

Фотонная интегральная схема со встроенными триггером и перестраиваемой референсной ветвью для оптической когерентной томографии

И.В. Степанов
Уфимский университет науки и технологий
Уфа, Россия
stepanov.iv@ugatu.su

Е.А. Талынев
Уфимский университет науки и технологий
Уфа, Россия
talynev2001@mail.ru

А.А. Иванов
Уфимский университет науки и технологий
Уфа, Россия
ivanov.aa@ugatu.su

Е.П. Грахова
Уфимский университет науки и технологий
Уфа, Россия
grakhova.ep@ugatu.su

Р.В. Кутлюяров
Уфимский университет науки и технологий
Уфа, Россия
kutluyarov.rv@ugatu.su

Аннотация— В статье представлен дизайн фотонной интегральной схемы (ФИС), предлагающий высокую степень интеграции структурных блоков, необходимых для реализации системы оптической когерентной томографии (ОКТ) с перестраиваемым источником. Топология чипа включает интерферометр, оптический триггер и перестраиваемую референсную ветвь. Модель ФИС разработана для платформы нитрид кремния, функционирование устройства предполагается во втором окне прозрачности (центральная длина волны 1310 нм). Моделирование устройства произведено с использованием программного обеспечения Ansys Lumerical. Результаты численного моделирования показывают эффективность предлагаемой ФИС.

Ключевые слова— оптическая когерентная томография, фотонные интегральные схемы, ОКТ с перестраиваемым источником, интегральный триггер

1. ВВЕДЕНИЕ

Фотоника открывает новые перспективы в медицинской диагностике, в частности для неинвазивной визуализации структуры различных тканей. Существенный прогресс был достигнут в сфере оптической когерентной томографии (ОКТ), которая применяется в офтальмологии, кардиологии и многих других областях медицины [1]. Однако коммерческие устройства для ОКТ, построенные на дискретных оптических компонентах, имеют большие габариты и неприменимы для эндоскопических и интраоперационных исследований, что ограничивает потенциальные возможности метода. Реализация даже частичного функционала системы на основе технологии интегральной фотоники позволит значительно увеличить компактность устройства, улучшить общую производительность и снизить цену.

Полная интеграция оптической и оптоэлектронной частей ОКТ на одной фотонной интегральной схеме (ФИС) является сложной задачей, привлекающей внимание множества исследователей. На ФИС реализованы три основных метода ОКТ: временная (time domain) [2], спектральная (spectral domain) [3] и с перестраиваемым источником (swept-source). Последние два метода обеспечивают наибольшую частоту сканирования (200 кГц против 400 Гц у временного метода), благодаря отсутствию механически изменяемой референсной ветви. Подход с перестраиваемым источником наиболее привлекателен для реализации на ФИС, так как не требует наличия высокочувствительной камеры и встроенного спектроанализатора. Также, предлагаемый метод меньше подвержен искажению изображения при движении исследуемого объекта.

Среди всех ранее представленных систем ОКТ с перестраиваемым источником (ПИ-ОКТ) на основе ФИС большая часть не выходит за уровень готовности технологии, больше чем концепция, подтвержденная в лабораторных условиях (TRL 3-4) [4]. Также на текущий момент, большинство исследований предлагает интегральную реализацию лишь отдельных элементов, например, управляемой референсной ветви [5].

Ключевым шагом для реализации полностью интегральной системы ПИ-ОКТ, является включение в топологию ФИС дополнительных функциональных компонентов схемы, таких как оптический триггер для запуска цикла цифровой обработки сигнала (ЦОС) [6], и перестраиваемая референсная ветвь. Применение триггера на ФИС позволит избавиться от дополнительной постобработки сигнала для калибровки фазы [7]. Реализация интегральной перестраиваемой линии задержки позволит изменять глубину

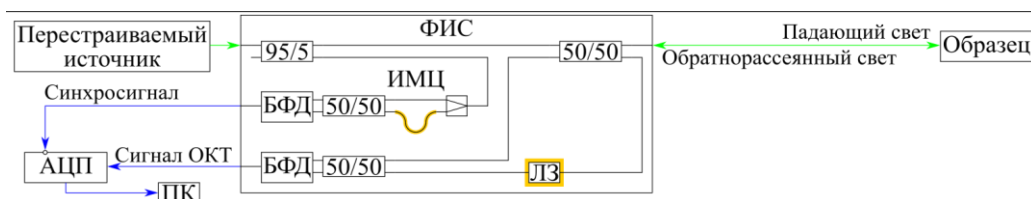


Рис. 1. Предлагаемая концепция системы ОКТ на основе ФИС: БФД – балансный фотодиод; ИМЦ – перестраиваемый интерферометр Маха-Цендера; ЛЗ – управляемая линия задержки; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер. Синим цветом показаны электрические сигналы, зеленым – оптические. Желтым цветом отображены нагревательные элементы

сканирования ткани и регулировать расстояние до сканируемого объекта.

2. СХЕМА УСТРОЙСТВА

Схема устройства представлена на Рис. 1. Свет от узкополосного источника с перестройкой длины волны в диапазоне от 1260 нм до 1360 нм поступает в ФИС через торцевой ввод. Далее, свет делится многомодовым интерферометром (ММИ) в соотношении 95/5 между плечом ОКТ и интегральным триггером, соответственно. Все многомодовые интерферометры в схеме могут быть заменены широкополосными направленными ответвителями, которые тем не менее гораздо более чувствительны к ошибкам фабрикации.

В свою очередь, в плече ОКТ сигнал делится в равных пропорциях между референсной ветвью и плечом образца. Свет, прошедший через плечо образца, выводится через торцевой ввод и падает на исследуемый образец, получаемое при этом обратнорассеянное излучение, попадает обратно на ФИС через торцевой ввод и идёт через короткое верхнее плечо к ММИ. Вторая половина мощности, проходит через референсную ветвь (управляемая линия задержки) и интерферирует с обратнорассеянным светом в нижнем ММИ (Рис. 1). В это же время 5% мощности сигнала проходят к разбалансированному интерферометру Маха-Цендера (ИМЦ), который рассчитан таким образом, чтобы в начале цикла работы перестраиваемого источника амплитуда на выходе триггера стремилась к 0. В случае применения АЦП с инвертирующим входом нулевой сигнал будет запускать цикл ЦОС.

Длина линии задержки рассчитана таким образом, чтобы так называемая «точка нулевой задержки», соответствующая равному времени прохождения света в плече образца и референсной ветви, находилась в непосредственной близости от края ФИС.

3. МОДЕЛИ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В дизайне ФИС содержатся следующие элементы: многомодовые интерферометры с коэффициентами деления 50/50 и 95/5, сплиттер, управляемая линия задержки и фотодиоды. Исполнение последних в зависимости от полупроводниковой платформы может быть интегральным или дискретным, также существует возможность гибридной интеграции.

Сплиттер и ММИ, соединенные между собой, образуют ИМЦ. При этом разность длин волноводов рассчитана таким образом, чтобы обеспечить область дисперсии более чем 100 нм. Соблюдение данного условия необходимо для того, чтобы триггер срабатывал один раз за период перестройки длины волны лазера.

Модель ФИС разработана для платформы нитрид

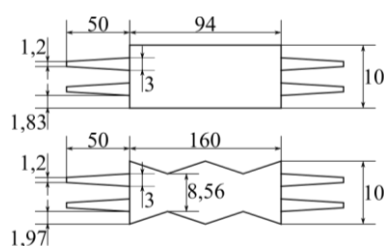


Рис. 2. Структуры многомодовых интерферометров с коэффициентами деления 50/50 (сверху) и 95/5 (снизу). Все размеры указаны в мкм

кремния. Все волноводы обладают высотой 450 нм и шириной 1200 нм для обеспечения одномодового режима работы устройства. Размеры многомодовых интерферометров были рассчитаны по формулам, представленным в работах [8,9]. Размеры использованных структур представлены на Рис. 2.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге, была предложена ФИС для систем ОКТ со встроенными интерференционной схемой, триггером и перестраиваемой референсной ветвью. Производство данной ФИС предполагается на основе платформы нитрид кремния (Si₃N₄), однако она может быть произведена на любой другой полупроводниковой платформе.

Результаты моделирования показали, что при расстоянии сканирования до 5 мм частота ОКТ сигнала не превышает 17 ГГц. Данная частота находится в полосе пропускания большинства интегральных и дискретных высокоскоростных фотодиодов [10]. Временная погрешность срабатывания оптического триггера незначительна и может быть компенсирована температурной подстройкой. Нагрев референсной ветви позволяет изменять глубину сканирования с минимальным шагом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники», государственное задание Минобрнауки России, код научной темы #FEUE-2021-0013, соглашение № 075-03-2021-014

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Optical coherence tomography: technology and applications. 1st ed. / edited by W. Drexler and J.G. Fujimoto – Heidelberg: Springer Berlin, 2008. – 1346 p.
- [2] Culemann, D. Integrated optical sensor in glass for the optical coherence tomography (OCT) / D. Culemann, A. Knuettel, E. Voges // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron – 2000. – Vol. 6(5). – P. 730–734.
- [3] Ruis, R.M. Decreasing the Size of a Spectral Domain Optical Coherence Tomography System With Cascaded Arrayed Waveguide Gratings in a Photonic Integrated Circuit / R.M. Ruis, A. Leinse, R. Dekker, R.G. Heideman, T.G. van Leeuwen, D.J. Faber // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2019. – Vol. 25(1). – P. 1–9.
- [4] Rank, E.A. Miniaturizing optical coherence tomography / E.A. Rank, A. Agneter, T. Schmoll, R.A. Leitgeb, W. Drexler // Transl. Biophotonics. – 2022. – Vol. 4(1–2). – P. e202100007.
- [5] Ji, X. On-chip tunable photonic delay line / X. Ji, X. Yao, Y. Gan, A. Mohanty, M.A. Tadayon, C.P. Hendon, M. Lipson // APL Photonics. – 2019. – Vol. 4(9). – P. 090803.
- [6] Kutluyarov, R.V. Devices for backscattered and reflected signals processing based on integrated photonics / R.V. Kutluyarov, D.M. Fatkhiev, G.S. Voronkov, A.Kh. Sultanov // SPIE-Intl Soc Optical Eng. – 2020. – P. 69.
- [7] Huang, Y. Wide-field high-speed space-division multiplexing optical coherence tomography using an integrated photonic device / Y. Huang, M. Badar, A. Nitkowski, A. Weinroth, N. Tansu, C. Zhou // Biomed. Opt. Express - Vol. 8(8). - P. 3856–3867.
- [8] Soldano, L.B. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications / L.B. Soldano, E.C.M. Pennings // J. Light. Technol. – 1995 – Vol. 13(4). – P. 615–627.
- [9] Domenech, J.D. Arbitrary Coupling Ratio Multimode Interference Couplers in Silicon-on-Insulator / J.D. Domenech, J.S. Fandino, B. Gargallo, P. Munoz // J. Light. Technol. – 2014 – Vol. 32(14). – P. 2536–2543.
- [10] Liu, J. A Review on the Recent Progress of Silicon-on-Insulator-Based Photodetectors / J. Liu, S. Cristoloveanu, J.A. Wan // Phys. status solidi. – 2021 – Vol. 218(14). – P. 2000751.