

УДК 621.395.631.4:621.791.776

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ МИКРОИНДУКТОР НА ОСНОВЕ ГИБКОЙ ПОЛИИМИДНОЙ ПЛЕНКИ*Петров А.В.¹, Демьянов С.Е.¹, Канюков Е.Ю.¹, Финк Д.²*¹Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, Республика Беларусь²Центр по материаловедению и энергетике им. Гельмгольца, г. Берлин, Германия

Предложен более простой по сравнению с существующими технологиями способ создания трехмерного гибкого высокочастотного микроиндуктора на основе полиимидной пленки с протравленными треками быстрых тяжелых ионов, заполненными проводящим материалом. Создан действующий макет микроиндуктора размером 0,04 мм³, имеющий следующие основные характеристики: плотность обмотки 7 витков/мм при толщине витка 10 мкм, индуктивность 0,3 мГн при добротности 8 на частоте 200 МГц. Показана возможность уменьшения размеров устройства до 10⁻⁶ мм³. (E-mail : petrov@ifftp.bas-net.by)

Ключевые слова: гибкие электротехнические устройства, высокочастотный микроиндуктор, треки быстрых тяжелых ионов, нанопоры, полиимидная пленка.

Введение

В последние годы активно проводятся работы по созданию микроэлектротехнических устройств, что связано с развитием таких технологий, как ионно-лучевое напыление, гальванопластика и фотолитография [1–4]. При этом микроприборы, как правило, формируются послойно на твердой подложке (преимущественно кремниевой) с использованием прослоек из изолирующего материала, что позволяет получать планарные устройства площадью в несколько квадратных миллиметров и толщиной несколько сотен микрометров. Они применяются в биологических и медицинских приборах, компьютерных технологиях [4–6], при создании научно-исследовательского оборудования [1–3], а также в системах связи, аэрокосмических и военных разработках [4].

Недостатком таких приборов является жесткость, что осложняет их использование на сложнопрофильных и подвижных поверхностях. Конструирование элементов электрических цепей на гибкой подложке позволяет решить эту проблему и одновременно уменьшить массогабаритные показатели. В связи с этим задача создания «гибкой электроники» является одной из наиболее актуальных для современного материаловедения [6–8].

Среди развиваемых в настоящее время способов получения подобных элементов осо-

бое место занимает так называемая ядерная технология, основанная на облучении материалов высокоэнергетичными тяжелыми ионами с образованием сильно разупорядоченных зон диаметром несколько нанометров [9–10]. Возможность их селективного вытравливания позволяет сформировать каналы с аспектным отношением (отношение диаметра к ширине) до 10 000 [10]. Заполнение каналов различными веществами дает возможность создания структур сложной геометрии на гибкой диэлектрической подложке [11–14].

При создании гибких микроиндукторов необходимо учитывать, что подложка должна обладать достаточной термической стабильностью для эффективного рассеивания джоулева тепла, генерирующегося в результате прохождения тока через обмотку индуктора. Наиболее подходящим материалом является полиимид, так как он выдерживает температуры до 400–500 °С без каких-либо химических и структурных изменений [11–12].

Принцип построения микроиндуктора зависит от диапазона частот, в котором его планируется использовать. Так, катушки микроиндукторов для низкочастотных применений, как правило, содержат ферромагнитный сердечник, а для более высоких частот используются сердечники из ферритов [3]. При частотах выше ~10⁸ Гц микроиндукторы строятся без сердечников из-за их высокой инерционности [2–5].

Технология создания прототипа микроиндуктора на основе пористой полиимидной пленки

Согласно технологиям, описанным в работах [5, 15–16], большинство современных высокочастотных микроиндукторов проектируются в виде двухслойной обмотки, которая изначально формируется на жесткой подложке кремния. Методом центрифугирования на кремнии создается слой полиимида, на котором с помощью электрохимического осаждения через специальные маски формируются 2 слоя обмоток из медных проводников. Между ними создается прослойка из полиимида, в которой плазменным травлением образуются отверстия для обеспечения контакта со вторым слоем обмотки. Поверх полностью сформированной обмотки наносится еще один диэлектрический слой полиимида, в котором плазменным травлением создаются отверстия для открытия доступа к контактным площадкам, обеспечивающим связь индуктора с внешней электрической схемой. Таким образом, ширина проводящего витка обмотки составляет 20 мкм, а межвиткового зазора – 50 мкм. После завершения формирования структуры микроиндуктора кремниевая подложка стравливается, что в конечном итоге обеспечивает гибкость изделия. Величина индуктивности такого индуктора составляет 10^{-7} Гн, а его добротность – 10 при частоте 100 МГц [16–17].

Описанная технология обладает некоторыми недостатками, например многостадийность изготовления, применение большого количества физико-химических методик и необходимость использования кремниевой подложки на всех стадиях изготовления микроиндуктора.

Более простой способ создания обмотки высокочастотного микроиндуктора по сравнению с существующими технологиями [2–5, 15–16] заключается в использовании пористой полиимидной пленки, в которой поры сформированы с использованием технологии треков быстрых тяжелых ионов [9–14]. Эта технология связана с формированием узких и протяженных областей радиационного повреждения, в результате воздействия на вещество ионов с вы-

сокой энергией. Поры (протравленные ионные треки) различных форм и размеров формируются в облученном материале за счет химического воздействия специальных травителей, удаляющих области треков с модифицированными свойствами. В нашем случае цилиндрические поры были получены в пленке полиимида толщиной 20 мкм химическим травлением в растворе NaOCl латентных ионных треков после ее облучения ионами аргона с энергией 350 МэВ и флюенсом 1×10^6 см⁻². В результате травления получалась матрица с порами со средним диаметром 0,2 мкм и плотностью $0,8 \times 10^6$ см⁻².

При создании действующего макета микроиндуктора для формирования его обмоток на полученную пористую полиимидную пленку при помощи термического напыления наносилась медь через специальные маски (рисунок 1). Сначала с обеих сторон полиимидной пленки накладывались 2 идентичные маски (рисунок 1а) с заданным количеством и расположением отверстий, которые при напылении меди под углом $\sim 45^\circ$ формировали вертикальные столбики металла в порах, выполняющие роль переходных проводников между слоями обмотки. Далее на одной из сторон полиимидной пленки с помощью маски (рисунок 1б) под углом $\sim 90^\circ$ напылялись медные проводники, горизонтально соединяющие вертикальные столбики металла в порах. Таким способом была создана одна часть обмотки индуктора. Напыление меди для образования второй части обмотки производилось на обратной стороне полиимидной пленки с помощью маски (рисунок 1в), форма которой позволяла диагонально соединить межслойные металлические перемычки и сформировать структуру обмотки индуктора в целом. Схематическое изображение конструкции микроиндуктора, полученной в результате данных технологических операций, приведено на рисунке 2.

На рисунке 3 представлена микрофотография фрагмента обмотки индуктора, сформированного на пористой пленке полиимида. Обмотка микроиндуктора имеет трехмерную конфигурацию и состоит из 7 витков толщиной 10 мкм при ширине витка 200 мкм и межвитковым зазором 30 мкм.

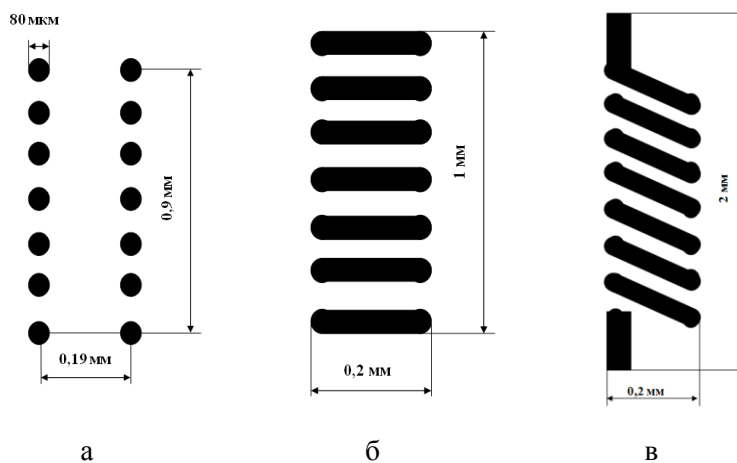


Рисунок 1 – Схематические изображения масок, используемых для формирования обмотки микроиндуктора

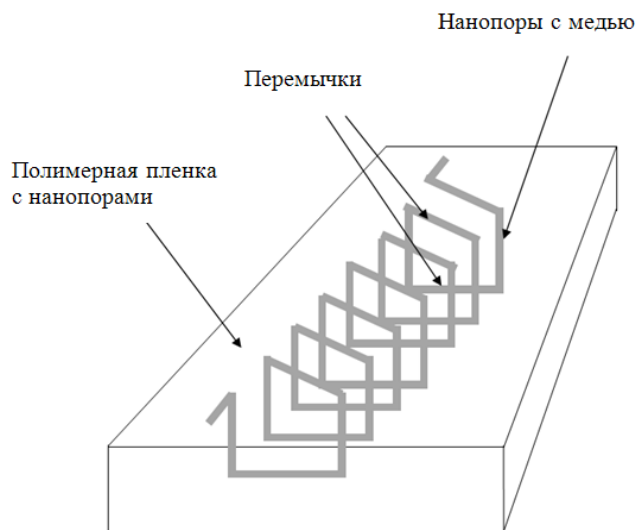


Рисунок 2 – Схематическое изображение обмотки микроиндуктора на полимерной подложке

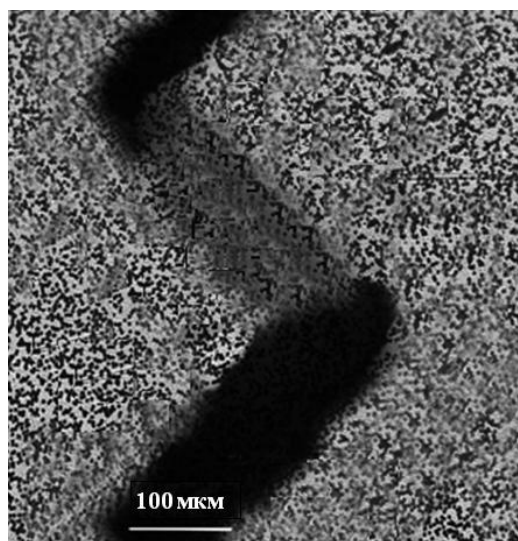


Рисунок 3 – Микрофотография фрагмента обмотки индуктора на пористой пленке полиимида

Исследования функциональных характеристик прототипа микроиндуктора

Для изучения частотных зависимостей индуктивности и добротности обмотки микроиндуктора в диапазоне 10 Гц – 1 ГГц при комнатной температуре использовались векторные анализаторы импеданса HP4191 и HP4192. По результатам исследований определено, что микроиндуктор устойчиво функционирует при частотах до 500 МГц и, как видно из рисунка 4а, индуктивность микроиндуктора сильно зависит от частоты. Величина индуктивности вначале уменьшается примерно на 2,5 порядка, а затем, при частотах выше ~ 50 кГц, она становится практически постоянной и достигает 0,3 мГн. Можно сделать вывод о том, что данная частотная зависимость связана с влиянием резистивных и емкостных потерь в системе, а также с влиянием магнитных полей рассеяния, появляющихся в микроиндукторе с увеличением частоты [12, 13].

Наблюдавшееся экспериментальное значение индуктивности (L) микроиндуктора согласуется с теоретической оценкой [17]:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{2\pi r_c}, \tag{1}$$

где μ – магнитная восприимчивость, которую в данном случае полагаем равной 1 Н/м; N – количество витков в обмотке, равное 7; A – поперечное сечение катушки, равное примерно $8 \times 10^{-9} \text{ м}^2$; r_c – радиус катушки, равный примерно $2 \times 10^{-4} \text{ м}$.

Таким образом, расчетное значение индуктивности составляет ~ 0,26 мГн.

Добротность (Q) микроиндуктора достигает максимального значения 8 при частоте (F) 200 МГц (рисунок 4б), после чего она уменьшается до нуля при частотах ~ 1 ГГц, когда система теряет свои индуктивные свойства.

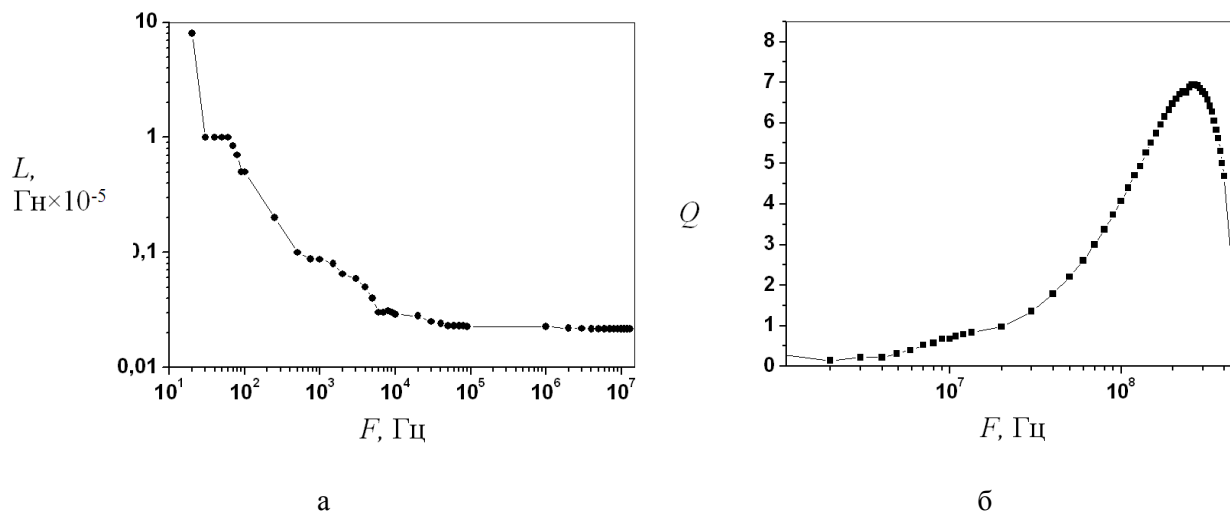


Рисунок 4 – Частотная зависимость индуктивности (а) и добротности (б) обмотки микроиндуктора на пористой пленке полиимида

Перспективы использования микроэлектротехнических устройств на основе пористой полиимидной пленки

Следует отметить, что при дальнейшей разработке данной задачи возможно уменьшения размеров микроиндуктора от $\sim 10^{-2}$ до $\sim 10^{-6} \text{ мм}^3$ посредством бóльшей миниатюриза-

ции используемых масок. В результате на куске полимерной пленки размером $5 \times 5 \text{ см}^2$ можно будет сформировать более 50 микроиндукторов. Кроме того, в процессе дальнейшей работы планируются преобразование полученного индуктора в микротрансформатор путем добавления второй обмотки согласно описанной выше технологии и исследование функциональных

характеристик полученной системы в широком диапазоне частот.

Микроиндукторы и микротрансформаторы на основе нанопористой полиимидной пленки могут эффективно применяться в компьютерных системах, в системах связи (в осцилляторах для телекоммуникационных систем), в аэрокосмических и военных проектах. Важными преимуществами использования данных систем являются их легкость, возможность крепления на сложнопрофильных поверхностях и высокая термическая стабильность [12–16]. Также следует отметить, что в настоящее время освоены технологии, позволяющие получать пористую пленку полиимида со сравнительно небольшими финансовыми затратами [10], т. е. стоимость создаваемых микроиндукторов и микротрансформаторов не будет превышать стоимости существующих аналогов на жесткой подложке.

Заключение

Предложен более простой по сравнению с существующими технологиями способ создания обмотки высокочастотного микроиндуктора на основе гибкой полиимидной пленки с микропорами, полученными при помощи ионно-трековой технологии. Данная технология включает в себя получение высокодефектных областей (латентных треков) в пленке полиимида посредством облучения быстрыми тяжелыми ионами, травление латентных треков для создания пористой матрицы, заполнение полученных пор материалом с малым сопротивлением для формирования трехмерной обмотки микроиндуктора. Такая технология позволила отойти от использования жесткой кремниевой подложки на различных технологических этапах, уменьшить число производственных операций и упростить их.

Создан действующий макет высокочастотного микроиндуктора размером $0,04 \text{ мм}^3$ с плотностью обмотки 7 витков/мм, испытания которого показали, что его индуктивность составляет 0,3 мГн и добротность 8 при частоте 200 МГц. Показано, что при дальнейшей миниатюризации используемых масок имеется возможность уменьшения размеров микроиндуктора от $\sim 10^{-2}$ до $\sim 10^{-6} \text{ мм}^3$. Показано, что при использовании промышленно получаемой пористой полиимидной пленки стоимость создаваемых устройств не будет превышать стоимо-

сти существующих аналогов на жесткой подложке.

Предложенный метод формирования элементов на гибком диэлектрике может быть распространен для создания более сложных электротехнических устройств микронного масштаба, которые могут найти применение в компьютерных системах, системах связи (в осцилляторах для телекоммуникационных систем), аэрокосмических и военных проектах.

Работа выполнена при поддержке НТП Союзного государства «Разработка нанотехнологий создания материалов, устройств и систем космической техники и их адаптация к другим отраслям техники и массовому производству» («Нанотехнология-СТ»).

Список использованных источников

1. *Yamasawa, K.* High frequency operation of a planar-type microtransformer and its application to multilayered switching regulators / K. Yamasawa [et al.] // *IEEE Trans. Magn.* – 1990. – V. MAG-26. – P. 1204–1209.
2. *Yamaguchi, H.* Loss characteristics of air-core superconducting transformer / H. Yamaguchi, Y. Sato, T. Kataoka // *IEEE Transact. on Magn.* – 1992. – V. 28. – P. 2232–2234.
3. *Ahn, C.H.* A Fully integrated planar toroidal inductor with a Micromachined Ni-Fe Magnetic Bar / C.H. Ahn, Y.J. Kim, M.G. Allen // *IEEE Transact. on Components, Packaging and Manufacturing Technology.* – 1994. – V. A17. – P. 463–469.
4. *Park, J.Y.* High current integrated microinductors and microtransformers using low temperature fabrication processes / J.Y. Park, M.G. Allen // *Microelectronics International.* – 1997. – V. 14. – P. 8–11
5. *Basteres, L.* Inductor for integrated circuit / L. Basteres [et al.] // *US Patent No. 6,456,183 – B1.* – 24.09.2002.
6. *Sekitani, T.* Flexible organic transistors and circuits with extreme bending stability / T. Sekitani [et al.] // *Nature Materials.* – 2010. – V. 9. – P. 1015–1022.
7. *Zschieschang, U.* Flexible low-voltage organic transistors and circuits based on a high-mobility organic semiconductor with good air stability / U. Zschieschang [et al.] // *Advanced Materials.* – 2010. – V. 22. – P. 982–985.
8. *Nakano, Sh.* Low operation voltage of inkjet-printed plastic sheet-type micromechanical switches / Sh. Nakano, Ts. Sekitani, T. Yokota, T. Someya // *Applied Physics Letters.* – 2008. – V. 92. – P. 053302–053307.

9. Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers. Ed. by D. Fink. Heidelberg. Springer Series in Materials Science. – V. 63. – 2004.
10. *Реутов, В.Ф.* Ионно-трековая нанотехнология / В.Ф. Реутов, С.Н. Дмитриев // Российский химический журнал (Журнал Рос. хим. общества им. Д. И. Менделеева). – 2002. – Т. XLVI. – № 5. – С. 74–80.
11. *Fink, D.* Production parameters for the formation of metallic nanotubules in etched tracks / D. Fink [et al.] // Radiation Measurements. – 2003. – V. 36. – P. 751–755.
12. *Lindeberg, M.* Interconnected nanowire clusters in polyimide for flexible circuits and magnetic sensing applications / M. Lindeberg, K. Hjort // Sensors and Actuators. – 2003. – V. A105. – P. 150–161.
13. *Lindeberg, M.* A comprehensive study of ion track enabled high aspect ratio microstructures in flexible circuit boards applications / M. Lindeberg, K. Hjort // Microsystem Technologies. – 2004. – V. 10. – P. 605–621.
14. *Toulemonde, M.* Track formation and fabrication of nanostructures with MeV – ion beams / M. Toulemonde [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2004. – V. 36. – P. 1–8.
15. *Saidani, M.* Three-dimensional miniaturized power inductors realized in a batch-type hybrid technology / M. Saidani, M.A.M. Gijs // J. Microelectromech. Microeng. – 2002. – V. 12. – P. 470–474.
16. *Saidani, M.* Cubic millimeter power inductor fabricated in batch-type wafer technology / M. Saidani, M.A.M. Gijs // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2003. – V. 12. – No. 2. – P. 172–178.
17. *Доброневский, О.В.* Справочник по радиоэлектронике / О.В. Доброневский. – К. : Вища школа, 1974.

Petrov A.V., Demyanov S.E., Kaniukov E.Yu., Fink D.

High-frequency microinductor on the base of flexible polyimide film

A method of creation of 3D flexible high-frequency microinductor on the base of polyimide film with etched swift heavy ion tracks, filled with a conducting material is proposed. This method is more simple as compared with existing technologies. The service model of the microinductor having dimensions $0,04 \text{ mm}^3$ is fabricated. This model has following main operational characteristics: winding density of 7 winding/mm at the winding thickness $10 \text{ }\mu\text{m}$; inductivity 0.3 mH with the Q-factor of 8 at 200 MHz. A possibility of the decrease of dimensions of the device down to 10^{-6} mm^3 is shown. (E-mail : petrov@ifftp.bas-net.by)

Key Words: flexible electrotechnical devices, high-frequency microinductor, swift heavy ion tracks, nanopores, polyimide film.

Поступила в редакцию 28.07.2011.