

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ В ВОЛНОВОДАХ ИЗ НИТРИДА КРЕМНИЯ РАЗЛИЧНОЙ ШИРИНЫ

А.И. Проходцов
НИУ ВШЭ,

Департамент электронной инженерии
МИЭМ НИУ ВШЭ

Аннотация

В этой работе нами была экспериментально измерена временная задержка света в волноводах различной длины и ширины, выполненных в виде спирали на чипе из нитрида кремния.

Введение

Целью работы являлась разработка, изготовление интегральных оптических линий задержки на нитриде кремния и экспериментальное измерение временной задержки сигнала в них. Разрабатываемые нами устройства могут быть использованы в радиофотонике, высокостабильных СВЧ-генераторах, в процессах обработки оптических сигналов, а также при конструировании квантово-оптических интегральных микросхем [1, 2], в том числе со сверхпроводниковыми однофотонными детекторами [3].

Дизайн линий задержки

Дизайн линий задержки был выполнен в среде программирования Python виде длинного волновода, закрученного в спираль, что позволяло значительно уменьшить габаритные размеры линии. На концах спирали были спроектированы решеточные элементы связи (англ. Focusing Grating Couplers, FGCs) для последующего тестирования устройств в телекоммуникационном диапазоне длин волн (вблизи 1550 нм) [4].

На рис. 1 показан массив линий задержки разной длины. В нижнем ряду чипа расположены калибровочные структуры фиксированной длины 327 мкм, которые служили для измерения эффективности ввода света. Для измерения задержки, были использованы только первые три нижние строчки матрицы.

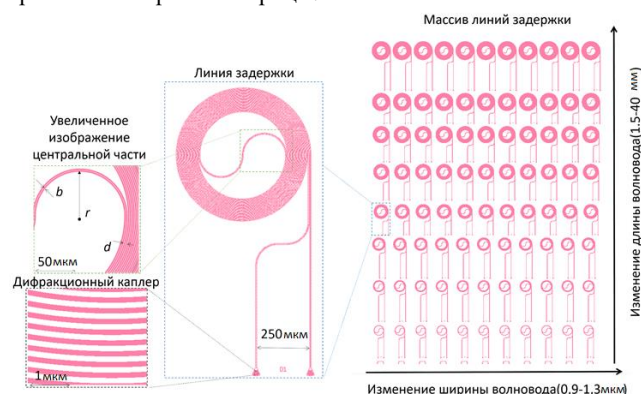


Рис. 1. Массив линий задержки с различными параметрами длины и ширины волновода

Для расчета групповой задержки при известной длине была использована формула:

$$\tau = \frac{l}{c/n_g}$$

где l - длина структуры, c - скорость света, n_g - групповой показатель преломления.

Длина структуры задавалась нами в программном коде, а групповой показатель преломления находится по формуле

$$n_g = n_{eff} - \lambda_0 \left(\frac{dn_{eff}}{d\lambda_0} \right),$$

где n_{eff} - эффективный показатель преломления, рассчитанный нами в COMSOL Multiphysics для данной геометрии, λ_0 - длина волны света в вакууме (1550 нм).

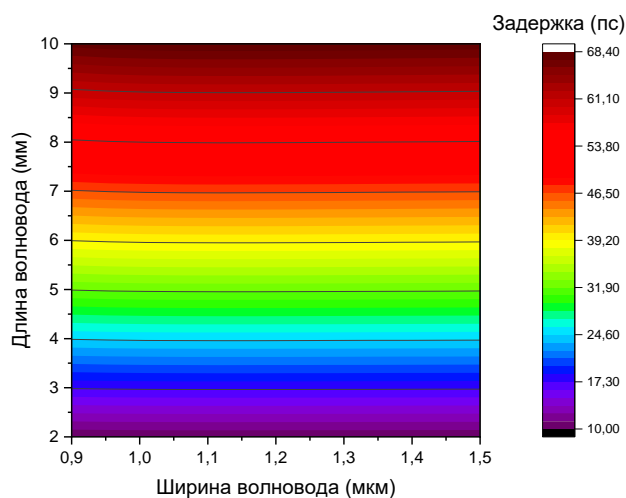


Рис. 2. Расчетная зависимость задержки сигнала от длины и ширины волновода

Из рис. 2 видно, что при увеличении длины и ширины волновода увеличивается величина задержки сигнала.

Изготовление линий задержки

Для изготовления линии задержки на чипе был применен следующий технологический маршрут:

1. Нанесение позитивного резиста толщиной 300 нм (ZEP 520A);
2. Формирование структур линий задержки методом электронной литографии, которая происходит электронного литографа CABL 9000C. При этом ускоряющее напряжение составляет 50 кВ, ток пучка 150 пА с дозой 14 мкК/см²;
3. Проявление резиста в O-Xylene, время проявления - 50 с, остановка процесса проявления - в изопропиловом спирте (ИПС) за 1 мин;
4. Плазмохимическое травление на установке Corial 200R. Рабочие газы: Ag и CHF₃ (скорость травления 2 нм/с)

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Свет от лазерного источника (New Focus TLB-6600) был подключён к чипу используя массив волокон. Свет через первый контроллер поляризации проходил амплитудный модулятор (Photline MXER-LN-10), подключенный к выходу векторного анализатора цепей (Agilent E8363B). Второй контроллер поляризации использовался нами для согласования оптического волокна и оптического волновода. Интенсивность света на входе в оптическое волокно измерялась с помощью оптического измерителя мощности. Оптический микроскоп использовался нами для предварительного совмещения с массивом оптоволокон, в то время как более точное совмещение происходило путем регулировки положения столика с помощью пьезоэлектрических двигателей (Newport). После прохождения интегральной линии задержки выходной сигнал регистрировался быстрым фотодиодом (Hamamatsu G9801), подключенным ко входу векторного анализатора цепей. Векторный анализатор цепей постепенно менял частоту модуляции света на амплитудном модуляторе в диапазоне от 1 до 9 ГГц. Если длина линии была фиксирована, то увеличению частоты модуляции приводило к изменению амплитуды сигнала, которая и измерялась в эксперименте. Аппроксимировав зависимость фазы сигнала от частоты линейной функцией, находилось время оптической задержки.

Для того, чтобы избавиться от задержки, связанной с разностью длин оптоволокон в массиве, которая не связана со спиральными линиями на чипе, а также чтобы исключить потери на ввод/вывод света, сначала нами проводилось измерение коротких оптических линий, расположенных внизу чипа (калибровочные структуры). А затем, после калибровки, измерялись непосредственно исследуемые спиральные линии.

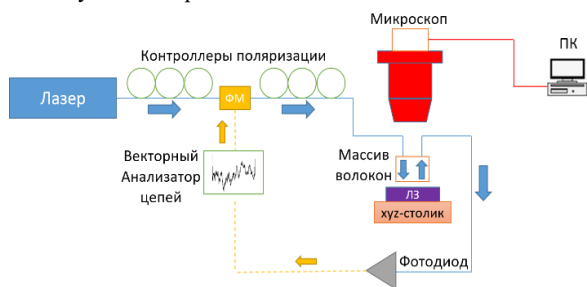


Рис. 3 Схема экспериментальной установки для измерения временной задержки

На рис. 4 показано соотношение задержки сигнала и потери сигнала в зависимости от длины волновода. Коэффициент возрастания временной задержки сигнала с увеличением длины линии, при фиксированном значении ширины волновода, равной 1,2 мкм, составил $12,35 \pm 0,88$ пс/мм. Вместе с увеличением длины линии увеличивались и потери в ней $4,3 \pm 0,05$ дБ/мм.

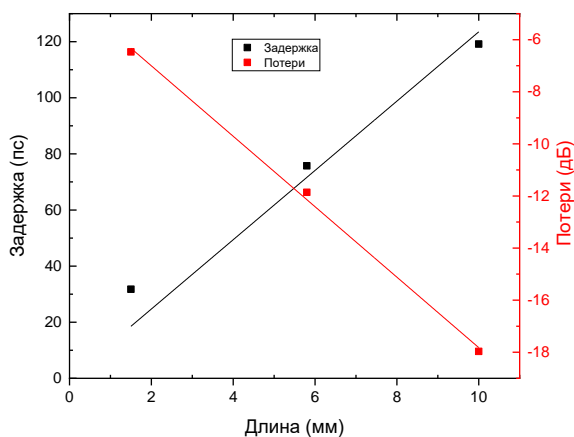


Рис. 4 Зависимость задержки оптического сигнала и потерь в линиях разной длины

На рис. 5. показан график зависимости временной задержки (выделена цветом) как от длины, так и от ширины волновода. Отдельно показано сечение графика, демонстрирующее зависимость временной задержки от длины линии, при фиксированной ширине волновода (1,115 мкм), а также при фиксированной длине (5,873 мм).

Из полученных данных видно хорошее согласие с численным расчетом.

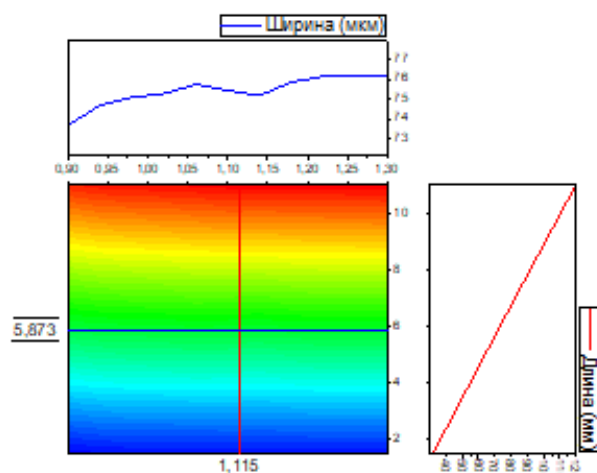


Рис. 5 Зависимость задержки оптического сигнала от ширины волновода

Заключение

Таким образом, в работе были разработаны и экспериментально исследованы временные задержки различной длины и ширины. Коэффициент возрастания временной задержки сигнала с увеличением длины линии, при фиксированном значении ширины волновода, равной 1,2 мкм составил $12,35 \pm 0,88$ пс/мм, а потери в ней $4,3 \pm 0,05$ дБ/мм. Уже в таком виде задержки могут быть использованы в приложениях радиофотоники и интегральной оптики. Дальнейшая работа будет направлена на уменьшение оптических потерь в линии.

Список литературы:

1. Lee H. Ultra-low-loss optical delay line on a silicon chip / Lee H. [et al.] // Nat. Commun. – 2012 – Vol 3 – P. 1–13.
2. Silverstone J. W. Silicon Quantum Photonics / J. W. Silverstone [et al.] // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2016 – Vol 22 – № 6, – P. 309–402.
3. Kahl O. Spectrally multiplexed single-photon detection with hybrid superconducting nanophotonic circuits / Kahl O. [et al.] // Optica – 2017 – Vol 4 – 5 – P.557.
4. Van Laere F. Compact focusing grating couplers for silicon-on-insulator integrated circuits / F. Van Laere [et al.] // Opt. Express – 2007 – Vol 19 – № 21–24 – P. 1919–1921.