

09

## Акустооптический автогенератор сдвига частоты

© А.В. Варламов, П.М. Агрузов, И.В. Ильичев, М.В. Парфенов, А.В. Тронеv, А.В. Шамрай

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: wwa@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 16 октября 2025 г.

В окончательной редакции 23 марта 2026 г.

Принято к публикации 23 марта 2026 г.

Впервые продемонстрирована работа оптоэлектронного осциллятора с акустооптическим модулятором в интегральном исполнении. Включение модулятора в петлю обратной связи позволяет генерировать частотный сдвиг в автоколебательном режиме без использования высокочастотного генератора. Исследована зависимость режимов генерации от мощности лазерного излучения и температуры модулятора. Продемонстрирована генерация сдвига оптической частоты на 171.5–174.5 МГц с возможностью подстройки путем изменения температуры модулятора. Определены условия возникновения многочастотного режима генерации и перехода в режим генерации хаотических колебаний.

**Ключевые слова:** акустооптический модулятор, сдвиг оптической частоты, оптоэлектронный осциллятор.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.12.62982.20530

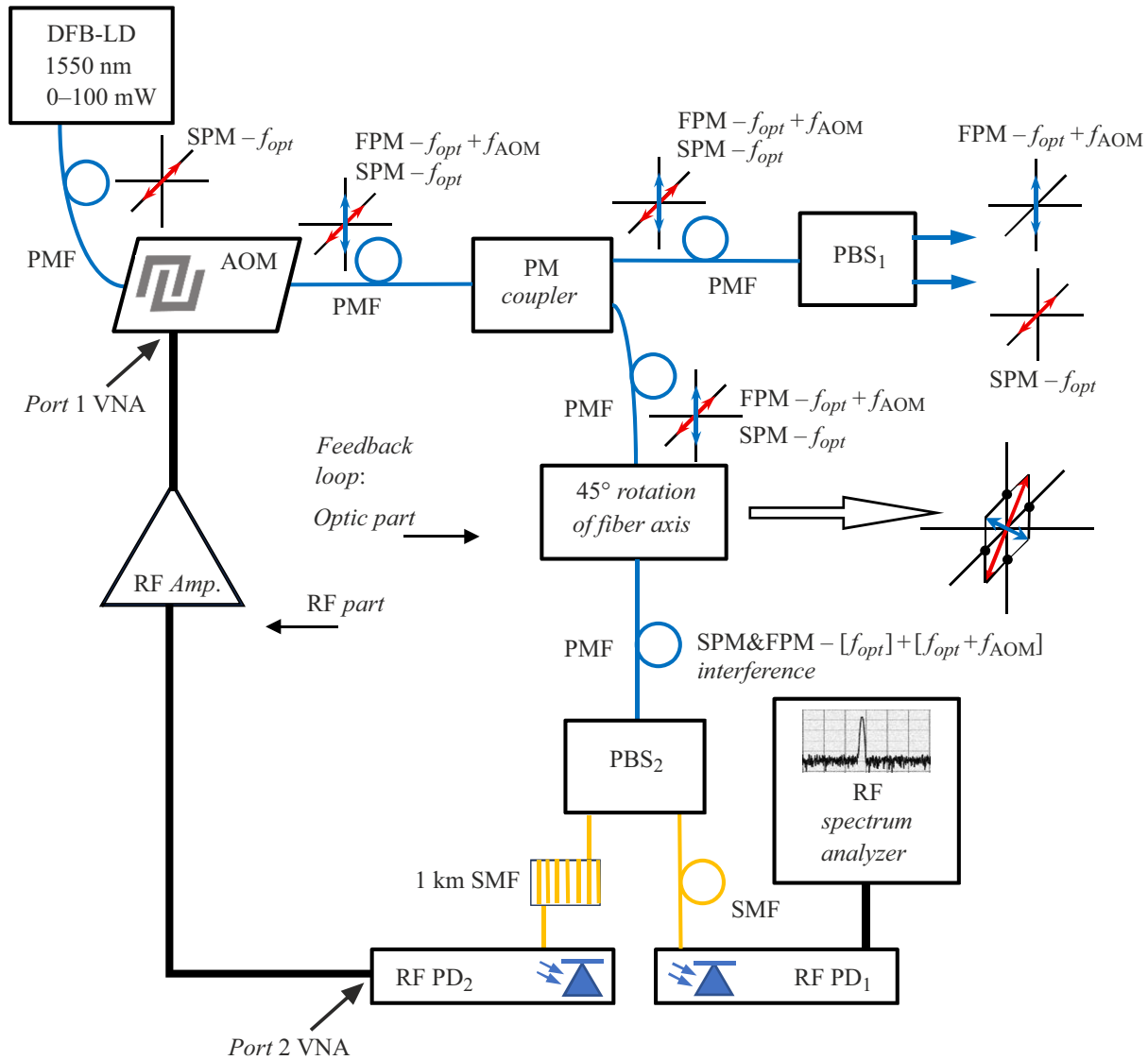
Сдвиг оптической частоты широко используется в системах прецизионных оптических измерений, таких как когерентные рефлектометры [1] и гетеродинные интерферометры [2]. Для генерации сдвига оптической частоты обычно используются акустооптические модуляторы (АОМ), возбуждаемые высокочастотными генераторами, настроенными на резонансную частоту, соответствующую максимуму дифракции оптического излучения с заданной длиной волны на бегущей акустической волне с периодом, определяемым скоростью звука в материале модулятора [3]. Настройка на резонанс акустооптической дифракции представляет собой отдельную задачу с учетом высокой селективности и температурной зависимости резонансной частоты [4]. В настоящей работе нами была предложена оригинальная схема оптоэлектронного осциллятора (ОЭО), позволяющая осуществить сдвиг оптической несущей в автоколебательном режиме без высокочастотного генератора. Кроме прикладного значения работа представляет научный интерес как первая демонстрация оптоэлектронного осциллятора с АОМ в интегральном исполнении.

Схема автогенератора сдвига оптической частоты (рис. 1) представляет собой классическую конфигурацию ОЭО [5–7]. Оптическая часть схемы содержит источник оптического излучения — одночастотный полупроводниковый лазерный диод с распределенной обратной связью (РОС ЛД) с оптическим выходом на основе двулучепреломляющего оптоволокна (РМФ), поддерживающего линейную поляризацию.

Линейно поляризованное излучение подается на вход ключевого элемента схемы — акустооптического модулятора сдвига частоты в интегральном исполнении (АОМ). Детальное описание его конструкции было представлено в наших предыдущих работах [8,9]. Принцип работы модулятора основан на попутной анизотропной дифракции на бегущей поверхностной акустической

волне (ПАВ), приводящей к повороту поляризации и сдвигу частоты оптического излучения. Для АОМ на основе оптического волновода в ниобате лития сдвиг частоты составляет около 170 МГц [8,9] и определяется дисперсионными свойствами ПАВ и поляризационной модовой дисперсией (разностью постоянных распространения собственных ортогональных поляризационных ТЕ- и ТМ-мод). Оси РМФ на входе АОМ ориентированы таким образом, что линейно поляризованное вдоль медленной оси оптическое излучение РОС ЛД вводится в ТЕ-поляризационную моду АОМ. Для повышения поляризационной экстинкции на входе АОМ сформирован тонкопленочный плазмон-поляритонный поляризатор [10]. ПАВ возбуждается при подаче через электрический высокочастотный вход АОМ сигнала модуляции на встречно-штыревой преобразователь (ВШП). Направление распространения ПАВ сонаправлено с распространением оптического излучения по каналному волноводу. Длина участка взаимодействия оптического излучения с ПАВ составляет около 16 мм, что обеспечивает брэгговский характер дифракции и высокую дифракционную эффективность. Подача на ВШП высокочастотного сигнала мощностью 45 мВт обеспечивала дифракционную эффективность 100% и полное преобразование линейно поляризованной ТЕ-моды на входе в ортогональную ТМ-моду на выходе [9]. Брэгговский характер дифракции также обеспечивает высокую частотную селективность акустооптического резонанса ( $\sim 240$  kHz) [9], поэтому для обеспечения стабильной работы АОМ и исключения температурного дрейфа интегрально-оптический чип был установлен на элемент Пельтье и снабжен терморезистором для измерения и стабилизации температуры.

В общем случае на выходе АОМ присутствуют обе поляризационные моды волновода: продифрагировавшее сдвинутое по частоте оптическое излучение в



**Рис. 1.** Схема автогенератора сдвига оптической частоты. DFB-LD — лазер (1550 нм, 0–100 мВт), PMF — двулучепреломляющие оптические волокна, AOM — интегральный акустооптический модулятор, PM coupler — поддерживающий поляризацию делитель оптической мощности, PBS — поляризационный делитель, 45° rotation of fiber axis — поворот оси волокна на 45°, 1 km SMF — 1 км стандартного одномодового оптического волокна, RF PD — высокочастотный фотодиод с обратным смещением, RF Amp. — ВЧ-усилитель (10–670 МГц, 28 дБ), Port 1 VNA — подключение порта 1 векторного анализатора цепей, Port 2 VNA — подключение порта 2 векторного анализатора цепей, RF spectrum analyzer — ВЧ-анализатор спектра.

ТМ-поляризационной моде и прошедшее непродифрагировавшее излучение в ТЕ-поляризационной моде. Оси PMF на выходе AOM сориентированы так, что ТМ-мода выводится в быструю ось, а ТЕ-мода — в медленную ось, т.е. излучение на основной и сдвинутой оптической частоте распространяется как невзаимодействующие ортогональные поляризационные моды.

Отметим особенности использования AOM в составе ОЗО. Высокая дифракционная эффективность, характерная для AOM в интегральном исполнении, значительно облегчает возбуждение автоколебательного режима генерации сдвига оптической частоты. Благодаря высокой спектральной селективности брэгговской дифракции AOM в интегральном исполнении помимо функции

преобразования электрического сигнала в оптический (переноса сигнала модуляции на оптическую несущую) выполняет также функцию частотного фильтра. Распределенный процесс дифракции приводит к сложной динамике изменения амплитудной и фазовой характеристик данного фильтра, которые определяются автокорреляционной функцией сигнала модуляции с временным лагом  $5 \mu\text{s}$  (время распространения ПАВ вдоль длины взаимодействия). Таким образом, данный вид модуляторов может обеспечивать новые малоизученные режимы обратной связи [11,12].

После AOM в схеме ОЗО установлен поддерживающий поляризацию волоконно-оптический делитель мощности (PM coupler) с коэффициентом деле-

ния 50/50 (3 dB). Один выход *PM coupler* является оптическим выходом автогенератора сдвига частоты, мы дополнительно установили в него волоконно-оптический поляризационный делитель ( $PBS_1$ ) и разделили оптическое излучение со сдвигом и без сдвига частоты.

Второй выход *PM coupler* используется в оптической части петли обратной связи ОЭО. В ней *PMF* на выходе *PM coupler* сваривается с *PMF* на входе второго волоконно-оптического поляризационного делителя ( $PBS_2$ ) с повернутыми на угол  $45^\circ$  осями, что приводит к возникновению общих проекций амплитуды оптического излучения со сдвигом частоты и без сдвига частоты на новые повернутые быструю и медленную оси и преобразованию модуляции сдвига частоты в модуляцию интенсивности за счет их биений после прохождения  $PBS_2$  (демодуляции). С одного выхода  $PBS_2$  оптическое излучение подается на фотоприемник на основе высокочастотного фотодиода с обратным смещением (RF PD<sub>1</sub>), который служит электрическим выходом ОЭО и используется нами для мониторинга высокочастотных сигналов. Второй выход  $PBS_2$  соединен с катушкой стандартного одномодового оптического волокна без поддержания поляризации (SMF) длиной около 1 km, выступающей в качестве оптической линии задержки для обеспечения низкого уровня фазовых шумов генерируемых сигналов. В конце оптической линии задержки также стоит фотоприемник на основе высокочастотного фотодиода с обратным смещением (RF PD<sub>2</sub>).

Электрический сигнал с выхода RF PD<sub>2</sub> подается через высокочастотный усилитель на электрический вход АОМ, тем самым замыкается петля обратной связи (ОС) ОЭО.

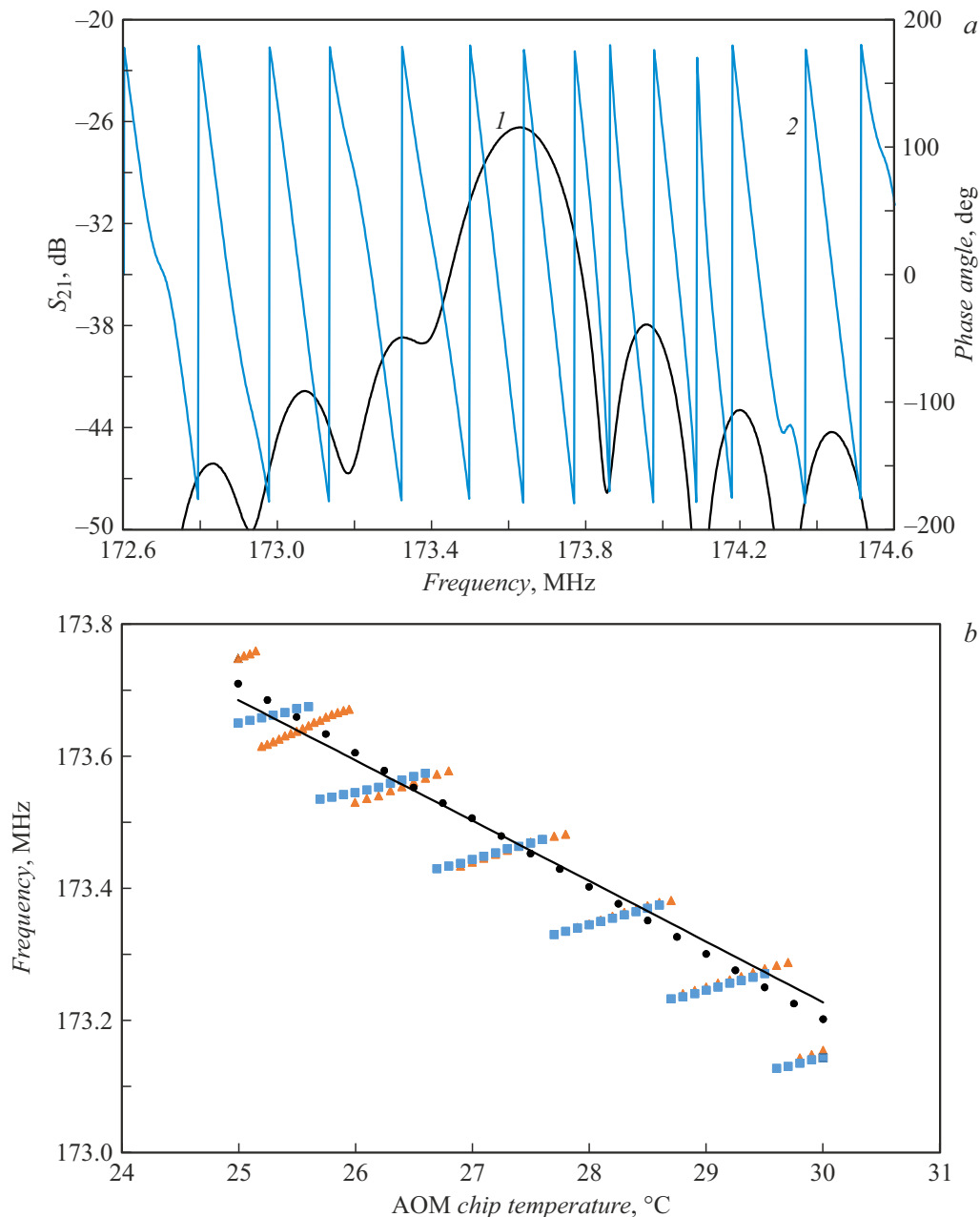
Для возбуждения автоколебаний необходимо выполнить два условия: коэффициент передачи при полном обходе петли должен быть больше единицы (0 dB), полный фазовый сдвиг должен обеспечивать условия положительной обратной связи.

На первом этапе экспериментальных исследований были проведены измерения коэффициента передачи схемы в условиях разомкнутой петли ОС ОЭО. На электрический вход АОМ подавался сигнал с высокочастотного (ВЧ) генератора, который регистрировался при помощи RF PD<sub>2</sub>. Измерения проводились с использованием векторного анализатора цепей. Зависимость коэффициента передачи ( $S_{21}$ ) от частоты ВЧ-сигнала при фиксированной длине волны (1550 nm) и мощности РОС ЛД (8 mW), а также фиксированной температуре АОМ (25 °C) представлена на рис. 2, а. Частотная зависимость коэффициента передачи повторяет резонансный пик акустооптической дифракции с шириной около 240 kHz.

Центральная частота резонансного пика дифракции на ПАВ может быть перестроена посредством изменения температуры АОМ или длины волны лазерного излучения [4]. Перестройка определяется зависимостями скорости ПАВ от температуры и двулучепреломления кристалла ниобата лития от температуры и длины волны

света и составляет  $-0.1 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$  и  $-0.12 \text{ MHz}/\text{nm}$  соответственно [4]. Ограничением диапазона перестройки резонансной частоты будет частотная полоса эффективного возбуждения ПАВ, определяемая конфигурацией ВШП [8,9]. Температура чипа АОМ могла настраиваться с помощью элемента Пельтье в диапазоне  $15-45^\circ\text{C}$ , что обеспечивало перестройку резонансной частоты в диапазоне  $171.5-174.5 \text{ MHz}$ . В схеме использовался РОС ЛД с ограниченным диапазоном перестройки длины волны ( $\sim 1 \text{ nm}$ ), что ограничивало перестройку резонансной частоты в диапазоне около 120 kHz, который не превышал селективность акустооптической дифракции ( $\sim 240 \text{ kHz}$ ). В связи с этим перестройка частоты генерации посредством изменения длины волны света не была реализована. Однако при использовании лазерного источника, перестраиваемого в широком диапазоне длин волн, данный механизм также может быть применен для перестройки частоты генерации.

В экспериментах по возбуждению автоколебательных режимов петля ОС ОЭО замыкалась через ВЧ-усилитель с полосой частот  $10-670 \text{ MHz}$  и коэффициентом усиления 28 dB, после чего постепенно увеличивалась мощность лазерного излучения. С помощью ВЧ-анализатора спектра регистрировался спектр радиочастотного сигнала на выходе RF PD<sub>1</sub>, а при помощи цифрового осциллографа контролировалась форма огибающей генерируемого ВЧ-сигнала. Генерации сдвига частоты не наблюдалось при мощности лазерного излучения менее 7 mW, так как потери в петле ОЭО превосходили коэффициент усиления усилителя. Для мощности лазерного излучения  $7-13 \text{ mW}$  в радиочастотном спектре присутствует только одна линия (рис. 3, а), что в оптическом спектре соответствует сдвигу вверх оптической частоты на частоту генерации ОЭО. При этом генерируется ВЧ-сигнал постоянной амплитуды (осциллограмма, рис. 3, а). Данная линия эффективно перестраивается изменением температуры АОМ (рис. 2, б). Температурная зависимость центральной частоты максимума коэффициента передачи АОМ непрерывная и монотонная, что было продемонстрировано в экспериментах по измерению зависимости акустооптического резонанса от температуры при разомкнутой петле ОС (рис. 2, б). Экспериментальные точки хорошо ложатся на теоретическую зависимость, рассчитанную на основе литературных данных по температурным зависимостям показателей преломления и скорости ПАВ для ниобата лития X-среза [4]. Отметим при этом, что перестройка частоты автогенерации при непрерывном монотонном изменении температуры происходит скачками. Величина скачков составляет около 140 kHz и совпадает с частотным расстоянием между резонансными частотами (модами) петли ОЭО, соответствующими переходам через  $2\pi$  измеренной фазочастотной характеристики коэффициента передачи при разомкнутой петле ОС. Отсюда мы делаем вывод, что перестройка происходит как перескок между модами ОЭО.

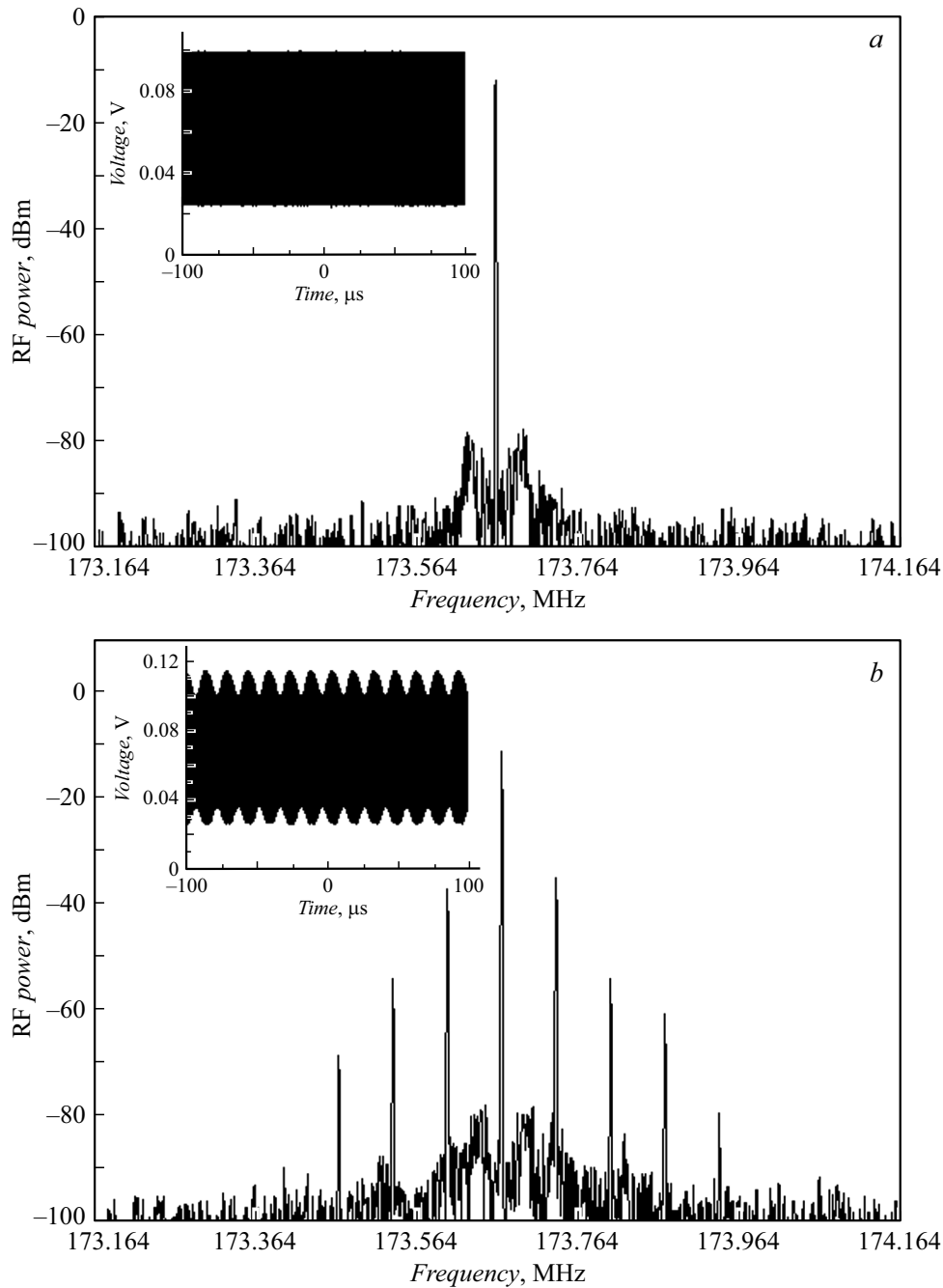


**Рис. 2.** *a* — частотная зависимость коэффициента передачи при разомкнутой петле ОС: 1 — амплитуда, 2 — фаза. *b* — перестройка частоты генерации в одночастотном автоколебательном режиме ОЭО при изменении температуры чипа АОМ (треугольники — повышение температуры, квадраты — понижение температуры) и температурная зависимость резонансного пика акустооптической дифракции при разомкнутой петле ОС (сплошная линия — теоретическая кривая [4], кружки — экспериментальные точки).

По мере увеличения лазерной мощности свыше 13 mW система переходит в многочастотный режим генерации (рис. 3, *b*). В ВЧ-спектре появляются дополнительные частотные составляющие. При этом генерируемые частоты не соответствуют условиям возникновения генерации на резонансных частотах (модах) петли ОЭО из измерений при разомкнутой петле ОС, что подобно результатам экспериментов с ОЭО на двоярном модуляторе Маха–Цендера с двойной ОС [13]. Постепенный рост мощности лазерного излучения приводит к возник-

новению новых линий генерации, причем расширяется спектр генерируемых частот и уменьшается разность частот между соседними линиями генерации. Форма огибающей ВЧ-сигнала при увеличении числа генерируемых частот приобретает сложный негармонический характер. Схожее поведение наблюдалось ранее в экспериментах по захвату частоты ОЭО на основе объемного АОМ [14].

Дальнейшее увеличение оптической мощности свыше 18 mW переводит ОЭО в режим генерации хаотических колебаний (рис. 3, *c*), что характерно для автоколеба-



**Рис. 3.** *a* — одночастотный режим генерации: длина волны 1550 nm, температура 25 °C,  $P_{opt} = 8$  mW. *b* — многочастотный режим генерации: длина волны 1550 nm, температура 25 °C,  $P_{opt} = 15$  mW. *c* — режим генерации хаотических колебаний: длина волны 1550 nm, температура 25 °C,  $P_{opt} = 87$  mW. На вставках представлены осциллограммы сигнала с выхода фотоприемника, показывающие форму огибающей в разных режимах генерации.

тельных систем с временной задержкой и нелинейностью в петле ОС [15,16], к которым относится рассматриваемый ОЭО на основе АОМ. Сложная динамика генерации ОЭО на основе АОМ требует дополнительных исследований, выходящих за рамки данного краткого сообщения. Здесь мы только отметим особенности АОМ, влияющие на динамику генерации ОЭО: зависимость спектральной характеристики АОМ от сигнала модуляции на его входе вызывает сильную нелинейность

петли ОС, а распределенный характер взаимодействия возбуждаемых ПАВ с оптическим излучением создает дополнительную временную задержку в петле ОС, связанную с временем распространения ПАВ (5 μs).

В заключение отметим, что нами была предложена оригинальная схема автогенератора сдвига частоты оптической несущей, использующая АОМ в интегральном исполнении в составе ОЭО. Экспериментально продемонстрирован режим одночастотной автогенера-

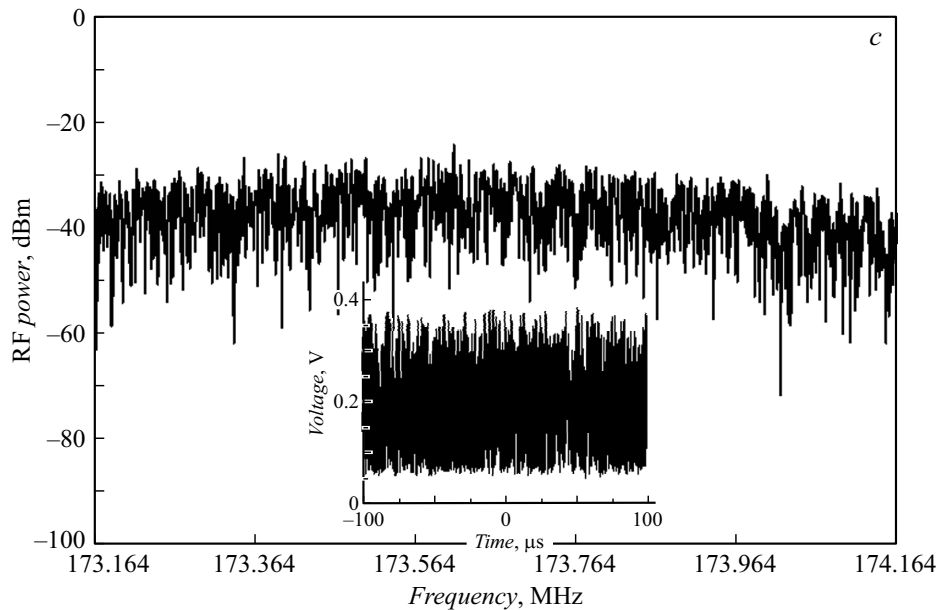


Рис. 3 (продолжение).

ции, обеспечивающий когерентный сдвиг оптической несущей без использования ВЧ-генератора для подачи сигнала на АОМ. Система переходит в режим автогенерации при превышении пороговой оптической мощности (7 mW), обеспечивающей коэффициент передачи петли ОС ОЭО более единицы (0 dB). Отметим, что режиму одночастотной генерации соответствует максимальный контраст интерференции в демодуляторе, что оптимально для интерференционных систем измерений.

Продемонстрирована возможность перестройки генерируемой частоты сдвига путем изменения температуры АОМ. Перестройка происходит скачками между собственными резонансными частотами (модами) петли ОС, которые при выбранной длине волоконно-оптической линии задержки ( $\sim 1$  km) и с учетом задержки в АОМ отстоят друг от друга приблизительно на 140 kHz.

По мере дальнейшего увеличения мощности лазерного излучения система демонстрирует сложную динамику и переходит сначала в режим многочастотной автогенерации (при оптической мощности свыше 13 mW), а затем в режим генерации хаотических колебаний (при оптической мощности свыше 18 mW).

Результаты работы представляют интерес для построения прецизионных систем оптических измерений, таких как когерентные рефлектометры и гетеродинные интерферометры. Когерентный сдвиг частоты и многочастотный режим генерации потенциально могут быть использованы для генерации частотных гребенок [17], а режим генерации хаотических колебаний — для построения генераторов случайных чисел [16,18].

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Y. Xue, Y. Niu, S. Gong, *Sensors*, **21** (16), 5510 (2021). DOI: 10.3390/s21165510
- [2] F. Liu, L. Gu, S. Xie, X. He, D. Yi, M. Zhang, Q. Tao, *J. Lightwave Technol.*, **36** (16), 3465 (2018). DOI: 10.1109/JLT.2018.2846280
- [3] A.P. Goutzoulis, *Design and fabrication of acousto-optic devices* (CRC Press, 2021).
- [4] A.V. Varlamov, P.M. Agruzov, I.V. Il'ichev, V.V. Lebedev, A.V. Shamrai, S.I. Stepanov, in *Int. Youth Conf. on electronics, telecommunications and information technologies (YETI-2020)*, ed. by E. Velichko, M. Vinnichenko, V. Kapralova, Y. Koucheryayv (Springer, Cham, 2020), p. 299. DOI: 10.1007/978-3-030-58868-7\_34
- [5] Y.K. Chembo, D. Brunner, M. Jacquot, L. Larger, *Rev. Mod. Phys.*, **91** (3), 035006 (2019). DOI: 10.1103/RevModPhys.91.035006
- [6] D. Strelakov, D. Aveline, N. Yu, R. Thompson, A.B. Matsko, L. Maleki, *J. Lightwave Technol.*, **21** (12), 3052 (2003). DOI: 10.1109/JLT.2003.821724
- [7] V. Lebedev, P. Agruzov, I. Iliyechev, A. Varlamov, I. Tatsenko, A. Nikitin, A. Ustinov, S. Stepanov, A. Shamray, *Photonics*, **10** (2), 196 (2023). DOI: 10.3390/photonics10020196
- [8] A.V. Varlamov, V.V. Lebedev, P.M. Agruzov, I.V. Il'ichev, L.V. Shamrai, A.V. Shamrai, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1326** (1), 012011 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1326/1/012011
- [9] A.V. Varlamov, V.V. Lebedev, P.M. Agruzov, I.V. Il'ichev, A.V. Shamrai, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1236** (1), 012034 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1236/1/012034
- [10] И.В. Ильичев, Н.В. Тогузов, А.В. Шамрай, *Письма в ЖТФ*, **35** (17), 97 (2009). [I.V. Il'ichev, N.V. Toguzov, A.V. Shamray, *Tech. Phys. Lett.*, **35** (9), 831 (2009). DOI: 10.1134/S1063785009090132].
- [11] В.И. Балакший, С.Н. Манцевич, *ЖТФ*, **81** (11), 106 (2011). [V.I. Balakshy, S.N. Mantsevich, *Tech. Phys.*, **56** (11), 1646 (2011). DOI: 10.1134/S1063784211110041].

- [12] S.N. Mantsevich, V.I. Balakshiy, *J. Opt. Soc. Am. B*, **35** (5), 1030 (2018). DOI: 10.1364/JOSAB.35.001030
- [13] Z. Xie, S. Li, H. Yan, X. Xiao, X. Zheng, B. Zhou, *Opt. Express*, **24** (26), 30282 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.030282
- [14] S.N. Mantsevich, V.I. Balakshy, *Appl. Phys. B*, **124** (4), 54 (2018). DOI: 10.1007/s00340-018-6923-z
- [15] K. Ikeda, K. Matsumoto, *Physica D*, **29** (1), 223 (1987). DOI: 10.1016/0167-2789(87)90058-3
- [16] J.H.T. Mbé, W.N. Atchoffo, R. Tchitnga, P. Woafu, *IEEE J. Quantum Electron.*, **57** (5), 5000507 (2021). DOI: 10.1109/JQE.2021.3093902
- [17] S.N. Mantsevich, A.S. Voloshin, K.B. Yushkov, *Phys. Rev. A*, **100** (1), 013829 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevA.100.013829
- [18] В.В. Дюделев, Е.Д. Черотченко, Д.А. Михайлов, Д.В. Чистяков, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, А.Г. Гладышев, А.В. Бабичев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Н.А. Пихтин, А.Ю. Егоров, А.В. Кондрашов, А.А. Семенов, Г.С. Соколовский, А.Б. Устинов, *Письма в ЖТФ*, **49** (22), 35 (2023). DOI: 10.61011/PJTF.2023.22.56598.19729 [V.V. Dudelev, E.D. Cherotchenko, D.A. Mikhailov, D.V. Chistyakov, S.O. Slipchenko, A.V. Lutetskii, A.G. Gladyshev, A.V. Babichev, L.Ya. Karachinskii, I.I. Novikov, N.A. Pikhtin, A.Yu. Egorov, A.V. Kondrashov, A.A. Semenov, G.S. Sokolovskii, A.B. Ustinov, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (11), 71 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.11.57205.19729].