

УДК 681.2.082

doi 10.54708/22259309_2025_132104

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ANSYS LUMERICAL

И. В. СТЕПАНОВ¹

¹stepanov.iv@ugatu.su

¹ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. В работе представлен подход к численному моделированию интегральных оптических линий задержки в программном обеспечении Ansys Lumerical. В рамках представленного подхода были рассмотрены линии задержки на основе интерферометра Маха-Цендера и микрокольцевого резонатора, реализованных на обобщённой платформе кремний-на-изоляторе с толщиной волноводного слоя 220 нм. Для управления компонентами был использован электрооптический эффект, обеспечивающий время изменения управляемой величины порядка единиц наносекунд. Предложенный подход может быть использован для разработки устройств интегральной фотоники, предполагающих управление временной задержкой.¹

Ключевые слова: интегральная фотоника; численное моделирование; оптические линии задержки; Ansys Lumerical.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические линии задержки обладают множеством областей применения в оптических коммутационных системах и обработке сигналов [1–3]. Во всех узлах оптически коммутируемых телекоммуникационных сетей они выполняют такие функции, как синхронизация оптических пакетов, буферизация, разрешение конфликтов пакетов и другое. Всё это может значительно снизить сложность систем связи и их энергопотребление за счет устранения чувствительных к длине волны и, следовательно, сложных оптоэлектронных и электронно-оптических преобразований. В системах микроволновой фотоники такие линии задержки обеспечивают реализацию перестраиваемых сверхвысокочастотных фильтров [4, 5] и формирователей диаграммы направленности фазированных антенных решёток [6, 7]. При этом интегральная реализация оптических линий задержки позволит значительно снизить массогабаритные показатели конечных устройств.

В интегральном виде оптическая линия задержки (ЛЗ) может быть реализована на основе интерферометра Маха-Цендера (ИМЦ) [8–10], микрокольцевого резонатора (МКР) [11–13], брэгговской решётки [14–17], массивной волноводной решётки [18] и фотонного кристалла [19, 20]. Стоит отметить, что для ИМЦ [9, 21], МКР [22] и волноводной брэгговской решётки [17] была продемонстрирована непрерывная перестройка значения вносимой временной задержки, что соответственно позволяет снизить шаг её изменения при использовании управля-

Исследование выполнено в рамках работ по Государственному заданию Минобрнауки России для УУНИТ (соглашение № 075-03-2024-123/1 от 15.02.2024 г.) в молодёжной научно-исследовательской лаборатории Евразийского НОЦ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники».

ющего воздействия. При этом наиболее выгодными вариантами с точки зрения технологичности производства являются ИМЦ и МКР [23]. Соответственно далее будут рассмотрены принципы работы данных элементов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВНОСИМОЙ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ ДЛЯ ЛЗ НА ОСНОВЕ ИМЦ И МКР

В простейшем случае интегральная оптическая ЛЗ на основе ИМЦ представляет собой небалансный ИМЦ, состоящий из двух перестраиваемых ответвителей, соединённых между собой волноводами разной длины [21]. Возможная реализация такой линии задержки представлена на рис. 1.

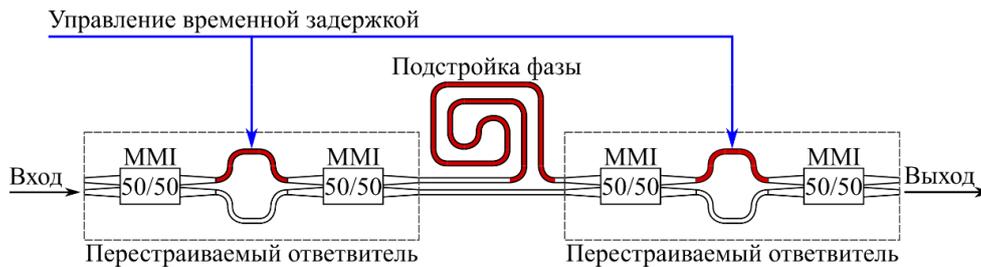


Рис. 1. ЛЗ на основе ИМЦ. Красным цветом выделены элементы с рп-переходом. MMJ – многомодовый ответвитель с коэффициентами деления 50/50

Для данной схемы, при условии применения одного и того же сигнала для управления перестраиваемыми ответвителями, временная задержка τ будет определяться как [21]:

$$\tau = \frac{K(K - \cos \Delta\varphi + K \cos \Delta\varphi)}{2K^2 \cos \Delta\varphi - 2K \cos \Delta\varphi - 2K + 2K^2 + 1} T + \tau_0, \quad (1)$$

где K – соотношение коэффициентов связи перестраиваемых ответвителей; τ_0 – минимальная временная задержка сигнала при прохождении через ИМЦ; T – разность временных задержек при прохождении всего излучения через самое длинное и через самое короткое плечи интерферометра; $\Delta\varphi$ – разность фаз сигналов, проходящих через разные плечи интерферометра.

Разность временных задержек при прохождении всего излучения через самое длинное и через самое короткое плечи интерферометра определяется как:

$$T = \frac{n_g \Delta L}{c} = \frac{1}{f_{FSR}},$$

где n_g – групповой показатель преломления волновода; ΔL – разность длин плеч небалансного ИМЦ; c – скорость света в вакууме; f_{FSR} – разность частот между соседними минимумами амплитудно-частотной характеристики линии задержки.

Разность фаз сигналов, проходящих через разные плечи интерферометра, в свою очередь, равна:

$$\Delta\varphi(f) = \frac{2\pi\Delta L}{c} + \phi,$$

где ϕ – сдвиг фазы в самом длинном плече ИМЦ.

В свою очередь, любой МКР (рис. 2) имеет свойства ЛЗ [22, 24]. В общем случае для одностороннего МКР вносимую временную задержку можно определить как [25]:

$$\tau(f) = \frac{\kappa}{2 - \kappa - 2\sqrt{1 - \kappa} \cos(2\pi f T_r + \phi)} T_r, \quad (2)$$

где κ – коэффициент передачи из прямого волновода в кольцевой резонатор; f – частота оптического сигнала; T_r – время, за которое оптический сигнал проходит кольцевой резонатор; ϕ – фазовый сдвиг, вносимый управляемым элементом в кольцевом резонаторе.

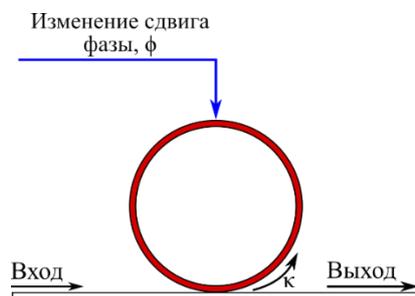


Рис. 2. ЛЗ на основе МКР. Красным цветом выделен кольцевой волновод с рп-переходом

При этом величина T_r определяется как:

$$T_r = \frac{Ln_g}{c} = \frac{1}{f_{FSR}},$$

где L – длина кольцевого волновода.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЛЗ

В рамках представленной работы рассматривается обобщённая платформа интегральной фотоники кремний-на-изоляторе с толщиной волноводного слоя 220 нм. Для управления ЛЗ применяется электрооптический эффект, обеспечивающий малое время изменения показателя преломления (порядка единиц наносекунд) [26].

Для передачи оптического излучения в ЛЗ использованы полосковые волноводы шириной 500 нм, что обеспечивает одномодовый режим работы. Сам волновод расположен на стеклянной подложке толщиной 2 мкм и закрыт защитным слоем из стекла толщиной 1 мкм. В случае же волноводов с рп-переходом их геометрия отличается (рис. 3).

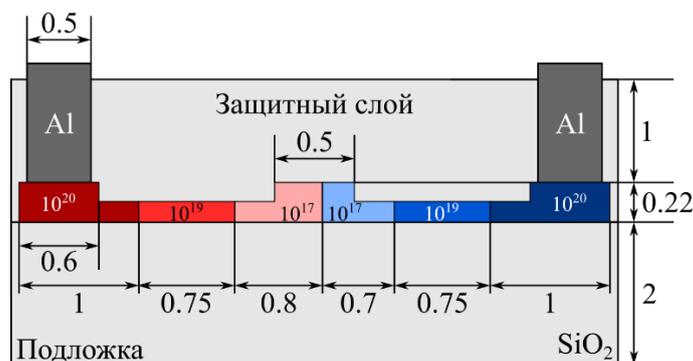


Рис. 3. Геометрия волновода с рп-переходом. Оттенки красного цвета показывают области с носителями зарядов р-типа (дырками), синего – n-типа (электроны). Числа внутри волновода показывают концентрацию носителей заряда в см^3 . Размеры структур показаны в мкм

Соответственно первый этап моделирования заключается в определении параметров моды в волноводе и их экспорт для применения в системной модели, для чего был использован программный пакет Lumerical MODE. Основным результатом служит эффективный показатель преломления моды.

В последующем этапе определяется зависимость распределения свободных носителей заряда от приложенного к управляющему контакту напряжения. Для моделирования процесса был использован программный пакет Lumerical CHARGE. Полученные распределения для отдельных значений напряжений представлены на рис. 4.

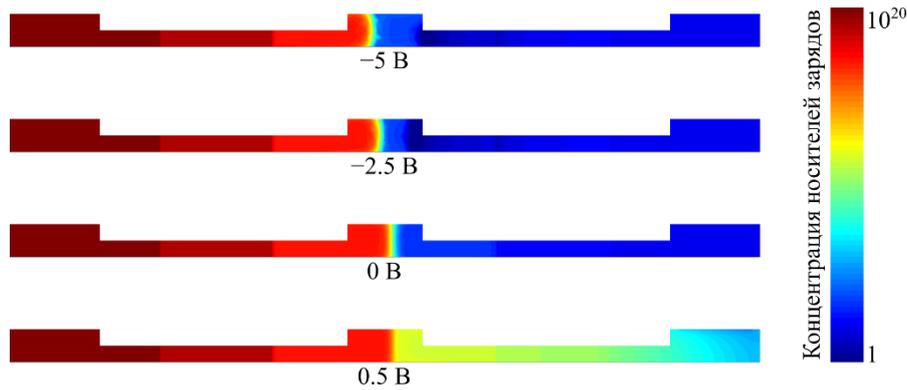


Рис. 4. Изменение распределения свободных носителей заряда р-типа в сечении волновода в логарифмическом масштабе при различных значениях управляющего напряжения

Для преобразования полученных распределений носителей зарядов в изменение эффективного показателя преломления, используемого в системной модели, была применена модель Сорфа и Беннета для одной из самых распространенных в системах связи длин волн 1550 нм [27]:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \Delta\alpha_e + \Delta\alpha_h = 8.88 \times 10^{-21} \Delta N_e^{1.167} + 5.84 \times 10^{-20} \Delta N_h^{1.109}, \\ -\Delta n &= \Delta n_e + \Delta n_h = 5.4 \times 10^{-22} N_e^{1.011} + 1.53 \times 10^{-18} \Delta N_h^{0.838}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Delta\alpha$ – изменение коэффициента поглощения излучения; индексы e и h соответствуют электронам и дыркам; ΔN – изменение количества носителей зарядов в активной области; Δn – изменение показателя преломления.

Для получения зависимости эффективного показателя преломления от напряжения был использован программный пакет Lumerical MODE, где были заданы коэффициенты из выражения (3) для численной модели кремния. Зависимость изменения эффективного показателя преломления моды от приложенного напряжения представлена на рис. 5.

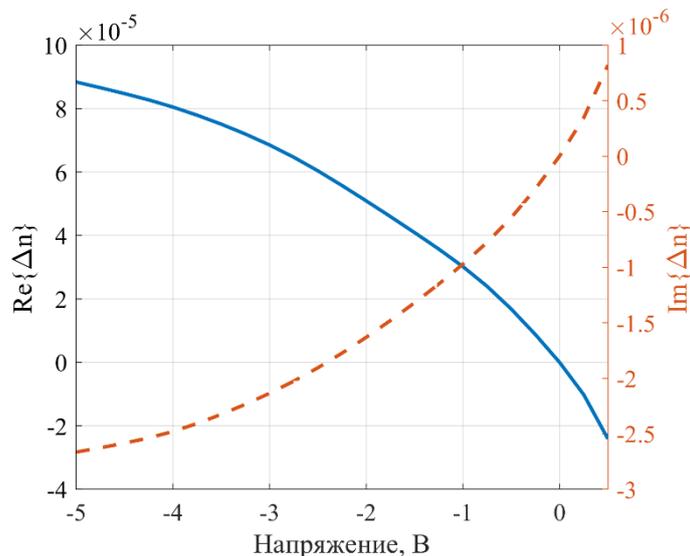


Рис. 5. Зависимость изменения эффективного показателя преломления волновода от приложенного к управляющему контакту напряжения относительно 0 В

Немаловажным компонентом для ИМЦ является направленный ответитель. В представленной работе применён многомодовый направленный ответитель (ММИ), работающий на основе принципа самоотображения [28]. Главными преимуществами ММИ являются их широкополосность и простота при производстве. Для моделирования ММИ был использован метод

разложения по собственным модам, реализованный в программном пакете Lumerical MODE. На основе данного метода были получены длина многомодовой части MMI и его амплитудно-частотные характеристики (рис. 6).

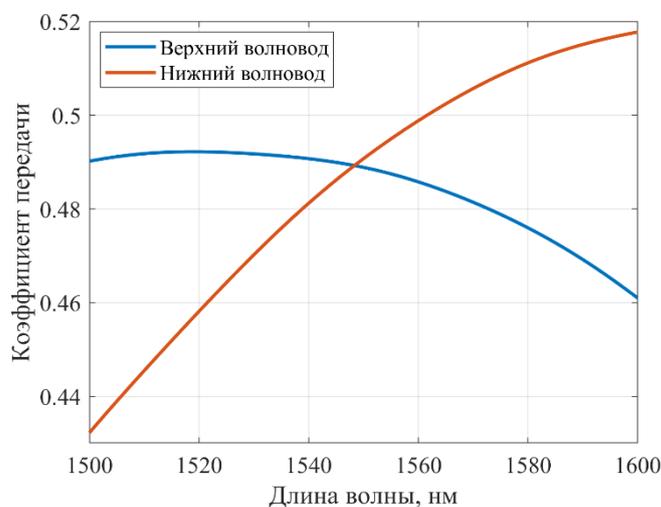


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики многомодового ответвителя

В случае МКР необходимо получить коэффициент передачи из прямого волновода в кольцевой. Для этого был использован метод конечных разностей во временной области (Lumerical FDTD). Полученная зависимость коэффициента передачи от длины волны представлена на рис. 7. Радиус МКР равен 100 мкм.

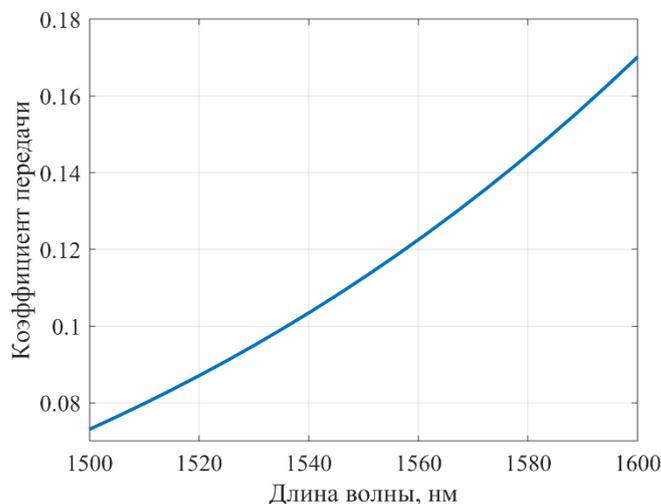


Рис. 7. Зависимость коэффициента передачи из прямого волновода в кольцевой от длины волны

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЗ В ЦЕЛОМ

На основе результатов моделирования, представленных выше, были созданы численные модели интегральных оптических линий задержки в программном пакете Lumerical INTERCONNECT. Для моделирования были установлены следующие параметры:

- частота следования гауссовских импульсов – 100 МГц;
- частота дискретизации модели – 1,8 и 50 ТГц;
- временное окно моделирования – 10 нс.

Для электрооптической линии задержки на основе ИМЦ длины волнопроводов перестраиваемых ответвителей равны 8 мм, при этом разность длин волнопроводов небалансного ИМЦ равна 1 мм при длине самого короткого волновода 0,5 мм.

Линии задержки на основе МКР имеют радиус кольцевого волновода 100 мкм, а расстояние между кольцом и прямым волнопроводом равно 180 нм.

Для определения времени задержки был использован одиночный гауссовский импульс (количество импульсов ограничено временным окном моделирования). По смещению его максимума во времени и определялась временная задержка. На рис. 8 приведены зависимости времени задержки от приложенного к управляющим контактам напряжения.

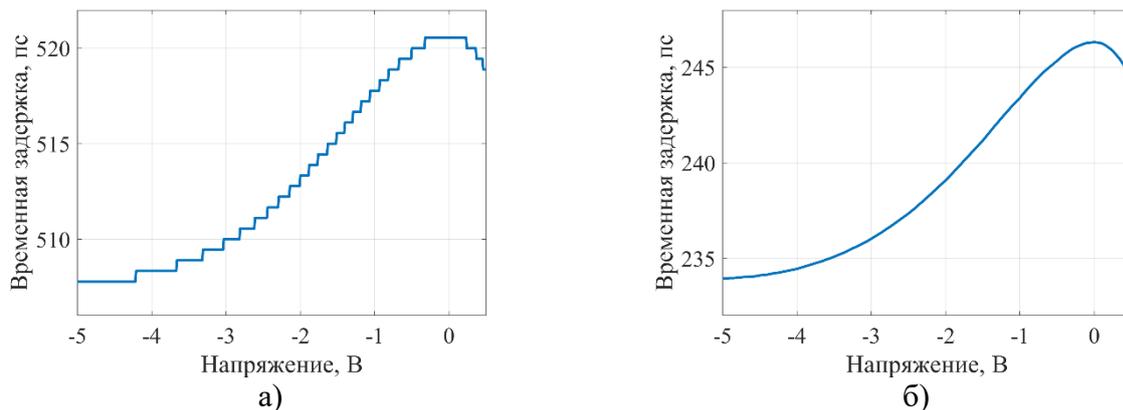


Рис. 8. Зависимости временной задержки от приложенного напряжения для ИМЦ при частотах дискретизации модели: а) 1,8 ТГц и б) 50 ТГц

Ступенчатый характер зависимости на рис. 8, а обусловлен зависимостью результатов численного моделирования от выбранной частоты дискретизации.

Также можно наблюдать, что абсолютное значение временной задержки зависит от частоты дискретизации модели. В рамках численного моделирования было выявлено, что для частот дискретизации свыше 100 ТГц изменение абсолютного значения вносимой временной задержки практически не происходит. Однако для большинства численных моделей, где требуется применение оптических ЛЗ, высокие частоты дискретизации могут привести к ошибкам вычисления либо значительно увеличить время получения результатов. Последнее особенно актуально в случае перебора большого количества параметров.

В связи с вышеизложенным было предложено применение аналитического подхода на финальном этапе моделирования с эквивалентной заменой оптической ЛЗ в моделях на идеализированный элемент, обеспечивающего временную задержку. При этом для определения вносимой временной задержки по выражениям (1) и (2) используются данные численного моделирования.

В соответствии с выражением (1) для ЛЗ на основе ИМЦ была построена зависимость соотношения коэффициентов связи перестраиваемых ответвителей от приложенного к управляющему контакту напряжения (рис. 9, а). Вычисленная зависимость вносимой временной задержки от напряжения для ИМЦ представлена на рис. 9, б.

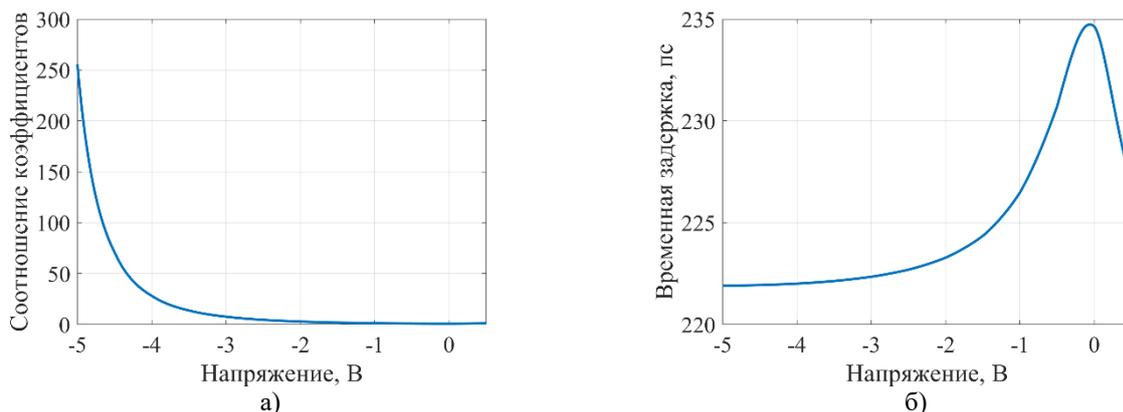


Рис. 9. а) зависимость соотношения коэффициентов связи перестраиваемых ответвителей от приложенного к управляющему контакту напряжения и б) зависимость вносимой временной задержки от приложенного к управляющему контакту напряжения для ИМЦ

Рассчитанная зависимость вносимой временной задержки от напряжения для МКР приведена на рис. 10.

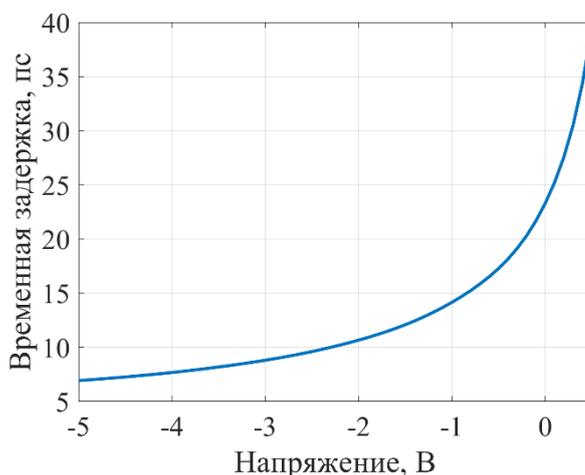


Рис. 10. Зависимость вносимой временной задержки от приложенного к управляющему контакту напряжения для МКР

В результате ЛЗ на ИМЦ обеспечивает шаг перестройки временной задержки 8,25 пс/В, а МКР – 3,49 пс/В. Для определения этих величин были использованы квазилинейные участки зависимостей на рис. 9, б и 10.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный подход к численному моделированию может быть использован для проектирования устройств интегральной фотоники с элементами управления временной задержкой оптического сигнала. Стоит отметить, что предложенный метод также является аналитическим из-за особенностей моделирования схем в программном обеспечении. Соответственно для его расширения и применения с другими топологиями оптических интегральных линий задержки требуются аналитические выражения, описывающие зависимость вносимой временной задержки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mok J. T., Eggleton B. J. Expect more delays // Nature. 2005. Т. 433. № 7028. С. 811–812.
2. Gauthier D. Slow light brings faster communications // Phys. World. 2005. Т. 18. № 12. С. 30–32.

3. **Zhuang L. et al.** Novel low-loss waveguide delay lines using Vernier ring resonators for on-chip multi- λ microwave photonic signal processors // *Laser & Photonics Reviews*. 2013. Т. 7. № 6. P. 994–1002.
4. **Polo V. et al.** Novel tunable photonic microwave filter based on laser arrays and N/spl times/N AWG-based delay lines // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2003. Т. 15. № 4. P. 584–586.
5. **Mokhtari A. et al.** Tunable microwave-photonic filter using frequency-to-time mapping-based delay lines // *Opt. Express*. 2013. Т. 21. № 18. P. 21702.
6. **Moreira R. L. et al.** Integrated Ultra-Low-Loss 4-Bit Tunable Delay for Broadband Phased Array Antenna Applications // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2013. Т. 25. № 12. P. 1165–1168.
7. **Minasian R. A.** Ultra-Wideband and Adaptive Photonic Signal Processing of Microwave Signals // *IEEE J. Quantum Electron.* 2016. Т. 52. № 1. P. 1–13.
8. **Xie J. et al.** Seven-bit reconfigurable optical true time delay line based on silicon integration // *Optics Express*. Optical Society of America, 2014. Т. 22. № 19. P. 22707–22715.
9. **Wang X. et al.** Continuously tunable ultra-thin silicon waveguide optical delay line // *Optica*. Optical Society of America, 2017. Т. 4. № 5. P. 507–515.
10. **Zhu C. et al.** Silicon integrated microwave photonic beamformer // *Optica*. Optical Society of America, 2020. Т. 7. № 9. P. 1162–1170.
11. **Meijerink A. et al.** Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas - Part I: Design and performance analysis // *Journal of Lightwave Technology*. 2010. Т. 28. № 1. P. 3–18.
12. **Liu Y. et al.** Ultra-Low-Loss Silicon Nitride Optical Beamforming Network for Wideband Wireless Applications // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2018. Т. 24. № 4.
13. **Tsokos C. et al.** True Time Delay Optical Beamforming Network Based on Hybrid Inp-Silicon Nitride Integration // *Journal of Lightwave Technology*. 2021. Т. 39. № 18. P. 5845.
14. **Burla M. et al.** Integrated waveguide Bragg gratings for microwave photonics signal processing // *Optics Express*. Optical Society of America. 2013. Т. 21. № 21. P. 25120–25147.
15. **Wang J. et al.** Subwavelength grating enabled on-chip ultra-compact optical true time delay line // *Scientific Reports*. Nature Publishing Group. 2016. Т. 6. № 1. P. 1–10.
16. **Wang Y. et al.** On-chip optical true time delay lines based on subwavelength grating waveguides // *Optics Letters*. Optical Society of America. 2021. Т. 46. № 6. P. 1405.
17. **Zhang W., Yao J.** A fully reconfigurable waveguide Bragg grating for programmable photonic signal processing // *Nature Communications*. 2018. Т. 9. № 1. P. 1396.
18. **Wang X. et al.** Integrated Optical Delay Line Based on a Loopback Arrayed Waveguide Grating for Radio-frequency Filtering // *IEEE Photonics Journal*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2020. Т. 12. № 3.
19. **Sancho J. et al.** Integrable microwave filter based on a photonic crystal delay line // *Nature Communications*. Nature Publishing Group. 2012. Т. 3. № 1. P. 1–9.
20. **Lin C.Y. et al.** Silicon nanomembrane based photonic crystal waveguide array for wavelength-tunable true-time-delay lines // *Applied Physics Letters*. American Institute of Physics AIP. 2012. Т. 101. № 5. P. 051101.
21. **Melati D. et al.** Wideband Integrated Optical Delay Line Based on a Continuously Tunable Mach–Zehnder Interferometer // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2018. Т. 24. № 1. P. 1–8.
22. **Schwelb O.** Transmission, Group Delay, and Dispersion in Single-Ring Optical Resonators and Add/Drop Filters—A Tutorial Overview // *J. Lightwave Technol.* 2004. Т. 22. № 5. P. 1380–1394.
23. **Su Y., Zhang Y.** *Passive silicon photonics devices*. 1st изд. Melville: AIP Publishing, 2022.
24. **Bogaerts W. et al.** Silicon microring resonators // *Laser & Photonics Reviews*. 2012. Т. 6. № 1. P. 47–73.
25. **Megret P. et al.** Ring resonator-based Tunable Optical Delay Line in LPCVD Waveguide Technology. 2005. P. 79–82.
26. **Kim Y. et al.** Heterogeneously-Integrated Optical Phase Shifters for Next-Generation Modulators and Switches on a Silicon Photonics Platform: A Review // *Micromachines*. 2021. Т. 12. № 6. P. 625.
27. **Nedeljkovic M., Soref R., Mashanovich G. Z.** Free-Carrier Electrorefraction and Electroabsorption Modulation Predictions for Silicon Over the 1-14- μm Infrared Wavelength Range // *IEEE Photonics J.* 2011. Т. 3. № 6. P. 1171–1180.
28. **Soldano L. B., Pennings E. C. M.** Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications // *J. Lightwave Technol.* 1995. Т. 13. № 4. P. 615–627.

ОБ АВТОРАХ

Степанов Иван Васильевич, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники»

METADATA

Title: Integrated optical time delay line numerical simulation in the Ansys Lumerical software

Author: I.V. Stepanov¹

Affiliation:

¹ Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ stepanov.iv@ugatu.su

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 1 (32), pp. 104-112, 2025. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: The paper presents an approach to numerical modeling of integrated optical delay lines in the Ansys Lumerical software. Within the framework of the presented approach, delay lines based on a Mach-Zehnder interferometer and a microring resonator implemented on a generalized silicon-on-insulator platform with a waveguide layer thickness of 220 nm were considered. To control the components, an electro-optic effect was used, providing a change time of the controlled value of the order of nanoseconds. The proposed approach can be used to develop integrated photonics devices that involve time delay control.

Keywords: integrated photonics, numerical simulation, optical time delay lines, Ansys Lumerical.

About author:

Stepanov Ivan Vasilivech, junior researcher, research laboratory "Sensor systems based on integrated photonics devices" (UUST).