

РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЭМС С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Владимир Станиславович Корнеев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физики, тел. (383)343-29-33, e-mail: korneyv@mail.ru

Представлены результаты теоретических расчетов и экспериментальных измерений параметров МЭМС с электромагнитным управлением. Полученные экспериментальные результаты сравниваются с результатами, опубликованными в отечественных источниках. Отмечаются перспективы применения разрабатываемых устройств в качестве дефлекторов, сканеров и анализаторов спектра оптического излучения.

Ключевые слова: МЭМС с электромагнитным управлением, торсионные микрозеркала, датчик Холла, воздушный зазор, железо Армко, феррит, дефлекторы, сканеры, анализаторы спектра.

CALCULATION AND MEASUREMENT OF MEMS PARAMETERS WITH ELECTROMAGNETIC CONTROL

Vladimir S. Korneyev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Physics, phone: (383)343-29-33, e-mail: korneyv@mail.ru

The results of theoretical calculations and experimental measurements of MEMS parameters with electromagnetic control are presented. The obtained results are compared with the known ones published in domestic sources. The prospects of the developed devices application as deflectors, scanners, and analyzers of the optical radiation spectrum are indicated.

Key words: MEMS with electromagnetic control, torsion micromirrors, Hall sensor, air gap, Armco iron, ferrite, deflectors, scanners, spectrum analyzers.

Введение

В настоящее время рынок серийно выпускаемых микроэлектро-механических систем (МЭМС) достаточно плотно заполнен перспективными разработками и устройствами, области применения которых весьма разнообразны:

- микродвигатели, микрогенераторы энергии;
- ВЧ-устройства (ВЧ-коммутаторы, перестраиваемые фильтры и антенны, фазированные антенные решетки);
- измерители перемещений (гироскопы, высокочувствительные акселерометры);
- сенсоры вибраций, датчики давления, скоростей напряжений, микрофоны;

– микрооптоэлектромеханика (проекционные дисплеи, цифровые видеопроекторы, адаптивная оптика, оптические коммутаторы) [1].

В большинстве МЭМС используется электростатический способ управления подвижными элементами, обеспечивающий высокое быстродействие и точность позиционирования [2–8]. Однако, наряду с преимуществами, этот способ имеет свои недостатки, которые связаны с необходимостью дополнительного экранирования электронной части схемы от силовой управляющей системы.

Методы и материалы

В работах [9–13] представлены образцы МЭМС с электромагнитным управлением, изготовленные методами объемного травления кремния, эта технология позволяет получить свободные или отделяющиеся структуры, которые могут каким-либо образом двигаться по отношению к жестко закрепленной рамке или подложке (рис. 1).

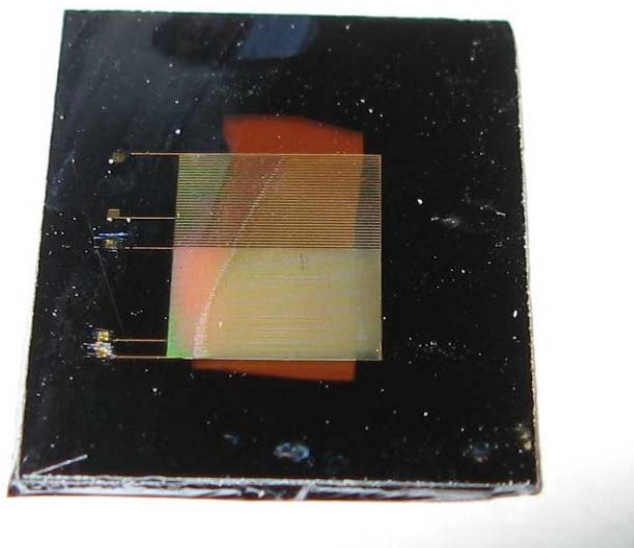


Рис. 1. Фото чипа МЭМС устройства (латеральный размер чипа 1×2 см)

Обладая микроскопическими размерами и большой крутильной жесткостью кремниевые микрополоски, обладают высокой частотой собственных крутильных колебаний (порядка десятков $\kappa\Gamma\text{ц}$), что позволяет использовать их в качестве торсионных микрозеркал дефлекторов и быстродействующих сканеров со временем переключения несколько микросекунд.

Обобщенный подход в описании теоретических моделей МЭМС позволил рассчитать параметры управления угловым положением микрозеркал и откорректировать оптическую схему экспериментальной установки (рис. 2).

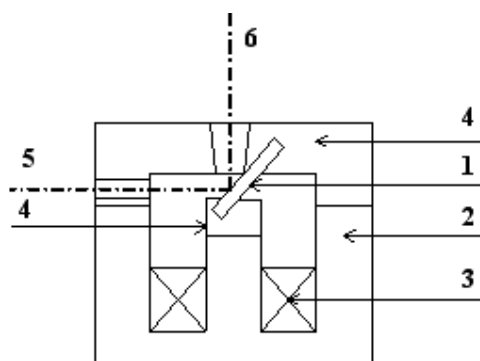


Рис. 2. Схема устройства управления угловым положением микрозеркал:

1 – кремниевый чип; 2 – ферритовый сердечник; 3 – токовая катушка; 4 – магнитопровод (2 детали); 5 – оптическая ось падающего пучка; 6 – оптическая ось отраженного пучка

Расчеты рабочих параметров МЭМС с электромагнитным управлением представлены в таблице и выполнены в [11] для сосредоточенных крутящих моментов, приложенных к среднему сечению торсионных микрозеркал, размеры которых ($l = 5$ мм, $b = 100$ мкм, $h = 3$ мкм).

Расчетные значения параметров МЭМС с электромагнитным управлением [3]

Способ управления	Параметры			
	δ (рад.)	B (Т)	B_r (Т)	i (мкА)
Электромагнитный (микромагнит) $V_m = 2,5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3$	0,056	0,1	0,1	–
Электромагнитный (магнитные элементы) $V_m = 2,5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3$	0,028	0,1	–	–
Магнитоэлектрический (токовая петля) $S_n = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$	0,050	0,1	–	200

Результаты экспериментальных измерений рабочих параметров микромеханических дефлекторов и сканеров с электромагнитным управлением представлены в [12, 13], необходимо отметить, что во всех работах для измерений индукции магнитного поля B использовался баллистический метод, дающий систематическую относительную погрешность измерений 10–15 %.

Результаты

В рамках выполненной в этом году исследовательской работы был собран измерительный зонд на основе датчика Холла *SS49E* с чувствительностью $1,75 \text{ мВ}/\text{Gauss}$, в диапазоне температур -40 – 100 °С и были проведены прямые

измерения индукции магнитного поля B в воздушном зазоре экспериментальной установки. Угол отклонения лазерного луча $\Delta\varphi$ от вертикального положения измерялся триангуляционным методом.

На рис. 3 представлены графики экспериментальных зависимостей угла отклонения лазерного луча $\Delta\varphi$ (mrad.) от индукции магнитного поля B (mT) в воздушном зазоре магнитопровода устройства управления. Все измерения индукции магнитного поля выполнены с помощью измерительного зонда на основе указанного выше датчика Холла.

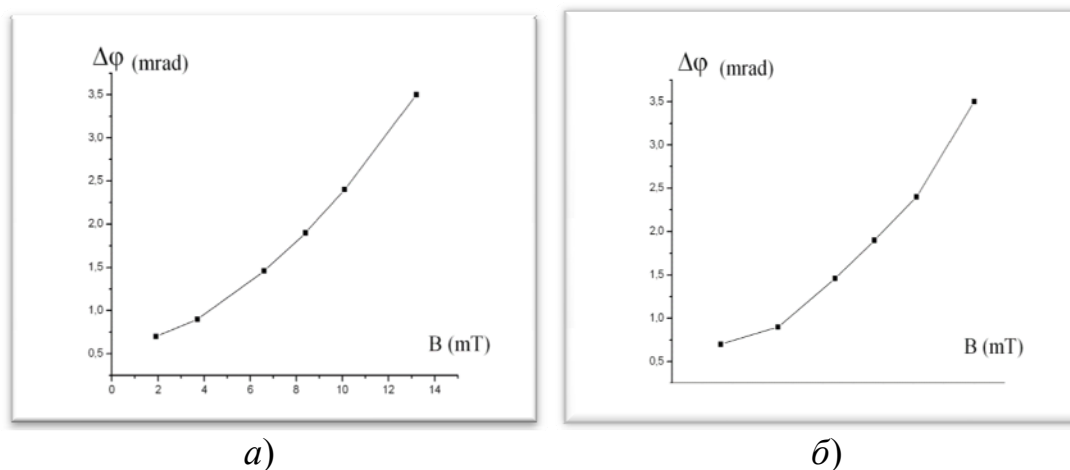


Рис. 3. Экспериментальные зависимости угла сканирования $\Delta\varphi$ (mrad.) от индукции магнитного поля в зазоре B (mT) для разных материалов магнитопровода:

а) железо Армко; б) феррит

Обсуждение

Интересно сравнить полученные нами результаты, с результатами, полученными в Институте автоматике и электрометрии СО РАН и опубликованными в [14], а также с результатами, опубликованными в [15].

В качестве сравниваемых рабочих параметров выбрана чувствительность смещения поверхности подвижного электрода, на частоте 500 Гц она составляла: $-100 \text{ нм} / \text{V}$ ($U_{cm}=10 \text{ V}$); $-150 \text{ нм} / \text{V}$ ($U_{cm}=15 \text{ V}$) [14].

Из приведенных в работе [14] экспериментальных данных, плотность энергии электростатического поля между подвижным электродом и неподвижным основанием может быть оценена $-w_e = 1300 \text{ Дж/м}^3$.

В нашем случае измерения были проведены на частоте 1000 Гц, чувствительность углового отклонения торсионных микрзеркал составляет $-2,6 \text{ мрад.} / \text{mT}$ (железо Армко); $-2,8 \text{ мрад.} / \text{mT}$ (феррит); плотность энергии магнитного поля в воздушном зазоре составляет $-w_m = 400 \text{ Дж/м}^3$.

Сравнения корректны только в том случае, когда заданы массы подвижных элементов и амплитуды их перемещений (объемы пространства свободных перемещений микробалок, торсионных микрзеркал и т.д.).

В работе [15] представлены расчетные динамические характеристики процесса прогиба микробалки с параметрами: $l = 75$ мкм, $w = 6$ мкм и $t = 2,5$ мкм под действием управляющего напряжения амплитудой $U = 82$ В, при значении начального воздушного зазора $d_z = 0,4$ мкм. Передний фронт импульса напряжения составлял $t_{имп} = 0,5$ мкс, в дальнейшем, микробалка после смещения начинала колебаться с собственной частотой около среднего положения величиной 122 нм [15].

В работах [16–20] представлены расчетные характеристики разрабатываемых МЭМС, а также оптико-электронные методы обработки слабоконтрастных изображений и дифракционных картин, которые автор использовал при подготовке данной статьи.

Заключение

В заключение необходимо указать возможные направления использования МЭМС с электромагнитным управлением. В первую очередь, это быстродействующие дефлекторы и сканеры оптического излучения, диапазон рабочих частот которых составляет от единиц Гц, до десятков кГц. Обладая хорошей чувствительностью, $2\text{--}3$ мрад. / мТ и быстродействием, данные устройства могут обеспечивать функции переключения оптических каналов связи с быстродействием в единицы микросекунд. При дополнительных изменениях схемы управления угловым положением микрзеркал, МЭМС с электромагнитным управлением могут использоваться в качестве портативных анализаторов спектра электромагнитного излучения.

Благодарности

Автор выражает благодарность заведующему лабораториями кафедры физики СГУГиТ Казацкому С. Г. за непосредственную помощь в подготовке и проведении экспериментальных измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Косцов Э. Г. Состояние и перспективы микро- и наноэлектромеханики // Автометрия. – 2009. – Т. 45, № 3 – С. 3–52.
2. Yong Y. High-yield assembly of hinged 3-D optical MEMS devices using magnetic actuation / Y. Yong, C. Liu // Proc. Int. Conf. on Solid-state Sensor and Actuators, Chicago, IL. – 1997. – Vol. 1 – P. 241–244.
3. Corrigan R. W. Calibration of a Scanned Linear Grating Light Valve Projection System / R. W. Corrigan, D. T. Amm, P. A. Alioshin et al. // SID Symposium Digest of Technical Papers. – 1999. – Vol. 30 (1). – P. 220–223.
4. Payne A. P. Resonance measurements of stresses in Al/Si₃N₄ microribbons / A. P. Payne, B. P. Staker, C. S. Gudeman, M. J. Daneman, D. E. Peter // Proc. SPIE, MEMS Reliability for Critical and Space Applications. – 1999. – 3880. – P. 90–100.

5. Liu A. Q. Micro-opto-mechanical grating switches // *Sensor and Actuators*. – 2000. – No. 86. – P. 127–134.
6. Toshiyoshi H. Electrostatic driving technique for high-precision 2-D scanning mirror / H. Toshiyoshi // *Eng. of University of California Los Angeles, USA*, April 2000.
7. Fresnel lenses in rear projection displays / A. R. Davis, C. Bush, J. C. Harvey, M. F. Foley // *SID Int. Symp. Digest Tech. Papers*. 2001. – 32 (1). – P. 934–937.
8. Trisnadi J. Overview and applications of Grating Light Valve based optical write engines for high-speed digital imaging / J. Trisnadi, C. Carlisle, R. Monteverde // *Proc. SPIE, MOEMS Display and Imaging Systems*. – 2004. – 5348. – P. 52–64.
9. Korneyev V.S. Micro- opto- mechanical scanner for terahertz spectrum diapason / V. S. Korneyev, V. V. Chesnokov, D. V. Chesnokov // *9-th Int. Symposium on Measurement Technique and Intelligent Instrument*. Proc. of ISMTII-2009, Vol. 2. – S-p-b. D.S. Rozhdestvensky Opt. Soc., 2009. – P. 2-361–2- 365.
10. Korneyev V. S. Study of the parameters of micromechanical devices with electromagnetic control // *Inter. school and seminar Modern problems of Nan electronics, Micro- and Nan systems Technologies*. Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.113–115.
11. Корнеев В. С. Разработка и исследование оптических магнитоуправляемых микро-механических устройств : дис. ... канд. техн. наук: 01.04.05. – Новосибирск, 2010. – 84 с.
12. Корнеев В. С. Экспериментальное исследование крутильных колебаний полосок микромеханической управляемой дифракционной решетки // *Вестник СГГА*. – 2010. – Вып. 1 (12). – С. 177–121.
13. Корнеев В. С., Райхерт В. А. Анализ факторов ограничивающих быстродействие МЭМС с электромагнитным управлением // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.)*. – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 2. – С. 58–61.
14. Косцов Э. Г., Соболев В. С. Низковольтный элемент программируемой полем динамической дифракционной решетки // *Автометрия*. – 2010. – Т. 46, № 3. – С. 101–108.
15. Князев И. В. Моделирование динамических характеристик переключения элементов микро-оптоэлектромеханической перестраиваемой дифракционной решетки // *Вестник СГУГиТ*. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 235–251.
16. Корнеев В. С., Чесноков В. В., Чесноков Д. В. Особенности спектральных характеристик микромеханической управляемой дифракционной решетки // *ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.)*. – Новосибирск : СГГА, 2009. Т. 4, ч. 2. – С. 24–28.
17. Корнеев В. С. Расчет амплитуд собственных колебаний для мембран прямоугольной и круглой формы // *Вестник СГУГиТ*. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 173–185.
18. Кузнецов М. М., Карманов И. Н. Оптические микроволновые линзы // *Вестник СГУГиТ*. – 2015. – Вып. 4 (32). – С. 79–85.
19. Носков М.Ф. Оптико-электронная обработка изображений шаровых элементов // *Вестник СГУГиТ*. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 254–260.
20. Корнеев В. С. Измерение сверхмалых перемещений модуляционным методом // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.)*. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 200–203.

© В. С. Корнеев, 2019