

07:12

©1994 г.

ПАССИВНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР С КРЕМНИЕВЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

А.В.Листвин, Т.В.Потапов, С.В.Твердов

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязинская часть,
141120, Фрязино, Россия
(Поступило в Редакцию 29 сентября 1993 г.
В окончательной редакции 7 июня 1994 г.)

Предложен новый принцип построения пассивных волоконно-оптических датчиков физических величин. Применение этого принципа продемонстрировано на примере акселерометра, в котором для измерения смещения чувствительного элемента вместо тензодатчика применяется амплитудный волоконно-оптический датчик углового смещения. Пороговая чувствительность которого составила $3 \cdot 10^{-10}$ рад/Гц^{1/2}. Динамический диапазон и пороговая чувствительность акселерометра при собственной частоте чувствительного элемента ~ 800 Гц составили соответственно ± 10 г и 10^{-5} г/Гц^{1/2}.

Во многих типах низкороговых волоконно-оптических датчиков измеряемая физическая величина преобразуется в линейное перемещение и может быть измерена с помощью высокочувствительных интерференционных методов [1]. Трудности реализации потенциальных возможностей таких датчиков связаны в первую очередь с влиянием низкочастотных дестабилизирующих факторов — вибраций и флуктуаций температуры. Как правило, глубина медленных вариаций фазы, обусловленных мешающими воздействиями, значительно превосходит величину слабых, но более быстрых вариаций, вызываемых измеряемым сигналом. Поэтому большое внимание уделяется разработке схем регистрации сигнала, позволяющих исключить влияние этих дестабилизирующих факторов.

При работе с низкокогерентным источником излучения — светодиодом, выбор которого диктуется необходимостью обеспечения низкой стоимости и большого срока службы датчика, практически единственным на сегодняшний день решением является применение активных схем стабилизации рабочей точки. Очевидно, что при этом теряется одно из основных преимуществ волоконно-оптических датчиков — пассивность.

Линейное перемещение консольного чувствительного элемента в акселерометре [1], вибрационном магнитометре [2], кремниевых микрорезонаторах [1], атомно-силовом микроскопе [3] и т.д. как правило, сопровождается одновременно и изменением угла наклона консоли. В таких датчиках величину внешнего воздействия можно определить не только интерференционным методом по линейному перемещению консоли, но и амплитудным методом по изменению ее угла наклона, что позволяет создавать пассивные схемы датчиков, пригодные для применения в условиях сильных электромагнитных помех, в зонах с повышенной агрессивностью среды, взрывоопасностью и т.д., и делает их потенциально конкурентоспособными с уже имеющимися промышленными разработками.

Но, как хорошо известно, пригодность датчиков к промышленному внедрению определяется не только их метрологическими характеристиками, но и надежностью, долговечностью, стабильностью, малыми габаритами, массой и энергопотреблением при низкой трудоемкости изготовления и небольшой стоимости. В этой связи большое значение приобретает технологичность изготовления чувствительного элемента датчика. Одним из путей решения проблемы является применение в волоконно-оптическом датчике чувствительных элементов, уже освоенных промышленностью, например кремниевых микрорезонаторов, для изготовления которых существуют готовые технологические линии.

В настоящей работе исследуется волоконно-оптический акселерометр (ВОА), выполненный на основе чувствительного элемента промышленного кремниевого акселерометра, в котором вместо тензодатчика для измерения смещения сейсмической массы применяется амплитудный волоконно-оптический датчик углового смещения, что делает акселерометр пассивным. Показано, что чувствительность датчика линейного перемещения, выполненного на основе амплитудного датчика углового смещения, близка к чувствительности интерференционных методов измерения линейных перемещений.

Чувствительный элемент акселерометра, схематически показанный на рис. 1, представляет собой консоль с массой на конце, выполненную путем анизотропного травления кремния. Изменение угла наклона консоли под действием ускорения измеряется с помощью амплитудного волоконно-оптического датчика углового смещения. Угол наклона определяется по изменению мощности излучения отраженного от консоли обратно в многомодовый световод, торец которого располагается в передней фокальной плоскости градиентной линзы. Часть отраженного излучения, проходя через световод, поступает на фотоприемник, расположенный в одном из плеч Y-образного ответвителя. В другое плечо ответвителя вводится излучение светодиода. При изменении угла наклона консоли изображение торца световода смещается в поперечном направлении относительно оси световода и соответственно изменяется отклик фотоприемника.

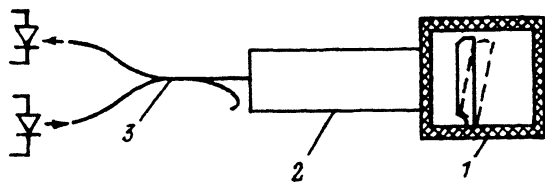


Рис. 1. Схема чувствительного элемента ВОА.

1 — кремниевая консоль в закрытом корпусе, 2 — градиентная линза, 3 — Y-образный ответвитель.

Изменение интенсивности I/I_0 излучения, отраженного от массы обратно в многомодовый световод со ступенчатым профилем показателя преломления, связано с поперечным смещением y изображения его торца относительно сердцевины световода диаметра p соотношением [4]

$$\frac{I}{I_0} = \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos\left(\frac{y}{p}\right) - \frac{y}{p} \left[1 - \left(\frac{y}{p}\right)^2 \right]^{1/2} \right\}. \quad (1)$$

Рассчитанная по формуле (1) зависимость I/I_0 от y представлена на рис. 2. Как видно, для того чтобы обеспечить работу на линейном участке характеристики, изображение торца световода должно быть смещено в начальном положении примерно на четверть диаметра сердцевины световода. Учитывая, что поперечное смещение y изображения торца световода выражается через угол наклона ε консоли и фокусное расстояние F градиентной линзы как $y = 2F\varepsilon$, и ограничиваясь областью малых смещений $y < 0.3p$, где $I/I_0 \cong 1 - 4y/\pi p$, выражение для коэффициента преобразования датчика угла наклона можно представить в виде

$$S(\varepsilon) = \left| \frac{1}{I_0} \frac{dI}{d\varepsilon} \right| = \frac{8F}{\pi p}. \quad (2)$$

Чувствительность акселерометра находим из фурье-образа уравнения колебаний консоли [5]

$$\frac{x_\omega}{a_\omega} = K_\omega = (-\omega^2 + ih\omega + \omega_0^2)^{-1}, \quad (3)$$

где K_ω — частотная передаточная функция консоли; h — коэффициент затухания; ω_0 — собственная частота колебаний; x_ω — фурье-компонента продольного смещения x конца консоли длины L ; которое выражается через ее угол наклона ε как $x \cong L\varepsilon$; a_ω — фурье-компонента действующего ускорения a .

Учитывая, что на практике частотный диапазон слабодемпфированного акселерометра ограничен уровнем 20% собственной частоты, где

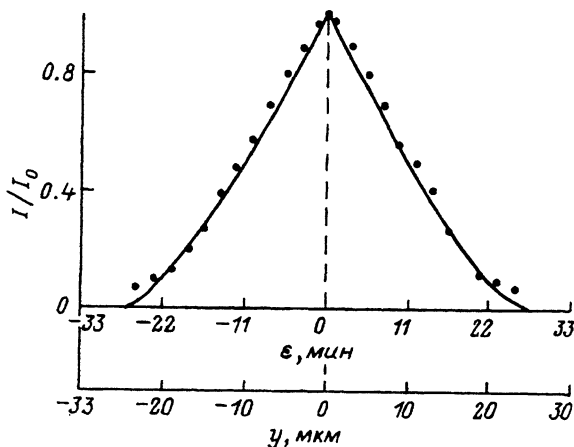


Рис. 2. Зависимость интенсивности от поперечного смещения изображения торца световода y и угла поворота зеркала ε .

Теоретическая зависимость — сплошная линия, экспериментальные результаты — звездочки.

малы искажения амплитудной и фазовой частотных характеристик, положим $|K_{\omega}| \cong 1/\omega_0^2$. В этом приближении коэффициент преобразования акселерометра $S(a_{\omega})$ можно представить с помощью (3), (4) в виде

$$S(a_{\omega}) = \left| \frac{1}{I_0} \frac{dI_{\omega}}{da_{\omega}} \right| = \frac{8F}{\pi L p \omega_0^2}. \quad (4)$$

В предположении, что система ограничена дробовыми шумами фотоприемника

$$c/\text{ш} = \left(\frac{W\eta}{2e\Delta f} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

где W — мощность, падающая на фотоприемник, η — квантовая эффективность, e — заряд электрона, Δf — полоса частот усилителя, минимально обнаружимое ускорение можно представить в виде

$$a_{\omega}^{\min} = (S(a_{\omega})c/\text{ш})^{-1} = \frac{\pi L p \omega_0^2}{8F} \left(\frac{2e\Delta f}{W\eta} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

Для значений параметров, реализованных на эксперименте, $L = 1.7$ мм, $p = 50$ мкм, $F = 3.8$ мм, $f_0 = \omega_0/2\pi = 800$ Гц, $\eta = 0.5$ А/Вт, $W = 11$ мкВт, $\Delta f = 1$ Гц из уравнений (2)-(6) получаем следующие оценки: $S(\varepsilon) = 2 \cdot 10^2$ рад $^{-1}$, $S(a_{\omega}) = 4.4 \cdot 10^{-2}$ 1/г, $c/\text{ш} = 4 \cdot 10^6$ Гц $^{1/2}$, $a_{\omega}^{\min} = 5.8 \cdot 10^{-7}$ г/Гц $^{1/2}$.

Э к с п е р и м е н т. Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 3. Для калибровки исследуемого ВОА был разработан миниатюрный вибростенд с консольным креплением, обеспечивающим его плоскопараллельное перемещение при малых амплитудах вибраций. Гармонические колебания вибростенда в диапазоне частот $20-2 \cdot 10^3$ Гц возбуждались с помощью цилиндрической пьезокерамики, управляемой звуковым генератором. Амплитуда колебаний измерялась с помощью автодинного интерферометра с He-Ne лазером ОКГ-13, а также вибрационным анализатором ROBOTRON 01 022 с пьезокерамическим датчиком КД 35. Амплитудно-частотная характеристика вибростенда, нагруженного чувствительным элементом ВОА

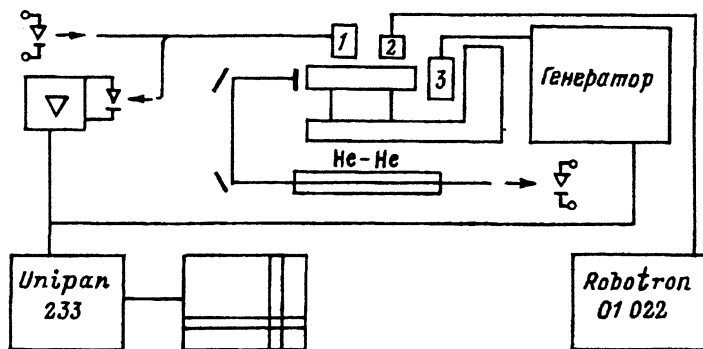


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки.

1 — чувствительный элемент, 2 — датчик КД-35, 3 — пьезокерамика.

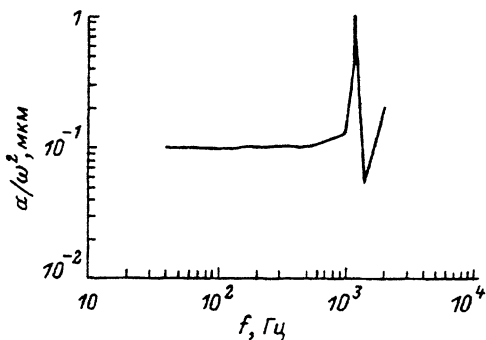


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика вибростенда.

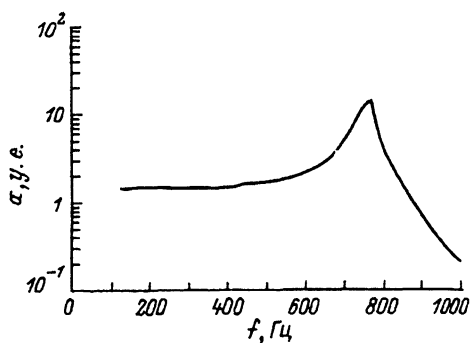


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика ВОА.

и датчиком КД 35, представлена на рис. 4. Как видно из рисунка, конструкция вибростенда обеспечивает постоянство амплитудной характеристики вплоть до частот порядка 1 кГц.

В датчике углового смещения использовался светодиод ИЛПН-304 и фотоприемник ФД-24К, расположенные в плечах Y-образного ответвителя на основе многомодового волокна, со ступенчатым профилем показателя преломления и диаметром световедущей жилы $p = 50$ мкм. Калибровка датчика проводилась с помощью зеркала с прецизионным отсчетом угла поворота ε , установленным вместо консоли за градиентной линзой с фокусным расстоянием $F = 3.8$ мм. Полученная экспериментально зависимость отклика фотоприемника от угла поворота зеркала приведена на рис. 2. Видно, что эксперимент хорошо согласуется с расчетом по формуле (1), откуда, в частности, следует, что

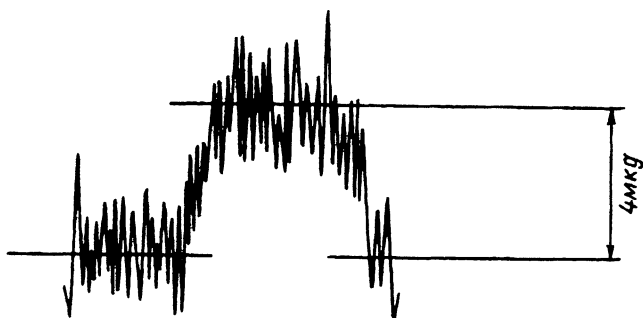


Рис. 6. Отклик ВОА на ускорение 4 мкг на частоте 300 Гц в полосе 0.1 Гц.

влияние аббераций линзы мало и имеется потенциальная возможность увеличить чувствительность к угловому смещению за счет использования световодов с меньшим диаметром световедущей жилы.

Отношение сигнал/шум на частотах выше 30 Гц при мощности излучения поступающего на фотоприемник $W = 11 \text{ мкВт}$ составило $c/\text{ш} = 3 \cdot 10^5 \text{ Гц}^{1/2}$. Такое значение отношения сигнал/шум, примерно на порядок хуже величины отношения сигнал/шум, обусловленной дробовыми шумами фотоприемника, и было связано с паразитными интерференционными помехами. Учитывая, что коэффициент преобразования $S(\varepsilon) = 2 \cdot 10^2 \text{ рад}^{-1}$ для минимально обнаружимого значения угла ε на частотах выше 30 Гц, получаем оценку $\varepsilon^{\min} = 1.7 \cdot 10^{-8} \text{ рад/Гц}^{1/2}$. Используя связь между продольным смещением конца консоли и углом ее наклона $x = L \cdot \varepsilon$ для минимально обнаружимого значения продольного смещения x , получаем $x^{\min} = 3 \cdot 10^{-11} \text{ м/Гц}^{1/2}$, что сравнимо с чувствительностью интерференционных методов измерения [1].

Чувствительный элемент ВОА, схематически показанного на рис. 1, представляет собой консоль, находящуюся в кремниевом корпусе. В таком чувствительном элементе уже решены такие конструкторские проблемы, как демпфирование колебаний, защита от перегрузок, повторяемость результатов. Демпфирование колебаний в таком чувствительном элементе воздушное, так как консоль находится в практически замкнутом объеме кремниевого корпуса. Защита акселерометра от перегрузок обусловлена тем, что стенки корпуса ограничивают отклонения консоли. Торец световода приклеивался к градиентной линзе, которая прикреплялась к кремниевому корпусу. Таким образом получалась миниатюрная и монолитная конструкция.

Измеренная с помощью предварительно калиброванного вибростенда амплитудно-частотная характеристика ВОА приведена на рис. 5. На резонансной частоте консоли $f_0 = 800 \text{ Гц}$ добротность составила величину $Q = 14$. Коэффициент преобразования $S(a_\omega)$ в рабочем диапазоне частот $f \leq 600 \text{ Гц}$ составил $2 \cdot 10^{-1} \text{ с}^2/\text{м}$, что близко к полученной выше оценке. Результаты прямых измерений пороговой чувствительности на частоте 300 Гц приведены на рис. 6, на частотах выше 30 Гц получено значение минимально обнаружимого ускорения $a_\omega^{\min} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ г/Гц}^{1/2}$.

Список литературы

- [1] *Optical Fiber Sensors: System and Applications* / ed. B. Culshaw and J. Dakin. Vol. 2. Boston: Artech House, 1989.
- [2] Листвин В.Н., Александров А.Ю., Козел С.М., Чуренков А.В. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 15. С. 36.
- [3] Эдельман В.С. // ПТЭ. 1991. № 1. С. 24.
- [4] Унгер Х.-Г. Планарные и волоконно-оптические волноводы. М.: Мир., 1980. 656 с.
- [5] Нуберт Г.П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Л.: Энергия, 1970. 360 с.