

Мощный волоконно-оптический усилитель диапазона 1640–1660 нм для лидарного контроля метана

В. И. Григорьевский

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Фрязино, 141190, Россия
E-mail: vig248@ire216.msk.su*

Создан и испытан мощный волоконно-оптический усилитель на эффекте Рамана на длину волны ~1653 нм с выходной пиковой мощностью ~10 Вт для применения в лидаре с целью контроля метана в атмосфере Земли. Усилитель состоит из трёх параллельно работающих оконечных усилителей с выходной мощностью более 3 Вт каждый. Мощность от этих усилителей суммировалась на волоконном объединителе для последующей передачи излучения в передающий коллиматор лидара. Теоретический расчёт выходной мощности отдельного оконечного усилителя показал, что эффективность рамановского преобразования возрастает, если в нём использовать световод с более тонкой световедущей жилой, что позволяет снизить как мощность накачки, так и длину световода. Приводятся спектры задающего лазерного источника и выходного излучения многоканального усилителя, которые в полосе сканирования излучения близки по форме друг к другу. Некоторое отличие наблюдается за полосой сканирования из-за более высокого уровня шума излучения после усилителя. Проведённые измерения параметров линии поглощения метана в атмосфере Земли на трассах с отражением светового излучения от облачных слоёв, расположенных на высотах до 3,5 км, хорошо согласуются с теоретическим расчётом. В созданном усилителе имеется также возможность нарастить выходную мощность свыше 20 Вт при подключении ещё четырёх оконечных усилителей. Такая мощность передатчика лидара способна обеспечить энергетический потенциал для измерений концентрации газа с низкоорбитального космического аппарата.

Ключевые слова: лидар, волоконно-оптический усилитель, эффект Рамана, атмосфера, оптический передатчик

Одобрена к печати: 03.06.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-66-72

Введение

Для лидарного контроля метана с летательных аппаратов требуются мощные (более 10 Вт) лазерные усилители в диапазоне линий поглощения метана ~1640–1660 нм, обеспечивающие усиление излучения узкополосных лазеров с распределённой обратной связью (*англ.* distributed feedback — DFB). Для применения лидаров на космических аппаратах для глобального мониторинга метана требуется мощность, превышающая ~20–30 Вт в максимуме излучаемого импульса (Акимов и др., 2015). В настоящее время таких мощных коммерческих источников излучения нет. Указанный диапазон длин волн привлекателен не только для лидарных технологий, но также широко используется в медицине для хирургических целей, обеспечивая лучшее качество разреза при наибольшей глубине проникновения, при этом считается безопасным для глаз (Alahyane et al., 2013). Более того, окно оптимальной рабочей длины волны источников для визуализации глубоких тканей лежит в пределах области 1600–1700 нм из-за лучшего проникновения в ткань при рассмотрении и обработке эффектов рассеивания и поглощения светового излучения (Chang et al., 2008). Наконец, поскольку окно пропускания кварцевого волокна с низкими потерями также лежит в этом диапазоне длин волн, то в телекоммуникационных технологиях существует определённый интерес к возможному увеличению мощности усилителей и лазеров, работающих на данных длинах волн. Такие приборы могут восполнить дефицит мощных лазерных источников, находящихся между волоконными усилителями на основе эрбия в длинноволновом L-диапазоне и современными усилителями и лазерами на основе тулия (Shaohxiang et al., 2019).

Для планируемого европейского спутникового проекта MERLIN (Delahaye et al., 2016) используются параметрические генераторы света (ПГС), в которых невозможна быстрая перестройка частоты, обеспечивающая определение ширины линии поглощения исследуемого газа, что ведёт к потере информации о распределении газа с высотой над уровнем Земли. В силу сказанного вопрос создания мощного лазерного передатчика с быстрой перестройкой частоты в указанном диапазоне длин волн остаётся весьма актуальным.

Целью работы является создание и исследование мощного рамановского усилителя на длину волны ~ 1653 нм посредством параллельного суммирования мощности нескольких усилителей для применения в задачах лидарного контроля метана с летательных аппаратов.

Теоретические и экспериментальные результаты

Ниже приводятся результаты теоретического расчёта выходной мощности, описание конструкции одного из вариантов такого источника излучения, а также его основные параметры и результаты экспериментальных исследований. Прибор был настроен для работы на линии поглощения метана R3 (~ 1653 нм). Спектр поглощения метана на данной длине волны по базе данных HITRAN показан на *рис. 1*. Зависимость полуширины этой линии поглощения от давления в лабораторных условиях измерена достаточно тщательно, например в работе (Ponomarev, Kapitanov, 2013).

На *рис. 2* представлена блок-схема усилителя. Задающий DFB-лазер OL6109L-10B модулировался пилообразным сигналом частотой ~ 125 Гц и скважностью ~ 3 , обеспечивая частотно модулированное излучение на волоконном выходе. Осуществлялась также его дополнительная модуляция синусоидальным сигналом небольшой амплитуды для исключения искажений от рассеяния Мандельштама–Бриллюена в протяжённых световодах тракта усилителя (Grigorievsky et al., 2017).

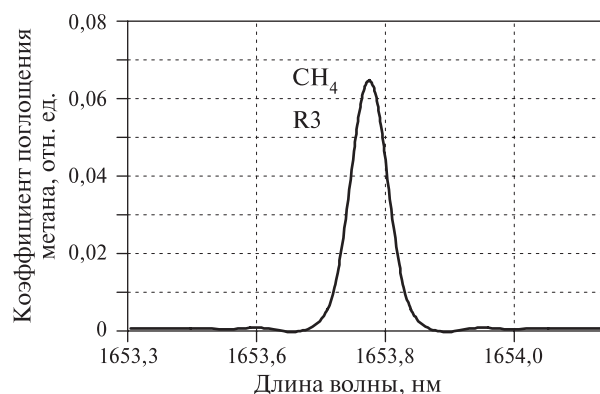


Рис. 1. Спектр поглощения метана в атмосфере в диапазоне 1653–1654 нм по базе данных HITRAN

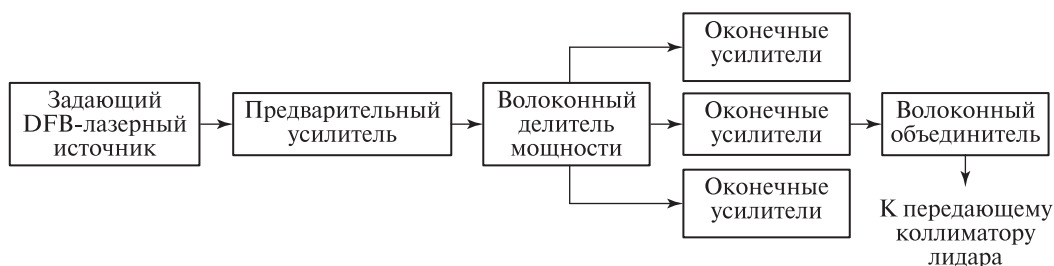


Рис. 2. Блок-схема оптического усилителя

Ширина спектра излучения лазера составляла около 0,03 нм, а диапазон сканирования частоты — $\sim 0,5$ нм (*рис. 3*, см. с. 68). Максимальная мощность в импульсе на выходе лазера составляла порядка 3 мВт. После предварительного усилителя эта мощность увеличивалась до ~ 300 мВт (мощность стоксовой компоненты рамановского преобразования). Волоконный делитель мощности разветвлял оптический сигнал на 7 каналов, в каждом из которых пиковая мощность составляла порядка 40 мВт.



Рис. 3. Спектр оптического сигнала задающего лазера в режиме сканирования частоты

Во всех трёх задействованных каналах стояли одинаковые оконечные усилители, обеспечивающие на выходе ~3,5 Вт пиковой мощности каждый. Между каскадами усилителя установлены не показанные на рисунке оптические изоляторы. В волоконном объединителе после суммирования три канала обеспечивали ~10 Вт мощности в максимуме оптического сигнала. Лазерная мощность измерялась тепловыми датчиками фирмы Ophir. Выходной световод — многомодовый с диаметром центральной жилы ~100 мкм.

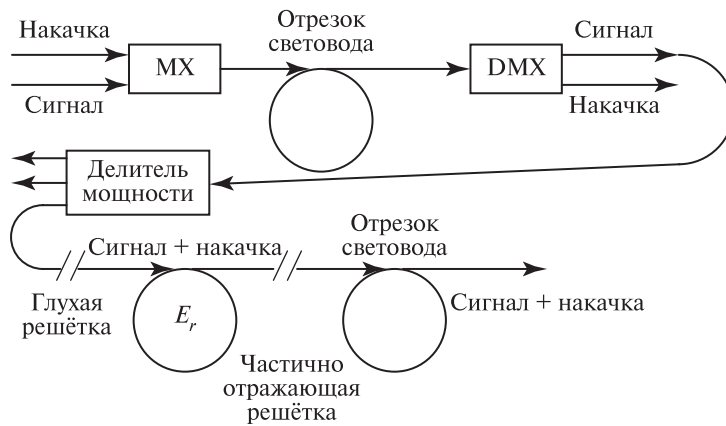


Рис. 4. Оптическая схема оконечного усилителя

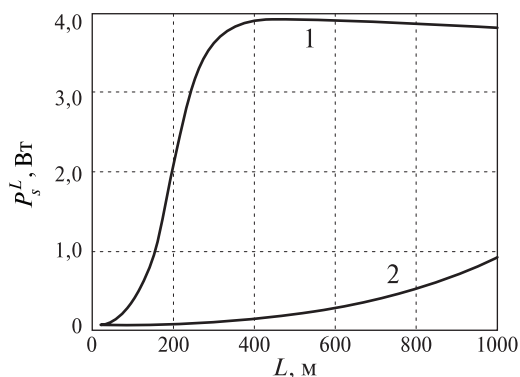
Соединение предварительного и каждого оконечного усилителя через делитель мощности показано на рис. 4. Схема предварительного усилителя состояла из источника накачки, оптического мультиплексора (MX — multiplexer), демультиплексора (DMX — demultiplexer) и отрезка кварцевого световода. Оконечный усилитель состоял из отрезка активного эрбиевого волокна (E_r — Erbium), глухой и частично отражающей решеток и отрезка кварцевого волокна. Как показано в работе (Grigorievsky et al., 2017), для такой схемы мощность на выходе усилителя зависит от мощности входного сигнала и накачки и определяется формулой, полученной посредством точного решения уравнений для нелинейного взаимодействия сигнала и накачки:

$$P_s(z) = \frac{\left(P_s^0 + \frac{\omega_s}{\omega_p} P_p^0 \right) \exp(-\alpha z)}{1 + \frac{\omega_s P_p^0}{P_s^0} \exp \left[\frac{g_r}{\alpha} \left(\frac{\omega_p}{\omega_s} \frac{P_s^0}{A_{eff}} + \frac{P_p^0}{A_{eff}} \right) (\exp(-\alpha z) - 1) \right]} \quad (1)$$

Здесь P_s , P_p , P_s/A_{eff} и P_p/A_{eff} — соответственно мощность и интенсивность стоксовой компоненты сигнала и накачки в зависимости от длины световода z ; A_{eff} — эффективная площадь сердцевины световода, L — его длина; g_r — усилительная способность активной среды волокна, м/Вт; ω_s и ω_p — частота сигнала и накачки; α — коэффициент затухания оптического сигнала в световоде; P_s^0 , P_p^0 — соответственно мощность сигнала и накачки при $z = 0$. При расчёте мощности P_s^L (при $z = L$) выходного сигнала по этой формуле оказалось, что чем тоньше применяемый отрезок световода, тем больше выходной сигнал. Интуитивно понятно, что чем тоньше световод, тем больше в нём проявляется нелинейный эффект рассеяния Рамана.

Рис. 5. Мощность на выходе оконечного усилителя при использовании световода с тонкой сердцевиной (1) и световода SMF-28 (2)

Это видно и непосредственно из формулы (1), где знаменатель зависит от эффективной площади сердцевины световода. Результатом использования более тонкой сердцевины световода является возможность резкого снижения мощности накачки P_p^0 при сохранении значения выходного сигнала. Аналогичные рассуждения верны и для использованных в приборе оконечных усилителей. Так, на рис. 5 представлены расчётные кривые мощности на выходе каждого из трёх оконечных усилителей в зависимости от длины световода в двух случаях: при использовании стандартного световода SMF-28 с эффективной площадью сердцевины $A_{eff} = 80 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ и отрезка световода с эффективной площадью сердцевины $A_{eff} = 12 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$. В вычислениях использовались следующие числовые значения: $\alpha \approx 0,22 \text{ дБ/км}$ (или $5,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/м}$) для длины волны $\sim 1,55 \text{ мкм}$ (область малых потерь световода); коэффициент рамановского усиления $g_r = 0,7 \cdot 10^{-13} \text{ м/Вт}$; $P_p^0 = 4 \text{ Вт}$; $P_s^0 = 40 \text{ мВт}$. На рисунке видно, что при мощности накачки 4 Вт достаточно всего 0,3 км световода с тонкой сердцевиной, чтобы обеспечить мощность $\sim 3,5 \text{ Вт}$ на выходе, при этом для SMF-28 при длине $\sim 1 \text{ км}$ выходная мощность сигнала составляет всего $\sim 1 \text{ Вт}$. Также расчёт по формуле (1) показывает, что для SMF-28 необходима мощность накачки порядка 18 Вт для получения той же выходной мощности полезного сигнала $\sim 3,5 \text{ Вт}$ при длине световода $\sim 0,3 \text{ км}$. Из приведённого сравнения следует, что световод с более тонкой сердцевиной по всем параметрам превосходит SMF-28 при использовании в рамановском преобразователе оптического сигнала. Необходимо отметить также, что стандартные мультиплексоры, выполненные на основе SMF-28, не выдерживают более $\sim 4,5 \text{ Вт}$ оптической мощности и часто выходят из строя, поэтому работа усилителей с пониженной мощностью накачки крайне желательна. При сварке SMF-28 со световодом с тонкой сердцевиной плавный переход между ними обеспечивал сохранение одномодового состава излучения с потерями на сварке не более 10 %.



Экспериментальные величины получаемой мощности оконечного усилителя достаточно хорошо согласуются с теоретическими оценками, однако следует отметить несколько меньшую получаемую в эксперименте мощность на выходе усилителя из-за потерь на сварках и в используемых оптических элементах, а также, возможно, из-за поляризационных явлений в световоде. Спектр выходного сигнала на выходе многомодового световода волоконного объединителя представлен на рис. 6. Обращает на себя внимание гораздо больший, чем для лазерного источника (см. рис. 3), уровень шумовых составляющих излучения вне полосы сканирования.

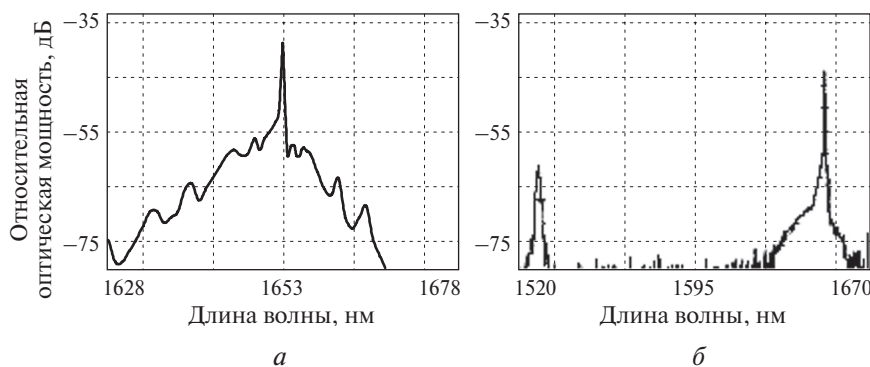


Рис. 6. Спектр выходного сигнала в режиме сканирования частоты: а — в окрестности рабочей длины волны 1653 нм; б — в широком диапазоне длин волн

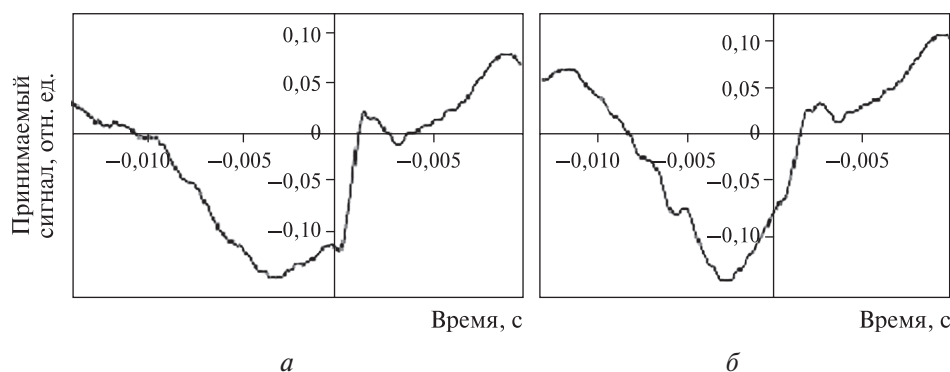


Рис. 7. Экспериментальные результаты по измерению ширины линии поглощения и концентрации метана при отражении излучения от облачных слоёв на высоте 1500 м (а) и 3400 м (б)

В рассматриваемом случае слабые входные сигналы в полосе рамановского усиления в диапазоне 1628–1665 нм усиливаются сильнее, чем сильные сигналы в пределах полосы сканирования на длине волны ~ 1653 нм. Если увеличивать мощность накачки выше используемой величины, происходит нежелательное уширение ширины линии излучения, которое может снизить чувствительность лидара к измерениям параметров линии поглощения метана. К тому же, как упоминалось ранее, при мощности свыше ~ 4 Вт могут выходить из строя оптические мультиплексоры. Тем не менее проведённые в атмосфере измерения с усилителем в составе лидара показывают, что расстояния зондирования составляют несколько километров, а чувствительность к метану сохраняется высокой. Так, на рис. 7 показаны результаты пробных измерений концентрации метана и ширины его линии поглощения для наземных экспериментов при отражении излучения от облачных слоёв. Представлены величины принимаемых лидаром оптических сигналов в пределах полосы сканирования за ~ 3 мс. За это время длина волны передатчика изменяется на $\sim 0,5$ нм, т. е. фактически прописывалась вся линия поглощения газа, ширина которой вблизи поверхности Земли не превышает $\sim 0,08$ нм. Даны результаты измерений для двух случаев: при отражении света от высокого облачного слоя (высота облаков $\sim 3,4$ км) (см. рис. 7б) и от низкого облачного слоя (высота облаков $\sim 1,5$ км) (см. рис. 7а). Расчёт по данным графикам показал, что при отражении от высоких облачных слоёв ширина линии поглощения метана уже, чем при отражении от низких. Теоретический расчёт концентрации и ширины линии поглощения для этих двух случаев с учётом барометрического уменьшения давления воздуха с высотой совпадает с результатами эксперимента в пределах ошибок измерений, которые составили $\sim 10\%$.

Заключение

Таким образом, в результате проведённой работы посредством параллельного суммирования мощности нескольких усилителей был создан и исследован мощный рамановский усилитель на длину волны ~ 1653 нм (линия R3 поглощения метана) для применения в задачах лидарного контроля метана с летательных аппаратов. Достигнута мощность ~ 10 Вт с приемлемым спектром излучения путём сложения мощности трёх усилителей, выполненных на световодах с площадью сердцевины $\sim 12 \cdot 10^{-12}$ м². В усилителе имеется возможность суммирования мощностей ещё четырёх усилительных каскадов для получения выходной мощности более 20 Вт. Проведённые натурные измерения параметров линии поглощения метана при отражении излучения от облачных слоёв хорошо согласуются с теоретическим расчётом.

Литература

1. Акимова Г. А., Григорьевский В. И., Матайбаев В. В. Увеличение энергетического потенциала лидара для контроля метана на основе квазинепрерывного источника излучения // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 10. С. 1058–1061.

2. Alahyane F., Crotti C., Deloison F. Wavelength optimization in femtosecond laser corneal surgery // *Investigative Ophthalmology and Visual Science*. 2013. V. 54. No. 5. P. 3340–3349.
3. Chang E. W., Sharma U., Yun S. H. Long-wavelength optical coherence tomography at 1.7 μm for enhanced imaging depth // *Optics Express*. 2008. V. 16. No. 24. P. 19712–19723.
4. Delahaye T., Maxwell S. E., Reed Z. D. Precise methane absorption measurements in the 1.64 μm spectral region for the MERLIN mission // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2016. V. 121. No. 12. P. 7360–7370.
5. Grigorievsky V. I., Elbakidze A. V., Tezadov Y. A., Modeling and investigation of high-power fiber-optical transmitters for lidar applications // *J. Russian Laser Research*. 2017. V. 38. No. 4. P. 311–315.
6. Ponomarev Yu. N., Kapitanov V. A. TDLS of methane and its applications to study of methane emissions from natural structures to the atmosphere. 2013. 31 p. URL: <http://www.dls.gpi.ru/rus/conf/TDLS2013/Posters/Ponomarev.pdf>.
7. Shaoxiang C., Shaif-Ul A., Yongmin J. Ultra-short wavelength operation of thulium-doped fiber amplifiers and lasers // *Optics Express*. 2019. V. 27. No. 25. P. 369322–369331.

Powerful fiber optic amplifier in the range of 1640–1660 nm for lidar control of methane

V. I. Grigorievsky

*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS,
Fryazino Branch, Fryazino 141190, Russia
E-mail: vig248@ire216.msk.su*

A powerful Raman-based fiber-optic amplifier was created and tested at a wavelength of ~ 1653 nm with an output peak power of ~ 10 W for use in a lidar for monitoring methane in the Earth's atmosphere. The amplifier consists of three parallel terminal amplifiers with an output power of more than 3 W each. The power from these amplifiers was summed on a fiber combiner for subsequent transmission of radiation to the transmitting lidar collimator. A theoretical calculation of the output power of a single amplifier showed that the efficiency of the Raman conversion increases if it uses a fiber with a thinner light guide core, which reduces both the pump power and the fiber length. The spectra of the master laser source and the output radiation of a multichannel amplifier are given, which are close in shape to each other in the radiation scanning band. Some difference is observed out of the scanning band due to the higher noise level of the radiation after the amplifier. The measurements of the parameters of the methane absorption line in the Earth's atmosphere on paths with reflection of light from cloud layers located at heights of up to 3.5 km are in good agreement with the theoretical calculation. The created amplifier also has the ability to increase the output power of more than 20 W when connecting four more terminal amplifiers. Such power of the lidar transmitter is capable of providing the energy potential for measuring gas concentration from a low-orbit spacecraft.

Keywords: lidar, fiber optic amplifier, Raman effect, atmosphere, optical transmitter

Accepted: 03.06.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-66-72

References

1. Akimova G. A., Grigorievsky V. I., Mataibaev V. V., Uvelichenie energeticheskogo potentsiala lidara dlya kontrolya metana na osnove kvazinepreryvnogo istochnika izlucheniya (Enhancement of the energy potential of a lidar for methane detection with the use of a quasi_continuous radiation source), *Radiotekhnika i elektronika*, 2015, Vol. 60, No. 10, pp. 1058–1061.
2. Alahyane F., Crotti C., Deloison F., Wavelength optimization in femtosecond laser corneal surgery, *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 2013, Vol. 54, No. 5, pp. 3340–3349.

3. Chang E. W., Sharma U., Yun S. H., Long-wavelength optical coherence tomography at 1.7 μm for enhanced imaging depth, *Optics Express*, 2008, Vol. 16, No. 24, pp. 19712–19723.
4. Delahaye T., Maxwell S. E., Reed Z. D., Precise methane absorption measurements in the 1.64 μm spectral region for the MERLIN mission, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, Vol. 121, No. 12, pp. 7360–7370.
5. Grigorievsky V. I., Elbakidze A. V., Tezadov Y. A., Modeling and investigation of high-power fiber-optical transmitters for lidar applications, *J. Russian Laser Research*, 2017, Vol. 38, No. 4, pp. 311–315.
6. Ponomarev Yu. N., Kapitanov V. A., *TDLS of methane and its applications to study of methane emissions from natural structures to the atmosphere*, 2013, 31 p., available at: <http://www.dls.gpi.ru/rus/conf/TDLS2013/Posters/Ponomarev.pdf>.
7. Shaoxiang C., Shaif-UI A., Yongmin J., Ultra-short wavelength operation of thulium-doped fiber amplifiers and lasers, *Optics Express*, 2019, Vol. 27, No. 25, pp. 369322–369331.