

PACS 42.81.Cn; 42.81.Dp; 42.81.Uv; 42.55.Wd

# Легированные висмутом волоконные световоды – новый прорыв в лазерных средах для ближней ИК области спектра

Е.М.Дианов

*На основе исследований последних лет продемонстрирована перспективность использования легированных висмутом волоконных световодов в качестве активной лазерной среды для ближней ИК области спектра. Рассмотрены висмутосодержащие волоконные световоды, разработанные и использованные для создания волоконных лазеров и оптических усилителей. Дан обзор недавних результатов по исследованию люминесцентных свойств различных типов легированных висмутом волоконных световодов и по созданию висмутовых волоконных лазеров и оптических усилителей для спектральной области 1150–1550 нм. Обсуждаются проблемы, которые необходимо решить для повышения эффективности разработанных висмутовых лазеров и оптических усилителей.*

**Ключевые слова:** волоконный лазер, волоконный усилитель, волоконные световоды, легированные висмутом, волоконно-оптическая связь.

## 1. Введение

После демонстрации первого лазера в 1960 г. большое внимание уделялось поиску и созданию новых активных лазерных сред, появление которых позволяло улучшать характеристики существующих лазеров и создавать новые. В настоящее время это направление современного материаловедения по-прежнему остаётся весьма актуальным из-за постоянной потребности в новых лазерах и оптических усилителях для многих применений, в частности для нового поколения волоконно-оптических систем связи. Современные коммерческие волоконно-оптические системы позволяют передавать информацию со скоростью до 10 Тбит/с по одному световоду, тогда как в экспериментальных системах скорость передачи информации достигает ~100 Тбит/с [1]. Это колоссальный успех в развитии волоконно-оптических систем связи и передачи информации, однако потребность в информации в развитых странах растёт ежегодно на 30%–40%. Это означает, что через двадцать лет возникнет потребность в передаче информации по одному волоконному световоду с петабитными скоростями. В литературе обсуждается ряд подходов к решению этой проблемы [2]. Одним из них является расширение спектральной области для передачи информации. В современных высокоскоростных волоконно-оптических системах для этой цели используется узкая (80 нм) спектральная область 1530–1610 нм, определяемая полосой усиления эрбиевого волоконного усилителя. Но, как видно из рис.1, область низких оптических потерь волоконных световодов на основе кварцевого стекла значительно шире. Так, спектральная область с оптическими потерями менее 0.4 дБ/км, которая могла бы быть использована для передачи информации, достигает 400 нм (1300–1700 нм).

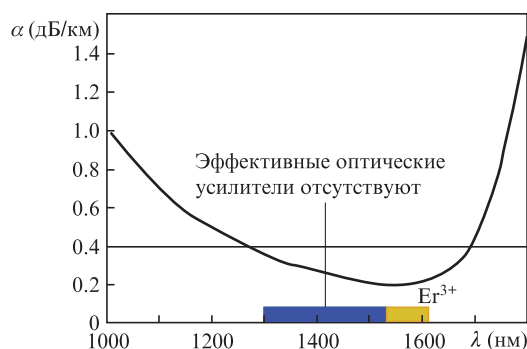


Рис.1. Спектр оптических потерь волоконных световодов на основе кварцевого стекла и спектральная область работы эрбиевого волоконного усилителя ( $\text{Er}^{3+}$ ), используемая в настоящее время для высокоскоростной передачи информации.

Однако в настоящее время для спектральных областей 1300–1520 и 1610–1700 нм отсутствуют эффективные волоконные оптические усилители – обязательные элементы высокоскоростных волоконно-оптических систем связи и передачи информации. Наиболее эффективными активными средами для ближней ИК области спектра являются световоды, легированные редкоземельными элементами. К сожалению, их полосы люминесценции не подходят для создания эффективных оптических усилителей в указанных спектральных областях. Поэтому существует настоятельная потребность в новых активных оптических материалах, пригодных для создания эффективных волоконных лазеров и оптических усилителей, работающих на этих длинах волн. Попытки разработки эффективных активных материалов, легированных переходными металлами, не были успешными.

В 2001 г. было обнаружено, что алюмосиликатное стекло, легированное висмутом, фотолуминесцирует в широкой (1000–1600 нм) области спектра с полосами люминесценции шириной 200–300 нм [3]. Этот вызвало большой интерес и привело к появлению ряда работ, посвященных исследованию люминесценции в стеклах различных составов, легированных висмутом. Но интерес к та-

ким стеклам резко возрос после первой демонстрации лазерной генерации в волоконном световоде, легированном висмутом [4].

В последующие 10 лет после наблюдения люминесценции в ближней ИК области в кварцевом стекле, легированном висмутом, было опубликовано множество статей, посвящённых исследованию этой люминесценции в различных стеклах и кристаллах, легированных висмутом. Люминесценция висмутовых центров наблюдалась и исследовалась в силикатных, германатных, алюмоборатных, алюмосиликатных, алюмофосфатных, боросиликатных и халькогенидных стёклах в спектральной области 1000–2000 нм (см., напр., обзоры [5, 6]). Несмотря на большое количество работ, посвящённых исследованию ИК люминесценции висмута в стеклах, природа висмутовых излучающих центров в стеклах до сих пор не ясна [5, 6]. Это препятствует созданию эффективных активных сред на основе стекол, легированных висмутом. И не случайно до сих пор не получена лазерная генерация в легированных висмутом объёмных образцах стекла.

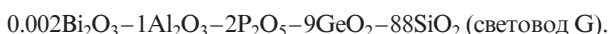
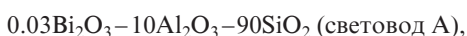
В настоящей статье представлены результаты работ по созданию различных волоконных световодов, легированных висмутом, и исследованию их люминесцентных характеристик, а также результаты недавних исследований висмутовых волоконных лазеров на основе уже разработанных световодов.

В Заключении сформулированы проблемы на пути создания высокоэффективных висмутовых волоконных лазеров и оптических усилителей и направления фундаментальных исследований для решения этих проблем.

## 2. Стекланные волоконные световоды, легированные висмутом, и их люминесцентные свойства

Первый волоконный световод, легированный висмутом, был изготовлен одновременно и независимо Научным центром волоконной оптики (НЦВО) РАН совместно с Институтом химии высокоочищенных веществ РАН [7] и японской компанией Sumitomo Electric Industries, Ltd [8] в 2005 г.

Для изготовления легированного висмутом световода использовалась технология модифицированного химического осаждения из газовой фазы (MCVD), широко применяемая для изготовления стандартных волоконных световодов (см., напр., [9]). Сердцевина этого световода состояла из легированного висмутом и алюминием кварцевого стекла, в котором впервые наблюдалась люминесценция в ближней ИК области [3]. Также был изготовлен [7] легированный висмутом фосфорогерманосиликатный волоконный световод для исследования влияния состава стекла на люминесцентные свойства. Составы стекол сердцевины этих волоконных световодов (в мол. %) были следующими:



В качестве оболочки волоконных световодов использовалось кварцевое стекло. На рис.2 показаны спектры люминесценции этих световодов при возбуждении излучением с длиной волны  $\lambda_p = 676$  нм. Эти спектры аналогичны спектрам люминесценции кварцевого стекла, леги-

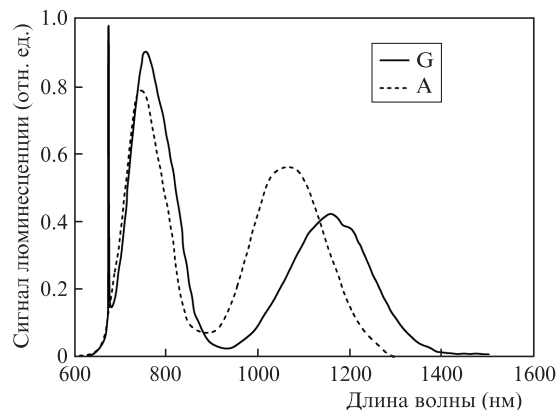


Рис.2. Спектры люминесценции первых легированных висмутом волоконных световодов.

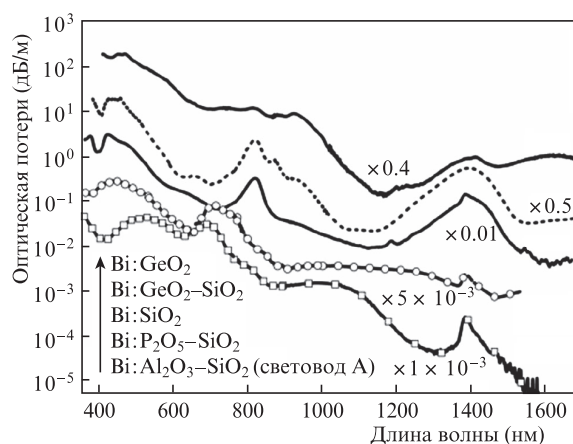


Рис.3. Спектры оптических потерь различных легированных висмутом волоконных световодов. Цифры у кривых показывают степень уменьшения поглощения соответствующего спектра для более удобного их сравнения. Изменение составов световодов идет от нижней кривой к верхним.

рованного висмутом и алюминием, полученным в [3]. Время жизни люминесценции при возбуждении излучением с  $\lambda_p = 1064$  нм равнялось 800 и 1200 мкс для световодов G и A соответственно. Спектр оптических потерь световода A показан на рис.3.

Позже были разработаны другие типы легированных висмутом волоконных световодов, в которых в качестве сердцевины использовались стекла  $\text{Bi:SiO}_2$ ,  $\text{Bi:GeO}_2$ ,  $\text{Bi:SiO}_2\text{-GeO}_2$ ,  $\text{Bi:SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Bi:SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ .

Заготовки волоконных световодов с сердцевиной из кварцевого стекла (стандартные и микроструктурированные) изготавливались различными методами: MCVD [11], «порошок в трубке» [10], золь-гельным [46], остальные заготовки – MCVD-методом [10, 11]. Все световоды вытягивались из заготовок в одинаковых условиях: нагрев до температуры около 2000 °С и последующее быстрое охлаждение световода в процессе вытяжки до температур ниже температуры стеклования за время менее 1 с. Концентрация висмута в сердцевине не превышала порога чувствительности измерительной аппаратуры и составляла, по нашим оценкам, менее 0.02 ат.%. Результаты ранних исследований спектров пропускания (поглощения) и люминесценции различных легированных висмутом волоконных световодов представлены в ряде статей и обзоров (см., напр., [12–16].

На рис.3 показаны спектры оптических потерь указанных выше волоконных световодов. Все спектры содержат несколько широких полос поглощения, расположенных в видимой и ближней ИК областях, что сильно упрощает накачку висмутовых волоконных лазеров. Нижняя кривая соответствует алюмосиликатному волоконному световоду А, первому из разработанных висмутовых световодов и наиболее изученному, и содержит хорошо известные полосы поглощения с максимумами поглощения на  $\lambda = 500, 700, 800, 1000$  и  $1400$  нм. Видно, что спектры поглощения зависят от состава стекла сердцевин, а также то, что волоконные световоды с сердцевинами из кварцевого или германосиликатного стекла имеют близкие спектры поглощения.

Прежде чем обсуждать люминесцентные свойства указанных выше световодов, хотелось бы сделать следующее отступление. Как правило, люминесцентные спектры легированных висмутом стёкол и волоконных световодов измеряются при возбуждении лишь на некоторых определённых длинах волн и регистрируются в ограниченной спектральной области спектра. Такие измерения не позволяют получить полную картину люминесценции образцов, необходимую для правильной интерпретации их спектров. В наших исследованиях мы провели измерения интенсивности люминесценции  $I_{lum}$  легированных висмутом волоконных световодов в зависимости от длин волн

как возбуждения ( $\lambda_{ex}$ ) так и излучения ( $\lambda_{em}$ ) в широкой (450–1700 нм) спектральной области. Для возбуждения люминесценции на различных длинах волн использовался источник излучения суперконтинуума SC450 (Fianium). Узкополосное излучение ( $\Delta\lambda = 3$  нм) выделялось с помощью акустооптического фильтра и вводилось в сердцевину световода. Спектры люминесценции регистрировались спектроанализатором HP в диапазоне  $875 \text{ нм} < \lambda_{em} < 1700 \text{ нм}$  и спектрометром SP200 (Ocean Optics) в диапазоне  $450 \text{ нм} < \lambda_{em} < 875 \text{ нм}$ . Таким образом были получены спектры люминесценции при изменении  $\lambda_{ex}$  в диапазоне 450–1700 нм с шагом 10 нм.

Полученные спектры люминесценции были скорректированы на спектральную чувствительность канала регистрации и нормировались на введённую в световод мощность накачки. Эти измерения позволили нам построить контурные графики зависимости  $I_{lum}(\lambda_{ex}, \lambda_{em})$  для волоконных световодов с сердцевинами  $\text{Bi}:\text{SiO}_2$ ,  $\text{Bi}:\text{GeO}_2$ ,  $\text{Bi}:\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$  и  $\text{Bi}:\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ , изображённые на рис.4 [17]. На приведённых контурных графиках отношение максимального и минимального значений люминесценции выбрано равным  $\sim 100$ . Это ограничивает области с низким уровнем люминесценции, в противном случае эти графики было бы трудно использовать при анализе структуры энергетических уровней висмутовых центров. Другими словами, на приведенных трёхмерных графиках ото-

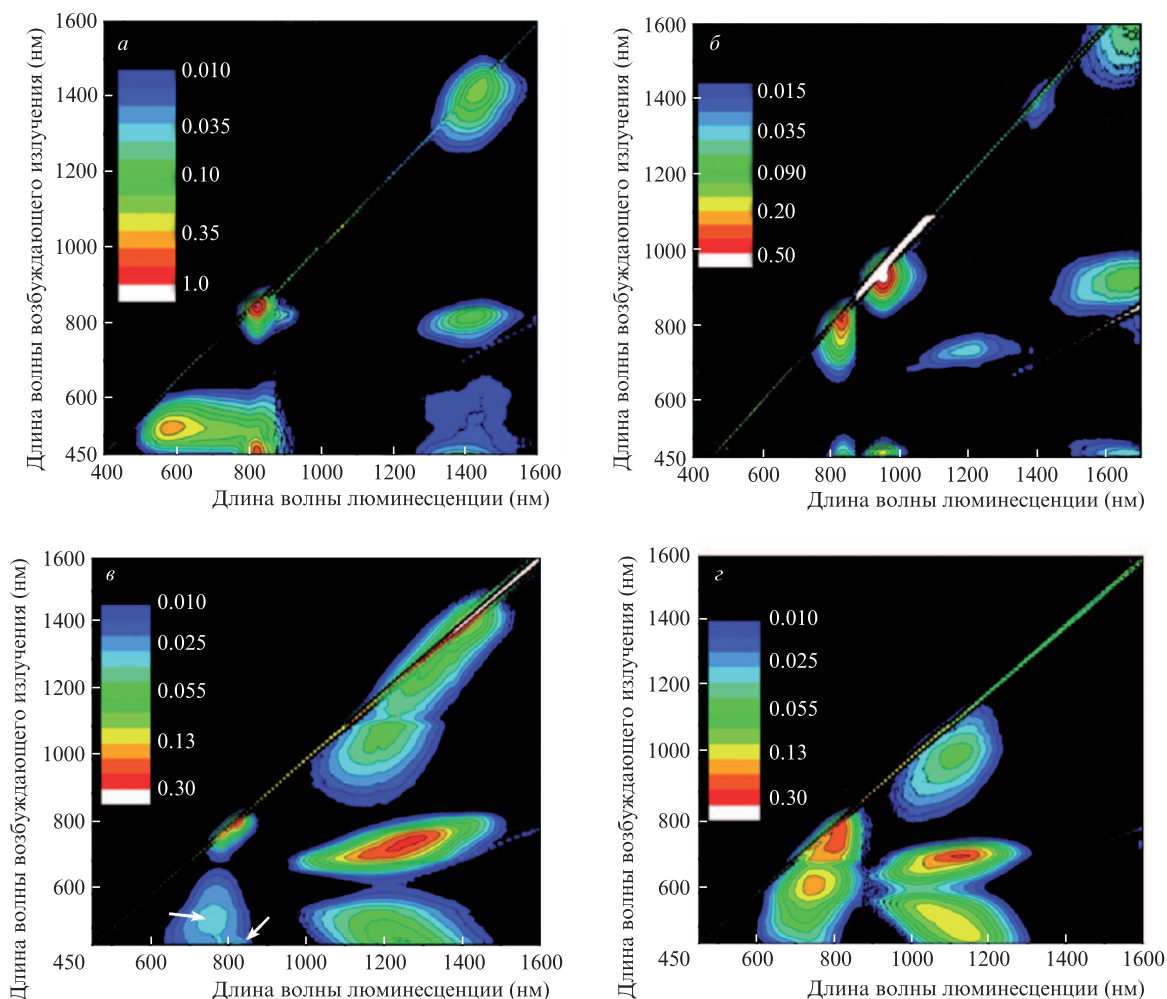


Рис.4. Контурные графики интенсивности люминесценции легированных висмутом волоконных световодов  $\text{Bi}:\text{SiO}_2$  (а),  $\text{Bi}:\text{GeO}_2$  (б),  $\text{Bi}:\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$  (в) и  $\text{Bi}:\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  (г).

бражены только основные, наиболее яркие пики наблюдаемой люминесценции. Как видно из рис.4, спектры люминесценции всех световодов представляют собой совокупность пиков сложной формы, часто налагающихся друг на друга. На всех приведённых графиках  $I_{lum}(\lambda_{ex}, \lambda_{em})$  наблюдается линия, проходящая по диагонали  $\lambda_{ex} = \lambda_{em}$ , которая соответствует рассеянному излучению возбуждения.

Наиболее простой вид имеет спектр люминесценции световода с сердцевинной из кварцевого стекла (рис.4,а). Во-первых, наблюдается красная люминесценции с максимумом на  $\lambda = 590$  нм, обусловленная  $Bi^{2+}$ . Идентификация красной люминесценции подробно обсуждается в работе [17]. Спектр ИК люминесценции состоит из двух полос: одна с максимумом на волне  $\lambda_{em} = 830$  нм, возбуждаемая излучением с  $\lambda_{ex} = 420$  и  $820$  нм, и другая с максимумом на  $1430$  нм, возбуждаемая излучением на  $\lambda_{ex} = 420, 820$  и  $1420$  нм. В дальнейшем будем считать, что эти полосы принадлежат висмуту в кварцевом стекле.

На рис.4,б показан спектр люминесценции волоконного световода с германатной сердцевинной. Неожиданным является отсутствие красной люминесценции, обусловленной  $Bi^{2+}$ . Надежного объяснения этого факта пока не существует. Присутствие полос люминесценции на  $\lambda_{em} = 830$  и  $1430$  нм связано с содержанием в германатной сердцевине небольшого количества кварцевого стекла. Две новые полосы появились в спектре люминесценции висмута на  $950$  и  $1650$  нм. В дальнейшем будем рассматривать эти полосы как принадлежащие висмуту в германатном стекле.

На рис.4,в представлена картина люминесценции фосфоросиликатного волоконного световода. Полоса люминесценции с максимумом на  $750$  нм, возбуждаемая излучением с длиной волны  $520$  нм, обусловлена  $Bi^{2+}$ . Видны полосы на  $\lambda_{em} = 830$  и  $1430$  нм, связанные с кварцевым стеклом. Широкие полосы люминесценции, расположенные в спектральной области  $1100-1300$  нм, связаны с фосфором. Спектр люминесценции волоконного световода с алюмосиликатной сердцевинной показан на рис.4,г. Полоса люминесценции на  $\lambda_{em} = 750$  нм принадлежит  $Bi^{2+}$ , полоса на  $830$  нм – висмуту в кварцевом стекле, три широкие полосы люминесценции в области  $1000-1250$  нм связаны с алюминием.

На рис.5 показаны суммарные результаты измерения люминесценции исследованных волоконных световодов. Учитывая ширины полос люминесценции ( $100$  нм и более), можно сделать вывод, что люминесценция висмуто-

вых центров исследованных волоконных световодов полностью перекрывает спектральную область  $800-1700$  нм. На этом же рисунке показаны времена жизни люминесценции для различных полос. Для длин волн от  $1000$  нм и более времена жизни люминесценции составляют  $600-1000$  мкс, а для более коротких длин волн они равны  $3-50$  мкс. Детальное обсуждение люминесцентных свойств волоконных световодов, легированных висмутом, содержится в [17].

### 3. Висмутовые волоконные лазеры

Как следует из представленных выше характеристик люминесценции (спектры, времена жизни), лазерная генерация в исследованных волоконных световодах, легированных висмутом, может быть осуществлена во всей спектральной области  $800-1700$  нм. При этом очень важной является открывшаяся возможность создания волоконных лазеров и оптических усилителей в области  $1300-1500$  нм, перспективной для передачи информации в волоконно-оптических системах нового поколения.

Первый висмутовый твердотельный (волоконный) лазер был создан в НЦВО РАН в 2005 г. [4]. В качестве активной среды использовался алюмосиликатный волоконный световод – первый из разработанных волоконных световодов, легированных висмутом [7]. Из рис.4,г следует возможность получения лазерной генерации в таком световоде в спектральной области  $1000-1250$  нм. Создание лазеров для этой области представляет большой интерес, особенно для диапазона  $1150-1250$  нм, в который не попадают длины волн генерации редкоземельных лазеров. Конструкция висмутового лазера была типичной для волоконных лазеров, резонатор которых образован брэгговскими волоконными решетками. Накачка излучением неодимового волоконного лазера на  $\lambda_p = 1060$  нм осуществлялась непосредственно в сердцевину активного световода. Непрерывная генерация с эффективностью  $\sim 10\%$  была получена в спектральной области  $1150-1215$  нм.

Запуск первого висмутового волоконного лазера инициировал их активные разработки и исследования. Был создан ряд висмутовых лазеров на основе алюмосиликатного световода, включая непрерывные лазеры с более высокой эффективностью [14, 15, 18–20], пикосекундные лазеры [21–26] и лазеры с узкой полосой излучения для генерации второй гармоники [16, 18, 19, 28]. Отметим, что жёлтое излучение ( $575-590$  нм) второй гармоники висмутовых лазеров на основе алюмосиликатного световода представляет интерес для медицинских применений, включая дерматологию [29] и офтальмологию [30]. Особый интерес представляет прямое получение излучения с длиной волны  $589$  нм путём генерации второй гармоники висмутового лазера с целью создания «искусственной звезды» (guide star) для астрономических применений [31].

Отмечу еще одно применение висмутового лазера на основе алюмосиликатного световода, связанное с разработкой полностью волоконных лазеров с модулированной добротностью. Одной из проблем в создании таких лазеров является выбор подходящего насыщающегося волоконного поглотителя. Для широко применяемого волоконного  $Yb$ -лазера в качестве такого поглотителя можно было бы использовать легированный висмутом алюмосиликатный световод с полосой поглощения вблизи  $1000$  нм, перекрывающей область генерации  $Yb$ -лазера. Однако время жизни возбужденного состояния  $Bi$  состав-

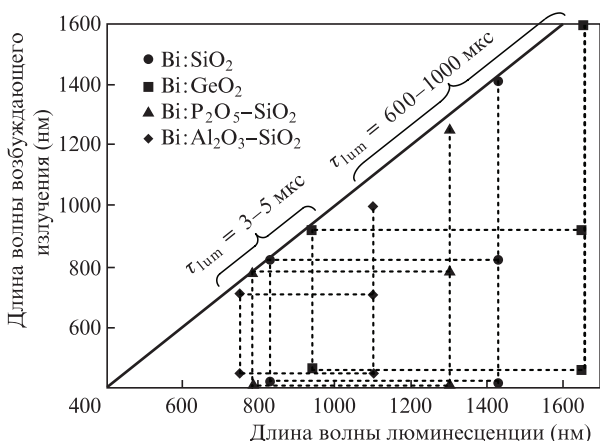


Рис.5. Суммарная схема главных пиков люминесценции различных волоконных световодов, легированных висмутом.

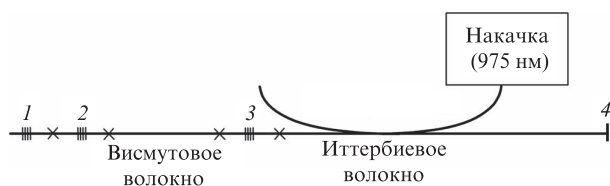


Рис.6. Висмутовый волоконный лазер в резонаторе волоконного Yb-лазера, используемый в качестве насыщающегося поглотителя для Yb-лазера с модулированной добротностью:

1, 2 – брэгговские волоконные решетки с высоким отражением; 4 и 3 – выходные зеркала Yb- и Vi-лазеров соответственно.

ляет  $\sim 800$  мкс, что ограничивает частоту следования лазерных импульсов на неприемлемо низком уровне ( $\sim 1$  кГц). Чтобы преодолеть это ограничение, в работе [32] реализована схема, в которой висмутовый волоконный световод помещен в отдельный резонатор для сокращения времени жизни возбужденного состояния висмута. Схема Yb–Vi-волоконного лазера представлена на рис.6 Импульсная генерация была получена в диапазоне длин волн 1050–1215 нм (от обоих лазеров), при этом частота следования импульсов длительностью  $\sim 1$  мкс достигала 100 кГц.

В ряде работ [18–20, 27, 33] подробно исследовано влияние параметров активного алюмосиликатного световода, прежде всего концентрации висмута, длин волн накачки и лазерной генерации, на эффективность висмутового лазера. Была обнаружена большая доля ненасыщаемого поглощения на длине волны накачки  $\lambda_p$ , причём величина этого поглощения зависела от  $\lambda_p$  и росла с увеличением концентрации висмута. Рост его концентрации приводил к кластеризации активных центров висмута, о чём свидетельствовало появление неэкспоненциальности распада люминесценции при увеличении концентрации висмута. Кроме того, были обнаружены поглощение из возбужденного состояния висмута и кооперативные эффекты, приводившие, в частности, к появлению видимого излучения (540 нм) при накачке ИК излучением. Все эти явления ограничивают эффективность висмутового лазера, приводя к необходимости использования очень низких концентраций висмута (порядка 0.01 ат.%) для увеличения эффективности лазерной генерации. Низкие концентрации являются недостатком этой лазерной системы, поскольку они требуют использования длинных активных световодов (50–100 м) и делают невозможной накачку волоконного лазера через оболочку. Возможно, этот недостаток может быть устранен при лучшем понимании природы висмутовых активных центров в стекле. Кстати говоря, именно необходимостью использования очень низких концентраций висмута для эффективной лазерной генерации объясняются неудачные попытки получения лазерной генерации в объёмных образцах стекол, легированных висмутом.

Принципиальным недостатком Vi-лазера на основе алюмосиликатного волоконного световода является узкий диапазон длин волн лазерной генерации. В настоящее время лазерная генерация получена в диапазоне 1150–1215 нм. Эффективность генерации на 1150 и 1160 нм при выходной мощности 13 и 15 Вт соответственно. На длинах волн 1205 и 1215 нм эффективность была равна  $\sim 7\%$  [18]. Максимальная эффективность была достигнута на длине волны 1179 нм при накачке на 1090 нм и составила 28% [20].

Висмутовые волоконные лазеры и оптические усилители для более длинноволновой (свыше 1250 нм) спек-

тральной области были созданы с использованием фосфорогерманосиликатных [34–36] и германосиликатных [37–40] световодов, а также волоконных световодов с сердцевиной из кварцевого стекла [11, 41]. Ниже представлены результаты разработки и исследования двух мощных непрерывных лазеров, работающих на длинах волн 1270 и 1460 нм, и висмутового волоконного оптического усилителя с максимумом усиления на 1460 нм.

Волоконный лазер с длиной волны генерации 1270 нм представляет интерес для многих применений, в частности для медицинских [42], а излучение второй гармоники этого лазера может заменить излучение газового He–Ne-лазера. Конструкция лазера была обычной для непрерывных волоконных лазеров: использовались легированный висмутом фосфорогерманосиликатный световод длиной 95 м и две брэгговские волоконные решетки, наплавленные на концы висмутового световода [36]. Одна решетка имела коэффициент отражения около 100%, в качестве выходного зеркала использовалась решетка с коэффициентом отражения 50% или 25%. Спектральные ширины всех брэгговских решеток составляли 0.5 нм. В качестве источника накачки использовался волоконный ВКР-лазер с длиной волны генерации 1230 нм и максимальной мощностью 25 Вт. На рис. 7 показана зависимость выходной мощности висмутового лазера от поглощенной мощности накачки. Впервые на длине волны 1268 нм получена непрерывная генерация мощностью 7 Вт при эффективности 35%.

Легированный висмутом фосфорогерманосиликатный световод был также использован для создания оптического усилителя, работающего в спектральной области вблизи 1300 нм. При накачке излучением с длиной волны 1230 нм и мощностью 460 мВт получено усиление с максимумом 25 дБ на 1320 нм и шириной полосы 40 нм [35].

Другим новым результатом является разработка мощных и эффективных висмутовых волоконных лазеров, генерирующих в спектральной области 1390–1530 нм [37–39]. В качестве активной среды этих лазеров использовался германосиликатный волоконный световод с концентрацией висмута не более 0.01 ат.%. Длина световода равнялась 95 м, что обеспечивало практически полное поглощение излучения накачки. Полоса люминесценции этого световода имела ширину  $\sim 150$  нм по уровню 3 дБ с максимумом вблизи 1430 нм.

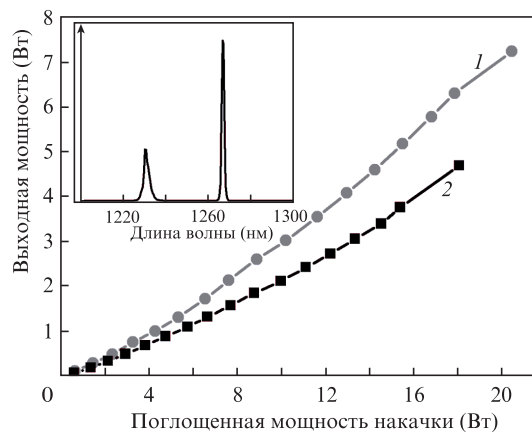


Рис.7. Зависимости выходной мощности лазера на длине волне 1268 нм от поглощенной мощности накачки для коэффициентов отражения выходного зеркала 50% (1) и 25% (2). На вставке – спектр лазерного излучения.

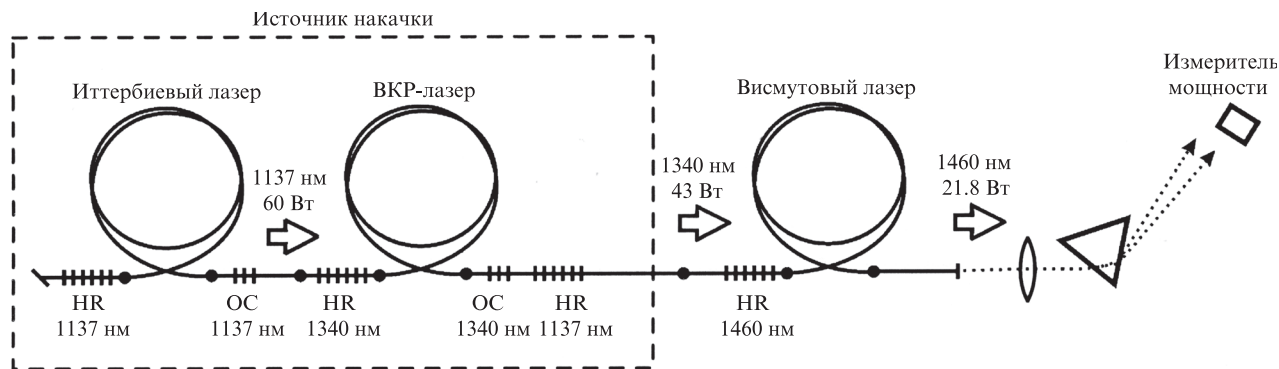


Рис.8. Схема висмутового волоконного лазера с длиной волны генерации 1460 нм. Показаны положения и даны длины волн резонансного отражения брэгговских решеток, образующих резонаторы лазеров накачки и висмутового лазера (HR – брэгговские решетки с коэффициентом отражения ~100%, ОС – брэгговские решетки, используемые в качестве выходных зеркал лазеров).

Схема лазера, генерирующего на длине волны 1460 нм, представлена на рис.8. Источником накачки ( $\lambda_p = 1340$  нм) служил ВКР-лазер на основе фосфоросиликатного световода, который, в свою очередь, накачивался излучением волоконного Yb-лазера с длиной волны 1137 нм. Зависимость выходной мощности висмутового лазера от мощности накачки показана на рис.9,а. Максимальная выходная мощность составляет 22 Вт при эффективности оптической накачки 50%.

На рис.9,б представлены температурные зависимости эффективности висмутовых лазеров на основе алюмосиликатного, фосфорогерманосиликатного и германосиликатного световодов. Видно, что эффективность висмутового лазера на основе германосиликатного волоконного световода наиболее слабо зависит от температуры.

Широкая полоса люминесценции висмутового германосиликатного волоконного световода с максимумом вблизи 1430 нм указывает на возможность получения лазерной генерации на различных длинах волн в пределах этой полосы. Для подтверждения такой возможности были собраны несколько лазерных схем, созданных путем замены в схеме висмутового лазера (рис.8) брэгговских волоконных решеток на пары решеток для длин волн между 1389 и 1538 нм. Лазерная генерация с выходной мощностью в несколько ватт и эффективностью 30%–65% была получена на длинах волн 1390, 1480, 1500 и 1538 нм [39].

Таким образом, впервые продемонстрирован висмутовый волоконный лазер на основе германосиликатного световода с выходной мощностью более 20 Вт и эффективностью 50% на длине волны 1460 нм, для которого характерен слабый температурный спад эффективности. Лазерная генерация в диапазоне длин волн 1390–1540 нм обладала достаточно высокой эффективностью.

Висмутовый германосиликатный волоконный световод был использован для создания эффективного оптического усилителя с максимумом усиления вблизи 1430 нм. При его накачке излучением коммерческого лазерного диода мощностью 65 мВт на  $\lambda_p = 1310$  нм было получено максимальное усиление 25 дБ; ширина полосы усиления достигала 40 нм (по уровню 3 дБ) и шум-фактор составлял 6 дБ [40].

На рис.10 показаны длины волн генерации и максимальные выходные мощности разработанных к настоящему моменту непрерывных висмутовых волоконных лазеров. Точками на горизонтальной оси указаны длины волн накачки и связанные с ними возбуждаемые длины волн генерации (не показаны длины волн генерации лазеров с выходной мощностью менее 1 Вт). Таким образом, в настоящее время разработанные висмутовые волоконные лазеры практически полностью перекрывают диапазон длин волн 1150–1550 нм.

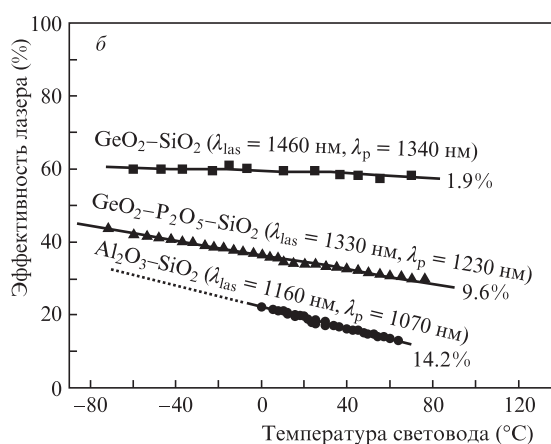
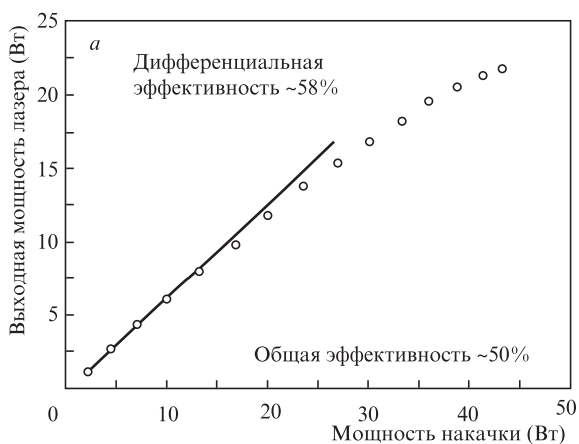


Рис.9. Зависимости выходной мощности висмутового лазера от мощности накачки на  $\lambda_p = 1340$  нм (а) и эффективности генерации различных висмутовых лазеров от температуры световода (указаны составы сердцевин висмутовых световодов, длины волн генерации и накачки соответствующих лазеров и величины спада эффективности (в процентах) при изменении температуры волоконного световода на 100 °C) (б).

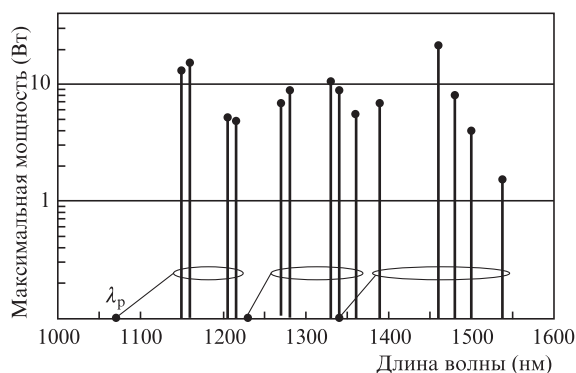


Рис.10. Выходные мощности различных непрерывных висмутовых лазеров, работающих в спектральной области 1150–1550 нм.

#### 4. Заключение

Полученные к настоящему моменту времени результаты подтверждают ожидаемую высокую перспективность стеклянных волоконных световодов, легированных висмутом, в качестве лазерной среды для ближней ИК области спектра. Спектры люминесценции стекол различных составов, легированных висмутом, полностью перекрывают спектральную область 800–2000 нм, при этом ширины полос люминесценции составляют 150–300 нм.

Разработана технология получения ряда волоконных световодов, легированных висмутом, на основе которых создано семейство висмутовых волоконных лазеров с эффективностью 25%–50%, полностью перекрывающих диапазон 1150–1550 нм. Важно отметить, что этот диапазон длин волн включает спектральную область 1300–1500 нм, в которую не попадают длины волн эффективных редкоземельных лазеров, но которая важна для ряда применений, прежде всего для волоконно-оптической связи. Именно для этой спектральной области разработаны висмутовые оптические усилители с максимальным усилением 25 дБ на длинах волн 1320 и 1430 нм и шириной полосы усиления ~40 нм.

Однако в настоящее время имеется ряд проблем, естественных при использовании новых лазерных материалов, которые пока не удалось решить.

Упомянем здесь лишь три проблемы.

1. Эффективная генерация висмутовых волоконных лазеров реализована лишь для очень низких концентраций висмута (не более 0.01 ат. %).

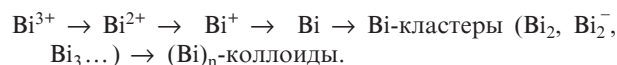
2. Достигнутая эффективность висмутовых волоконных лазеров и оптических усилителей пока ниже эффективности соответствующих приборов, в которых используются редкоземельные элементы.

3. Пока не удалось получить генерацию висмутовых лазеров во всем возможном диапазоне длин волн 800–2000 нм.

Трудности в решении указанных проблем в значительной степени связаны со своеобразием висмута как активного элемента.

Во-первых, для изготовления стекол, содержащих висмут, используются исходные соединения, содержащие висмут в трехвалентном состоянии ( $\text{Bi}^{3+}$ ), например оксид висмута  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . Однако в процессе варки стекол или при изготовлении волоконных световодов при температурах более 1000 °С висмут восстанавливается до состояний с более низкой валентностью. И только в этом случае возникают висмутовые центры, люминесцирующие в ближней ИК области.

Во-вторых, своеобразие висмута как химического элемента заключается в его исключительно высокой скорости восстановления при росте температуры плавления стекла с образованием ионов более низкой валентности и различных комплексов [43, 44]:



Скорость этого процесса зависит от температуры, состава стекла, от атмосферы и концентрации висмута.

В настоящий момент мы не знаем точно природу висмутовых центров, люминесцирующих в ближней ИК области. Имеется ряд гипотез, касающихся источника ИК люминесценции, согласно которым это  $\text{Bi}^{+}$ ,  $\text{Bi}$ -кластеры,  $\text{BiO}$ ,  $\text{Bi}_2^-$ ,  $\text{Bi}_2^{2-}$ , точечные дефекты и др., но ни одна из этих гипотез не имеет прямого подтверждения [5]. По мнению автора статьи, источником этой люминесценции является не индивидуальный ион висмута в низковалентном состоянии, а некоторые дефектные центры, состоящие из иона  $\text{Bi}$  в низковалентном состоянии и дефекта стекла, скорее всего анионной (кислородной) вакансии [6, 45]. Требуется проведение дальнейших фундаментальных исследований по выяснению природы висмутовых излучающих центров. Но даже если мы будем знать их структуру, придется решать другую проблему – это контроль процесса восстановления  $\text{Bi}^{3+}$ , чтобы получать  $\text{Bi}$  в нужном валентном состоянии и не допускать избыточного восстановления висмута с образованием кластеров металлического висмута, приводящим к росту оптических потерь волоконных световодов и другим проблемам, обсужденным в предыдущем разделе. Другими словами, требуются фундаментальные исследования восстановления висмута в стеклах и процессов установления окислительно-восстановительного равновесия  $\text{Bi}$  в стеклах.

В случае висмутовых волоконных световодов на основе кварцевого стекла проведение этих фундаментальных исследований встречает существенные трудности из-за высоких температур, используемых при изготовлении волоконных световодов и достигающих 2000 °С. Однако без таких исследований трудно рассчитывать на решение указанных выше проблем.

Автор благодарит сотрудников НЦВО РАН В.Г.Плотниченко и В.О.Соколова за обсуждения при подготовке этой статьи и ценные замечания.

1. *Proc. OFC Conf.* (Los Angeles, 2012).
2. Morioka Toshio. *Proc. Optoelectron. and Commun. Conf.* (Hong Kong, 2009, paper FT4).
3. Fujimoto Y., Nakatsuka M. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, L279 (2001).
4. Дианов Е.М., Двойрин В.В., Машинский В.М., Умников А.А., Яшков М.В., Гурьянов А.Н. *Квантовая электроника*, **35**, 1083 (2005).
5. Peng M., Dong G., Wondraczek L., Zhang L., Zhang N., Qiu J. *J. Non-Crystal. Sol.*, **357**, 2241 (2011).
6. Dianov E.M. *Light: Science and Applications*; 1, e12; doi:10.1038/lisa.2012.12 (2012).
7. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M., Umnikov A.A., Yashkov M.V., Guryanov A.N. *Proc. ECOC* (Glasgow, 2005, paper Th. 3.3.5).
8. Nagura T., Kakui M., Taru T., Ishikawa Sh., Onishi M. *Proc. Opt. Appl. Topical Meeting* (Budapest, 2005, paper MC3).
9. Дианов Е.М., Прохоров А.М. *УФН*, **148**, 289 (1986).
10. Буфетов И.А., Семенов С.Л., Вельмискин В.В., Фирстов С.В., Буфетова Г.А., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **40**, 639 (2010).

11. Zlenko A.S., Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Denisov A.N., Iskhakova L.D., Mayorova M.S., Medvedkov O.I., Semenov S.L., Vasiliev S.A., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **36**, 2599 (2011).
12. Dianov E.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6890**, 6890H-1 (2008).
13. Bufetov I.A., Dianov E.M. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 487 (2009).
14. Razdobreev I., Bigot L., Pureur V., Favre A., Bouwmans G., Douay M. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 031103-1 (2007).
15. Kalita M.P., Yoo S., Sahu J. *Opt. Express*, **16**, 21032 (2008).
16. Dianov E.M., Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Medvedkov O.I. *Proc. ECOC* (Cannes, 2006, paper Th.2.3.1).
17. Firstov S.V., Khopin V.F., Bufetov I.A., Firstova E.G., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Express*, **19**, 19551 (2011).
18. Dianov E.M., Shubin A.V., Melkumov M.A., Medvedkov O.I., Bufetov I.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**, 1749 (2007).
19. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **44**, 834 (2008).
20. Dvoyrin V.V., Kir'yanov A.V., Mashinsky V.M., Medvedkov O.I., Umnikov A.A., Guryanov A.N., Dianov E.M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **46**, 182 (2010).
21. Dianov E.M., Krylov A.A., Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Kryukov P.G., Okhotnikov O.G., Guina M. *J. Opt. Soc. Am. B*, **27**, 1807 (2007).
22. Kivistö S., Puustinen J., Guina M., Okhotnikov O.G., Dianov E.M. *Electron. Lett.*, **44**, 1456 (2008).
23. Крылов А.А., Крюков П.Г., Дианов Е.М., Охотников О.Г. *Квантовая электроника*, **39**, 882 (2009).
24. Kivistö S., Gumenyuk R., Puustinen J., Guina M., Dianov E.M., Okhotnikov O.G. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **21**, 599 (2009).
25. Kivistö S., Puustinen J., Guina M., Herda R., Marcinkevicius S., Dianov E.M., Okhotnikov O.G. *Opt. Express*, **18**, 1041 (2010).
26. Luo A.-P., Luo Z.-C., Xu W.-C., Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 601 (2011).
27. Bufetov I.A., Firstov S.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Proc. ECOC* (Brussels, 2008, paper Tu.3.B.4).
28. Rulkov A.B., Ferin A.A., Popov S.V., Taylor J.R., Razdobreev I., Bigot L., Bouwmans G. *Opt. Express*, **15**, 5473 (2007).
29. Sadick N.S., Weiss R. *J. Dermatol. Surg.*, **28**, 21 (2002).
30. Blodi C.F., Russel S.R., Padilo J.S., Folk J.C. *Ophthalmology*, **6**, 791 (1990).
31. Max C.E., Olivier S.S., Friedman H.W., et al. *Science*, **277**, 1649 (1977).
32. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **32**, 451 (2007).
33. Yoo S., Kalita M.P., Sahu J., Nilsson J., Oton C. *Proc. 3rd EPS-QEOD Europhoton Conf.* (Paris, 2008, paper THoE.5).
34. Дианов Е.М., Мелькумов М.А., Шубин А.В., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Буфетов И.А., *Квантовая электроника*, **39**, 1099 (2009).
35. Bufetov I.A., Melkumov M.A., Khopin V.F., Firstov S.V., Shubin A.V., Medvedkov O.I., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7580**, 758014-1 (2010).
36. Bufetov I.A., Shubin A.V., Firstov S.V., Melkumov M.A., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Proc. CLEO/Europe-EQEC Conf.* (Munich, 2011, paper cJ 8.2).
37. Dianov E.M., Bufetov I.A., Firstov S.V., Medvedkov O.I., Melkumov M.A. *Proc. ECOC* (Geneva, 2011, paper Tu 3 Le Cervin 3).
38. Фирстов С.В., Шубин А.В., Хопин В.Ф., Мелькумов М.А., Буфетов И.А., Медведков О.И., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **41**, 581 (2011).
39. Shubin A.V., Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S.V., Medvedkov O.I., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **37**, 2589 (2012).
40. Melkumov M.A., Bufetov I.A., Shubin A.V., Firstov S.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **36**, 2408 (2011).
41. Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S.V., Shubin A.V., Semenov S.L., Vel'miskin V.V., Levchenko A.E., Firstova E.G., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **36**, 166 (2011).
42. Krasnovsky A.A., Drozdova N.N., Ivanov A.V., Ambartsumian R.V. *Biochemistry (Moscow)*, **68**, 963 (2003).
43. Corbett J.D. *Progr. Inorganic Chem.*, **21**, 129 (1976).
44. Khonton S., Morimoto Sh., Arai Y., Ohishi Y. *Opt. Materials*, **31**, 1262 (2009).
45. Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **40**, 283 (2010).
46. Razdobreev I., El Hamzaoui H., Ivanov V.Yu., Kustov E.F., Capoen B., Bouzaoui M. *Opt. Lett.*, **35**, 1341 (2010).