

Конференции «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре  
в эпоху цифровой трансформации» 5 лет

УДК 621.391

## Оптические усилители на иттербиевом волокне для систем космической связи

Глаголев С. Ф.✉, Гордийчук И. М.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

**Постановка задачи.** Внедрение оптической связи между искусственными спутниками Земли как части глобальной сети связи – важная и актуальная проблема. Одна из задач, которую при этом необходимо решить, – это переход с длины волны излучения 1,55 мкм, которая успешно используется в волоконно-оптических системах связи на Земле и под водой, на более короткие волны. В статье рассмотрена частная задача практической реализации оптического усилителя для системы космической связи. Была выбрана схема усилителя, использующего иттербиевое оптическое волокно в качестве активной усилительной среды. **Целью** работы является исследование оптических усилителей на основе иттербия, их схем и конструктивных особенностей для применения в качестве усилителя мощности и предварительного усилителя в системах космической связи. **Новизна** работы заключается в предлагаемой методике исследований и результатах анализа схем двухкаскадного оптического усилителя мощности и однокаскадного предварительного оптического усилителя. **Результат исследования:** практические рекомендации по методикам исследования оптических усилителей на основе иттербиевых волокон. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы разработчиками оптических усилителей, а также в учебном процессе на кафедре оптических и квантовых систем связи СПбГУТ.

**Ключевые слова:** космическая связь, волоконно-оптический усилитель на основе иттербия

### О современном состоянии космической связи

Космическая связь начала свое развитие в середине 1960-х гг. с появлением первого советского спутника связи «Молния» и американского «Telstar» и продолжает быстро развиваться в интересах всего человечества.

В настоящее время в околоземном пространстве находятся тысячи спутников связи, которые классифицируются по типу своей орбиты [1, 2] относительно Земли (таблица 1). Существуют группировки низкоорбитальных (LEO), среднеорбитальных (MEO) и геостационарных (GEO) спутников связи.

#### Библиографическая ссылка на статью:

Глаголев С. Ф., Гордийчук И. М. Оптические усилители на иттербиевом волокне для систем космической связи // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 4. С. 2. EDN: MSPXWZ

#### Reference for citation:

Glagolev S., Gordiychuk I. Optical Amplifiers on Ytterbium Fiber for Space Communication Systems // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 4. P. 2. EDN: MSPXWZ

Таблица 1. Классификация спутников связи по параметрам их орбит

Параметры орбит спутников связи	Типы орбит спутников связи		
	GEO	MEO	LEO
Высота орбиты, км	36 000	5000–15 000	500–2000
Минимальное количество спутников связи в одной орбитальной группировке	3	8–12	48–66
Максимальная зона покрытия поверхности Земли одним спутником связи, %	34	25–28	3–7
Время пребывания одного спутника связи в зоне радиовидимости	24 часа	1,5–2 часа	10–15 мин

На рисунке 1 представлено схематическое представление орбит спутников связи. Согласно международной конвенции ООН о мирном использовании космического пространства и рекомендациям Международного радиочастотного комитета, чтобы избежать радиопомех для соседних геостационарных спутников связи, их угловое расстояние друг от друга должно составлять не менее  $0,5^\circ$ . Таким образом, на геостационарной орбите можно разместить не более 720 спутников. Однако в последние десятилетия это требование уже не соблюдается. На 2011 год в каталоге числилось свыше 1500 геостационарных спутников. К ним можно добавить более 600 высокоэллиптических объектов, которые периодически пересекают геостационарную орбиту, и более 200 военных спутников, запущенных на орбиту в интересах обороны и разведки различных государств, не включенных в публично доступный каталог NORAD (<https://www.sat.belastro.net/index.php>).

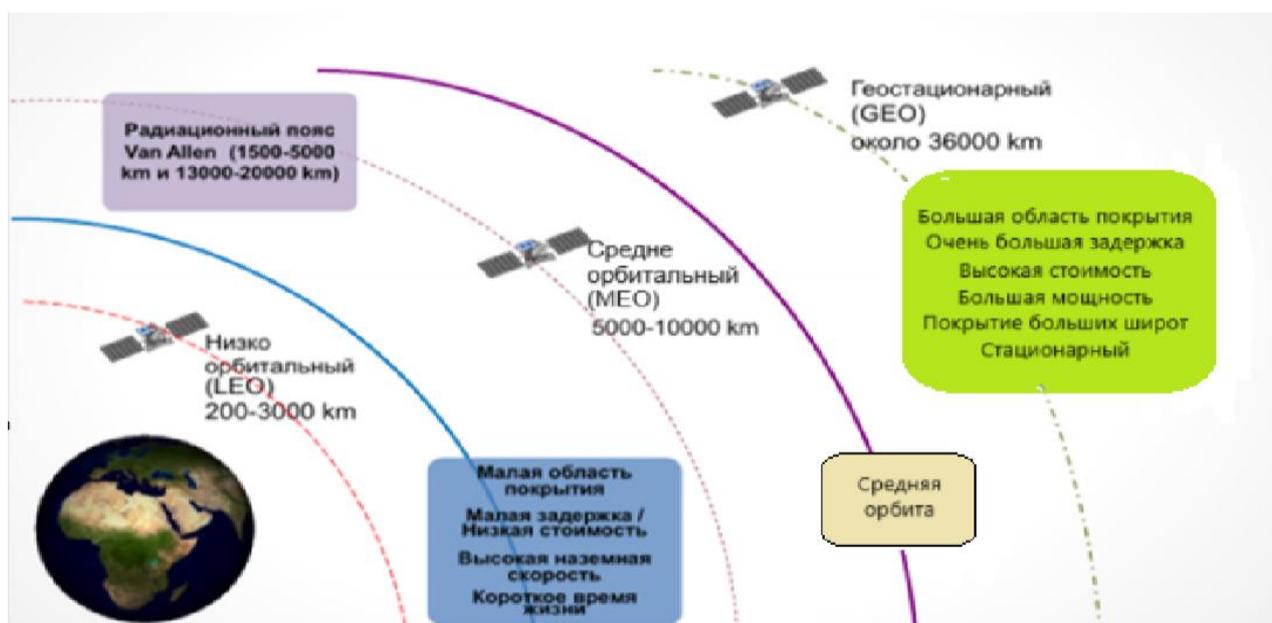


Рис. 1. Схема расположения орбит спутников связи относительно Земли

В настоящее время связь между спутниками связи и наземными станциями в основном осуществляется сверхвысокочастотными радиоволнами в диапазонах  $X$  (7,0–10,7 ГГц),  $Ku$  (10,7–18,0 ГГц) и  $Ka$  (26,5–40 ГГц) [3].

Однако интерес к использованию и попытки создания систем лазерной оптической связи в космосе возникли практически сразу после появления первых спутников связи и лазерных источников излучения: во второй половине прошлого века [1–3]. Отметим, что оптическая связь в космическом пространстве относится к более широкой области связи, которая получила название FSO (*аббр. от англ. Free Space Optics* – оптика свободного пространства). В большинстве FSO используется ближний инфракрасный диапазон длин волн от 750 до 1600 нм. Наиболее распространенные длины волн включают диапазоны около: 800 нм (819/830/880 нм), 1000 нм (1058/1064 нм) и 1550 нм [4].

### Структурные схемы передатчиков и приемников FSO

Рассмотрим упрощенные структурные схемы передатчика и приемника для  $M$ -канальных FSO. В схему передатчика (рисунок 2) входят  $M$  отдельных маломощных канальных передатчиков (Tx1–TxM) с длинами волн  $\lambda_1$ – $\lambda_M$ , модулированное излучение которых объединяется в мультиплексоре (MUX) и поступает на оптический усилитель мощности (ОУМ), также называемый бустером. Выходное излучение ОУМ поступает в оптическую схему передающей антенны (ПРД), где формируется выходное излучение в виде параллельного пучка с радиусом  $W_0$ .

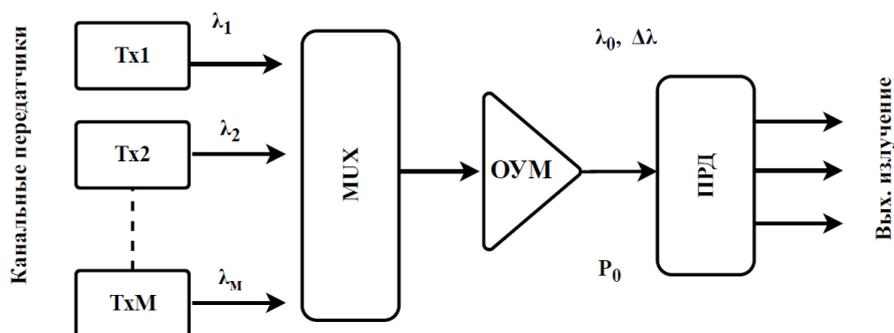


Рис. 2. Упрощенная структурная схема многоканального передатчика FSO

В схему приемника (рисунок 3) входит приемная антенна (ПМР), которая собирает ослабленное рассеянное излучение от передатчика с мощностью  $P_R$  в пределах своей апертуры с радиусом  $W_R$  и направляет его в предварительный оптический усилитель (ПОУ) с коэффициентом усиления  $G$  и коэффициентом шума  $F_n$ . Выходной сигнал ПОУ поступает на демультиплексор (DMUX), который направляет оптические каналные сигналы с мощностью  $P_r$  на свои фотоприемные устройства (ФПУ).

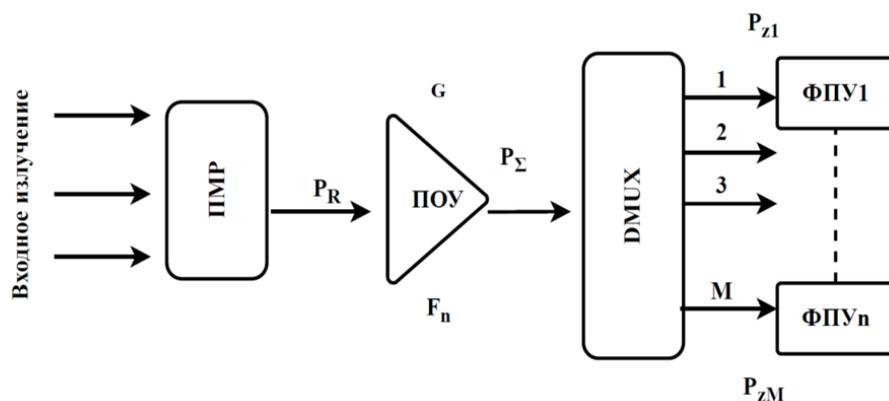


Рис. 3. Упрощенная структурная схема  $M$ -канального приемника FSO

### Выбор длины волны излучения для FSO в космосе

При выборе наиболее эффективной длины волны лазерного излучения для FSO необходимо учитывать ряд факторов: уровень потерь в канале связи, наличие доступных и эффективных источников, приемников, усилителей и модуляторов оптического излучения, а также других оптических компонентов для выбранной длины волны. Потери в канале связи FSO между спутниками определяются в основном дифракционной расходимостью лазерного пучка, а для атмосферных FSO, включая линии связи с наземными станциями, необходимо учитывать также потери и искажения оптических пучков в атмосфере Земли. Рассмотрим упрощенную оптическую схему канала FSO в безвоздушном пространстве длиной  $L$  (рисунок 4) между двумя линзовыми антеннами Л1 (ПРД) и Л2 (ПМР). Полагаем, что выходящий из линзы Л1 пучок мощностью  $P_0$  является гауссовским с радиусом  $W_0$  равным радиусу линзы Л1 (апертуре передатчика).

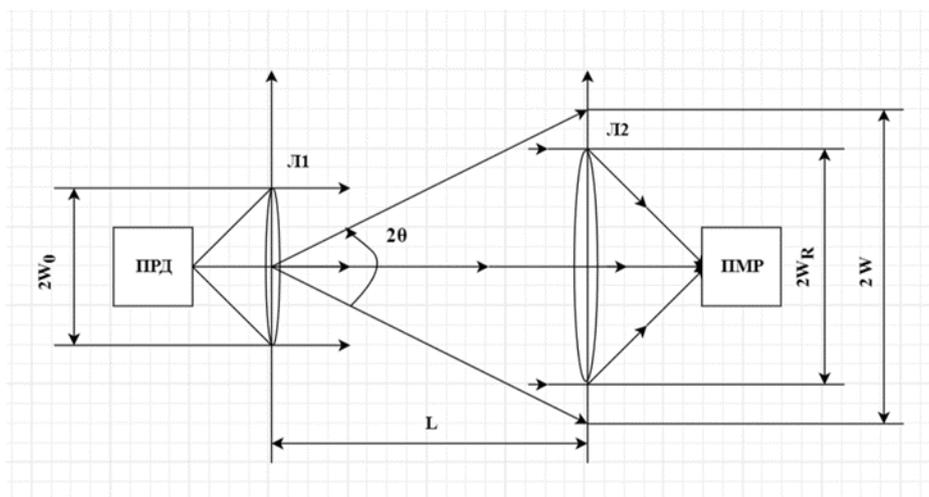


Рис. 4. Упрощенная оптическая схема канала FSO в безвоздушном пространстве

Радиус этого пучка на расстоянии  $L$  значительно возрастает до величины  $W$ . Часть энергии пучка с радиусом апертуры приемной антенны  $W_R$  воспринимается ФПУ. Запишем выражение для угла расходимости  $\theta_0$  пучка, который зависит от длины волны излучения  $\lambda_0$  и апертуры передатчика  $W_0$ :

$$\theta^0 = \frac{\lambda^0}{\pi \cdot W_0}, \text{ рад.} \quad (1)$$

Для оценки величины потерь в оптическом канале за счет дифракции можно использовать упрощенное выражение [2]:

$$A = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_0}{P_R}\right) \approx 20 \cdot \lg\left(\frac{L \cdot \lambda_0}{\pi \cdot W_0 \cdot W_R}\right), \text{ дБ}, \quad (2)$$

где  $P_R$  – мощность на входе ФПУ.

Из выражения (2) видно, что для уменьшения потерь в линейном тракте FSO необходимо увеличивать апертуры передающей  $W_0$  и приемной  $W_R$  антенн, а также уменьшать длину волны излучения  $\lambda_0$ . Это означает следующее: несмотря на то, что С-диапазон со средней длиной волны 1550 нм широко используется для FSO, работающих в атмосфере, переход на более коротковолновый диапазон со средней длиной волны 1000 нм позволяет, в соответствии с (2), на 3,8 дБ уменьшить потери  $A$  и в 2,4 раза увеличить максимальное расстояние  $L$  между спутниками.

### Особенности FSO по сравнению с волоконно-оптическими системами связи

В настоящее время многоканальные волоконно-оптические системы связи (ВОСС) с технологией плотного мультиплексирования в волновой области DWDM (*аббр. от англ. Dense Wavelength Division Multiplexing* – плотное мультиплексирование с разделением по длине волны), использующие одномодовые оптические волокна (ОВ) и среднюю длину волны 1550 нм, стали во всем мире основой не только транспортных, магистральных и региональных сетей связи, но также и сетей доступа. Для них разработана широкая номенклатура комплектующих изделий, включая источники, приемники, кодеры, модуляторы излучения, а также мультиплексоры и цифровые сигнальные процессоры (DSP, *аббр. от англ. Digital Signal Processor*) для обработки сигналов и т. д. Для усиления сигналов в ВОСС используют оптические усилители EDFA (*аббр. от англ. Erbium-Doped Fibre Amplifier* – усилитель на волокне, легированном эрбием). В качестве активной усиливающей среды в них используются ОВ, сердцевина которых легирована ионами эрбия.

Особенностями современных ВОСС являются линейные и нелинейные искажения в волокнах, которые ограничивают максимальные уровни оптических сигналов на входе в ОВ. Кроме того, для устранения этих искажений ужесточаются требования к структурам DSP, а также к алгоритмам и программам цифровой обработки сигналов (ЦОС).

В FSO в канале связи между спутниками атмосферные искажения, обусловленные потерями на поглощение и турбулентностью, отсутствуют. Нелинейные искажения и нелинейные шумы также не возникают. Это позволяет не только упростить структуру DSP и алгоритмы ЦОС, но и снять ограничения на канальную и общую мощности на выходе передающей антенны, которую можно повысить до нескольких ватт за счет применения ОУМ. Для повышения чувствительности ФПУ можно использовать лавинные фотодиоды (ФД) или ПОУ в сочетании с р-и-п ФД.

В данной статье рассматривается один из аспектов возможного перехода FSO на среднюю длину волны 1000 нм, а именно возможность практической реализации ключевых элементов системы связи — ОУМ и ПОУ.

### Особенности оптических усилителей на ОВ, легированном иттербием

Для создания оптического усилителя (ОУ) в разных диапазонах длин волн используют ОВ, сердцевина которых легируется редкоземельными элементами: эрбием, иттербием, празеодимом, тулием и гольмием [5]. Для диапазона со средней длиной волны в районе 1000 нм может использоваться волоконный ОУ YDFA (аббр. от англ. Ytterbium-Doped Fibre Amplifier — усилитель на волокне, легированном иттербием), в качестве активной среды которого используется кварцевое ОВ (YDF), сердцевина которого легирована иттербием. YDFA позволяют усиливать оптические сигналы в очень широком диапазоне длин волн от 975 до 1150 нм (обычно от 1030 до 1080 нм), обеспечивать высокую выходную мощность до десятков ватт и эффективное преобразование мощности накачки в выходную мощность сигнала (PCE, аббр. от англ. Power Conversion Efficiency — эффективность преобразования мощности), а YDF обладает высокой теплостойкостью, сохраняя свою геометрию при высоких температурах [6, 7].

На рисунке 5 показана структура энергетических уровней ионов иттербия  $Yb^{3+}$  в YDF. Для использования в ОУ подходят два множества уровней: основное множество  $^2F_{7/2}$ , состоящее из четырех уровней, и возбужденное множество  $^2F_{5/2}$ , состоящее из трех уровней [8].

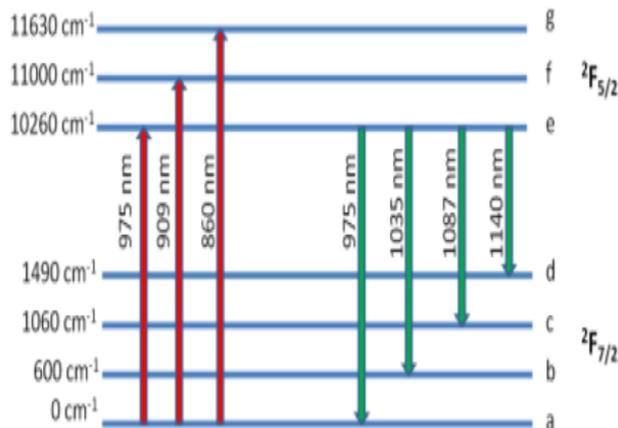


Рис. 5. Структура энергетических уровней  $Yb^{3+}$  [9]

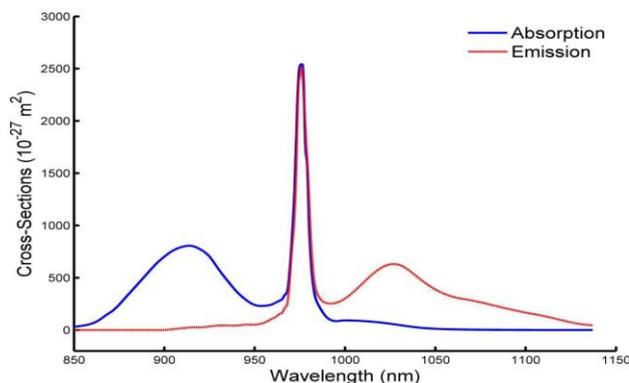


Рис. 6. Сечения поглощения (синий) и излучения (красный)  $Yb$  в германосиликатном стекле [8]

На рисунке 6 показаны сечения поглощения и излучения иттербия в германосиликатном стекле. Первый пик поглощения находится на длине волны 910 нм, что обусловлено переходом с нижнего уровня основного состояния, уровня  $a$ , на второй уровень возбужденного состояния, уровень  $f$ . Поскольку возбужденные ионы на уровне  $f$  нестабильны и легко распадаются до уровня  $e$  в возбужденном состоянии, сечение излучения на длине волны 910 нм очень мало. Это позволяет значительной части иттербия перейти в верхнее множество состояний, и мощная накачка на длине волны 910 нм приводит к тому, что 97 % ионов находятся в верхнем состоянии, что обеспечивает практически максимальное возможное

усиление на единицу длины [8]. Первый пик сечения излучения находится на длине волны 975 нм, что связано с переходами с нижнего уровня возбужденного состояния, уровня *e*, на нижний уровень основного состояния, уровень *a*. Таким образом, можно достичь максимально возможного усиления на длине волны 975 нм при накачке около 910 нм, но это будет слишком узкополосный ОУ, не пригодный для передачи больших объемов информации.

Для эффективного усиления в диапазоне от 1030 до 1080 нм, что соответствует переходам с уровня *e* в возбужденном состоянии на уровни *b* и *c* в основном состоянии, необходимо обеспечить инверсную населенность на уровне *e*. Для этого можно использовать накачку с длинами волн 860–970 нм (рисунок 5), которая переводит ионы иттербия на возбужденные уровни *f*, *g*. Далее ионы переходят без излучения на уровень *e* и там накапливаются, создавая инверсную населенность. Использовать для накачки излучение с длинами волны вблизи пика поглощения 975 нм (рисунок 6), нецелесообразно, так как этой волне соответствует и пик излучения. Это приводит к резкому росту усиленного спонтанного излучения (ASE, аббр. от англ. Amplified Spontaneous Emission) и ограничивает инверсию населенности на уровне *e* величиной 50 %. Этого недостаточно для эффективного усиления. Далее это будет проиллюстрировано (см. рисунок 13).

Однако по данным компании-изготовителя PG Photonics даже небольшой уход от резонансной длины волны позволяет создавать эффективные иттербиевые ОУ с мощностью от 1 до 100 Вт.

Отметим, что для ПОУ с небольшой выходной мощностью могут использоваться одномодовые ОБ с одной оболочкой и смесители (мультиплексоры) с технологией WDM (аббр. от англ. Wavelength Division Multiplexing – мультиплексирование в волновой области) для объединения излучений сигнала и накачки ограниченной мощности (не более 1 Вт). Для ОУМ с большой выходной мощностью требуется накачка мощностью в единицы-десятки Вт. При использовании обычного смесителя WDM для ОУМ требуемая интенсивность излучения на входе в ОБ может приводить к разрушению, как торца YDF, так и самого смесителя.

Изобретение YDF с двойной оболочкой решает эту проблему. На рисунках 7 и 8 показана упрощенная конструкция YDF с двойной оболочкой: внешней (Outer Cladding) и внутренней (Inner Cladding).

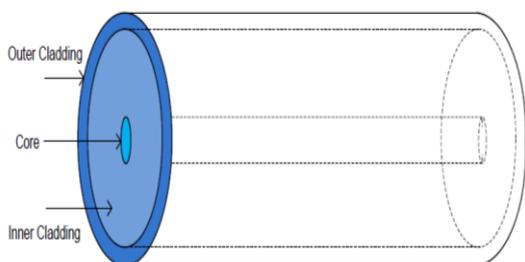


Рис. 7. Конструкция YDF с двойной оболочкой

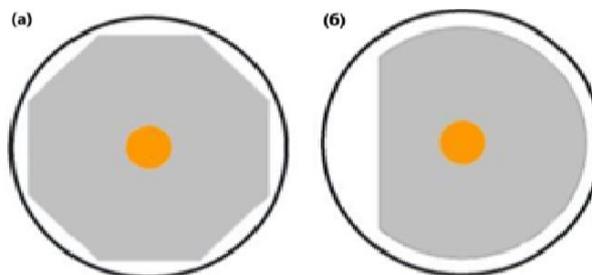


Рис. 8. Поперечное сечение: а) восьмиугольного; б) D-образного YDF с двойной оболочкой

Оптический сигнал вводится в сердцевину ОБ с двойной оболочкой и затем усиливается в ней, тогда как излучение накачки вводится во внутреннюю оболочку. В любой плоскости сечения ОБ, перпендикулярной направлению распространения света, только небольшая часть излучения накачки взаимодействует с ионами легирующего элемента в сердцевине волокна. Однако излучение накачки входит в сердцевину YDF не только в его начале, но и на всем протяжении. Введем коэффициент *D*, который определяет процент энергии накачки, введенной во внутреннюю оболочку, и фактически определяет усилительную способность на определенном участке волокна:

$$D = \frac{A_{core}}{A_{inner\_cladding}}, \quad (3)$$

где  $A_{core}$ ,  $A_{inner\_cladding}$  – площади сердцевины и внутренней оболочки YDF, соответственно.

Диаметр внутренней оболочки имеет размер около 100 мкм, в то время как диаметр сердцевины обычно не превышает 10 мкм. Таким образом, коэффициент  $D$  будет меньше 0,01. Чтобы добиться более высокой эффективности накачки, нужно значительно увеличить ее мощность, вводимую во внутреннюю оболочку, и увеличить длину YDF. Коэффициент  $D$  можно также увеличить, применив различные формы внутренней оболочки, чтобы повысить вероятность того, что отраженный свет накачки попадет в сердцевину. На рисунке 8 показаны поперечные сечения двух ОБ с двойной оболочкой с восьмиугольной и  $D$ -образной формами внутренней оболочки, которые иногда называют «хаотическими волокнами». Неправильные формы внутренней оболочки позволяют свету накачки отражаться в случайных направлениях, благодаря чему он имеет большую вероятность пройти через сердцевину YDF и возбудить ионы легирующего элемента.

В сердцевине YDF из-за большой интенсивности излучений возникают нелинейные искажения сигналов. Один из методов уменьшения нелинейных эффектов – это снижение интенсивности излучения за счет увеличения площади сердцевины ОБ. Такие ОБ называются волокнами с большим диаметром поля моды (Large Mode Area Fibers, LMA), типичный диаметр которых составляет 20 мкм или более.

### Двухкаскадный ОУ на ОБ, легированном иттербием

Использование двух каскадов усиления в YDFA, использующего YDF с двойной оболочкой, позволяет создать ОУ с большим коэффициентом усиления, низким уровнем шума и большой выходной мощностью. На рисунке 9 представлена схема моделирования такого двухкаскадного ОУ [10].

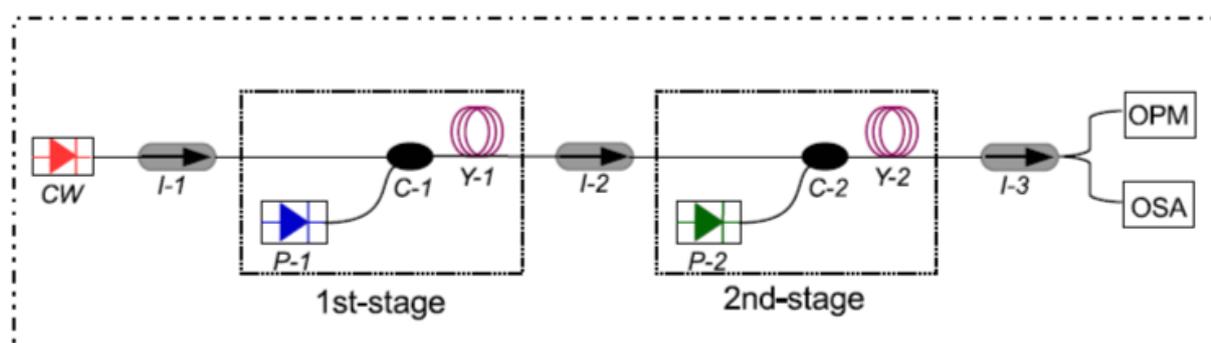


Рис. 9. Схема YDFA: CW – лазер непрерывного излучения; I-1, I-2, I-3 – изоляторы; P1, P2 – источники излучения накачки; Y-1, Y-2 – YDF; C1, C2 – смесители WDM; OSA – оптический анализатор спектра; OPM – оптический измеритель мощности

Первый каскад усиления использует накачку с длиной волны 920 нм, на которой коэффициент поглощения ОБ мал. Второй каскад использует более мощную по сравнению с первым накачку с длиной волны 980 нм, для которой поглощение в ОБ практически максимально. Схема исследования включает в себя источник входного сигнала (непрерывный лазер), три изолятора (I-1, I-2 и I-3), которые обеспечивают однонаправленное прохождение оптического сигнала, а также два смесителя излучения сигнала и накачки (C1 и C2). В схему также входят два источника накачки (P1 и P2), два коротких отрезка иттербиевого ОБ YDF (Y-1 и Y-2), выполняющие функции усиления. Параметры YDF Y-1 и Y-2 приведены в таблице 2 [10]. Эти параметры схожи с характеристиками серийных ОБ YDF (#YB1200-4/125) производства Thorlab ([https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=336&pn=YB1200-4/125](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=336&pn=YB1200-4/125)). Изоляторы I-1 и I-2 расположены перед первым и вторым каскадами ОУ, соответственно, а изолятор I-3 установлен на выходе всего усилителя для предотвращения возможных обратных отражений, которые могут нарушить стабильность работы ОУ [11, 12]. Для исследований в установке используются: оптический измеритель мощности (OPM) и оптический анализатор спектра (OSA).

На рисунке 10 показаны зависимости общего коэффициента усиления двухкаскадного ОУ от длины волны в диапазоне 1020–1080 нм. Из рисунка 10а видно, что максимальное усиление (62, 62,5 и 60,8 дБ) наблюдается на длине волны сигнала 1032,9 нм при длинах легированного волокна Y-2 второго каскада усиления 3, 6 и 9 м, соответственно. Коэффициент усиления в коротковолновой части спектра существенно снижается с увеличением длины ОБ, что связано с уменьшением инверсии населенности усиливающей

среды [11]. Из рисунка 10б видно, что максимальное усиление (62, 62,5 и 60,5 дБ) достигается на той же длине волны при концентрациях ионов иттербия  $\text{Yb}^{3+}$ , равных  $25 \times 10^{24}$ ,  $50 \times 10^{24}$  и  $75 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$ , соответственно. При этом длина ОВ Y-2 была равна 6 м, а мощность сигнала на входе второго каскада была постоянной и составляла  $-35$  дБм.

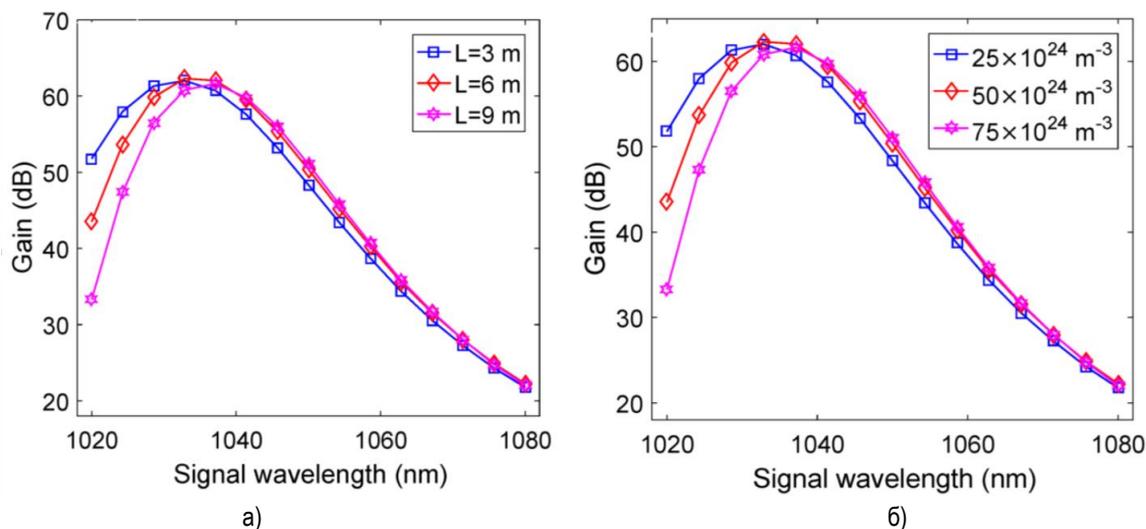


Рис. 10. Графики зависимости коэффициента усиления от длины волны входящего сигнала для различных длин ОВ Y-2 (а) и концентраций легирующей примеси  $\text{Yb}^{3+}$  (б) [10]

Параметры, использованные при моделировании двухкаскадного ОУ, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры двухкаскадного ОУ YDFA

Параметр ОУ	Значение
Длина волны накачки 1-го каскада P-1	920 нм
Длина волны накачки 2-го каскада P-2	980 нм
Мощность накачки 1-го каскада P-1	1 Вт
Мощность накачки 2-го каскада P-2	4 Вт
Длина первого ОВ Y-1	1 м
Концентрация $\text{Yb}^{3+}$ в ОВ Y-1	$50 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$
Радиусы сердцевин ОВ Y-1 и Y-2	3,4 мкм
Радиусы областей легирования ОВ Y-1 и Y-2	2,4 мкм
Радиусы оболочек ОВ Y-1 и Y-2	62,5 мкм
Числовые апертуры сердцевин ОВ Y-1 и Y-2	0,2
Числовые апертуры оболочек ОВ Y-1 и Y-2	0,5
Затухание сигнала	0,1 дБ
Затухание сигнала накачки	0,15 дБ

Таким образом, длина ОВ Y-2 6 м и концентрация легирующего вещества  $\text{Yb}^{3+}$ , равная  $50 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$ , обеспечивают максимальное усиление  $-62,5$  дБ.

На рисунке 11 показаны графики зависимости коэффициента усиления от длины волны сигнала при различных значениях мощности накачки и сигнала. Из рисунка 11а видно, что максимальные значения усиления (около 58,6, 60,6 и 62,5 дБ) были получены при мощности накачки 2, 3 и 4 Вт, соответственно, для длины волны сигнала 1032,9 нм. Из рисунка 11б видно, что максимальные значения усиления (62,5, 54,5 и 40,4 дБ) наблюдались на длине волны сигнала 1032,9 м при уровнях мощности сигнала на входе второго каскада  $-35$ ,  $-20$ , и  $-5$  дБм, соответственно.

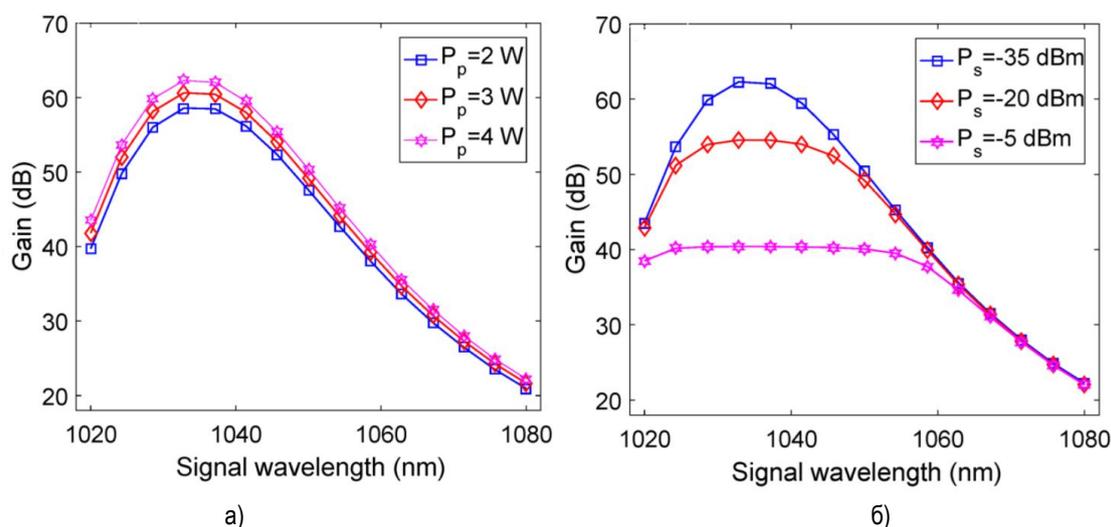


Рис. 11. Графики зависимости коэффициента усиления от длины волны сигнала при различных мощностях накачки (а) и сигнала на входе второго каскада (б) [10]

На рисунке 12 показаны графики зависимостей уровней мощности сигнала на выходе ОУ и коэффициента усиления от мощности накачки при различных значениях мощности сигнала. Из рисунка 12а видно, что эффективность преобразования мощности накачки в мощность сигнала (PCE) на длине волны сигнала 1032,9 нм равна 58,8, 60 и 60,5 % при уровнях мощности сигнала  $-35$ ,  $-20$  и  $-5$  дБм, соответственно. Из рисунка 12б видно, что коэффициент усиления быстро увеличивается при возрастании мощности накачки для каждого значения мощности сигнала; однако наибольший коэффициент усиления достигается при самой малой мощности входного сигнала  $-35$  дБм.

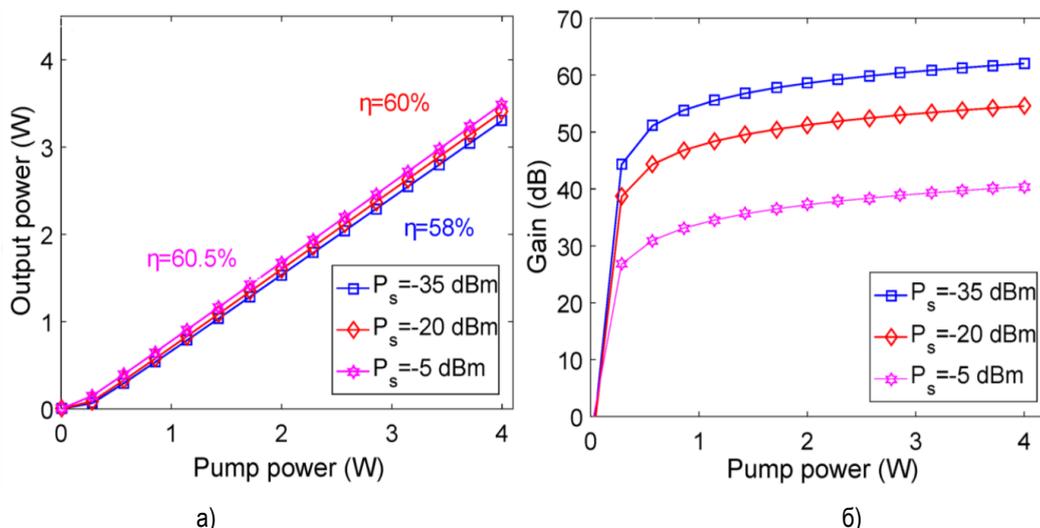


Рис. 12. Зависимость от мощности накачки выходной мощности сигнала (а) и коэффициента усиления (б) [10]

На рисунке 13 показаны зависимости выходной мощности и коэффициента усиления ОУ от длины волны накачки для трех различных значений мощности накачки на длине волны сигнала 1032,9 нм. Из рисунка 13а видно, что при изменениях длины волны накачки от 940 до 960 нм выходная мощность сигнала остается стабильной на уровнях 1,75; 3,5 и 4,5 Вт при мощностях накачки 2, 4 и 6 Вт, соответственно. Из рисунка 13б видно, что в этом диапазоне длин волн накачки коэффициент усиления составляет 59; 62,5 и 63,5 дБ при мощностях накачки 2, 4 и 6 Вт, соответственно. Однако на длине волны накачки примерно 965 нм наблюдается резкое снижение выходной мощности сигнала и коэффициента усиления ОУ.

Подобное поведение графиков зависимости на рисунке 13 можно объяснить, обратившись к рисунку 6, где видно, что коэффициенты поглощения фотонов накачки мало изменяются в диапазоне длин

волн 920–960 нм. Следовательно, выходная мощность и коэффициент усиления остаются практически постоянными в этом диапазоне длин волн накачки при всех трех значениях ее мощности.

На рисунке 6 в области 960–970 нм виден резкий пик поглотительной и излучательной способности ионов иттербия, которая приводит к снижению инверсии населенности до 50 %. При этом резко возрастает ASE, которое перегружает ОУ, и он теряет свои полезные усилительные функции. В результате выходная мощность и коэффициент усиления ОУ резко снижаются. При дальнейшем увеличении длины волны накачки более 975 нм значения выходной мощности и коэффициента усиления ОУ возвращаются к своим прежним значениям.

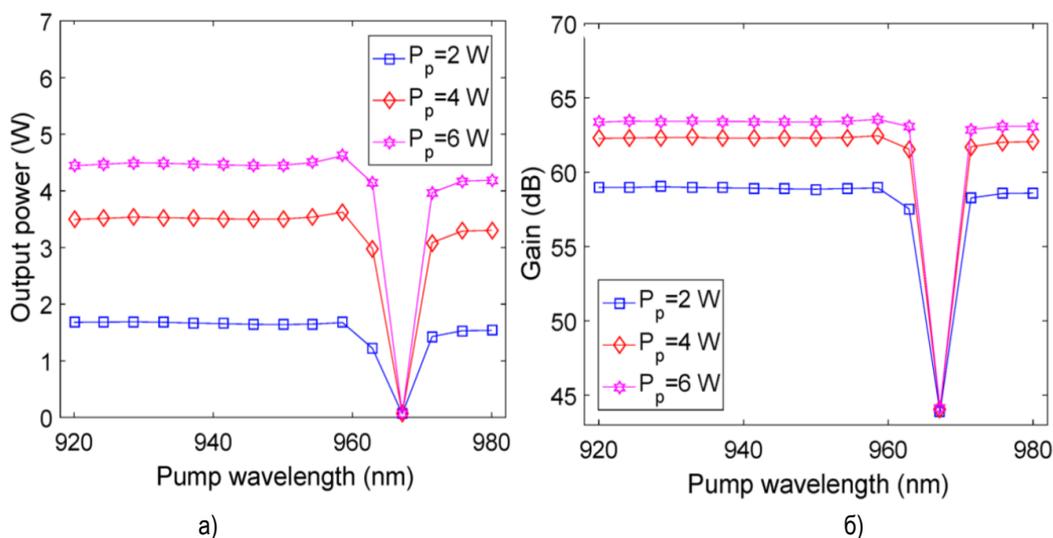


Рис. 13. Зависимость от длины волны накачки выходной мощности сигнала (а) и коэффициента усиления (б) [10]

На рисунке 14а показаны зависимости коэффициента усиления ОУ от его выходной мощности при трех уровнях мощности накачки: 3; 3,5 и 4 Вт. При этом мощность сигнала на входе второго каскада поддерживалась на уровне –35 дБм. Максимальные уровни выходных сигналов ОУ, при которых коэффициент усиления уменьшается на 3 дБ, изменяются в пределах от 33,8 до 35,3 дБм. При этом мощность накачки изменялась от 3 до 4 Вт.

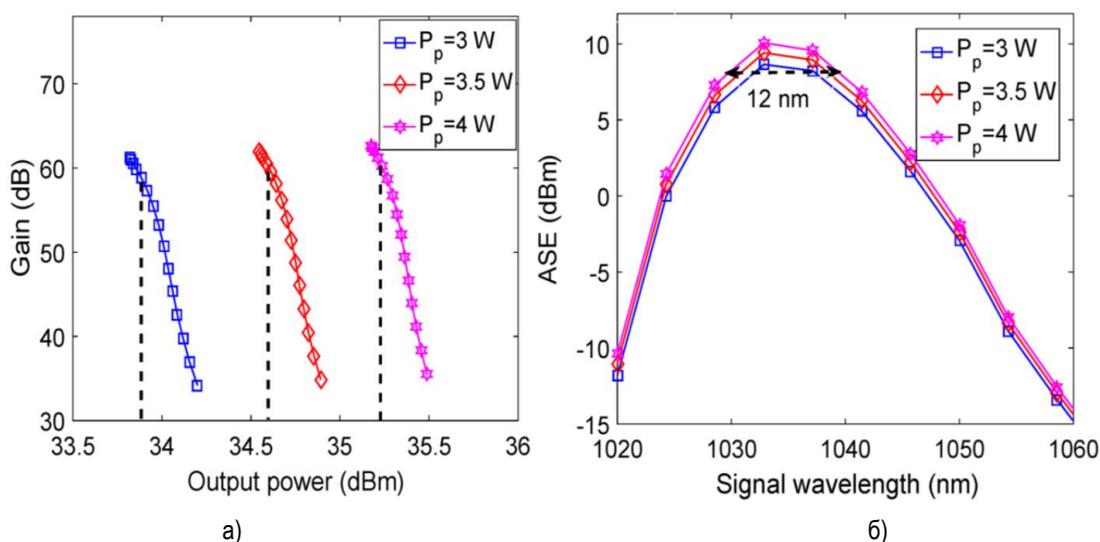


Рис. 14. Зависимости коэффициента усиления от выходной мощности ОУ (а) и уровня мощности ASE от длины волны сигнала (б) для различных значений мощности накачки [10]

На рисунке 14б показаны зависимости уровней мощности ASE от длины волны сигнала. Максимальные мощности ASE наблюдались на длине волны 1030 нм. Они составили 8,7; 9,4 и 10,1 дБм при мощностях накачки 3; 3,5 и 4 Вт, соответственно. Видно, что мощность ASE возрастает с увеличением

мощности накачки, так как последнее повышает не только вынужденное, но и спонтанное излучение. При мощности накачки 4 Вт ширина полосы ASE достигла 12 нм.

На рисунке 15 показана зависимость коэффициента усиления ОУ от мощности входного сигнала для различных значений мощности накачки на длине волны сигнала 1032,9 нм. Можно заметить, что коэффициент усиления постепенно увеличивается при уменьшении мощности сигнала с 10 до -30 дБм. При дальнейшем снижении мощности сигнала с -30 до -40 дБм коэффициент усиления стабилизируется и перестает увеличиваться. Отметим также, что значение коэффициента усиления ОУ растет с увеличением мощности накачки.

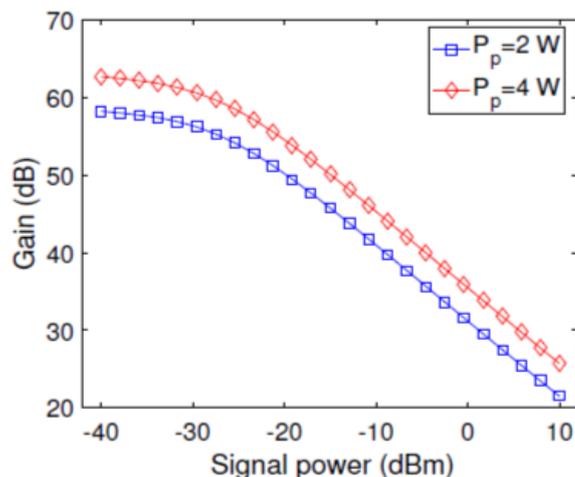


Рис. 15. Графики зависимости коэффициента усиления от мощности входного сигнала для двух значений мощности накачки

Основные характеристики рассмотренного двухкаскадного волоконно-оптического усилителя на основе иттербия в режиме стабилизации выходной мощности приведены в таблице 3.

Таблица 3. Основные характеристики двухкаскадного ОУ на основе иттербиевого ОВ с двойной оболочкой

Параметр	Значение параметра
Коэффициент усиления $G$ , дБ	до 62,5
Длины волн сигнала $\lambda$ , нм	1030–1080
Уровень мощности входного сигнала, $P_{вх}$ , дБм	-35 / -20 / -5
Мощность выходного сигнала $P_{вых}$ , Вт	до 3,5
Шум-фактор $NF$ , дБ	меньше 5
Эффективность преобразования мощности накачки, $PCE$ , %	до 60,5

### ПОУ на ОВ, легированном иттербием

В [13] предложена схема и конструкция ОУ на основе иттербия для использования в качестве ПОУ. В ОУ использовано специально разработанное YDF, имеющее конструкцию с кольцевым легированием (оболочка была частично легирована ионами Yb) и малым диаметром сердцевины и оболочки 10 и 80 мкм, соответственно, для получения низкой выходной мощности при использовании в качестве ПОУ (таблица 4). На рисунке 16 показана эффективность преобразования сигнала накачки в выходной сигнал ПОУ.

Таблица 4. Параметры ПОУ YDFA

Параметр	Значение параметра
Мощность накачки, Вт	менее 10
Мощность входного сигнала, мВт	менее 1
Мощность выходного сигнала, Вт	0,1–1
Энергетическая эффективность накачки, $PCE$ , %	11,5

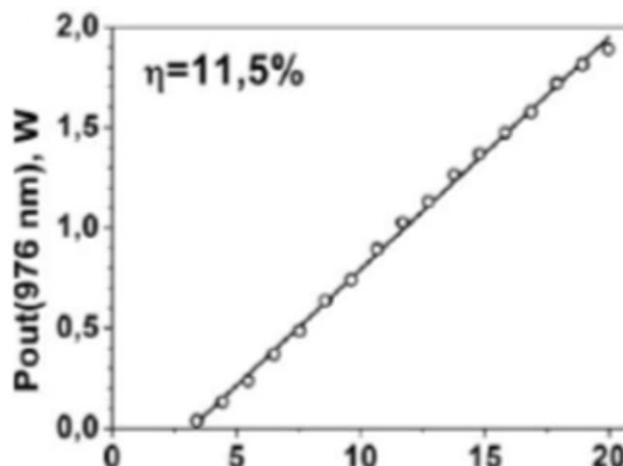


Рис. 16. Эффективность преобразования сигнала накачки в выходной сигнал, измеренная в режиме насыщения

### Заключение

Основываясь на изложенном, сформулируем преимущества перехода на более короткие длины волн и использование YDFA по сравнению с EDFA для космической связи.

Во-первых, использование для межспутниковой оптической связи диапазона длин волн 1030–1080 нм вместо 1520–1560 нм позволяет увеличить дальность связи при тех же габаритах передающих и приемных антенн за счет меньшей расходимости лучей или уменьшить габариты антенн при той же дальности.

Во-вторых, использование YDFA по сравнению с EDFA позволяет обеспечить более широкую полосу усиления оптических сигналов, за счет чего можно уменьшить взаимные помехи при одном и том же количестве каналов или увеличить количество сигналов.

В-третьих, использование YDF с увеличенным диаметром сердцевины и двойной оболочкой по сравнению со стандартным EDF позволяет значительно увеличить не только выходную мощность YDFA, но и дальность связи между космическими аппаратами.

### Литература

1. Дмитриев В. И. Системы спутниковой подвижной связи // Космическая связь: прошлое, настоящее, будущее: Материалы Четвертых научных чтений памяти А. С. Попова, посвященных Дню радио – празднику работников всех отраслей связи (Санкт-Петербург, 6 мая 2011 г.). СПб.: Центральный музей связи им. А. С. Попова, 2011. 128 с.
2. Hemmati H. Near-Earth Laser Communications // Near-Earth Laser Communications. CRC press, 2020. 453 p.
3. Романов А. А., Романов А. А. Основы космических информационных систем: учебное пособие. М.: ИКИ РАН; МФТИ, 2019. 292 с.
4. Kaushal H., Kaddoum G. Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 19. Iss. 1. P. 57–96. DOI: 10.1109/COMST.2016.2603518. EDN: USFFPW
5. Alharbi A. G., Kanwal F., Ghafoor S., Habib N.; Kanwal B. et al. Performance Optimization of Holmium Doped Fiber Amplifiers for Optical Communication Applications in 2–2.15  $\mu\text{m}$  Wavelength Range // Photonics. 2022. Vol. 9. Iss. 4 (245). DOI: 10.3390/photonics9040245. EDN: TORLVN
6. Albalawi A., Zhu H., Taccheo S., Chiasera A., Ferrari M. et al. Numerical Modeling of the Impact of Pump Wavelength on Yb-Doped Fiber Amplifier Performance // Optical and Quantum Electronics. 2016. Vol. 48. Iss. 11. PP. 1–7. DOI: 10.1007/s11082-016-0771-z. EDN: DAPYDN
7. Zervas N. M. High Power Ytterbium-Doped Fiber Lasers-Fundamentals and Applications // International Journal of Modern Physics B. 2014. Vol. 28. Iss. 12. PP. 1442009–1442044. DOI: 10.1142/S0217979214420090. EDN: SOQEMP
8. Paschotta R., Nilsson J., Tropper A. C., Hanna D. C. Ytterbium-Doped Fiber Amplifiers // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1997. Vol. 33. Iss. 7. PP. 1049–1056. DOI: 10.1109/3.594865

9. Pask H. M., Carman R. J., Hanna D. C., Tropper A. C., Mackechnie C. J. et al. Ytterbium-Doped Silica Fiber Lasers: Versatile Sources for the 1–1.2  $\mu\text{m}$  Region // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 1995. Vol. 1. Iss. 1. PP. 2–13. DOI: 10.1109/2944.468377

10. Mirza J., Ghafoor S., Armghan A., Elhamrawy O. I., Jamal L. et al. Performance Enhancement of Ytterbium-Doped Fiber Amplifier Employing a Dual-Stage In-Band Asymmetrical Pumping // Micromachines 2022. Vol. 13. Iss. 9. P. 1488. DOI: 10.3390/mi13091488. EDN: IUPIIU

11. Mukhtar S., Aliyu K. N., Qureshi K. K. Performance Evaluation of  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  Codoped Fiber Amplifier // Microwave and Optical Technology Letters. 2020. Vol. 62. Iss. 6. PP. 2243–2247. DOI: 10.1002/mop.32320. EDN: ANLZZD

12. Tench R. E., Romano C., Delavaux J.-M. Shared Pump Two-Stage Polarization-Maintaining Holmium-Doped Fiber Amplifier // IEEE Photonics Technology Letters. 2019. Vol. 31. Iss. 5. PP. 357–360. DOI: 10.1109/LPT.2019.2895786. EDN: CEDQKE

13. Aleshkina S. S., Lipatov D. S., Kotov L. V., Temyanko V. L., Likhachev M. E. All-fiber Single-mode PM Yb-Doped Pre-Amplifier at 0.976  $\mu\text{m}$  // Proceedings of the 2019 IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC, Munich, Germany, 23–27 June 2019). P. 8872593. DOI: 10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8872593. EDN: ILPCFA

**Статья поступила 5 ноября 2024 г.  
Одобрена после рецензирования 20 декабря 2024 г.  
Принята к публикации 27 декабря 2024 г.**

*Материалы статьи были представлены на V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации» (ПКМ-2024).*

### **Информация об авторах**

*Глаголев Сергей Федорович* — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: glagolev.sergey@sut.ru

*Гордийчук Ирина Михайловна* — студент 2-го курса магистратуры (группа ИКТФ-36м) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: gordiichuk.im@sut.ru

## Optical Amplifiers on Ytterbium Fiber for Space Communication Systems

S. Glagolev✉, I. Gordiychuk

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

**Statement of the problem.** *The implementation of optical communication between Earth-orbiting satellites, as part of a global communication network, presents an important and relevant challenge. One of the tasks that must be addressed in this context is the transition from the 1.55  $\mu\text{m}$  wavelength, which is successfully used in terrestrial and underwater fiber-optic communication systems, to shorter wavelengths. This paper, following the justification of this primary task, explores a specific challenge related to the practical realization of an optical amplifier for space communication systems. The amplifier design selected utilizes ytterbium-doped optical fiber as the active amplifying medium. **The objective of this study** is to investigate the ytterbium-based optical amplifier, its design, and construction features for its application as a power amplifier and a pre-amplifier in space communication systems. **The novelty** of this work lies in the proposed research methodology and the analytical results regarding the configurations of both two-stage power optical amplifiers and single-stage pre-optical amplifiers. **Results:** The outcome of the research includes practical recommendations for research methodologies pertaining to ytterbium fiber-based optical amplifiers. **Practical significance:** The findings can be utilized by developers of optical amplifiers, as well as in the educational process within the Department of Optical and Quantum Communication Systems at the SPbSUT.*

**Key words:** *space communication, ytterbium-based fiber optic amplifier*

### Information about Authors

*Glagolev Sergey* — Ph.D. of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Optical and Quantum Communication Systems (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: glagolev.sergey@sut.ru

*Gordiychuk Irina* — 2<sup>nd</sup> Year Master's Student (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: gordiichuk.im@sut.ru