

КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ ДЛЯ МЭМС

Стефанус Бутгенбах и Волкер Сейдман

Институт микротехнологий, Технический университет Брауншвейга, Лангер Камп 8, D-38106 Брауншвейг, Германия

Аннотация

В данной статье представлены технологии, предназначенные для изготовления многослойных катушек с интегрированными концентраторами магнитного поля и большим форматным соотношением. Эти технологии основаны на использовании недорогих УФ-фоторезистов. Они были использованы для улучшения свойств индуктивных микродатчиков и электромагнитных микроактюаторов.

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря развитию технологий изготовления микрокатушек, электромагнитные компоненты приобретают все большее значение для МЭМС. Помимо использования в качестве приводных элементов электромагнитных микроактюаторов, микрокатушки могут применяться как индуктивные элементы электронных схем, а также чувствительных элементов датчиков и телеметрических приборов.

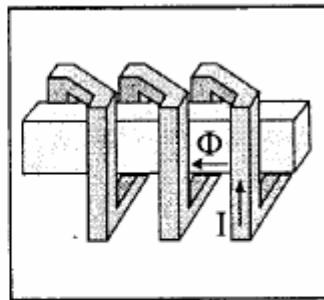
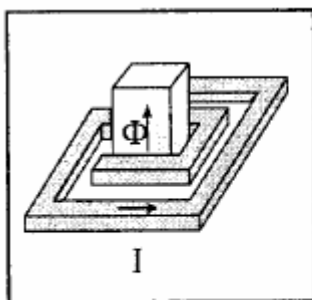


Рис.1. Схема базовых конструкций микрокатушек: планарная спиральная катушка (слева) и объемная (3D) винтовая (справа)

Для построения электромагнитных микроактюаторов требуется интегрировать в катушки магнитомягкие структуры, обеспечивающие концентрирование магнитного потока. Для снижения омического и магнитного сопротивлений необходимо, чтобы сечение соответствующих структур было достаточно большим. Параметры индуктивных датчиков также улучшаются при увеличении сечения проводников, благодаря снижению сопротивления (постоянному току) и повышению добротности (Q). Кроме того, увеличение сечения ферромагнитных структур повышает чувствительность датчиков, что позволяет реализовывать высококачественные датчики магнитного поля.

Неудивительно, что в настоящее время разработки технологий изготовления многослойных катушек с большим форматным соотношением и интегрированными концентраторами магнитного поля, ведутся во многих лабораториях [1]-[3]. И если тонкопленочная технология позволяет получать слои толщиной лишь в несколько микрон, использование аддитивных процессов с применением глубокой УФ-литографии и гальванопокрытий позволяет формировать микроструктуры высотой в десятки микрон.

В принципе, возможные геометрии катушек можно разделить на две категории: планарные спиральные одно- или многослойные катушки, создающие вертикальный

магнитный поток, и трехмерные винтовые или «меандрические» катушки, создающие горизонтальное магнитное поле (рис.1). Процесс изготовления, представленный в настоящей работе, содержит следующие шаги: глубокая УФ-литография, гальваническое нанесение меди (проводящей структуры), никеля (магнитной структуры) и полимерной изоляции, выравнивание промежуточных слоев.

ТЕХНОЛОГИЯ

Недавно были разработаны новые типы фоторезистов, позволяющие экспонировать толстые слои резиста в УФ лучах [4]-[6]. Мы испытали позитивный резист AZ9260 (пр-ва Clariant) на основе Novolak в процессе изготовления микроформ с большим форматным соотношением. Кроме того был испытан эпоксидный негативный фоторезист SU8, использованный в целях изоляции и выравнивания.

Весьма вязкий резист AZ9260 был оптимизирован для использования при прецизионной гальванопластике с толщиной слоя до 100 мкм. При этом удалось обеспечить угол между боковой стенкой и подложкой в 92°. Очень крутой наклон боковых стенок позволяет получать форматное соотношение (ФС) до 9 (рис.2). На данный момент этот результат превзойден только негативным резистом SU8.

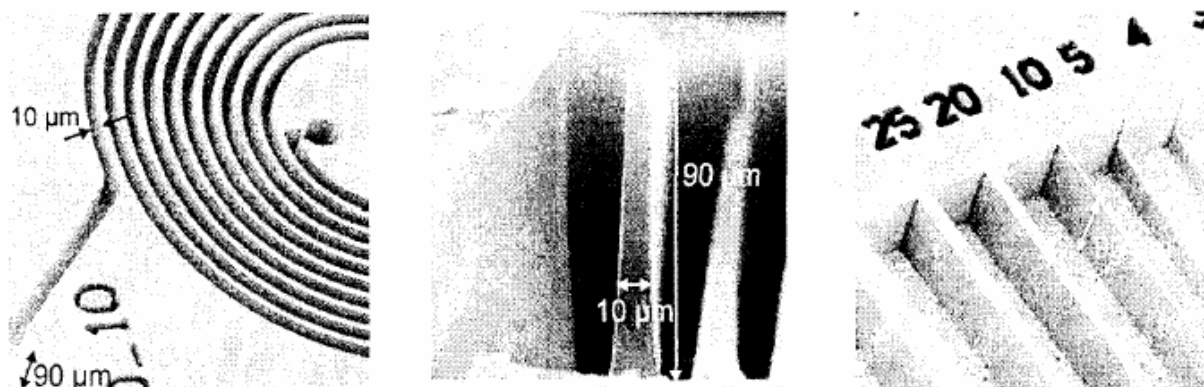


Рис.2. Глубокая литография с использованием резиста AZ9260 на основе DNQ/Novolak: структура катушки с минимальным просветом в 10 мкм при высоте в 90 мкм (слева), срез слоя резиста (в центре), тестовая структура для определения разрешения и угла между боковыми стенками и подложкой (справа)

Что касается SU8, нами был разработан процесс для пленок с толщиной от 300 до 400 мкм. При этом удается добиться почти вертикальных стенок с форматными соотношениями до 36 (рис.3).

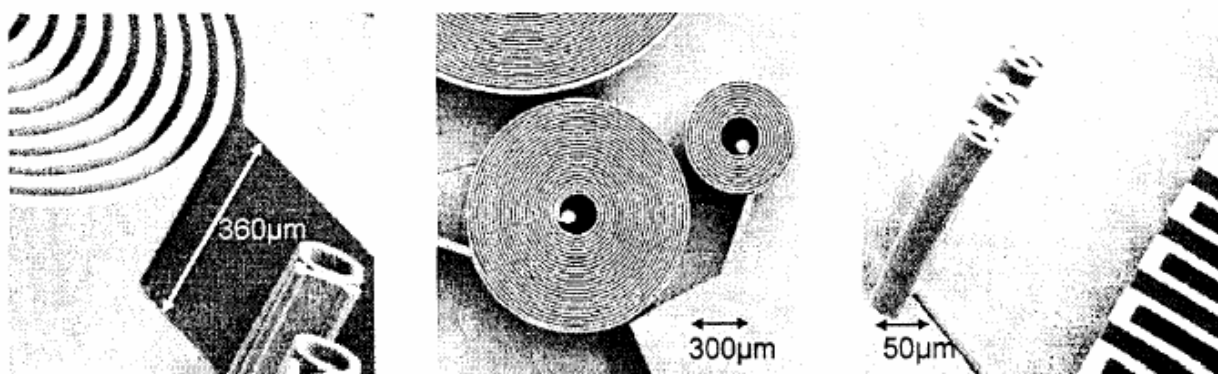


Рис.3. Глубокая литография с использованием SU8 на эпоксидной основе: структура с минимальным размером элемента 10 мкм при высоте в 360 мкм

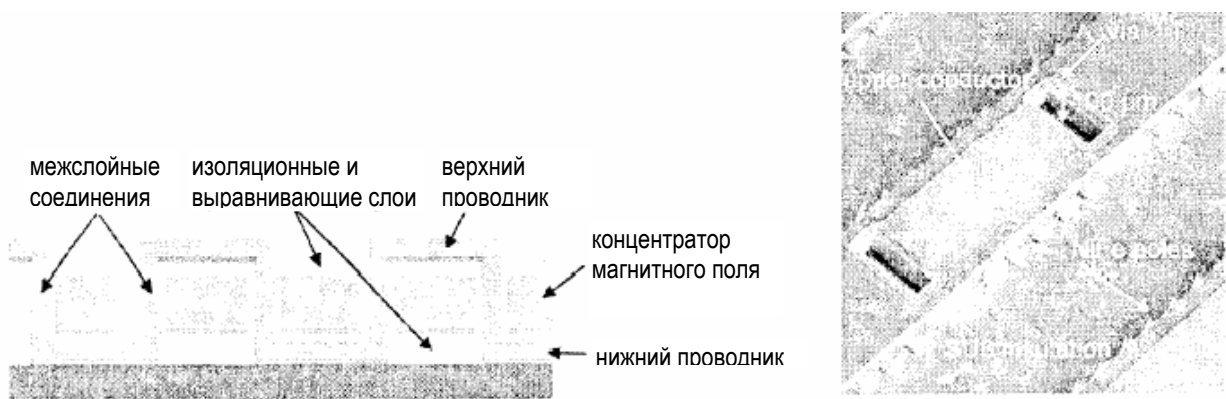


Рис.4. Схематичный срез (слева) и СЭМ-микрофотография (справа) внеплоскостной меандрической катушки

Были разработаны оптимизированные технологические последовательности для формирования как спиральных, так и винтовых катушек. В обоих случаях ферромагнитное ярмо и полюсы интегрируются в профилированный диэлектрик катушки. Примером может служить винтовая катушка на рис. 4, где показан схематичный срез катушки, а также СЭМ-фотография внеплоскостной меандрической катушки. Катушки сформированы вокруг планарных полюсов и состоят из множества верхних и нижних проводников, соединенных через несколько слоев диэлектрика с помощью переходных отверстий [7]. Технологический процесс состоит из глубокой УФ-литографии с AZ9260 для создания форм (для последующей гальваностегии) с большим ФС, гальваническое нанесение меди и NiFe (нанесение проводящих и ферромагнитных структур), нанесение SU8 для изоляции, формирование и микропрофилирование межслойных соединений с высоким ФС.

ИНДУКТИВНЫЕ МИКРОДАТЧИКИ

Технология планарных спиральных катушек была использована нескольких видов датчиков. Например, датчик приближения на вихревых токах, показанный на рис.5 [8] состоит из обмотки возбуждения и измерительной обмотки. Две почти идентичные концентрические катушки имеют хорошую магнитную связь и создают тороидальный магнитный поток. При приближении проводящего объекта характер магнитной связи изменяется из-за возникающих вихревых токов, что в свою очередь приводит к изменению амплитуды и фазы колебаний. Точное измерение расстояния достигается в диапазоне до нескольких миллиметров. Чувствительность устройства может быть существенно повышена при использовании магнитомягкого сердечника, несмотря на дополнительные потери от вихревых токов в проводящем магнитном материале

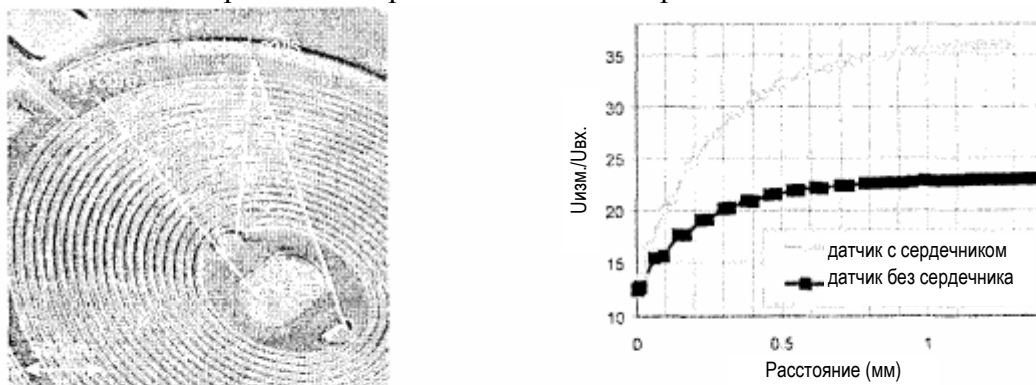


Рис.5. Датчик приближения на вихревых токах с двумя вложенными трансформаторными обмотками: СЭМ-фотография (слева), возрастание чувствительности при использовании магнитомягкого сердечника (справа)

(пермаллоевые). Повышение чувствительности на примере двух идентичных датчиков с сердечником и без продемонстрировано на рис. 5.

ЛИНЕЙНЫЙ МИКРОДВИГАТЕЛЬ

Технология получения трехмерных меандрических катушек была применена к электромагнитному микроактюатору, а именно линейному индукторному микродвигателю с бегунком (ротором), перемещающегося по направляющим. Для преодоления значительного трения, характерного для подобных конструкций при магнитном потоке, направленном вертикально к находящемуся сверху ротору, мы разработали концепт, иллюстрируемый на рис. 6 [9]. Здесь воздействие магнитного поля на ротор осуществляется через четное количество зазоров, что в идеале создает только тангенциальное усилие без дополнительного трения. Для этого структура катушек формируется в виде меандрической «надплоскостной» обмотки вокруг статорных полюсов, лежащих на плоскости подложки. Благодаря этому формируется горизонтальный поток. Бегунок (ротор) представляет собой «гребенчатую» траверсу с полюсными расширениями («зубцами»), расположенными между полюсами статора. Горизонтальный магнитный поток вызывает притяжение полюсов бегунка с обеих сторон¹. Смонтированный бегунок со статором в сборе имеет размеры 8×7 мм. Для снижения трения в структуры был введен рубиновый шарикоподшипник (рис.6).

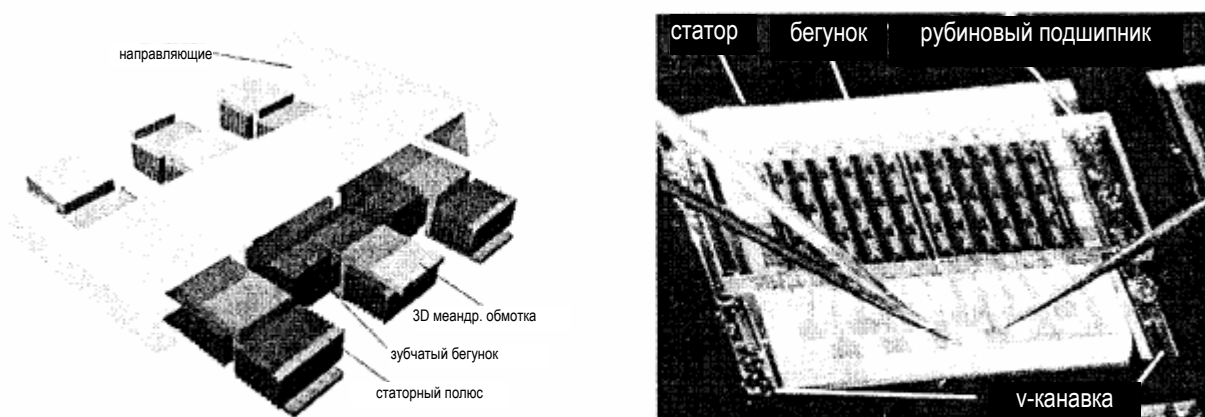


Рис.6. Линейный индукторный микродвигатель с горизонтальным потоком: принцип действия (слева), микрофотография (справа).

ВЫВОДЫ

Была разработана законченная технологическая последовательность для изготовления микроэлементов с большим форматным соотношением. Процесс основывается на использовании недорогих УФ-фоторезистов AZ9260 и SU8. Эта технология была использована для изготовления микрокатушек с большим сечением токопроводящих и ферромагнитных структур. Возможности этой технологии применительно к микродатчикам и актюаторам были продемонстрированы в ходе изготовления датчика приближения на вихревых токах и линейного индукторного микродвигателя.

¹ Реально здесь на ротор действуют две составляющие силы – тангенциальная (совершающая полезную работу) и нормальная (вызывающая трение ротора о направляющие). Нормальные составляющие с двух сторон ротора компенсируются только при условии симметрии магнитной системы, т.е. при равенстве зазоров с обеих сторон ротора. Учитывая, что в подобных системах нормальные составляющие сил всегда значительно превышают тангенциальные (это легко видеть по скорости изменения объема зазора в зависимости от направления перемещения - $F = -\rho dV/dx$, где F - сила, ρ – плотность энергии в зазоре, V – его объем), приведенная система должна иметь очень высокую точность изготовления. – прим. перев.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] C. H. Ahn and M. G. Allen, "A planar micromachined spiral inductor for integrated magnetic microactuator applications," *J. Micromechanics and Microengineering*, vol. 3, pp. 37-44, 1993.
- [2] B. Löchel, A. Maciossek, M. Rothe, and W. Windbracke, "Micro coils fabricated by UV depth lithography and galvanoplatin," *Proc. 8th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators*, 1995, pp. 264-267.
- [3] N. Yamada, Y. Yokoyama, and H. Tanaka, "Fabrication of wrapped micro coils wound around a magnetic core," *Proc. 8th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators*, 1995, pp. 300-313.
- [4] B. Loechel, "Thick-layer resists for surface micromachining," *J. Micromechanics and Microengineering*, vol. 10, pp. 108-115, 2000.
- [5] M. Ohnmacht, V. Seidemann, and S. Büttgenbach, "Microcoils and microrelays - an optimized multilayer fabrication process," *Sensors and Actuators A*, vol. 83, pp. 124-129, 2000.
- [6] H. Lorenz, M. Despont, N. Fahrni, J. Brugger, P. Vettiger, and P. Renaud, "High-aspect-ratio, ultra-thick, negative-tone near-UV photoresist and its applications for MEMS," *Sensors and Actuators A*, vol. 64, pp. 33-39, 1998.
- [7] V. Seidemann and S. Büttgenbach, "A novel fabrication process for 3D meander shaped micro coils in SU8 dielectric and their application to linear micro motors," *Proc. of SPIE*, vol. 4407, pp. 304-309, 2001.
- [8] V. Seidemann and S. Büttgenbach, "Fabrication technology for closely coupled micro coils with integrated flux guidance and their application to proximity and magnetoelastic force sensors," *Proc. IEEE Sensors Conf.*, 2002, pp. 580-584.
- [9] V. Seidemann, J. Edler, S. Büttgenbach, and H. D. Stölting, "Linear variable reluctance (VR) micro motor with horizontal flux guidance: concept, simulation, fabrication and test," *Proc. 12th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators*, 2003, pp. 1415-1418.