

Моделирование характеристик интегрального кремниевого электрооптического модулятора на основе интерферометра Маха-Цендера

И.Е. Кустов, Г.А. Зарецкая

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: В работе представлены результаты моделирования характеристик интегрального кремниевого электрооптического модулятора на основе интерферометра Маха-Цендера. Произведен расчет электрофизических, оптических и СВЧ характеристик волноведущей структуры, а также получены результирующие рабочие характеристики готового устройства. Показано, что при подаче $2^{16}-1$ псевдослучайной последовательности двоичных чисел при скоростях передачи до 70 Гбит/с определение логических уровней в точке принятия решения не затруднено, фронты сигналов читаемы. При этом полоса пропускания ограничивается величиной 12,3 ГГц по уровню -3 дБ.

Ключевые слова: радиофотоника, системы оптической связи, электрооптический интегральный модулятор Маха-Цендера, амплитудная модуляция

1. Введение

В последнее десятилетие на базе интегральной кремниевой технологии уже реализован ряд новых радиофотонных устройств, которые не могли быть созданы на других технологических платформах. Наиболее интересными приборами с точки зрения интеграции, управления и реализации являются электрооптические модуляторы. Принцип работы и таких модуляторов основан на эффекте дисперсии плазмы [1], который связан с плотностью свободных носителей в полупроводнике. Изменение плотности свободных носителей заряда под действием приложенного напряжения смещения, в свою очередь, приводит к изменению действительной и мнимой части показателя преломления.

В данной работе приводятся основные результаты моделирования кремниевого интегрального электрооптического модулятора, построенного на несбалансированном интерферометре Маха-Цендера, также рассмотрены основные электрофизические, оптические и СВЧ характеристики, приведены результирующие характеристики прибора.

2. Конструкция кремниевого электрооптического модулятора

Рассмотрим подробнее базовую конструкцию модулятора. Как уже говорилось выше, модулятор построен на несбалансированном интерферометре Маха-Цендера. Из анализа литературы следует, что структура обладает высоким значением потерь в оптическом диапазоне частот при положительных напряжениях смещения [2], поэтому расчеты производились только для отрицательных значений напряжения. Длины плеч интерферометра были выбраны 4,25 мм и 4 мм, электродов – 4 мм. Управляющее напряжение смещения при проведении моделирования прикладывалось к более длинному плечу.

Поперечное сечение оптического волновода на основе легированного кремния, в увеличенном масштабе схематично представлено на рисунке 1. Все основные геометрические размеры и материалы также указаны на рисунке. Значения концентраций основных носителей заряда в p и n областях были выбраны на уровне

$5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, соответственно. Концентрации носителей заряда в областях промежуточного легирования p^+ и n^+ составили $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Для создания омического контакта в областях, где структура прилегает к управляющим электродам, были добавлены области p^{++} и n^{++} с концентрациями $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

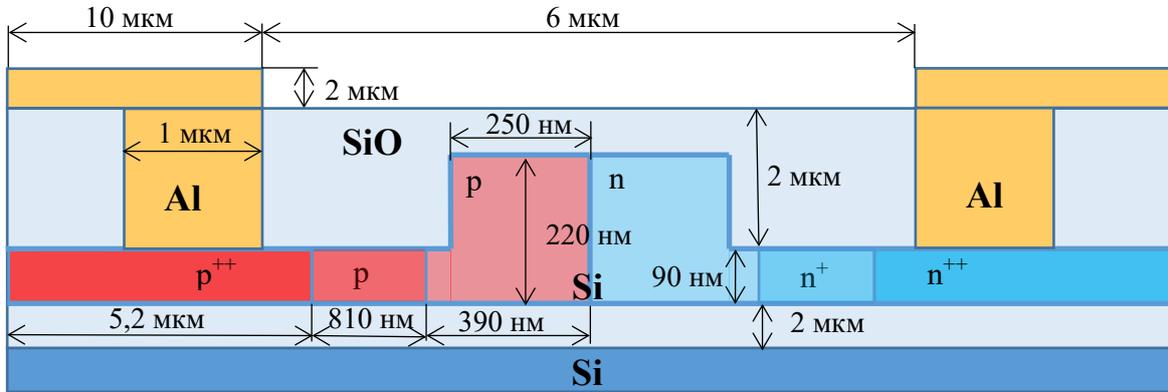


Рисунок 1. Поперечное сечение оптического волновода

3. Моделирование характеристик волноведущей структуры

3.1. Моделирование электрофизических характеристик

Рассмотрим подробнее характеристики волноведущей структуры в зависимости от приложенного напряжения смещения. Для этого на первом этапе в программном пакете ANSYS Lumerical в модуле CHARGE был произведен расчет электрофизических характеристик. Были получены значения погонной емкости при постоянном и переменном высокочастотном напряжении и значения погонного высокочастотного сопротивления структуры (см. рисунок 2). Для удобства визуализации полученных результатов знак «минус» при графическом представлении информации опускался.

Из рисунков видно, что с увеличением обратного напряжения смещения происходит уменьшение значения емкости, а также увеличение значения погонного сопротивления, что обусловлено увеличением ширины обедненной области (см. рисунок 3). При этом с увеличением частоты малосигнального возбуждения их значение уменьшается.

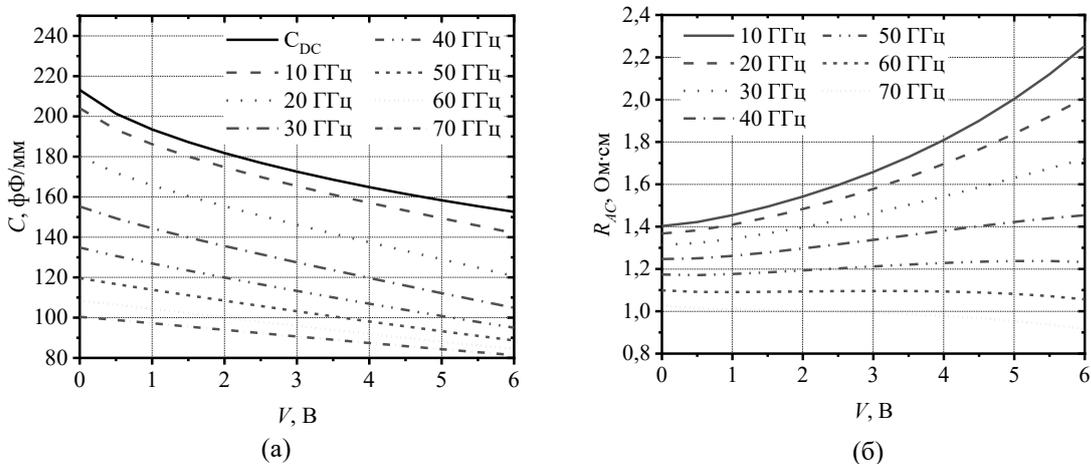


Рисунок 2. Зависимость погонных ёмкости (а) и сопротивления (б) волноведущей структуры от обратного напряжения смещения при переменном управляющем сигнале

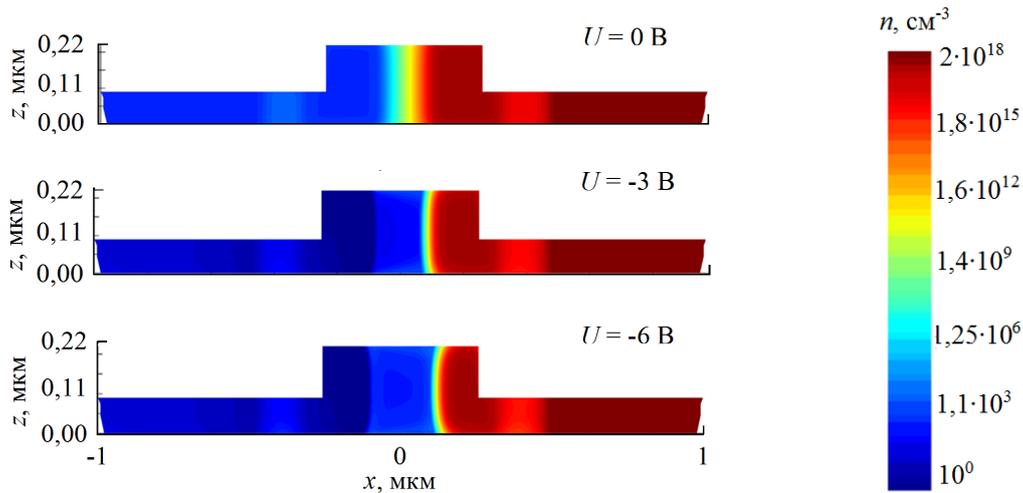


Рисунок 3. Распределение носителей заряда (электронов) в поперечном сечении структуры в зависимости от приложенного напряжения смещения

3.2. Моделирование оптических характеристик

Для расчета оптических характеристик распределение носителей заряда в поперечном сечении структуры экспортировалось в модуль MODE пакета ANSYS Lumerical.

Результирующие характеристики изменения эффективного показателя преломления (Δn_{eff}), группового показателя преломления (Δn_g), значения потерь (α_{dB}), а также эффективности модуляции ($V_{\pi}L$) от приложенного постоянного обратного напряжения смещения представлены на рисунке 4. Значения Δn_{eff} и Δn_g определялись по отношению к значению при напряжении 0 В. Моделирование проводилось для длины волны $\lambda = 1550$ нм.

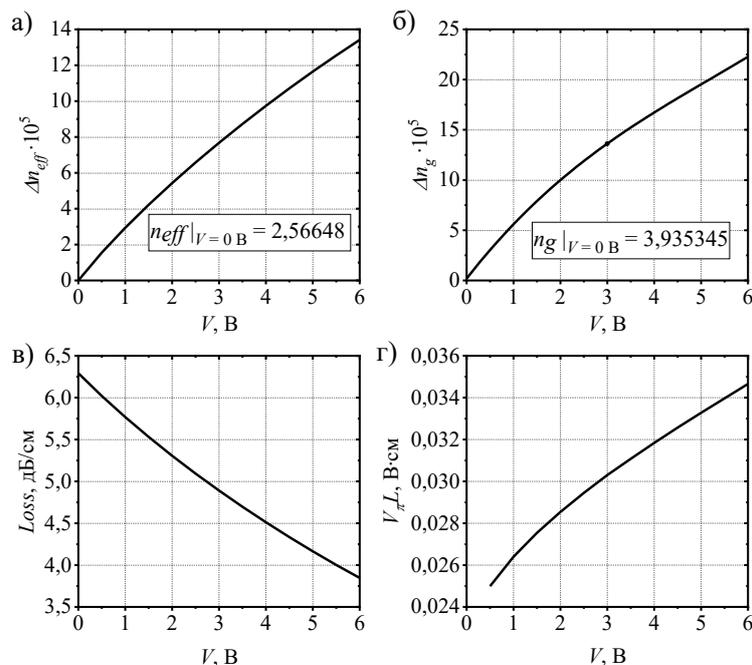


Рисунок 4. Характеристики волноведущей структуры в оптическом диапазоне: изменения эффективного показателя преломления (а), изменения группового показателя преломления (б), потерь (в), эффективности модуляции (г) от обратного напряжения смещения

Из рисунков видно, что с увеличением значения обратного напряжения смещения и, соответственно, уменьшением количества свободных носителей заряда в волноведущей области, происходит увеличение значений Δn_{eff} и Δn_g и уменьшение значения a_{dB} , что коррелирует с теорией [1].

Параметр $V_\pi L$ (см. рисунок 4(г)), в свою очередь, характеризует эффективность модулятора и/или фазовращателя и описывается произведением напряжения смещения на длину, обеспечивающую фазовый сдвиг π радиан [3]. Заметим, что с ростом обратного напряжения смещения наблюдается рост значения параметра $V_\pi L$, что соотносится как с теоретическим соотношением [4], так и данными, полученными в работах [2, 5-8].

3.3. Моделирование СВЧ характеристик

Рабочие характеристики готового модулятора определяются не только электрофизическими и оптическими параметрами. Наибольший вклад в суммарные потери в структуре модулятора или уменьшение полосы пропускания вносят физические ограничения, которые могут быть определены только при анализе поведения структуры в СВЧ-диапазоне [9].

Анализ структуры в СВЧ-диапазоне производился на основе произведенного ранее анализа в модуле MODE и учитывал, как конечную проводимость и геометрию контактов, так и электрофизические характеристики структуры, определенные ранее. На рисунке 5 представлены основные характеристики волноведущей структуры в СВЧ-диапазоне, полученные для напряжения 0 В и обратного смещения 1,5 В. Отметим, что значение обратного смещения 1,5 В было выбрано в качестве рабочего для расчета характеристик конечного устройства.

Рисунок 5 (а) демонстрирует, уменьшение значения группового показателя преломления с ростом частоты СВЧ-сигнала и напряжения обратного смещения. Также на рисунке показано значение n_g оптического сигнала. Отметим, что наилучшее согласование при напряжении обратного смещения 1,5 В достигается вблизи частоты 11.6 ГГц.

Значение полного импеданса структуры составляет около 43 Ом (см. рисунок 5 (б) и (в)), а суммарное влияние изменений в системе иллюстрирует график зависимости потерь от частоты (см. рисунок 5 (г)). Можно заметить, что с ростом обратного напряжения смещения происходит уменьшение потерь.

3.4. Моделирование результирующих характеристик электрооптического модулятора

Далее для получения характеристик передачи данных, связанных с модулятором, использовался программный пакет ANSYS Lumerical, модуль INTERCONNECT. Данные, необходимые для проведения расчета, экспортировались из модулей MODE и CHARGE.

Рисунок 6 (а) показывает результирующую характеристику передачи модулятора в оптическом диапазоне частот при различных значениях обратного напряжения смещения. Отметим, что при изменении напряжения смещения от 0 В до минус 6 В осуществляется перестройка структуры примерно на 0,9 нм (~113 ГГц).

На рисунке 6 (б) представлена характеристика передачи электродов бегущей волны модулятора в СВЧ-диапазоне при напряжении смещения -1.5 В и амплитуде сигнала 0,5 В. Как видно из рисунка, полоса пропускания электродов бегущей волны модулятора ограничивается величиной 12,28 ГГц по уровню минус 3 дБ

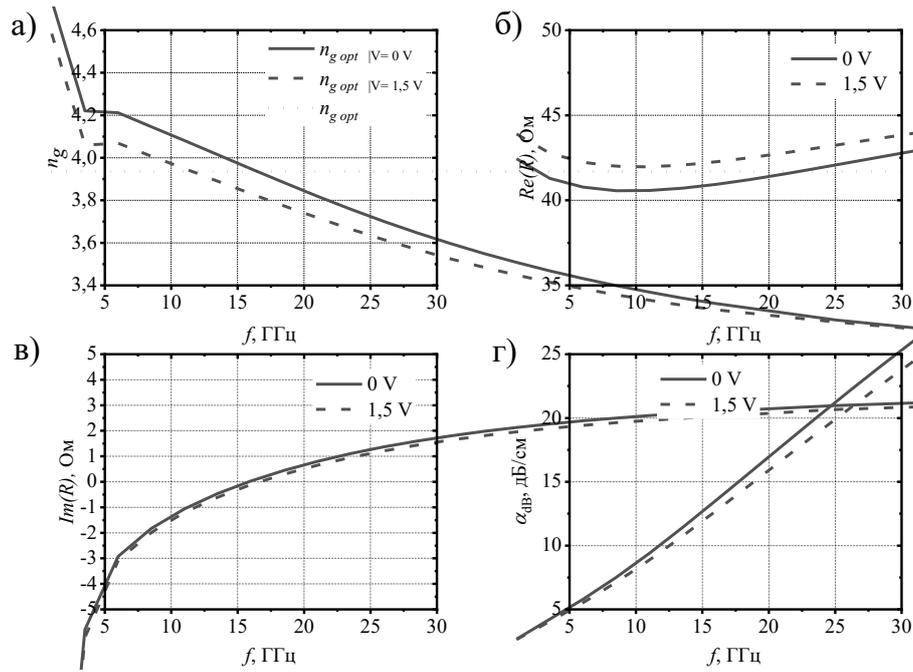


Рисунок 5. Характеристики волноведущей структуры при исследовании на СВЧ: а) зависимость группового показателя преломления от частоты, б) зависимость реальной части импеданса от частоты, в) зависимость мнимой части импеданса от частоты, г) зависимость потерь в структуре от частоты,

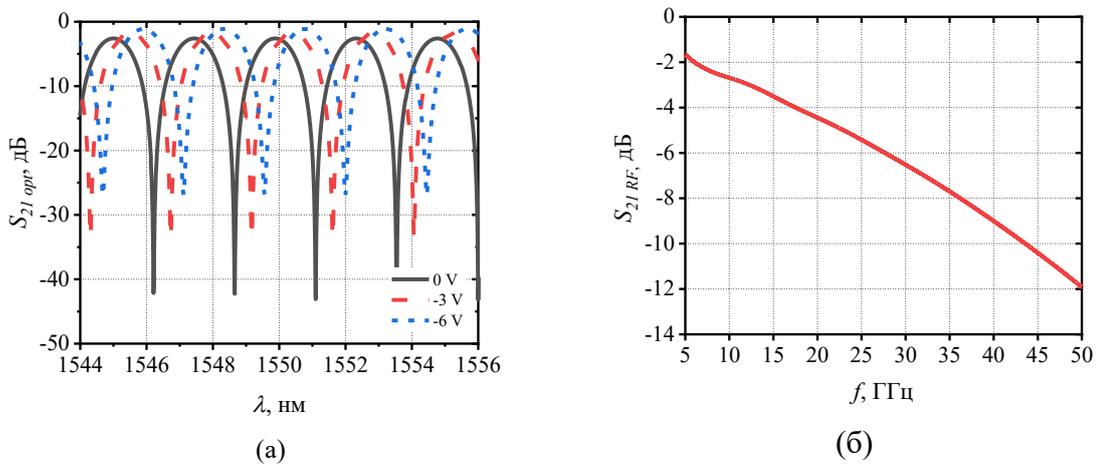


Рисунок 6. Зависимости характеристики передачи модулятора в оптическом диапазоне при различных значениях обратного напряжения смещения (а); характеристики передачи модулятора в СВЧ-диапазоне при напряжении смещения -1.5 В и амплитуде сигнала 0,5 В (б)

Изначальная задача модулятора – работа с цифровыми последовательностями данных. Для анализа характеристик устройства в таком случае необходимо воспользоваться глазковыми диаграммами, которые отражают отклик системы на воздействие сигнала с узкой заданной полосой. Данный способ анализа цифровых последовательностей является наиболее наглядным и позволяет мгновенно определить качество передачи информации по цифровому каналу связи. Глазковые диаграммы для модулятора, исследуемого в работе, представлены на рисунке 7. Результаты были получены на длине волны несущего сигнала 1550,77 нм, при обратном напряжении смещения 1,5 В и амплитуде колебания 0,5 В. Битовая последовательность задавалась с помощью 2^{16} -1 псевдослучайной последовательности

двоичных чисел (PRBS). Глазковая диаграмма при скорости передачи 20 Гбит/с (рисунок 7 (а)) показывает минимальные дрожания сигнала (jitter), определение логических уровней в точке принятия решения не затруднено, глаз практически полностью «открыт», фронты сигналов читаемы. Так как модулятор предназначен в том числе для интеграции в КМОП технологию, то можно судить о стабильной работе в схемах с логикой, которая имеет три состояния.

По мере роста скорости передачи (рисунок 7 (б-е)) увеличиваются дрожания фронтов. При этом определение логических уровней в точке принятия решения не затруднено, фронты сигналов читаемы вплоть до скоростей передачи до 70 Гбит/с. Полученные данные схожи с результатами, которые были описаны в работах [2, 5-8], поэтому можно считать их корректными.

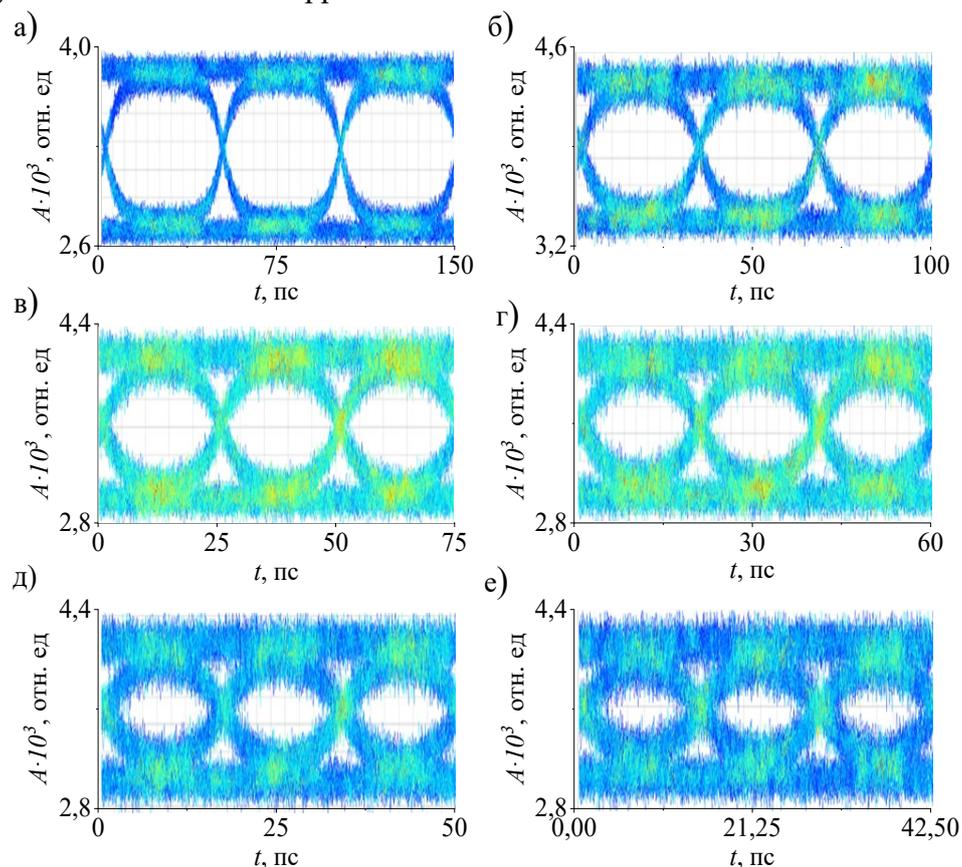


Рисунок 7. Глазковые диаграммы модулятора при скоростях передачи 20 Гбит/с (а), 30 Гбит/с (б), 40 Гбит/с (в), 50 Гбит/с (г), 60 Гбит/с (д), 70 Гбит/с (е)

4. Заключение

Таким образом в работе представлены результаты расчета характеристик передачи интегрального кремниевого электрооптического модулятора на основе интерферометра Маха-Цендера. Произведено численное исследование характеристик модулятора заданной базовой геометрии. Показано, что при подаче псевдослучайной последовательности $2^{16}-1$ двоичных чисел при скоростях передачи до 70 Гбит/с определение логических уровней в точке принятия решения не затруднено, фронты сигналов читаемы. При этом полоса пропускания электродов бегущей волны модулятора ограничивается величиной 12,3 ГГц по уровню -3 дБ.

Список литературы

1. Soref, R.A., Bennett B.R., Electrooptical Effects in Silicon // IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS. – 1986.– Vol. 23. – Is. 1. – P. 123-129.
2. Baehr-Jones T., et al., Ultralow drive voltage silicon traveling-wave modulator // Opt. Express. – 2012. – Vol. 20, Issue 11. – P. 12014-12020.
3. Kim Y., Jin T., Bae Y., A comparative simulation study on lateral and L-shaped PN junction phase shifters for single-drive 50 Gbps lumped Mach–Zehnder modulators // Japanese Journal of Applied Physics. – 2021. – Vol. 60, Issue 5. – P. 052002.
4. Шалимова, К. В. Физика полупроводников: Учебник – 4-е изд., стер. – СПб : Издательство «Лань», 2010. – 400 с.
5. Ding R., et al., High-Speed Silicon Modulator With Slow-Wave Electrodes and Fully Independent Differential Drive // Journal of Lightwave Technology. – 2014. Vol. 32, Issue 12. – P. 2240–2247.
6. Patel D., et al., Design, analysis, and transmission system performance of a 41 GHz silicon photonic modulator // Optics Express. – 2015. Vol. 23, Issue 11. – P. 14263-14287.
7. RG J. S., Sivasubramanian J. S., Modelling and analysis of a corrugated PN junction phase shifter in silicon MZM // Silicon. – 2022. – Vol. 14, Issue 6. – P. 2669–2677.
8. Mishra D., Sonkar R. K., Effect of Wafer Tilt During Ion Implantation on the Performance of a Silicon Traveling-Wave Mach-Zehnder Modulator // IEEE Access. – 2021. Vol. 9. – P. 149993–150003.
9. Ding R., et al., Design and characterization of a 30-GHz bandwidth low-power silicon traveling-wave modulator // Optics communications. – 2014. – Vol. 321. – P. 124–133.