

РАЗРАБОТКА ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Е.С. Василевская, В.Ю. Казаков
Томский политехнический университет
paiper@sibmail.com

Введение

В настоящее время велика потребность в измерении малых длин. Примерами данного измерения являются контроль деформации, точность механической обработки, точное позиционирование.

Для измерения малых длин существует большое количество методов, например, емкостные, индуктивные, вихрековые и др [1]. Однако у данных методов есть существенный недостаток – все они подвержены воздействию электромагнитных помех. Хорошей альтернативой являются оптические методы измерения малых перемещений. Однако применение классических оптических методов затрудняет их сложность и дороговизна.

Развитие оптоволоконной и лазерной технологий позволило удешевить элементную базу и повысить их доступность, что дало возможность использовать данные технологии повсеместно.

В данной работе представлен теоретический анализ волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо [2]. На рисунке 1 показана схема датчика малых перемещений, построенного на его основе [3].

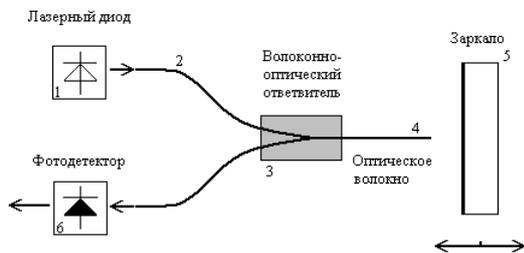


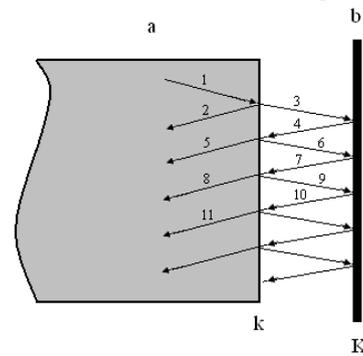
Рис. 1. Схематическое изображение датчика малых перемещений

Его принцип действия заключается в том, что излучение лазерного диода 1 вводится в оптоволоконно 2 и через ответвитель 3 передается на волокно 4. При прохождении излучения через торец волокна (рисунок 2), часть отражается от него, а остальная часть высвечивается в воздух. После отражения от зеркала 5 излучение возвращается обратно в волоконный световод. Луч, отраженный от торца, интерферирует с лучом, отраженным от зеркала, и на фотоприемнике 6 регистрируется интенсивность излучения.

Рассмотрим случай многолучевой интерферометрии, при котором коэффициент отражения зеркала равен K , а торца волокна – k . При этом торец оптоволоконна и зеркало образуют интерферометр Фабри-Перо.

От расстояния между торцом волокна и зеркалом x_0 будет зависеть интенсивность света, отражаемого этим интерферометром обратно в волокно.

Схема интерферометра изображена на рисунке 2. Пусть в волокне интенсивность света будет I_0 (участок 1), тогда от торца волокна отразится $I_0 \cdot k$ (участок 2) интенсивности. Интенсивность света, прошедшего в зазор интерферометра будет равна $I_0 \cdot (1-k)$ (участок 3). От зеркала отразится $I_0 \cdot (1-k) \cdot K$ (участок 4), обратно в волокно попадет $I_0 \cdot (1-k)^2 \cdot K$ (участок 5) и т. д. Видно, что лучи при переотражении будут проходить в волокно с уменьшающейся интенсивностью. При этом каждый луч будет иметь дополнительный набег фазы φ .



а – оптоволоконно, б – зеркало

Рис. 2. Схема интерферометра

Амплитуды света, отражённого интерферометром Фабри-Перо в волокно рассчитываются по формулам (1), (2), (3) и (4).

$$a_1 = a_0 \sqrt{k} \quad (1)$$

$$a_2 = -a_0 (1-k) \sqrt{K} \exp(-i\varphi) \quad (2)$$

$$a_3 = -a_0 (1-k) \sqrt{K} \sqrt{Kk} \exp(-2i\varphi) \quad (3)$$

$$a_4 = -a_0 (1-k) \sqrt{K} \sqrt{(Kk)^2} \exp(-3i\varphi) \quad (4)$$

Тогда интенсивность света, отражённого интерферометром Фабри-Перо в волокно будет определяться по формуле (5).

$$I_n = I_0 \left| \sqrt{k} - \frac{(1-k)\sqrt{K}}{\exp(i\varphi) - \sqrt{Kk}} \right|^2, \quad (5)$$

где φ – набег фазы световой волны за один обход интерферометра Фабри-Перо (т.е. от волокна к зеркалу и назад).

Набег фазы определяется по формуле (6).

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} x_0 \quad (6)$$

Коэффициент отражения торца волокна равен френелевскому коэффициенту отражению на границе стекло-воздух $k=0.04$.

На рисунке 3 изображена кривая изменения интенсивности света отражённого интерферометром, образованного торцом волокна (стекло) $k=0,04$ и зеркалом $K=0,99$ в зависимости от набег

фазы интерферирующих лучей. При смещении зеркала на четверть длины волны значение ϕ будет составлять π . Из рисунка 3 ясно, что интенсивность света принимает минимальное значение при $\phi=2\pi n$, где $n=0,2,4,\dots$. Интенсивность света принимает максимальное значение при $\phi=2\pi(n+1)$.

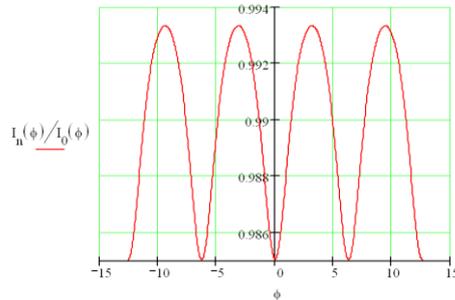


Рис. 3. Кривая изменения интенсивности света

На рисунке 4 представлена зависимость изменения видности (контрастности) интерференционной картины $V(K)=(I_{\max}-I_{\min})/(I_{\max}+I_{\min})$ от изменения коэффициента отражения зеркала K от 0 до 1.

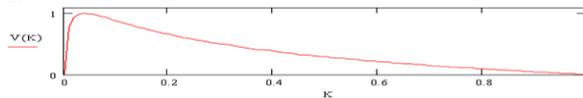


Рис. 4. Зависимость изменения видности (контрастности) интерференционной картины

Интенсивность света $I(K) = (I_{\max} - I_{\min}) / I_0$ в зависимости от коэффициента отражения зеркала K представлена на рисунке 5 (при $I_0=1$).

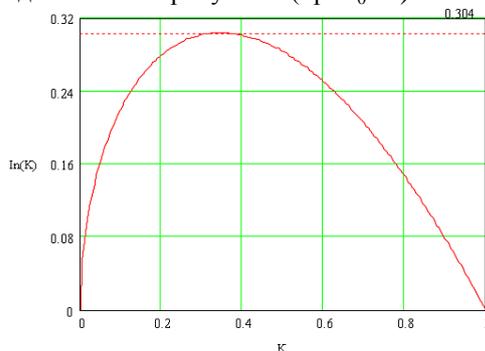


Рис. 5. Кривая изменения интенсивности света

Формулу (5) можно преобразовать к следующему виду:

$$I_n = I_0 \left(1 - \frac{(1-k)(1-K)}{1+kK-2\sqrt{kK}\cos(\phi)} \right) \quad (7)$$

Из формулы (7) видно, что при $K=1$ зеркало будет отражать 100 % света ($I_n=I_0$). На рисунке 6 изображена зависимость интенсивности $I_n(\phi)$ при различных значениях коэффициента отражения зеркала K .

Рисунки 5 и 6 показывают нам, что максимальная контрастность интерференционной картины достигается при коэффициенте отражения зеркала $K \approx 0.05$, однако интенсивность света при данном значении коэффициента примерно в 2 раза меньше максимально возможной.

По формуле (7) определим величину x_0 . Рассчитанное значение ϕ представлено в виде:

$$\phi = \arccos \left(\frac{I_0 - I_n + kK(I_0 - I_n) - (1-k)(1-K)I_0}{2\sqrt{kK}(I_0 - I_n)} \right) \quad (8)$$

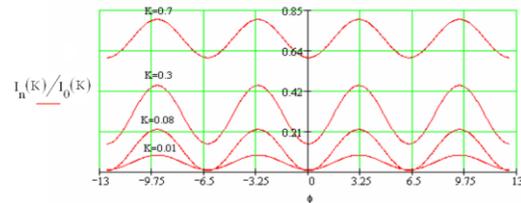


Рис. 6. Кривые изменения интенсивности света

Учитывая формулу (6), можно вывести значение для x_0

$$x_0 = \frac{\lambda \cdot \arccos \left(\frac{I_0 - I_n + kK(I_0 - I_n) - (1-k)(1-K)I_0}{2\sqrt{kK}(I_0 - I_n)} \right)}{4\pi} \quad (9)$$

Формула (9) позволяет определить величину перемещения зеркала x_0 . Однако, следует иметь в виду, что при различных фазах, выходная интенсивность может принимать одинаковые значения (см. рисунок 3). Максимально допустимый сдвиг фаз ϕ , при котором будет произведено корректное измерение интенсивности, будет равен π . Отсюда минимально и максимально возможное перемещение зеркала x_0 (при длине волны 1550 нм) достигает значения 0 нм и 390 нм соответственно. Практически же, минимум определяется пороговой чувствительностью фотоприемника, максимум зависит от способа подсчета максимумов и минимумов.

Заключение

■ Проведен теоретический анализ волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо зависимости расстояния между торцом волокна и зеркалом x_0 от длины волны λ , интенсивности света в волокне I_0 , интенсивности света, отражённого интерферометром Фабри-Перо в волокно, I_n , коэффициентов отражения зеркала K и торца волокна – k . На основе этого можно дать рекомендации для построения интерференционного датчика малых перемещений.

Литература

1. Датчики перемещения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://devicesearch.ru/article/3648> – Загл. с экрана. (дата обращения: 23.05.2014)
2. Волоконно-оптический интерферометр Фабри-Перо [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://physics.nad.ru/sensors/Cyrillic/setup.htm> – Загл. с экрана. (дата обращения: 23.09.2014)
3. Волоконно-оптический интерферометр Фабри-Перо [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://physics.nad.ru/sensors/Cyrillic/interf.htm> – Загл. с экрана. (дата обращения: 23.09.2014)