

# Перестраиваемый полупроводниковый лазер с двумя управляемыми акустооптическими фильтрами во внешнем резонаторе

Л.Н.Магдич, А.Ю.Чаморовский, В.Р.Шидловский, М.В.Шраменко, С.Д.Якубович

*Исследован лазер с линейным внешним резонатором, содержащим в качестве активного элемента инжекционный полупроводниковый оптический усилитель ближнего ИК диапазона и два акустооптических перестраиваемых фильтра (АОПФ) с квазиколлинеарным взаимодействием световой и акустической волн. При равных частотах управляющих фильтрами ВЧ сигналов, которые обеспечивают компенсацию доплеровского сдвига оптической частоты, возникающего при прохождении света через АОПФ, удалось сузить спектр стационарной генерации лазера до примерно 25 МГц, что почти на три порядка меньше ширины спектра ( $\sim 20$  ГГц), наблюдаемой при использовании одного фильтра. Положение линии генерации, которая остается узкой, медленно флуктуирует в пределах спектральной полосы шириной около 3 ГГц, что, по-видимому, связано с большой длиной внешнего резонатора и недостаточной термостабилизацией его составляющих. Это не препятствует получению излучения с большой длиной когерентности. В режиме свитчирования длины волны генерации мгновенная ширина спектра растет с увеличением скорости перестройки, достигая 0.022 нм (8.8 ГГц) при максимальной скорости перестройки  $10^4$  нм/с. В режиме автоматического контроля выходной оптической мощности на уровне 3 мВт диапазон перестройки составил 815–875 нм. Подобные приборы представляют практический интерес для оптической когерентной томографии, спектроскопии, оптической метрологии и других прикладных областей.*

**Ключевые слова:** перестраиваемый лазер, полупроводниковый оптический усилитель, акустооптический фильтр, оптическая когерентная томография.

## 1. Введение

Полупроводниковые инжекционные лазеры, способные быстро и с высокой точностью перестраивать длину волны излучения, являются наиболее востребованными на современном рынке подобного рода приборов. Небольшие размеры компонентов современной оптоэлектроники позволили создать компактные схемы внешнего резонатора лазера. Выполненные с применением различных оптоэлектронных элементов (объемных дифракционных решеток, акустооптических элементов, электрооптических устройств), такие схемы позволяют достичь высокой скорости перестройки длины волны при высокой точности ее воспроизведения. Благодаря этим достоинствам приборы данного типа находят все более широкое применение в различных областях науки и техники, и в первую очередь – в оптической когерентной томографии (ОКТ), включая Swept Source (SS) и Full Field (FF) ОКТ-системы, в спектроскопии, оптических датчиках и др.

Л.Н.Магдич. АО «НИИ «Полус» им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1  
А.Ю.Чаморовский. Superlum Diodes Ltd, B3, Fota Point Enterprise Park, T45FC93 Carrigtwohill, Co Cork, Ireland  
В.Р.Шидловский, М.В.Шраменко. ООО «Оптон», Россия, 119330 Москва, ул. Мосфильмовская, 17Б  
С.Д.Якубович. Московский технологический университет (МИРЭА), Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78;  
e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

Поступила в редакцию 5 ноября 2019 г., после доработки – 20 декабря 2019 г.

В качестве спектрально-селективных элементов, способных быстро перестраивать длину волны генерации в резонаторе лазера, большой интерес представляют акустооптические перестраиваемые фильтры (АОПФ), что объясняется их компактностью, высокой надежностью и простотой управления с помощью ВЧ сигнала. Последнее является ключевым преимуществом подобных приборов, т. к. обеспечивает высокую точность задания и воспроизведения длины волны излучения как в стационарном режиме, так и в режиме свитчирования. Это выгодно отличает их от спектрально-селективных элементов с механически подвижными частями, которым свойственны невысокая надежность, люфты и гистерезисы при перемещении.

Наряду с очевидными преимуществами, акустооптические приборы обладают и недостатками. Основным недостатком их применения во внешнем резонаторе лазера является появление доплеровского частотного сдвига в оптической частоте света, прошедшего через АОПФ [1], что приводит к ухудшению характеристик лазера и, прежде всего, к увеличению ширины его спектра излучения. Применение оптических схем резонатора с компенсацией этого частотного сдвига является эффективным методом сужения линии генерации лазера.

В настоящей работе рассматривается одна из возможных схем внешнего резонатора лазера с двумя акустооптическими фильтрами, компенсирующими сдвиг оптической частоты в АОПФ, подобная описанной в [2–4]. Целью работы, являющейся развитием исследований, представленных в [5], была разработка оптической схемы быстроперестраиваемого в широкой спектральной полосе лазера, пригодной для практической реализации в виде компактного прибора.

## 2. Оптическая схема лазера

На рис.1 представлена схема лазера с внешним резонатором линейной конфигурации, использованная в настоящем исследовании. В качестве активного элемента использован двухпроходный полупроводниковый оптический усилитель (ПОУ) с изогнутым активным каналом [6] на основе наногетероструктуры, обеспечивающей оптическое усиление в спектральном диапазоне 810–880 нм [7]. ПОУ-модуль с вводом и выводом излучения через одномодовые волоконные световоды (ОВС) с сохранением поляризации типа PANDA PM 850 был собран в корпусе Butterfly, содержащем микроохладитель Пельтье и термистор, которые обеспечивали термостабилизацию активного элемента. Выходная грань ПОУ с коэффициентом отражения 20% служила зеркалом внешнего резонатора. Вторая грань, обращенная во внешний резонатор, имела антиотражающее покрытие. В качестве спектрально-селективного элемента была применена пара квазиколлинеарных АОПФ с полосой пропускания около 0.2 нм в указанном спектральном диапазоне. Фильтры были включены таким образом, чтобы создаваемые ими доплеровские сдвиги в оптической частоте взаимно компенсировались. В качестве второго зеркала внешнего резонатора на выходе АОПФ2 использовалось диэлектрическое широкополосное зеркало с коэффициентом отражения, близким к 100%. Длина резонатора составляла около 2 м. Ввод излучения в АОПФ1 осуществлялся с помощью волоконно-оптического коллиматора (на рис.1 не показан), который обеспечивал пучок диаметром 1.2 мм с расходимостью не более 0.8 мрад.

Оба АОПФ имели встроенные микроохладители Пельтье для стабилизации рабочей температуры акустооптических ячеек. Управление фильтрами осуществлялось от платы двухканального цифрового синтезатора частоты AD 9958 (Analog Device). Тактирование каналов осуществлялось от одного кварцевого генератора на плате ВЧ синтезатора, что обеспечивало идентичность фазовых характеристик ВЧ сигналов обоих каналов. Для получения требуемой электрической мощности сигналы с выходов платы синтезатора дополнительно усиливались с помощью двухканального усилителя мощности. Управление синтезатором осуществлялось персональным компьютером (ПК).

Использованная пара АОПФ обладала оптимальными для взаимной работы характеристиками. АОПФ1 мог работать как с горизонтальной, так и с вертикальной поляризацией света на входе, тогда как АОПФ2 требовал вертикальной ориентации вектора поляризации. Для удовлетворения этого требования вектор поляризации на входе АОПФ1 ориентировался горизонтально, поскольку на его выходе поляризация преобразовывалась в вертикальную. Мощности ВЧ сигналов управления обоими фильтрами были одинаковы и составляли 0.1 Вт.

После каждого этапа установки и юстировки фильтров в схеме внешнего резонатора тщательно измерялись

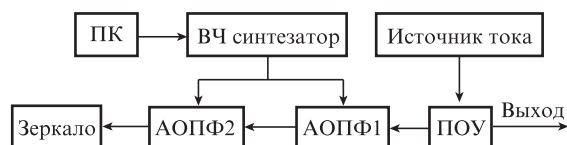


Рис.1. Упрощенная схема перестраиваемого лазера.

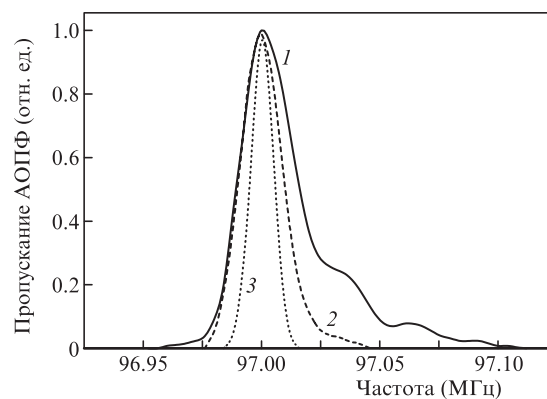


Рис.2. Нормированные зависимости пропускания АОПФ от частоты управляющего ВЧ сигнала:

1 — на выходе АОПФ1; 2 — на выходе АОПФ2; 3 — после отражения от зеркала и повторного прохождения через оба АОПФ.

их аппаратные функции и эффективности дифракции. Результаты измерений представлены на рис.2, из которого видно, что аппаратная функция АОПФ сужается в 2.4 раза за счет двукратного прохождения света через фильтры, что согласуется с результатами, приведенными в [8]. Значительное сужение аппаратной функции является очевидным преимуществом линейной схемы внешнего резонатора над кольцевой, в которой в случае двух АОПФ она может сужаться только в 1.41 раза. Акустооптические фильтры имели высокую эффективность дифракции, составлявшую 92%.

## 3. Мощностные и спектральные характеристики лазера в стационарном режиме работы

Ватт-амперная характеристика исследуемого лазера приведена на рис.3. Она была измерена на частоте сигнала управления обоих АОПФ 97 МГц, соответствующей длине волны генерации 860 нм. Пороговое значение тока инжекции составило 28 мА при дифференциальной квантовой эффективности 0.16 мВт/мА.

Зависимость длины волны генерации лазера от частоты управляющих ВЧ сигналов АОПФ, изображенная на рис.4, была измерена в режиме поддержания оптической мощности на уровне 1 мВт с тем, чтобы обеспечить максимальный диапазон спектральной перестройки.

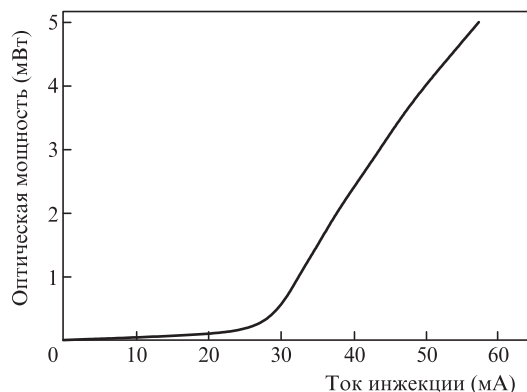


Рис.3. Стационарная ватт-амперная характеристика лазера при настройке на длину волны 860 нм.

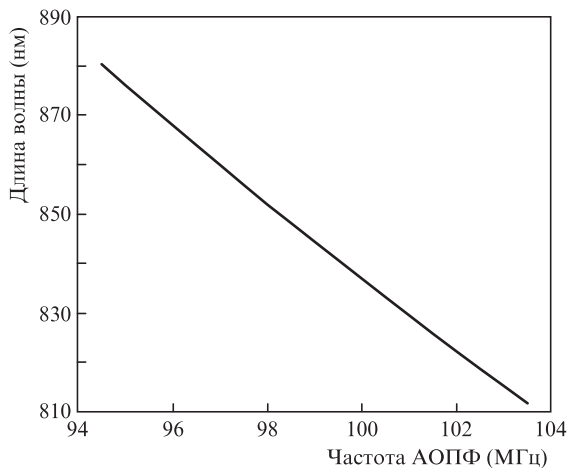


Рис.4. Зависимость длины волны генерации от частоты управляющих сигналов АОПФ.

Зависимости тока инжекции ПОУ от длины волны генерации лазера для двух уровней выходной оптической мощности показана на рис.5. Диапазон перестройки длины волны генерации при выходной мощности 1 мВт составил 68.7 нм, а при мощности 3 мВт – 64.4 нм. Максимальный ток инжекции на краях диапазона перестройки не превышал 120 мА. Выходное излучение было сильно поляризовано, коэффициент экстинкции составлял около 20 дБ.

Спектр излучения лазера, записанный с помощью оптического анализатора спектра Advantest Q8347, представлен на рис.6. Предельного спектрального разрешения данного прибора, которое составляет 0.003 нм (1.2 ГГц), оказалось недостаточно для точного определения ширины линии.

В использованной оптической схеме вывод излучения осуществлялся непосредственно из активного канала ПОУ. Как следствие этого в спектрах выходного излучения наблюдается «суперлюминесцентный пьедестал», в связи с чем важным параметром такого лазера является величина превышения спектрального максимума над уровнем суперлюминесцентного фона. Соответствующие спектры, записанные в диапазоне 800–885 нм при выходной мощности 3 мВт (рис.7) демонстрируют превышение максимума спектральной линии над пьедесталом, составляющее ~45 дБ (более 30000) во всем диапазоне перестройки.

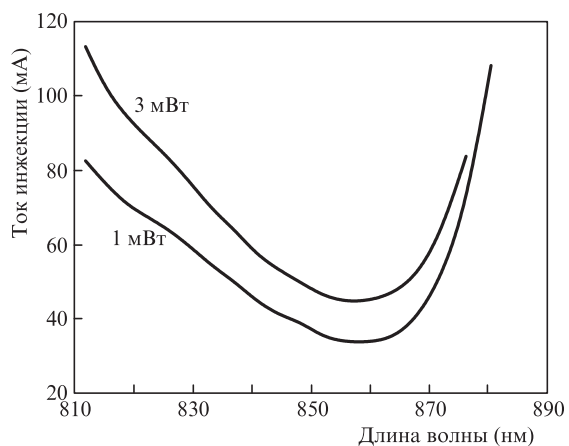


Рис.5. Зависимости тока инжекции ПОУ от длины волны генерации при спектральной перестройке в режиме автоматического контроля выходной оптической мощности.

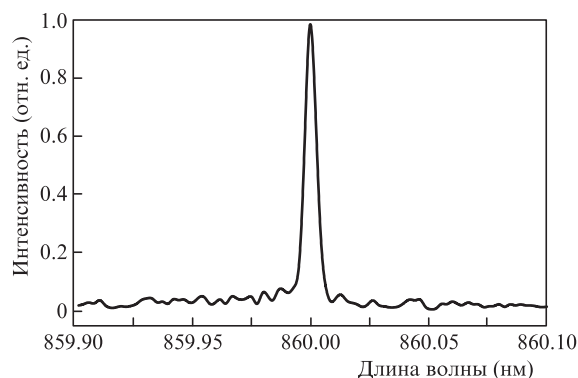


Рис.6. Спектр генерации лазера в стационарном режиме при частоте управляющих сигналов АОПФ 97 МГц. Полуширина линии генерации составляет 0.0056 нм при выходной оптической мощности 3 мВт.

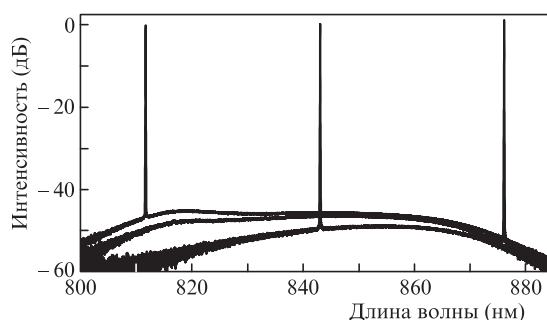


Рис.7. Спектры выходного излучения лазера при выходной мощности 3 мВт и различных положениях линии генерации.

Для получения точных данных о спектральной ширине линии генерации был использован конфокальный сканирующий интерферометр Фабри – Перо ближайшего ИК диапазона спектра с областью свободной дисперсии 1.5 ГГц и оптическим разрешением 7.5 МГц. Схема измерительной установки показана на рис.8. Для исключения влияния обратных отражений на работоспособность лазера на входе измерительной системы был установлен оптический изолятор с коэффициентом изоляции более 30 дБ. Фокусировка излучения в интерферометр осуществлялась с помощью плосковыпуклой линзы, которая обеспечивала нужный диаметр перетяжки светового пучка в резонаторе интерферометра. Электронный блок управления осуществлял сканирование зеркала интерферометра, выдавал сигналы для синхронизации спектра на экране осциллографа и имел встроенный трансимпедансный усилитель для усиления сигнала выходного фотодиода интерферометра. Примеры спектров, записанных с помощью сканирующего интерферометра Фабри – Перо, представлены на рис.9.

На рис.10 показана зависимость полуширины линии генерации от выходной оптической мощности, измеренная сканирующим интерферометром. Лазер работал в стационарном режиме, частота управляющего сигнала



Рис.8. Схема установки для измерения ширины линии генерации.

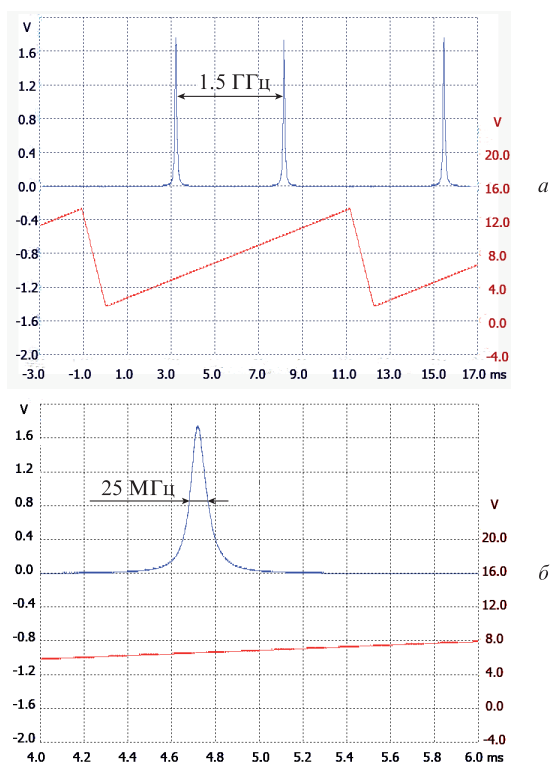


Рис.9. Оптические спектры, записанные с помощью сканирующего интерферометра Фабри–Перо: панорамный вид (а) и линия генерации (б).

обоих АОФ составляла 97 МГц. Из приведенных данных видно, что ширина линии слабо зависит от выходной мощности.

Следует отметить, что при работе лазера в стационарном режиме наблюдалось нестабильное поведение спектральной линии, проявляющееся в ее перескоках на разные длины волн в диапазоне шириной 3–4 ГГц. Часто наблюдалось расщепление линии на две, три, а иногда и более линий разной интенсивности. Характерное время перескоков в спектре составляло единицы секунд. Можно предположить, что указанные нестабильности связаны с неидеальной термостабилизацией ПОУ и АОФ, а также с отсутствием термостабилизации оптоволоконного участка внешнего резонатора. Следует указать, что при длине внешнего резонатора около 2 м межмодовый интервал для продольных мод составляет около 50 МГц. Можно

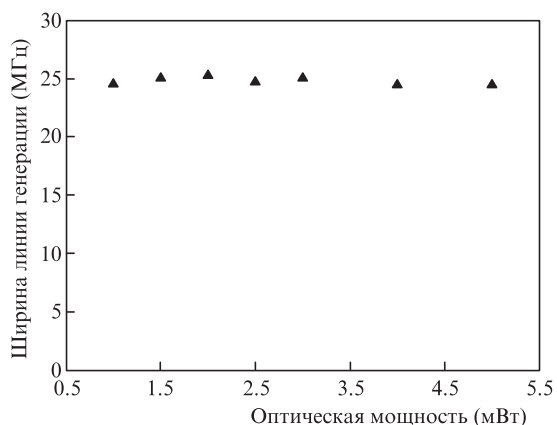


Рис.10. Зависимость измеренной полуширины линии генерации от выходной оптической мощности лазера.

ожидать существенного повышения стабильности одночастотного режима генерации при значительном уменьшении длины внешнего резонатора, что, однако, связано с серьезными технологическими трудностями.

#### 4. Спектральные характеристики перестраиваемого лазера в режиме свипирования

Важным режимом работы перестраиваемого лазера является режим непрерывного свипирования длины волны излучения с заданной скоростью. В этом режиме ширина спектральной линии может значительно уширяться с ростом скорости свипирования. Для измерения ширины линии генерации был использован монолитный эталон Фабри–Перо соответствующего спектрального диапазона с областью свободной дисперсии 0.12 нм (48 ГГц) и оптическим разрешением 0.01 нм (4 ГГц). Ввод лазерного излучения в эталон Фабри–Перо осуществлялся с помощью волоконно-оптического коллиматора, который обеспечивал диаметр светового пучка 3 мм. Регистрация излучения на выходе эталона осуществлялась с помощью кремниевого фотодиода с временем нарастания 1 нс. Отклик с фотодиода отображался на экране осциллографа. Пример спектра на выходе эталона, записанного при скорости перестройки 460 нм/с, представлен на рис.11,а. На рис.11,б приведен сигнал с выхода конфокального интерферометра Фабри–Перо с областью свободной дисперсии 10 ГГц и разрешением 68 МГц, записанный при нулевой скорости развертки в отсутствие напряжения на интерферометре. Из сравнения этих осциллограмм видно,

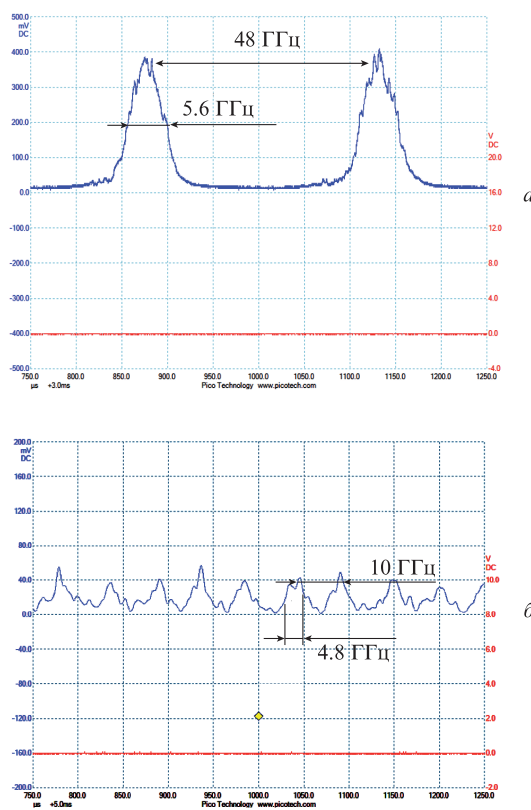


Рис.11. Спектры на выходе монолитного эталона Фабри–Перо (а) и сканирующего интерферометра Фабри–Перо с выключенной разверткой (б).

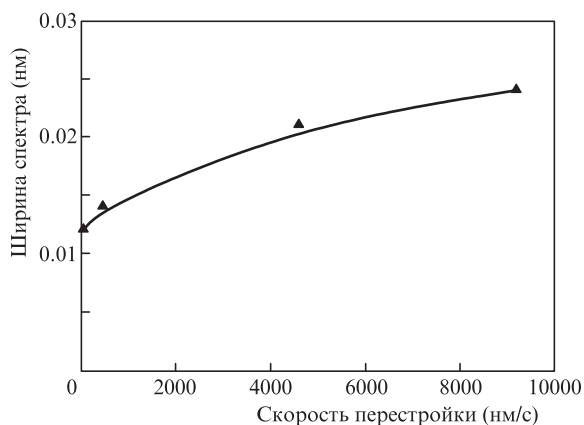


Рис. 12. Зависимость полуширины оптического спектра от скорости перестройки длины волны.

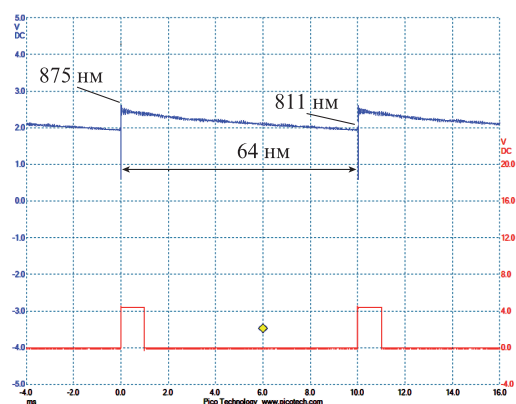


Рис. 13. Хронограмма выходной оптической мощности лазера при периодическом свипировании длины волны в диапазоне 875–811 нм со скоростью около  $10^4$  нм/с.

что полученные значения ширины спектра практически совпадают.

На рис. 12 представлена зависимость ширины оптического спектра лазера от скорости перестройки длины волны, измеренная с помощью монолитного эталона Фабри–Перо. Видно, что измеренная мгновенная ширина спектральной линии увеличивается с ростом скорости перестройки, изменяясь от 0.012 до 0.024 нм. С учетом спектрального разрешения интерферометра истинный диапазон изменения ширины линии составляет 0.007–0.022 нм. Типичные значения данного параметра для схемы внешнего резонатора с одним акустооптическим фильтром лежат в диапазоне 0.05–0.06 нм. Очевиден существенный выигрыш, получаемый за счет компенсации доплеровского сдвига частоты в АОПФ.

На рис. 13 представлена хронограмма выходной мощности в режиме периодического свипирования длины волны излучения лазера при ее поддержании на уровне 3 мВт системой АКМ. Ее кажущееся изменение связано с различием спектральных характеристик чувствительности фотодиода в системе АКМ и регистрирующего фотоприемника.

## 5. Заключение

Проведенные исследования показали, что использование оптической схемы полупроводникового лазера с внешним линейным резонатором, содержащим два АОПФ, которые обеспечивают компенсацию доплеровского сдвига оптической частоты, позволяет значительно сузить спектр генерации как в стационарном режиме работы, так и в режиме свипирования длины волны по сравнению с лазером без компенсации доплеровского сдвига с одним АОПФ [9].

В стационарном режиме работы при нулевом рассогласовании частот управляющих сигналов АОПФ полуширина линии генерации достигает 25 МГц, что почти на три порядка меньше, чем при использовании одного фильтра. При этом положение линии нестабильно и медленно флуктуирует в полосе 3–4 ГГц, что не препятствует получению излучения с большой длиной когерентности.

В режиме свипирования линия генерации лазера заметно уширяется, но не превышает 0.022 нм (8.8 ГГц) при максимальной скорости перестройки длины волны для АОПФ данного типа  $10^4$  нм/с.

Проведенное экспериментальное исследование показывает возможность создания коммерческого прибора на базе перестраиваемого полупроводникового инжекционного лазера со следующими техническими параметрами: оптическая мощность на выходе ОВС 3 мВт, диапазон перестройки длины волны 815–875 нм, максимальная скорость перестройки  $10^4$  нм/с, мгновенная ширина спектра при перестройке не более 0.025 нм, превышение максимума спектральной линии над суперлюминесцентным фоном не менее 40 дБ, длина когерентности излучения в стационарном режиме работы не менее 10 м, коэффициент экстинкции излучения на выходе ОВС не менее 17 дБ.

Длину внешнего резонатора лазера можно сократить до 200–250 мм, что должно привести к дальнейшему сужению спектра выходного излучения и к повышению его стабильности в стационарном режиме генерации. Выходная оптическая мощность может быть значительно увеличена при использовании на выходе лазера спектрально-согласованного ПОУ бегущей волны.

1. Duarte F.J. *Tunable Lasers Handbook* (New-York: Academic Press, 1995).
2. Coquin G.A., Cheung K.W. *Electron. Lett.*, **24** (10), 599 (1988).
3. Coquin G.A., Cheung K.W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **25** (6), 1576 (1989).
4. Ward J.D., Pannell C.N. *Phys. Procedia*, **70**, 914 (2015).
5. Chamorovsky A.Yu., Lobintsov A.A., Shramenko M.V., Yakubovich S.D. *Proc. SPIE*, **9697**, 96972T-1 (2016).
6. Мамедов Д.С., Мармалюк А.А., Прохоров В.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **34** (3), 206 (2004) [*Quantum Electron.*, **34** (3), 206 (2004)].
7. Андреева Е.В., Ильченко С.Н., Ладугин М.А., Лобинцов А.А., Мармалюк А.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **43** (11), 994 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (11), 994 (2013)].
8. Волошинов В.Б., Магдич Л.Н., Князев Г.А. *Квантовая электроника*, **35** (11), 1057 (2005) [*Quantum Electron.*, **35** (11), 1057 (2005)].
9. Андреева Е.В., Магдич Л.Н., Мамедов Д.С., Руенков А.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **36** (4), 324 (2006) [*Quantum Electron.*, **36** (4), 324 (2006)].