

Влияние температуры на активные свойства эрбиевых волоконных световодов

Л.В.Котов, А.Д.Игнатьев, М.М.Бубнов, М.Е.Лихачев

Исследовано влияние нагрева эрбиевых световодов на характеристики устройств на их основе. Определены температурные зависимости сечений поглощения и излучения ионов эрбия в кварцевом стекле. Показано, что нагрев световодов в мощных (~100 Вт) эрбиевых волоконных лазерах с накачкой по оболочке не приводит к существенному уменьшению эффективности их работы. Установлено, что суперлюминесцентные источники, работающие в длинноволновом диапазоне (1565–1610 нм), напротив, оказываются крайне чувствительными к изменению температуры.

Ключевые слова: эрбиевый волоконный световод, эффективность, температура, суперлюминесцентные источники.

1. Введение

Устройства на основе эрбиевых волоконных световодов (лазеры, усилители, суперлюминесцентные источники) находят широкое применение в различных областях науки и техники, в частности в телекоммуникациях, медицине, датчиках, в устройствах для удаленного зондирования и др. Нередко при эксплуатации таких приборов температура активного световода может существенно увеличиваться. Согласно распределению Больцмана, увеличение температуры активного световода изменяет населенность подуровней лазерных уровней. Это приводит к изменению сечений поглощения и сечений излучения ионов эрбия, что влияет на величину инверсной населенности в световоде и увеличивает перепоглощение сигнала [1]. Как известно, главным фактором, снижающим эффективность преобразования излучения накачки в сигнал лазеров и усилителей на основе эрбиевых световодов, является кооперативная ап-конверсия вследствие кластеризации ионов эрбия [2–4]. Дополнительное перепоглощение сигнала приводит к увеличению негативного влияния кластеризации на эффективность работы таких лазеров [4]. Таким образом, нагрев может приводить к падению КПД и, следовательно, выходной мощности лазеров и усилителей на основе эрбиевых световодов. Увеличение инверсной населенности также влияет на спектр усиления активных световодов, поэтому нагрев может изменять спектры суперлюминесцентных источников.

Стоит отметить, что во многих применениях эрбиевых световодов нагрев не приводит к существенному измене-

нию характеристик устройств на их основе. Так, хорошо известно, что стандартные эрбиевые усилители С-диапазона (1530–1565 нм), накачиваемые по сердцевине одно-модовыми лазерными диодами, обладают крайне низкой температурной чувствительностью – изменение коэффициента усиления в них не превышает сотых долей дБ/°С [5, 6]. Также известна высокая стабильность суперлюминесцентных источников, используемых для гироскопов: после оптимизации параметров изменение длины волны в таких источниках составляет единицы пм/°С [7]. Однако высокая температурная стабильность перечисленных источников излучения достигается за счет использования эрбиевого световода относительно небольшой длины, соответствующей поглощению слабого сигнала накачки по сердцевине (далее ПССНС) 20–40 дБ, что исключает существенное перепоглощение сигнала.

Существует ряд применений, в которых длина эрбиевого световода существенно больше (ПССНС составляет 100–400 дБ), и перепоглощение сигнала в таких устройствах начинает играть значительную роль. В первую очередь это эрбиевые лазеры и усилители с накачкой по оболочке (поглощение из оболочки на порядок меньше, чем поглощение по сердцевине, что требует пропорционального увеличения длины световода). Большие длины эрбиевого световода требуются также для суперлюминесцентных источников, излучающих в длинноволновом L-диапазоне (1565–1625 нм), где генерация сигнала достигается путем многократного поглощения сигнала с более короткими длинами волн и излучения фотонов в длинноволновой области при распространении вдоль протяженного участка световода.

Несмотря на большое число публикаций, посвященных исследованиям свойств эрбиевых световодов и устройствам на их основе, на сегодняшний день, насколько нам известно, отсутствуют работы, в которых детально исследована температурная чувствительность устройств с эрбиевыми световодами большой длины (ПССНС свыше 100 дБ). Целью настоящей работы является детальное исследование температурных эффектов таких устройств, равно как и определение зависимости сечений поглощения и излучения от температуры, что необходимо для теоретического анализа температурных эффектов.

Л.В.Котов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: kotov@fo.gpi.ru

А.Д.Игнатьев. ООО «Инновационное предприятие “НЦВО-Фотоника”», Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

М.М.Бубнов, М.Е.Лихачев. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 11 ноября 2015 г., после доработки – 27 января 2016 г.

2. Температурная зависимость сечений ионов эрбия

Как уже было сказано, увеличение температуры эрбиевого световода приводит к изменениям сечений поглощения и излучения ионов эрбия. В данном разделе приведены результаты исследований температурной зависимости этих сечений в диапазоне 25–120 °С. Известно, что спектры сечений поглощения и излучения ионов эрбия зависят от состава стекла сердцевинны [3, 8]. Наиболее распространенным составом на сегодняшний день является алюмосиликатное стекло с концентрацией оксида алюминия 4–7 мол.%. Это стекло обладает наилучшей растворимостью кластеров эрбия, обеспечивая, таким образом, наибольшую эффективность преобразования излучения накачки в сигнал [3]. Световоды на основе алюмосиликатных стекол широко используются в телекоммуникационных усилителях, а также в эрбиевых суперлюминесцентных источниках. В то же время такие световоды имеют высокую разность показателей преломления сердцевинны и оболочки ($\Delta n > 0.01$). Это приводит к невозможности получения одномодовых световодов с большой площадью поля моды, необходимых для создания усилителей импульсов с высокой пиковой мощностью [9–11] и мощных высокоэффективных непрерывных лазеров [4, 12].

Недавно было показано, что световоды с малой величиной Δn , сохраняющие высокую лазерную эффективность, могут быть реализованы при использовании тройной фосфоалюмосиликатной матрицы стекла [3, 13]. Причиной этого является тот факт, что при одновременном легировании оксидами алюминия и фосфора в сетке стекла образуются структурные группы $AlPO_4$, свойства которых близки к свойствам молекул SiO_2 [14]. Показатель преломления такого стекла при эквимолярном соотношении оксидов алюминия и фосфора оказывается даже более низким, чем у чистого кварцевого стекла. Положительная разность показателей преломления сердцевинны и оболочки в данном случае может быть обеспечена небольшим избытком оксида алюминия либо оксида фосфора. С технологической точки зрения из-за меньшей рефрактивности оксида фосфора для получения небольшого Δn удобнее использовать именно его, а не оксид алюминия. Таким образом, для измерения температурных зависимостей сечений поглощения и излучения нами были выбраны два типа эрбиевых световодов, наиболее перспективные с точки зрения создания источников излучения в области 1.55 мкм, а именно алюмосиликатные (AlSi) и фосфоалюмосиликатные с избытком фосфора (PAISi) световоды.

Для измерения относительного изменения сечения излучения с температурой была использована схема, изображенная на рис.1. Излучение одномодового лазерного диода накачки (980 нм, мощность ~100 мВт) с помощью волоконного мультиплексора WDM 980/1550 нм вводилось в отрезок эрбиевого световода, другой конец которого был сколот под углом для предотвращения обрат-

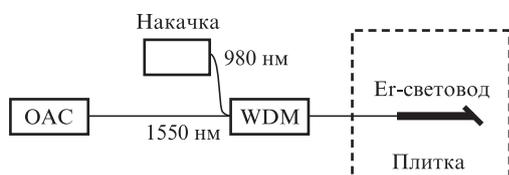


Рис.1. Схема измерения спектра люминесценции.

ного отражения сигнала. Люминесценция, распространяющаяся в обратном направлении, выходила из сигнального порта мультиплексора, снабженного FC/APC-коннектором с волоконным (SMF28) выводом, и измерялась с помощью оптического анализатора спектра (ОАС) (Yokogawa AQ6370C). Отрезок активного световода находился на нагревательной плитке с цифровым управлением температурой (Wisd WiseTherm HP-20D) и был накрыт теплоизолирующим материалом. Измеряемые спектры затем корректировались с учетом спектра оптических потерь мультиплексора. Для достижения теплового равновесия между световодом и плиткой каждое измерение спектра люминесценции проводилось не ранее чем через 15 мин после изменения температуры плитки.

Для измерений использовались AlSi- и PAISi-световоды с максимумом поглощения 23 и 52 дБ/м в области 1530 нм, диаметрами сердцевинны 4 и 9 мкм и $\Delta n \sim 0.02$ и 0.004 соответственно. Оболочки световодов диаметром 125 мкм были покрыты полимером с высоким показателем преломления. Для исключения изменения спектральной формы люминесценции вследствие перепоглощения/усиления при измерениях были выбраны длины отрезков исследуемых световодов 3 и 1.5 см соответственно. На рис.2 приведены нормированные спектры люминесценции, измеренные при комнатной температуре (25 °С). Стоит отметить, что, как и следовало ожидать из результатов работы [3], форма спектра излучения PAISi-световода близка к форме спектра фосфоросиликатного световода.

На рис.3 показаны относительные изменения спектров люминесценции при температурах $T = 40, 80$ и 120 °С, соответствующие изменениям сечения излучения для AlSi- и PAISi-световодов при $T = 25$ °С.

Температурные зависимости сечений поглощения исследовались с помощью метода последовательного уменьшения длины (метод «облома»). На рис.4 приведены нормированные спектры поглощения при комнатной температуре. На рис.5 показаны относительные температурные изменения форм спектров, а следовательно, и сечений поглощения для AlSi- и PAISi-световодов.

Сравнивая зависимости на рис.3 и 5, можно отметить, что в области 1570 нм сечения поглощения и излучения увеличиваются с нагревом световода, при этом относительный рост сечений поглощения примерно в 3 раза больше, чем сечений излучения. Кроме того, относительное изменение сечений поглощения, в отличие от сечений излучения, не уменьшается с ростом длины волны в область более 1585 нм. Как было отмечено выше, увеличение се-

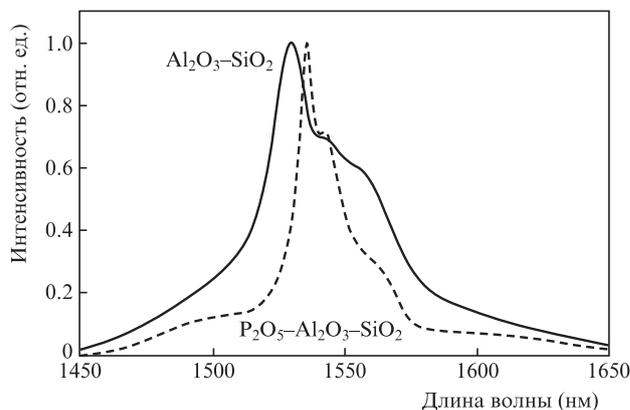


Рис.2. Спектры люминесценции ионов эрбия для AlSi- и PAISi-стекла.

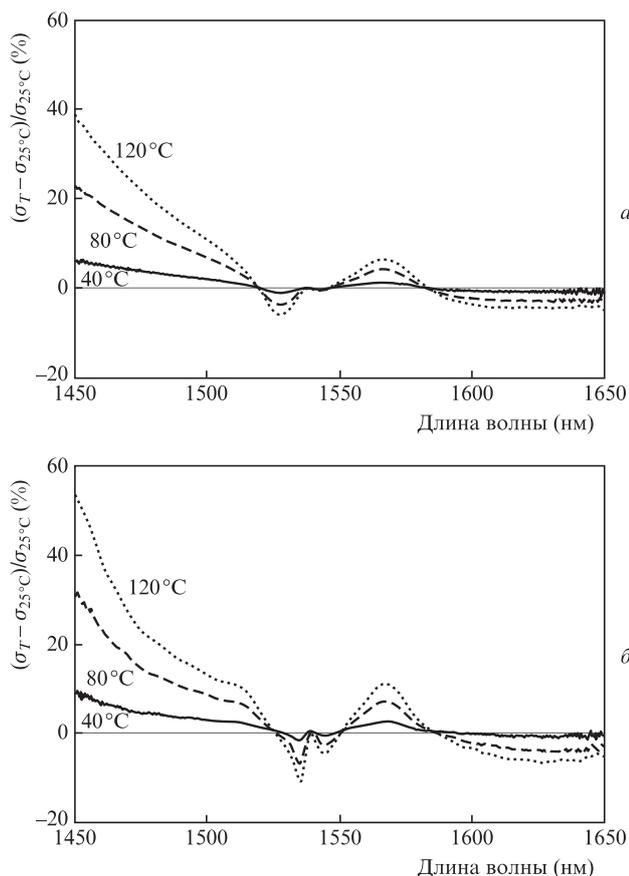


Рис.3. Относительное температурное изменение сечений излучения ионов эрбия в AlSi- (а) и PAlSi- (б) световодах.

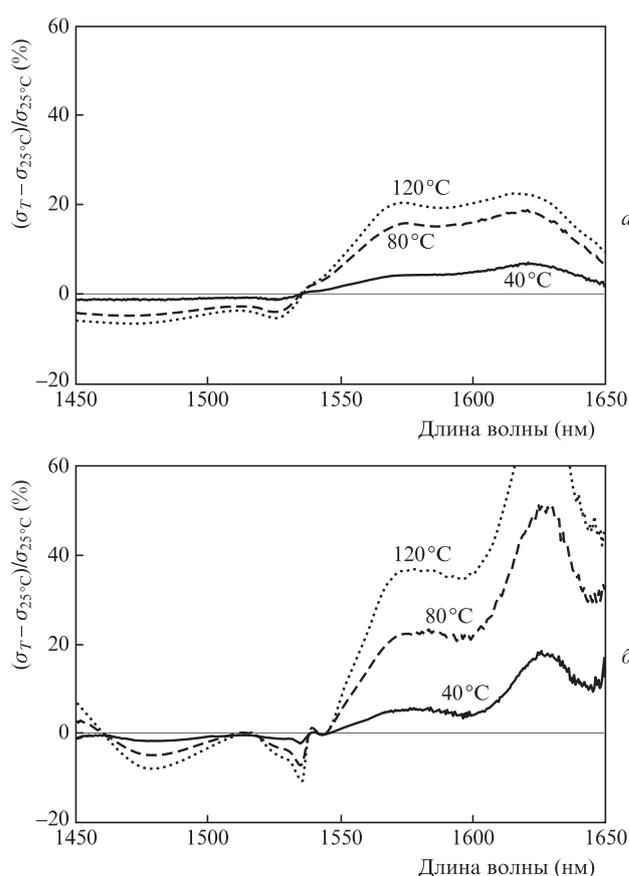


Рис.5. Относительное температурное изменение сечений поглощения ионов эрбия в AlSi- (а) и PAlSi- (б) световодах.

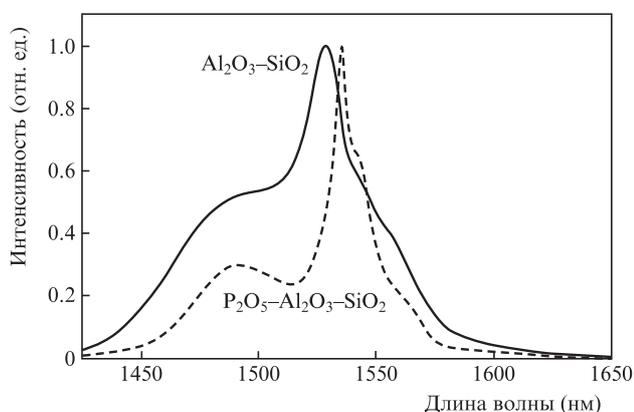


Рис.4. Спектры поглощения ионов эрбия для AlSi- и PAlSi-стекло.

чения поглощения может приводить к росту негативного влияния кооперативной ап-конверсии. Таким образом, при нагреве можно ожидать ухудшения выходных характеристик лазеров, усилителей и суперлюминесцентных источников, работающих в длинноволновом диапазоне.

3. Влияние нагрева на характеристики эрбиевых суперлюминесцентных источников

Суперлюминесцентные волоконные эрбиевые источники находят широкое применение в системах мониторинга окружающей среды, противопожарной безопасности и других, где чувствительным элементом является внутриволоконная брэгговская решетка показателя преломления. Одним из путей увеличения производи-

сти таких систем является расширение спектрального диапазона работы источников излучения, что увеличивает диапазон изменений регистрируемой величины либо число каналов регистрации. Добиться этого можно за счет одновременного использования эрбиевых источников, работающих не только в обычном С-диапазоне (1530–1565 нм), но и в длинноволновом L-диапазоне (1565–1625 нм). Реализация длинноволновых источников затруднена из-за малого сечения излучения ионов эрбия в этом диапазоне, и для их создания используются эрбиевые световоды с длиной, существенно превышающей длину, на которой поглощается все излучение накачки. В результате в таком световоде сначала генерируется коротковолновая люминесценция, а затем, при дальнейшем распространении по световоду, вследствие поглощения и переизлучения сигнала его длина волны смещается в длинноволновый диапазон. Как было показано в разд.2, сечения ионов эрбия в длинноволновом диапазоне существенно меняются с температурой, а большое число актов поглощения и переизлучения сигнала в суперлюминесцентных источниках для L-диапазона еще больше усиливает влияние температуры на выходные характеристики (за счет накопления этого эффекта). Следует также отметить, что температурная нестабильность характеристик, в том числе средневзвешенной длины волны суперлюминесцентных источников, может существенно ограничивать их применение в волоконных гироскопах.

Для демонстрации температурной чувствительности суперлюминесцентных источников длинноволнового диапазона нами была реализована схема, изображенная на рис.6. В этом случае использовалось излучение накач-

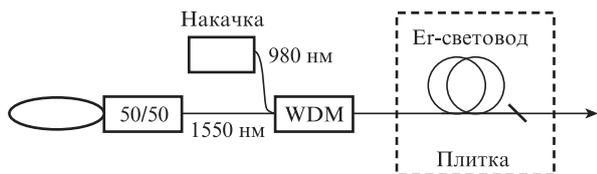


Рис.6. Схема суперлюминесцентного источника.

ки (980 нм) мощностью 150 мВт, а к сигнальному порту мультиплексора приваривалось волоконное кольцевое зеркало на основе волоконного ответвителя 50/50. Исследуемый в эксперименте отрезок алюмосиликатного эрбиевого световода имел диаметр сердцевины 4 мкм, поглощение 40 дБ/м на 980 нм и длину 10 м (ПССНС 400 дБ). Спектр излучения на выходе отрезка эрбиевого световода при $T = 25^\circ\text{C}$ представлен на рис.7,а сплошной кривой. Средняя мощность на выходе источника составляла 1 мВт. Нагрев эрбиевого световода до 60°C привел к уменьшению выходной мощности более чем в два раза (до 450 мкВт).

Для оценки влияния температуры на выходной спектр суперлюминесцентного источника с помощью численного моделирования был рассчитан спектр усиления световода в описанных условиях эксперимента. Путем решения скоростных уравнений с учетом ап-конверсии [15] моделировалось одновременное распространение слабого сигнала на различных длинах волн в попутном с излучением накачки направлении. В расчетах использовались значения сечений излучения и поглощения для комнатной температуры из [8]. При $T = 60^\circ\text{C}$ эти сечения были

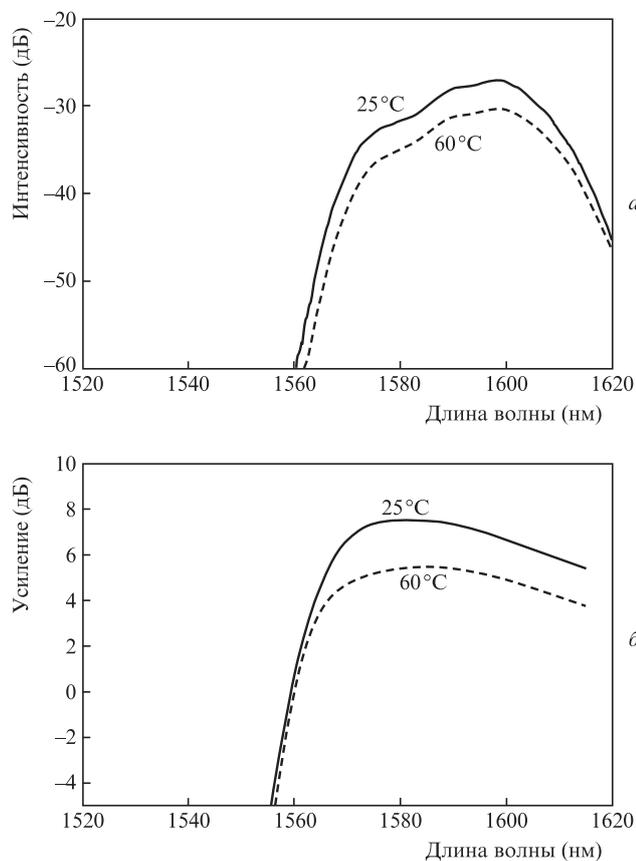


Рис.7. Измеренные выходные спектры суперлюминесцентного источника (а) и рассчитанные спектры усиления (б) эрбиевого световода длиной 10 м при температурах 25 и 60°C .

скорректированы с учетом измерений из разд.2. Результаты расчетов приведены на рис.7,б. Видно, что расчетный спектр усиления данного световода демонстрирует хорошее согласие с измеренным выходным спектром суперлюминесцентного источника и позволяет объяснить изменение спектра и снижение мощности с температурой. Наблюдаемые различия между результатами расчета и эксперимента объясняются тем, что затравочным сигналом в суперлюминесцентном источнике служит сигнал люминесценции ионов эрбия, распространяющийся как в прямом, так и в обратном (за счет наличия кольцевого зеркала) направлениях. А поскольку спектр люминесценции не является плоским, то это приводит к отличию выходного спектра от спектра усиления.

При создании суперлюминесцентных источников для С-диапазона обычно используется относительно короткий отрезок световода, число перепоглощений сигнала в котором значительно меньше, чем в длинном. Кроме того, температурное изменение сечений ионов эрбия в области 1535–1565 нм заметно меньше, чем в длинноволновом диапазоне. Поэтому можно ожидать существенно меньшего изменения выходных спектров таких источников с температурой. На рис.8,а приведены результаты расчетов спектров усиления отрезка того же эрбиевого световода длиной 1 м (ПССНС 10 дБ). Видно, что теперь нагрев световода не приводит к сколько-нибудь существенным изменениям спектра усиления. Измерения спектров суперлюминесцентного источника на основе световода длиной 1 м также не выявили заметных изменений (рис.8,б).

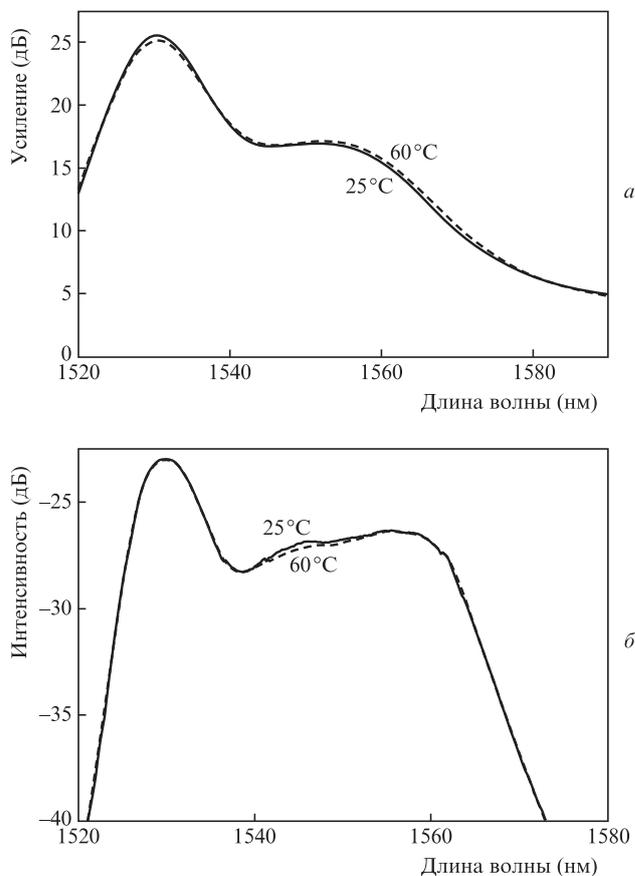


Рис.8. Рассчитанные спектры усиления эрбиевого световода длиной 1 м (а) и измеренные выходные спектры суперлюминесцентного источника на основе того же световода (б) при температурах 25 и 60°C .

Таким образом, температурное воздействие на выходные характеристики эрбиевых волоконных суперлюминесцентных источников, работающих в L-диапазоне, гораздо сильнее, чем на характеристики источников в стандартном C-диапазоне. Это объясняется тем, что для генерации сигнала в длинноволновой области требуется существенно большая длина световода, а также большей, чем в C-диапазоне, температурной чувствительностью сечений поглощения и излучения.

4. Влияние нагрева на характеристики эрбиевых лазеров высокой средней мощности

Как было отмечено во Введении, высокую чувствительность к влиянию температуры могут иметь и мощные эрбиевые лазеры и усилители с накачкой по оболочке.

Выполненные в работе [16] расчеты нагрева сердцевин эрбиевого волоконного лазера с накачкой по оболочке на длине волны 980 нм показали, что при пассивном охлаждении световода ($T = 20^\circ\text{C}$) можно ожидать нагрева сердцевин до $\sim 60^\circ\text{C}$ при выходной мощности лазера ~ 100 Вт. Для оценки снижения эффективности преобразования мощности накачки в излучение эрбиевых лазеров мы провели эксперимент, схема которого изображена на рис.9.

Использовался фосфороалюмосиликатный эрбиевый световод с двойной оболочкой с диаметрами сердцевин и первой оболочки 33 и 130 мкм и поглощением в оболочке 2 дБ/м на 980 нм (поглощение накачки в сердцевине ~ 30 дБ/м). Длина волны отсечки высших мод составляла ~ 1700 нм. Таким образом, при небольшом изгибе данный световод работал в одномодовом режиме. Длина световода составляла 3.8 м (ПССНС 115 дБ). Источниками накачки служили два многомодовых лазерных диода с волоконным выходом суммарной мощностью до 50 Вт на длине волны 980 нм, излучение которых вместе с излучением сигнала вводилось в активный световод с помощью коммерчески доступного объединителя. Источником усиливаемого сигнала служил эрбиевый волоконный лазер с выходной мощностью 30 мВт на длине волны 1565 нм. К выходу активного световода было приварено устройство для вывода непоглощенного излучения накачки. Потери на сварку, а также внутренние потери данного устройства в сумме составляли ~ 0.6 дБ. Нагрев эрбиевого световода производился аналогично описанному в разд.2.

В эксперименте исследовалось изменение выходной мощности усилителя при нагреве активного световода. Через 1 ч после включения усилителя при выключенной нагревательной плитке устанавливалось тепловое равновесие. При этом, т.к. световод и керамическая поверхность плитки были теплоизолированы, их температура увеличивалась до 40°C за счет выделяемого в активном световоде тепла. Выходная мощность усилителя в этот

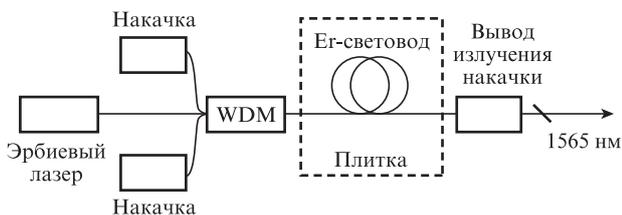


Рис.9. Схема эксперимента.

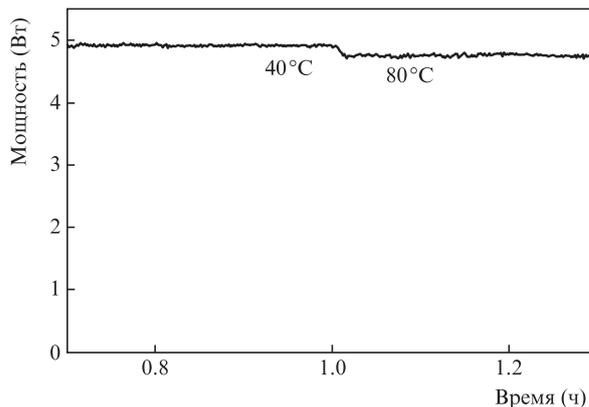


Рис.10. Зависимость выходной мощности усилителя от времени.

момент составляла 4.95 Вт. Затем температура нагревателя плитки устанавливалась равной 80°C , при этом выходная мощность усилителя уменьшалась до 4.75 Вт (рис.10). Таким образом, снижение КПД мощных эрбиевых волоконных усилителей с накачкой по оболочке (980 нм) составляет менее 5% при нагреве до 80°C , что, согласно результатам [16], имеет место при работе волоконного лазера с выходной мощностью более 100 Вт.

Для подтверждения полученных результатов было проведено численное моделирование распространения сигнала (1565 нм) по активному световоду в описанном эксперименте при температурах 40 и 80°C . Результаты расчетов представлены на рис.11,а. Получившиеся расчетные значения выходной мощности 5.75 и 5.5 Вт при длине 3.8 м для указанных температур очень хорошо согласуются с

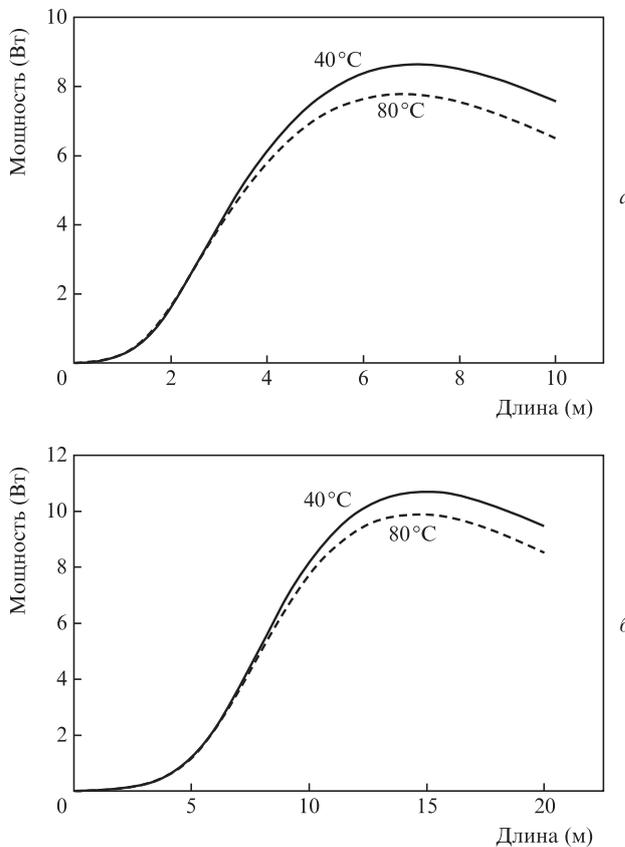


Рис.11. Расчетные распределения выходной мощности сигнала с длиной волны 1565 нм (а) и 1580 нм (б) по длине эрбиевого световоду при температурах 40 и 80°C .

полученными экспериментально, если учесть, что потери в устройстве для вывода накачки составляют 0.6 дБ. Следовательно, даже существенное изменение температуры сердцевины эрбиевого световода с двойной оболочкой при работе в режиме высокой средней мощности снижает КПД лазера незначительно. Из рис. 11,а также видно, что используемая длина световода 3.8 м меньше длины, на которой достигается максимальная мощность сигнала. Одним из основных применений усиливающих световодов с большим полем моды является получение коротких импульсов с высокими пиковыми мощностями [10, 11]. В нашем случае выбор длины световода был обусловлен требованием нахождения спектра усиления в С-диапазоне [11] и снижения нелинейных эффектов. И хотя увеличение длины световода приводит к увеличению температурной чувствительности, изменение мощности из-за роста температуры по-прежнему остается незначительным (~10% при длине световода 7 м, на которой выходной сигнал максимален).

Следует отметить, что при работе усилителя в области 1570–1600 нм в силу заметного температурного роста сечения поглощения при практически неизменном сечении излучения (рис. 4 и 5,б) можно ожидать существенно-го снижения его КПД. Однако, как показывают расчеты, проведенные для сигнала на 1580 нм (рис. 10,б), выходная мощность усилителя падает не более чем на 10%. Это можно объяснить тем, что сечение поглощения в данном спектральном диапазоне мало, поэтому даже его увеличение на десятки процентов с ростом температуры не приводит к заметному уменьшению эффективности усилителя.

5. Заключение

В настоящей работе проведено исследование влияния температуры на выходные характеристики устройств на основе эрбиевых световодов. Впервые, насколько нам известно, были измерены температурные зависимости сечений поглощения и излучения ионов эрбия в наиболее интересных с практической точки зрения стеклянных матрицах – алумосиликатной и фосфороалумосиликатной с избытком фосфора. Полученные данные позволяют оценивать изменения характеристик устройств на основе эрбиевых световодов при изменении температуры. Показано, что изменение температуры существенно влияет на выходную мощность суперлюминесцентных источников, работающих в L-диапазоне. Также были проведены оцен-

ки изменения эффективности преобразования накачки в сигнал эрбиевых волоконных лазеров с накачкой по оболочке при нагреве световода. Полученные данные позволяют ожидать снижения КПД мощных (свыше 100 Вт) эрбиевых лазеров в результате изменения сечений ионов эрбия не более чем на 10% при работе как в С-, так и в L-диапазонах.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-01572).

Авторы выражают благодарность Е.М.Дианову и С.Л.Семенову за постоянную поддержку и интерес, проявленный к настоящей работе.

1. Brown D.C., Hoffman H.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **37** (2), 207 (2001).
2. Myslinski P., Nguyen D., Chrostowski J. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **15**, 112 (1997).
3. Likhachev M.E., Bubnov M.M., Zotov K.V., Lipatov D.S., Yashkov M.V., Guryanov A.N. *Opt. Lett.*, **34** (21), 3355 (2009).
4. Kotov L.V., Likhachev M.E., Bubnov M.M., Medvedkov O.I., Yashkov M.V., Guryanov A.N., Lhermite J., Fevrier S., Cormier E. *Opt. Lett.*, **38**, 2230 (2013).
5. Yucel M., Goktas H.H. *J. Appl. Sci.*, **8** (23), 4464 (2008).
6. Lee J.H., Lee W.J., Park N. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **10** (12), 1721 (1998).
7. Wysocki P.F., Digonnet M.J.F., Kim B.Y. *Opt. Lett.*, **16**, 961 (1991).
8. Barnes W.L., Laming R.I., Tarbox E.J., Morkel P.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27** (4), 1004 (1991).
9. Jasapara J.C., Andrejco M.J., DeSantolo A., Yablon A.D., Varallyay Z., Nicholson J.W., Fini J.M., DiGiovanni D.J., Headley C., Monberg E., Dimarcello F.F.V. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15** (1), 3 (2009).
10. Kotov L.V., Likhachev M.E., Bubnov M.M., Paramonov V.M., Belovolov M.I., Lipatov D.S., Guryanov A.N. *Laser Phys. Lett.*, **11** (9), 095102 (2014).
11. Котов Л.В., Коптев М.Ю., Анашкина Е.А., Муравьев С.В., Андрианов А.В., Бубнов М.М., Игнатьев А.Д., Липатов Д.С., Гурьянов А.Н., Лихачев М.Е., Ким А.В. *Квантовая электроника*, **44** (5), 458 (2014).
12. Jain D., Alam S., Jung Y., Barua P., Velazquez M.N., Sahu J.K. *Opt. Express*, **23**, 28282 (2015).
13. Kotov L., Likhachev M., Bubnov M., Medvedkov O., Lipatov D., Guryanov A., Zaytsev K., Jossent M., Fevrier S. *Opt. Lett.*, **40**, 1189 (2015).
14. Kosinski S.G., Krol D.M., Duncan T.M., Douglass D.C., MacChesney J.B., Simpson J.R. *J. Non-Cryst. Solids*, **105**, 45 (1988).
15. Nilsson J., Jaskorzynska B., Blixt P. *Conf. Tech. Dig. «Opt. Amplifiers and Their Applications»* (Yokohama, Japan, 1993, Vol. MD19-1, p. 222).
16. Kuhn V., Kracht D., Neumann J., Wessels P. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **23** (7), 432 (2011).