

УДК 539.67

В.И. Обухов

**ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДАТЧИКА МОМЕНТА
В МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРАХ**

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е.Алексеева

Рассмотрены теоретические аспекты возможности использования электромагнитного датчика момента для микросистемных измерительных устройств, в частности для микромеханического акселерометра. Использование таких датчиков позволит существенно снизить массогабаритные характеристики измерительных устройств. На основе выполненного анализа определены допустимые плотности токов в тонкопленочных проводниках электромагнитного преобразователя.

Ключевые слова: микромеханический акселерометр, электромагнитный датчик, плотность тока, полупроводниковый кремний, чувствительный элемент, упругий подвес, тонкие пленки.

Особенностью современного приборостроения стало создание измерительных устройств (ИУ), обладающих малыми массогабаритными характеристиками и небольшим энергопотреблением. Главным импульсом в этом направлении послужили тенденции, которые нашли свое отражение в приборостроении в 60-х годах XX столетия, когда в качестве основного конструкционного материала в приборостроении стал использоваться полупроводниковый кремний, а технология микроэлектроники стала базовой для производства ИУ. Единство материала и технологии микроэлектроники позволили на одном кристалле реализовывать микромеханическую и микроэлектронную составляющие ИУ. Технология микроэлектроники, в том числе тонкопленочная, позволила создавать элементы и узлы ИУ по планарной технологии. В настоящее время промышленностью освоен широкий спектр датчиков и приборов на основе микроэлектронной технологии: датчики давления, температуры, гироскопические приборы, акселерометры и т.д. Такие датчики и приборы принято называть микромеханическими [3].

Современные микромеханические акселерометры в качестве датчиков перемещения используют емкостные преобразователи, преобразователи на полевом эффекте, магниторезистивные, оптоэлектронные и т.д. Для компенсационных вариантов микромеханических акселерометров в качестве обратных силовых преобразователей (датчиков моментов) используются: электростатические, диамагнитные, магнитоэлектрические, электромагнитные и т.д. [1]. В частности, широкое применение магнитоэлектрических преобразователей обусловлено достаточно линейной его характеристикой и большой величиной развиваемого усилия. Однако в микроэлектронном исполнении такие датчики имеют все еще большие размеры и массу, в какой-то мере теряют свои преимущества.

В предлагаемой статье рассматривается вопрос использования электромагнитного преобразователя в качестве датчика момента для компенсационных микромеханических акселерометров, микрогироскопов, который значительно проще в изготовлении и имеет меньшие габариты и массу. При этом важно обосновать его надежность и силовые характеристики. Принцип работы такого преобразователя основан на том, что при протекании постоянного тока через параллельно расположенные проводники между ними возникает магнитная сила взаимодействия. Каждый из проводников находится в магнитном поле другого, и если направление токов в проводниках совпадает, то проводники притягиваются, и наоборот. Чем ближе друг к другу расположены проводники, тем больше эта сила. Сила притяжения или отталкивания между параллельно расположенными проводниками может быть определена по формуле

$$F = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 l}{\pi h}, \quad (1)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, равная $1,257 \cdot 10^{-5}$ Гн/м; μ - относительная магнитная проницаемость для среды, в которой находятся проводники; I_1, I_2 - сила тока в первом и втором проводниках соответственно; l - длина проводника; h - расстояние между проводниками.

Рассмотрим вариант микромеханического акселерометра, состоящего из чувствительного элемента (рис. 1) и содержащего подвижную чувствительную массу 2 в виде несимметричного маятника, закрепленного на упругих подвесах 5.

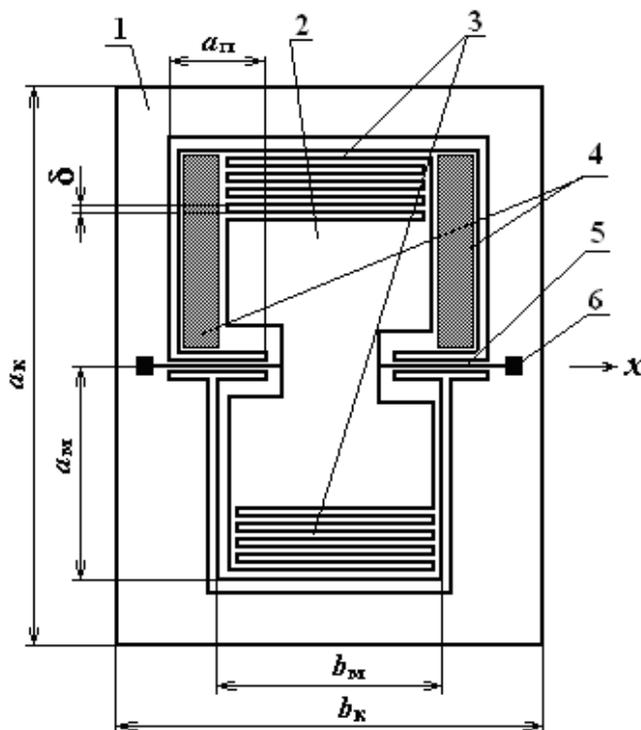


Рис. 1. Чувствительный элемент микромеханического акселерометра:

1 – жесткая рамка; 2 – подвижная чувствительная масса; 3 – тонкопленочные проводники электромагнитного преобразователя; 4 – обкладки датчика перемещения; 5 – упругий подвес; 6 – контактные площадки для подвода тока

Электромагнитный преобразователь выполнен в виде меандра тонкопленочных проводников 3, расположенных на подвижном маятнике 2. Витки тонкопленочных подвижных проводников могут быть запитаны опорным напряжением. Неподвижные тонкопленочные проводники выполнены на двух одинаковых обкладках-крышках (рис. 2), жестко соединенных с кремниевой пластиной, витки которой расположены строго против витков подвижной обмотки. На неподвижные обмотки подается ток с выхода акселерометра таким образом, чтобы по одним виткам (рис. 2, верхние) ток протекал в одном направлении, а по другим (нижние) в другом. Величина шага между витками обмотки и величина зазора между подвижными и неподвижными обмотками должны отвечать соотношению

$$h/\delta \leq 10, \quad (2)$$

где h – зазор между подвижными и неподвижными обмотками; δ – шаг между витками обмотки. Это необходимо для снижения влияния электрического поля силовых электродов на поле электродов преобразователя перемещений.

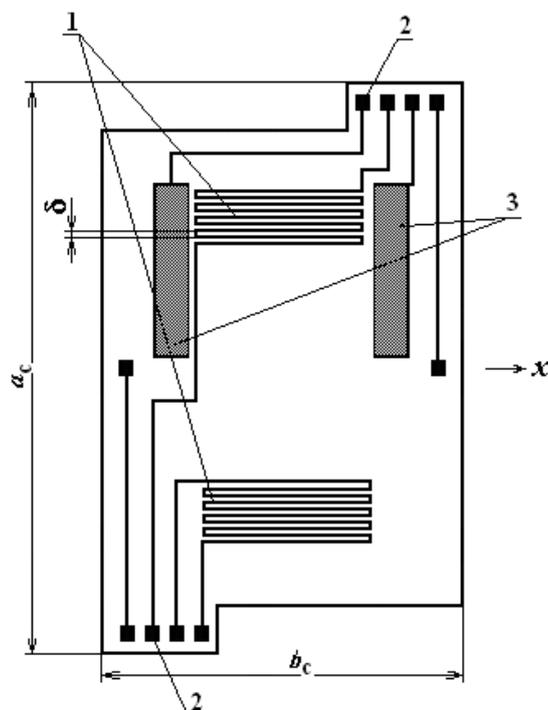


Рис. 2. Обкладка-крышка:

1 – тонкопленочные неподвижные проводники электромагнитного преобразователя;
2 – контактные площадки; 3 – неподвижные обкладки датчика угла

Число зигзагов меандра определяется из расчета создания необходимого усилия силового преобразователя. На обеих сторонах маятника проводники расположены идентично, как и на обкладках-крышках. Реализация демпфирования подвижного узла в компенсационном акселерометре с электромагнитной силовой обработкой возможна как с заполнением ЧЭ газом, например, азотом, так и в электрическом контуре для случая вакуумирования чувствительного элемента.

Работа микромеханического акселерометра осуществляется следующим образом. При отсутствии ускорения маятник 2 находится в среднем положении между неподвижными электродами 3 (см. рис. 2) емкостного датчика перемещений. На выходе акселерометра напряжение равно нулю. Поскольку неподвижные тонкопленочные проводники питаются выходным напряжением, сила электромагнитного преобразователя равна нулю, и никакого влияния на маятник 2 не оказывается.

При действии ускорения возникает сила инерции, отклоняющая маятник. Эта сила определяется произведением небаланса чувствительной массы на действующее ускорение:

$$F_{\text{ин}} = m_{\text{неб}} a, \quad (3)$$

$m_{\text{неб}}$ – масса небаланса (рис. 1, затененные участки); a – действующее ускорение.

Угол отклонения маятника пропорционален действующему ускорению. Соответственно выходной сигнал является пропорциональным углу отклонения маятника. Датчик угла и электронный блок формирует сигнал, пропорциональный углу отклонения маятника, который поступает на проводники отработки 1, расположенные на обкладке-крышке (рис. 2). Возникающая электромагнитная сила $F_{\text{эл}}$ имеет противоположное направление по сравнению с направлением силы инерции

$$F_{\text{эл}} = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 n l}{\pi h}, \quad (4)$$

где I_1 – сила тока в первом проводнике (в проводнике на маятнике); I_2 – сила тока во втором проводнике (в проводнике на стеклянной обкладке); n – число волн меандра.

Сила тока в первом проводнике задается нагрузочным резистором и напряжением источника опорного напряжения, которое в основном влияет на точность задаваемого тока. Поскольку сила тока в первом проводнике является величиной постоянной, то этим обеспечивается линеаризация характеристике. Сила тока во втором проводнике задается нагрузочным резистором и выходным напряжением акселерометра.

Под действием ускорения относительно подвесов возникает инерционный момент, который определяется соотношением

$$M_{\text{ин}} = F_{\text{ин}} l_{\text{цм}} = m_{\text{нес}} a l_{\text{цм}}, \quad (5)$$

где $l_{\text{цм}}$ - плечо, или расстояние от точки подвеса маятника до центра расположения несбалансированной массы. Для уравнивания инерционного момента необходимо приложить усилие электромагнитного датчика на соответствующем плече, относительно точки подвеса маятника, то есть

$$F_{\text{эл}} l_{\text{д}} = M_{\text{ин}}, \quad (6)$$

где $l_{\text{д}}$ - плечо, на котором приложена сила электромагнитного преобразователя.

Подставим в равенство (6) значение инерционного момента (5) и значение силы электромагнитного преобразователя (4) и решим равенство относительно токов по шинам электромагнитного датчика:

$$I_1 I_2 = a \frac{\pi m_{\text{нес}} l_{\text{цм}} h}{\mu_0 \mu_{\text{н}} l_{\text{д}} l_{\text{п}}}. \quad (7)$$

Уравнение (7) позволяет определять необходимую величину токов I_1 , I_2 для принятой величины измеряемого ускорения акселерометром.

Эффективность работы электромагнитного преобразователя будет определяться величинами токов I_1 и I_2 , а их максимально допустимая величина, в свою очередь будет ограничиваться допустимыми плотностями токов по тонкопленочным проводникам (шинам). При этом важен размер плеча, на котором будет приложена сила преобразователя. Из опыта производства микромеханических акселерометров известно, что токоведущие дорожки изготавливаются шириной 50–100 мкм и толщиной 0,6–1,0 мкм. Следовательно, площадь поперечного сечения шины составляет

$$S = bt, \quad (8)$$

где b – ширина токоведущей дорожки; t – толщина.

Для принятых предельных размеров $S = 100 \cdot 1,0 = 100 \text{ мкм}^2$. Следовательно, для тока 10 мА плотность тока может оставить

$$j = \frac{I}{S} = \frac{1 \cdot 10^{-2} \text{ А}}{1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2} = 1 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 = 1 \cdot 10^2 \text{ А/мм}^2.$$

Для мелкозернистых алюминиевых пленок, полученных на холодных подложках полупроводникового кремния при толщине 0,7 мкм, длиной 1370 и шириной 13 мкм при плотности тока от 0,5 до $2,88 \cdot 10^4 \text{ А/мм}^2$ наработка на отказ составила до 850 ч. Обычно в пленках, полученных из Al на подложках из полупроводникового кремния, не используется ток плотностью более 100 А/мм^2 [2].

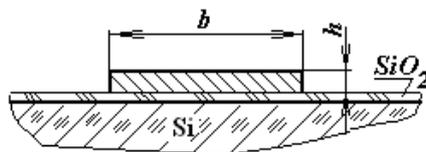


Рис. 3. Токоведущая дорожка шириной b , нанесенная на предварительно окисленную полупроводниковую пластину

Покрытие пленки кварцевым стеклом, которая наносится пиролитическим способом до толщины 0,7 мкм, чтобы снизить поверхностную диффузию, способствует повышению ее надежности более чем в три раза [2].

Напряжённость электрического поля вдоль шины

$$E = \frac{I}{\sigma} j. \quad (7)$$

Для Al: $\sigma = 3 \cdot 10^7$ 1/Ом·м. При $j = 10^8$ А/м² получаем $E = 3$ В/м. Для микромеханического акселерометра это приведет к ничтожно малому падению напряжения.

Плотность мощности на единицу поверхности шины толщиной t :

$$P_{\text{плос}} = \frac{j^2}{\sigma} \cdot t = \frac{10^{16}}{3 \cdot 10^7} \cdot 10^{-6} = 300 \text{ Вт/м}^2 = 0.3 \text{ Вт/см}^2.$$

Такой поток мощности легко отводится за счет теплопроводности кремния.

Как показывают наши расчеты по уравнению (7), с учетом ограничений по плотности тока для тонкопленочных алюминиевых проводников электромагнитные преобразователи вполне пригодны в качестве датчиков моментов в цепи обратной связи микромеханических акселерометров.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.
2. **Пасынков, В.В.** Материалы электронной техники / В.В. Пасынков. – М.: Высш. шк., 1980.
3. **Распопов, В.Я.** Микромеханические приборы / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.

Дата поступления
в редакцию 08.02.2011

V.I. Obuchov

PROCESS ENGINEERING ESTIMATE OF THE USAGE OF ELECTROMAGNETIC MOMENT DETECTOR IN MICROMECHANICAL ACCELERATION INDICATORS

The article deals with theoretical aspects of the usage of electromagnetic moment detector in micro measuring devices, particularly in a micromechanical acceleration indicator. The use of these sensors will essentially lower mass-dimensional specifications of measuring devices. Admissible current densities in thin-film conductors of electromagnetic transducer are calculated.

Key words: micromechanical acceleration indicator, electromagnetic sensor, current density, semiconductor silicon, sensing element, elastic suspension, thin-films.