

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Usman, M. Recent progress in atomistic modelling and simulations of donor spin qubits in silicon / M. Usman // Computational Materials Science. – 2021. – Vol. 193. – P. 110280.
2. Semiconductor spin qubits / G. Burkard [et al.] // Reviews of Modern Physics. – 2023. – Vol. 95, № 2. – P. 025003.
3. Baruffa, F. Spin-orbit coupling and anisotropic exchange in two-electron double quantum dots / F. Baruffa, P. Stano, J. Fabian // Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics. – 2010. – Vol. 82, № 4. – P. 045311.
4. Exchange coupling in silicon quantum dots: Theoretical considerations for quantum computation / Q. Li [et al.] // Phys. Rev. B. – 2010. – V. 81, № 8. – P. 085313.
5. Calderon, M.J. Exchange coupling in semiconductor nanostructures: Validity and limitations of the Heitler-London approach / M.J. Calderon, B. Koiller, S. Das Sarma // Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics. – 2006. – Vol. 74, № 4. – P. 045310.
6. Gate-induced ionization of single dopant atoms / G.D.J. Smit [et al.] // Physical Review B. – 2003. – Vol. 68. – P. 193302.
7. Fang, A. Effect of J-gate potential and uniform electric field on a coupled donor pair in Si for quantum computing / A. Fang, Y.C. Chang // Phys. Rev. B. – 2002. – Vol. 66. – P. 155331.
8. 3D two-electron double quantum dot: Comparison between the behaviour of some physical quantities under two different confinement potentials in the presence of a magnetic field / A.M. Maniero [et al.] // Physica B: Condensed Matter. – 2023. – Vol. 657. – P. 414818.

КРЕМНИЕВЫЙ ТЕРМООПТИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ПО СХЕМЕ МАХА-ЦЕНДЕРА: КОНСТРУКЦИЯ И ДИЗАЙН УСТРОЙСТВА

Г. А. Лемешевская¹, А. А. Скрылев¹, А. В. Нежданов¹, К. В. Сидоренко¹,
А. И. Бобров¹, Д. Е. Николичев¹

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского Россия,
603022 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23
e-mail: lemeshevskaya@unn.ru*

Создана математическая модель термооптического интерферометра Маха-Цендера, выполненного по технологии «кремний на изоляторе». Модель позволяет прогнозировать распределение тепла в субмикронной структуре при её нагреве, а также связанное с этим изменение оптических характеристик исследуемой микросистемы. Проведено сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными. Результаты анализа позволили найти калибровочный коэффициент для математической модели, с использованием которых возможно достоверно прогнозировать поведение схожих планарных оптических систем, работающих на термооптическом эффекте. При этом в расчётах могут варьироваться параметры активной области: её материал, форма и топология.

Ключевые слова: кремниевая фотоника; термооптический эффект; интерферометр Маха-Цендера; кремний на изоляторе.

SILICON THERMO-OPTICAL INTERFEROMETER BASED ON THE MACH-ZEHNDER SCHEME: CONSTRUCTION AND DESIGN OF THE DEVICE

G. A. Lemeshevskaya¹, A. A. Skrylev¹, A. V. Nezhdanov¹, K. V. Sidorenko¹,
A. I. Bobrov¹, D. E. Nikolichev¹

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
Corresponding author: G. A. Lemeshevskaya (lemeshevskaya@unn.ru)

A mathematical model of a Mach-Zehnder thermo-optical interferometer made using the silicon-on-insulator technology has been developed. The model allows one to predict the heat distribution in a submicron structure during its heating, as well as the associated change in the optical characteristics of the microsystem under study. The calculated results have been compared with the experimental data. The results of the analysis allowed us to find a calibration coefficient for a mathematical model, using which it is possible to reliably predict the behavior of similar planar optical systems operating on the thermo-optical effect. In this case, the parameters of the active region can vary in the calculations: its material, shape and topology..

Key words: silicon photonics; thermo-optic effect; Mach-Zehnder interferometer; silicon on insulator.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интегральная фотоника является одним из быстро развивающихся направлений науки. В отличие от электроники передача информационного сигнала в фотонных интегральных схемах (ФИС) осуществляется не электронами, а с помощью фотонов, что, как ожидается, обеспечит повышение быстродействия вычислительных устройств [1]. Наиболее перспективной платформой для проведения исследований в соответствующем направлении является система «кремний на изоляторе». Использование кремния в качестве активной оптической среды позволяет упростить организацию производства ФИС за счет использования стандартной материально технической базы предприятий микроэлектронной промышленности. К преимуществам кремниевой фотоники также следует отнести возможность интеграции на одном микрочипе большого количества фотонных пассивных и активных компонентов, таких как оптические приемники, усилители, модуляторы и многое другое [2, 3].

Одним из основных компонентов в фотонных устройствах является планарный интерферометр по схеме Маха-Цендера [4]. Его конструкция представляет собой систему оптических волноводов, в которой один волновод делится на два независимых плеча, которые, в свою очередь, на некотором расстоянии снова объединяются в один волновод. Модуляция света осуществляется за счет изменения показателя преломления оптически-активной среды в одном из плеч относительно другого. Если разница в набеге фазы лазерного излучения в плечах интерферометра стремится к нулю, то система находится в «открытом» состоянии, при этом на выходе регистрируется максимум интенсивности. В противном случае имеет место снижение выходного сигнала, вплоть до его полного гашения, когда лазерное излучение приходит к

точке слияния плечей интерферометра в противофазе – в этом случае имеет место «закрытое» состояние.

Тепловое воздействие позволяет управлять показателем преломления кремниевых планарных оптических волноводов, и, как следствие, осуществлять модуляцию лазерного излучения [5]. При этом для оптимизации конструкции интерферометра с целью повышения её функциональных характеристик, а также для снижения рисков при производстве ФИС необходимо создание достоверной математической модели, прогнозирующей характеристики субмикронных структур при их нагреве.

В работе представлены результаты разработки и верификации математической модели интерферометра Маха-Цендера на основе системы «кремний на изоляторе» с термооптическим элементом в качестве фазовращателя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для создания математической модели использовался программный пакет COMSOL Multyphysics® в совокупности с набором встроенных модулей для расчёта теплопередачи и процессов протекания электрических токов. В рамках используемых модулей решаются упрощенное уравнение теплопроводности (1) и закон Ома в дифференциальной форме (2).

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) = Q, \quad (1)$$

где k – коэффициент теплопроводности [Вт/м·К], T – температура [К], Q – источники тепла [Вт/м³].

$$J = \sigma E, \quad (2)$$

где J – плотность тока [А/м²], σ – электропроводность [См/м], E – электрическое поле [В/м].

Модель представляет собой кремниевую подложку толщиной 400 мкм с нанесенным сверху тонким слоем SiO₂ толщиной 6,5 мкм, внутри которого расположены два волноводных плеча интерферометра Маха-Цендера из кремния. Для реализации термооптического эффекта над одним из волноводов располагается нагревательный элемент из TiN, температура которого изменяется вследствие протекания через него электрического тока.

В математической модели для нахождения наилучшей топологии интерферометра Маха-Цендера варьировались геометрические параметры волноводов и нагревателя. После этого анализировались данные о температурном градиенте. Результаты работы одной из моделей представлены на рисунке 1, где отмечены отдельные значения

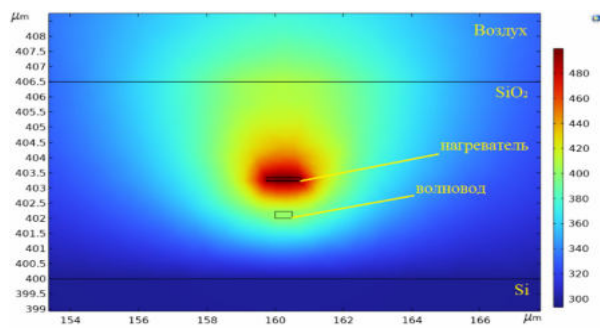


Рис. 1. Пример распределения тепла внутри структуры по результатам моделирования

температур волновода и нагревательного элемента. Дополнительно рассчитывались вольтамперные характеристики.

Для верификации и калибровки математической модели были созданы прототипы планарных кремниевых модуляторов Маха-Цендера с термооптическим элементом. При этом использовалось плазмохимическое осаждение для формирования тонких плёнок, а также проекционная фотолито-

графия совместно с плазмохимическим травлением для получения топологического рисунка. Изготовление структур производилось на материально-технической базе Филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ НИИИС им. Ю. Е. Седакова. Измерение параметров модулятора было осуществлено через введение в него оптического излучения с длиной волны 1,55 мкм и подачу на контакты нагревательного элемента напряжения с лабораторного блока питания в диапазоне от 0 до 10 В. При этом регистрировалась мощность оптического излучения на выходе из интерферометра в зависимости от электрического воздействия на нагреватель.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из литературных данных известно, что разность фаз имеет двойную температурную зависимость [6]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial T} = \frac{2\pi L}{\lambda} \left(\frac{\partial n_{Si}}{\partial T} + \alpha n_{Si} \right), \quad (3)$$

где $\partial \varphi$ – разность фаз, T – температура, n_{Si} – показатель преломления кремния, λ – длина волны оптического излучения, L – длина отрезка кремния, в котором распространяется электромагнитная волна, $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ – коэффициент теплового расширения в кремнии.

При этом также известна температурная зависимость показателя кремния [7]:

$$n_{Si}(T) = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + (d + e \cdot T + f \cdot T^2) \cdot \lambda^h, \quad (4)$$

где T – температура [°C], λ – длина волны оптического излучения [мкм], $a = 3,413$, $b = 1,872 \cdot 10^{-4}$, $c = 4,635 \cdot 10^{-8}$, $d = 0,1635$, $e = 2,4 \cdot 10^{-5}$, $f = 1,398 \cdot 10^{-7}$, $h = -2,33$.

Используя зависимости (3) – (4) и полученные в результате моделирования значения температур волноводов, можно рассчитать выходную интенсивность интерферометра для проведения сравнительного анализа с экспериментальными данными. Аналогично, используя зависимости (3) – (4) и полученные экспериментальные данные о выходной интенсивности, можно решить обратную задачу, рассчитав температуру волноводов для проведения сравнительного анализа с теоретически рассчитанными. Полученные графики зависимостей представлены на рис. 2.

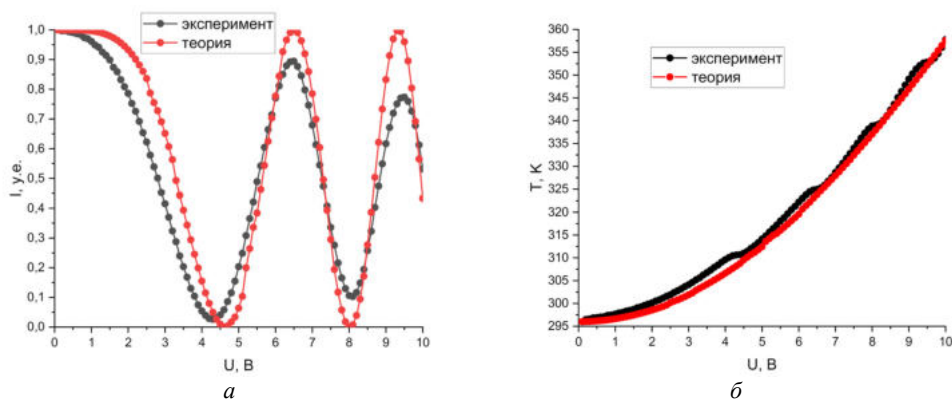


Рис. 2. *а* – Изменение выходной интенсивности интерферометра в зависимости от подаваемого на контакты нагревательного элемента напряжения; *б* – изменение температуры волновода в зависимости от подаваемого на контакты нагревательного элемента напряжения

В результате проведения сравнительного анализа зависимостей определено, что нагрев тестовой структуры происходит медленнее по сравнению с расчётными значениями в 1,75 раз. Это может быть связано с рядом причин, к которым можно отнести наличие паразитного сопротивления на контактах, возникновение потенциального барьера на границе контактов металл-металл, привнесение паразитных химических примесей в TiN-нагреватель и пр. Таким образом, результатом калибровки является определение температурного коэффициента, связывающего математическую модель с экспериментальными результатами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана модель интерферометра по схеме Маха-Цендера с термооптическим элементом, используемым для реализации фазового смещения. На основе данных моделирования спроектирован и изготовлен экспериментальный образец соответствующей приборной структуры. В результате сравнительного анализа произведена верификация математической модели, а также определен калибровочный температурный коэффициент для повышения точности последующих расчетов.

В части математического моделирования работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWR-2022-0007. В части эксперимента исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 «Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров. Этап 2023–2025».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Белоус А.И., Красников Г.Я., Солодуха В.А. Основы проектирования субмикронных систем. - М.: Техносфера, 2020.
2. Doerr CR Silicon photonic integration in telecommunications. *Front. Phys.* 3:37. doi: 10.3389/fphy.2015.00037.
3. Maxime Jacques, Alireza Samani, Eslam El-Fiky, David Patel, Zhenping Xing, and David V. Plant. Optimization of thermo-optic phase-shifter design and mitigation of thermal crosstalk on the SOI platform // *Opt. Express* 27, 10456–10471 (2019).
4. George Giamougiannis, Apostolos Tsakyridis, Miltiadis Moralis-Pegios, Christos Pappas, Manos Kirtas, Nikolaos Passalis, David Lazovsky, Anastasios Tefas and Nikos Pleros. Analog nanophotonic computing going practical: silicon photonic deep learning engines for tiled optical matrix multiplication with dynamic precision // *Nanophotonics*. - 2022. - №12(5). - pp. 963–973.
5. Магунов Н.В. Лазерная термометрия твердых тел. - М.: Физматлит, 2001.
6. G. Cocorullo, F. G. Della Corte and I. Rendina Temperature dependence of the thermo-optic coefficient in crystalline silicon between room temperature and 550 K at the wavelength of 1523 nm // *Applied physics letters*. - 1999. - №74. - P. 3338.
7. Магунов А.Н., Лукин О.В. Оптические методы измерения температуры полупроводниковых кристаллов в диапазоне 300 - 800 К (обзор) // *Микроэлектроника*. - 1996. - №2. - С. 97–111.