

УДК 535.421
DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-3-128-132

Исследование параметров микроэлектромеханических систем дефлекторов для определения магнитной проницаемости материала диполей

В. С. Корнеев^{1}, С. Л. Шергин¹*

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: korneyv@mail.ru, serkron@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены микроэлектромеханические системы (МЭМС) – дефлекторы с электромагнитным управлением и экспериментальный стенд для измерения их функциональных параметров. Электромагнитный способ управления позволяет получить высокую точность позиционирования отраженного пучка вдоль одной пространственной координаты, а также обеспечивает повышенное быстродействие со временем отклонения светового потока в заданное положение 5–10 мкс. Представлены графики экспериментальных и теоретических зависимостей угла отклонения светового потока от индукции управляющего магнитного поля МЭМС-дефлекторов. Методом последовательных приближений подобрано значение магнитной проницаемости материала диполя $\mu = 120$, а также определена максимальная величина углового отклонения светового потока вдоль одной пространственной координаты, которая составляет $13,5^\circ$. Представленные в работе МЭМС могут найти применение в первую очередь как быстродействующие дефлекторы и сканеры оптических потоков с диаметром пучка до 2,5 мм.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, дефлекторы, магнитная проницаемость материала

Введение

Микроэлектромеханические системы находят широкое применение в системах лазерного сканирования, системах экспресс-анализа и мониторинга состояния техногенных объектов. Перспективным направлением использования МЭМС является пространственное управление световыми потоками. Одним из способов управления потоками отраженного излучения является электромагнитный способ, который позволяет получить высокую точность позиционирования отраженного пучка вдоль одной пространственной координаты, а также обеспечивает повышенное быстродействие со временем отклонения светового потока в заданное положение 5–10 мкс.

Целью данной работы является экспериментальное определение зависимости между индукцией управляющего магнитного поля и углом отклонения отраженного светового потока, сравнение данных эксперимента с теоретическими расчетами, а также косвенное определение магнитной проницаемости материала диполя, состоящего из пленки особо чистого железа, осажденной в вакууме методом магнетронного напыления.

Методы и материалы

В работах [1–5] представлены образцы МЭМС, изготовленные методом объемного травления кремния, представляющие массив одинаковых по размерам и физическим ха-

рактическим характеристикам торсионных микрозеркал. Управление угловым положением микрозеркал основано на взаимодействии переменного магнитного поля с собственными магнитными моментами диполей, сформированных на тыльной поверхности микрозеркал.

В моделях микромеханических модуляторов [1] и дефлекторов [2] собственный магнитный момент диполей создавался электрически током, циркулирующим в витках, расположенных на верхней поверхности микрозеркал или микромагнитами, сохраняющими остаточную намагниченность, перпендикулярно внешнему управляющему полю. В последующих проектах микромеханических дифракционных решеток и дефлекторов [3, 4] для управления положением торсионных микрозеркал использовалось переменное магнитное поле, наводящее индуцированный магнитный момент в диполях из магнитомягкого материала, расположенных под углом в 45° по отношению к управляющему магнитному полю.

В работах [3, 4] было получено теоретическое выражение для угла поворота среднего сечения торсиона с координатой $x = l/2$

$$\delta_x = \int_0^{l/2} (M_k / GI_0) dx, \quad (1)$$

где G – модуль сдвига материала; I_0 – полярный момент инерции сечения торсиона; l – длина торсиона.

Если принять, что ширина торсиона b много больше толщины h , тогда угол закручивания сечения торсиона с координатой $x = l/2$ может быть найден из выражения

$$\delta_x = \frac{3}{4} \frac{\mu B^2 V_m l}{\mu_0 G b h^3} \sin 2\alpha, \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость материала диполя; V_m – объем слоя ферромагнитного материала.

Величина угла отклонения $d\Phi$ потока излучения, отраженного от среднего сечения микрозеркал, может быть определена из соотношения

$$d\Phi = 2\delta_x. \quad (3)$$

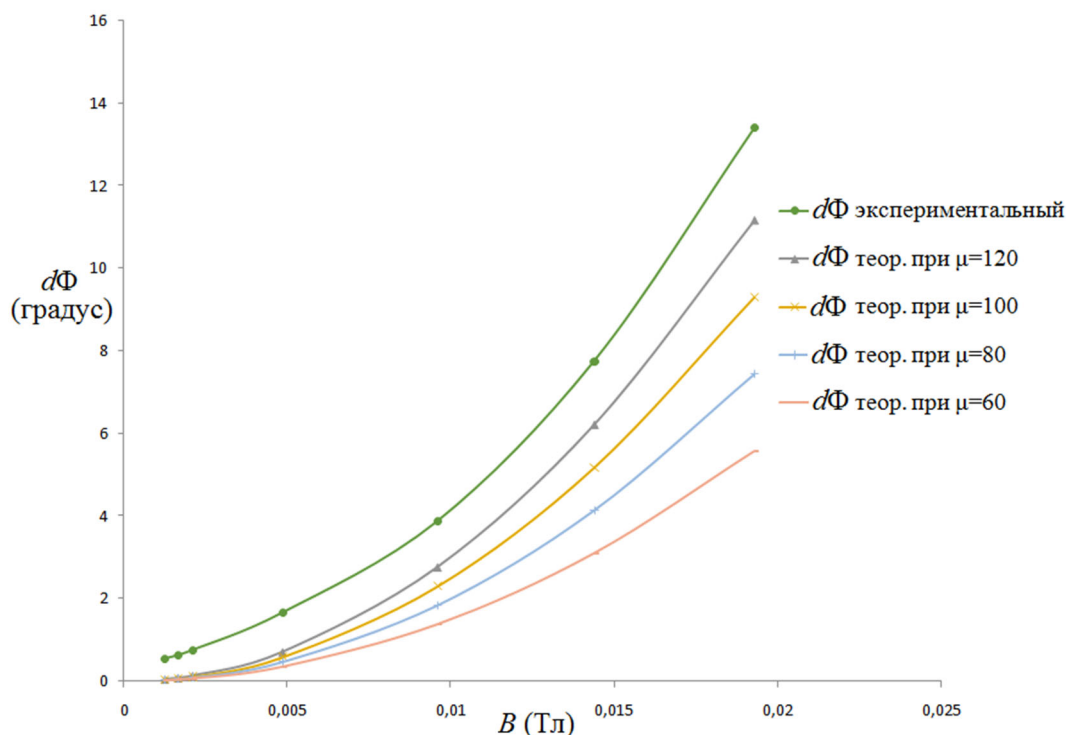
В работах [6, 7] рассмотрены вопросы теоретического моделирования и расчета функциональных параметров МЭМС с подвижными элементами в виде квадратных и круглых мембран [6], а также узких полосок [7]. При этом регистрация и обработка оптических сигналов, полученных в процессе экспериментальных исследований функциональных возможностей МЭМС-дефлекторов, осуществлялись различными методами [8–12].

В выражении (2) большое значение имеют параметры дефлектора, которые получены на основании экспериментальных измерений и расчетов: так, например, латеральные размеры микрозеркал (длина, ширина, толщина) получены прямыми измерениями на микроскопе «Метам-4М»; величина модуля сдвига G получена на основании расчетов, представленных в работе [13]; величина объема слоя ферромагнитного материала V_m получена перемножением размера площади поверхности микрозеркала на толщину пленки особо чистого железа, осажденной в вакууме методом магнетронного напыления.

Магнитная проницаемость μ для объемных образцов особо чистого железа может иметь значение в широких пределах (100–10 000). Для тонких ферромагнитных пленок, толщина которых менее 1 мкм, характерна монокристаллическая структура, с направлением оси легкого намагничивания вдоль ориентирующего магнитного поля, а величина μ является неизвестной.

Результаты

В работе [14] представлен измерительный стенд для экспериментальных исследований динамических параметров МЭМС-дефлекторов с электромагнитным управлением, на котором были выполнены измерения величин магнитной индукции B в воздушном зазоре магнитопровода и угла отклонения $d\Phi$ отраженного светового потока. Графики экспериментальной и теоретической зависимости этих величин представлены на рисунке; основным отличием данных графиков является то, что отражение светового потока наблюдалось от массива микрозеркал шириной 50 мкм, в работах [3, 4] отражение наблюдалось от микрозеркал шириной 100 мкм.



Экспериментальная и теоретическая зависимости угла отклонения $d\Phi$ от индукции магнитного поля B в воздушном зазоре при различных значениях относительной магнитной проницаемости μ материала диполя (принято значение модуля сдвига $G = 80$ ГПа)

Обсуждение

Сравнение графиков, представленных на рисунке, показало соответствие экспериментальной зависимости угла отклонения $d\Phi$ от индукции магнитного поля B в воздушном зазоре с теоретическими расчетами, выполненными на основе выражений (2) и (3). Используя данные статьи [13], в выражении (2) были приняты следующие значения параметров микрозеркал: G – модуль сдвига торсионного микрозеркала (слой кремния – 3 мкм; отражающий слой – 0,1 мкм; слой ферромагнитной пленки – 0,45 мкм) и $G = 80$ ГПа; $h = 3,55$ мкм; $b = 50$ мкм; $l = 5$ мм. Методом последовательных приближений нами определено значение магнитной проницаемости материала магнитного диполя ($\mu = 120$).

Заключение

Использование магнитных полей в МЭМС-устройствах управления потоками отраженного излучения позволяет получить высокую

точность позиционирования отраженного пучка. Средняя чувствительность, равная отношению выходного параметра $d\Phi$ к входному B , для исследованного экспериментального образца составляет $0,4^\circ/\text{мТл}$.

Величина угла отклонения светового потока $d\Phi$, отраженного от массива микрозеркал шириной $b=50$ мкм, более чем в 2,5–3 раза превышает углы отклонения, представленные в работах [3, 4] для микрозеркал шириной 100 мкм. Эти данные свидетельствуют о более широком рабочем диапазоне проектируемых МЭМС-устройств управления оптическими потоками, хотя, на наш взгляд, важным параметром является прочность торсионных микрозеркал к силовому воздействию в режиме вынужденных крутильных колебаний.

Представленные в данной статье МЭМС могут найти применение в первую очередь как быстродействующие дефлекторы и сканеры оптических потоков с диаметром пучка до 2,5 мм, максимальная величина углового отклонения светового пучка вдоль одной пространственной координаты составляет $13,5^\circ$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чесноков В. В. Микромеханические модуляторы света // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. – 1990. – № 6. – С. 82–85.
2. Чесноков Д. В. Микромеханический дефлектор световых потоков // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74, № 4. – С. 51–54.
3. Корнеев В. С. Микромеханическая управляемая дифракционная решетка с изменяемым углом блеска // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77, № 5. – С. 69–71.
4. Корнеев В. С. Экспериментальное исследование параметров крутильных колебаний полосок микромеханической отражательной дифракционной решетки // Вестник СГГА. – 2010. – Вып. 1 (12). – С. 117–122.
5. V. S. Korneyev, V. V. Chesnokov, D. V. Chesnokov. Micromechanical optical scanner for terahertz spectrum diapason // Key Engineering Materials. 2010. V.473. – P.291–295.
6. Корнеев В. С. Расчет амплитуд собственных колебаний для мембран прямоугольной и круглой формы // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 173–185.
7. Князев И. В. Моделирование динамических характеристик переключения элементов микрооптоэлектромеханической перестраиваемой дифракционной решетки // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 235–251.
8. Федоров С. Ю., Бояршинов Б. Ф. Аппаратура для измерений в сфокусированных лазерных пучках и ее применение // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 2 (26). – С. 47–60.
9. Кузнецов М. М., Карманов И. Н. Оптические микроволновые линзы // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 4 (32). – С. 79–85.
10. Носков М. Ф. Опико-электронная обработка изображений шаровых элементов // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 254–260.
11. Корнеев В. С., Райхерт В. А., Шергин С. Л., Никулин Д. М. Компьютерная обработка изображений дифракционных картин в лабораторных работах по физике // Физическое образование в ВУЗах. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 31–38.
12. Vladimir S. Korneyev. Study of the parameters of micromechanical devices with electromagnetic control // International school and seminar «Modern problems of Nanoelectronics, Micro- and Nanosystem Technologies». – Novosibirsk : NSTU, 2009. – P.113–115.
13. Корнеев В. С., Райхерт В. А., Кочкарев Д. В. Экспериментальное определение модуля упругости Юнга многослойной консольной микробалки // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 2, ч. 2. – С. 113–117.
14. Корнеев В. С., Шергин С. Л. Измерительный стенд для экспериментальных исследований динамических параметров микро-электромеханических систем с электромагнитным управлением // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – № 4. – С. 154–155.

Об авторах

Владимир Станиславович Корнеев – кандидат технических наук, доцент кафедры физики.
Сергей Леонидович Шергин – кандидат технических наук, доцент кафедры физики.

Получено 20.06.2022

© В. С. Корнеев, С. Л. Шергин, 2023

**Investigation of the parameters of MEMS deflectors
to determine the magnetic permeability of the dipole material**

V. S. Korneyev¹, S. L. Shergin¹*

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: korneyev@mail.ru, serkron@mail.ru

Abstract. Micro-electromechanical (MEMS) deflectors with electromagnetic control and an experimental stand for measuring their functional parameters are considered. The electromagnetic control method makes it possible to obtain a high positioning accuracy of the reflected beam along one spatial coordinate, and also

provides increased speed with the time of deviation of the light flux to a predetermined position of 5–10 μs . Graphs of experimental and theoretical dependences of the angle of deviation of the light flux on the induction of the control magnetic field of MEMS deflectors are presented. Using the method of successive approximations, the value of the magnetic permeability of the dipole material $\mu = 120$ was selected, and the maximum value of the angular deviation of the light flux along one spatial coordinate was determined, which is 13.5° . The MEMS presented in this paper can be used, first of all, as high-speed deflectors and optical flow scanners with a beam diameter of up to 2.5 mm.

Keywords: micro-electromechanical systems (MEMS), deflectors, material magnetic permeability

REFERENCES

1. Chesnokov, V. V. (1990). Micromechanical modulators of light. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie [Journal of Instrument Engineering]*, 6, 82–85 [in Russian].
2. Chesnokov, D. V. (2007). Micromechanical deflector of light fluxes. *Opticheskii zhurnal [Journal of Optics]*, 74(4), 51–54 [in Russian].
3. Korneyev, V. S. (2010). Micromechanical controlled diffraction grating with variable glare angle. *Opticheskii zhurnal [Journal of Optics]*, 77(5), 69–71 [in Russian].
4. Korneyev, V. S. (2010). Experimental study of the parameters of torsional vibrations of strips of a micromechanical reflective diffraction grating. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 1(12), 117–122. Novosibirsk: SSGA [in Russian].
5. Korneyev, V. S., Chesnokov, V. V., & Chesnokov, D. V. (2010). Micromechanical optical scanner for terahertz spectrum diapason. *Key Engineering Materials*, 473, 29–295.
6. Korneyev, V. S. (2017). Calculation of natural oscillation amplitudes for rectangular and round membrane. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(4), 173–185 [in Russian].
7. Knyazev, I. V. (2017). Modeling of dynamic characteristics of switching elements of micro-optoelectromechanical tunable diffraction grating. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(1), 235–251. Novosibirsk: SSUGT [in Russian].
8. Fedorov, S. Yu., & Boyarshinov, B. F. (2014). Equipment for measurements in focused laser beams and its application. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2(26), 47–60 [in Russian].
9. Kuznetsov, M. M., & Karmanov, I. N. (2015). Optical Microwave Lenses. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(32), 79–85 [in Russian].
10. Noskov, M. F. (2016). Optoelectronic processing of images of spherical elements. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(36), 254–260 [in Russian].
11. Korneyev, V. S., Reihert, V. A., Shergin, S. L., & Nikulin, D. M. (2019). Computer processing of images of diffraction patterns in laboratory work in physics. *Fizicheskoe obrazovanie v VUZakh [Physics in Higher Education]*, 25(4), 31–38 [in Russian].
12. Korneyev, V. S. (2009). Study of the parameters of micromechanical devices with electromagnetic control. In *International School and Seminar: Modern problems of Nanoelectronics, Micro- and Nanosystem Technologies* (pp. 113–115). Novosibirsk: NSTU Publ. [in Russian].
13. Korneyev, V. S., Reihert, V. A., & Kochkarev, D. V. (2011). Experimental determination of Young's modulus of elasticity of a multilayer cantilevered microbeam. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2011: T. 2, ch. 2 [Proceedings of GEO-Siberia-2011: Vol. 2, Part 2]* (pp. 113–117). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
14. Korneyev, V. S., & Shergin, S. L. (2021). Measuring stand for experimental research of dynamic parameters of micro-electromechanical systems with electromagnetic control. *Pribory i tekhnika eksperimenta [Devices and Technique of Experiment]*, 4, 154–155 [in Russian].

Author details

Vladimir S. Korneyev – Ph. D., Associate Professor, Department of Physics.

Sergey L. Shergin – Ph. D., Associate Professor, Department of Physics.

Received 20.06.2022

© V. S. Korneyev, S. L. Shergin, 2023