

Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова
Физический факультет
Кафедра квантовой электроники

Учёт кросс-воздействия в задаче программирования интерферометра с произвольной архитектурой

Курсовая работа студента 2-го курса
Физического факультета МГУ имени
М.В.Ломоносова Урусовой Ксении

Зав.кафедрой
Обучающийся
Руководитель

профессор, д.ф-м.н. Панов В.И
Урусова К.Н.
н. с. Дьяконов И.В.

Содержание

1	Введение	3
2	Интерферометр	4
2.1	Фазовращатель	4
2.2	Светоделитель	5
2.3	Калибровка фазовращателей.	7
	Список литературы	10

1. Введение

В настоящее время одним из важнейших и развивающихся направлений исследования является интегральная фотоника – область, связанная с разработкой и изготовлением интегральных фотонных схем. В отличие от электронных микросхем, работающих на электрическом токе, интегральные фотонные схемы используют оптическое излучение. Одним из примеров такой схемы является интерферометр. С помощью них становится возможным осуществлять линейные преобразования над излучением, в которое кодируют информацию, и передавать его уже в другие вычислительные схемы. Огромным преимуществом интерферометров является возможность их перестраивать: одно и то же устройство можно перепрограммировать под разные задачи. Благодаря этому один чип может использоваться в широком классе задач. Например, с помощью многопортовых интерферометров возможно выполнять квантовые вычисления (1), и в будущем такие чипы станут основой квантового компьютера – устройства, использующего для кодировки информации кубиты. Также интерферометры используются в таких направлениях как системы машинного обучения (2), оптическая сеть (3), квантовое моделирование (4) и т. д. Однако интерферометры очень чувствительны к ошибкам, которые могут возникать ещё при их изготовлении. Неидеальность элементов, используемых в их архитектуре, могут сильно снизить точность преобразования, осуществляемого чипом. Также в некоторых дизайнах могут возникать ошибки вследствие кросс-воздействия между фазовращателями внутри схемы. Именно тепловые помехи будут изучены в данной работе. Целью работы является построение алгоритма калибровки интерферометра, учитывающего кросс-воздействие внутри чипа. Для её достижения были поставлены следующие задачи: 1. Составление возможных видов зависимости для кросс-токов и моделирование интерферометра. 2. Аппроксимация экспериментальных данных, полученных с помощью 4-канального интерферомет-

ра.

2. Интерферометр

Интерферометр — это оптическое устройство, осуществляемое линейное преобразование подаваемого излучения между некоторым числом каналов. Он состоит из N входящих и выходящих каналов, его строительными элементами являются фазовращатели и светоделители. Преобразование, которое совершает интерферометр, может быть описано с помощью унитарной матрицы U размера $N \times N$:

$$E_{out} = U E_{in}, \quad (1)$$

где E_{in} - столбец $N \times 1$ амплитуд излучения, получаемого на выходе интерферометра, E_{out} - столбец $N \times 1$ амплитуд излучения, подаваемого на вход чипа. Вид U зависит от фаз, установленных на фазовращателях, от характеристик светоделителей, а также от архитектуры интерферометра. Рассмотрим каждый элемент, из которых состоит чип.

2.1. Фазовращатель

В качестве фазовращателей используются элементы, основанные на термооптическом эффекте - явлении зависимости показателя преломления от температуры. Наиболее простая реализация заключается в следующем: на поверхность устройства интегрируется микронагреватель, который при подаче постоянного электрического тока рассеивает тепло за счёт эффекта Джоуля-Ленца и, таким образом, локально увеличивает температуру подложки. Вследствие упомянутого выше термооптического эффекта, при увеличении температуры изменится показатель преломления, что обеспечит разность хода для лучей и, следовательно, необходимую разность фаз (рис. 2.1) Такой подход, несмотря на свою простоту, достаточно стабилен:

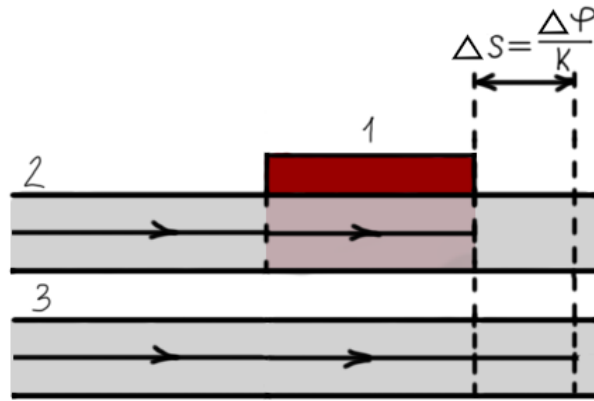


Рис. 2.1. Модель, состоящая из микронагревателя 1 и двух волноводов 2 и 3. По волноводам идут лучи, соответствующие направлению распространения излучения. Так как область под микронагревателем имеет больший показатель преломления, чем остальная часть волновода, то, пока луч в волноводе 2 проходит через эту область, луч в волноводе 3 проходит некоторое расстояние Δs , которое связано с разностью фаз $\Delta\varphi = k\Delta s$, где k – волновое число.

он не приводит к дополнительным потерям интенсивности. Однако, как отмечалось выше, их недостатком является тепловые помехи. Калибровка фазовращателей будет рассматриваться позже в пункте 2.3

2.2. Светоделитель

Светоделитель — это оптическое устройство, разделяющее луч света на проходящий и отраженный. В зависимости от способа изготовления они делятся на два типа: объёмный и интегральный. В нашей работе используются волноводные светоделители – это один из видов интегральных устройств, поэтому рассмотрим их более подробно. Волноводный светоделитель представляет собой несколько волноводов, сближенных близко друг к другу, за счёт чего электромагнитные поля перекрываются и взаимодействуют. Он имеет преимущество перед многими типами светоделителей, поскольку они значительно меньше остальных. Рассмотрим случай двухпортового светоделителя, чтобы понять, как именно он работает. Как следует из названия, он состоит из двух входных и двух выходных портов. При подаче на светоделитель оптического излучения некоторая его часть будет отражаться, а



Рис. 2.2. Схема волноводного двухпортового светоделителя – оптического устройства, разделяющего луч света на проходящий и отражённый, представляющий собой два близко расположенных волновода. На вход подаётся излучение с амплитудами E_1 и E_2 .

некоторая - проходить через него. Таким образом, если подать на входящие каналы излучение с амплитудами E_1 и E_2 , амплитуда E_3 будет суперпозицией прошедшей части E_2 и отраженной части E_1 , а E_4 - отражённой E_2 и прошедшей E_1 (рис. 2.2) Каждый светоделитель может быть представлен в виде унитарного оператора:

$$\begin{pmatrix} E_3 \\ E_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & T \\ T' & R' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где R и R' - коэффициенты отражения, а T и T' - коэффициенты пропускания. В случае симметричного светоделителя $R' = R, T' = T$:

$$\begin{pmatrix} E_3 \\ E_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & T \\ T & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Так как этот оператор унитарный, то справедливо равенство:

$$\begin{pmatrix} R & T \\ T & R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R^* & T^* \\ T^* & R^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

откуда следует, что

$$|R|^2 + |T|^2 = 1 \quad (5)$$

$$RT^* + TR^* = 0. \quad (6)$$

R и T — комплексные числа, поэтому они представимы в виде $R = |R|e^{i\varphi_R}$, $T = |T|e^{i\varphi_T}$, тогда из уравнений 5 и 6 получим:

$$\varphi_R - \varphi_T = \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

И если, $\varphi_R = 0$ и $\varphi_T = \frac{\pi}{2}$, то $R = |R|$, $T = i|T|$. Тогда

$$\begin{pmatrix} E_3 \\ E_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |R| & i|T| \\ i|T| & |R| \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Таким образом, важной характеристикой светоделителя является соотношение, в котором он перераспределяет амплитуды входных оптических сигналов между выходными модами, т. е. значения $|R|^2$ и $|T|^2$. Например, в схеме Клементса, которая была предложена в (5), используется светоделители с (50:50), т. е. 50% света отражается, 50% света проходит.

2.3. Калибровка фазовращателей.

Рассмотрев одни из возможных архитектур интерферометра, перейдём непосредственно к калибровке интерферометра. Её цель - определить начальную фазу φ_0 на этом участке канала и коэффициент пропорциональности α между фазой и силой тока:

$$\varphi = \varphi_0 + \alpha I^2 \quad (9)$$

Калибровка проходит следующим образом: заводится излучение (в данной работе на длине волны 925 нм) в определённый входной канал интерферометра, после чего подаётся ток в некотором диапазоне значений (от 0 до 19.5 мА) на калибруемый фазовращатель. Для каждого значения силы тока регистрируются с помощью фотодиодов значения мощности на выходе из каждого канала. Далее строится зависимость мощности от силы тока, подавае-

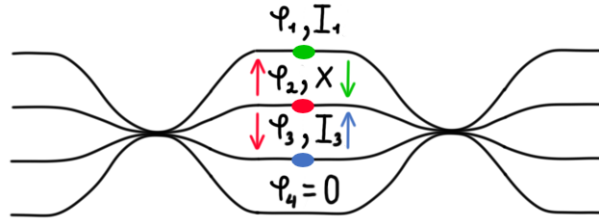


Рис. 2.3. Модель 4-канального интерферометра с 3 фазовращателями. На первый и третий фазовращатели подаются постоянные токи I_1 и I_3 , на втором ток x меняется. С помощью стрелок на рисунке указано направление распространения тепла от разных микронагревателей.

мого на фазовращатель, и после аппроксимации полученных данных получают необходимые значения. Однако зависимость (9) справедлива, если на фазовращатель не оказывают влияние соседние термо-управляющие элементы. При подаче на фазовращатель силы тока он становится источником тепла, которое создаёт дополнительную фазу на калибруемом элементе. В этом случае зависимость фазы будет иметь следующий вид:

$$\varphi = \varphi_0 + \alpha I_0^2 + \sum_{i,j=1}^K \beta_{ij} I_j^2, \quad (10)$$

где β_{ij} - коэффициенты кросс-воздействия, I_j - силы тока на соседних фазовращателях, K - число элементов помимо калибруемого. Таким образом, матрицу, описывающую фазовый слой, можно представить в следующем виде:

$$\Phi = \Phi_0 + AI^2, \quad (11)$$

Φ_0 - вектор начальных фаз, I - матрица сил тока, подаваемых на соответствующие фазовращатели, A - матрица эффективности влияния, элементами которой являются коэффициенты пропорциональности и коэффициенты кросс-воздействия. Например, на рис. 2.3 изображена модель 4-канального интерферометра. На первый и третий фазовращатели подаются постоянные токи I_1 и I_3 , на втором же подаётся ток x в некотором диапазоне. В данном

случае $K = 2$ (калибровка снимается для второго микронагревателя, первый и третий же являются соседними), и зависимости фаз от сил тока для каждого элемента имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \varphi_1^0 + \alpha_1 x^2 + \beta_{12} I_2^2 + \beta_{13} I_3^2 \\ \varphi_2 &= \varphi_2^0 + \alpha_2 I_2^2 + \beta_{21} I_1^2 + \beta_{23} I_3^2 \\ \varphi_3 &= \varphi_3^0 + \alpha_3 I_3^2 + \beta_{31} I_1^2 + \beta_{32} I_2^2,\end{aligned}\tag{12}$$

Наша задача заключается именно в том, чтобы определить, какой же вид имеют коэффициенты β_j : какова их зависимость от расстояния между калибруемым и j -ым термо-управляющими элементами.

Список литературы

- [1] J.Carolan,C.Harrold, C.Sparrow, E.Martin-Lopez, N.J.Russell, J.W.Silverstone, P.J.Shadbolt, N.Matsuda, M.Oguma, M.Itoh, G.D.Marshall, M.G.Thompson, J.C.F.Matthews, T.Hashimoto, J.L.O'Brien,and A.Laing. Universal linear optics. (2015)
- [2] J.Wang, S.Paesani, R.Santagati, S.Knauer, A.A.Gentile, N.Wiebe, M.Petruzzella, J.L.O'Brien, J.G.Rarity, A.Laing,andM.G.Thompson. Experimental quantum Hamiltonian learning. (2017)
- [3] R. Stabile, A. Albores-Mejia, A. Rohit, and K. A. Williams. Integrated optical switch matrices for packet data networks. (2016)
- [4] N.C.Harris, G.R.Steinbrecher, M.Prabhu, Y.Lahini, J.Mower, D.Bunandar, C.Chen, F.N.C.Wong, T.Baehr-Jones, M.Hochberg, S.Lloyd, and D.Englund. Quantum transport simulations in a programmable nanophotonic processor. (2017)
- [5] W. R. Clements, P. C. Humphreys, B. J. Metcalf, W. S. Kolthammer, and I. A. Walsmley. An Optimal Design for Universal Multiport Interferometers. (2017)