

УДК 681.7.068; 535

Волоконный тулиевый лазер с повышенной стабильностью выходной мощности

*Сазонкин С.Г., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

*Научный руководитель: Денисов Л.К., д.т.н.
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
baryshnikov@bmstu.ru*

Диапазон длин волн около 2 мкм может использоваться в различных сферах науки и техники таких как медицина, локация (излучение с длиной волны 2 мкм относится к безопасному для глаз и попадает окно прозрачности в атмосфере), научные исследования и спектроскопия. В этой статье будет исследована возможность создания волоконного тулиевого лазера с повышенной стабильностью генерации для накачки $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера в квантовых стандартах частоты нового поколения на ИК переходах метана с долговременной стабильностью частоты $10^{-15} - 10^{-16}$.

В настоящее время существует несколько способов накачки волоконных тулиевых лазеров. Первый способ включает в себя использование накачку волокна, легированного ионами тулия, в сердцевину и в первую оболочку излучением с длиной волны $\sim 1,60$ мкм [1]. Второй способ включает в себя использование накачки волокна, легированного ионами тулия, в первую оболочку излучением с длиной волны $\sim 0,80$ нм [2].

В схеме накачки на 1,60 мкм используется волоконный $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ лазер. Эффективный коэффициент поглощения при накачке в оболочку составляет $\sim 1,7$ дБ/м на длине волны 1565 нм. Излучение в волокно вводится линзой, оба конца волокна установлены в V-образные пазы из теплопроводного материала с водяным охлаждением. Пороговая мощность при длине волокна 5 м составила 3,1 Вт. Максимальная мощность при данной длине волокна составила 19,2 Вт на длине волны 1991 нм. Мощность накачки составляла 38,2 Вт, в этом случае дифференциальная эффективность составила 69 %. Отметим, что при использовании волокна длиной 2,5 м около 65% накачки не поглощалось световодом, поэтому приходилось использовать дифракционную решетку, для возвращения излучения обратно в волокно. Возможна перестройка лазера в диапазоне от 1859 до 2061 нм, а при выходной мощности 15 Вт от 1885 до 2025 нм.

Так же в работе [1] был исследован волоконный тулиевый лазер с накачкой в сердцевину. В этом исследовании, значительно уменьшена длина легированного волокна (~ 24 см) в связи с высоким поглощением в сердцевине (~ 170 дБ/м). Накачка была запущена в торец волокна с использованием линзы с фокусным расстоянием 25 мм и высокой светопередачей (> 98%) на длине волны 2 мкм и передачу 91% на длине волны накачки в 1,565 мкм. Максимальная выходная мощность 12,1 Вт на 1861 нм при накачке 23,1 Вт, эффективность составила 58,6 %. Стоит отметить, что при вводе накачки в систему только около 55 % от её мощности, приходящейся на торец волокна, попадает непосредственно в сердцевину. Остальная накачка распространялась по оболочке, но она мало влияет на общее поглощение из-за значительно меньшего коэффициента поглощения при накачке в оболочку.

Достоинствами данной схемы является:

- высокая эффективность генерации в следствие низкого нагрева на квантовых дефектах и возможность вводить большую мощность накачки
- перестройка в большом диапазоне длин волн, связанная с хорошим качеством пучка иттербие-эрбиевого лазера и возможностью осуществить накачку в сердцевину.

К недостатками данной схемы можно отнести:

- сложность конструкции лазера и сложность юстировки.
- низкая эффективность лазера накачки. Волоконный лазер, легированный ионами Er^{3+} и Yb^{3+} сам по себе имеет достаточно низкую эффективность. Это накладывает отпечаток на значение КПД всей системы.

При накачке излучением 800 нм ионы Tm^{3+} возбуждаются из основного состояния $^3\text{H}_6$ в состояние $^3\text{H}_4$ (схема уровней Tm^{3+} показана на рис. 1). Затем, согласно анализу, проведенному в [2], из состояния $^3\text{H}_4$ ионы переходят на верхний лазерный уровень $^3\text{F}_4$, как путем комбинации излучательных и безызлучательных переходов, так и за счет кросс-релаксации. С одновременным переходом одного иона вниз с уровня $^3\text{H}_4$ на верхний лазерный уровень $^3\text{F}_4$ и другого – вверх с основного уровня $^3\text{H}_6$ также на верхний лазерный уровень $^3\text{F}_4$. Таким образом, в этой схеме возможно достижение квантовой эффективности больше единицы. В работе [2] была получена эффективность порядка 63%, а максимальная мощность на длине волны 2040 нм – 225 Вт, при мощности накачки 500 Вт. Длина активного волокна составляла ~ 5 м. Для охлаждения применялся алюминиевый цилиндр диаметром ~ 25 см, на котором располагалось активное волокно, охлаждаемый водой при комнатной температуре, протекающей через медные трубы внутри цилиндра. В волокне, которое использовалось в лазере, при смещении накачки до 795 нм поглощается

около 90% излучения накачки, а квантовая эффективность составила 1,84. Параметр качества M^2 был равен 1,2.

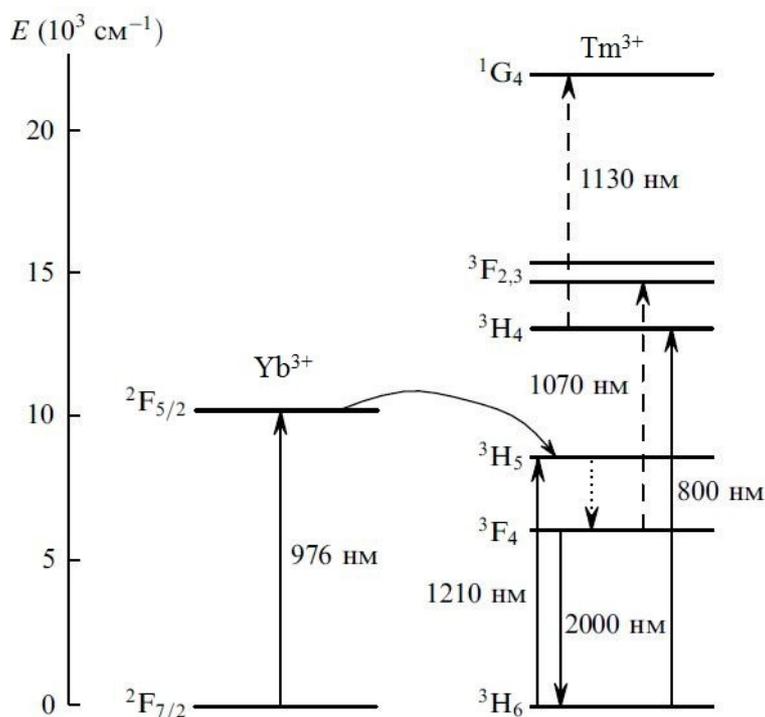


Рис. 1. Схема уровней Tm^{3+} и Yb^{3+}

Данный способ имеет следующие достоинства:

- реализуема квантовая эффективность больше 1 (теоретически 2), в работе [2] реализована 1,8.

- возможность получения высоких выходных мощностей излучения с близким к дифракционному качеством пучка (300 Вт), так и в многомодовом режимах (885 Вт).

- накачка осуществляется высокомошными лазерными диодами с длиной волны ~ 800 нм.

Недостатками данного способа являются:

- существует возможность образования центров окраски
- плохое качество излучения высокомошных диодных лазеров накладывает ограничение на используемое волокно

- достаточно сильный нагрев волокна при генерации лазерного излучения

- нелинейные эффекты при распространении монохроматического мощного лазерного излучения по волокну (такие как 4-х волновое смешение, вынужденное рассеивание).

Существует два основных вида активных световодов, это световоды с двойной оболочкой и световоды с многоэлементной первой оболочкой (МПО). Оба вида

световодов представлены на рис. 2, где 1 – легированная сердцевина, 2 – первая оболочка, 3 – вторая оболочка, 4 – световод накачки.

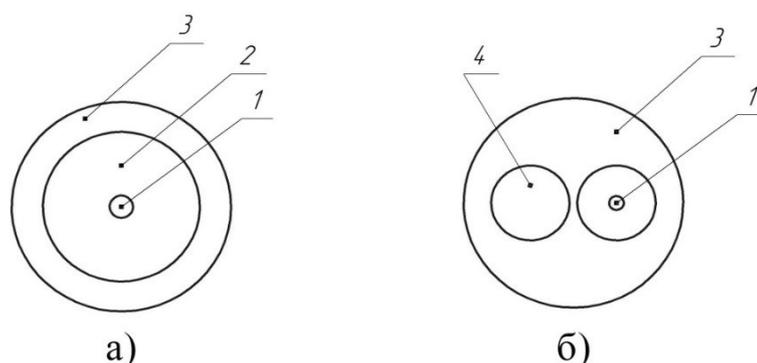


Рис. 2. Основные виды активных волоконных световодов: а) световод с двойной оболочкой; б) МПО световод

Волокно с двойной оболочкой может иметь профиль первой оболочки различной формы, например круглой, квадратной или прямоугольной. Форма профиля влияет на коэффициент поглощения волокна, и в среднем у волокна с двойной оболочкой коэффициент поглощения выше, чем у световода с общей оболочкой. Изменения длины резонатора сильно влияют на стабильность выходных характеристик. При создании волоконного лазера с повышенной стабильностью выходной мощности целесообразно использовать световод с двойной оболочкой, так как длина резонатора и температурные изменения его длины будут существенно меньше, чем при использовании МПО световода. Однако, существует проблема сварки этого волокна с одномодовым волокном, в котором нанесены брэгговские решетки.

Все из вышперечисленных недостатков обоих способов будут в той или иной степени влиять на стабильность выходной мощности лазера и использовать их для создания нужного нам источника накачки нецелесообразно. Для создания стабильного источника накачки $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ лазера была разработана схема (рис.3) на основе волокна солегированного ионами Yb^{3+} и Tm^{3+} . Выбор этой схемы накачки связан с использованием диодов накачки, производимых по отработанной технологии производства. Накачка производится не в сам максимум поглощения иттербия на 980 нм, а в «хвост» максимума на длине волны ~ 920 нм, что позволит избежать возможного срыва генерации при изменении спектра диода накачки от нагревания элементов. Использование только волоконных компонентов позволяет уменьшить потери в резонаторе, что благотворно влияет на стабильность всей системы.

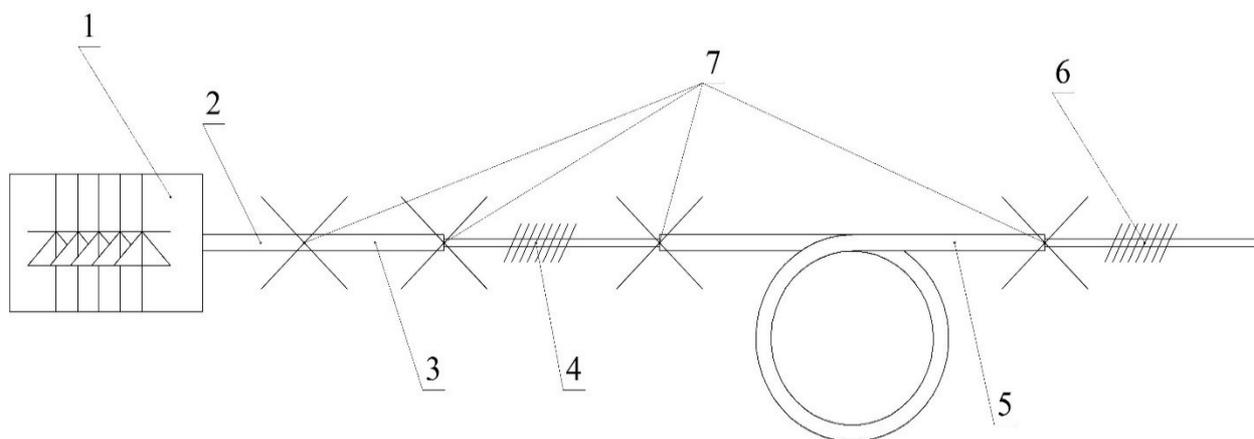


Рис. 3. Схема волоконного тулиевого лазера с повышенной стабильностью мощности: 1 – блок диодов накачки; 2 – волоконный выход блока накачки; 3 – многомодовый световод для передачи излучения накачки; 4 – одномодовое волокно, с нанесённой брэгговской решеткой с высоким коэффициентом отражения на длине волны 1,95 мкм; 5 – активное волокно с двойной оболочкой; 6 – одномодовое волокно, с полупрозрачной брэгговской решеткой на длине волны 1,95 мкм; 7 – места сварки волокон

Качество сварных соединений активного волокна с одномодовыми волокнами напрямую влияет на качество выходного излучения, при больших потерях возможен сильный нагрев мест сварки и даже их разрушение. Сварка волокон производилась по сигналу, источником сигнала служила галогеновая лампа, а приемником анализатор оптического спектра. Выбирался сигнал с длиной волны ~ 1310 нм, в области, где потери в волокне минимальны. Экспериментальным путем найден наилучший режим сварки активного волокна с одномодовым, при котором предполагаемые потери не превышали 0,15 дБ. Проверка потерь производилась при помощи рефлектометра, на котором был получен результат 0,3 дБ для двух сварок.

Для реализации лазера выбран солегированный иттербием и тулием световод с квадратным профилем первой оболочки. Было проведено исследование поглощения этого волокна как по сердцевине (см. рис. 4), так и по оболочке (см. рис. 5) для определения необходимой длины активного световода. Для почти полного поглощения излучения накачки на длине волны ~ 920 нм, была выбрана длина активного световода порядка 5 м, а поглощение составило ~ 2.9 дБ/м.

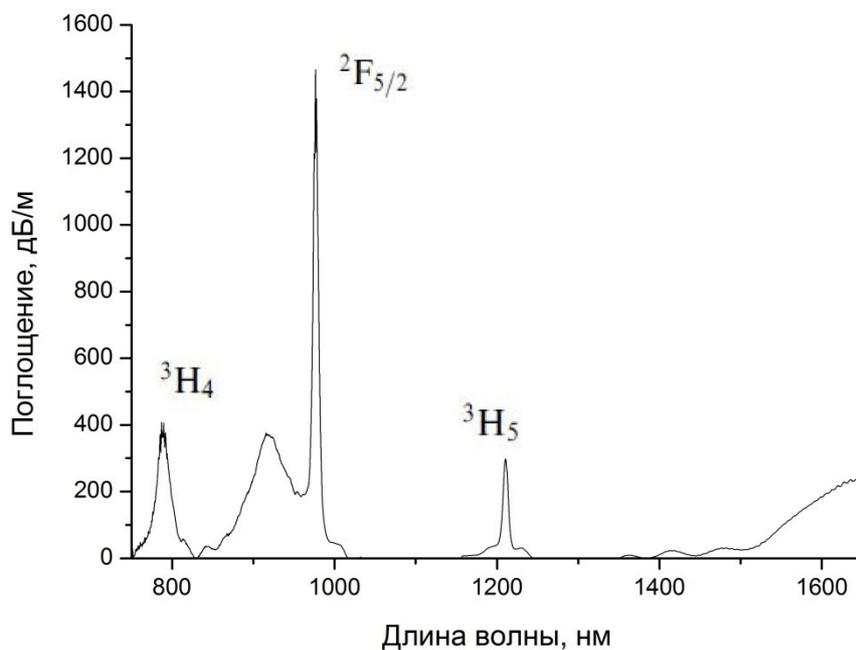


Рис. 4. Спектр поглощения волокна по сердцевине

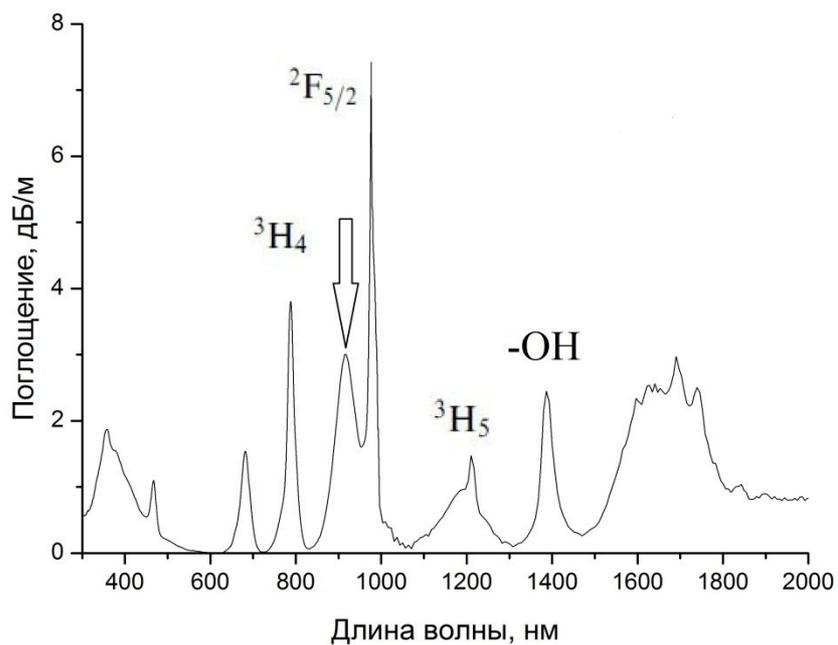


Рис. 5. Спектр поглощение волокна по оболочке (стрелочкой показана длина волны накачки)

В результате показана возможность создания волоконного тулиевого лазера с повышенной стабильностью выходной мощности, реализованного по схеме накачки солегированного иттербием и тулием волокна излучением с длиной волны ~ 920 нм.

Выходная мощность составила не менее 3,5 Вт в непрерывном одномодовом режиме, длина волны излучения 1,96 мкм со спектральной шириной полосы 0,1 – 0,2 нм. Долговременная нестабильность выходной мощности при усреднении 30 секунд составила 5 %, что позволит использовать данный лазер для накачки Cr²⁺:ZnSe лазера в квантовых стандартах частоты нового поколения.

Список литературы

1. W. A. Clarkson, D.Y. Shen, P. J. Jander and J. K. Sahu «Tm doped fiber laser pumped by a cladding-pumped Er/Yb fiber laser», Optoelectronics Research Centre University of Southampton, report, 2005. P 15-25.
2. Peter F. Moulton, Glen A. Rines, Evgueni V. Slobodtchikov, Kevin F. Wall, Tm-doped fiber Lasers: Fundamentals and power Scaling // IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 15, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 2009. P 85 – 92.
3. К.С. Кравцов, И.А. Буфетов, О.И. Медведков, Е.М. Дианов, М.В. Яшков, А.Н. Гурьянов, Одномодовый тулиевый волоконный лазер мощностью 7 Вт с накачкой на длине волны 1230 нм // Квант. электроника, 2005, 35 (7), С. 586 - 590.
4. Волоконные технологические лазеры: Учебное пособие / Голубенко Ю.В., Богданов А.В. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 25 – 31.