение в структуре световода было связано с созданием дополнительного световедущего стеклянного слоя (внутренняя оболочка) между сердцевиной и оболочкой. Показатель преломления такого слоя был ниже, чем у активной сердцевины, но выше, чем у внешней оболочки, что позволяло добиться распространения излучения диодной накачки с низкими оптическими потерями по внутренней оболочке. Дальнейшие разработки в этом направлении привели к усовершенствованию геометрии активного световода, что в совокупности с появлением относительно недорогих диодов накачки способствовало увеличению яркости, мощности и энергоэффективности получаемых лазерных систем.

Однако развитие направления волоконных лазеров было связано не только с масштабированием выходной мощности, но и с освоением новых спектральных областей. С этой целью проводились поисковые исследования новых материалов, потенциально применимых для получения лазерно-активных световодов. Одним из важных результатов в данном направлении стало получение первых световодов с сердцевиной из алюмосиликатного стекла, легированного висмутом, которые продемонстрировали лазерную генерацию в области длин волн 1150–1215 нм [9]. Дальнейший прогресс в этой области привёл к разработке других более привлекательных с практической точки зрения висмутовых световодов, способных обеспечивать усиление оптического излучения в диапазоне длин волн 1260–1400 нм ($P_2O_5-SiO_2$); 1400–1520 нм (< 30 мол. % GeO_2-SiO_2) [10]; 1620–1770 нм (> 30 мол. % GeO_2-SiO_2) [11]. Основные характеристики (максимально достигнутая эффективность, спектральный диапазон генерации) существующих разновидностей непрерывных висмутовых лазеров (ВЛ) представлены на рис. 2. Необходимо отметить, что состав стеклянной матрицы сердцевины световода определяет тип висмутового активного центра (ВАЦ-Al, ВАЦ-P, ВАЦ-Si, ВАЦ-Ge) и систему энергетических уровней с оптическими переходами [12]. Спектральный диапазон генерации ВЛ на переходах указанных ВАЦ охватывает определённую область длин волн, и почти в каждой из них отсутству-

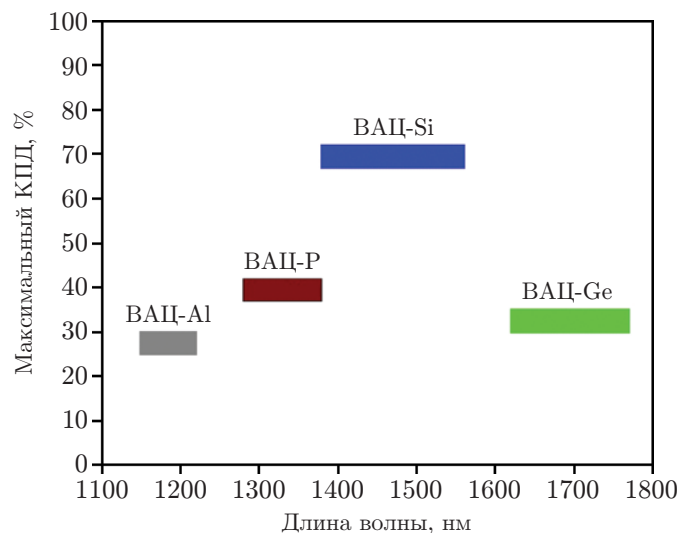


Рис. 2. Основные характеристики существующих висмутовых волоконных лазеров на оптических переходах разных типов ВАЦ

ют эффективные волоконные лазеры на редкоземельных ионах. Лучшие ВЛ, в частности, на переходах ВАЦ-Si способны обеспечить выходную мощность более 20 Вт при низком лазерном пороге (несколько мВт) и показать высокую дифференциальную эффективность $> 70\%$ (см. рис. 2). Однако из-за низкой концентрации Вi в лазерно-активных световодах достижение вышеприведённых характеристик осуществлялось с использованием ввода излучения накачки в сердцевину световода [13]. Иными словами, высокие выходные мощности волоконных лазеров на световодах, легированных Вi, требовали мощных одномодовых источников накачки, как правило, каскадных ВКР (на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния) преобразователей длины волны с накачкой волоконными лазерами, легированными Yb, для которых в свою очередь источниками накачки служат многомодовые лазерные диоды. Сложные одномодовые конструкции, используемые для накачки ВЛ, создают серьёзные трудности для их практического применения и дальнейшего масштабирования мощности лазерного излучения, даже несмотря на их преимущества, например возможность плавной перестройки длины волны генерации в широкой области длин волн, и т. д.

Тем не менее в последнее время появились публикации, где приводятся первые результаты, касающиеся разработки ВЛ с накачкой во внутреннюю оболочку с помощью коммерчески доступных многомодовых лазерных диодов, поэтому в данной работе будут рассмотрены основные результаты, достигнутые в этом направлении, а также возможности их усовершенствования, которые позволят достичь более высокой мощности и улучшенных параметров эффективности. Кроме того, приведём дополнительные оригинальные результаты об особенностях работы таких лазеров, например временную стабильность ВЛ, нелинейные зависимости выходной мощности генерации и др.

Висмутовый лазер с диодной накачкой: концепция. Известно, что добавление Вi в стеклянную матрицу приводит к появлению полос поглощения, соответствующих ВАЦ, что хорошо видно на рис. 3 для ВАЦ-Si. Схема лазерной генерации в случае использования накачки в сердцевину висмутовых световодов является квазитрёхуровневой, т. е. излучение накачки эффективно возбуждает ВАЦ непосредственно на верхний лазерный уровень (резонансная накачка) (см. рис. 3, *b*, стрелка 2). При этом длина волны накачки находится в области 1200–1310 нм (для ВАЦ-P и ВАЦ-Si) и 1450–1550 нм (для ВАЦ-Ge). Такой подход при накачке в сердцевину активного световода является наиболее

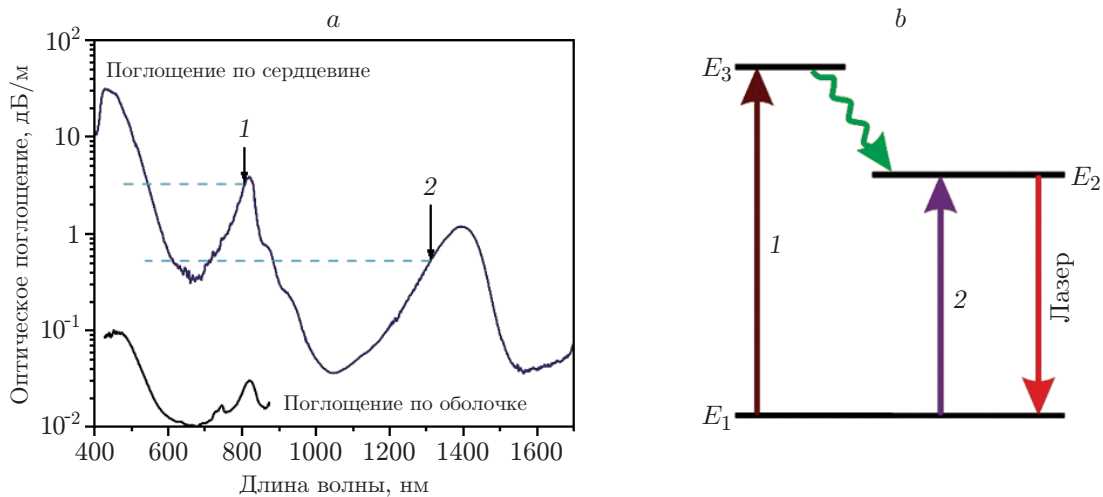


Рис. 3. Характеристики ВАЦ-Si: *a* — спектры поглощения (в оболочке и сердцевине) висмутового световода с сердцевиной из германосиликатного стекла; *b* — диаграмма энергетических уровней ВАЦ и основных переходов, связанных с возбуждением ВАЦ и лазерной генерацией

приемлемым из-за отсутствия мощных одномодовых источников с длиной волны излучения в более коротковолновой спектральной области (700–900 нм). В случае многомодовой диодной накачки такую схему генерации (квазитрёхуровневую) использовать крайне неэффективно по ряду причин: низкий уровень поглощения ВАЦ в данных областях длин волн, отсутствие мощных многомодовых лазерных диодов накачки, заметное поглощение полимерного покрытия. В этом отношении более привлекательным выглядит использование трёхуровневой схемы генерации с задействованием вышерасположенного энергетического уровня E_3 для возбуждения ВАЦ (см. рис. 3, *b*, стрелка 2), с которого будет осуществляться безызлучательный переход на верхний лазерный уровень E_2 . Аналогичная схема генерации уже использовалась для получения лазерной генерации в ИК-области на основе висмутовых световодов, но при накачке в сердцевину с помощью одномодовых лазерных источников [14]. Одно из очевидных преимуществ такого подхода заключается в доступности мощных многомодовых диодов накачки, спектр излучения которых хорошо совпадает с полосами поглощения ВАЦ-Si и ВАЦ-P, имеющими более высокий уровень интенсивности по сравнению с длинноволновыми полосами поглощения. Однако следует отметить, что квантовый дефект в такой схеме лазерной генерации заметно выше, чем при резонансной накачке, что неизбежно будет сказываться на эффективности лазерной генерации таких лазеров.

Кроме того, в такой системе необходимо обеспечивать быстрое расселение энергетического уровня E_3 на верхний лазерный уровень E_2 , чтобы, с одной стороны, уменьшить вероятность процессов поглощения из возбуждённого состояния с переходом на более высокие уровни или вынужденного расселения с переходом ВАЦ в основное состояние, а с другой стороны, эффективно заселять метастабильный лазерный уровень. Проведённые исследования показали, что времена переходов ВАЦ с уровня E_3 на уровень E_2 зависят от типа ВАЦ (45 мкс для ВАЦ-Si, 5 мкс для ВАЦ-P) [15].

Важной характеристикой висмутового световода, которая может оказывать влияние на эффективность устройства, являются неактивные потери, обусловленные примесями и неоднородностями стеклянной матрицы, а также наличием кластерных форм висмута (ненасыщаемые потери). Известно, что уровень ненасыщаемых потерь, связанных с висмутом, возрастает при переходе в коротковолновый диапазон, что накладывает определённые

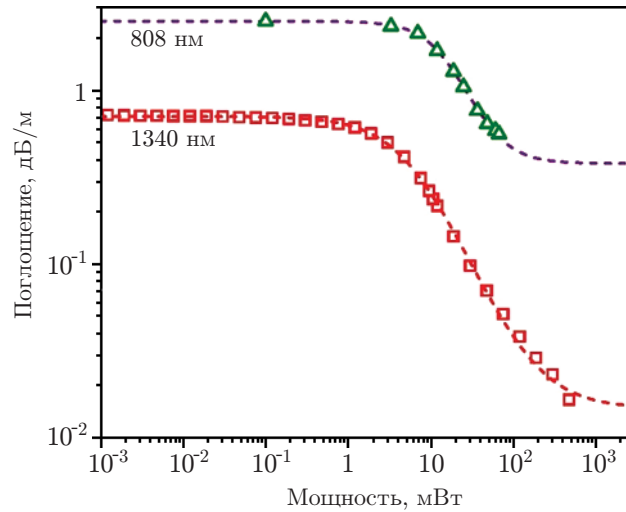


Рис. 4. Зависимости изменения коэффициента поглощения германосиликатного световода с висмутом от введённой мощности излучения на длинах волн 808 нм и 1340 нм. Излучение вводилось в сердцевину активного световода

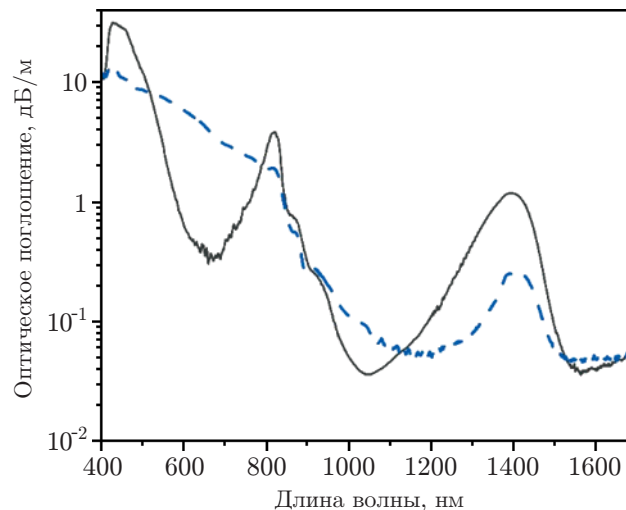


Рис. 5. Спектры поглощения световода с сердцевиной из стекла $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$, легированного Bi, до (сплошная кривая) и после (штриховая кривая) облучения на 450 нм в течение 2,5 ч

ограничения на предельно достижимые параметры разрабатываемых устройств. На рис. 4 показаны зависимости изменения поглощения в отрезке висмутитового световода с сердцевиной из германосиликатного стекла при вводе лазерного излучения на 808 и 1340 нм различной мощности. Остаточный (ненасыщаемый) уровень потерь на длинах волн 1340 и 808 нм составляет ~ 2 и 15 % от общего уровня поглощения слабого сигнала соответственно. Также следует отметить, что уровень насыщаемых потерь на длине волны 808 нм более чем в 20 раз выше, чем на длине волны 1340 нм.

Использование источников накачки с более коротковолновым излучением, например мощных многомодовых лазерных диодов синего света на длине волны 450 нм, применительно к висмутитовым лазерам невозможно, что вызвано явлениями фотообесцвечивания ВАЦ-Si, заключающегося в разрушении структуры ВАЦ, и деградации оптических свойств висмутитовых световодов [16]. Спектральные изменения поглощения висмутитового германо-

силикатного световода, произошедшие после облучения синим лазером мощностью 15 Вт, можно отчётливо наблюдать на рис. 5. Видно, что интенсивность всех полос, принадлежащих ВАЦ-Si, существенно снижается на фоне появления широкой полосы поглощения в видимой области.

Первые эксперименты по лазерной генерации. Первый висмутовый лазер с накачкой во внутреннюю оболочку генерировал излучение в области длин волн 1,43–1,46 мкм в зависимости от конфигурации резонатора (режим свободной генерации и с использованием высокоотражающей ВБР) [17]. В качестве активной среды служил германосиликатный световод с висмутом. Позже была получена лазерная генерация около 1,33–1,36 мкм с использованием световода с сердцевиной из фосфоросиликатного стекла, легированного висмутом [18]. Типичная схема висмутовых лазеров с диодной накачкой включала волоконную систему объединения излучения накачки и генерируемого излучения, активный световод и стриппер оболочечных мод (рис. 6, *a*). В качестве зеркал могли использоваться либо высокоотражающая ВБР, либо торец сколотого под прямым углом световода, обеспечивающего 4-процентное френелевское отражение. Источниками накачки выступали коммерчески доступные многомодовые полупроводниковые лазерные диоды, работающие в области длин волн 793–808 нм. Дизайн активного световода был полным аналогом стандартных световодов с круглым поперечным сечением и сердцевиной в центре. Более подробно со свойствами висмутовых световодов можно познакомиться в работах [18, 19]. Основное отличие висмутового световода от стандартных световодов заключалось в том, что показатель преломления его полимерного покрытия был ниже, чем у кварцевого стекла, что, в свою очередь, позволило создать световедущую структуру во внутренней оболочке. Следует отметить, что круглое поперечное сечение внутренней оболочки не позволяет обеспечить эффективное поглощение излучения, распространяющегося по оболочке, из-за существования мод высших порядков, имеющих слабое перекрытие с активной сердцевиной. Тем не менее для таких световодов в спектрах поглощения по оболочке могут наблюдаться полосы, принадлежащие ВАЦ (см. рис. 3, *a*).

Спектры генерации и выходные характеристики ВЛ, генерирующих излучение на длинах волн 1360 нм (фосфоросиликатный световод, $\lambda_{\text{нак}} = 793$ нм) и 1460 нм (германосиликатный световод, $\lambda_{\text{нак}} = 808$ нм), показаны на рис. 6, *b* и *d* соответственно. Качество пучка выходного излучения висмутовых лазеров определялось по измерениям M^2 параметра. Для примера на рис. 6, *c* показаны экспериментальные данные о характеристике пучка выходного лазерного излучения висмутового лазера на длине волны 1460 нм. Полученное значение $M^2 \sim 1,15$ свидетельствует об одномодовом режиме генерации излучения такого лазера. Дифференциальная эффективность полученных лазеров находилась в пределах 1–1,3 % от введённой во внутреннюю оболочку мощности накачки. Стабильная работа непрерывных висмутовых лазеров подтверждается экспериментальными данными, приведёнными на рис. 6, *e*, где показана временная зависимость выходной мощности генерации для лазера, работающего на длине волны 1460 нм в режиме свободной генерации. Видно, что после включения лазера (наблюдаемые изменения связаны с работой измерителя мощности) вариация выходной мощности лазера составляла менее 2 % в течение 100 мин его непрерывной работы.

Двухволновая накачка висмутового лазера. На рис. 6, *d* хорошо видна нелинейная зависимость выходной мощности с ростом мощности накачки для ВЛ на переходах ВАЦ-Si. Как оказалось, такое поведение обусловлено достаточно продолжительным временем спонтанной релаксации ВАЦ с уровня E_3 на верхний лазерный уровень E_2 , характерное время которой, как указано выше, для ВАЦ-Si составляет 45 мкс. При увеличении мощности накачки лазера данный спонтанный процесс становится «узким местом», ограничивая скорость заселения метастабильного уровня и, как следствие, мощность генерации. Заселение уровня E_2 за счёт расселения уровня E_3 можно добиться с помощью

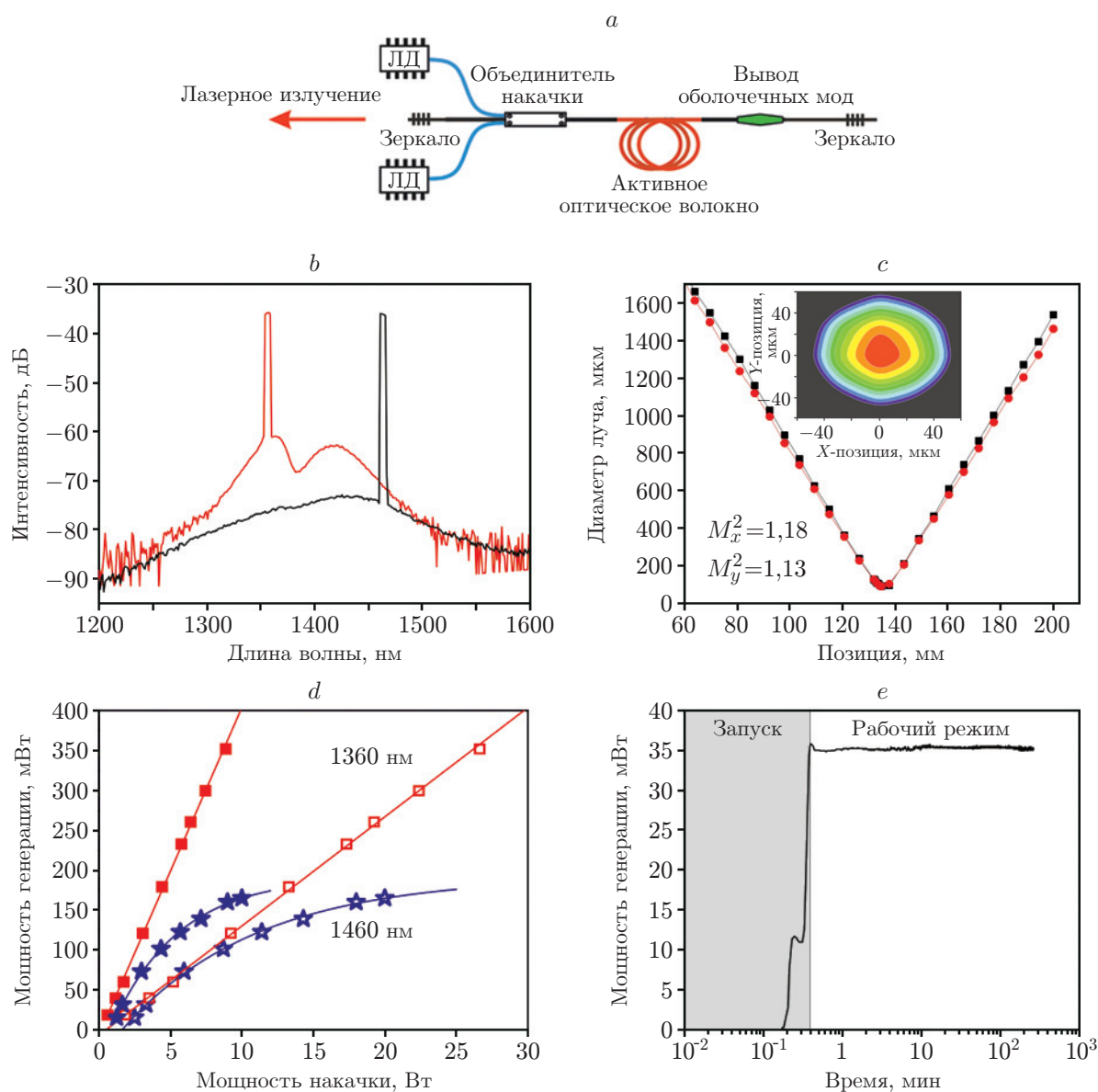


Рис. 6. Висмутовый лазер с накачкой по оболочке: *a* — схема лазера; *b* — типичные спектры излучения на выходе лазеров; *c* — характеристика пучка выходного лазерного излучения висмутового лазера на 1460 нм; *d* — зависимости мощности генерации на 1360 и 1460 нм от введённой (незакрашенные символы) и поглощённой (закрашенные символы) мощностей накачки; *e* — временная зависимость выходной мощности генерации для лазера, работающего на длине волны 1460 нм

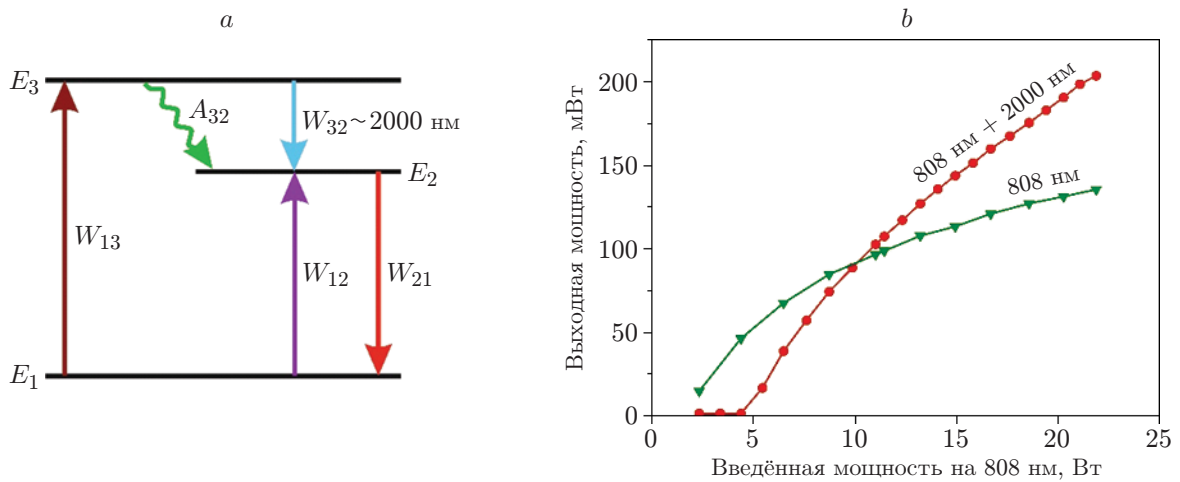


Рис. 7. Двухволновая накачка: *a* — схема уровней ВАЦ с вынужденным переходом $E_3 \rightarrow E_2$, инициированным с помощью лазерного излучения с длиной волны вблизи 2 мкм; *b* — зависимости выходной мощности висмутового лазера, генерирующего на длине волны 1460 нм, с одно- и двухволновой накачками (в оболочку на 808 нм и в сердцевину на 2000 нм (2 Вт))

вынужденных процессов, инициируемых фотонами с энергией, близкой к энергии данного перехода (рис. 7, *a*). Для этого необходимо излучение с длиной волны около 2 мкм, что достигается, например, использованием тулиевого волоконного лазера. На рис. 7, *b* показаны зависимости выходной мощности ВЛ на 1460 нм с одно- (в оболочку на $\lambda_{\text{нак}} = 808 \text{ нм}$) и двухволновой (в оболочку на 808 нм и в сердцевину на 2000 нм) накачками. Использование схемы с возбуждением на двух длинах волн позволяет частично решить проблему, связанную с расселением уровня E_3 . В результате зависимость выходной мощности лазера изменяется заметным образом, становясь по форме ближе к линейной функции. В таком случае происходит увеличение выходной мощности лазера с 135 мВт до $> 200 \text{ мВт}$ (см. рис. 7, *b*). С одной стороны, наблюдаемый эффект обусловлен тем, что приложенное возбуждение на длине волны $\sim 2000 \text{ нм}$ приводит к тому, что заселение уровня E_2 начинает происходить не только за счёт спонтанной релаксации A_{32} , но и в результате вынужденного процесса W_{32} , и при достаточной мощности тулиевого лазера скорость установления равновесного распределения населённостей между уровнями $E_3 \rightarrow E_2$ перестаёт быть «узким местом», а зависимость выходной мощности от мощности накачки стремится к линейной. С другой стороны, равновесные населённости уровней E_3 и E_2 определяются соотношениями соответствующих сечений поглощения и вынужденного излучения на длине волны генерации тулиевого лазера. Это означает, что при определённых мощностях накачки и для определённых длин волн генерации тулиевого лазера в равновесном состоянии будет преимущественно заселяться уровень E_3 , что, как следствие, приведёт к повышению порога генерации. Совокупность этих двух особенностей наблюдается на рис. 7, *b*, где видно, что с добавлением накачки в сердцевину на длине волны 2000 нм кривая распрямляется, но порог достижения генерации увеличивается с ~ 2 до 5 Вт.

Влияние дизайна внутренней оболочки световода. Одна из возможностей усовершенствования лазеров с накачкой по оболочке связана с изменением круглого поперечного сечения внутренней оболочки на прямоугольное/квадратное, а также увеличение соотношения размера сердцевины к внутренней оболочке при сохранении одномодового режима распространения излучения по сердцевине. В [20] проведён сравнительный анализ лазерных свойств для двух тестовых образцов: световод с сердцевиной 9 мкм и круглой

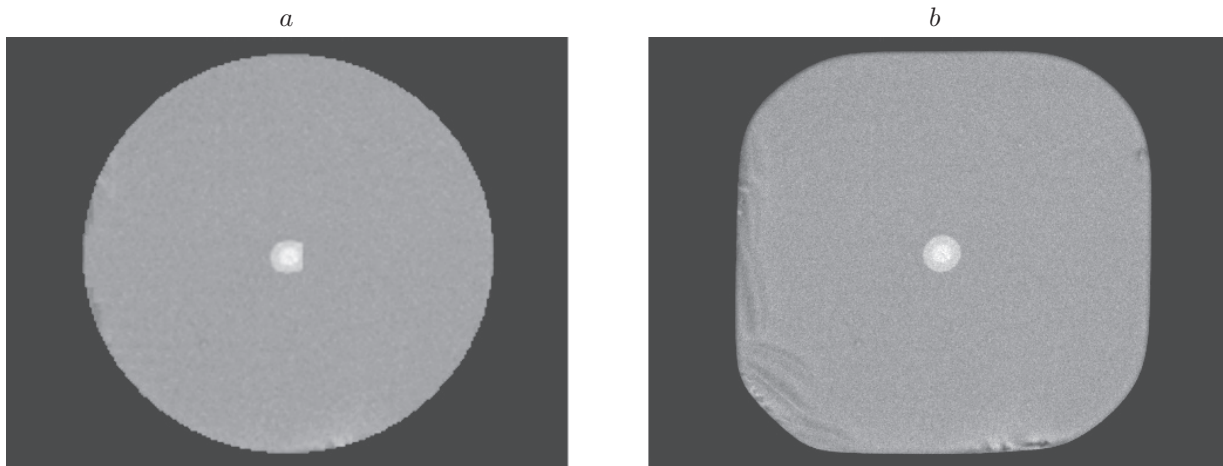


Рис. 8. Фотографии торцов световодов: с круглым сечением оболочки (а) и с квадратным сечением оболочки (b)

внутренней оболочкой диаметром 125 мкм (рис. 8, а); световод с сердцевинной 11 мкм и внутренней оболочкой квадратного сечения 80×80 мкм² (рис. 8, b).

Установлено, что поглощение по оболочке вблизи длины волны 810 нм у световода с конструкцией первой оболочки, имеющей квадратное сечение, на 20 % выше, чем у световода с круглой оболочкой с внешним диаметров 125 мкм. Изменение геометрии сечения внутренней оболочки привело к повышению дифференциальной эффективности висмутового лазера в ~ 4 раза. Исследования по оптимизации конструкции и химического состава стекла сердцевинной волоконного световода продолжаются.

Заключение. Представлен краткий обзор висмутовых лазеров с многомодовой диодной накачкой через внутреннюю оболочку активного световода. Рассмотрен способ получения лазерной генерации в таких устройствах с указанием задействованных оптических переходов ВАЦ. Представлены результаты первых экспериментов в данном направлении. Особое внимание уделено обсуждению основных параметров висмутовых лазеров (эффективность, пороговая мощность, выходная мощность, стабильность), излучающих в области длин волн 1,3–1,5 мкм. Показаны особенности применения двухволновой накачки на выходные параметры висмутовых лазеров. Рассмотрено влияние геометрии внутренней оболочки активного световода на эффективность исследованных лазеров.

Полученные данные являются первым шагом в направлении создания устройств на основе висмутовых световодов с многомодовой диодной накачкой. Несмотря на то что в данный момент максимальная достигнутая мощность разработанных устройств пока в значительной степени уступает аналогам с накачкой по сердцевине, возможности висмутовых лазеров с накачкой по оболочке до конца неясны. Вполне может оказаться, что они имеют гораздо больший потенциал, позволяя достичь существенного повышения выходных характеристик таких лазеров.

Финансирование. Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-79-00708).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jauregui C., Limpert J., Tunnermann A. High-power fibre lasers // Nature Photonics. 2013. 7, Iss. 7. P. 861–867.
2. Zervas M. N., Codemard C. A. High power fiber lasers: A review // IEEE Journ. Selected Topics in Quant. Electron. 2014. 20, Iss. 5. P. 219–241.

3. Nilsson J., Payne D. N. High-power fiber lasers // Science. 2011. **332**, N 6032. P. 921–922.
4. Бабин С. А., Ватник И. Д. Волоконные лазеры со случайной распределенной обратной связью на рэлеевском рассеянии // Автометрия. 2013. **49**, № 4. С. 3–29.
5. Харенко Д. С., Бабин С. А. Генерация диссипативных солитонов в волоконных фемто-секундных лазерах // Автометрия. 2013. **49**, № 4. С. 100–120.
6. Stiles E. New developments in IPG fiber laser technology // Proc. of the 5th International Workshop on Fiber Lasers. Dresden, Germany, Sept. 30 - Oct. 01, 2009.
7. Shi W., Fang Q., Zhu X. et al. Fiber lasers and their applications // Appl. Opt. 2014. **53**, Iss. 28. P. 6554–6568.
8. Snitzer E., Po H., Hakimi F. et al. Double clad, offset core Nd fiber laser // Proc. of the Conference of Optical Fiber Sensors. New Orleans, USA, 27 Jan., 1988. PD5.
9. Dianov E. M., Dvoyrin V. V., Mashinsky V. M. et al. CW bismuth fibre laser // Quant. Electron. 2005. **35**, Iss. 12. P. 1083.
10. Bufetov I. A., Melkumov M. A., Firstov S. V. et al. Bi-doped optical fibers and fiber lasers // IEEE Journ. Selected Topics in Quant. Electron. 2014. **20**, Iss. 5. P. 111–125.
11. Firstov S. V., Alyshev S. V., Riumkin K. E. et al. Laser-active fibers doped with bismuth for a wavelength region of 1.6–1.8 μm // IEEE Journ. Selected Topics in Quant. Electron. 2018. **24**, Iss. 5. P. 1–15.
12. Фирстова Е. Г., Буфетов И. А., Хопин В. Ф. и др. Люминесцентные свойства висмутовых активных ИК центров в стёклах на основе SiO_2 в спектральном диапазоне от УФ до ближнего ИК // Квантовая электроника. 2015. **45**, № 1. С. 59–65.
13. Thipparapu N. K., Wang Y., Wang S. et al. Bi-doped fiber amplifiers and lasers // Opt. Mater. Express. 2019. **9**, Iss. 6. P. 2446–2465.
14. Bufetov I. A., Firstov S. V., Khopin V. F. et al. Bi-doped fiber lasers and amplifiers for a spectral region of 1300–1470 nm // Opt. Lett. 2008. **33**, Iss. 19. P. 2227–2229.
15. Vakhrushev A. S., Umnikov A. A., Lobanov A. S. et al. Output power saturation effect in cladding-pumped bismuth-doped fiber lasers // Journ. Lightwave Technol. 2023. **41**, Iss. 2. P. 709–715. DOI: 10.1109/JLT.2022.3219549.
16. Firstov S. V., Kharakhordin A. V., Vakhrushev A. S. et al. Deterioration of Bismuth-Doped fiber lasers performance induced by blue and green laser light launched into cladding // Results in Physics. 2022. **34**. 105276.
17. Firstov S. V., Umnikov A. A., Kharakhordin A. V. et al. Cladding-pumped bismuth-doped fiber laser // Opt. Lett. 2022. **47**, Iss. 4. P. 778–781.
18. Вахрушев А. С., Харахордин А. В., Хегай А. М. и др. Висмутовый волоконный лазер с накачкой в оболочку световода, излучающий в области длин волн 1.3–1.4 мкм // Квантовая электроника. 2022. **52**, № 8. С. 681–684.
19. Vakhrushev A. S., Umnikov A. A., Lobanov A. S. et al. W-type and Graded-index bismuth-doped fibers for efficient lasers and amplifiers operating in E-band // Opt. Express. 2022. **30**, Iss. 2. P. 1490–1498.
20. Vakhrushev A. S., Umnikov A. A., Alyshev S. V. et al. Double clad bismuth-doped fiber with a rectangular inner cladding for laser application // Photonics. 2022. **9**, Iss. 11. P. 788.

Поступила в редакцию 31.10.2022

После доработки 18.11.2022

Принята к публикации 02.12.2022