09

Фотонная интегральная схема для системы стабилизации длины волны излучения перестраиваемого лазера С-диапазона

© А.А. Шейнбергер, В.Е. Трутнева, М.В. Степаненко, Ю.С. Жидик, И.В. Юнусов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия
E-mail: annasejnberger@gmail.com

Поступило в Редакцию 8 декабря 2025 г.
В окончательной редакции 6 февраля 2026 г.
Принято к публикации 6 февраля 2026 г.

Приведены результаты разработки фотонной интегральной схемы (ФИС) для измерения длины волны (частоты) излучения в С-диапазоне. Разработанная ФИС обеспечивает разрешение измерения 2.4 pm (0.3 GHz), точность ±8 pm(±1 GHz) и чувствительность к оптической мощности −18 dBm. ФИС разработана для изготовления по технологии, совместимой с технологией КНИ КМОП. Данная ФИС может быть использована в составе системы стабилизации длины волны излучения перестраиваемого лазера С-диапазона при реализации технологии DWDM.

Ключевые слова: измерение длины волны излучения, стабилизация длины волны излучения, DWDM, перестраиваемый лазер.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.10.62736.20591

Перестраиваемый лазер является неотъемлемой частью волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), в которых используется технология плотного мультиплексирования с разделением по длине волны (dense wavelength division multiplexing, DWDM). Для обеспечения совместимости оборудования от разных производителей и создания масштабируемых сетей частотная сетка в технологии DWDM регламентируется международным стандартом ITU-T G.694.1, который разработан Сектором стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи. Отклонения длины волны излучения лазера от стандартизированных значений приводят к возникновению битовых ошибок при передаче информации по ВОЛС [1,2]. Это делает востребованными системы стабилизации длины волны излучения лазера, в состав которых входят фотонные интегральные схемы (ФИС) для ее измерения. При реализации технологии DWDM по стандарту ITU-T G.694.1 с частотной сеткой 12.5 GHz такая ФИС должна обеспечивать точность измерения длины волны (частоты) излучения не хуже ±0.05 nm (±6 GHz).

Для измерения длины волны излучения в ФИС могут использоваться демультиплексоры [3]. В основе интегральных демультиплексоров лежат дифракционные волноводные решетки или планарные вогнутые решетки. ФИС с демультиплексорами обеспечивают высокоскоростные измерения с разрешением до 1.2 nm [4]. Существенным недостатком таких решений являются большая площадь дифракционных волноводных решеток и невозможность изготовления планарных вогнутых решеток на стандартных подложках КНИ (кремний на изоляторе) с толщиной рабочего слоя 220 nm. Данный тип подложек содержит слой диоксида кремния, помещенный между слоями монокристаллического кремния. При этом платформа КНИ предпочтительна для ФИС благодаря высокому оптическому контрасту, возможности использования пластин до 300 mm и совместимости с КНИ КМОП-технологией, что обеспечивает низкую стоимость, крупносерийное производство и интеграцию фотонных и электронных схем на одной пластине или чипе [5,6].

Другой подход к измерению длины волны излучения задействует микрокольцевые резонаторы (МКР). Например, в работе [7] представлена ФИС с четырьмя МКР, обеспечивающая разрешение измерения длины волны до 1.6 pm и точность 15 pm. Однако данное решение разработано для реализации на основе технологической платформы InP, в то время как более перспективной на данный момент считается технологическая платформа КНИ.

Настоящая работа посвящена разработке ФИС для измерения длины волны перестраиваемого лазера в С-диапазоне (1530−1565 nm), которая может быть изготовлена по технологии, совместимой с технологией КНИ КМОП.

Предлагаемая ФИС состоит из MMI-делителя 1×4 (MMI — multimode interference, или „многомодовая интерференция“), четырех МКР с различными длинами окружности кольцевого волновода (MRR1−MRR4 на рис. 1), четырех термооптических фазовращателей (PHS1−PHS4 на рис. 1) и четырех фотодиодов (PD1−PD4 на рис. 1), каждый из которых подсоединен к МКР.

Излучение посредством MMI-делителя 1×4 направляется на четыре МКР. Управляющее напряжение на каждом фазовращателе (ФВ) варьируется до достижения резонанса (максимального ослабления сигнала) в соответствующем МКР, что приводит к уменьшению тока

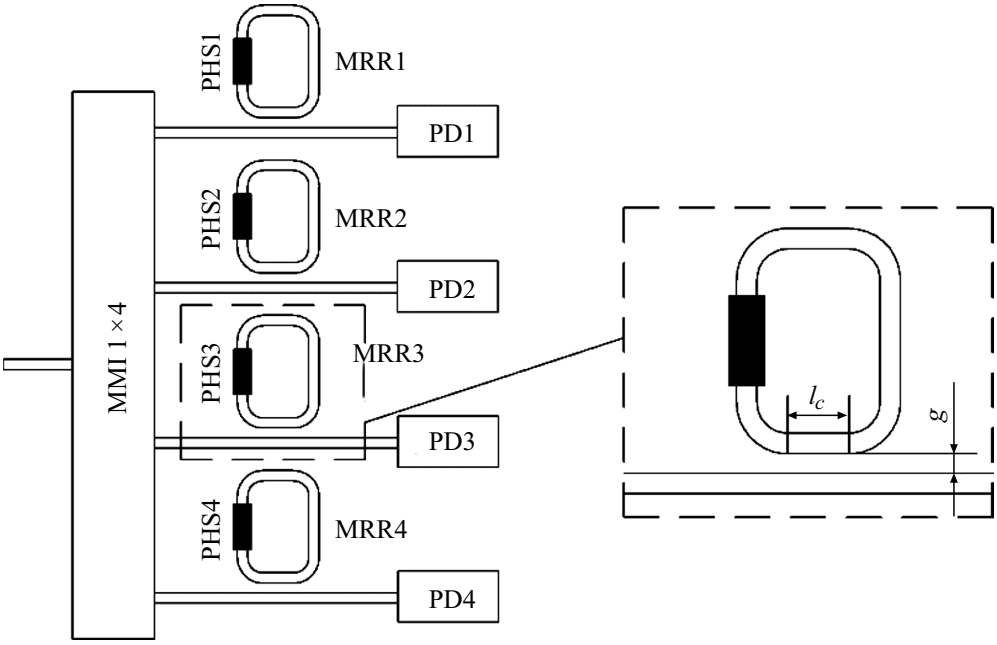

Рис. 1. Схематическое изображение ФИС для измерения длины волны излучения.

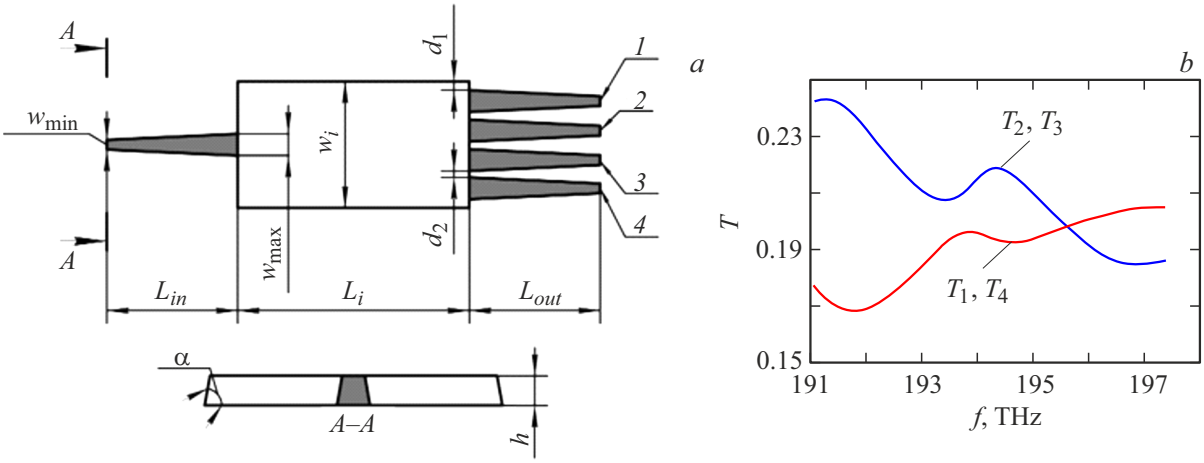

Рис. 2. Геометрические параметры (*a*) и спектральные зависимости коэффициентов передачи оптической мощности (*b*) разработанного MMI-делителя 1×4 (T_1–T_4 — коэффициенты передачи оптической мощности для выходов 1–4 соответственно).

на выходе соответствующего фотодиода (ФД). Таким образом, каждому значению резонансной длины волны излучения соответствует набор значений управляющего напряжения на ФВ, при котором на всех четырех ФД наблюдается минимальный ток. Разрешение измерения длины волны излучения для данной ФИС определяется шагом изменения положения резонансного пика МКР при минимальном изменении управляющего напряжения. Точность измерения в свою очередь определяется шириной резонансного пика на полувысоте, обозначаемой как FWHM (full width at half maximum). Разработка предложенной ФИС сводится к разработке MMI-делителя 1×4 и четырех МКР, а также к теоретическому исследованию ФИС.

MMI-делитель 1×4 должен обеспечивать минимальные вносимые оптические потери и осуществлять деление оптической мощности равномерно в рабочем диапазоне длины волны (частоты). Для этого необходимо оптимизировать его геометрические параметры (рис. 2, *a*). При этом ряд параметров устройства регламентируется технологией его изготовления, а именно $h = 0.22\,\mu$m, $\alpha = 85^\circ$, $w_{\min} = 0.45\,\mu$m. Похожие технологии описаны в работах [8,9]. Показатели преломления Si и SiO_2 на центральной частоте равны 3.467 и 1.449 соответственно. Расстояние d_2 должно быть не менее $0.8\,\mu$m для минимизации перекрестных помех (при выполнении данного условия коэффициент передачи оптической мощности между соседними волноводами имеет

максимальное допустимое значение 10^{-4}). Коническая форма волноводов требуется для согласования полей мод одномодового волновода и области интерференции, в которой распространяется несколько мод.

Ширина w_i была задана равной $5\,\mu$m, чтобы разместить на выходе MMI-делителя четыре выходных волновода с соблюдением требования к расстоянию между ними. Ширина $w_{\max}$ была задана равной $0.5\,\mu$m, что также обусловлено требованиями к расстоянию между волноводами. Входной волновод был расположен на середине ширины области интерференции. Положения выходных волноводов определялись по распределению электрического поля в области интерференции, рассчитанному методом EME (eigenmode expansion method — метод расширения собственных мод) [10]. Оптимальные значения остальных геометрических параметров были определены посредством их варьирования. При варьировании каждого параметра остальные параметры имели фиксированные значения. Поглощение кремнием оптической мощности и ее рассеяние на шероховатостях стенок при моделировании не учитывались. В результате были определены следующие оптимальные значения геометрических параметров MMI-делителя: $w_i = 5\,\mu$m, $w_{\max} = 0.5\,\mu$m, $L_{in} = 12\,\mu$m, $L_{out} = 10\,\mu$m, $L_i = 10.6\,\mu$m, $d_1 = 0.25\,\mu$m, $d_2 = 0.8\,\mu$m.

На рис. 2, *b* представлены расчетные спектральные зависимости значений коэффициентов передачи разработанного MMI-делителя 1×4. Коэффициенты передачи пронумерованы в соответствии с номерами выходных волноводов на рис. 2, *a*. Так как шаги между стандартными каналами DWDM кратны 12.5 GHz, при расчетах и представлении их результатов целесообразно перейти от длины волны в nm к частоте (f) в THz.

Таким образом, разработанный MMI-делитель характеризуется достаточно слабой спектральной зависимостью коэффициентов передачи оптической мощности в рабочем диапазоне.

Разработка МКР сводится к определению тех значений длины окружности кольцевого волновода и коэффициента его связи с прямым волноводом, которые обеспечивают наиболее высокие точность и разрешение измерения длины волны излучения. Методом компактных моделей [6] было исследовано влияние коэффициента связи МКР на его резонансный спектр и FWHM в отсутствие управляющего напряжения на ФВ. Длина окружности кольцевого волновода была выбрана равной $551\,\mu$m. Это минимальное значение, позволяющее поместить на кольцевом волноводе термооптический ФВ на основе пленки TiN, изменяющий фазу сигнала на 2π при подаче управляющего напряжения не более 5 V. Длина ФВ была определена по следующей формуле:

$$l_{\text{PHS}} = (2U_{2\pi}^2 w)/(P_{2\pi}\rho_{\square}),$$

где $U_{2\pi}$ — целевое управляющее напряжение для изменения фазы на 2π, принятое равным в данном случае 5 V; w — ширина пленки TiN, равная $1.5\,\mu$m; $P_{2\pi}$ — целевая электрическая мощность, необходимая для поворота фазы фазовращателем на 2π (в данном случае 18 mW); $\rho_{\square}$ — удельное поверхностное сопротивление тонкой пленки TiN.

Длина пленки TiN составила $360\,\mu$m. Для компактности использовались два одинаковых ФВ, размещенных на длинных сторонах кольцевого волновода. При радиусе изгиба дуг $10\,\mu$m, длине контактных площадок $10\,\mu$m, зазоре между дугами и контактными площадками $10.5\,\mu$m и длине связи (l_c на рис. 1), равной $3\,\mu$m, минимальная длина окружности кольцевого волновода МКР составила около $551\,\mu$m. Собственная добротность для такого МКР составляет, согласно расчетам, 58 444.99.

Коэффициенту связи были последовательно заданы значения 0.1, 0.2 и 0.3. Нагруженная добротность МКР при этом составила 55 059.82, 46 908.85 и 37 625.48 соответственно. Согласно результатам расчетов, при коэффициенте связи 0.1 достигается наименьшее значение FWHM, равное 2 GHz (рис. 3, *a*). Соответственно, точность измерений частоты (длины волны) составляет ± 1 GHz (± 8 pm). Данная точность измерений является достаточной для реализации технологии DWDM с минимальной стандартной частотной сеткой 12.5 GHz в соответствии со стандартом ITU-T G.694.1, а также равна точности измерения зарубежного аналога, описанного в [11]. Таким образом, для реализации устройства был выбран коэффициент связи 0.1. Важно отметить, что критический коэффициент связи для МКР в данном случае составляет 0.4. Однако использование МКР с коэффициентом связи меньше критического является допустимым решением для измерительных устройств, где точность измерения важнее минимизации потерь [12].

В результате расчета методом FDTD (finite difference time domain — метод конечных разностей во временнóй области) было установлено, что коэффициент связи 0.1 достигается при зазоре между прямым и кольцевым волноводами $g = 0.225\,\mu$m и длине связи $l_c = 3\,\mu$m (рис. 1). Было решено использовать такую форму кольцевых волноводов, при которой значения g и l_c одинаковы для всех МКР при индивидуальных значениях длин окружностей кольцевых волноводов.

Также была определена точность измерения частоты при отклонении ширины волноводов на $\pm 0.03\,\mu$m и отклонении их толщины на $\pm 0.01\,\mu$m (в соответствии с данными о технологических допусках). В результате было установлено, что при отклонении ширины на $\pm 0.03\,\mu$m точность измерения ухудшается до ± 2 GHz. При этом точность не зависит от толщины волноводов в исследуемом диапазоне.

Принцип действия предложенной ФИС требует, чтобы все МКР имели один общий резонансный пик в пределах рабочего диапазона. Для этого каждый МКР должен иметь свое уникальное значение FSR (free spectral range — область свободной дисперсии), которое определяется длиной окружности кольцевого волновода.

Длина окружности первого кольцевого волновода L_1 была задана равной минимальному допустимому зна-

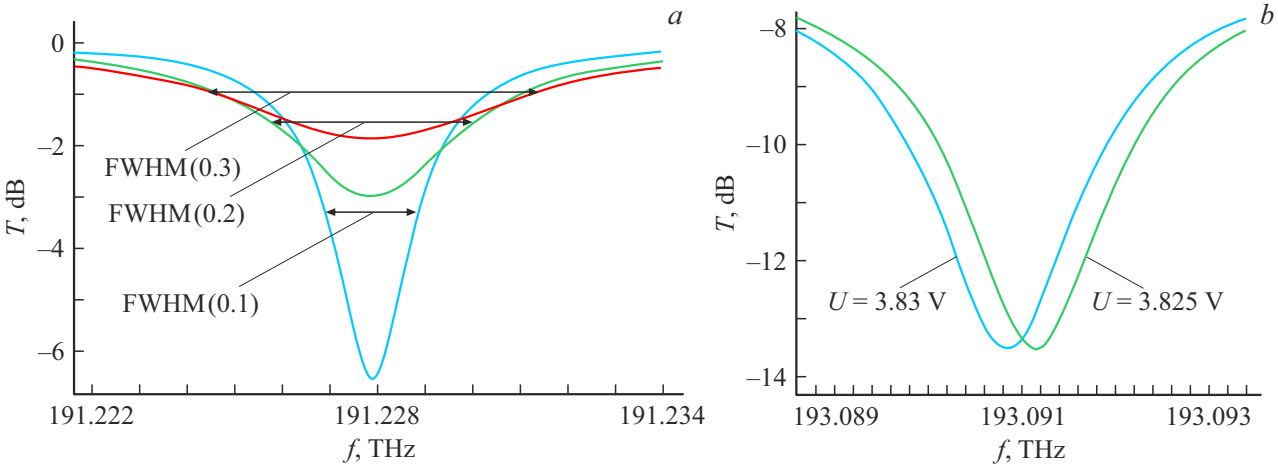

Рис. 3. Результаты расчетов методом компактных моделей. *a* — влияние коэффициента связи МКР на его резонансный спектр при отсутствии управляющего напряжения на ФВ; *b* — смещение резонансного пика МКР при минимальном доступном изменении управляющего напряжения на ФВ.

чению (551 μm). Длина окружности второго кольцевого волновода L_2 была рассчитана по следующей формуле [7]:

$$L_2 = L_1 + c/(n_g \cdot \mathrm{FSR}_{1\text{-}2}),$$

где c — скорость света в вакууме; n_g — групповой показатель преломления волновода, равный 4.358; $\mathrm{FSR}_{1\text{-}2}$ — суммарная область свободной дисперсии первого и второго МКР.

Величина $\mathrm{FSR}_{1\text{-}2}$ должна быть равна рабочему диапазону устройства или превышать его. В настоящей работе было выбрано значение 12.4 THz (100 nm). FSR для МКР3 и МКР4 должны удовлетворять следующим условиям:

1) $\mathrm{FWHM} \leqslant \mathrm{FSR}_1 - \mathrm{FSR}_3 \leqslant 12.5\,\mathrm{GHz}$;
2) $\mathrm{FWHM} \leqslant \mathrm{FSR}_1 - \mathrm{FSR}_4 \leqslant 25\,\mathrm{GHz}$.

Соблюдение данных условий исключает неоднозначность определения длины волны излучения, связанную с близостью несовпадающих резонансных пиков МКР1 и МКР2, а также обеспечивает соответствие ФИС требованиям частотных сеток 25 и 12.5 GHz, регламентируемым стандартом ITU-T G.694.1. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Далее для оценки разрешения измерения, обеспечиваемого разработанной ФИС (рис. 1), было проведено ее исследование методом компактных моделей.

Таблица 1. Результаты расчета длин окружностей МКР

Номер МКР	FSR, GHz	L, μm
1	124.9	551
2	123.7	556.5
3	113.6	606.2
4	104.1	661.3

Были определены смещения резонансных пиков МКР при минимальном доступном изменении управляющего напряжения на ФВ (5 mV). Для этого в компактной модели была учтена предварительно рассчитанная зависимость эффективного показателя преломления кольцевого волновода от управляющего напряжения. В частности, изменение управляющего напряжения от 3.825 до 3.83 V приводит к увеличению эффективного показателя преломления на $7.55 \cdot 10^{-6}$. Согласно результатам (рис. 3, *b*), разрешение измерения длины волны излучения для данной ФИС составляет 0.3 GHz. Таким образом, по разрешению измерения разработанная ФИС превосходит известные аналоги, описанные в [11,13], для которых разрешение измерения составляет < 1 GHz и ~ 1.4 GHz соответственно (табл. 2). При этом отклонения ширины и толщины MMI-делителя и волноводов от целевых значений в пределах технологического допуска не влияют на разрешение измерения. Важно отметить, что различие между оптическими потерями на рис. 3, *a* и *b* обусловлено тем, что результаты, представленные на рис. 3, *a*, получены для МКР самого по себе, а результаты, приведенные на рис. 3, *b*, — для МКР, входящего в состав схемы, включающей в себя MMI-делитель 1×4 и четыре МКР.

В табл. 3 представлены расчетные значения управляющих напряжений на термооптических ФВ, которые смещают резонансные пики всех четырех МКР на центральную частоту (193.1 THz), а также на соседние и крайние частоты С-диапазона в соответствии со стандартом ITU-T G.694.1 для частотной сетки 12.5 GHz. Данные значения кратны минимальному шагу 5 mV, с которым может изменяться управляющее напряжение.

Как показывают результаты расчета (табл. 3), наборы управляющих напряжений на МКР, соответствующие соседним значениям рабочей длины волны излучения,

Таблица 2. Сравнение разработанной ФИС с аналогами

Источник	Разрешение (длина волны/ частота)	Точность измерения	Чувствительность (оптическая мощность)	Платформа (технология)	Архитектура схемы
Наст. раб.	2.4 pm/$\sim$ 0.3 GHz	$\pm$8 pm ($\pm$1 GHz)	$-$18 dBm (входной порог)	Кремний на изоляторе (SOI)	Многокольцевая резонаторная (Вернье)
[7]	1.6 pm/$\sim$ 0.2 GHz*	Точно не указана (целевой уровень $\sim$ 15 pm)	Не указана (InP интегральные фотодиоды)	InP	Многокольцевая резонаторная (с фазовыми модуляторами)
[11]	$\sim$ 5–8 pm/$<$ 1 GHz	$\pm$8 pm	Не указана (высокочувствительный фотодиод на кристалле)	Кремний (КМОП-совместимая, атермальная)	Интерферометры Маха–Цендера (компенсированные температурой)
[13]	$\sim$ 11 pm/$\sim$ 1.4 GHz	Не указана	Не указана	Si_3N_4	Кольцевой резонатор + AWG (двухкаскадный)

*Значение частоты получено теоретически.

Таблица 3. Расчетные значения управляющего напряжения детектирования

f, GHz	U_1, V	U_2, V	U_3, V	U_4, V
195.90	2.625	1.505	2.365	2.125
193.1125	3.495	3.265	0.725	1.64
193.1	3.695	3.48	1.405	2.015
193.0875	0.895	3.68	1.845	2.36
191.60	0.375	0.65	2.31	3.11

различаются между собой достаточно сильно, чтобы однозначно определять по ним длину волны излучения.

Далее методом компактных моделей для разработанной ФИС (рис. 1) было проведено сравнение токов фотодиодов при отсутствии управляющего напряжения на ФВ с токами фотодиодов при подаче на ФВ управляющего напряжения детектирования, смещающего пики пропускания МКР на определенную детектируемую длину волны (табл. 4). Токи фотодиодов при отсутствии управляющего напряжения обозначены как I_0, а токи при напряжении детектирования — как I. Входная оптическая мощность сигнала составляла -10 dBm (0.1 mW), а чувствительность фотодиодов была равна 1 A/W. При этом нелинейность фотодиодов не учитывалась.

Снижение токов фотодиодов, наблюдаемое при подаче на ФВ управляющего напряжения детектирования, достаточно велико по сравнению со случайными флуктуациями.

Также была определена чувствительность разработанной ФИС к оптической мощности. Она определялась как входная оптическая мощность, при которой наименьшее значение тока фотодиода составляет 0.5 μA, т. е. в 5 раз превышает значение темнового тока. Чувствительность разработанной ФИС составила -18 dBm (15.8 μW).

Таким образом, была разработана ФИС для измерения длины волны излучения в C-диапазоне. Разработанная ФИС обеспечивает разрешение измерения 0.3 GHz (2.4 pm), точность $\pm$1 GHz ($\pm$8 pm) и чувствительность к оптической мощности -18 dBm. Разработанная ФИС превосходит ряд известных аналогов по разрешению измерения, а по точности измерения не уступает им. ФИС разработана для изготовления по технологии,

Таблица 4. Расчетные значения токов фотодиодов при отсутствии управляющего напряжения и при подаче управляющего напряжения детектирования

f, GHz	ФД1		ФД2		ФД3		ФД4	
	I_0, μA	I, μA	I_0, μA	I, μA	I_0, μA	I, μA	I_0, μA	I, μA
195.90	20.23	4.46	23	5	23.08	4.31	20.22	3.22
193.1125	20.09	4.44	23.75	5.3	22.31	4.44	20.14	3.17
193.1	19.21	4.46	23.67	5.15	23.67	4.5	20.16	6.33
193.0875	19.56	4.44	22.52	5.15	23.75	4.44	20.17	3.18
191.60	11.18	4.43	21.5	5.18	23.88	4.44	20.05	3.21

совместимой с технологией КНИ КМОП, что создает возможность крупносерийного производства при потенциально низкой стоимости одного устройства. Данная ФИС может быть использована в составе системы стабилизации длины волны излучения перестраиваемого лазера C-диапазона при реализации технологии DWDM.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта FEWM 2024-0004.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Z. Chen, X. Dong, J. Gao, Z. Yu, K. Xu, IEEE Photon. J., **17** (2), 1 (2025). DOI: 10.1109/JPHOT.2025.3555482
[2] Y. Sun, *DWDM source with precise channel spacing and good reliability*, PhD thesis (College of Science and Engineering, Minneapolis, 2025).
[3] R. Yu, R. Proietti, J. Kurumida, A. Karalar, B. Guan, S.J.B. Yoo, IEEE Photon. Technol. Lett., **24** (1), 70 (2012). DOI: 10.1109/LPT.2011.2172684
[4] M. Muneeb, A. Ruocco, A. Malik, S. Pathak, E. Ryckeboer, D. Sanchez, L. Cerutti, J.B. Rodriguez, E. Tournie, W. Bogaerts, M.K. Smit, G. Roelkens, Opt. Express, **22** (22), 27300 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.027300
[5] С.С. Косолобов, И.А. Пшеничнюк, К.Р. Тазиев, А.К. Земцова, Д.С. Земцов, А.С. Смирнов, Д.М. Жигунов, В.П. Драчёв, УФН, **194** (11), 1223 (2024). DOI: 10.3367/UFNr.2024.09.039762 [S.S. Kosolobov, I.A. Pshenichnyuk, K.R. Taziev, A.K. Zemtsova, D.S. Zemtsov, A.S. Smirnov, D.M. Zhigunov, V.P. Drachev, Phys. Usp., **67** (11), 1153 (2024). DOI: 10.3367/UFNe.2024.09.039762].
[6] W. Bogaerts, L. Chrostowski, Laser Photon. Rev., **12** (4), 1700237 (2018). DOI: 10.1002/lpor.201700237
[7] A. Volpini, D. Massella, D. Alvarez-Outerelo, F. Soares, F.J. Diaz-Otero, in *2023 IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting Series (SUM)* (IEEE, 2023), p. 1–2. DOI: 10.1109/SUM57928.2023.10224439
[8] Q. Liu, Y. Bian, J. Xiong, Photonics, **12** (9), 928 (2025). DOI: 10.3390/photonics12090928
[9] Y. Liu, U. Khan, W. Bogaerts, Opt. Express, **33** (6), 13530 (2025). DOI: 10.1364/OE.558406
[10] S. Hassan, D. Chack, Microelectron. J., **104** (4), 104887 (2020). DOI: 10.1016/j.mejo.2020.104887
[11] B. Stern, K. Kim, H. Gariah, D. Bitauld, in *Frontiers in Optics + Laser Science 2023 (FiO, LS)* (Optica Publ. Group, 2023), paper FM6D.4. DOI: 10.1364/FIO.2023.FM6D.4
[12] K. Qian, J. Tang, H. Guo, W. Liu, J. Liu, C. Xue, Y. Zheng, C. Zhang, Sensors, **17** (1), 100 (2017). DOI: 10.3390/s17010100
[13] M. Hasan, G.M. Hasan, H. Ghorbani, M. Rad, P. Liu, E. Bernier, T. Hall, Opt. Express, **32** (6), 8697 (2024). DOI: 10.1364/OE.509659