

УДК 539.23

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛЯТОРА
С ПЛАВНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ ФАЗОЙ
В ЕГО ПЕТЛЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Воронков Г.С., Степанов И.В., Иванов В.В., Кутлюяров Р.В., Грахова Е.П.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация, voronkov.gs@ugatu.su

Аннотация: Работа посвящена вопросам моделирования элементов интегральной фотоники, необходимых для плавного управления выходной частотой оптоэлектронного осциллятора путем контроля интегрированной оптической линии задержки в контуре его обратной связи. Показано, что для плавного для управления частотой оптоэлектронного осциллятора можно использовать линии задержки на основе интерферометра Маха-Цендера или на основе микрокольцевого резонатора, а процесс перестройки может быть реализован за счет термооптического или электрооптического эффекта. Показано, что крутизна графика зависимости вносимой задержки от приложенного напряжения, для микрокольцевого резонатора слишком велика, чтобы обеспечить плавную перестройку частоты, а наименьший шаг перестройки можно получить при использовании линии задержки на основе микрокольцевого резонатора, управляемого за счет электрооптического эффекта.

Ключевые слова: численное моделирование; оптоэлектронный осциллятор; фотонная интегральная схема; радиофотоника.

I. ВВЕДЕНИЕ

Оптические методы генерации сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний являются перспективной альтернативой традиционным схемам, основанным на использовании полупроводниковых активных приборов. При этом стоит отметить, что в большей части современных СВЧ-генераторов используются транзисторы, изготовленные с использованием арсенида галлия *GaAs*, обладающие относительно малым диапазоном перестройки частоты [1,2]. Методы радиофотоники же позволяют достичь существенного диапазона перестройки частот, при этом одной из самых простых и экономичных схем оптических генераторов СВЧ-колебаний является оптоэлектронный осциллятор (ОЭО) [3,4]. Классический ОЭО состоит из источника лазерного излучения, электрооптического модулятора, режекторного фильтра, фотодетектора, усилителя электрического сигнала и элемента, запасующего энергию [5]. Большинство разработанных ранее ОЭО реализованы на основе дискретных оптических компонентов, обладающих относительно большими массой и габаритами [3]. Их снижение возможно при использовании технологий интегральной фотоники [6] за счет реализации оптической части ОЭО на фотонной интегральной схеме (ФИС) с дальнейшей интеграцией оптической и электрической частей на одной печатной плате [7,8]. Примеры реализации ОЭО на ФИС можно найти, например, в работах [9–12]. Однако, в фундаментальных работах по ОЭО [3,13] рассматривается обычно управление частотой за счет изменения резонансной длины волны режекторного фильтра. Шаг перестройки частоты ОЭО при этом оказывается значительно больше, чем у электрических аналогов [14,15]. При условии фиксированной оптической длины петли обратной связи ОЭО он определяется областью свободной дисперсии ОЭО и составляет порядка нескольких десятков кГц при использовании электрического режекторного фильтра, диапазон перестройки которого ограничивает и диапазон генерируемых ОЭО частот. В то же время, для электрических генераторов шаг перестройки частоты может достигать 0,001 Гц с применением схем фазовой автоподстройки частоты [16,17].

Снизить шаг перестройки частоты ОЭО можно при использовании альтернативного метода управления ею, основанного на изменении фазового набега в петле обратной связи ОЭО за счет включения в нее дополнительно электрического фазовращателя или перестраиваемой оптической линии задержки (ЛЗ) [14,16]. Использование решений такого позволит обеспечить непрерывную перестройку частоты СВЧ-сигнала на выходе ОЭО. Наша работа посвящена моделированию компонентов ФИС, необходимых для непрерывного управления выходной частотой интегрального ОЭО, в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 1.

II. Моделирование элементов системы

В интегральной фотонике выделяют два метода управления фазовым набегом оптического излучения: фазовый сдвиг (*PS – phase shift*) и действительная временная задержка (*TTD – true time delay*) [18]. Первый метод реализуется за счёт изменения эффективного показателя преломления интегрального оптического волновода (например, на основе термооптического или электрооптического эффекта). Второй метод часто реализуется за счёт дискретного изменения пути прохождения света,

соответственно, вносимая временная задержка изменяется дискретно. Однако в интегральной фотонике представлены решения с непрерывным изменением вносимой временной задержки [19–21].



Рисунок 1. Структурная схема интегрального ОЭО, дополненного ЛЗ

Существенным недостатком метода фазового сдвига является зависимость фазового набега от длины волны и более высокие потери по сравнению с методом действительной временной задержки [22]. Этот недостаток обусловил выбор метода TTD в нашем исследовании.

Непрерывная перестройка временной задержки была продемонстрирована для ИМЦ [19,23], МКР [24] и волноводной брэгговской решётки [21]. Наиболее выгодными вариантами с точки зрения технологичности производства являются ИМЦ и МКР [25], которые и будут рассмотрены в нашем исследовании.

а. Моделируемые структуры и эффекты

Моделирование производилось для платформы «кремний-на-изоляторе» (КНИ). Геометрия волноводов и численные модели нагревательного элемента и полупроводникового диода в волноводе, разработанные в программном пакете Ansys Lumerical DEVICE, приведены на рис. 2.

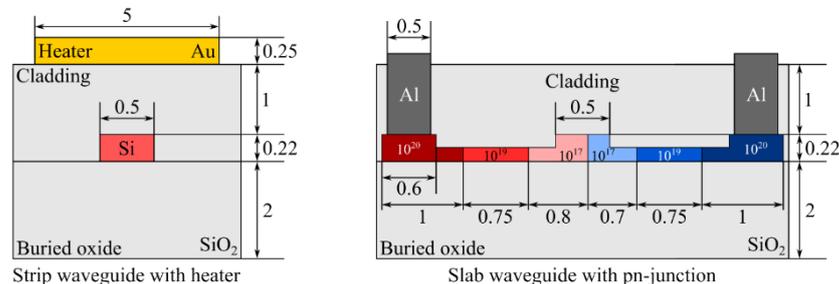


Рисунок 2. Геометрические параметры волновода с нагревательным элементом и полупроводникового диода. Все размеры приведены в мкм. У волновода с pn-переходом оттенки красного показывают области с примесями р-типа, синего – примесями n-типа

б. Результаты моделирования

На рис. 3 и 4 приведены полученные зависимости временных задержек для ЛЗ на основе ИМЦ и МКР соответственно. Видно, что значительная крутизна характеристики МКР при использовании термооптического эффекта не позволит обеспечить малого шага перестройки частоты ОЭО. Однако, такая схема может найти применение в сенсорных системах.

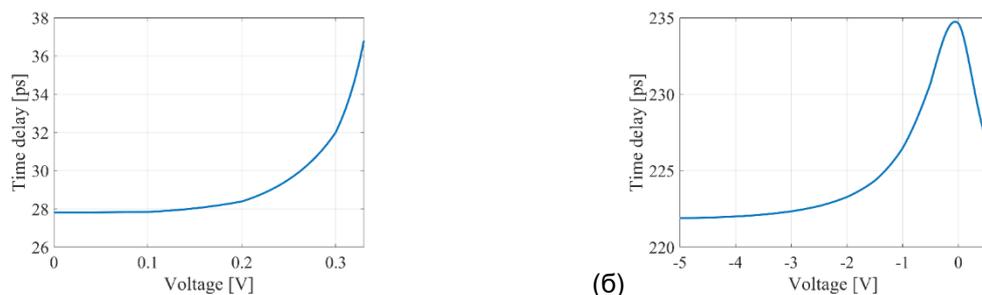


Рисунок 3. Зависимости вносимых временных задержек от приложенного к управляющему контакту напряжения для термооптического (а) и электрооптического ИМЦ (б)

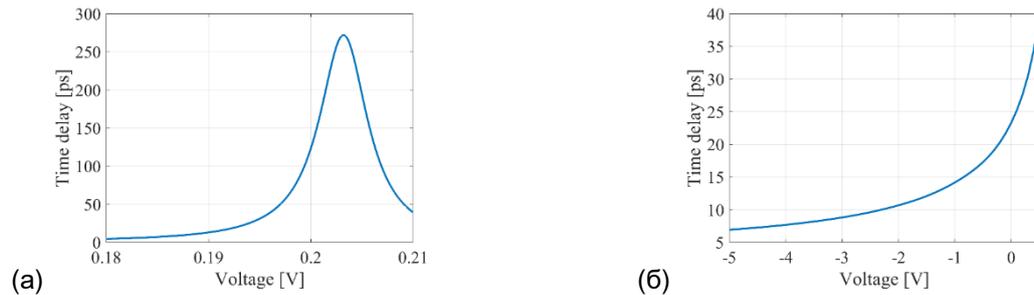


Рисунок 4. Зависимости вносимых временных задержек от приложенного к управляющему контакту напряжения для термооптического (а) и электрооптического МКР (б). Расчёт выполнен для длины волны 1550,4 нм

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты моделирования ЛЗ, предназначенных для плавного изменения частоты выходных колебаний ОЭО, на основе ИМЦ и МКР. Показано, что ЛЗ на ИМЦ обеспечивают шаги перестройки задержки 49,4 пс/В (термооптический ИМЦ), 8,25 пс/В (электрооптический ИМЦ), а МКР – 28611,43 и 3,49 пс/В (термооптический и электрооптический, соответственно). Таким образом, минимального шага перестройки частоты ОЭО можно добиться при использовании ЛЗ на МКР, управляемом электрооптическим эффектом.

БЛАГОДАРНОСТЬ

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».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 24-24.5GHz Tx Multifunction. United Monolithic Semiconductors, 2012.
- [2] 18.10 GHz to 26.60 GHz Quadband VCO. Analog Devices, 2020.
- [3] Maleki L. The optoelectronic oscillator // *Nature Photon.* 2011. Vol. 5, № 12. P. 728–730.
- [4] Li M. et al. Tutorial on optoelectronic oscillators // *APL Photonics.* 2021. Vol. 6, № 6. P. 061101.
- [5] Ivanov V. et al. PIC-based opto-electronic oscillator for communication and sensing applications // *J. Opt. Technol.* 2023. Vol. 90, № 12. P. 719.
- [6] Pelucchi E. et al. The potential and global outlook of integrated photonics for quantum technologies // *Nat Rev Phys.* 2021. Vol. 4, № 3. P. 194–208.
- [7] Tang J. et al. An integrated optoelectronic oscillator // 2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). Beijing: IEEE, 2017. P. 1–4.
- [8] Zhang W., Yao J. Silicon Photonic Integrated Optoelectronic Oscillator for Frequency-Tunable Microwave Generation // *J. Lightwave Technol.* 2018. Vol. 36, № 19. P. 4655–4663.
- [9] Han J.-Y. et al. Wideband frequency-tunable optoelectronic oscillator with a directly modulated AlGaInAs/InP integrated twin-square microlaser // *Opt. Express.* 2018. Vol. 26, № 24. P. 31784.
- [10] Do P.T. et al. Wideband tunable microwave signal generation in a silicon-micro-ring-based optoelectronic oscillator // *Sci Rep.* 2020. Vol. 10, № 1. P. 6982.
- [11] Wani M., Azeemuddin S. Optoelectronic Oscillator (OEO) designs: Wide-range tunable Silicon Microring resonator design and Low-noise High frequency Optical Mix Oscillator design // *OSA Advanced Photonics Congress 2021.* Washington, DC: Optica Publishing Group, 2021. P. JTU1A.8.
- [12] Weng W. et al. Microresonator Dissipative Kerr Solitons Synchronized to an Optoelectronic Oscillator // *Phys. Rev. Applied.* 2022. Vol. 17, № 2. P. 024030.
- [13] Yao X.S., Maleki L. Optoelectronic microwave oscillator // *J. Opt. Soc. Am. B.* 1996. Vol. 13, № 8. P. 1725.
- [14] Yang B. et al. A Wideband Frequency-Tunable Optoelectronic Oscillator Based on a Narrowband Phase-Shifted FBG and Wavelength Tuning of Laser // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2012. Vol. 24, № 1. P. 73–75.

- [15] Peng H. et al. Wideband tunable optoelectronic oscillator based on the deamplification of stimulated Brillouin scattering // *Opt. Express*. 2017. Vol. 25, № 9. P. 10287.
- [16] Hao T. et al. Perspectives on optoelectronic oscillators // *APL Photonics*. 2023. Vol. 8, № 2. P. 020901.
- [17] Guo A., Qin S., Xu M. A charge pump phase-locked loop with low phase noise based on ring oscillator // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2024. Vol. 2810, № 1. P. 012003.
- [18] McKay L. et al. Integrated microwave photonic true-time delay with interferometric delay enhancement based on Brillouin scattering and microring resonators // *Opt. Express*. 2020. Vol. 28, № 24. P. 36020.
- [19] 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. Vol. 24, № 1. P. 1–8.
- [20] Megret P. et al. Ring resonator-based Tunable Optical Delay Line in LPCVD Waveguide Technology. 2005. P. 79–82.
- [21] Zhang W., Yao J. A fully reconfigurable waveguide Bragg grating for programmable photonic signal processing // *Nature Communications*. 2018. Vol. 9, № 1. P. 1396.
- [22] 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. Vol. 28, № 1. P. 3–18.
- [23] Wang X. et al. Continuously tunable ultra-thin silicon waveguide optical delay line // *Optica*. Optical Society of America, 2017. Vol. 4, № 5. P. 507–515.
- [24] Schwelb O. Transmission, Group Delay, and Dispersion in Single-Ring Optical Resonators and Add/Drop Filters—A Tutorial Overview // *J. Lightwave Technol.* 2004. Vol. 22, № 5. P. 1380–1394.
- [25] Su Y., Zhang Y. *Passive silicon photonics devices*. 1st ed. Melville: AIP Publishing, 2022.

SIMULATION OF ELEMENTS OF AN INTEGRATED OPTOELECTRONIC OSCILLATOR WITH SMOOTH FREQUENCY TUNING BASED ON PHASE CONTROL IN ITS FEEDBACK LOOP

G.S. Voronkov, I.V. Stepanov, V.V. Ivanov, R.V. Kutluyarov, E.P. Grakhova

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation, voronkov.gs@ugatu.su

Abstract: The study addresses the challenges in modeling integrated photonics-based elements necessary for the precise control of an optoelectronic oscillator's output frequency. This control is achieved by adjusting the integrated optical delay line within the oscillator feedback loop. The research demonstrates that for smooth frequency control, delay lines based on either a Mach-Zehnder interferometer or a microring resonator can be utilized. The tuning process can be implemented through thermo-optical or electro-optical effects. However, it is noted that the steepness of the delay versus applied voltage curve for a microring resonator is too high to ensure smooth frequency tuning. The smallest tuning step is achieved using a delay line based on a microring resonator controlled by the electro-optical effect.

Keywords: numerical simulation; optoelectronic oscillator; photonic integrated circuit; radiophotonics.