

# Кольцевое зеркало с ВБР для стабилизации диапазона сканирования в волоконном лазере с самосканированием частоты

А.Ю.Ткаченко, И.А.Лобач, Е.В.Подивилов, С.И.Каблуков

*Предложена новая схема стабилизации границ сканирования в самосканирующем волоконном лазере с использованием волоконной брэгговской решетки (ВБР) и волоконного кольцевого зеркала. Механизм стабилизации конечной и/или стартовой границ сканирования основан на формировании дополнительных селективных потерь и/или отражения в зависимости от расположения ВБР относительно волоконного зеркала. Показано, что одновременное применение двух селекторов уменьшает флуктуации границ сканирования до единиц пикометров, что на один-два порядка меньше, чем в случае отсутствия ВБР. Предложенный подход позволяет повысить предсказуемость перестройки длины волны генерации волоконных самосканирующих лазеров, что очень важно для их практических применений.*

**Ключевые слова:** волоконный лазер, эффект самосканирования, волоконная брэгговская решетка.

## 1. Введение

Перестраиваемые лазеры широко применяются в различных областях науки и техники. В большинстве случаев перестройка частоты излучения осуществляется с помощью спектральных перестраиваемых элементов и драйверов, что существенно усложняет конструкцию лазера. В частности для перестройки используются интерферометры Фабри–Перо [1], дифракционные решетки [2] или призмы, перестраиваемые волоконные брэгговские решетки (ВБР) [3]. Также известны работы, в которых перестройка оптической частоты осуществляется за счет модуляции параметров лазера (например, тока накачки [4]). Кроме того, множество работ посвящено созданию волоконного лазера с перестройкой частоты на основе синхронизации мод в фурье-пространстве, например работа [5]. Ранее [6, 7] было показано, что существует класс волоконных импульсных лазеров с самоиндуцированным сканированием (для простоты – самосканированием) частоты, в которых перестройка частоты генерации происходит без использования специальных перестраиваемых элементов.

Основой работы самосканирующих лазеров является формирование динамических решеток показателя преломления и усиления в активной среде лазера [8, 9]. Динамика спектра напрямую связана с динамикой интенсивности лазера: оптическая частота генерации скачкообразно, от импульса к импульсу, меняется на величину, кратную частоте межмодовых биений резонатора. В то же время существуют схемы резонатора лазера [8], в которых реали-

зуется режим одночастотного самосканирования, когда каждый импульс состоит из одной продольной моды с шириной спектра  $\sim 1$  МГц. К настоящему времени самосканирование уже продемонстрировано в различных спектральных областях – от 1.03 [6–8] до 2.1 мкм [10]. Достаточно простая схема таких лазеров позволяет им конкурировать с другими перестраиваемыми источниками в целом ряде приложений. Подобные лазеры применяются, в частности, для опроса волоконных сенсорных линий на основе ВБР [11] и для анализа оптических спектров лазерного излучения [12].

Одной из ключевых характеристик как перестраиваемых, так и самосканирующих лазеров является диапазон сканирования, который определяется как абсолютная разность стартового и конечного значений длины волны в процессе одного цикла сканирования. Для практических применений лазеров важны и ширина диапазона перестройки, и стабильность его границ. В работе [13] на примере иттербиевого самосканирующего лазера было показано, что спектральная область сканирования смещается в область больших длин волн при увеличении длины активной среды или при уменьшении внутррезонаторных потерь в лазере. Также областью сканирования можно управлять, изменяя температуру активной среды. Эти подходы позволяют получать режим сканирования в области усиления иттербия от 1028 до 1080 нм. Однако из-за неконтролируемого характера процесса границы диапазона флуктуируют от одного сканирования к другому, что усложняет практические применения подобных лазеров. Для решения проблемы стабилизации границ сканирования в работе [14] предлагается использовать в качестве выходного зеркала лазера отражатель на основе интерферометра Майкельсона (ООИМ), образованный волоконным разветвителем, двумя ВБР и торцом волокна. В зависимости от длины волны отражения ВБР происходит стабилизация стартовой или конечной границы сканирования. Спектр отражения ООИМ промодулирован в области отражения ВБР. Стабилизация конечной границы происходит за счет того, что в процессе сканирования очередная генерируемая мода попадает в область умень-

А.Ю.Ткаченко. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 1; e-mail: alinka.tkachenko@yandex.ru

И.А.Лобач, Е.В.Подивилов, С.И.Каблуков. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 1; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Поступила в редакцию 9 октября 2018 г., после доработки – 18 октября 2018 г.

шенного отражения ООИМ, связанного с интерференцией в нем волн, отраженных от торца волокна и от ВБР. При резком перескоке в коротковолновую область генерация начинается в узкой спектральной области отражения второй ВБР, наличие которой приводит к стабилизации стартовой границы сканирования. Однако, поскольку коэффициент отражения  $R$  выходного зеркала, как правило, равен 0.1%–5% [6–14], коэффициент отражения ВБР, используемых для стабилизации границ, должен был составлять 0.01%–0.1%. При меньших коэффициентах стабилизация не наблюдалась, а при больших сканирование происходило только в спектральной области отражения ВБР. Для реализации малых коэффициентов отражения при использовании стандартных ВБР с  $R = 10\%–99\%$  в работе [14] использовался волоконный ослабитель, что существенно уменьшало выходную мощность лазера.

Для решения данной проблемы при стабилизации границ сканирования в настоящей работе предлагается располагать селективные отражатели со стороны плотного зеркала. В этом случае из-за высокого коэффициента отражения плотного зеркала (как правило, он превышает 50% для обеспечения однонаправленности лазерной генерации) жесткие требования на малые коэффициенты отражения ВБР исключаются. При этом может наблюдаться стабилизация как стартового, так и конечного значения длины волны сканирования (в зависимости от расположения селектора относительно плотного зеркала). В частности, установка ВБР непосредственно в волоконное кольцевое зеркало (ВКЗ) приводит к возникновению селективных потерь [15], что помогает стабилизировать конечную границу сканирования. Установка ВБР перед ВКЗ вызывает небольшое селективное увеличение коэффициента отражения, что способствует стабилизации стартовой длины волны. В случае применения стандартных ВБР такой подход позволяет уменьшить флуктуации границ сканирования с сотен до единиц пикометров. Это сравнимо с результатами, полученными с использованием ООИМ [14].

## 2. Эксперимент

В работе использовался такой же волоконный самосканирующий иттербиевый лазер, как и в [14], в котором слабоотражающая ВБР заменена высокоотражающей и перенесена в сторону ВКЗ (рис.1). В лазере использовались компоненты, сохраняющие поляризацию излучения. Активной средой служило иттербиевое волокно с двойной оболочкой длиной 3 м (Nufern PM-YDF-5/130), которое было намотано на термостабилизированную катушку, позволяющую управлять ее температурой. Накачка осу-

ществлялась через объединитель накачек излучением лазерного диода (ЛД) с длиной волны вблизи 970 нм и мощностью 2 Вт. Резонатор лазера был образован широкополосным высокоотражающим ВКЗ на основе поляризующего волоконного разветвителя 50/50 с одной стороны и выходным отражателем на основе сколотого под прямым углом волокна с другой. Значительная часть излучения выводилась из резонатора через волоконный разветвитель 80/20 и изолятор – волоконный выход. При использовании компонентов с сохранением поляризации и поляризующего ВКЗ лазер генерировал линейно поляризованное излучение.

Лазер работал в режиме одночастотного самосканирования частоты [8]. Кроме того, при увеличении температуры активного световода его диапазон сканирования смещался в длинноволновую область [13]. В отсутствие в резонаторе лазера каких-либо ВБР границы сканирования при нагревании активного волокна от 20 до 45°C смещались с  $\lambda = 1056$  к 1066 нм и с  $\lambda = 1077$  к 1083 нм для стартового и конечного значений соответственно. В экспериментах по стабилизации границ сканирования в ВКЗ и/или перед ним устанавливались ВБР с центральными длинами волн 1064 нм ( $R \approx 27\%, 55\%, 85\%$ ) и 1080 нм ( $R \approx 8\%, 24\%, 34\%$ ). ВБР были сформированы в волокне с сохранением поляризации. В зависимости от расположения ВБР относительно плотного зеркала происходила стабилизация стартовой и/или конечной границы сканирования. В ходе эксперимента проводились длительные (более 10 мин) измерения временной динамики длины волны излучения самосканирующего лазера с помощью быстрого спектроанализатора Laser Spectrum Analyzer (Angstrom/High-Finesse) при различных условиях.

### 2.1. Стабилизация конечной границы сканирования

Для стабилизации конечной границы сканирования в ВКЗ добавлялась ВБР с центральной длиной волны отражения, близкой к этой границе в лазере без селекторов. Как и в работе [15], в спектре отражения ВКЗ появляются дополнительные провалы, связанные с наличием ВБР. Кроме того, эти провалы дополнительно промодулированы вследствие интерференции волн в ВКЗ, а период модуляции определяется местом расположения ВБР внутри ВКЗ. Для стабилизации конечной границы была выбрана ВБР с центральной длиной волны отражения 1080.8 нм и коэффициентом отражения  $R \sim 34\%$ . При температуре активного волокна 25°C среднее значение конечной длины волны составляло  $\sim 1077$  нм и влияния ВБР на процесс сканирования не наблюдалось (рис.2,а,з). Отсутствие стабилизации в этом случае можно связать с тем, что при

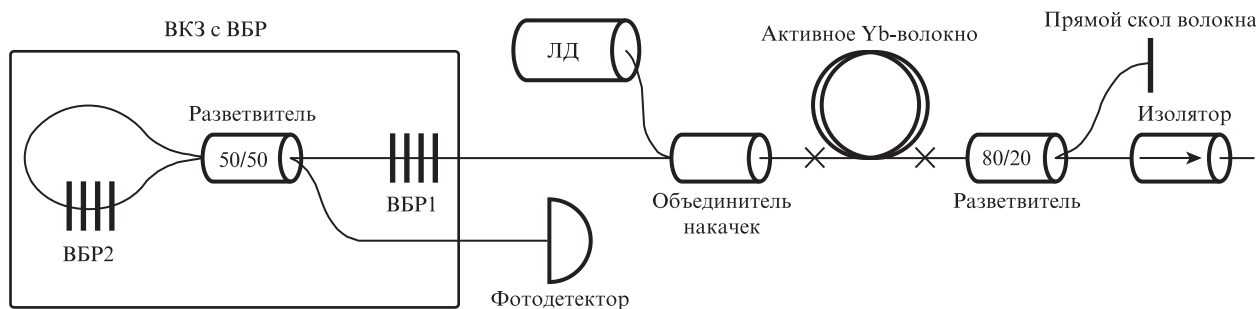


Рис.1. Схема волоконного самосканирующего лазера. ВБР1, ВБР2 – решетки, стабилизирующие стартовую и конечную границы сканирования соответственно.

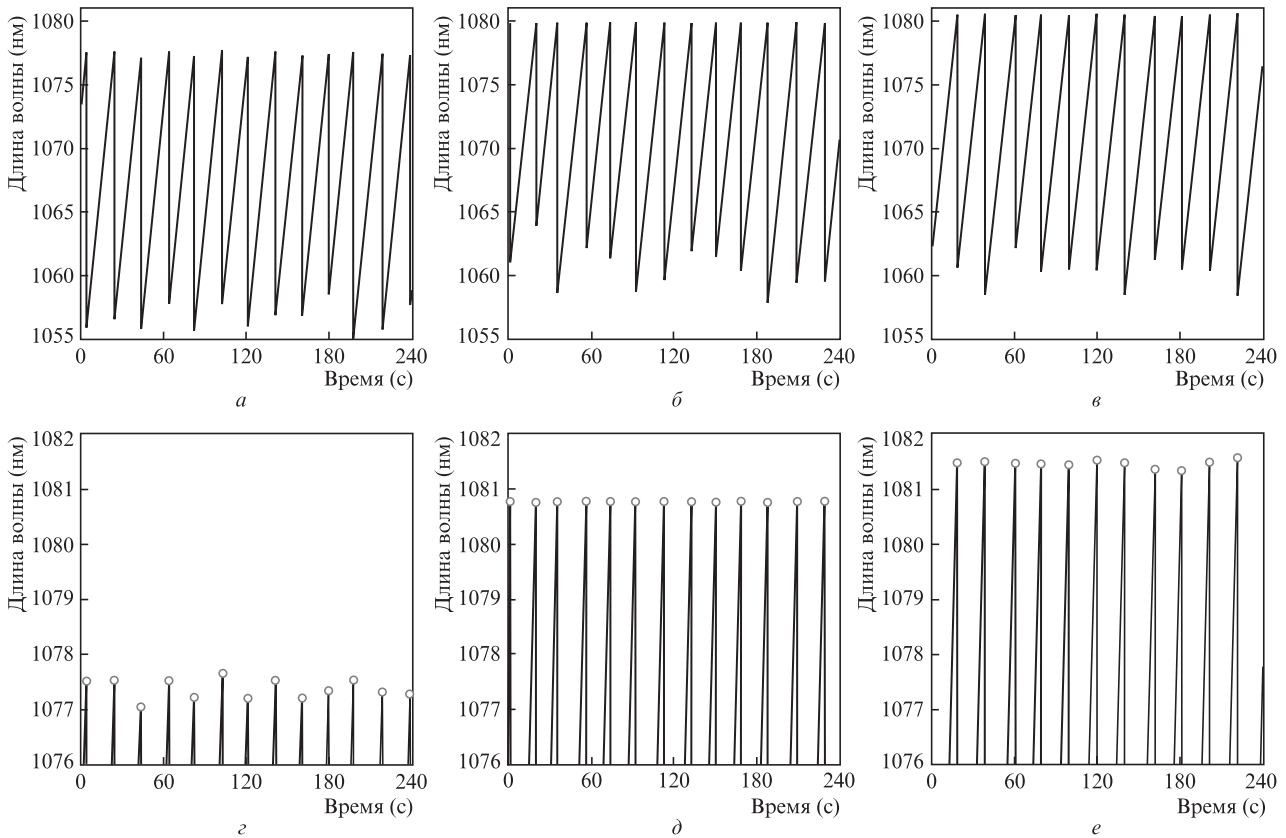


Рис.2. Временная динамика длины волны излучения лазера с ВБР ( $\lambda = 1080.8$  нм,  $R \sim 34\%$ ) при  $25^\circ\text{C}$  (а) и при  $45^\circ\text{C}$  (б), без ВБР – при  $45^\circ\text{C}$  (в). На рис. г, д, е показаны участки тех же зависимостей вблизи верхней границы сканирования.

сканировании область отражения ВБР не достигается. Действительно, временная динамика длины волны была аналогична динамике в отсутствие ВБР, и конечная граница сканирования имела достаточно большие флуктуации ( $\sim 200$  пм). На рис.3 кружками показано смещение верхней границы сканирования при нагревании активного волокна. Видно, что до температуры активного волокна на  $35^\circ\text{C}$  происходит увеличение длины волны конечной границы. При температуре свыше  $35^\circ\text{C}$  рост прекращается на значении, соответствующем длине волны отраже-

ния ВБР, что свидетельствует о стабилизации конечной границы (рис.2,б,д). При этом флуктуации длины волны конечной границы уменьшаются до  $\sim 9$  пм. Для сравнения на рис.2,в,е представлена динамика длины волны излучения лазера при температуре  $45^\circ\text{C}$  при отсутствии ВБР в резонаторе. Видно, что конечная граница также имеет большие флуктуации, достигающие  $\sim 110$  пм, и это подтверждает необходимость использования ВБР для ее стабилизации.

Было замечено, что процесс стабилизации зависит от коэффициента отражения ВБР. В частности, в отличие от ВБР с  $R \sim 24\%$  и  $34\%$ , стабилизация конечной границы для ВБР с  $R \sim 8\%$  во всем диапазоне температур активного световода ( $20\text{--}45^\circ\text{C}$ ) не наблюдалась. Для определения более точного значения коэффициента отражения ВБР, требуемого для стабилизации, регистрировалось излучение, прошедшее через ВКЗ, с помощью быстрого фотодетектора (см. рис.1). Как и в работе [15], форма огибающей спектра пропускания ВКЗ с ВБР совпадала с формой спектра отражения ВБР. Таким образом, зная временную зависимость интенсивности излучения, прошедшего через ВКЗ, и динамику длины волны лазера, можно восстановить спектр отражения используемой ВБР [11]. Такие измерения были проведены для ВБР с  $R \approx 8\%$ ,  $24\%$  и  $34\%$  (рис.4). Видно, что временные зависимости интенсивности излучения для ВБР с  $R \sim 34\%$  и  $24\%$  на рис.4,а,б соответственно имеют резкие длинноволновые границы. Это свидетельствует о том, что сканирование обрывается, не пройдя весь спектр отражения ВБР, а также о стабилизации конечной границы. В то же время отсутствие резкой границы во временной зависимости интенсивности излучения, прошедшего через ВКЗ, для ВБР с  $R \sim 8\%$  свидетель-

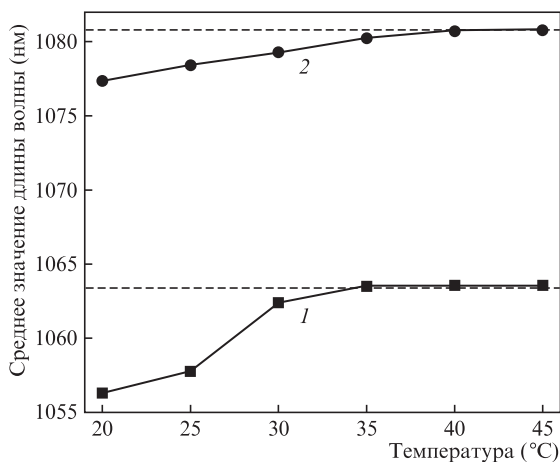


Рис.3. Температурные зависимости стартовой (1) и конечной (2) границ диапазона сканирования при использовании либо ВБР2 ( $\lambda = 1080.8$  нм,  $R \sim 34\%$ ), либо ВБР1 ( $\lambda = 1064$  нм,  $R \sim 27\%$ ) соответственно. Штриховыми линиями отмечены центральные длины волн отражения ВБР.

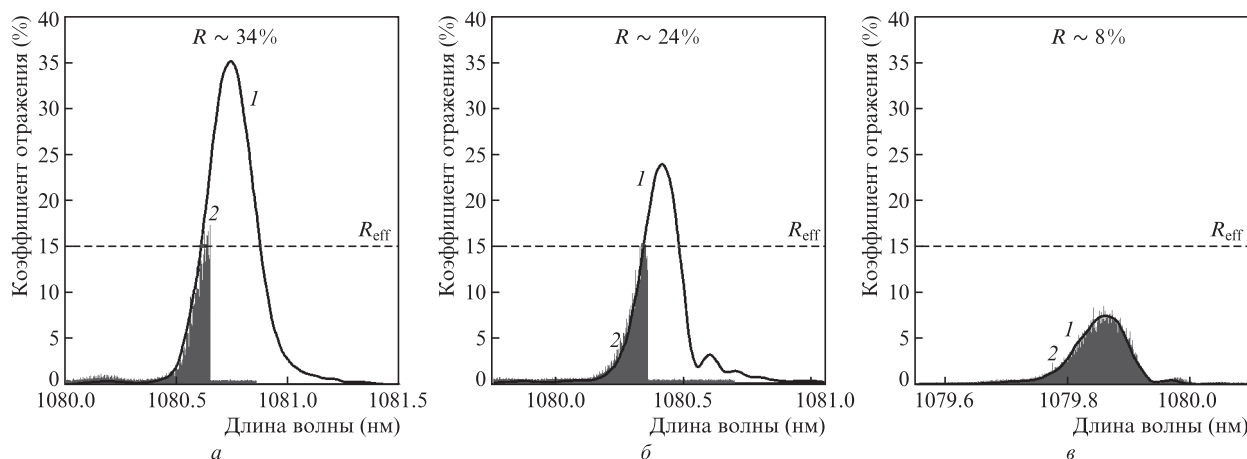


Рис.4. Спектры отражения ВБР (1) и временные зависимости интенсивности излучения, прошедшего через ВКЗ с ВБР (2), в процессе сканирования при  $R = 34\%$  (а),  $24\%$  (б),  $8\%$  (е). Температура активного волокна  $45^\circ\text{C}$ .

стует об отсутствии стабилизации. Спектры отражения ВБР были измерены с помощью анализатора оптических спектров Yokogawa AQ6370. Сопоставление спектров прошедшего через ВКЗ с ВБР излучения и спектров отражения ВБР показывает, что обрыв сканирования происходит при  $R \approx 15\%$  (рис.4). Однако стоит отметить, что это значение соответствует условиям конкретного эксперимента, в частности температуре активного волокна  $45^\circ\text{C}$ , и может меняться при ее изменении.

С использованием этой схемы проводились измерения и для ВБР с  $\lambda = 1064$  нм. При этом характер стабилизации конечной границы сканирования изменялся. Ста-

билизация происходила только при низких температурах,  $\sim 25^\circ\text{C}$  (рис.5,а). При постепенном увеличении температуры до  $45^\circ\text{C}$  наблюдался перескок длины волны излучения лазера через спектр отражения ВБР со случайным значением новой стартовой длины волны и образованием ступеньки в зависимости длины волны от времени (рис.5,б). Нужно отметить, что такое поведение кардинально отличается от случая использования схемы с ООИМ из [14], когда при уменьшении длины волны отражения ВБР стабилизация конечной границы сменяется стабилизацией стартовой границы. Однако исследование зависимости процесса стабилизации конечной границы сканирования в схеме ВКЗ с ВБР от центральной длины волны отражения ВБР выходит за рамки настоящей работы.

## 2.2. Стабилизация стартовой границы сканирования

Для стабилизации стартовой границы сканирования необходимо создать увеличенный коэффициент отражения в узкой спектральной области, поэтому было решено поместить ВБР с длиной волны, соответствующей стартовой границе сканирования, непосредственно перед ВКЗ (см. рис.1), формируя тем самым в резонаторе интерферометр Фабри–Перо. Для проведения экспериментов была выбрана ВБР с  $\lambda = 1064$  нм и  $R \sim 27\%$ . Как и в случае с конечной границей, при температуре активного волокна  $25^\circ\text{C}$  влияние ВБР на процесс сканирования не наблюдалось (рис.6,а,з). Временная динамика длины волны была аналогична динамике в отсутствие ВБР, когда стартовая граница сканирования имеет большие флуктуации ( $\sim 1.8$  нм). Для смещения области сканирования мы увеличивали температуру активного волокна. Из рис.3 видно, что до температуры активного волокна  $35^\circ\text{C}$  происходит увеличение длины волны стартовой границы. При температуре выше  $35^\circ\text{C}$ , когда стартовая граница достигает длины волны отражения ВБР, рост прекращается, что свидетельствует о привязке границы к спектру отражения ВБР (рис.6,б,д). При этом флуктуации длины волны стартовой границы уменьшаются до  $\sim 15$  пм. Для сравнения на Рис.6,в,е представлена динамика длины волны излучения лазера при температуре  $45^\circ\text{C}$  в отсутствие ВБР в резонаторе. Видно, что стартовая граница также имеет большие флуктуации, достигающие  $\sim 1.5$  нм. В заключение отметим, что, в отличие от стабилизации конечной границы,

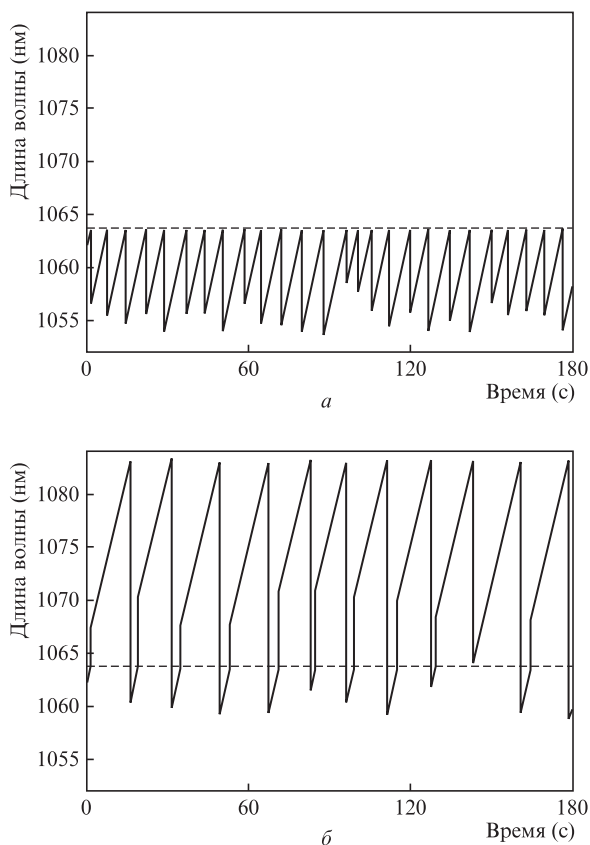


Рис.5. Временная динамика длины волны излучения лазера с ВБР ( $\lambda = 1064$  нм,  $R \sim 85\%$ ) при температурах  $25^\circ\text{C}$  (а) и  $45^\circ\text{C}$  (б).

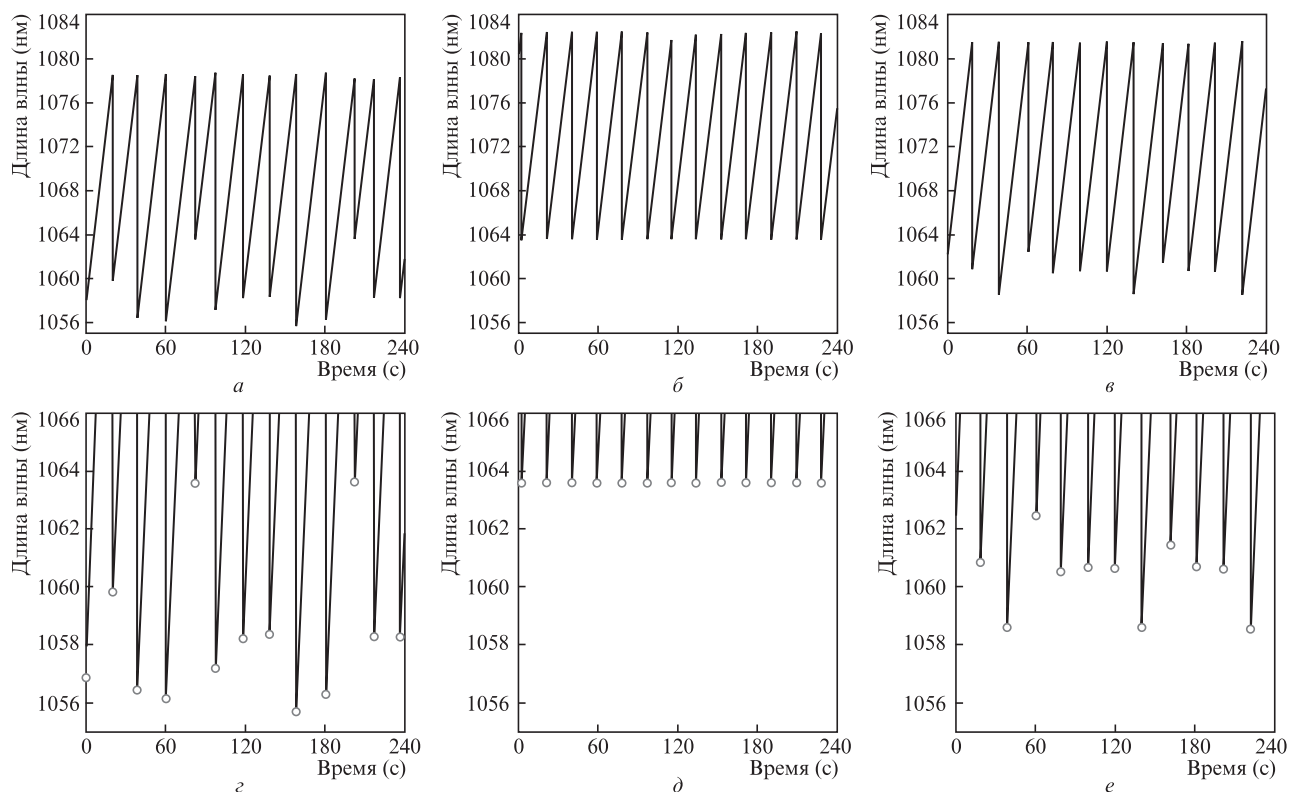


Рис.6. Временная динамика длины волны излучения лазера с ВБР ( $\lambda = 1064$  нм,  $R \sim 27\%$ ) при температурах  $25^\circ\text{C}$  (а) и  $45^\circ\text{C}$  (б), а также без ВБР при  $45^\circ\text{C}$  (в). На рис. г, д, е показаны участки тех же зависимостей вблизи нижней границы сканирования.

для стартовой границы стабилизация наблюдалась при всех использованных в экспериментах коэффициентах отражения ВБР (от 27% до 85%).

### 2.3. Стабилизация обеих границ сканирования

Как видно из рис.3, использованные ВБР позволяют стабилизировать границы сканирования в одинаковом диапазоне температур, от  $35$  до  $45^\circ\text{C}$ . Этот факт дает возможность применять две ВБР для одновременной стабилизации двух границ. Для этого в резонатор лазера были помещены одновременно ВБР с  $\lambda = 1064$  нм,  $R \sim 27\%$  и ВБР с  $\lambda = 1080.8$  нм и  $R \sim 34\%$  (см. рис.1). На рис.7 представлена временная динамика длины волны излучения лазера в отсутствие ВБР в резонаторе и лазера с двумя ВБР в резонаторе. Видно, что в отсутствие каких-либо селекторов (рис.7,а) длины волн конечной и стартовой границ сканирования имеют флуктуации  $\sim 100$  и  $1500$  пм соответственно. При установке в резонатор двух ВБР флуктуации конечной и стартовой границ уменьшаются до  $9$  и  $6$  пм соответственно (рис.7,б).

Для подтверждения механизма стабилизации границ сканирования был измерен спектр пропускания использованного отражателя, состоящего из ВКЗ и двух ВБР (рис.8). В спектре видно, что установка дополнительной ВБР перед ВКЗ приводит к уменьшению пропускания (т.е. к увеличению отражения), а установка такой ВБР внутри ВКЗ приводит к увеличению пропускания (т.е. к уменьшению отражения). Справедливости ради следует отметить, что разрешение используемого для измерений анализатора оптических спектров Yokogawa AQ6370 ( $0.02$  нм) не позволяет зарегистрировать модуляцию спектров пропускания, связанную с формированием вложенных интерферометров, а представленные спектры являются ре-

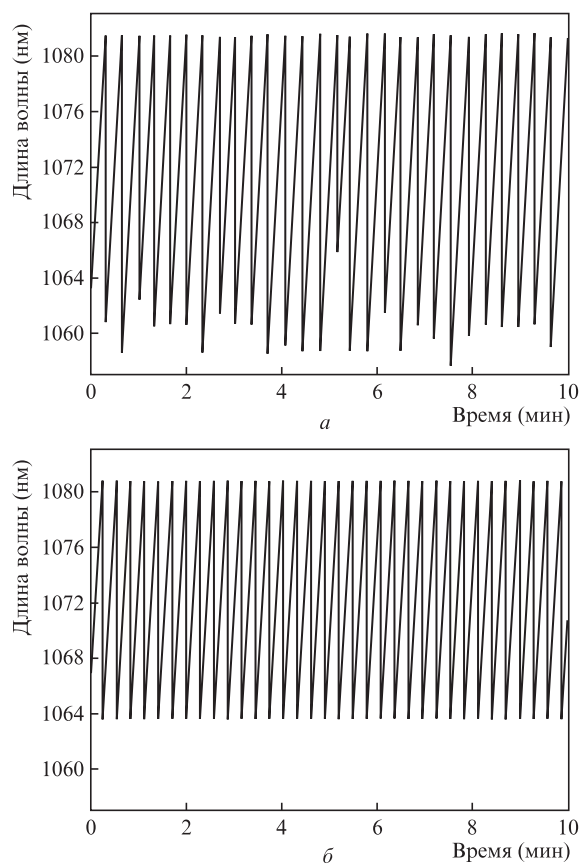


Рис.7. Временная динамика длины волны излучения самосканирующего лазера без ВБР (а) и с двумя ВБР в резонаторе (б).

зультатом усреднения. Кроме того, при измерении коэффициента пропускания составного зеркала использова-

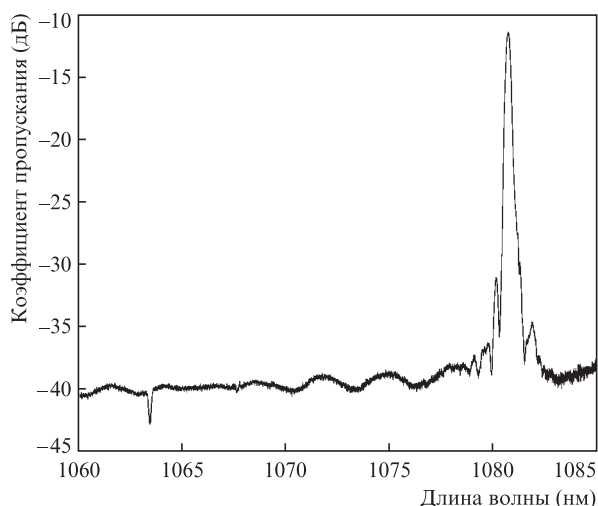


Рис.8. Спектр пропускания ВКЗ с двумя ВБР с  $\lambda = 1064$  и  $1080.8$  нм.

лась ВБР с  $\lambda = 1064$  нм и  $R \sim 85\%$ , а в эксперименте по стабилизации обеих границ сканирования – ВБР с меньшим коэффициентом отражения ( $R \sim 27\%$ ). На стабилизацию границы сканирования уменьшение коэффициента отражения не влияет, а в усредненном спектре пропускания составного зеркала провал на длине волны  $1064$  нм становится сравнимым с уровнем шумов. Наличие провала в спектре свидетельствует о том, что ВБР, установленная перед ВКЗ, приводит к дополнительному селективному отражению на фоне широкополосного отражения плотного зеркала, что и способствует формированию стартового значения длины волны диапазона сканирования. ВБР, установленная внутри ВКЗ, вызывает дополнительные селективные потери, что приводит к перескоку длины волны (завершению цикла сканирования).

### 3. Заключение

В работе предлагается новая схема стабилизации границ сканирования в самосканирующем волоконном лазере. Применение спектральных селекторов в виде ВБР со стороны плотного зеркала резонатора лазера позволяет стабилизировать как стартовую, так и конечную границу сканирования. Селектор, установленный внутри высокоотражающего волоконного кольцевого зеркала, приводит к дополнительным селективным потерям, что способствует стабилизации конечной границы сканирования. Селектор, расположенный непосредственно перед плотным зеркалом, способствует стабилизации стартовой гра-

ницы сканирования. Показано, что одновременное применение двух селекторов позволяет уменьшить флуктуации обеих границ сканирования до единиц пикометров, что на один-два порядка меньше, чем при отсутствии селекторов. Предложенный подход имеет неоспоримое преимущество по сравнению со схемой стабилизации, в которой селективное выходное зеркало реализовано на основе интерферометра Майкельсона и где имеются жесткие требования на крайне малый коэффициент отражения используемых ВБР.

Предложенный подход позволяет повысить предсказуемость перестройки длины волны генерации (т. е. определение длины волны по измерению времени с начала нового сканирования) волоконных самосканирующих лазеров, что очень важно для их практических применений.

Авторы выражают благодарность И.Н.Немову за изготовление использованных в работе ВБР. Экспериментальные исследования А.Ю.Ткаченко поддержаны РФФИ (грант №18-32-00563). Работа выполнена в рамках государственного задания ИАиЭ СО РАН (№0319-2018-0004) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Высокоразрешающая спектроскопия газов и конденсированных сред» ИАиЭ СО РАН, Новосибирск.

1. Dawson J.W., Park N., Vahala K.J. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 3090 (1992).
2. Kwon Y.S., Ko M.O., Jung M.S., Park I.G., Kim N., Han S.-P., Ryu H.-C., Park K.H., Jeon M.Y. *Sensors*, **13**, 9669 (2013).
3. Babin S.A., Kablukov S.I., Vlasov A.A. *Laser Phys.*, **17**, 1323 (2007).
4. Yamashita S., Takubo Y. *Photon. Sensors*, **3**, 320 (2013).
5. Jung E.J., Kim C.-S., Jeong M.Y., Kim M.K., Jeon M.Y., Jung W., Chen Z. *Opt. Express*, **16**, 16552 (2008).
6. Kir'yanov A.V., Il'ichev N.N. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 305 (2011).
7. Lobach I.A., Kablukov S.I., Podivilov E.V., Babin S.A. *Opt. Express*, **19**, 17632 (2011).
8. Lobach I.A., Kablukov S.I., Podivilov E.V., Babin S.A. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 045103 (2014).
9. Peterka P., Honzátko P., Koška P., Todorov F., Aubrecht J., Podrazký O., Kašík I. *Opt. Express*, **24**, 16222 (2016).
10. Navratil P., Peterka P., Vojtisek P., Kasik I., Aubrecht J., Honzátko P., Kubecek V. *Opto-Electron. Review*, **26**, 29 (2018).
11. Ткаченко А.Ю., Лобач И.А. *Прикладная фотоника*, **3**, 37 (2016).
12. Tkachenko A.Yu., Lobach I.A., Kablukov S.I. *Opt. Express*, **25**, 17600 (2017).
13. Lobach I.A., Tkachenko A.Yu., Kablukov S.I. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 045104 (2016).
14. Tkachenko A.Yu., Vladimirskaia A.D., Lobach I.A., Kablukov S.I. *Opt. Lett.*, **43**, 1558 (2018).
15. Shu X., Yu L., Zhao D., Zhang L., Sugden K., Bennion I. *J. Opt. Soc. Am. B*, **19**, 2770 (2002).