

МИКРООПТИКА В ЭЛЕКТРОНИКЕ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНЫХ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ
КАК ЭЛЕМЕНТОВ МИКРООПТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ**

Методические указания

**НОВОСИБИРСК
2015**

МИКРООПТИКА В ЭЛЕКТРОНИКЕ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ КАК ЭЛЕМЕНТОВ МИКРООПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Методические указания по КП для студентов факультета
МТС направлений 11.03.03 – Конструирование и
технология электронных средств, 11.03.04 – Интегральная
электроника и наноэлектроника

НОВОСИБИРСК
2015

Составитель канд. техн. наук, доц. *А.Д. Бялик*

Работа подготовлена на кафедре технической электроники

Введение

Использование волоконно-оптических датчиков (ВОД) является необходимым в тех отраслях техники, где требуется высокая чувствительность измерительных систем к измеряемым параметрам в сочетании с требованиями пожаро-, взрыво- и электробезопасности, нечувствительность к внешним электромагнитным полям и агрессивным средам. Это позволяет использовать волоконно-оптические датчики для решения задач неразрушающего контроля процессов и изделий, в частности, таких элементов электроэнергетического оборудования, как высоковольтные трансформаторы.

Развитие волоконно-оптических датчиков связано в том числе и с развитием технологий микроэлектроники и микросистемной техники, что делает возможным миниатюризацию ВОД.

Общая структура преобразований в волоконно-оптических датчиках приведена на рис. 1 [1–6].

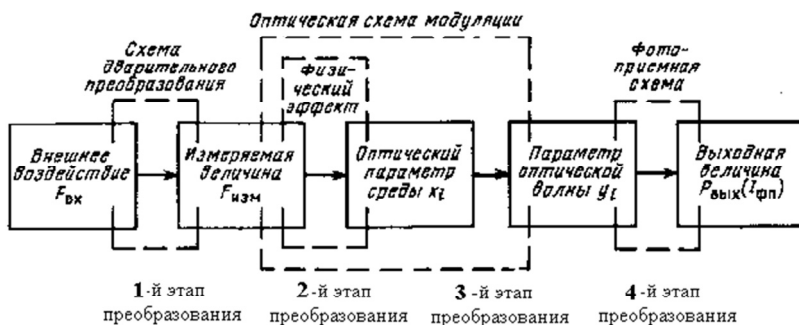


Рис. 1. Общая структура преобразования в волоконно-оптических датчиках

В процессе измерения в волоконно-оптических датчиках происходит ряд преобразований измеряемой величины. В качестве внешнего

воздействия могут выступать измеряемые величины, принципиально различные по своей природе (электрического, магнитного, теплового, механического, химического, радиационного типов).

Способ преобразования измеряемой величины выбирается с учетом общей структуры преобразования в волоконно-оптических датчиках.

Схема предварительного преобразования (1-й этап преобразования согласно рис. 1) необходима, если нельзя непосредственно измерить исследуемую величину или в наличии уже имеется датчик для измерения другого физического параметра [1]. В схеме предварительного преобразования могут использоваться различные физические принципы преобразования (механический, электромеханический, электромагнитный и т. д.).

Далее измеряемая величина (непосредственно или после предварительного преобразования) воздействует на параметры оптической среды, т. е. системы, по которой распространяется оптическое излучение (2-й этап преобразования). Целесообразность использования при этом того или иного физического эффекта определяется целями, которые преследуют данные измерения. Параметрами оптической среды, которые изменяются под влиянием внешнего воздействия, могут являться показатель преломления (n), коэффициент поглощения (χ), изменение линейных размеров (например, длины оптического пути).

Далее при помощи схем оптической модуляции изменение параметров оптической среды приводит к изменению параметров оптической волны (амплитуды, фазы, поляризации, частоты оптического излучения; 3-й этап преобразования) [1, 5, 6]. Поскольку параметры оптической волны крайне затруднительно воспринимать и анализировать непосредственно, то обычно при помощи фотоприемника измеряемая величина преобразуется в электрический сигнал (напряжение, ток или их изменение; 4-й этап преобразования). Для детектирования и измерения изменений параметров оптической волны могут использоваться различные фотоприемные схемы (непосредственное измерение, анализатор угла поворота плоскости поляризации, спектрально-чувствительные фотоприемники, позиционно-чувствительные фотоприемники). С помощью стандартных изделий микроэлектроники с заранее известными характеристиками измеряемую величину можно усилить или ослабить, нормировать, фильтровать, перевести в цифровую форму.

Общую функцию преобразования датчиков можно представить в следующем виде:

$$A_{\text{фп}} = P_{\text{ии}}(I_{\text{ии}}) f_{\text{фп}} \left\{ y_i \left[x_i (F_{\text{изм}}(F_{\text{вх}})) \right] \right\} S_{\text{фп}} k_{\text{п}}, \quad (1)$$

где $A_{\text{фп}}$ – выходной сигнал (ток или напряжение); $P_{\text{ии}}(I_{\text{ии}})$ – мощность оптического излучения, создаваемого источником оптического излучения (ИОИ) при протекании по нему тока $I_{\text{ии}}$; $f_{\text{фп}}$ – функция фотоприемного преобразования; $S_{\text{фп}}$ – интегральная чувствительность фотоприемника; $F_{\text{вх}}$ – внешнее воздействие; $k_{\text{п}}$ – коэффициент потерь мощности оптического излучения при $F_{\text{вх}} = 0$; $F_{\text{изм}}$ – измеряемая величина; x_i – оптический параметр среды; y_i – параметр оптической волны.

Охарактеризовать волоконно-оптические датчики можно следующими, существенно зависящими от конструкции, основными характеристиками:

- 1) диапазон измеряемых давлений;
- 2) основная погрешность;
- 3) чувствительность;
- 4) нелинейность передаточной характеристики;
- 5) частотный диапазон работы датчика;
- 6) температурный диапазон работы датчика;
- 7) дополнительная температурная погрешность;
- 8) собственные потери оптического излучения в датчике;
- 9) суммарные потери оптического излучения;
- 10) начальный выходной сигнал.

К этому добавляются важнейшие эксплуатационные характеристики: влагостойкость, устойчивость к вибрации и механическим нагрузкам, долговечность, надежность, а также габариты, масса, потребляемая мощность, простота в эксплуатации, стоимость.

Согласно [1–3], наибольшее распространение получили волоконно-оптические датчики, использующие фазовую (интерферометрические датчики) и амплитудную модуляции. При этом амплитудные датчики более просты в изготовлении и эксплуатации, однако иногда проигрывают интерферометрическим в точности и разрешающей способности.

Физическую основу работы таких датчиков составляет перераспределение под воздействием измеряемого параметра интенсивности излучения, проходящего с выхода излучающего световода на вход приемного световода в соответствии с диаграммой направленности, светопропусканием световодов и способами модуляции [2, 5].

При использовании амплитудных волоконно-оптических датчиков не требуется обязательного использования когерентного источника излучения, а также допускается использование многомодовых оптических волокон.

Следствием этих особенностей являются технологичность конструкции и простота настройки и юстировки ВОД.

Расчет преобразовательной характеристики таких амплитудных волоконно-оптических датчиков давления в зависимости от конструктивного исполнения, а также технического задания является целью данного курсового проектирования.

1. Структура функции преобразования амплитудных ВОД

Функция преобразования, описываемая выражением (1), применительно к амплитудным ВОД давления имеет вид

$$U = F_3 \{ F_2 [F_1(p)] \} \tag{2}$$

или

$$\Delta p \rightarrow \Delta x \rightarrow \Delta I \rightarrow \Delta U,$$

где Δp – давление или изменение давления; Δx – смещение чувствительного элемента; ΔI – изменение потока оптического излучения; ΔU – изменение выходного сигнала; F_1 , F_2 , F_3 – частные функции преобразования, которое в данном случае соответствует трем этапам преобразования (2): F_1 – функция механического преобразования, описывающая зависимость смещения упругого чувствительного элемента ВОД под воздействием измеряемого параметра (давления); F_2 – функция преобразования оптической модуляции, описывающая изменение интенсивности светового потока, отраженного от поверхности упругого чувствительного элемента (микрозеркала), в зависимости от смещения последнего. Данная функция преобразования может быть представлена в виде

$$F_2 = F_{2C} F_{2H}, \tag{3}$$

где F_{2C} – составляющая функции преобразования оптической модуляции, связанная со стандартизованными характеристиками элементов

конструкции (материал, форма, геометрические размеры, количество оптических волокон, источники и приемники оптического излучения, элементы, составляющие схему электронной обработки оптического сигнала); F_{2H} – составляющая функции преобразования оптической модуляции, связанная со свойствами элементов конструкции с переменными свойствами и характеристиками (относительное пространственное расположение излучающих и приемных оптических волокон и оптического модулятора); F_3 – функция электрического преобразования, описывающая изменение электрического выходного сигнала в зависимости от изменения интенсивности светового потока.

Общий вид преобразовательной характеристики ВОД определяется следующими процессами.

Излучение от источника, пройдя через излучающие оптические волокна, отражается от поверхности упругого чувствительного элемента. Часть отраженного излучения попадает в приемные волокна и далее – на фотоприемник, электрический сигнал с которого (фотоЭДС) обрабатывается электронным блоком.

Под воздействием давления Δp чувствительный элемент смещается от положения равновесия на величину Δx . При этом изменяется расстояние между излучающими и приемными оптическими волокнами и отражающей поверхностью упругого чувствительного элемента. Соответственно изменяется интенсивность потока оптического излучения ΔJ , попадающего в приемные оптические волокна и далее на фотоприемник, т. е. происходит амплитудная модуляция оптического излучения внешним воздействием (давлением). Далее изменение интенсивности потока оптического излучения ΔJ с помощью фотоприемника и блока электронной обработки преобразуется в выходной сигнал ΔU необходимого уровня и формы.

Общая структурная схема амплитудного волоконно-оптического датчика давления рефлектометрического типа, реализующего описанный выше процесс преобразования, показана на рис. 2.

Волоконно-оптический датчик содержит стабилизированный источник тока 1, корпус 2 с источником 3 и приемником 4 оптического излучения, оптические волокна, собранные в кабель 5, кремниевую подложку 6 для чувствительного элемента, чувствительный элемент 7, блок электронной обработки сигнала с фотоприемника 9, блок термостабилизации 10, индикатор 11. Цифрой 8 обозначен ход оптического излучения.

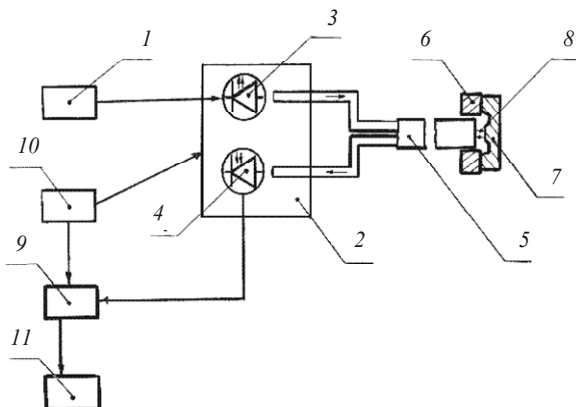


Рис. 2. Структурная схема амплитудного волоконно-оптического датчика давления рефлектометрического типа

2. Расчет функции оптического преобразования

К элементам, составляющим волоконно-оптический канал, относятся оптические волокна и модулятор параметров светового потока [5, 16, 21, 22].

Выбор оптического модулятора в значительной мере определяется его конструкцией и тем, какой именно параметр оптической среды модулирует поток оптического излучения. В случае измерения давления при помощи ВОД рефлектометрического типа, а также исходя из технологических и эксплуатационных требований наиболее целесообразным является использование элементов, способных под внешним воздействием изменять свои форму или геометрические размеры, т. е. работающих на изменении длины оптического пути. Варианты конструкций и свойства таких модуляторов рассматриваются в [2]. При этом необходимо учитывать характер отражения от поверхности (при использовании волоконно-оптического датчика рефлектометрического типа). Отражение может носить зеркальный, диффузный и смешанный характер. Для волоконно-оптических датчиков предпочтительнее первый случай, однако его не всегда возможно реализовать.

2.1. Расчет составляющей функции преобразования оптической модуляции, связанной со стандартизованными характеристиками элементов конструкции

Общее число волокон выбирается исходя из эффективной площади пучка оптического излучения, генерируемого источником, площадью фотоприемника, порогом чувствительности фотоприемника и светопропусканием волокна. Полный поток излучения для всего оптического канала справедливо представить как сумму потоков отдельных волокон. Площадь пучка оптического излучения определяется выражением [2, 5]:

$$S = \pi(l + h \operatorname{tg} \theta)^2, \quad (4)$$

где l – размер источника излучения; h – расстояние от источника до текущей плоскости пучка; θ – угол расхождения светового пучка. Для некогерентных источников оптического излучения θ принимается равной $22,5^\circ$, причем интенсивность потока оптического излучения в таком телесном угле считается постоянной по площади пучка.

Длина волокон определяется конструктивным требованием к датчику и ограничивается светопропусканием оптического волокна. При чрезмерной длине оптических волокон точность измерений (при прочих равных условиях) становится неприемлемой либо из-за недостаточной чувствительности фотоприемника, либо из-за малого отношения сигнал/шум.

Выбор материалов, из которых состоят оптические волокна, определяется с учетом следующих факторов:

- выполнение условия полного внутреннего отражения для оптической волны в волокне. В противном случае резко возрастают потери в оптическом волокне, что отрицательно влияет на точность измерения;
- малое затухание оптической волны в волокне на рабочих частотах;
- технологичность изготовления оптических волокон;
- большой срок эксплуатации;
- устойчивость к механическим воздействиям.

По совокупности требований наиболее приемлемыми являются кварцевые волокна с полимерной защитной оболочкой. Такие волокна и волоконно-оптические жгуты на их основе являются стандартными изделиями с заранее известными метрологическими характеристиками.

Форма и геометрические размеры торцов приемных и передающих волокон определяются главным образом из технологических соображений. Целесообразно рассматривать и использовать оптические волокна или группы оптических волокон (волоконно-оптические кабели) с волокнами круглого сечения и одинакового диаметра. Такая унификация делает их наиболее простым при изготовлении и эксплуатации. Для волокон цилиндрической формы поток оптического излучения можно считать равномерно распределенным по его выходному торцу. При выборе площади торца единичного волокна необходимо учитывать, в каком режиме (одно- или многомодовом) оно будет работать. Многомодовый режим предпочтительнее, так как в этом случае не требуется использование когерентного источника излучения, а также существенно упрощается процедура соединения оптических волокон друг с другом (если это предусматривает оптическая схема датчика). Кроме того, диаметр волокон будет определяться: 1) диаграммой направленности источников и приемников оптического излучения, а также диаграммой направленности самого оптического волокна; 2) необходимой величиной интенсивности потока оптического излучения; 3) размерами источников и приемников оптического излучения и объекта измерения.

С учетом выражения

$$J = dP / d\omega, \quad (5)$$

где dP – элементарный поток оптического излучения; J – сила света источника излучения; $d\omega$ – элементарный телесный угол, частная функция преобразования, связанная со свойствами стандартных элементов (F_{2C}), может быть представлена так [2, 5]:

$$F_{2C} = J_{22} / J_{11} \quad (6)$$

или

$$J_{11} = J_0 f(\varphi) d\omega,$$

$$J_{21} = J_{11} (r dr d\theta / \pi R^2) \tau(L) d\omega, \quad (7)$$

$$J_{12} = f(\Delta x) J_{21},$$

$$J_{22} = J_{12} (r dr d\theta / \pi R^2) \tau(L) d\omega,$$

где J_0 – сила света источника излучения, направленная по нормали к торцу волокна; J_{11} – сила света источника излучения, падающего от источника на торец излучающего волокна; J_{21} – сила света источника излучения, падающего на микрозеркало; J_{12} – сила света отраженного потока оптического излучения, падающего на торец приемного волокна; J_{22} – сила света отраженного потока оптического излучения, падающего на фотоприемник; $f(\varphi)$ – диаграмма направленности источника излучения; L – длина оптических волокон; R – радиус оптического волокна; $\tau(L)$ – светопропускание оптического волокна; $f(\Delta x)$ – функция, зависящая от расстояния между торцами оптических волокон и микрозеркала; r, θ – текущие координаты. Светопропускание стандартных оптических волокон определяется потерями на поглощение в волокне. В стандартных многомодовых волокнах со ступенчатым показателем преломления затухание составляет около 0,1..10 Дб/км [16]. Это позволяет не учитывать потери на затухание в ВОД.

Диаграмма направленности $f(\varphi)$ будет определяться числовой апертурой оптических волокон [16]:

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}, \quad (8)$$

где n_2 и n_1 – показатели преломления оплетки и сердечника соответственно.

Одним из главных факторов, влияющих на светопропускание $\tau(L)$, является изгиб или деформация оптических волокон.

Критерием возникновения потерь в волокне при этом можно считать нарушение условия полного внутреннего отражения:

$$\theta_C \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, \quad (9)$$

где $\theta_C = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$.

В соответствии с этим выбирается минимальный радиус искривления оптических волокон, а также величины прочих механических воздействий на них, которые приводят к микроизгибам. Оценки, приведенные в [16, 21, 22], показывают, что при учете условий, указанных в (9), данными потерями можно пренебречь.

2.2. Расчет составляющей функции преобразования оптической модуляции, связанной с переменными характеристиками элементов конструкции

Главным фактором, определяющим ход функции преобразования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления рефлектометрического типа, связанной с элементами конструкции с заранее неизвестными свойствами и характеристиками F_{2H} (функции преобразования оптической модуляции), является выбор пространственного и углового расположения групп излучающих и приемных волокон и оптического модулятора.

Преобразовательные характеристики амплитудных волоконно-оптических датчиков давления рефлектометрического типа в двухволоконном приближении

Рассмотрим систему, показанную на рис. 3 и состоящую из одного излучающего и одного приемного оптических волокон и отражающего элемента (микрзеркала) [18, 23–26].

Пусть оба волокна имеют круглое сечение и одинаковый радиус, их торцы лежат в одной плоскости, причем параллельной плоскости микрзеркала. Отражение считаем зеркальным, потерями на границе раздела «волокно–воздух» и прочими пренебрегаем.

Также считаем, что в отраженном пятне в любой плоскости, перпендикулярной оси светового луча, интенсивность светового потока не зависит от координат. Характер прохождения оптического излучения считаем соответствующим законам геометрической оптики.

Интенсивность светового потока источника оптического излучения пропорциональна току светодиода, выходное напряжение фотодиода пропорционально интенсивности потока принятого излучения, т. е. можно записать

$$F_{2H} = I_{22} / I_{11}, \quad (10)$$

где I_{11} – интенсивность потока оптического излучения, падающего от источника на торец излучающего волокна; I_{22} – интенсивность потока оптического излучения, падающего на фотоприемник.

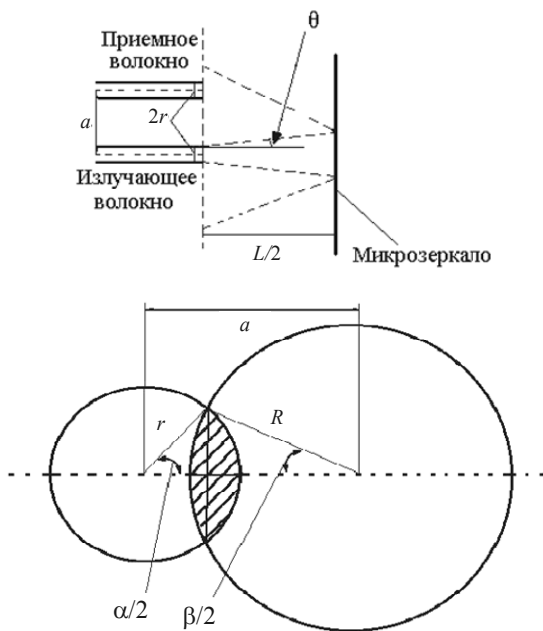


Рис. 3. Схема, объясняющая зависимость интенсивности светового потока в приемном волокне от взаимного расположения оптических волокон и отражающей поверхности:

$L/2$ – расстояние от плоскости зеркала до плоскости, в которой лежат торцы оптических волокон; a – расстояние между осями волокон; θ – угол расхождения светового пучка; R – радиус светового пятна на расстоянии L от торца излучающего волокна

При соблюдении описанных выше условий функция преобразования оптической модуляции для амплитудных волоконно-оптических датчиков давления рефлектометрического типа с переменными свойствами и характеристиками будет определяться как

$$F_{2H} = \frac{I_{22}}{I_{11}} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\alpha \frac{\pi}{180} - \sin \alpha}{(1 + x \operatorname{tg} \theta)^2} + \beta \frac{\pi}{180} - \sin \beta \right], \quad (11)$$

где $x = \frac{L}{r}$, $\alpha = 2 \arccos \frac{r^2 + a^2 - R^2}{2ar}$, $\beta = 2 \arcsin \left(\frac{r \sin \alpha / 2}{R} \right)$; I_{22} , I_{11} –

интенсивности светового потока, падающего на фотоприемник и испускаемого источником излучения соответственно; r – радиус сердцевины волокон; $L/2$ – расстояние от плоскости микрзеркала до плоскости, в которой лежат торцы оптических волокон; a – расстояние между осями волокон; θ – угол расхождения светового пучка.

Преобразовательная характеристика ведет себя следующим образом. До тех пор, пока на торец приемного волокна не падает оптическое излучение, $I_{22} = 0$. Затем, по мере роста площади освещенной части торца приемного волокна, начинают действовать два конкурирующих процесса: уменьшение интенсивности потока оптического излучения, падающего на торец приемного волокна из-за роста площади светового пятна (и, как следствие, падение интенсивности потока оптического излучения, падающего на фотоприемник), и рост интенсивности светового потока на фотоприемнике из-за увеличения освещенной площади торца приемного волокна, причем второй процесс резко перевешивает первый. В какой-то момент времени зависимость выходного сигнала (тока или напряжения) от величины L начинает квазилинейно расти. Затем, когда торец приемного волокна полностью освещен, а L продолжает увеличиваться, интенсивность светового потока (и вместе с ней выходной сигнал с фотоприемника) начинает падать пропорционально $1/L^2$.

На рис. 4–6 приведены графики описанных выше зависимостей (изменяющиеся параметры a , θ , r).

Можно отметить, что с ростом a график преобразовательной характеристики смещается в сторону больших значений L , при этом уменьшаются по абсолютной величине интенсивность светового потока I_2 и коэффициент оптического преобразования (отношение выходного сигнала к расстоянию от излучающего до приемного волокна), увеличивается длина квазилинейного участка.

С ростом угла θ рабочие (квазилинейные) участки характеристик смещаются к началу координат.

С уменьшением радиуса испускающего волокна рабочие (квазилинейные) участки характеристик смещаются в сторону меньших значений L .

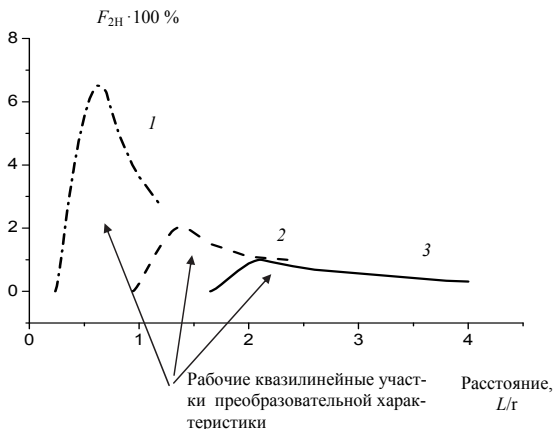


Рис. 4. Зависимость функции преобразования оптической модуляции F_{2H} от расстояния между торцами оптических волокон и отражающей поверхностью чувствительного элемента при разных значениях a :

1) $a = 3r$; 2) $a = 6r$; 3) $a = 9r$

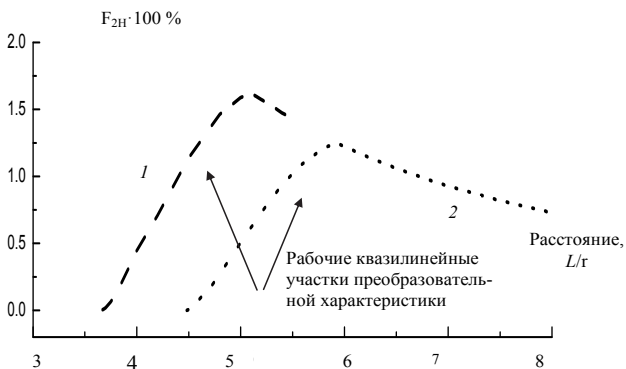


Рис. 5. Зависимость функции преобразования оптической модуляции F_2 от расстояния между торцами оптических волокон и отражающей поверхностью чувствительного элемента при разных диаметрах испускающего оптического волокна:

1) $d = r$; 2) $d = 2r$

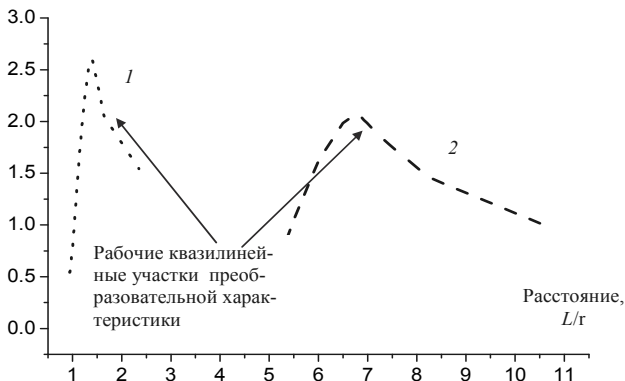


Рис. 6. Зависимость функции преобразования оптической модуляции F_2 от расстояния между торцами оптических волокон и отражающей поверхностью чувствительного элемента при разных θ :

1) 30° ; 2) 1°

Таким образом, максимальная чувствительность при прочих равных условиях будет достигнута при минимально возможном a и максимально возможном θ .

Однако из экспериментальных данных и технологических особенностей изготовления ВОД известно, что торцы испускающих и приемных волокон, а также микрзеркало не лежат в строго параллельных плоскостях [26]. Чтобы учесть эти особенности в описанной модели, вводим параметр γ – угол между идеализированной (нормальной к оси оптических волокон) и фактической плоскостями отражения светового пучка.

С учетом этого схема модели приобретает вид, указанный на рис. 7.

Тогда выражение (11) для функции преобразования оптической модуляции F_{2H} можно переписать в виде

$$F_2 = \frac{I_{22}}{I_{11}} = \frac{r^2/2 \left(\alpha \frac{\pi}{180} - \sin \alpha \right) + a_3 b_3 \arccos(x/a_3) - xy}{\pi a_3 b_3}, \quad (12)$$

где a_3 , b_3 – большая и малая полуоси эллиптического светового пятна в плоскости приемного волокна соответственно; α – угол между точками пересечения эллипса и приемного волокна с координатами x и y ,

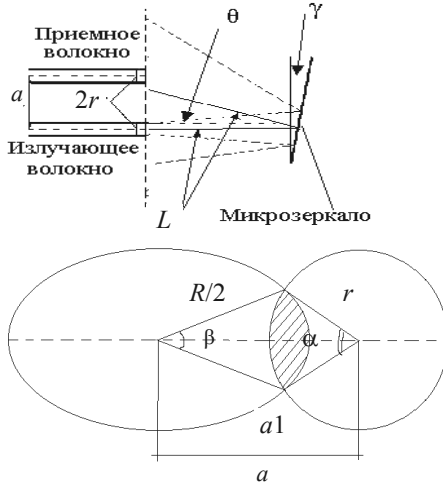


Рис. 7. Схема, объясняющая зависимость интенсивности светового потока в приемном волокне от взаимного расположения оптических волокон и отражающей поверхности с учетом параметра γ

как показано на рис. 7; координаты отсчитываются от центра эллипса. Описанные величины можно выразить так:

$$a_3 = \frac{1}{2} \left\{ \left[r + \frac{L \operatorname{tg} \theta}{2 \cos \gamma} \right] \left[\frac{\cos \theta}{\cos \theta + \gamma} + \frac{\cos \theta}{\cos \gamma - \theta} \right] \right\}, \quad (13)$$

$$b_3 = \frac{1}{2} \left(r + \frac{L \operatorname{tg} \theta}{2 \cos \gamma} \right), \quad (14)$$

$$\alpha = 2 \arccos \left(\frac{r^2 + a_1^2 - d^2}{2ra_1} \right), \quad (15)$$

где $a_1 = a - a_3 - \frac{L}{2} \operatorname{tg} \gamma + \left(r + \frac{L \operatorname{tg} \theta}{2 \cos \gamma} \right) \left(\frac{\cos \theta}{\cos(\gamma - \theta)} \right)$,

$$x = d \cos \frac{\beta}{2}, \quad y = d \sin \frac{\beta}{2}, \quad (16)$$

d – полу диаметр эллипса, проведенный в точку пересечения эллипса и окружности.

На рис. 8 показаны зависимости интенсивности потока излучения, падающего на фотоприемник, от параметра γ .

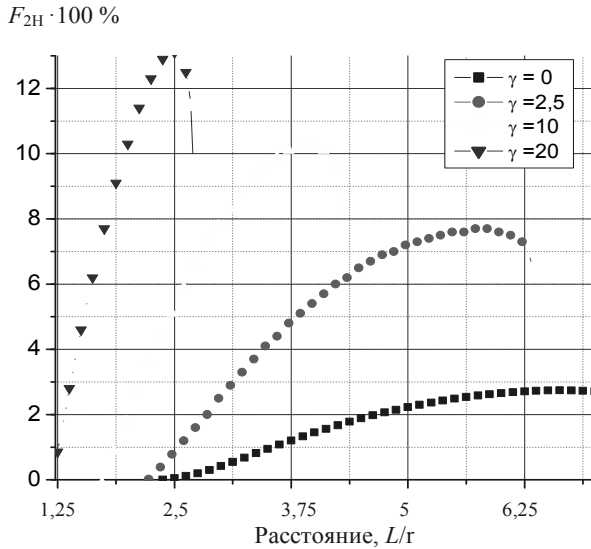


Рис. 8. Зависимости преобразовательной функции F_2 от расстояния до микрозеркала. Угол γ принимает значения $0; 2,5; 10; 20^\circ$

Можно отметить, что с ростом параметра γ увеличивается крутизна преобразовательной характеристики и уменьшается величина квазилинейного участка, который при этом смещается в сторону меньших расстояний до микрозеркала.

Как показано на рис. 4, ход зависимости выходного сигнала от перемещения существенно зависит от параметра a – расстояния между осями испускающих и приемных волокон.

Однако зависимость, приведенная на рис. 9, показывает, что при технологическом разбросе этого параметра $\pm 5 \dots 7\%$ ход суммарной характеристики близок к средней моделируемой. В указанном на рис. 9

диапазоне перемещений разница по выходному сигналу, чувствительности и нелинейности составляет 1,5; 0,1 и 0,08 % соответственно.

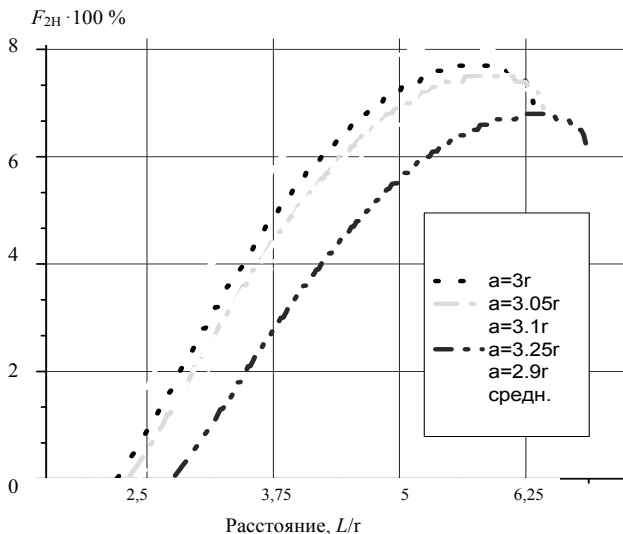


Рис. 9. Зависимость выходного сигнала от расстояния до микрзеркала. Параметром является a – расстояние между осями испускающих и приемных волокон

Более существенное различие по выходному сигналу наблюдается при учете неодинакового начального расстояния между торцами волокон по площади общего торца кабеля и плоскостью микрзеркала (L).

На рис. 10 показаны типичные зависимости выходного сигнала от расстояния до микрзеркала при разных начальных L . Параметр $\gamma = 2,5^\circ$, диаметр торца кабеля $D = 2$ мм. В указанном на рис. 10 диапазоне расстояний до микрзеркала разница по выходному сигналу между средним арифметическим значением по вкладкам в преобразовательную характеристику и вкладку в преобразовательную характеристику от излучающего волокна, находящегося на расстоянии $L' = L + (D \sin \gamma)/2$, составляет около 8...10 %. Разброс по чувствительности и нелинейности составил 1,5 и 5 % соответственно.

Если в конструкции датчика используется не два, а набор волокон, собранных в кабель, необходимо просуммировать вклад каждого волокна в преобразовательную характеристику. Из выражения для F_2

(11) следует сильная зависимость светового потока в приемном волокне от расстояния a между осями волокон.

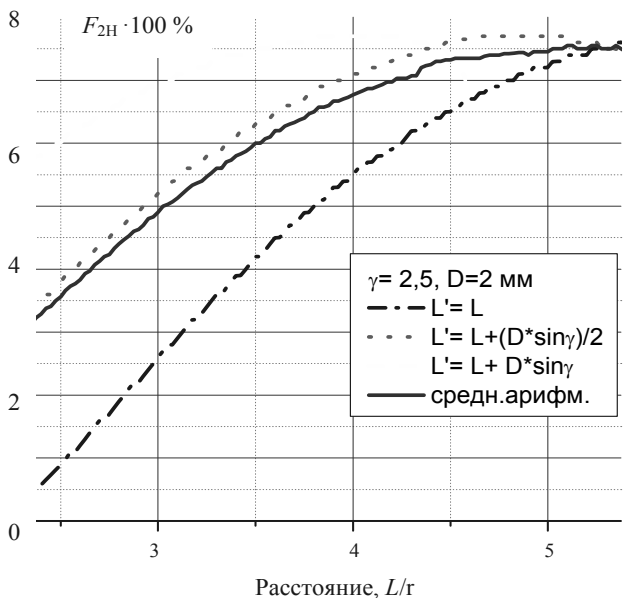


Рис. 10. Зависимость выходного сигнала от перемещения. Разное расстояние между торцами волокон по площади общего торца жгута и плоскостью микрзеркала

Задача суммирования разбивается на два этапа. На первом этапе рассмотрим случай, когда одно приемное волокно окружено бесконечным множеством излучающих. Если в кабеле используются одинаковые стандартно изготавливаемые волокна с соответствующими значениями апертуры и диаметрами сердечника и оплетки и можно считать, что каждое волокно окружено шестью другими, то для такой конструкции при расчете величины светового потока, попавшего в приемное волокно, можно ограничиться суммой вкладов световых потоков, излученных волокнами, принадлежащих первым восьми слоям, окружающим данное приемное волокно, т.е. выполняется условие $a/r < 11$. Вклад всех остальных излучающих волокон в преобразовательную функцию F_2 , не удовлетворяющий этому условию, оказывается менее 0,5 % [2]. Это позволяет ввести понятие кластера – набора

излучающих волокон, которые дают вклад в световой поток данного приемного волокна. Общая интенсивность светового потока, падающего на фотоприемник, определяется как

$$I_{ss} = \sum_k I_{sk} = \sum_k \frac{1}{2} \sum_a I_{1a} n_a, \quad (17)$$

где I_{1a} , n_a – вклад в интенсивность светового потока от излучающего волокна и количество излучающих волокон на расстоянии a до приемного в пределах кластера; I_s – вклад данного кластера в общую интенсивность светового потока; k – общее число кластеров. Отметим, что параметр a принимает только дискретные значения, определяемые размерами кластера.

Модель кластера, по площади которого проводилось суммирование, показана на рис. 11.

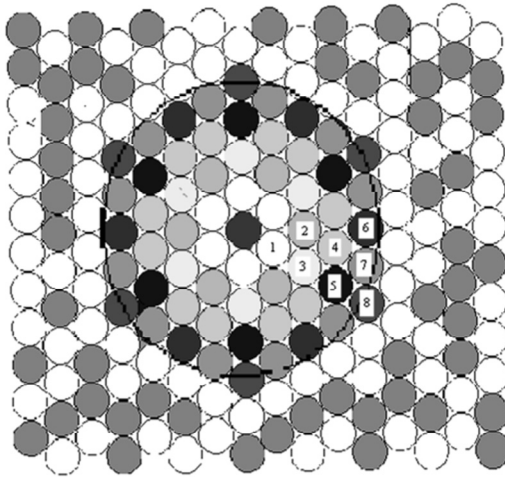


Рис. 11. Модель кластера волокон кабеля. Цифрами обозначены слои волокон, для которых выполняется условие $a/r < 11$

Поскольку максимальная чувствительность при прочих равных условиях достигается при минимально возможном a , то целесообразно расположить излучающие и приемные волокна чередующимися слоями, как показано на рис. 12, б.

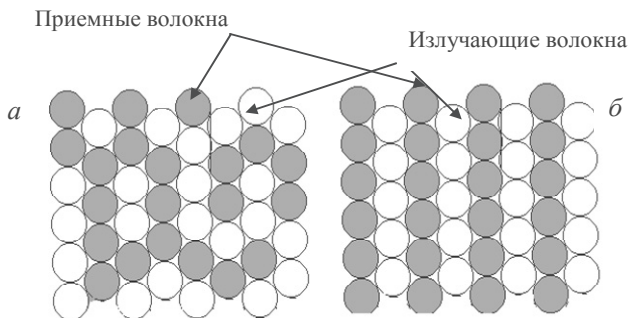


Рис. 12. Случайно-равномерное (а) и слоистое (б) расположение оптических волокон в кабеле

В этом случае чувствительность возрастает (при прочих равных условиях) на 8...15 %. В частности, при рассмотрении волоконно-оптического кабеля с общим числом волокон $N \approx 500$ при случайном распределении оптических волокон и при их слоистом чередующемся распределении по площади торца кабеля приведенная к интенсивности потока оптического излучения, испускаемого источником, чувствительность в рабочем диапазоне расстояний L/r составила соответственно 0,029 и 0,032 [27].

3. Расчет функции механического преобразования

Согласно описанной выше структуре полной функции преобразования амплитудных ВОД, одной из составляющих является функция механического преобразования F_1 . Вид данной функции зависит от формы и геометрических размеров чувствительного элемента ВОД, от материала, из которого изготовлен чувствительный элемент, а также от способа преобразования измеряемой величины в перемещение. Согласно [2] амплитудную модуляцию потока оптического излучения можно осуществить, изменяя 1) коэффициент поглощения; 2) показатель преломления и 3) относительным перемещением источников и приемников оптического излучения. В случае волоконно-оптических датчиков давления предпочтительнее использовать способ № 3 из технологических (воспроизводимость, точность соблюдения размеров модуляторов оптического излучения) и эксплуатационных (долговеч-

ность, стабильность передаточной характеристики модуляторов оптического излучения) соображений.

В случае измерения давления одной из основных форм чувствительного элемента является мембрана из упругого материала, жестко защемленная по контуру. С точки зрения технологии наиболее оптимальной формой чувствительного элемента является прямоугольник (квадрат), так как в этом случае возможно изготовление чувствительного элемента при помощи методов микромеханики, что позволяет выдержать исходные размеры с точностью до единиц микрометров.

В качестве материала для изготовления чувствительных элементов предпочтительно выбрать монокристаллический кремний, технология обработки которого в настоящее время хорошо отработана и применяется при создании изделий микроэлектроники. При этом свойства монокристаллического кремния как материала (твердость, упругость, химическая стойкость) удовлетворяют требованиям, предъявляемым к чувствительным элементам [2, 28, 29].

На рис. 13 представлены схемы упругих мембран из кремния как чувствительных элементов ВОД. Сложная форма чувствительного элемента (он составляет единое целое с основанием, на котором она крепится) объясняется необходимостью механической развязки ЧЭ от других элементов конструкции ВОД. Наличие жесткого центра позволяет уменьшить нелинейность функции преобразования, связанной с искривлением поверхности чувствительного элемента под давлением [2].

В частном случае плоской мембраны, как показано в [30, 31], для расчета функции механического преобразования F_1 может быть применен вариационный метод. Суть метода заключается в том, что прогибы упругого чувствительного элемента определяются исходя из принципа виртуальных перемещений, который применительно к рассматриваемой задаче дает уравнение

$$\delta V - p \int \delta w dx_1 dx_2 = 0, \quad (18)$$

где δw – вариация прогибов; V – полная энергия изогнутой пластины.

Решение ищем в виде пробной функции с неизвестными постоянными коэффициентами. Пробную функцию для квадратного чувствительного элемента удобно выбрать в полиномиальной форме [30]:

$$w = C_1 (x_1^2 - a^2)^2 (x_2^2 - a^2)^2 + C_2 (x_1^2 - a^2)^3 (x_2^2 - a^2)^3, \quad (19)$$

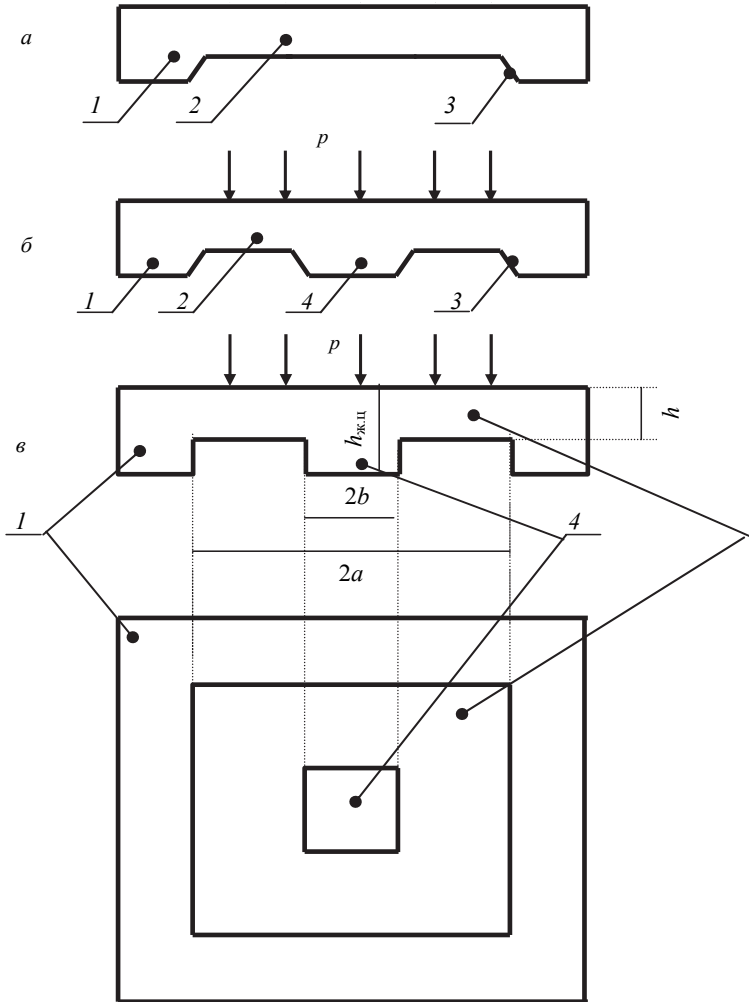


Рис. 13. Схема кремниевого упругого ЧЭ и его нагружения:

a – ЧЭ в виде плоской профилированной мембраны; *б* – ЧЭ в виде профилированной мембраны с жестким центром; *в* – моделируемая структура ЧЭ; 1 – рамка; 2 – тонкая часть; 3 – боковой скос; 4 – жесткий центр; $2a$ и $2b$ – размеры сторон квадратной мембраны и жесткого центра; h и $h_{жц}$ – толщина мембраны и жесткого центра; p – давление

где C_1 и C_2 – коэффициенты, определяемые из уравнения (19), которые применительно к выбранной функции определяются из уравнений:

$$\int_{-a}^{+a} \int_{-a}^{+a} (\widehat{L}w - p)(x_1^2 - a^2)^2 (x_2^2 - a^2)^2 dx_1 dx_2 = 0, \quad (20)$$

$$\int_{-a}^{+a} \int_{-a}^{+a} (\widehat{L}w - p)(x_1^2 - a^2)^3 (x_2^2 - a^2)^3 dx_1 dx_2 = 0. \quad (21)$$

Начальные условия: прогибы и их первые производные по контуру заземления равны нулю:

$$w_\Gamma = 0, \quad (dw/dn)_\Gamma = 0, \quad (22)$$

где L – оператор дифференциального уравнения; Γ – контур мембранного чувствительного элемента.

Монокристаллический кремний, из которого в большинстве случаев изготавливаются мембранные чувствительные элементы, обладает анизотропией механических свойств в разных кристаллографических направлениях. Учитывая это, если расчеты прогибов провести для трех основных кристаллографических направлений – (100), (110), (111) – и совместить систему координат со срединной плоскостью мембраны, а начало координат выбрать в центре пластины, получим

$$L = D_{11} \frac{\partial^4}{\partial x_1^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + D_{22} \frac{\partial^4}{\partial x_2^4}, \quad (23)$$

где D_{ij} – изгибные жесткости анизотропной мембраны.

Интегрирование (20) и (21) позволяет определить коэффициенты C_1 и C_2 , а вместе с ними и прогибы w [30, 31].

Расчет функции механического преобразования в более общем случае, т. е. зависимости прогибов чувствительного элемента ВОД, изготовленного в виде жестко заземленной сложно профилированной мембраны, – сложная инженерная задача, не во всех случаях имеющая аналитическое решение [32].

Однако приведенное в литературных источниках [2] решение такой задачи численными методами, в частности методом конечных элементов (МКЭ), согласуется с точным аналитическим решением, а также с

экспериментальными данными на уровне 4...6 %, позволяет использовать МКЭ для расчетов функции механического преобразования.

В табл. 1 приведены результаты расчетов функции F_1 , выполненных по методу конечных элементов, для следующих условий.

1. Нагрузка (давление p) равномерно распределена по всей площади чувствительного элемента.

2. Чувствительный элемент (мембрана) жестко зашпемлен по контуру.

3. $a \gg h$, где a – полудлина и полуширина; h – толщина чувствительного элемента.

4. $b \gg h_{жц}$, где b – полудлина и полуширина; $h_{жц}$ – толщина жесткого центра.

5. Для упрощения расчетной процедуры технологические скосы, возникающие при анизотропном травлении, заменялись вертикальными. В результате сечения чувствительный элемент имеет вид, как показано на рис. 13, в.

В рассматриваемом случае исследовался прогиб упругих кремниевых (кристаллографическая ориентация (100), модуль Юнга $E = 1,69 \cdot 10^{11}$ Н/м², коэффициент Пуассона $\nu = 0,062$) чувствительных элементов с размерами: $h_{жц} = 420$ мкм, $b = 0,9$ мм.

Т а б л и ц а 1

Функция механического преобразования F_1 в выражении (2)

Полуширина чувствительного элемента, мкм	Толщина чувствительного элемента, мкм	Чувствительность, м/Па	Нелинейность, %	Прогиб при 1 атм, мкм	Отношение прогиб/толщина, %
200	60	1,93E-10	1,51	19,29	32
200	70	1,27E-10	0,41	12,71	18
200	75	1,05E-10	0,20	10,46	14
200	80	8,71E-11	0,09	8,71	11
200	85	7,32E-11	0,03	7,32	9
300	60	1,79E-10	1,35	17,88	30
300	70	1,18E-10	0,38	11,77	17
300	75	9,70E-11	0,19	9,70	13
300	80	8,08E-11	0,09	8,08	10
300	85	6,81E-11	0,04	6,81	8
400	60	1,62E-10	1,15	16,25	27
400	70	1,07E-10	0,34	10,68	15

Продолжение табл. 1

Полуширина чувствительного элемента, мкм	Толщина чувствительного элемента, мкм	Чувствительность, мПа	Нелинейность, %	Прогиб при 1 атм, мкм	Отношение прогиб/толщина, %
400	75	8,81E-11	0,18	8,81	12
400	80	7,35E-11	0,10	7,35	9
400	85	6,20E-11	0,05	6,20	7
500	50	2,29E-10	3,37	22,88	46
500	60	1,45E-10	0,95	14,52	24
500	70	9,54E-11	0,29	9,54	14
500	75	7,88E-11	0,17	7,88	11
500	80	6,58E-11	0,10	6,58	8
500	85	5,56E-11	0,06	5,56	7
600	50	2,03E-10	2,71	20,35	41
600	60	1,28E-10	0,77	12,78	21
600	70	8,40E-11	0,26	8,40	12
600	75	6,95E-11	0,16	6,95	9
600	80	5,81E-11	0,10	5,81	7
600	85	4,92E-11	0,07	4,92	6
700	50	1,78E-10	2,13	17,82	36
700	60	1,11E-10	0,62	11,11	19
700	70	7,30E-11	0,23	7,30	10
700	75	6,05E-11	0,15	6,05	8
700	80	5,08E-11	0,10	5,08	6
700	85	4,31E-11	0,07	4,31	5
700	90	3,69E-11	0,06	3,69	4
800	50	1,54E-10	1,63	15,37	31
800	60	9,53E-11	0,50	9,53	16
800	70	6,28E-11	0,20	6,28	9
800	75	5,21E-11	0,14	5,21	7
800	80	4,39E-11	0,10	4,39	5
800	85	3,73E-11	0,08	3,73	4
800	90	3,21E-11	0,06	3,21	4
900	50	1,31E-10	1,24	13,07	26
900	60	8,07E-11	0,41	8,07	13
900	70	5,34E-11	0,18	5,34	8
900	75	4,45E-11	0,13	4,45	6
900	80	3,75E-11	0,10	3,75	5
900	85	3,20E-11	0,08	3,20	4
900	90	2,76E-11	0,07	2,76	3

Продолжение табл. 1

Полуширина чувствительного элемента, мкм	Толщина чувствительного элемента, мкм	Чувствительность, м/Па	Нелинейность, %	Прогиб при 1 атм, мкм	Отношение прогиб/толщина, %
1000	40	1,89E-10	3,59	18,91	47
1000	50	1,09E-10	0,94	10,94	22
1000	60	6,76E-11	0,34	6,76	11
1000	70	4,50E-11	0,17	4,50	6
1000	75	3,76E-11	0,13	3,76	5
1000	80	3,18E-11	0,10	3,18	4
1000	85	2,73E-11	0,08	2,73	3
1000	90	2,36E-11	0,07	2,36	3
1100	40	1,58E-10	2,63	15,80	39
1100	50	9,01E-11	0,72	9,01	18
1100	60	5,58E-11	0,29	5,58	9
1100	70	3,74E-11	0,16	3,74	5
1100	75	3,14E-11	0,12	3,14	4
1100	80	2,67E-11	0,10	2,67	3
1100	85	2,30E-11	0,08	2,30	3
1100	90	2,01E-11	0,07	2,01	2
1200	40	1,29E-10	1,87	12,90	32
1200	50	7,29E-11	0,56	7,29	15
1200	60	4,55E-11	0,25	4,55	8
1200	70	3,08E-11	0,15	3,08	4
1200	75	2,60E-11	0,12	2,60	3
1200	80	2,23E-11	0,10	2,23	3
1200	85	1,93E-11	0,08	1,93	2
1200	90	1,69E-11	0,07	1,69	2
1300	40	1,03E-10	1,31	10,26	26
1300	50	5,80E-11	0,44	5,80	12
1300	60	3,65E-11	0,22	3,65	6
1300	70	2,51E-11	0,13	2,51	4
1300	75	2,13E-11	0,11	2,13	3
1300	80	1,84E-11	0,09	1,84	2
1300	85	1,61E-11	0,08	1,61	2
1400	30	1,58E-10	4,27	15,76	53
1400	40	7,95E-11	0,93	7,95	20
1400	50	4,52E-11	0,35	4,52	9
1400	60	2,89E-11	0,19	2,89	5
1400	70	2,02E-11	0,12	2,02	3

Полуширина чувствительного элемента, мкм	Толщина чувствительного элемента, мкм	Чувствительность, м/Па	Нелинейность, %	Прогиб при 1 атм, мкм	Отношение прогиба/толщина, %
1400	75	1,73E-11	0,10	1,73	2
1400	80	1,51E-11	0,08	1,51	2
1400	85	1,33E-11	0,07	1,33	2
1500	40	5,98E-11	0,66	5,98	15
1500	50	3,45E-11	0,29	3,45	7
1500	60	2,26E-11	0,16	2,26	4
1500	70	1,61E-11	0,11	1,61	2
1500	75	1,40E-11	0,09	1,40	2
1500	80	1,24E-11	0,08	1,24	2
1500	85	1,11E-11	0,06	1,11	1

4. Расчет общей функции преобразования амплитудных волоконно-оптических датчиков рефлектометрического типа

Применительно к инженерным расчетам приближенно линеаризованная полная функция преобразования (выражение (2)) в случае амплитудных ВОД давления может быть описана выражением

$$u_{\text{вых}} = S_{\text{ВОД}} k_y p, \quad (24)$$

где p – номинальное давление; k_y – коэффициент усиления блока электронной обработки; $S_{\text{ВОД}}$ – чувствительность полной функции преобразования

$$S_{\text{ВОД}} = k_{\text{ф}} P_0 S_2 S_1 \eta, \quad (25)$$

где $k_{\text{ф}}$ – коэффициент преобразования фотоприемника; P_0 – мощность излучения, испускаемого источником; S_2 и S_1 – чувствительности частных функций преобразования оптического и механического преобразования соответственно; η – коэффициент ослабления излучения в оптическом канале.

Коэффициент преобразования фотоприемника k_{ϕ} определяется выражением

$$u = k_{\phi} P_{\phi}, \quad (26)$$

где u – выходной сигнал фотоприемника; P_{ϕ} – мощность потока оптического излучения, падающая на фотоприемник и пропорциональная мощности светового потока, излучаемого источником P_0 .

Нелинейность полной функции преобразования определяется как

$$NI = \sqrt{NI_{F1}^2 + NI_{F2}^2 + NI_{\text{эб}}^2}, \quad (27)$$

где NI_1 , NI_2 , $NI_{\text{эб}}$ – нелинейности частных функций преобразования оптического и механического преобразования и блока электронной обработки соответственно.

5. Задания по курсовому проектированию

Рассчитать функцию преобразования амплитудного волоконно-оптического датчика давления рефлектометрического типа. Построить график зависимости функции.

Исходные данные для проектирования

1. Толщина чувствительного элемента $h = 40$ мкм.
2. Ширина чувствительного элемента $a = 2$ мм.
3. Диапазон давлений $p = 50 \dots 100$ кПа.
4. Диаметр сердцевины оптических волокон $d = 40$ мкм.
5. Диаметр оплетки оптических волокон $d = 60$ мкм.
6. Количество волокон в кабеле $N = 450$ шт.
7. Угол расхождения светового пучка $\theta = 22,5^\circ$.
8. Взаимное расположение волокон в кабеле – случайно-равномерное (СР).
9. Оптическая мощность источника излучения $P_0 = 6$ мВт.
10. Коэффициент усиления электронного блока, $K_y = 200$ (см. табл. 2, вариант 1).

Номер строки в табл. 2 соответствует номеру параметра из списка исходных данных. Каждый вариант описывается одним столбцом таблицы. Столбец 1 повторяет вариант задания, описанный в столбце «Исходные данные для проектирования».

Таблица 2

Варианты заданий

Исходные данные	Номер варианта																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	40	50	60	60	60	70	80	70	60	60	50	60	60	50	50	40	30	80
2	2	2	2	1,8	1,8	2	2,2	2,2	1,8	1,8	2	1	1	1	2	2	1	2,2
3	50...	100...	100...	50...	30...	200...	200...	200...	100...	100...	100...	100...	100...	100...	100...	50...	50...	200...
	100	150	120	100	80	300	300	300	120	150	150	150	120	120	120	100	100	300
4	40	40	50	50	40	40	40	50	50	50	40	40	10	10	20	30	50	40
5	60	60	120	120	60	60	60	120	70	70	60	60	20	20	30	40	120	60
6	450	500	300	300	400	450	500	300	300	400	300	300	400	450	500	100	50	50
7	22,5	22,5	22,5	15	1	22,5	22,5	22,5	15	22,5	22,5	22,5	15	15	1	22,5	22,5	22,5
8	CP	CP	CP	CP	CP	СЛ	CP	CP	СЛ	CP	CP	СЛ	CP	CP	CP	CP	CP	CP
9	6	5	10	5	5	6	5	10	5	5	5	6	5	5	5	6	5	10
10	200	150	150	250	250	150	150	250	250	250	250	150	150	250	150	150	250	250

Справочная информация

- Расстояние между плоскостью, в которой лежат торцы оптических волокон, и отражающей поверхностью чувствительного элемента $L/2$ выбирается исходя из положения участка с минимальной нелинейностью функции оптического преобразования.
 - Параметр γ принять равным $2,5^\circ$.
 - Взаимное расположение оптических волокон в кабеле может быть случайно-равномерным (СР) или слоистым (СЛ).
 - Показатели преломления сердцевины и оплетки оптических волокон $n_1 = 1,5$ и $n_2 = 1,45$ соответственно.
 - Коэффициент ослабления излучения в оптическом канале $\eta = 0,03$.
 - Коэффициент преобразования фотоприемника $k_{\phi} = 75$ мВ/мкВт.
 - Кристаллографическая ориентация плоскости чувствительного элемента (100), сторон – типа $\langle 110 \rangle$.
 - При построении графика функции преобразования $u(p)$ шаг аргумента принимается равным $1/20$ заданного диапазона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бусурин В.И.* Волоконно-оптические датчики: физические основы расчета и применения / В.И. Бусурин, Ю.Р. Носов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. *Бялик А.Д.* Разработка и исследование амплитудных волоконно-оптических датчиков давления: дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.13 – приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 169 с.
3. *Окоси Т.* Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
4. *Бадеева Е.А.* Классификация амплитудных волоконно-оптических преобразователей / Е.А. Бадеева, В.А. Мещеряков, Т.И. Мурашкина // Датчики и системы. – 2003. – № 2. – С. 20–25.
5. *Зак Е.А.* Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией / Е.А. Зак. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
6. *Пивкин А.Г.* Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом / А.Г. Пивкин, Е.А. Бадеева, А.В. Гориш и др. – М.: МГУЛ, 2004. – 246 с.
7. *Таланчук П.М.* Сенсоры в контрольно-измерительной технике / П.М. Таланчук, С.П. Голубков. – Киев: Тэхника, 1991. – 146 с.
8. *Lange V.* Static and dynamic characterization of Si membranes/ V. Lange, G. Higelin // Sensors and actuators, A. – 1995. – № 46–47. – P. 47–50.
9. *Петерсен К.Э.* Кремний как механический материал / К.Э. Петерсен // ТИИЭР. – Май 1982. – Т. 70. – С. 5–49.
10. *Vaganov V.I.* Construction problems in sensors / V.I. Vaganov // Sensors and actuators, A. – 1991. – № 28. – P. 161–172.
11. *Gambling W.A.* Optical fiber for sensors/ W.A. Gambling // Sensors and actuators, A. – 1991. – № 25–27. – P. 191–196.
12. *Peters D.* Integrated optics based on silicon oxinitride thin films deposited on silicon substrates for sensor applications/ D. Peters, K. Fischer, J. Muller // Sensors and actuators, A. – 1991 – № 25–27 – P. 425–431.
13. *Маркузе В.С.* Оптические волноводы / В.С. Маркузе. – М.: Мир, 1974. – 58 с.

14. Клер Ж.-Ж. Введение в интегральную оптику / Ж.-Ж. Клер. – М.: Советское радио, 1980 – 86 с.
15. Световоды с дискретной коррекцией для передачи информации / под ред. А.Г. Мурадяна. – М.: Связь, 1975. – 56 с.
16. Бутусов М.М. Волоконно-оптические системы передачи / М.М. Бутусов, С.М Верник и др. – М.: Радио и связь, 1992. – 320 с.
17. Мещеряков В.А. Волоконно-оптические датчики давления отражательного типа для летательных аппаратов / В.А. Мещеряков, Т.И. Мурашкина, Е.А. Мурашкина // Датчики и системы. – 2001. – № 9. – С. 14–18.
18. Пивкин А.Г. Волоконно-оптические датчики аттенюаторного типа для космической техники / А.Г Пивкин, Т.И. Мурашкина. – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. – 152 с.
19. Мурашкина Т.И. Амплитудные волоконно-оптические датчики автономных систем управления / Т.И. Мурашкина, В.И. Волчихин. – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 1999. – 173 с.
20. Зак Е.А. Особенности проектирования рефлектометрических ВОД перемещений / Е.А. Зак, А.Л. Тув // Измерительная техника. – 1997. – № 1. – С. 28–30.
21. Капани М. Волоконная оптика / М. Капани. – М.: Мир, 1967. – 186 с.
22. Даниелян Г.Л. Многоканальные волоконно-оптические жгуты / Г.Л. Даниелян, Ю.Н. Федин // Приборы и системы управления. – 1998. – № 8. – С. 27–28.
23. Пивкин А.Г. Волоконно-оптические датчики аттенюаторного типа для летательных аппаратов / А.Г. Пивкин, В.А. Мещеряков, Т.И. Мурашкина и др. // Датчики и системы. – 2003. – № 4. – С. 11–14.
24. Бялик А.Д. Особенности проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления / А.Д. Бялик // Сборник трудов НГТУ. – 2003. – № 4. – С. 159–164.
25. Гридчин В.А. Особенности проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления, использующих кремниевые мембранные чувствительные элементы / В.А. Гридчин, А.Д. Бялик // Приборы. – 2005. – № 7. – С. 25–29.
26. Бялик А.Д. Особенности преобразовательных характеристик амплитудных волоконно-оптических датчиков давления рефлектометрического типа / А.Д. Бялик // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 1. – С. 338–341.
27. Свидетельство на полезную модель 26652 РФ 7 G 01 L 11/02. Амплитудный волоконно-оптический преобразователь механических величин / Бялик А.Д. (РФ). – № 2002114123; заявл. 27.05.2002; опублик. 10.12.2002. – 4 с.
28. Loke Y. Fabrication and characterization of silicon micromachined threshold accelerometers / Y. loke, G.H. McKinnon, M.J. Brett // Sensors and actuators, A. – 1991. – № 29. – P. 241–250.

29. *Marty J.* Fiber-optic accelerometer using silicon micromachining techniques / J. Marty, A. Malki, C. Renouf // *Sensors and actuators*, A. – 1995. – № 46–47. – P. 470–473.

30. *Гридчин В.А.* Физические основы сенсорной электроники. Ч. 1. Сенсоры механических величин: учеб. пособие / В.А. Гридчин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1995. – 107 с.

31. *Гридчин В.А.* Физика микросистем. Ч. 1 / В.А. Гридчин, В.П. Драгунов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 415 с.

32. *Лехницкий С.Г.* Анизотропные пластинки / С.Г. Лехницкий – М., Л.: ОГИЗ, Гостехиздат, 1947. – 208 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Структура функции преобразования амплитудных ВОД	6
2. Расчет функции оптического преобразования	8
2.1. Расчет составляющей функции преобразования оптической модуляции, связанной со стандартизованными характеристиками элементов конструкции	9
2.2. Расчет составляющей функции преобразования оптической модуляции, связанной с переменными характеристиками элементов конструкции	12
3. Расчет функции механического преобразования	22
4. Расчет общей функции преобразования амплитудных волоконно-оптических датчиков рефлектометрического типа	29
5. Задания по курсовому проектированию	30
Список литературы	33

МИКРООПТИКА В ЭЛЕКТРОНИКЕ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ КАК ЭЛЕМЕНТОВ МИКРООПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Методические указания