ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СВЯЗИ

Полностью оптическая стабилизация коэффициента усиления волоконного усилителя с удаленной оптической накачкой

А.Ю.Игуменов, С.Н.Лукиных, О.Е.Наний, В.Н.Трещиков

Экспериментально исследована оптическая система стабилизации коэффициента усиления многоканального оптического усилителя с удаленной попутной доставкой накачки (Forward Remote Optically Pumped Amplifier, F-ROPA). Для осуществления оптической стабилизации (Gain Clamping) создается спектрально селективная, в пределах одного канала, оптическая обратная связь. При ненасыщенном коэффициенте усиления, который превышает потери в цепи обратной связи, возникает генерация, обеспечивающая стабилизацию коэффициента усиления на в точности компенсирующем потери в цепи обратной связи уровне. Установлено, что коэффициент усиления ROPA в режиме оптической стабилизации изменяется не более чем на 0.17 дБ при вариации мощности лазера накачки в диапазоне от 21.5 до 29 дБм, 0.43 дБ при модуляции мощности входного сигнала от 2 до 10 дБм, 0.24 дБ при изменении температуры окружающей среды в диапазоне от – 40 до + 50 °С. Показано, что оптическая стабилизация усиления не приводит к искажению спектра усиления, а коэффициент усиления можно с высокой точностью регулировать изменением потерь в резонаторе обратной связи. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования оптической стабилизации усиления F-ROPA в оптических линиях связи с пролетами большой длины.

Ключевые слова: *волоконная оптика, оптоволоконные усилители, эрбиевый усилитель, оптическая стабилизация.*

1. Введение

Волоконно-оптические усилители на оптическом волокне, легированном ионами эрбия (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA) широко используются в системах волоконно-оптической связи с плотным мультиплексированием по длине волны (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) из-за их небольших размеров, низкой стоимости и простоты управления [1 – 3]. Традиционно такие усилители устанавливаются в специально оборудованных пунктах обслуживания, в которых поддерживается рабочая температура и имеются источники накачки EDFA; будем называть такие усилители усилителями с локализованной накачкой (LocEDFA). Переход от сетей с топологией «точка – точка» к сетям с динамически перестраиваемой архитектурой предъявляют новые требования к оптическим усилителям [4]. В таких сетях необходимо обеспечить постоянство коэффициента усиления в условиях периодического подключения и отключения некоторой части спектральных каналов. Поскольку отключение/подключение каналов приводит к изменению суммарной усиливаемой мощности, то в отсутствие стабилизации происходит изменение значения коэффициента усиления оптического усилителя в результате насыщения. Изменение усиления и, следовательно, мощности рабочих каналов не только приводит к увеличению количества ошибок (BER), но может привести и к выходу системы из строя. Для предотвращения больших колебаний канальной мощности сигналов используются различные методы стабилизации коэффициента усиления LocEDFA [5].

Для увеличения дальности безрегенерационной передачи и пропускной способности многоканальных линий связи, а также максимальной длины пролетов и оптического отношения мощности сигнала к мощности шума (Optical Signal-to-Noise Ratio, OSNR), совместно с LocEDFA используются усилители с удаленной оптической накачкой (Remote Optically Pumped Amplifier, ROPA), устанавливаемые вне пунктов обслуживания [6 – 13]. Поскольку усилители ROPA расположены вне пунктов обслуживания, они работают в существенно более тяжелых климатических условиях, когда перепады температуры могут достигать многих десятков градусов, а вызванные ими изменения коэффициента усиления достигают 10 дБ [14]. При этом стабилизация ROPA затруднена, в силу их удаленности от блоков питания и управления, расположенных в пунктах обслуживания.

Накачка усилителей ROPA может осуществляться сонаправлено с информационным сигналом или во встречном направлении. Удаленные усилители первого типа принято обозначать F-ROPA (от английского Forward), а второго – B-ROPA (от английского Backward). В B-ROPA по сравнению с F-ROPA зависимость коэффициента усиления (КУ) от числа каналов (мощности входного сигнала) слабая, т.к. в обычных конфигурациях B-ROPA работает в режиме слабого сигнала. В настоящее время для B-ROPA реализован режим стабилизации

А.Ю. Игуменов. Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9; ООО «Т8 НТЦ», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44/1;
e-mail: igumenov.au@mipt.ru
С.Н.Лукиных, О.Е.Наний. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2; ООО «Т8 НТЦ», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44/1
В.Н.Трещиков. ООО «Т8 НТЦ», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44/1; Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Введенского, 1

Поступила в редакцию 10 мая 2023 г., после доработки – 28 июня 2023 г.

полной выходной мощности (сигнал + шум), измеряемой на блоке накачки: ток лазера накачки варьируется для поддержания постоянной выходной мощности [5]. Более сложной задачей является стабилизация КУ F-ROPA, т. к. его система накачки и управления находится на входе в пролет, где расположен F-ROPA и на котором невозможно измерить мощность выходного сигнала. Кроме того, F-ROPA работает в режиме насыщения, когда КУ зависит еще и от мощности входного сигнала и будет изменяться при изменении числа и/или мощности спектральных каналов.

В ряде работ исследована система оптической стабилизации (ОС) усиления в LocEDFA, заключающаяся в том, что активное эрбиевое волокно усилителя помещается в резонатор лазера, генерирующего на длине волны вне рабочего спектра LocEDFA. В работах [1, 15–18] исследованы резонаторы на волоконных брэгговских решетках (ВБР), в работах [19–21] – на кольцевом оптоволоконном резонаторе, в работах [22–24] – комбинации ВБР и кольцевого резонатора. В перечисленных работах продемонстрирована возможность стабилизации коэффициента усиления LocEDFA при изменяющихся входной мощности сигнала и мощности накачки.

Вместе с тем, нами найдена только одна работа [25], в которой продемонстрирована принципиальная возможность оптической стабилизации КУ ROPA, однако остались не исследованными работа ОС КУ при изменении температуры, а также влияние ОС на спектр усиления.

В настоящей статье реализована и детально исследована оптическая стабилизация коэффициента усиления ROPA, осуществляемая путем насыщения усиления до порога генерации в лазере, который образован спектрально селективным кольцевым резонатором, содержащим переменный аттенюатор и стабилизируемый удаленный эрбиевый усилитель.

2. Методика проведения эксперимента

Для реализации оптической стабилизации коэффициента усиления активное эрбиевое волокно усилителя помещается в резонатор лазера, генерирующего на нерабочей длине волны. Хорошо известное свойство лазера заключается в том, что коэффициент усиления в нем в режиме генерации в точности равен потерям в резонаторе. Если на активный элемент лазера подать внешнее излучение на негенерирующей длине волны, то выходная мощность лазера изменится, а коэффициент усиления останется прежним. Лазерное излучение, таким образом, оказывается некоторым балластным излучением, обеспечивающим постоянство коэффициента усиления. Уменьшение общей мощности входящего оптического сигнала автоматически компенсируется увеличением лазерной мощности и наоборот.

Схема экспериментального стенда, имитирующего реальную волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС), приведена на рис.1.

Стенд собран на основе DWDM-платформы «Волга» производства ООО «Т8 НТЦ». В качестве источников излучения использовались каналы транспондеров 21-26 стандартизованной международным союзом электросвязи (International Telecommunication Union, ITU) сетки частот [26] с длинами волн 1560.61, 1559.79, 1558.98, 1558.17, 1557.36, 1556.56 нм. Каналы транспондеров объединяют мультиплексором WDM и через EDFA подают в линию. После прохождения 50 км оптического волокна SMF-28 сигнал поступает в ROPA. Накачка активного волокна ROPA осуществляется лазером с длиной волны 1480 нм по дополнительному волокну, чтобы исключить рамановское усиление сигнала. Лазер, стабилизирующий коэффициент усиления EDFA, работает на длине волны 1561.42 нм (канал 20). Кольцевой резонатор, создающий селективную обратную связь, образован парой мультиплексоров ввода/вывода (Optical Add-Drop Multiplexer, OADM), соединенных пассивным участком и активным участком, содержащим EDF. Пассивный участок кольцевого резонатора содержит изолятор, пропускающий излучение в сторону первого OADM, и аттенюатор EXFO LTB8 для варьирования потерь в резонаторе. Сигналы каналов визуализировались с помощью анализатора оптического спектра (Optical Spectrum Analyzer, OSA) Anritsu MS9740A при его подключении после катушки оптоволокна (входной сигнал) и между активным волокном и вторым OADM (спектр усиленного сигнала и канала генерации). При проведении температурных исследо-

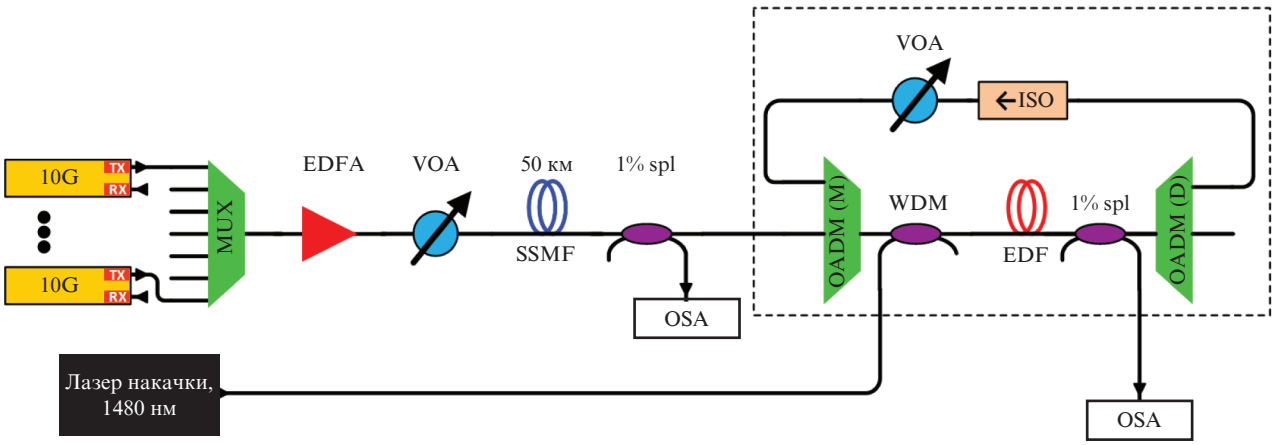

Рис.1. Схема экспериментальной установки:
10G TX – каналы транспондеров; MUX – мультиплексор; EDFA – сосредоточенный эрбиевый усилитель; VOA – переменный аттенюатор; SSMF (Standard Singlemode Fiber) – стандартное одномодовое волокно длиной 50 км; 1 % spl – оптический сплиттер 1/99 %; OSA – анализатор оптического спектра; OADM (M/D) – мультиплексор/демультиплексор ввода/вывода; WDM – спектрально-селективный сплиттер; EDF – оптическое волокно, легированное ионами эрбия; ISO – оптический изолятор.

ваний кассета с активным волокном помещалась в промышленную климатическую камеру тепло – холод – влажность Espec SH-662.

При мощности накачки EDFA, обеспечивающей превышение порогового коэффициента усиления, запускается генерация на длине волны вне рабочего диапазона сигнальных каналов. В результате КУ EDFA на частоте генерации лазера стабилизируется на пороговом значении, определяемом потерями в резонаторе. Это позволяет управлять КУ с помощью переменного аттенюатора. Проведено комплексное исследование влияния системы оптической стабилизации на основе кольцевого резонатора на зависимость спектра коэффициента усиления F-ROPA от мощности лазера накачки, мощности входного сигнала, температуры активного волокна.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Зависимость коэффициента усиления F-ROPA от мощности лазера накачки

Коэффициенты усиления рассчитаны как разность мощности на выходе и входе ROPA в логарифмических единицах дБм и обозначены G_{21-26} для каждого канала. На рис.2 приведены зависимости коэффициентов усиления каналов от мощности лазера накачки P_{pump} при включенной (GC-on) и отключенной (GC-off) ОС.

Из рис.2 видно, что при отключенной оптической стабилизации при увеличении P_{pump} коэффициенты усиления каналов линейно возрастают, в отличие от схемы с включенной ОС, где на зависимостях наблюдается насыщение при P_{pump} > 21.5 дБм. При P_{pump} > 21.5 дБм с включенной оптической стабилизацией коэффициенты усиления каналов практически не зависят от мощности лазера накачки (стандартное отклонение от среднего составляет 1%). Зависимость коэффициентов усиления сигнальных каналов от мощности накачки выходит на плато при возникновении генерации в канале с обратной связью (канал активной стабилизации). Активная стабилизация осуществлялась на 20-м канале (1561.42 нм), расположенном на краю рабочего спектрального диапазона усилителя. Наличие плато на зависимости коэффициентов усиления

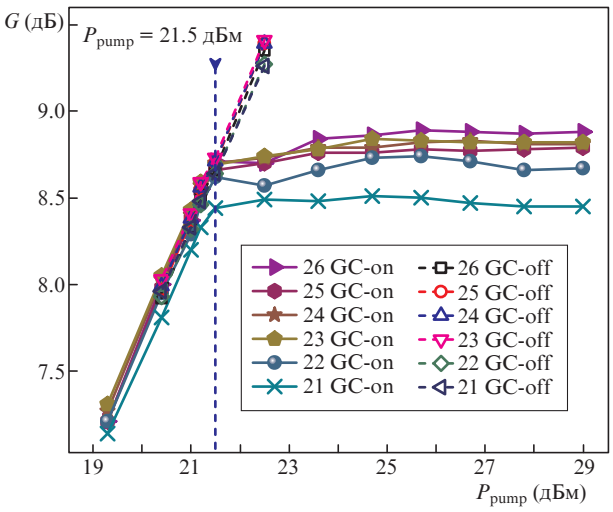

Рис.2. Зависимости коэффициентов усиления G каналов 21-26 от мощности лазера накачки P_{pump} при включенной (GC-on) и отключенной (GC-off) ОС.

каналов от мощности накачки указывает на эффективность использования оптической стабилизации в F-ROPA для реализации режима постоянного коэффициента усиления. В приведенном эксперименте порог равнялся 21.5 дБм при мощности входного сигнала 12.6 дБм и потерях в аттенюаторе 5 дБм.

3.2. Зависимость коэффициента усиления ROPA от входной мощности

Зависимость коэффициента усиления ROPA от входной мощности (P_{in}) исследовалась путем выключения нескольких каналов и контроля мощности оставшихся. Мощность входного сигнала в этом эксперименте изменялась от 1.6 до 9.9 дБм, потери в аттенюаторе устанавливались равными 4 дБ, при этом порог генерации не превышал 21.5 дБм. В табл.1 приведены КУ каналов в схеме с оптической стабилизацией, выключенные каналы отмечены символом «×». Мощность накачки установлена на уровне 24.9 дБм, варьируемые потери в аттенюаторе 4 дБ.

Табл.1. Коэффициенты усиления при отключении каналов.

	G_{26} (дБ)	G_{25} (дБ)	G_{24} (дБ)	G_{23} (дБ)	G_{22} (дБ)	G_{21} (дБ)
Вкл. 6 каналов	6.6	6.9	6.6	6.1	6.8	6.4
Вкл. 26-й канал	6.5	×	×	×	×	×
Вкл. 21-й канал	×	×	×	×	×	6.4
Вкл. 23-й канал	×	×	×	6.6	×	×

Из табл.1 видно, что при выключении 5 из 6 каналов и значительном уменьшении полной входной мощности КУ оставшегося канала практически не изменяется. Таким образом, ОС обеспечивает стабилизацию коэффициентов усиления отдельных каналов при изменении входной мощности. В табл.2 приведены мощности каналов P_{21-26} на входе в ROPA в схеме с оптической стабилизацией, выключенные каналы отмечены символом «×», мощность канала генерации обозначена P_{20}.

Табл.2. Мощности каналов.

	P_{26} (дБ)	P_{25} (дБ)	P_{24} (дБ)	P_{23} (дБ)	P_{22} (дБ)	P_{21} (дБ)	P_{20} (дБм)	$\sum P_i$ (мВт)
Вкл. 6 каналов	1.6	1.6	1.6	1.8	1.6	1.6	12.6	28.1
Вкл. 26-й канал	1.6	×	×	×	×	×	14.2	28.2
Вкл. 21-й канал	×	×	×	×	×	1.6	14.2	28.2
Вкл. 23-й канал	×	×	×	1.8	×	×	14.2	28.1

При отключении 5 из 6 каналов суммарная мощность сигнальных каналов и канала генерации сохраняется: входная мощность падает на 8.1 мВт, а мощность канала генерации увеличивается на 8.2 мВт.

3.3. Зависимость коэффициента усиления ROPA от величины потерь в резонаторе

Зависимость коэффициента усиления ROPA от величины варьируемых потерь α, вносимых переменным аттенюатором VOA, показана на рис.3. Мощность накачки

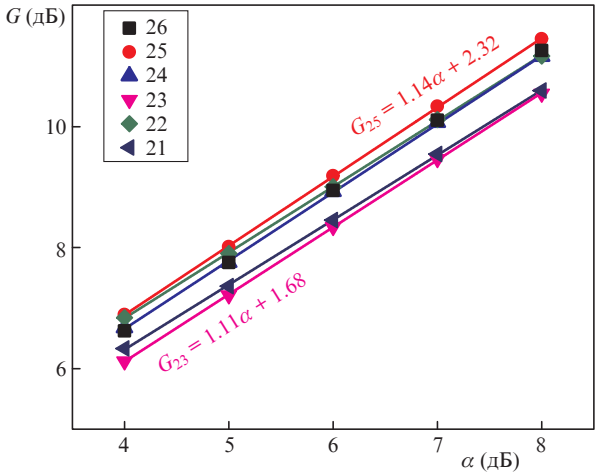

Рис.3. Зависимость коэффициента усиления G ROPA от величины варьируемых потерь в резонаторе α при генерации на 20-м канале.

установлена на уровне 24.6 дБм, входная мощность 12.6 дБм.

Зависимость коэффициента усиления ROPA от величины варьируемых потерь в резонаторе хорошо аппроксимируется линейной функцией. На рис.3 указаны параметры линейной аппроксимации для 25-го канала (G_{25}): угловой коэффициент 1.14, константа пересечения 2.32 дБ, что соответствует усилению при установленном на 0 аттенюаторе. Усиление при нулевом значении варьируемых потерь на аттенюаторе определяется уровнем собственных потерь кольцевого резонатора, который можно оценить, аппроксимировав все графики на рис.3. Проведена аппроксимация каждой зависимости линейной функцией, по которой определены собственные потери в резонаторе при аттенюаторе, установленном на 0 дБ (константа пересечения при линейной аппроксимации). Вычислены полные потери в резонаторе α_{full} путем сложения варьируемых и собственных потерь, и построена зависимость коэффициента усиления G ROPA от величины полных потерь в резонаторе α_{full} при генерации на 20-м канале (рис.4).

Зависимости на рис.4 аппроксимированы линейной функцией, угловые коэффициенты которой близки к 1, а константы пересечения зафиксированы на значение 0 дБ. Аппроксимирующие функции хорошо ложатся на экспе-

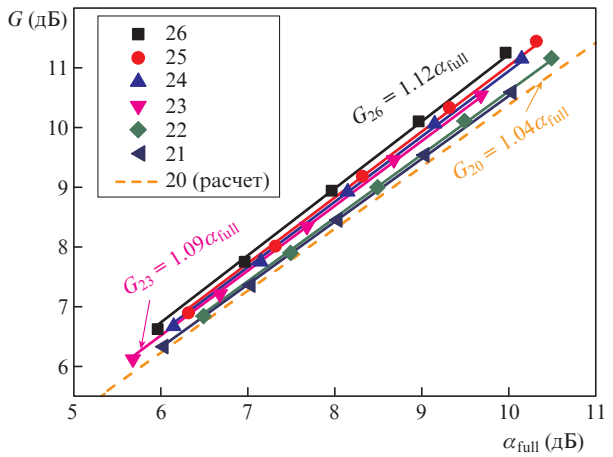

Рис.4. Зависимость коэффициента усиления G ROPA от величины полных потерь в резонаторе α_{full} при генерации на 20-м канале.

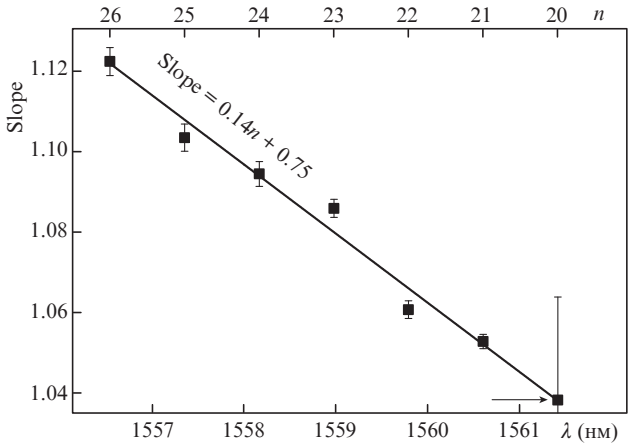

Рис.5. Зависимость углового коэффициента Slope от номера канала n. Стрелкой отмечено расчетное значение для канала генерации.

риментальные данные: для всех каналов $R^2 \geqslant 0.999$. Таким образом, зависимости на рис.4 соответствуют ожидаемым зависимостям, проходящим через начало координат, а диапазон подстройки коэффициента усиления определяется возможностью варьирования потерь в резонаторе и может составлять более 10 дБ.

Зависимость коэффициентов аппроксимации на рис.4 от номера канала хорошо описывается линейной функцией, что позволяет рассчитать такие коэффициенты для усиления в канале генерации (рис.5).

Угловой коэффициент для канала генерации составил 1.04 ± 0.03, что близко к 1 и соответствует известному соотношению для лазерного резонатора: $G = \alpha_{full}$. Из рис.5 следует, что скорость увеличения КУ ROPA линейно возрастает с номером канала (при отдалении от 20-го канала генерации). При изменении номера канала n от 20 до 60, угловой коэффициент Slope меняется на 0.56 дБ, что отражает возможность стабилизации широкого спектра КУ с высокой точностью.

3.4. Влияние оптической стабилизации на спектр усиления

При исследовании влияния оптической стабилизации на спектр усиления использовались DWDM-каналы с длинами волн 1529.55, 1534.47, 1539.77, 1546.92, 1554.13, 1560.61 нм (номера каналов 60, 54, 47, 38, 29, 21 стандартизованной международным союзом электросвязи (ITU) сетки частот [26]). Генерация происходила на канале 20. На рис.6 показаны спектры коэффициентов усиления при разных значениях потерь в резонаторе VOA и мощности накачки P_{pump}.

Форма спектров коэффициентов усиления с отключенной оптической стабилизацией имеет заметную неравномерность, нехарактерную для LocEDFA. Эта неравномерность вызвана различной интенсивностью испускания фотонов в С-диапазоне при релаксации ионов в активном волокне. В данном эксперименте не использовался выравнивающий фильтр, часто применяющийся в коммерческих LocEDFA для достижения равномерности спектра КУ. Из рис.6 видно, что возможен подбор P_{pump} таким образом, что спектры коэффициентов усиления с включенной и отключенной оптической стабилизацией практически совпадут. Следовательно, оптическая стабилизация не вносит дополнительных искажений в спектр

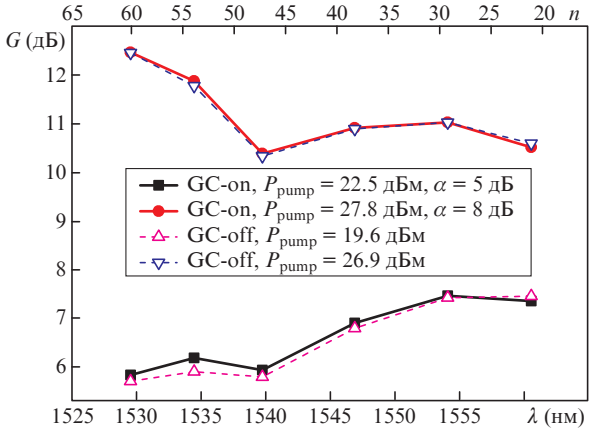

Рис.6. Спектр коэффициентов усиления при включенной (GC-on) и отключенной (GC-off) ОС.

КУ. Это объясняется тем, что спектр КУ определяется инверсией населенности уровней, а не мощностями накачки и входного сигнала.

В наших экспериментах не обнаружено влияние эффекта выжигания дыр инверсии (Hole Burning, [27–29]) что свидетельствует о его незначительном воздействии на спектры во всем исследованном диапазоне температур и мощностей накачки.

3.5. Зависимость коэффициента усиления ROPA от температуры активного волокна

При проведении температурных исследований использован набор каналов 21–26. Мощность накачки составляла 24.6 дБм, входная мощность 12.6 дБм, варьируемые потери в резонаторе 6 дБ. На рис.7 показаны зависимости коэффициентов усиления каналов от температуры активного волокна. Видно, что коэффициенты усиления каналов с учетом погрешности не зависят от температуры активного волокна: стандартное отклонение не превышает 0.24 дБ, в то время, как без оптической стабилизации КУ убывает с увеличением температуры активного волокна [14, 30]: как показано в [14], при росте температуры от –70 до 100 °C КУ падает от 20 до 11 дБ.

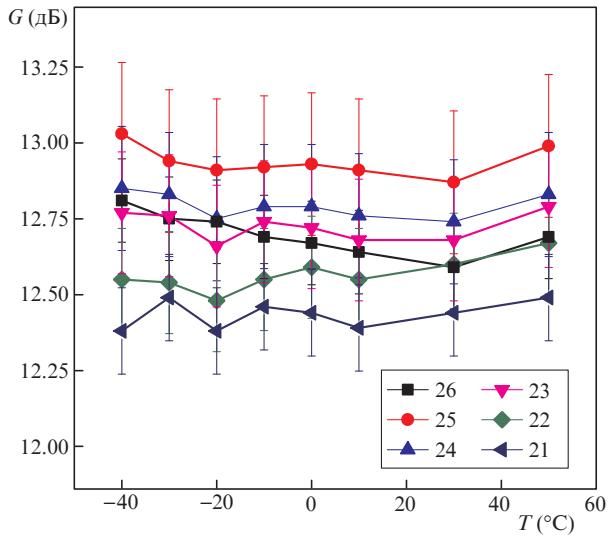

Рис.7. Зависимость коэффициентов усиления каналов от температуры активного волокна для каналов 21–26.

4. Заключение

Проведенные исследования показали, что оптическая стабилизация эффективно подавляет вариации коэффициента усиления рабочих спектральных каналов F-ROPA при изменениях мощности лазера накачки, интегральной мощности входного сигнала, температуры активного волокна. Коэффициент усиления ROPA изменяется на величину не более 0.17 дБ при изменении мощности накачки на 7.5 дБ и не более чем на 0.43 дБ при изменении мощности входного сигнала на 8 дБ. Установлено, что зависимость коэффициента усиления от потерь оптической мощности в резонаторе стабилизирующего лазера линейна. Это открывает возможности точной регулировки стабилизируемого значения коэффициента усиления ROPA путем подстройки уровня потерь внутрирезонаторного аттенюатора. Показано, что оптическая стабилизация не вносит дополнительных искажений в спектр КУ. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности использования ОС в ROPA для реализации режима постоянного коэффициента усиления.

1. Zulkipli N.F., Sadik S.A., Durak F.E., Paul M.C., Altuncu A. Harun S.W. *J. Mod. Opt.*, **68** (8), 457 (2021). DOI: 10.1080/09500340.2021.1912424.
2. Durak F.E., Altuncu A. *Opt. Commun.*, **386**, 31 (2017). DOI: 10.1016/j.optcom.2016.11.009.
3. Durak F.E., Altuncu A. *RTUWO 2017* (Riga, Latvia, 2017, p. 24). DOI: 10.1109/RTUWO.2017.8228498.
4. Ramaswami R. *IEEE Communications Magazine*, **40** (5), 138 (2002). DOI:10.1109/MCOM.2002.1006983.
5. Борисов М.А. *Lightwave Russian Edition*, **4**, 34 (2005).
6. Kitamura K., Udagawa K., Masuda H. *IEICE Communications Express*, **6** (9), 519 (2017). DOI: 10.1587/comex.2017XBL0083.
7. Chang D., Patki P., Burtsev S., Pelouch W. *OFC/NFOEC 2013, OSA Technical Digest (online)* (Optica Publ. Group, 2013, paper JTh2A.42). DOI:10.1364/NFOEC.2013.JTh2A.42.
8. Ma M.X., Kidorf H.D., Rottwitt K., Kerfoot F.W., Davidson C.R. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **10** (6), 893 (1998). DOI: 10.1109/68.681521.
9. Masuda H., Kawakami H., Kuwahara S., Hirano A., Sato K., Miyamoto Y. *Electron. Lett.*, **39** (23), 1668 (2003). DOI:10.1049/el:20031000.
10. Masuda H., Ono H., Takara H., Miyamoto Y., Ichii K., Takenaga K., Matsuo S., Kitamura K., Abe Y., Yamada M. *2013 IEEE Photonics Soc. Summer Top. Meet. Ser.* (Waikoloa, USA, 2013, p. 131). DOI:10.1109/PHOSST.2013.6614551.
11. Takara H., Mizuno T., Kawakami H., Miyamoto Y., Masuda H., Kitamura K., Ono H., Asakawa S., Amma Y., Hirakawa K., Matsuo S., Tsujikawa K., Yamada M. *J. Lightwave Technol.*, **33** (7), 1473 (2015). DOI:10.1109/JLT.2015.2397009.
12. Masuda H., Kitamura K. *2016 IEEE Photonics Soc. Summer Top. Meet. Ser.* (Newport Beach, USA, 2016, p. 76). DOI:10.1109/PHOSST.2016.7548735.
13. Takara H., Ono H., Abe Y., Masuda H., Takenaga K., Matsuo S., Kubota H., Shibahara K., Kobayashi T., Miaymoto Y. *Opt. Express*, **20** (9), 10100 (2012). DOI:10. 1364/OE.20.010100.
14. Шихалиев И.И. *Канд. дисс.* (М.: МФТИ, 2019).
15. Harun S.W., Tamchek N., Poopalan P., Ahmad H. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **16** (2), 422 (2004). DOI: 10.1109/LPT.2003.822230.
16. Harun S.W., Low S.K., Poopalan P., Ahmad H. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **14** (3), 293 (2002). DOI: 10.1109/68.986790.
17. Yang J., Meng X., Liu C. *Opt. Laser Technol.*, **78** (B), 74 (2016). DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.10.019.
18. Durak F.E., Altuncu A. *Opt. Fiber Technol.*, **45**, 217 (2018). DOI: 10.1016/j.yofte.2018.07.014.
19. Lu Y.-H., Chi S. *Opt. Commun.*, **229** (1-6), 317 (2004). DOI:10.1016/j.optcom.2003.10.028.
20. Harun S.W., Tamchek N., Teyo T.C. *Indian J. Phys.*, **76B** (2), 103 (2002).

21. Inoue K. *IEEE Photonics Technol. Lett*., **11** (9), 1108 (1999). DOI: 10.1109/68.784203.
22. Harun S.W., Samsuri N., Ahmad H. *Pramana - J. Phys*. **66**, 539 (2006). DOI: 10.1007/BF02704497.
23. Lin J.M., Ho W.J. *Laser Phys*. **22**, 765 (2012). DOI: 10.1134/S1054660X1204010X.
24. Lin Jhe-Min, Ho Wen-Jeng, Li Chih-Yung., in *PIERS Proc*. (Morocco, 2011, p.922).
25. Kitamura K., Udagawa K., Masuda H. *IEICE Commun. Express*, **6** (9), 519 (2017). DOI:10.1587/comex.2017XBL0083.
26. G.694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-202010-I/en.
27. Bergano N.S. *J. Lightwave Technol.*, **23** (12), 4125 (2005). DOI: 10.1109/JLT.2005.858255.
28. Popov D.A., Vasiliev A.B., Voronin V.G., Nanii O.E., Treshchikov V.N. *Moscow Univ. Phys. Bulletin*, **70**, 390 (2015). DOI:10.3103/S0027134915050124.
29. Кузьменков А.И., Лукиных С.Н., Наний О.Е., Одинцов А.И., Смирнов А.П., Федосеев А.И. Трещиков В.Н. *Квантовая электроника*, **46** (9), 795 (2016) [*Quantum Electron*., **46** (9), 795 (2016)]. DOI:10.1070/QEL16085.
30. Mohamed M.K., Moustafa H.A., Okaz A.M., El-Rasheedy A.M. *J. Appl. Sci. Res*., **4** (11), 1395 (2008).