

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 681.586.54: 621.395

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО МИКРОФОНА

© 2011 г. А. А. Ветров*, канд. техн. наук; С. С. Комиссаров*;
А. Н. Сергушичев*, канд. техн. наук; М. В. Туркин**, канд. техн. наук;
А. А. Ширшов***

* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

** Государственное учреждение Войсковая часть 35533, Москва

*** “Технологический центр” Московского института электронной техники, Москва

E-mail: a_vetrov@mail.ru

Рассмотрен волоконно-оптический микрофон на основе торцевого интерферометра. Проведены теоретический анализ оптико-электронной схемы и экспериментальные исследования присущих ей шумов, определены оптимальные конструктивные параметры схемы по критерию отношения сигнал/шум.

Ключевые слова: волоконно-оптический микрофон, торцевой интерферометр, шумы оптико-электронной схемы.

Коды OCIS: 060.2370, 120.5475.

Поступила в редакцию 08.12.2010.

Введение

Прогресс в развитии оптических технологий, в частности, в области оптической связи и телекоммуникаций, обеспечил широкую рыночную доступность высококачественных волоконно-оптических элементов – излучателей, приемников, коннекторов, разветвителей и т. д. Это обстоятельство открывает широкие возможности построения на современной элементной базе разнообразных волоконно-оптических датчиков различных физических величин.

Одним из простейших устройств такого типа можно считать описанный в предыдущей работе волоконно-оптический торцевой интерферометр (ВОТИ) [1], по сути являющийся двухлучевым интерферометром Фабри–Перо, в котором оптическое излучение частично отражается от торца волокна, а частично выходит в свободное пространство и возвращается в торец волокна внешним отражателем. Такой интерферометр, являясь высокочувствительным датчиком смещения, отличается простой

конструкцией, компактностью, устойчивостью к внешним воздействиям и невысокой стоимостью. Он может служить основой для построения широкого класса датчиков физических величин.

Одним из наиболее очевидных применений такого устройства может считаться волоконно-оптический микрофон, в котором с помощью интерферометра регистрируются колебания подвижной мембраны под действием звукового (акустического) давления. Технологию производства подобных высокочувствительных мембран можно найти, например, в [2].

Преимуществами волоконно-оптического микрофона перед микрофонами других типов можно считать:

- высокую чувствительность,
- полную электро-, искро- и пожаробезопасность вследствие полного отсутствия токоведущих элементов,
- полную невосприимчивость к электромагнитным полям, помехам и возмущениям как индустриального, так и искусственно создан-

ного характера. Это относится как к самому микрофону, так и к оптической линии связи с устройством приема информации;

– вследствие малого затухания в оптическом волокне линия связи от микрофона до регистратора может быть практически неограниченной длины.

В данной работе приведен краткий теоретический анализ волоконно-оптического микрофона, определены его оптимальные конструктивные параметры, приведены экспериментальные результаты измерений его шумов и пороговой чувствительности.

1. Теоретический расчет оптической схемы микрофона

Принципиальная схема волоконно-оптического микрофона (ВОМ), построенного на основе торцевого интерферометра Фабри–Перо (рис. 1), состоит из источника когерентного излучения (И), волоконного оптического направленного ответвителя (НО) и выносного устройства оптического микрофона. К первому плечу НО подключен источник монохроматического светового сигнала – лазер, ко второму плечу – фотодиод (ФД), к третьему плечу поглотитель (отраженная волна отсутствует), на четвертое плечо подключено выносное устройство (ВУ) оптического микрофона. Основным элементом ВУ является чувствительная мембрана, расположенная на расстоянии h от торца одномодового оптического волокна.

При колебаниях мембраны изменяется фаза волны, отраженной от зеркальной поверхности мембраны. Волна, отраженная от мембраны, интерферирует с волной, отраженной от торца волокна. В результате интерференции результирующая волна, распространяющаяся

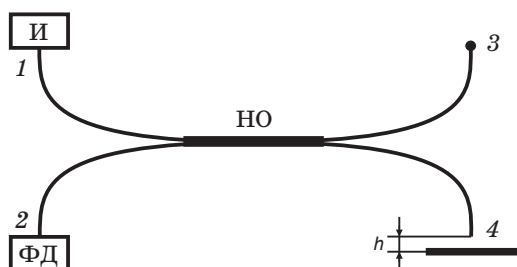


Рис. 1. Схема интерференционного волоконно-оптического микрофона. 1–4 – номера портов (входа/выхода) направленного ответвителя. Пояснения в тексте.

в волокне 4 в направлении к фотодиоду, оказывается промодулирована по амплитуде и фазе в такт с колебаниями мембраны. Модуляция интенсивности отраженного сигнала детектируется в фотодиоде, образуя в результате полезный электрический сигнал, пропорциональный смещениям мембраны. Отличительная особенность оптического микрофона, построенного по данной схеме, – низкие требования к длине когерентности лазерного излучения, так как разность оптических путей двух интерферирующих волн составляет менее 1 мм. Это позволяет использовать максимальную длину световода от НО до ВУ, ограниченную только потерями в оптическом волокне (0,2–0,3 дБ/км).

На рис. 2 представлена схема, поясняющая структуру волн в области между торцом световода и мембраной. Волна от источника лазерного излучения имеет амплитуду C , амплитуда отраженной волны – D . Волна D представляет собой суперпозицию многих волн, возникающих в результате многократных переотражений светового пучка, вышедшего в свободное пространство, между торцом волокна и мембраной. На выходе из волокна существует суммарная квазиплоская волна с амплитудой A , которая при удалении от торца постепенно преобразуется в сферическую. Достигая мембраны, она отражается от нее и возвращается к торцу волокна с амплитудой B (см. рис. 2). Волны A и B также представляют собой суперпозицию волн, возникших в результате многократных переотражений в пространстве между торцом световода и мембраной.

Поставим задачу найти амплитуду отраженной волны D в волокне 4, которая несет информацию о положении отражающей свет мембраны. Пусть мембрана расположена на

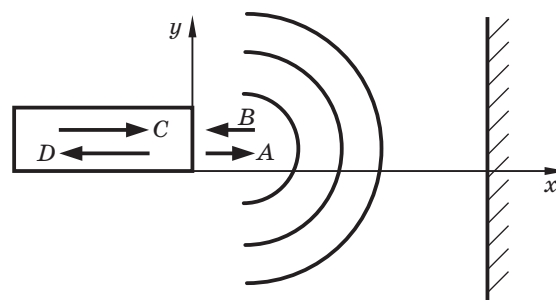


Рис. 2. Структура волн между торцом световода и мембраной. Пояснения в тексте.

расстоянии h от торца световода, а первичная падающая волна имеет единичную амплитуду $C = 1$. При падении на границу раздела она отразится с коэффициентом отражения по амплитуде [3]

$$r = -\frac{n-1}{n+1}. \quad (1)$$

Что касается амплитуды волны, вышедшей из торца, отразившейся от мембраны и вернувшейся обратно в волокно (с учетом N переотражений), то ее можно найти, используя выражения, аналогичные формулам для низкодобротного интерферометра Фабри–Перо с потерями [3].

В соответствии с [3] получим

$$D(h) = r + (1-r)(1+r)t(h) \times [1 + (-rt(h)) + (-rt(h))^2 + \dots + (-rt(h))^N], \quad (2)$$

где

$$t(h) = \frac{\exp(-i4\pi h/\lambda)}{\sqrt{1 + (h/h_0)^2}}$$

– коэффициент передачи между двумя торцами одинаковых одномодовых оптических волокон, расположенных на расстоянии $2h$ [4]; $h_0 = 2\pi na^2/\lambda$, n – показатель преломления, λ – длина волны оптического излучения, a – радиус поля оптической моды в волокне. Численно для стандартного кварцевого одномодового волокна при $\lambda = 1,55$ мкм, $n = 1,468$ и $a = 5,2$ мкм параметр $h_0 \approx 80$ мкм.

После преобразования геометрической прогрессии в квадратных скобках определим амплитуду отраженного информационного сигнала

$$D(h) = \frac{t(h/h_0) + r}{1 + rt(h/h_0)} = \frac{\exp(-i4\pi h/\lambda) + r\sqrt{1 + (h/h_0)^2}}{\sqrt{1 + (h/h_0)^2} + r\exp(-i4\pi h/\lambda)}. \quad (3)$$

Комплексная амплитуда отраженной оптической моды D (рис. 2), распространяющейся в направлении фотоприемника, рассчитывалась в двух вариантах – с учетом только первого отражения ($N = 0$) от мембраны и с учетом всех переотражений.

Для иллюстрации на рис. 3 приведен график функции $|D(h)|^2$, соответствующей оптической мощности отраженной моды. Масштаб осцилляций для наглядности существенно трансформирован – на самом деле их период равен $\lambda/2$ (при $\lambda = 1,55$ мкм это около 0,8 мкм), что при-

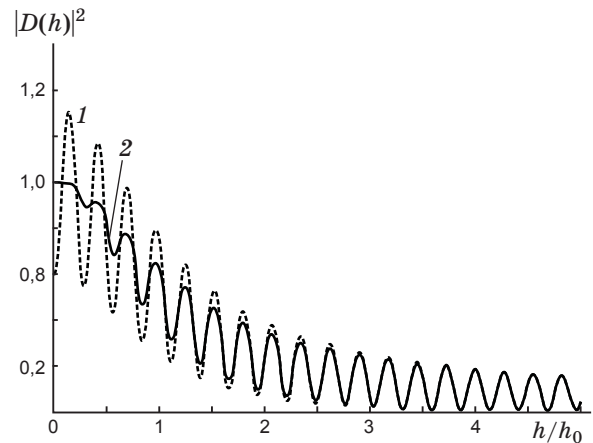


Рис. 3. График зависимости мощности оптического сигнала, распространяющегося в направлении фотоприемника, от расстояния до мембраны. 1 – с учетом только первого отражения, 2 – с учетом всех переотражений.

мерно в 100 раз меньше h_0 . Сплошная линия приведена с учетом всех переотражений, пунктирная – с учетом только первого отражения.

Кривые на рис. 3 можно назвать передаточной характеристикой торцевого интерферометра. Из графика видно, что на достаточном удалении мембраны от торца можно учитывать только первое отражение, а по мере уменьшения расстояния h размах интерференции подавляется за счет вторичных переотражений.

Граничное значение зазора $h_{гр}$, разделяющее эти две области, при использовании критерия погрешности в 1% и свободном торце оптоволоконка (граница кварц – воздух, коэффициент отражения $R = r^2 = 0,036$) после несложных расчетов можно определить как

$$h_{гр} = 2,5h_0, \quad (4)$$

т. е., при $h > h_{гр}$ с высокой степенью точности можно принимать в расчет только первое отражение. На самом деле, учитывая неидеальность отражений, это значение $h_{гр}$ еще меньше.

При изменении зазора h на Δh изменение принятой мощности оптического излучения¹ составит ΔP , т. е. амплитуда переменного сигнала на выходе фотодиода пропорциональна производной передаточной характеристики, представленной на рис. 3. Ее также можно назвать крутизной характеристики. График этой функции, полученный в результате дифференцирования графика функции $|D(h)|^2$, представлен на рис. 4.

¹ Далее вместо “мощность оптического излучения” будем использовать термин “оптическая мощность”.

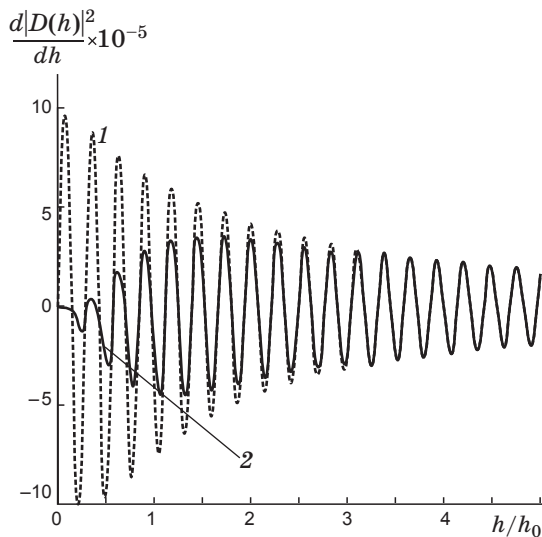


Рис. 4. Производная (крутизна) передаточной характеристики датчика. 1 – с учетом только первого отражения, 2 – с учетом всех отражений.

Пунктирные графики, рассчитанные при учете одного отражения, приведенные на рис. 3 и 4, показывают важность учета многократных отражений, особенно при малых расстояниях между торцом световода и мембраной.

Набор значений величин зазора, в которых производная $d(D^2(h))/dh$, а следовательно, и чувствительность, максимальны, представляет собой совокупность возможных *рабочих точек* интерферометрического датчика, т. е. начальных положений мембраны в отсутствие акустического воздействия.

Без учета возможных шумов датчика может быть рассмотрена задача получения максимально возможного отклика рассматриваемой схемы на входной акустический сигнал, вызывающий смещение мембраны. Для решения этой задачи достаточно вычислить огибающую максимумов функции $d(D^2(h))/dh$ и найти ее максимальное значение (максимум максимумов).

На рис. 5 приведен результат численного расчета огибающей производной функции $D^2(h)$, которая позволяет определить, как зависит уровень выходного полезного сигнала от расстояния между торцом световода и мембраной при условии выбора оптимального положения рабочей точки на передаточной характеристике – положения в локальном максимуме функции $d(D^2(h))/dh$. В результате численного расчета установлено, что максимальный уровень выходного сигнала интерференционного

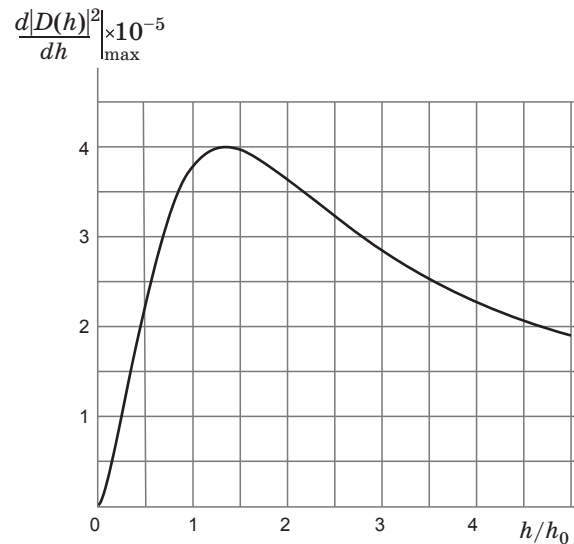


Рис. 5. Зависимость максимальной амплитуды выходного сигнала от расстояния до мембраны.

датчика достигается в том случае, когда расстояние между торцом световода и мембраной составляет приблизительно $1,37h_0$, т. е. при $h_0 \approx 80$ мкм – около 110 мкм.

Однако истинной задачей оптимизации является не получение максимального отклика на входное воздействие, а достижение максимально возможного отношения сигнал/шум, определяющего минимальный регистрируемый акустический сигнал. Такую оптимизацию можно провести только с учетом реальных собственных шумов рассматриваемой оптико-электронной схемы.

2. Анализ собственных шумов оптико-электронной схемы

Общие шумы оптико-электронной схемы можно разделить на темновые шумы электронного блока $U_{ш.э}$ и оптические шумы $U_{ш.опт}$, обусловленные оптической засветкой приемного фотодиода. Исходя из физической сущности составляющих шумов, их можно считать независимыми и представить как

$$U_{ш}^2 = U_{ш.э}^2 + U_{ш.опт}^2. \quad (5)$$

Одной из основных особенностей волоконно-оптических датчиков является наличие значительной постоянной засветки фотоприемника оптическим излучением источника (лазера либо светодиода), которая вносит определяющий вклад в общий (интегральный) уровень шума

датчика в целом. При правильном проектировании электронного блока $U_{ш.э} \ll U_{ш.опт}$, и тогда электронными шумами при анализе можно пренебречь.

Что касается оптических шумов $U_{ш.опт}$, то в них можно выделить несколько составляющих.

Дробовой шум $U_{ш.др}$, обусловленный протеканием фототока через фотоприемник, пропорционален корню квадратному из фототока (а значит, и оптической мощности излучения, падающего на фотоприемник) и определяется известным соотношением [5]

$$i_{ш.др.} = \sqrt{2qi_{фд}\Delta f}, \quad (6)$$

где $q = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, $i_{фд} = S_{ф}P_{ср}$ – ток фотоприемника, Δf – полоса рабочих частот датчика, $S_{ф}$ – токовая чувствительность фотоприемника, $P_{ср}$ – средняя оптическая мощность.

Для высокостабильных оптических источников (например, светодиодов в датчиках **амплитудного** типа) дробовой шум является **основным**. Поскольку полезный сигнал пропорционален оптической мощности, а дробовой шум – корню квадратному из оптической мощности, то с точки зрения повышения отношения сигнал/дробовой шум целесообразно повышать оптическую мощность и коэффициент пропускания оптической схемы. Поэтому, кстати, оптические датчики амплитудного типа – достаточно энергоемкие устройства.

В оптических датчиках **интерференционно** типа принципиальным является использование когерентных оптических источников – лазеров. Наряду с высокой когерентностью и большей экономичностью, они характеризуются значительно большей сложностью физических процессов, лежащих в основе их работы. Это приводит к большей “шумности” лазеров по сравнению со светодиодами – дополнительно появляется как **амплитудный** шум, обусловленный флуктуациями оптической мощности лазера, так и **частотный** (фазовый) шум, связанный с колебаниями рабочей длины волны (частоты) излучения лазера.

Как следует из вышеизложенного, источники лазерных шумов многообразны и они не могут быть описаны точными аналитическими выражениями (формулами). Минимизировать их влияние можно технологическими приемами и методами – тщательным подбором элементной базы (лазеров, разветвителей, ти-

пов оптических коннекторов и т. п.), а также правильным выбором режимов работы лазера (прежде всего оптической мощности и рабочей температуры) и строгим соблюдением технологии сборки оптической схемы (тщательная протирка оптических коннекторов и высокое качество полировки их торцов).

Уровень выходного сигнала оптического датчика интерференционного типа определяется его вольтовой чувствительностью S_d (крутизной характеристики), которая пропорциональна “размаху” интерференционной картины (статической характеристики) ΔU , т. е. разности между минимальным (как правило, близким к нулю) и максимально возможным выходным напряжением. Эта разность ΔU зависит от тока инжекции и температуры лазерного источника, коэффициента отражения зеркал интерферометра и т. д. и может меняться от опыта к опыту. В противоположность этому нормированная чувствительность $S_n = S_d/\Delta U$ в интерференционной схеме есть величина постоянная и зависящая только от длины волны оптического излучения. Поэтому для определения пороговой чувствительности датчика определяющее значение имеет **нормированный** (относительный) уровень интегральных шумов $U_{ш.н} = U_{ш}/\Delta U$ в рабочей полосе частот датчика, который, как следует из определения, – безразмерная величина.

В результате измерений шумов полупроводникового лазерного источника излучения установлено следующее:

- при достаточной мощности лазера нормированный шум мало меняется в зависимости от засветки фотоприемника (т. е. шумами электроники можно пренебречь);

- нормированный шум падает с ростом мощности лазера, однако начиная с некоторой оптической мощности (около 4 мВт) возникают нестационарные шумы (“щелчки”, “перескоки моды”), во время которых шум резко увеличивается;

- оптимальным можно считать уровень мощности лазера 3–4 мВт, при котором в данном эксперименте нормированный шум составил $(3-3,5) \times 10^{-5}$ в рабочей полосе частот.

При включении лазера в оптическую схему согласно рис. 1 при измерениях серии образцов (10 шт.) нормированный шум $U_{ш.н}$ в большинстве случаев лежал в пределах от $0,7 \times 10^{-4}$ до $1,3 \times 10^{-4}$ в полосе частот 10 кГц. Окончательный усредненный результат экспериментального измерения шумов рассматриваемой опти-

ческой схемы можно выразить следующей формулой:

$$U_{ш.н} = U_{ш}/\Delta U = P_{ш}/(P_{\max} - P_{\min}) = 10^{-4}, \quad (7)$$

где $P_{ш}$ – мощность оптических шумов, а $(P_{\max} - P_{\min})$ – размах интерференционной характеристики (см. рис. 3).

3. Оптимизация оптической схемы по критерию максимума отношения сигнал/шум

Как показано выше, определяющие составляющие шума интерферометрической схемы – шум лазерного источника и, в меньшей степени, дробовой шум фотодиода. Амплитуда шума лазерного источника пропорциональна постоянной составляющей тока, протекающего по фотодиоду при отсутствии смещения мембраны, т. е. пропорциональна функции $|D(h)|^2$ (мощности оптического сигнала). Амплитуда дробового шума фотодиода пропорциональна корню из постоянного тока, протекающего через фотодиод, т. е. пропорциональна функции $|D(h)|$ (амплитуде оптического сигнала). Можно образовать дискретную функцию $S_1(h)$, рассчитываемую в точках максимального значения производной $|D(h)|^2$, которая пропорциональна уровню приведенного шума оптического микрофона при условии, что основной источник шума – шум лазера (мощность шума пропорциональна мощности сигнала засветки на фотодиоде),

$$S_1(h) = \frac{|D(h)|^2}{\left| \frac{d|D(h)|^2}{dh} \right|} \quad (8)$$

и дискретную функцию $S_2(h)$, которая пропорциональна уровню приведенного шума оптического микрофона при условии, что основной источник шума – дробовой шум фотодиода (мощность шума пропорциональна току фотодиода),

$$S_2(h) = \frac{|D(h)|}{\left| \frac{d|D(h)|^2}{dh} \right|}. \quad (9)$$

Как видно из формул (8) и (9), эти функции представляют собой отношение шум/сигнал, взятые на совокупности рабочих точек интерферометра. На рис. 6 представлены графики зависимости этих функций (сплошная линия –

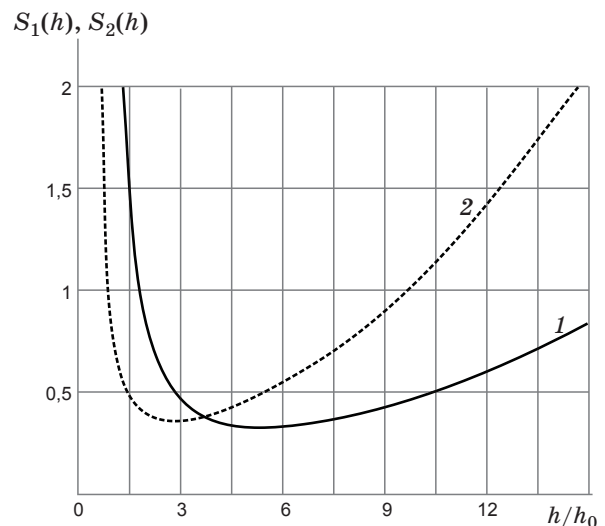


Рис. 6. Зависимость отношения шум/сигнал от нормированного расстояния между торцом волокна и мембраной. 1 – $S_1(h)$, 2 – $S_2(h)$.

$S_1(h)$, пунктир – $S_2(h)$) от нормированного расстояния между торцом волокна и мембраной.

Численные расчеты и анализ графиков рис. 6 показывают, что минимальное значение отношения шум/сигнал (максимум сигнал/шум) в наиболее часто подтверждающемся на практике случае, когда основной источник шума – лазер, достигается при нормированном зазоре торец–мембрана $h/h_0 = 5$. Зона расстояний h/h_0 , близких к оптимальному (где сигнал/шум ухудшается не более, чем на 50%), составляет от 3 до 10. При ранее полученном численном значении величины $h_0 \approx 80$ мкм (см. формулу (2)) оптимальное расстояние $h_{\text{опт}} = 400$ мкм, а диапазон допустимых значений (по уровню увеличения отношения сигнал/шум в 1,5 раза) от 240 мкм до 800 мкм. Заметим, что этот диапазон отвечает условию формулы (4), $h > h_{\text{тр}}$, и, следовательно, можно принимать в расчет только первое отражение. В этом случае можно считать, что в формировании возвратной моды (обозначенной D на рис. 2) принимают участие только две составляющие – отраженная непосредственно от торца с мощностью $P_r = |r|^2 P_0$ и отраженная от мембраны с мощностью

$$P_1 = (1 - |r|^2)^2 |t(h)|^2.$$

Поскольку структура полей этих волн полностью идентична, можно воспользоваться известным выражением для интерференции двух плоских электромагнитных волн [3]

$$P_D = P_R + P_1 + 2\sqrt{P_R P_1} \cos(k\Delta), \quad (10)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, $\Delta = 2h$ – оптическая разность хода.

Графически это выражение соответствует передаточной характеристике рис. 3 при $h > h_{\text{тр}} (P_D = D^2(h))$. Тогда производная этой функции определится выражением

$$\frac{dP_D}{dh} = 2\sqrt{P_R P_1} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \sin \left(\frac{4\pi h}{\lambda} \right), \quad (11)$$

а в максимуме (при $\sin(4\pi h/\lambda) = 1$) –

$$\frac{dP_D}{dh} = 2\sqrt{P_R P_1} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right).$$

Несложно заметить, что размах интерференционной кривой (назовем ее размахом характеристики) согласно уравнению (10) (при подстановке в него $\cos(k\Delta) = \pm 1$) определяется как $P_{\text{max}} - P_{\text{min}} = 4\sqrt{P_R P_1}$. Тогда окончательно получаем

$$dP_D/dh = (P_{\text{max}} - P_{\text{min}})(2\pi/\lambda). \quad (12)$$

Здесь $(2\pi/\lambda) = S_n$ – нормированная к размаху крутизна характеристики, которая для двухлучевого интерферометра зависит только от длины волны.

После первого каскада усилителя-преобразователя “ток – напряжение” с коэффициентом K_1 размах выходного напряжения запишется как

$$\Delta U = S_\phi K_1 (P_{\text{max}} - P_{\text{min}}), \quad (13)$$

где S_ϕ – токовая чувствительность фотоприемника.

Заметим, что в рабочей точке, где производная, определяемая выражением (11), максимальна, оптическую мощность в соответствии с (10) можно записать в виде

$$P_D = P_R + P_1 = (P_{\text{max}} + P_{\text{min}})/2.$$

Обозначим эту мощность в рабочей точке $P_D = P_{\text{р.т}}$. После первого каскада усилителя-преобразователя “ток – напряжение” она преобразуется в постоянную составляющую выходного напряжения

$$U_{\text{р.т}} = S_\phi K_1 (P_{\text{max}} + P_{\text{min}})/2. \quad (14)$$

С учетом сделанных замечаний отношение сигнал/шум (С/Ш) можно записать как

$$(C/Ш) \approx \frac{dP_D}{dh} / P_{\text{р.т.}} = \frac{(P_{\text{max}} - P_{\text{min}}) 4\pi}{(P_{\text{max}} + P_{\text{min}}) \lambda}. \quad (15)$$

Поскольку мощность $P \geq 0$, очевидно, что отношение сигнал/шум имеет максимум при $P_{\text{min}} = 0$.

Определим из уравнения (10) параметры оптической системы, при которых $P_D = P_{\text{min}} = 0$. Учитывая, что минимальное значение мощности P_{min} достигается при $\cos(4\pi h/\lambda) = -1$, получим

$$P_R + P_1 = 2\sqrt{P_R P_1}. \quad (16)$$

Решением этого уравнения является условие $P_R = P_1$, т. е. минимальное значение мощности P_{min} достигается при равенстве мощностей волноводных мод, отраженных от торца и от мембраны.

Раскрывая это соотношение, легко найти оптимальное расстояние (зазор) $h_{\text{опт}}$, при котором отношение сигнал/шум максимально. Аналитически оно определяется формулой

$$\frac{h_{\text{опт}}}{h_0} = \sqrt{\frac{(1-r^2)^2 - r^2}{r^2}}. \quad (17)$$

Численно при $r^2 = 0,036$ и $h_0 = 80$ мкм имеем $h_{\text{опт}} = 5,1$ мкм, $h_0 = 410$ мкм, что хорошо совпадает с результатом точного расчета (см. рис. 6).

Соотношение (15) имеет важное практическое значение. Оно носит универсальный характер и всегда справедливо при синусоидальной передаточной характеристике и шумах, пропорциональных оптической мощности. Дело в том, что при настройке интерферометра затруднительно непосредственно измерить зазор h , соответствующий $h_{\text{опт}}$, тем более что он рассчитан при некоторых допущениях (отражение от мембраны предполагалось идеальным) и на практике может отличаться от расчетного. Технологически при настройке зазора гораздо проще выполнить условие $P_{\text{min}} = 0$. Для этого достаточно приложить к мембране любое переменное давление, обеспечивающее ее перемещение в пределах нескольких периодов характеристики (рис. 3) и добиваться выполнения условия $U_{\text{min}} = S_\phi K_1 P_{\text{min}} = 0$.

Одновременно, с практической точки зрения, важно в процессе настройки зафиксировать величину $U_{\text{max}} = S_\phi K_1 P_{\text{max}} = \Delta U$, соответствующую размаху характеристики в вольтах. С ее помощью легко определить $U_{\text{р.т}} = \Delta U/2$, соответствующее оптимальному положению рабочей точки на середине линейного участка

характеристики, и при необходимости скорректировать это положение, например, прецизионной подстройкой длины волны излучения лазера λ (подробнее на эту тему см. в [6]).

Оценим теперь чувствительность интерференционного датчика к перемещению. Для этого необходимо использовать экспериментальные данные по шумам реальной опико-электронной схемы. Мощность оптического шума $P_{\text{ш}}$ в полосе частот 10 кГц при оптимальной настройке интерферометра $P_{\text{ш}} \approx 10^{-4} P_{\text{max}}$ (см. раздел 2, выражение (7)). В этом случае (при $h/h_0 = 5$) имеем

$$\begin{aligned} \text{сигнал} - \delta h dP_D/dh &= 2\delta h P_R (4\pi/\lambda), \\ \text{шум} - P_{\text{ш}} &= 10^{-4} P_{\text{max}} \approx 4 \times 10^{-4} P_R. \end{aligned} \quad (18)$$

Отсюда при условии $(С/Ш) = 1$ и $\lambda = 1550$ нм получим пороговое значение перемещения $\delta h = (10^{-4}/2\pi)\lambda \approx 0,025$ нм.

Для оценки пороговой чувствительности микрофона введем параметр M , характеризующий акустическую подвижность мембраны, имеющий размерность [нм/Па] и определяемый соотношением

$$M = h/p, \quad (19)$$

где p – акустическое давление. Современные высокотехнологичные наноразмерные мембраны на основе нитрида кремния имеют подвижность порядка 100 нм/Па (см., например, [2]).

Тогда, с учетом (19), пороговая чувствительность волоконно-оптического микрофона по давлению составит $\delta p = \delta h/M = 250$ мкПа или 22 дБ относительно порога слышимости 2×10^{-5} Па.

* * * * *

Заключение

В заключение кратко сформулируем основные результаты работы.

– Построена физико-математическая модель распространения волн в торцевом волоконно-оптическом интерферометре по схеме Фабри–Перо с учетом многократных отражений, определен уровень отраженного сигнала в зависимости от расстояния между торцом световода и мембраной, определена совокупность рабочих точек интерферометра, найдена величина зазора, при котором выходной сигнал максимален.

– Определены основные составляющие шумов волоконно-оптического интерферометра, приведены данные экспериментального определения общего шума. Введено понятие нормированных шумов, измеренное среднее значение которых составило 10^{-4} от оптической мощности в полосе частот 10 кГц.

– Проведена оптимизация опико-электронной схемы с точки зрения отношения сигнал/шум, найдены оптимальная величина рабочего зазора интерферометра и диапазон рабочих расстояний, в котором отношение сигнал/шум остается на допустимом уровне. Предложена практическая методика настройки рабочего зазора в положение, близкое к оптимальному.

– Дана оценка пороговой чувствительности (при $С/Ш = 1$) волоконно-оптического интерферометра по перемещению (0,025 нм в полосе частот 10 кГц) и волоконно-оптического микрофона на его основе (22 дБ относительно порога слышимости при подвижности звукочувствительной мембраны 100 нм/Па).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ветров А.А., Комиссаров С.С., Сергушичев А.Н. Волоконно-оптический торцевой интерферометр – универсальный элемент построения датчиков смещения // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 1. С. 3–6.
2. Корляков А.В. Сверхтонкие мембраны в микросистемной технике // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 8. С. 17–26.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 712 с.
4. Козанне А., Флере Ж., Мэтр Г., Руссо М. Оптика и связь // М.: Мир. 1984. С. 254.
5. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. М.: Техносфера. 2003. С. 126.
6. Ветров А.А., Данилов Д.А., Есипов С.С., Комиссаров С.С., Сергушичев А.Н. Сравнение температурных и электрических методов управления длиной волны излучения полупроводниковых лазеров // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 8. С. 90–96.