

**РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ
НА ЧИПЕ ДЛЯ РАБОТЫ В
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОМ ДИАПАЗОНЕ
ДЛИН ВОЛН**

*А.И. Проходцов, Г.Н. Гольцман
НИУ ВШЭ,
Департамент электронной инженерии
МИЭМ НИУ ВШЭ*

Аннотация

В работе проведена разработка оптических линий задержки при помощи пакета gdsCAD для Python. В частности, произведен расчет дизайна оптических линий задержки и разработан технологический маршрут изготовления на чипе из нитрида кремния.

Введение

Целью работы являлась разработка дизайна и технологического маршрута изготовления интегральных оптических линий задержки на нитриде кремния. Такие устройства могут быть использованы для временной задержки в радиофотонике, высокостабильных СВЧ-генераторах, в процессах обработки оптических сигналов, а также при конструировании квантово-оптических интегральных микросхем [1, 2]. Для уменьшения габаритных размеров линия задержки выполнена в виде длинного волновода, закрученного в спираль. В конце спирали спроектированы фокусирующие решеточные элементы связи для последующего тестирования устройства в телекоммуникационном диапазоне длин волн (вблизи 1550 нм) [3].

Разработка дизайна

Дизайн линии задержки был выполнен в среде программирования Python. Блок-схема разработанной программы показана на рис. 1. Вначале задавались основные параметры спирали: радиус самой малой дуги, ширина волновода и угол. Далее, в зависимости от заданных параметров, в цикле while происходил расчет двух спиралей (w_{g1} и w_{g2}), отличающихся углом поворота (по часовой и против часовой стрелки):

$$w_{g_{1,2}} = r \cdot 2 + k \cdot \frac{d}{2},$$

где r – радиус самой малой дуги, k – коэффициент увеличения радиуса, d – расстояние между полуокружностями (полулугами).



Рис.1. Блок-схема программы для создания оптических линий задержки

После окончания цикла концы спирали соединялись с решеточными элементами связи [3], оптимизированными

для ввода излучения на длине волны 1550 нм. Затем происходило вычисление общей длины линии задержки путем суммирования длин отдельных полулуч. На рис.2 показано полученное изображение линии задержки для электронной литографии представлено и обозначены следующие элементы: 1 – решеточный элемент связи, 2 – волновод, 3 – спираль, 4 – метка с указанием общей длины спирали.

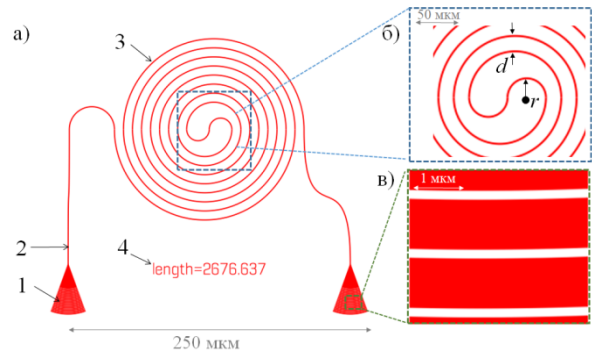


Рис.2. Изображение оптической линии задержки для последующего изготовления методом электронно-лучевой литографии с негативным резистом: а) все устройство; б) увеличенное изображение центральной части спирали; в) увеличенное изображение центральной части решеточного элемента связи.

На рис. 2б показано увеличенное изображение центральной части спирали с указанием ее минимального радиуса, а на рис. 2с – увеличенное изображение центральной части решеточного элемента связи. Красным цветом закрашена область последующей зарисовки электронным лучом.

Для того, чтобы иметь возможность изготавливать линии задержки в позитивном резисте, элементы спирали и решеточные элементы включались в геометрическое объединение, после чего происходило расширение геометрической области спирали на величину $b = 4$ мкм (буффер), а затем следовала операция вычитания исходной области из расширенной (рис. 1). Результат операции показан на рис. 3.

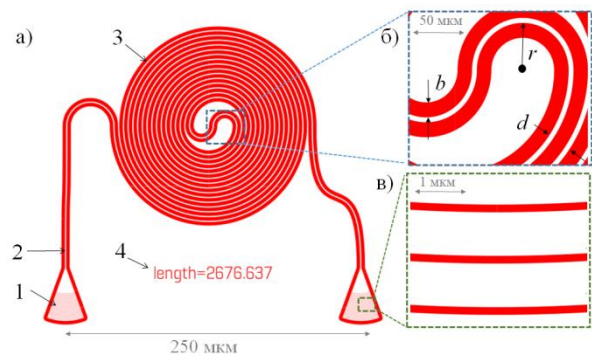


Рис. 3. Изображение оптической линии задержки для последующего изготовления методом электронно-лучевой литографии с позитивным резистом: а) все устройство; б) увеличенное изображение центральной части; в) увеличенное изображение центральной части решеточного элемента связи.

Красной областью показана область зарисовки электронным лучом.

Разработка технологического маршрута изготовления

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

1. Формирование знаков совмещения для фото- и электронной литографии:

1.1. Нанесение позитивного резиста (AZ-1512A). Слой резиста наносится на поверхность чипа, закрепленного на центрифуге. Центрифуга приводится во вращение со скоростью 6000 об/мин. Через 60 секунд на подложке формируется слой резиста толщиной 1,5 мкм. Центрифугирование обеспечивает высокую однородность толщины пленки. После этого пластинка помещается на печку и сушится при температуре 90°C в течение 5 минут;

1.2. Фотоэкспонирование. Процесс экспонирования заключается в нанесении знаков совмещения через фотошаблон на установке MA-56 фирмы Karl Suss. Мощность лампы 250 Вт, длина волны 356,5 нм, время экспонирования 15 с;

1.3. Проявление происходит в слабом растворе КОН 0,7%, время проявления 15 с. Для остановки проявления, пластина промывается в деионизированной воде;

1.4. Осаждение двухслойной металлизации Ti-Au на фоторезист и в проявленные области. Процесс осаждения происходит в вакууме, методом термического испарения;

1.5. Удаление фоторезиста с металлизацией Ti-Au или lift-off процесс.

2. Формирование структуры линии задержки методом электронной литографии (позитивный резист):

2.1. Нанесение позитивного резиста (ZEP 520A) методом центрифугирования. За 60 с при 4000 об/мин формируется толщина резиста 300 нм. После этого происходит сушка резиста при температуре 170°C в течение 1 минуты;

2.2. Электронная литография выполняется на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6380, преобразованном в электронный литограф. При этом ускоряющее напряжение составляет 30 кВ, ток пучка 12 пА с дозой 14 мкК/см²;

2.3. Проявление резиста происходит в O-Xylene, время проявления – 50 с, остановка процесса проявления - в изопропиловом спирте (ИПС) за 1 мин;

2.4. Плазмохимическое травление выполняется на установке Sogial 200R. В этом случае при зажигании емкостного разряда происходит разложение газовой смеси на электроны, ионы и активные радикалы. Травление происходит большей частью за счет активных радикалов. Рабочий газы: Ag и CHF₃;

2.5. Удаление фоторезиста выполняется в растворе N-метил-2-пирролидон (NMP).

В случае использования негативного резиста для электронной литографии, п. 1 технологического маршрута, посвященный созданию знаков совмещения, остается тем же, тогда как для п.2 технологического маршрута изготовления используются модифицированные параметры:

2*. Формирование структуры линии задержки методом электронной литографии (негативный резист):

2.1*. Нанесение негативного резиста (maN-2403) методом центрифугирования. За 60 с при 3400 об./с формируется толщина резиста 300 нм. После этого происходит сушка резиста при температуре 90°C в течение 2-х минут;

2.2*. Электронная литография выполняется на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6380, преобразованном в электронный литограф. При этом ускоряющее напряжение составляет 30 кВ, ток пучка 12 пА с дозой 14 мкК/см²;

2.3*. Проявление резиста происходит в MF-319, время проявления – 60 с, после этого чип обдувается струей воздуха;

2.4*. Плазмохимическое травление выполняется на установке Sogial 200R. В этом случае при зажигании емкостного разряда происходит разложение газовой смеси на электроны, ионы и активные радикалы. Травление

происходит большей частью за счет активных радикалов. Рабочий газы: Ag и CHF₃;

2.5*. Удаление фоторезиста выполняется в растворе N-метил-2-пирролидон (NMP).

Заключение

Таким образом, в работе разработан дизайн линий задержки для электронной литографии, а также технологический маршрут их изготовления на чипе из нитрида кремния [4]. Дальнейшая работа будет посвящена процессу изготовления и тестирования представленных линий задержки, а также их объединению с другими интегральными оптическими элементами включая источники, логические элементы и однофотонные детекторы [5].

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. 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.

4. Bogdanov S. Material platforms for integrated quantum photonics / S. Bogdanov, M. Y. Shalaginov, A. Boltasseva, and V. M. Shalaev // Opt. Mater. Express – 2016 – Vol. 7 – № 1 – P. 111–132.

5. Pernice W. H. P. High-speed and high-efficiency travelling wave single-photon detectors embedded in nanophotonic circuits / W. H. P. Pernice [et al.] // Nat. Commun. – 2012. – Vol. 3 – P. 1325.