

УДК 671.327.1

© С. В. Соколов, В. В. Каменский

ОПТИЧЕСКИЙ НАНОАКСЕЛЕРОМЕТР

Рассмотренный в статье оптический наноакселерометр реализует идею использования телескопических нанотрубок в качестве чувствительного элемента устройства, а также возможности управления ими с помощью оптических потоков.

Кл. сл.: оптическое наноустройство, оптические устройства обработки информации, оптические нановолокна, телескопические нанотрубки, источник постоянного оптического сигнала, оптический нановолоконный Y-разветвитель, оптический нановолоконный объединитель

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из основных направлений создания инерциальных измерителей (в частности, акселерометров) является их микроминиатюризация. На сегодняшний день технология микроэлектромеханических систем (MEMS) позволяет разработать измерители, которые пока удовлетворяют требованиям большинства разработчиков по массо-габаритным характеристикам [1]. Но основной проблемой этой технологии является низкая точность MEMS-измерителей (MEMS-гироскопов, MEMS-акселерометров и т. д.), обусловленная не только их инструментальными, но и методическими погрешностями. Более того очевидно, что в связи с постоянно возрастающими требованиями к точности и габаритам инерциальных измерителей MEMS-технология не является окончательной. Поэтому в качестве альтернативы существующим технологиям для создания инерционных наноизмерителей, и в частности акселерометров, ниже рассматривается возможность использования одного из интенсивно развивающихся сегодня направлений нанотехнологии — нанофотоники [2].

СТРУКТУРА НАНОАКСЕЛЕРОМЕТРА

Описываемый ниже акселерометр построен в основном на основе оптических нановолокон, варианты технического исполнения которых описаны в [3], и открытых в 2002 г. телескопических нанотрубок, под которыми понимается пара вложенных одна в другую нанотрубок [4, 5].

С точки зрения технологии изготовления представленного акселерометра важно отметить, что реализация соединений оптических нановолокон — как оптических нановолоконных объединителей,

так и оптических нановолоконных Y-разветвителей, рассматриваемых далее, — в настоящее время может быть осуществлена как на основе наноструктурированных пористых стекол [6, 7], так и на основе фотонно-кристаллических световодов [8].

Преимуществами разработанного оптического наноакселерометра являются, во-первых, его реализация на основе уже апробированных нанозаготовок — нановолноводов и телескопических нанотрубок, позволяющих предельно на сегодняшний день уменьшить размеры измерителя; во-вторых, высокое быстродействие и, в-третьих, широкий диапазон измерения.

Разработанный оптический наноакселерометр (рис. 1) содержит следующие функциональные узлы:

И — источник постоянного оптического сигнала;

ИК — компенсирующий источник оптического сигнала;

ГОИ — генератор оптических импульсов;

ТНТ — телескопические нанотрубки;

Р — оптический нановолоконный Y-разветвитель;

ОВ1, ОВ2, ОВ3 — три оптических нановолокна.

Принцип действия данного оптического наноакселерометра основан на измерении времени перемещения внутренней нанотрубки при соответствующем ускорении объекта при условии компенсации всех сил, препятствующих ее движению (и рассмотренных далее), за счет сил, обусловленных давлением оптических потоков на внутреннюю нанотрубку.

В данном устройстве телескопические нанотрубки ТНТ расположены между выходом оптического нановолокна ОВ3 и первым выходом

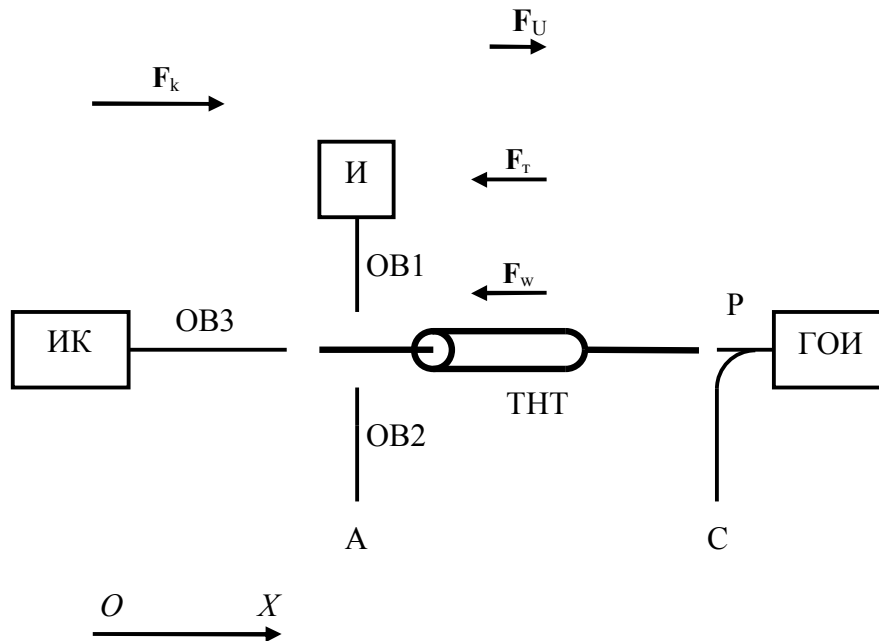


Рис. 1. Схема оптического наноакселерометра.

И — источник постоянного оптического сигнала; ИК — компенсирующий источник оптического сигнала; ГОИ — генератор оптических импульсов; ТНТ — телескопические нанотрубки; Р — оптический нановолоконный Y-разветвитель; ОВ1, ОВ2, ОВ3 — три оптических нановолокна; F_U — сила инерции; F_k — компенсирующая сила; F_T — сила трения; F_w — сила Ван-дер-Ваальса

оптического нановолоконного Y-разветвителя Р по оси распространения их выходных оптических сигналов. В крайнем левом (исходном) положении внутренняя нанотрубка разрывает оптические связи между первым ОВ1 и вторым ОВ2 оптическими нановолокнами.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ НАНОАКСЕЛЕРОМЕТРА

Рассмотрим работу наноакселерометра подробно. Оптический сигнал с выхода компенсирующего источника ИК воздействует на внутреннюю нанотрубку с силой F_k , компенсирующей сумму всех сил F_Σ , препятствующих движению внутренней нанотрубки вправо ($F_\Sigma = F_w + F_T$, где F_w — сила Ван-дер-Ваальса ($\approx 0.1\text{--}5$ нН), F_T — сила трения ($\approx 0.1\text{--}0.5 F_w$)).

Примем величину компенсирующей силы F_k равной 10 нН, тогда требуемая мощность компен-

сирующего источника ИК, учитывая $Z \approx 18 \cdot 10^{-9}$ — известный коэффициент связи между интенсивностью светового потока и силой, действующей на внутреннюю нанотрубку [4, 5], ориентировочно будет равна

$$\Phi = F_k / Z = 10^{-8} / 18 \cdot 10^{-9} = 0.56 \text{ Вт},$$

что легко обеспечить уже существующими источниками как когерентного, так и некогерентного излучения.

Так как силы, препятствующие движению внутренней нанотрубки вправо, уже скомпенсированы, то при наличии ускорения объекта в отрицательном направлении оси OX внутренняя нанотрубка под действием силы инерции $F_U = m \cdot W$ начнет перемещаться вправо.

Считая ускорение объекта W на интервале измерения неизменным (что, как показано ниже, справедливо для подавляющего большинства подвижных объектов), перемещение внутренней нанотрубки по оси OX во времени будем описывать

известным выражением равноускоренного движения:

$$x(t) = x_0 + V_0 \cdot t + \frac{Wt^2}{2}, \quad (1)$$

где $x_0 = x(t_0) = 0$, $V_0 = V(t_0) = 0$ для рассматриваемого случая.

В этом случае внутренняя нанотрубка переместится вправо на известное расстояние Δx до первого оптического нановолокна ОВ1 за время $\Delta t = t_1 - t_0$, определяемое выражением

$$\Delta t = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta x}{W}}.$$

Если, например, принять расстояние Δx равным 10 нм и проекцию кажущегося ускорения на ось OX равной 10 м/с^2 , то внутренняя нанотрубка переместится вправо на расстояние Δx за 32 мкс.

При перемещении внутренней нанотрубки вправо на расстояние Δx возникает оптическая связь между выходом первого оптического нановолокна ОВ1 и входом второго оптического нановолокна ОВ2 — в момент времени t_1 на выходе А устройства появляется оптический сигнал.

Возврат внутренней нанотрубки в исходное положение осуществляется генератором оптических импульсов ГОИ: с его выхода оптические импульсы с заданной интенсивностью и периодом Tu , пройдя через оптический нановолоконный Y-разветвитель Р, воздействуют на внутреннюю нанотрубку, перемещая ее влево. На внутреннюю нанотрубку при этом будет действовать разность сил — силы F_n , создаваемой оптическим потоком, и суммы всех сил, препятствующих движению внутренней нанотрубки влево ($F_U + F_W + F_T$).

Так как за счет выбора мощности генератора оптических импульсов ГОИ сила, действующая на внутреннюю нанотрубку, много больше суммы всех сил, препятствующих движению внутренней нанотрубки влево ($F_n \gg F_U + F_W + F_T$), то внутренняя нанотрубка переместится в крайнее левое (начальное) положение ($x = 0$) за пренебрежительно малое время. Например, при силе $F_n = 20 \text{ нН}$ время перемещения нанотрубки в начальное положение составит 1 нс.

Интервал времени Δt между задним фронтом импульса на выходе С и моментом появления переднего фронта импульса на выходе А (рис. 2) — время измерения кажущегося ускорения W , является величиной, исходной для определения измеренного ускорения W из выражения

$$W = \frac{2 \cdot \Delta x}{(\Delta t)^2}.$$

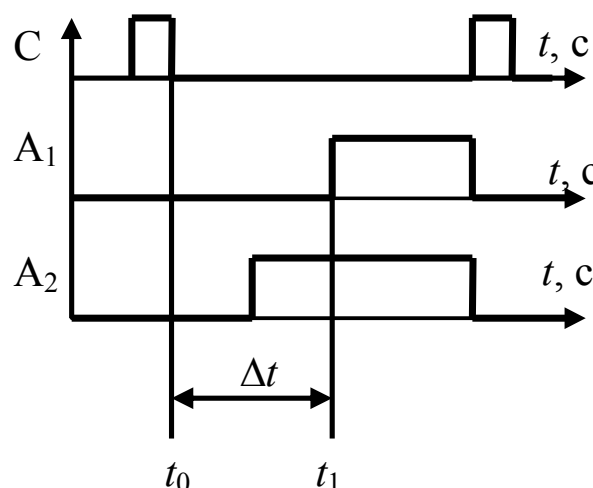


Рис. 2. Временные диаграммы работы оптического nanoакселерометра

Период Tu генератора оптических импульсов ГОИ выбирается при этом заведомо больше, чем максимальное время перемещения внутренней нанотрубки вправо на расстояние Δx (которое в свою очередь рассчитывается исходя из диапазона измеряемых ускорений).

Очевидно, что при измерении малых значений ускорения время измерения будет увеличиваться и наоборот. На рис. 2 показан пример временных диаграмм импульсов на выходах С и А при измерении ускорений $A_1 < A_2$: очевидно, что время измерения меньшего ускорения (A_1) больше, чем время измерения большего ускорения (A_2).

ОСОБЕННОСТИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Важно отметить, что время измерения кажущегося ускорения W данным оптическим nanoакселерометром определяется, по существу, временем перемещения внутренней нанотрубки на расстояние Δx в процессе измерения. Так, при $\Delta x = 10 \text{ нм}$ и ускорениях от 1 до 10^6 м/с^2 время измерения составляет $\approx 1.5 \cdot 10^{-4} - 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, что удовлетворяет частотному диапазону изменения ускорений подавляющего большинства современных подвижных объектов.

Для расширения пространства измерений в обоих направлениях оси OX необходимо использовать два работающих одновременно оптических nanoакселерометра со встречно направленными осями измерения, один из которых измеряет проекцию положительного ускорения на ось OX , а другой — отрицательного. Для определения ускорения в трех измерениях могут быть использованы соответственно три такие пары оптических nanoакселерометров, расположенные ортогонально.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Простота данного оптического наноакселерометра, широкий диапазон измерения ускорений — от 1 м/с^2 до 10^6 м/с^2 (что определяется возможностью осцилляции внутренней нанотрубки с частотой 10^7 Гц [4]), а также возможность наноразмерного исполнения делают его весьма перспективным при разработке и создании навигационных систем, а также аппаратуры для виброиспытаний и гравиметрических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Распопов В.Я.* Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 399 с.
2. *Poole C.P., Owens F.J.* Introduction to Nanotechnology. Wiley-Interscience, 2003. 400 p.
3. Оптика наноструктур / Под ред. А.В. Федорова. СПб.: Недра, 2005. 326 с.
4. *Zheng Q., Jiang Q.* Multiwalled carbon nanotubes as gigahertz oscillators // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 88. 045503.
5. *Subramanian A., Nelson B.J., Dong L.* Carbon nanotubes for nanorobot technology // *Nanotoday.* 2007. V. 2, N 6. P. 12–21.
6. *Antropova T.V., Petrov D., Yakovlev E.* Porous glasses

as basic matrixes of the microoptical devices: effect of composition and leaching conditions of the initial phase-separated glass // *Phys. Chem. Glasses: Eur. J. Glass Sci. Technol. B.* 2007. V. 48, N 5. P. 324–327.

7. *Petrov D.V., Yakovlev E.B., Antropova T.V.* Laser based processing of porous glass for micro optical devices // International Conference "Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies" (FLAMN-07), Workshop "Laser Cleaning and Artworks Conversation" (LCAC). Abstract. St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO), June 25–28, 2007. St. Petersburg. P. 44.
8. *Желтиков А.М.* Развитие технологии фотонно-кристаллических световодов в России // *Российские нанотехнологии.* 2007. Т. 2, № 1-2. С. 70–78.

Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону

Контакты: *Каменский Владислав Валерьевич*, kam-vladislav@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 26.08.2011.

THE OPTICAL NANODEVICE FOR ACCELERATION MEASUREMENT

S. V. Sokolov, V. V. Kamensky

Rostov-on-Don

The optical nanodevice for acceleration measurement realizing the idea of using multiwalled carbon nanotubes as a sensitive element and their control by means of optical streams is considered in the article.

Keywords: optical nanodevice, optical processing devices of the information, optical nanofibres, multiwalled carbon nanotubes, constant optical signal source, optical a nanofiber Y-splitter, optical nanofibres combiner