

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 4(153) ♦ 2013

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России и в систему Российского индекса научного цитирования

Главный редактор

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В.
Асеев А. Л.
Волчихин В. И.
Гапонов С. В.
Захаревич В. Г.
Каляев И. А.
Квардаков В. В.
Климов Д. М.
Ковальчук М. В.
Нарайкин О. С.
Никитов С. А.
Сауров А. Н.
Серебряников С. В.
Сигов А. С.
Стриханов М. Н.
Чаплыгин Ю. А.
Шахнов В. А.
Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И.
Андреевский Р. А.
Антонов Б. И.
Арсентьева И. П.
Астахов М. В.
Быков В. А.
Горнев Е. С.
Градецкий В. Г.
Гурович В. А.
Кальнов В. А.
Карякин А. А.
Колобов Ю. Р.
Кузин А. Ю.
Мокров Е.
Панич А. Е.
Панфилов Ю. В.
Петросьянц К. О.
Петрунин В. Ф.
Пожела К.
Путилов А. В.
Пятышев Е. Н.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.
Тимошенков С. П.
Тодуа П. А.
Шубарев В. А.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство
"Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

Издается с 1999 г.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Ичкитидзе Л. П., Подгаецкий В. М., Путря Б. М., Селищев С. В., Благоев Е. В., Галперин В. А., Шаман Ю. П., Кицюк Е. П. Электропроводящие слои композиционных наноматериалов с многослойными углеродными нанотрубками 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Гриджин В. А., Чебанов М. А., Зиновьев В. Б. Численное моделирование при проектировании сенсоров давления 5

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Троян П. Е., Зеленский В. И. Эмиссионные структуры на основе формованных тонкопленочных систем 9

Вагин Д. В., Касаткин С. И., Амеличев В. В., Костюк Д. В., Беляков П. А. Частотные характеристики спин-вентильных магниторезистивных наноструктур 12

Галперин В. А., Кондратьев П. К., Зубов Д. Н., Кельм Е. А., Павлов А. А. Оптимизация процесса электрохимического осаждения меди в массивы углеродных нанотрубок 15

Тучин А. В., Битюцкая Л. А., Борментов Е. Н. Эффект Штарка в фуллерене C₆₀ 19

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Благоев Е. В., Амеличев В. В., Костюк Д. В. Магниторезистивный преобразователь для датчиков тока 22

Гаршин А. Я., Тучин А. В., Борментов Е. Н. Дифференциальный датчик давления с импульсной компенсацией 25

Ичкитидзе Л. П. Сверхпроводниковый пленочный трансформатор магнитного потока с наноразмерными ветвями для датчика магнитного поля 27

Уваров И. В., Наумов В. В., Амиров И. И. Резонансные свойства многослойных металлических нанокантилеверов 29

Земляничников Н. С., Данилова Н. Л., Панков В. В., Суханов В. С., Михайлов Ю. А. Тензорезистивные преобразователи давления на основе сложнопрофилированных кремниевых мембран 32

Никифоров С. В., Поломошнов С. А., Тихонов Р. Д., Черемисинов А. А. Исследование микросистемы с использованием преобразователей магнитного поля 36

Амеличев В. В., Сницар В. Г., Костюк Д. В., Касаткин С. И. Высокочувствительный магниторезистивный сенсор для современных приборов считывания информации 38

СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ

Мальцев П. П. Перспективы создания систем на кристалле для СВЧ и КВЧ диапазонов 40

Зайцев А. А. Метод построения высокочастотного помехоустойчивого управляемого генератора для "системы на кристалле" субмикронного КМОП-базиса 49

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Прокофьев И. В., Суханов В. С., Амеличев В. В. Применение тонкопленочных резистивных преобразователей магнитного поля для систем ориентации и интеллектуального мониторинга транспортных средств 53

Contents 55

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайте журнала (<http://novtex.ru/nmst/>) и научной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 по 2011 г. в разделе "АРХИВ".

ПОДПИСКА:

по каталогу Роспечати (индекс 79493);
по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)
в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

Адрес для переписки:

107076 Москва, Стромьинский пер., д. 4
e-mail: nmst@novtex.ru

УДК 539.51:621.371.39.001.121.18

Л. П. Ичкитидзе¹, канд. физ.-мат. наук, доц., ст. науч. сотр., e-mail: leo852@inbox.ru,
В. М. Подгаецкий¹, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Б. М. Путря¹, аспирант,
С. В. Селищев¹, д-р физ.-мат. наук, зав. каф., e-mail: sersel@miee.ru,
Е. В. Благоев², д-р физ.-мат. наук, зам. директора, e-mail: blagovev@mail.ru,
В. А. Галперин², канд. техн. наук, нач. лаб., e-mail: V.Galperin@tcen.ru,
Ю. П. Шаман³, мл. науч. сотр., e-mail: shaman.yura@gmail.com,
Е. П. Кицюк², аспирант
¹Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Зеленоград, Москва
²Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (ИНМЭ), Москва
³НПК "Технологический центр" МИЭТ, Зеленоград, Москва

ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ СЛОИ КОМПОЗИЦИОННЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ С МНОГОСЛОЙНЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Поступила в редакцию 11.02.2013

Исследована удельная электропроводность слоев композиционных наноматериалов микрометровых размеров, состоящих из карбоксиметилцеллюлозы и многослойных углеродных нанотрубок с различными аспектными отношениями. Ультрадисперсная водная суспензия наносилась методом шелкографии на подложки из покровного стекла и кремния со слоем оксида кремния. Электропроводность измерялась четырехзондовым методом. Для слоев в интервале толщин 0,5...10 мкм наибольшая удельная объемная проводимость составила ~350 См/м. Описаны некоторые аспекты увеличения электропроводности под действием лазерного излучения.

Ключевые слова: карбоксиметилцеллюлоза, многослойные углеродные нанотрубки, композиционный наноматериал, слои, удельная электропроводность, лазерное излучение, подложки

Углеродные нанотрубки (УНТ), как и слои, пленки и проводники, изготовленные на их основе, имеют более высокие механические характеристики по сравнению с металлическими нанопроводниками (особенно по прочности на разрыв и по значению

модуля упругости). Действительно, для УНТ отношение производной прочности на разрыв (~ 10 ГПа) и удельной электропроводности ($\sigma \approx 10^2$ кСм/м) к плотности материала на несколько порядков выше таковых для медных или алюминиевых пленок и проводников, часто используемых в микроэлектронике. Например, в медных нанопроводах достигается на несколько порядков более низкое предельное значение плотности тока $J \leq 10^6$ А/см², чем в проводах из УНТ ($J \geq 10^8$ А/см²), при котором начинается разрушение материала. Опытные образцы кабеля на основе многослойных УНТ (МУНТ), легированных йодом, обладают высокой токонесущей способностью порядка $\sim 10^5$ А/см² при комнатной температуре [1], что сравнимо с конструкционной токонесущей способностью кабелей на основе сверхпроводящих материалов с рабочей температурой жидкого азота [2].

Реализованная в экспериментах удельная проводимость слоев на основе УНТ значительно уступает расчетным значениям как для индивидуальных однослойных УНТ (ОУНТ), так и индивидуальных МУНТ ($\sigma \geq 10^8$ См/м). Электрические свойства МУНТ сильно зависят от многих факторов, в том числе от способа их изготовления, очистки и аспектного отношения $a = l_0/d_0$, где l_0 и d_0 — длина и диаметр нанотрубки соответственно [3].

В работе ставилась задача выяснения влияния действия лазерного излучения на удельную проводимость слоев наноматериалов, содержащих композицию матрица—гель на основе карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ), наполнитель — МУНТ с различными значениями a . Исследовались слои композиционных наноматериалов, нанесенные на подложки из покровного стекла (ПС) и кремния со слоем оксида кремния (Si/SiO₂).

При изготовлении МУНТ использовался биметаллический катализатор Fe—Mo/MgO. Синтез МУНТ протекал при температуре $t \approx 900$ °С в потоке Ag и CH₄ в течение 30...40 мин [4]. Варьирование длительности синтеза и технологического маршрута позволяет получить МУНТ с различными длинами (≤ 1 мкм и ≥ 10 мкм). Для типа I МУНТ значение d_0 находится в пределах 4...20 нм при среднем диаметре ~ 8 нм и $a \approx 80$. Для типа II МУНТ $d_0 \approx 10$...60 нм, характерный диаметр ~ 40 ...50 нм, $a \approx 200$. Приведенные показатели оценивали путем анализа изображений, полученных на просвечивающем электронном микроскопе.

В экспериментах использовали электропроводящий гель (ЭПГ) в виде водного раствора карбок-

симетилцеллюлозы (~4 мас. % КМЦ), удельная электропроводность которого σ составляла ~0,4 См/м при температуре $t = 25^\circ\text{C}$ в электрическом поле с напряженностью ~100 В/м. ЭПГ служил матрицей для создания электропроводящего композиционного наноматериала, в который добавлялся наполнитель МУНТ. Рабочая водная дисперсия, состоящая из ЭПГ и МУНТ, получалась после нескольких процедур перемешивания в магнитной мешалке и УЗ ванне [5].

Водную дисперсию с 4 мас. % КМЦ + 5 мас. % МУНТ наносили на подложки ПС и Si/SiO₂ методом шелкографии. На каждой подложке рядом наносили два слоя (образцы) прямоугольной формы с размерами сторон 20 × 10 мм, разделенные полосой шириной 1 мм. Оба слоя имели приблизительно одинаковую толщину в интервале 1...10 мкм. Сразу после нанесения, когда слой еще были влажными (переходное "влажное состояние"), один из них накрывали светонепроницаемой пластинкой, а второй подвергали действию непрерывного лазерного излучения (ЛИ) с плотностью мощности $w_s \approx 0,2 \text{ Вт/см}^2$ и длиной волны генерации 970 нм в течение 5 мин. После сушки слоев ("высушенное состояние") на них проводили электрические измерения.

Проводимость образцов измеряли четырехзондовым методом. Толщину d слоев на подложках оценивали интерференционным и микрометрическим методами. Во всех случаях относительная погрешность величины d не превосходила 10...15 %. Значения d для исследованных слоев составляли ~1...10 мкм.

В таблице приведены σ и отношения $\Delta\sigma_L/\sigma = [\sigma_L - \sigma]/\sigma$ для слоев на подложках ПС для обоих типов МУНТ. Здесь σ_L — значение проводимости после воздействия ЛИ на слои, которые находились в переходном (влажном) состоянии. Значения σ , σ_L и $\Delta\sigma_L/\sigma$ для образцов с различными толщинами в интервале 1...5 мкм отличались в пределах $\pm 22\%$.

Важным является то, что в слоях, полученных после ЛИ с $w_s = 0,2 \text{ Вт/см}^2$, значения σ увеличиваются на $\Delta\sigma_L/\sigma \approx 13...20\%$, относительно необлученных образцов. Получается, что лазерное излучение каким-то образом влияет на образование слоя, когда он еще находится в переходном состоянии — от жидкостного к твердому. Такие измене-

Удельная проводимость образцов на подложке ПС без и с облучением лазером ($w_s = 0,2 \text{ Вт/см}^2$)

Образцы	σ , См/м	σ_L , См/м	$[\sigma_L - \sigma]/\sigma$, %
Тип I МУНТ (короткие)	300 ± 15	355 ± 15	18,0
	335 ± 15	395 ± 15	17,8
	310 ± 15	350 ± 15	12,9
	315 ± 15	365 ± 15	15,9
Среднее	315 ± 15	365 ± 15	16,2
Тип II МУНТ (длинные)	290 ± 15	340 ± 15	17,2
	275 ± 15	320 ± 15	16,4
	370 ± 15	435 ± 15	17,6
	365 ± 15	420 ± 15	15,1
Среднее	325 ± 15	395 ± 15	16,6

ния наблюдались для всех слоев, состоящих из любых типов МУНТ и нанесенных на любых подложках (ПС или Si/SiO₂).

По-видимому, значительный положительный эффект увеличения проводимости слоев под действием ЛИ связан с частичным структурированием МУНТ. Действительно, УНТ ориентируются по направлению электрического поля света ЛИ аналогично проводящим нитям в диэлектрической матрице [6]. Вблизи конца УНТ напряженность светового поля в $\sim m$ раз больше средней напряженности поля в матрице, где коэффициент $m \approx 1$ для индивидуальных УНТ, снижаясь при их сближении [7].

Изменения объемной удельной проводимости под действием ЛИ, когда слои находятся во "влажном состоянии", по-видимому, можно представить следующим образом. В этом состоянии, когда МУНТ еще имеют возможность повернуться или двигаться в слое, они более подвержены действию ЛИ. Следовательно, определенное число МУНТ будет ориентироваться по направлению электрического поля ЛИ и, соответственно, средняя проводимость слоя должна увеличиться относительно первоначального состояния, когда МУНТ были хаотически расположены.

Вместе с тем такие изменения должны быть больше в слоях с МУНТ, для которых значения a велики, что в нашем случае не наблюдалось в пределах погрешности эксперимента. Видимо, в сгустках МУНТ их реальные длины становятся равными порядка расстояния между ближайшими узлами пересечения нанотрубок, что для обоих типов МУНТ одинаково, поскольку их концентрации в наноматериалах близки. Следовательно, реальные аспектные отношения для различных типов МУНТ также мало отличаются друг от друга. Все образцы, полученные с ЛИ и без него, переведенные в "высушенное состояние" облучали ЛИ, что приводило к незначительному увеличению значений σ , независимо от типа МУНТ, их толщины и типа подложек. Зависимости σ от w_s , как видно из рис. 1, были сходны для всех исследованных слоев. В этих случаях изменения удельной проводимости под воздействием ЛИ можно описать параметром $\beta = (\Delta\sigma/\sigma)/w_s$, где $\Delta\sigma$ — изменение σ после облучения.

Нагрев слоев под действием ЛИ ($\Delta t \leq 8^\circ\text{C}$ при $w_s = 0,2 \text{ Вт/см}^2$) дает определенный вклад в значение β , что можно оценить из параметра температурной зависимости $\alpha = (\Delta\sigma/\sigma)/\Delta t$, где $\Delta\sigma$ — изменение σ в интервале Δt . Типичная зависимость $\sigma(t)$ для образца с $d \approx 3,3 \text{ мкм}$ (тип I МУНТ, подложка Si/SiO₂) приведена на рис. 2, из нее следует $\alpha \approx 0,0075 (1/^\circ\text{C})$. С учетом этого значения получается, что при нагреве образца на $\Delta t \approx 8^\circ\text{C}$, происходит относительное увеличение его проводимости на $\Delta\sigma/\sigma \approx 6\%$, что сопоставимо с изменением $\Delta\sigma/\sigma \approx 2,4\%$ при ЛИ ($\Delta\sigma/\sigma \approx \beta w_s$). Поэтому можно допустить, что в механизме изменения проводимости слоев под действием ЛИ определенную роль играет их нагрев.

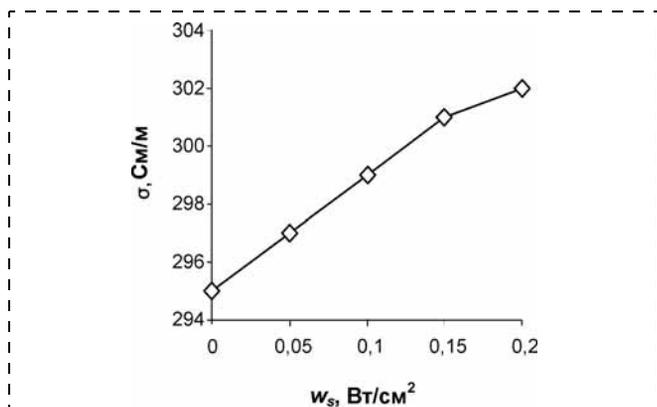


Рис. 1. Зависимость $\sigma(w_s)$ для образца с $d \approx 5$ мкм, содержащего тип I МУНТ (подложка Si/SiO₂)

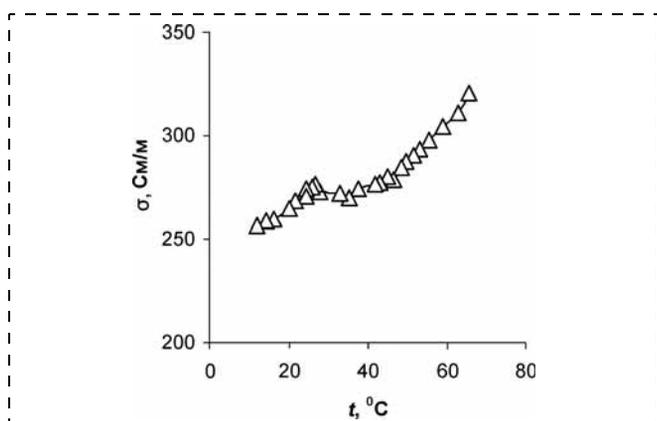


Рис. 2. Зависимость $\sigma(t)$ для образца с $d \approx 3,3$ мкм, содержащего тип I МУНТ (подложка Si/SiO₂)

Из данных, приведенных в таблице, видно, что в образцах, подверженных предварительному ЛИ во "влажном состоянии", параметр β достигает 90 %/(Вт/см²). В "высушенном состоянии" влияние ЛИ на величину σ гораздо меньше — $\beta \leq 12$ %/(Вт/см²), что следует из рис. 1.

Таким образом, механизмы изменения удельной проводимости исследуемых слоев композиционного материала под действием лазерного излучения могут быть разными в зависимости от того, в каком состоянии находились образцы. Можно предположить, что в первом случае ("влажное состояние") лазерное излучение осуществляет частичную ориентировку нанотрубок в слоях и существенно увеличивает (на 90 %/(Вт/см²)) их удельную проводимость, а во втором случае ("высушенное состояние") лазерное излучение не может структурировать МУНТ (они закреплены в матрице), а только перегревает слои и частично увеличивает (≤ 12 %/(Вт/см²)) их проводимость.

В нашем эксперименте не обнаружена заметная разница в проводимости слоев на основе МУНТ, имеющих отличающиеся в 2—3 раза аспектные отношения, что возможно является следствием хаотического и запутанного распределения МУНТ в исследованных слоях.

Заключение

В работе приведена методика изготовления слоистых композиционных наноматериалов, содержащих 4 мас. % целлюлозы КМЦ и 5 мас. % МУНТ двух типов, аспектные отношения которых отличались в 2—3 раза. Ультрадисперсную водную дисперсию композиционного наноматериала наносили методом шелкографии на подложки из покровного стекла и кремния со слоем оксида кремния. Удельная электропроводность слоев композиционных наноматериалов толщиной 0,5...10 мкм, состоящих из обоих типов МУНТ, была примерно одинакова. Удельная объемная проводимость образцов составляла ~ 350 См/м. Лазерное облучение (длина волны генерации 970 нм) высушенных образцов в течение 5 мин с обоими типами МУНТ, независимо от их типа, увеличивало удельную объемную проводимость в пределах 12 %/(Вт/см²), а в случае влажных образцов увеличение удельной объемной проводимости доходило до 90 %/(Вт/см²). В последнем случае, по-видимому, лазерное излучение в какой-то мере ориентирует первоначально хаотично расположенные МУНТ в направлении электрического поля световой волны, тем самым увеличивая среднее значение проводимости слоев.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госконтракты: № 16.426.11.0043 и 16.740.11.0765, соглашение 14.B37.21.0567), Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-08-12014/12) и Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (контракт 10678р/19537).

Список литературы

1. Zhao Y., Wei J., Vajtai R., Ajayan P. M., Barrera E. Iodine doped carbon nanotube cables exceeding specific electrical conductivity of metals // Sci. Rep. 2011. Vol. 1. P. 83—88.
2. Mukoyama S., Yagi M., Hirata H., Suzuki M., Nagaya S., Kashima N., Shiohara Y. Development of YBCO High-Tc Superconducting Power Cables // Furukawa Review. 2009. N 35. P. 18—22.
3. Yang K., He J., Puneet P., Su Z., Skove M. J., Gaillard J., Tritt T. M., Rao A. Tuning electrical and thermal connectivity in multiwalled carbon nanotube buckypaper // J. Phys.: Condens. Matter. 2010. Vol. 22, 334215 (6 p).
4. Ичкигидзе Л. П., Рындина Т. С., Селищев С. В., Пономарева О. В., Табулина Л. В., Шулицкий Б. Г., Галперин В. А., Шамаев Ю. П., Благов Е. В. Объемный композитный наноматериал на основе белка и углеродных нанотрубок // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 3. С. 13—19.
5. Ичкигидзе Л. П., Подгаецкий В. М. Электропроводный биосовместимый композиционный наноматериал с углеродными нанотрубками // Медицинская техника. 2011. № 6(270). С. 25—29.
6. Каманина Н. В., Васильев П. Я., Студенов В. И. Особенности наноструктурированных покрытий при использовании лазерной технологии и ориентированных углеродных нанотрубок // Письма ЖТФ. 2011. Т. 37, № 3. С. 23—29.
7. Bouree K. D., Kim J.-E., Youl S. Calculation of the field enhancement for a nanotube array and its emission properties // Appl. Phys. 2009. V. 105, N 8. P. 084315 (5 pages).

УДК 681.586.2

В. А. Гридчин, д-р техн. наук, проф.,
М. А. Чебанов, аспирант,
Новосибирский государственный технический
университет,
e-mail: chebanov100@gmail.com,
В. Б. Зиновьев, канд. техн. наук, доц., нач. лаб.,
ОАО "НПП "Восток", г. Новосибирск

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЕНСОРОВ ДАВЛЕНИЯ

Поступила в редакцию 18.01.2013

Рассмотрен вариант тензорезистивного сенсора давления с упругим элементом (УЭ) в виде квадратной мембраны, на планарной стороне которой сформированы четыре углубления. Определено влияние геометрических размеров углублений на деформацию УЭ и приведены оценки чувствительности, нелинейности и прочности УЭ нового типа. Получено теоретическое и экспериментальное подтверждение увеличения чувствительности сенсора давления на основе предложенного варианта УЭ на 30 % по отношению к традиционным сенсорам давления с плоской мембраной.

Ключевые слова: тензорезистивный сенсор давления, чувствительность, нелинейность, надежность, метод конечных элементов

Введение

Кремниевые сенсоры давления занимали 12 % общего рынка продаж в 2011 г. и, по оценкам специалистов, их доля за 5 лет увеличится примерно в 2 раза [1]. Этому способствуют потенциальные возможности технологий микросистемной техники (МСТ), успехи материаловедения и достижения микроэлектроники, которые сделали возможным переход от традиционных сенсоров физических величин к интеллектуальным.

Фундаментальную роль в улучшении соотношения точность/стоимость и повышении конкурентоспособности сенсоров играют новые методы и инструменты проектирования. Применительно к тензорезистивным кремниевым сенсорам давления ключевое значение имеет задача о распределении механических напряжений в упругом элементе. Ее решение, в сочетании с определением деформационных и электрических полей в тензорезисторе, позволяет постро-

ить общую математическую модель сенсора, которую далее можно оптимизировать.

Для первоначальных вариантов сенсоров давления в качестве модели упругого элемента рассматривали круглые или прямоугольные жесткозашемленные по контуру пластинки постоянной толщины. Распределение механических напряжений в таких структурах оказалось возможным представить в аналитической форме, решая уравнения теории упругости либо напрямую, либо вариационным методом [2–5].

Второй этап развития моделей сенсоров давления связан с применением упругих элементов сложных профилей. Это привело к численным моделям и позволило решить ряд конструктивно-метрологических задач интегральных сенсоров [6–10]. Третий этап начался с введения в сенсоры давления мезатензорезисторов.

Современные тензорезистивные сенсоры давления имеют в своем составе мезатензорезисторы с диэлектрической изоляцией вместо интегральных тензорезисторов с $p-n$ -переходами, упругие элементы разнообразной формы и профиля, изготовленные из различных материалов (кремний, сапфир, металл). Размеры упругих элементов имеют четкую тенденцию к уменьшению, а тензорезисторы переходят в субмикрометровый и нанометровый диапазон [11]. Численные модели таких сенсоров становятся все сложнее и должны включать связанный анализ механических и электрофизических свойств всех элементов структуры.

Модели третьего поколения мало исследованы как в теоретическом, так и в экспериментальном отношении. Так, особенности деформации мезатензорезисторов были проанализированы в работе [12], влияние эффектов масштабирования на сопротивление резисторов и тензочувствительность — в работах [13–15]. В настоящей статье описаны варианты численной модели нового типа сенсора и ее экспериментальная проверка.

Численная модель

Рассматриваемый чип кремниевого сенсора давления имеет общие размеры $4 \times 4 \times 0,44$ мм и профилированную квадратную мембрану толщиной $H = 65$ мкм и сторонами длиной $2A = 2$ мм. Стороны мембраны ориентированы по направлениям [110] и $\bar{1}\bar{1}0$. На поверхности в центральной части мембраны анизотропным травлением сформированы углубления, представляющие собой усе-

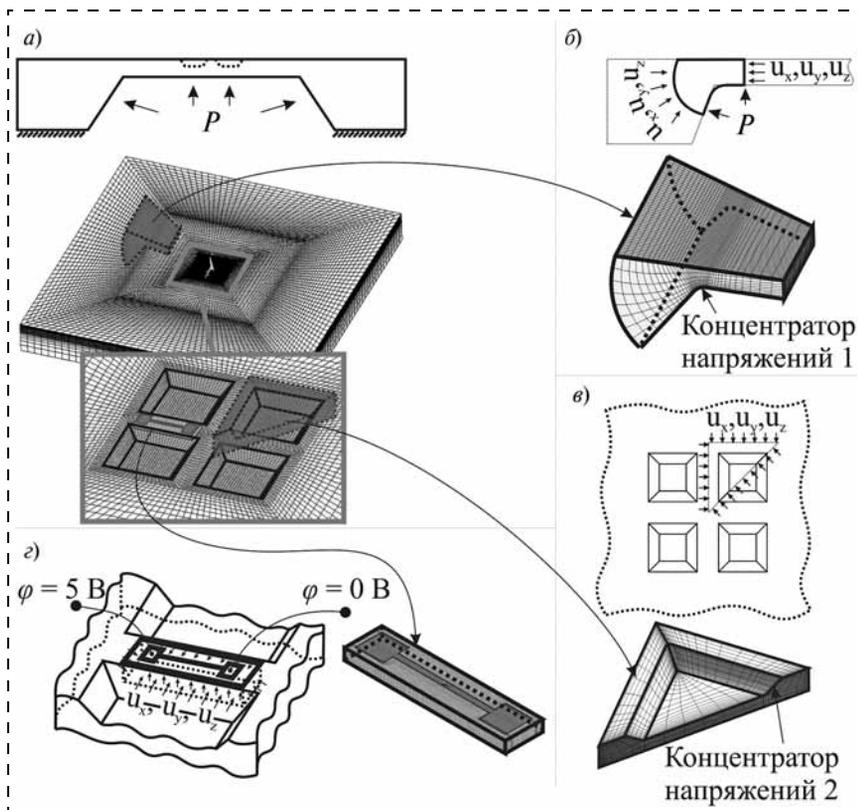


Рис. 1. Сетка конечных элементов и граничные условия:

a — модели УЭ сенсора давления; *б* — подмодели области перехода от мембраны к жесткой рамке; *в* — подмодели углубления на поверхности мембраны; *г* — подмодели поликремниевого тензорезистора

ченные пирамиды с основанием 220×220 мкм и варьруемой глубиной, расположенные симметрично относительно центральных осей мембраны. Расстояние между углублениями составляет $S_{cave} = 70$ мкм. На окисленной поверхности упругого элемента (УЭ) сформированы поликремниевые тензорезисторы с размерами $180 \times 10 \times 0,5$ мкм с контактами 50×50 мкм.

Численное моделирование деформации УЭ сенсора давления проводили методом конечных элементов с использованием пакета программ ANSYS (11 версия). Модель УЭ была представлена структурированной сеткой конечных элементов первого порядка SOLID185 (рис. 1, *a*). Конечный элемент SOLID185 имеет форму шестигранника, вершины которого могут совершать перемещения по координатам x, y, z , он предназначен для линейных и нелинейных расчетов деформации трехмерных структур, а также позволяет учесть анизотропию упругих свойств кремния. Тензорезистивный анализ поликремниевых тензорезисторов выполняли с использованием расчетной сетки, составленной из конечных элементов второго порядка SOLID226. Этот элемент составлен из 20 узлов, 8 из которых образуют форму шестигранника, а остальные 12 находятся на его ребрах. SOLID226 позволяет рассчитывать связанные задачи структурного и электрического анализа и имеет по четыре степени свободы в каждом узле — перемещения по координатам

x, y и z , а также узловые потенциалы ϕ . Этот элемент позволяет выполнять нелинейный расчет деформации и распределения потенциала в трехмерных структурах с учетом анизотропии их упругих и электрических свойств.

При моделировании прочностных характеристик структур особое внимание было уделено сингулярным точкам [16], в которых численное решение носит неопределенный характер. Сингулярные точки возникают в местах резкого изменения геометрической формы моделируемой структуры. Для корректного определения напряженного состояния в таких местах был реализован метод подмоделирования, позволяющий обойти неопределенность решения, предварительно сгладив острые края двугранных углов. Подмодель области перехода между мембраной и жесткой рамкой представлена на рис. 1, *б*. Подмодель углублений на поверхности мембраны представлена на рис. 1, *в*. Граничные условия в виде узловых перемещений для подмодели накладывали на ее общие границы с полной моделью, а значения узловых

перемещений на этих границах определяли методом трехмерной интерполяции результатов предварительно рассчитанной полной модели структуры. Метод подмоделирования позволяет выполнять расчеты для структур, геометрические размеры которых существенно различаются в пределах одной модели, что порождает проблему низкого качества расчетной сетки. Подмоделирование позволяет отдельно рассчитать макро- и микрообласти модели (например УЭ и тензорезистора), сшивая их решения на общих границах (рис. 1, *г*).

Граничные условия, а также способ нагружения в макромоделе и подмоделях, применяемых для расчета деформации упругого элемента и тензорезистивного анализа, также представлены на рис. 1.

При моделировании упругие свойства монокристаллического кремния представлялись полной матрицей упругих коэффициентов, а поликристаллический кремний был представлен как материал с изотропией упругих свойств. Данные по использованным в расчетах упругим постоянным и коэффициентам пьезосопротивления приведены в работе [2].

Обсуждение результатов численного моделирования

В плоской квадратной мембране УЭ с ориентацией сторон вдоль [110] деформации в центре равны, и $\varepsilon_x/\varepsilon_z = 1$. Формирование системы из четырех

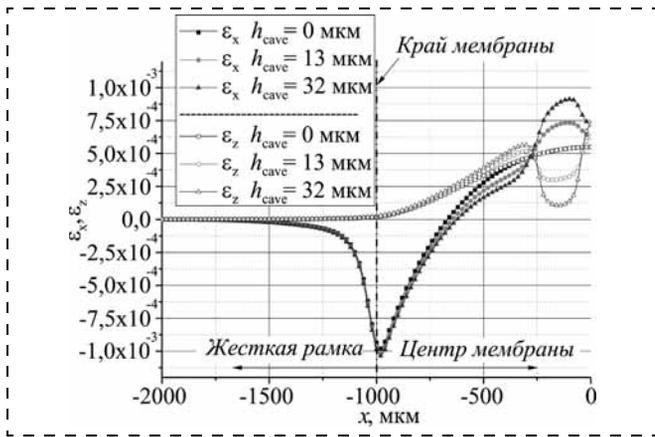


Рис. 2. Распределение продольной и поперечной компонент деформации вдоль средней линии мембраны для случая, когда измеряемое давление подается с обратной стороны мембраны

симметричных углублений позволяет эффективно изменять это отношение, увеличивая продольную и уменьшая поперечную деформацию. На рис. 2 представлено распределение ε_x деформации вдоль оси симметрии УЭ при нагружении обратной стороны мембраны. Для углублений глубиной $h_{cave} = 32$ мкм и длиной стороны $l_{cave} = 220$ мкм отношение деформаций составляет $\varepsilon_x/\varepsilon_z = 6,6$ и поле деформаций близко к одноосному. Изменение направления давления (на "планарную" сторону) влияет на значение отношения и делает его равным $\varepsilon_x/\varepsilon_z = 5,8$.

В УЭ мембранного типа связь между измеряемым давлением и деформацией $\varepsilon_x = \varepsilon_x(P)$ нелинейная и зависит от выбора места на УЭ и его геометрии. На рис. 3 приведено распределение нелинейности вдоль оси симметрии УЭ. Нелинейность при этом определялась как $\delta = \Delta\varepsilon_x/\varepsilon_x$, где $\Delta\varepsilon_x$ — максимальное отклонение от линейной зависимости $\varepsilon_x = \varepsilon_x(P)$ в выделенной точке в интервале давлений (0...P). Из результатов моделирования следует, что наличие углублений приводит к локальному росту нелинейности в центре мембраны, которое не превышает 3,5 % при давлении $P = 7$ атм

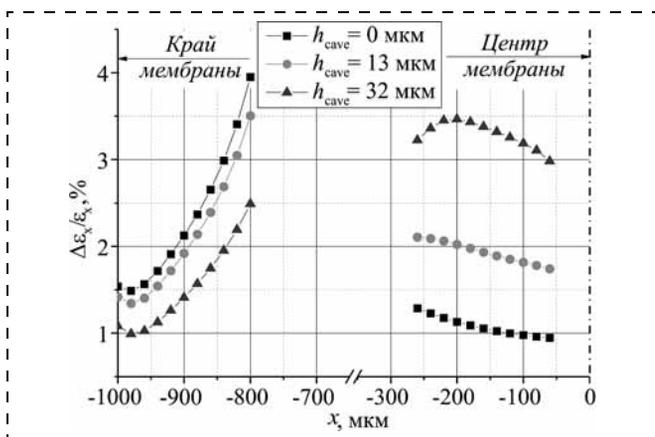


Рис. 3. Распределение нелинейности продольной деформации вдоль средней линии при нагружении с обратной стороны мембраны

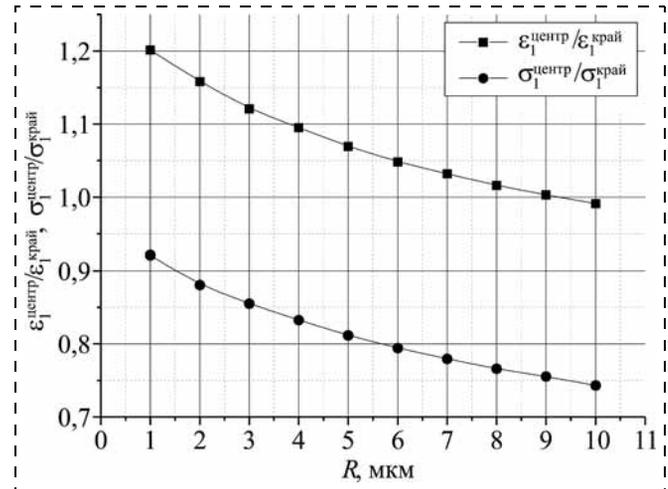


Рис. 4. Зависимость отношения главных компонент деформаций и напряжений в критических точках кристалла от радиуса сглаживания двугранных углов при фиксированных параметрах:

$h_{cave} = 32$ мкм, $l_{cave} = 220$ мкм, $S_{cave} = 70$ мкм

на обратную сторону мембраны и 4,5 % при нагрузке на "планарную" сторону.

Двугранные углы, возникающие в ходе профилирования УЭ, играют роль концентраторов напряжений [17]. В УЭ со сложным профилем их действие должно быть рассмотрено специально. Предварительный расчет напряженно-деформированного состояния УЭ выявил самые опасные точки в рассматриваемой структуре (см. рис. 1, б и 1, в). На рис. 4 приведена зависимость отношения $\varepsilon_1^{\text{центр}}/\varepsilon_1^{\text{край}}$ и $\sigma_1^{\text{центр}}/\sigma_1^{\text{край}}$ от радиуса сглаживания двугранных углов R в наиболее опасных областях структуры, где $\varepsilon_1^{\text{край}}$, $\varepsilon_1^{\text{центр}}$ и $\sigma_1^{\text{край}}$, $\sigma_1^{\text{центр}}$ — соответственно главные компоненты деформаций и напряжений в области концентраторов напряжений 1 и 2. При уменьшении радиуса сглаживания R наблюдается повышенный рост напряжений в области центрального концентратора 2, что обусловлено разницей углов, образованных плоскостями (111) и (100) — концентратор напряжений 1 и плоскостями семейства (111) — концентратор напряжений 2.

Наличие в центре мембраны квадратных углублений с размерами $h_{cave} \leq H/5$, $l_{cave} \leq A/4$ и $R \geq 5$ мкм не сказывается на прочностных свойствах УЭ, поскольку максимальные деформации и напряжения по-прежнему остаются на краю мембраны. При $h_{cave} = H/5$, $l_{cave} = A/4$ и $R \geq 5$ мкм деформации в концентраторе напряжений 2 на 20 % ниже деформации в концентраторе напряжений 1.

Верификация разработанной численной модели была проведена на серийном варианте чипа сенсора давления, изготовленного на ОАО "Восток", г. Новосибирск. Упругий элемент сенсора содержит четыре тензорезистора, соединенных по мостовой схеме. Тензорезисторы из поликристаллического кремния с диэлектрической изоляцией имели радиальное расположение, два из которых на-

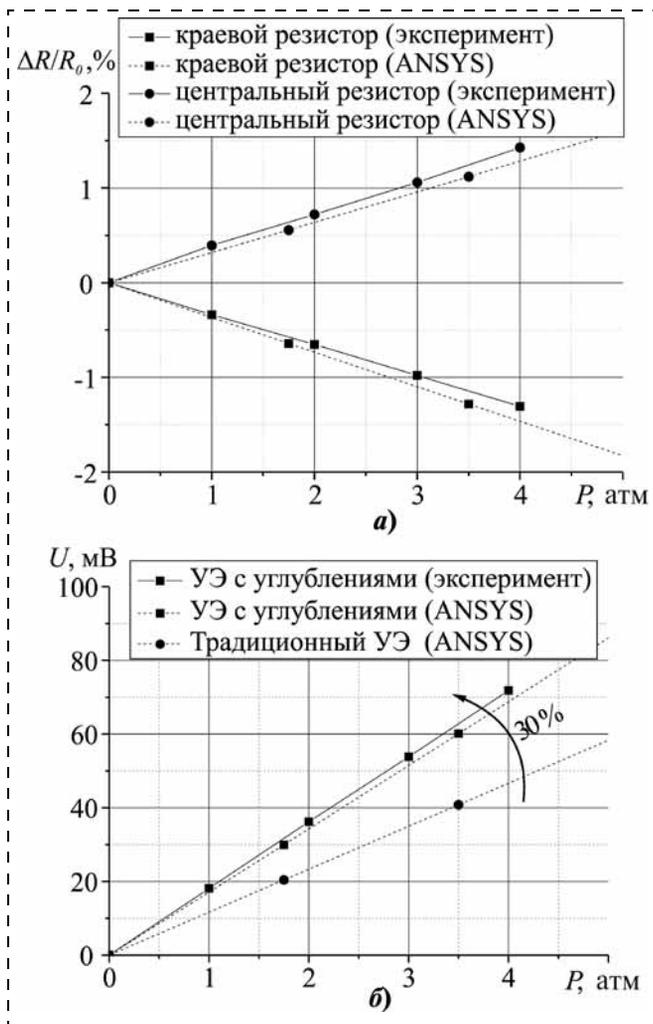


Рис. 5. Сравнение численно рассчитанных с экспериментально полученными данными:

а — относительного изменения сопротивления центральных и краевых тензорезисторов; б — преобразовательной характеристики сенсора

ходились у края мембраны, а два других — между углублениями на оси симметрии УЭ. Перераспределение деформации, вызванное углублениями, привело к возрастанию чувствительности центральных тензорезисторов до уровня краевых.

На рис. 5, а приведены нагрузочные зависимости изменения относительного сопротивления краевых и центральных тензорезисторов, рассчитанные на основе разработанной модели и определенные по данным эксперимента. Отличие не превосходит 10 % и может быть связано с технологическими факторами.

Изменение расположения тензорезисторов благодаря введению углублений позволило повысить выходной сигнал на номинальном давлении на 30 % относительно стандартной топологии, когда радиальные и тангенциальные резисторы расположены у края мембраны УЭ (рис. 5, б).

Заключение

Представленная численная модель позволяет более эффективным образом описывать характеристики чипов сенсоров давления, чем стандартная аналитическая модель. Применение рассмотренной модели позволило повысить чувствительность сенсора на 30 % при сохранении прочностных свойств.

Список литературы

1. **Manners D.** MEMS pressure sensor market to top \$1.5bn this year. <http://www.electronicweeky.com/Articles/05/11/2012/54917/mems-pressure-sensor-market-to-top1.5bn-this-year.htm>, 2012.
2. **Гриджин В. А., Драгунов В. П.** Физика микросистем. Часть 1. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 416 с.
3. **Matsuoka Y., Yamamoto Y., Tanabe M.** et al. Low-pressure measurement limits for silicon piezoresistive circular diaphragm sensors // Journal of Micromechanics and Microengineering. 1995. Vol. 5. P. 32–35.
4. **Wu X., Hu M., Shen J., Ma Q.** A miniature piezoresistive catheter pressure sensor // Sensors and Actuators A. 1993. V. 35. P. 197–201.
5. **Elgamel H. E.** Closed-form expressions for the relationships between stress, diaphragm deflection, and resistance change with pressure in silicon piezoresistive pressure sensors // Sensors and Actuators A. 1995. V. 50. P. 17–22.
6. **Matsuoka Y., Yamamoto Y., Yamada K.** et al. Characteristics of a pressure sensor using the silicon piezoresistance effect for high-pressure measurements // Journal of Micromechanics and Microengineering. 1995. Vol. 5. P. 25–31.
7. **Ciampolini P., Pierantoni A., Rudan M.** A CAD environment for the numerical simulation of integrated piezoresistive transducers // Sensors and Actuators A. 1995. V. 46–47. P. 618–622.
8. **Sandmaier H.** Non-linear analytical modeling of bossed diaphragms for pressure sensors // Sensors and Actuators A. 1991. V. 25–27. P. 815–819.
9. **Marco S., Samitier J., Ruiz O., Morante J. R., Esteve J.** Analysis of nonlinearity in high sensitivity piezoresistive pressure sensors // Sensors and Actuators A. 1993. V. 37–38. P. 790–795.
10. **Kanda Y., Yasukawa A.** Optimum design considerations for silicon piezoresistive pressure sensors // Sensors and Actuators A. 1997. V. 62. P. 539–542.
11. **Tanimoto Y., Sugiyama S.** Single crystalline silicon nanowire piezoresistors for mechanical sensors // Journal of Microelectromechanical Systems. 2002. Vol. 11, N 5. P. 605–611.
12. **Gridchin V. A., Chebanov M. A.** Features of micron-sized mesapiezoresistor // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. 2010. Vol. 1(7), N 4. P. 42–47.
13. **Toriyama T., Sugiyama S.** Single crystalline silicon piezoresistive nano-wire bridge // Sensors and Actuators A. 2003. V. 108. P. 244–249.
14. **Bui T., Dao D., Toriyama T., Sugiyama S.** Evaluation of the piezoresistive effect in single crystalline silicon nanowires // IEEE SENSORS 2009. Conference. 2009. P. 41–44.
15. **Barwicz T., Klein L., Koester S. J., Hamann H.** Silicon nanowire piezoresistance: Impact of surface crystallographic orientation // Applied Physics Letters. 2010. Vol. 97, N 2. P. 023110–023110-3.
16. **Gridchin V. A., Chebanov M. A.** FEM simulation of piezoresistive pressure module // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. 2010. Vol. 1(7), N 4. P. 48–51.
17. **Chouaf A., Malhaire C., Le Berre M.** et al. Stress analysis at singular points of micromachined silicon membranes // Sensors and Actuators A. 2000. V. 84. P. 109–115.

УДК 537.5

П. Е. Троян, д-р техн. наук, проф.,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Томский
государственный университет систем управления
и радиоэлектроники" (ТУСУР),
e-mail: p.e.troyan@mail.ru,

В. И. Зеленский, канд. физ.-мат. наук, доц.,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Югорский
государственный университет" (ЮГУ),
e-mail: selenskij@gmail.com

ЭМИССИОННЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ФОРМОВАННЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СИСТЕМ

Поступила в редакцию 04.02.2013

Рассматриваются технология получения тонкопленочной системы металл—диэлектрик—металл и свойства, приобретаемые системой в результате электрической формовки в сильном электрическом поле в вакууме. Обсуждается модель возникающей в результате электрической формовки наноструктуры.

Ключевые слова: технология тонкопленочных систем, система металл—диэлектрик—металл, электрическая формовка, токоперенос, эмиссия, наноструктура, квантовые точки

Тонкопленочная система металл—диэлектрик—металл (МДМ-система) приобретает новые физические свойства (вольтамперная характеристика тока с участком отрицательного дифференциального сопротивления, эмиссия электронов в вакуум) после того, как подвергается электрической формовке в вакууме.

В связи с тем что с течением времени сила тока через МДМ-систему необратимо возрастает, целесообразно применение импульсного режима.

Измерения быстродействия эмиссии электронов из МДМ-системы показывают, что временная задержка импульса тока эмиссии относительно импульса напряжения между электродами не превышает 10 нс.

Важной особенностью импульсного режима является увеличение максимального напряжения между электродами МДМ-системы, в результате чего

существенно расширяется диапазон изменения эмиссионного тока.

Исследования импульсных токов показывают, что импульс тока эмиссии повторяет форму импульса напряжения, приложенного между электродами МДМ-системы, независимо от исходного состояния образца, в то время как параметры импульса тока, протекающего между электродами МДМ-системы, существенно зависят как от предыдущего воздействия на образец, так и от параметров импульса напряжения.

Методом задерживающего потенциала установлено, что функция распределения по энергии электронов, эмитированных в вакуум из МДМ-системы, соответствует функции распределения Максвелла с температурой $(12...14) \cdot 10^3$ К в зависимости от напряжения между электродами.

Многочисленные измерения показывают, что справедливым является следующее соотношение между I_c — силой тока, протекающего через МДМ-систему, и I_0 — силой тока эмиссии в вакуум: $I_0 = \alpha I_c$, где α — коэффициент токопереноса, имеющий значение $10^{-4}...10^{-3}$. В связи с этим целесообразным является изучение причин возникновения и закономерностей протекания тока через МДМ-систему.

На рис. 1 приведена схема образца, используемого в эксперименте. Тонкопленочные элементы МДМ-системы наносятся на торцевую гладкую поверхность металлического стержня (ввода) 1. Электрические контакты к электродам МДМ-системы осуществляются посредством ввода 1 — к нижнему электроду и поверхности внешнего металлического цилиндра 2 — к верхнему тонкому электроду 6. Надежность контакта к тонкой металлической пленке верхнего электрода 6 обеспечивается напылением проводящего слоя металла 7 толщиной 0,5...0,6 мкм. С помощью защитного диэлектрика 4 возможно изготовление МДМ-систем с различной площадью.

При необходимости возможно изготовление нижнего электрода МДМ-системы путем напыления металлического слоя на торец ввода 1.

Электрическая формовка, в результате которой МДМ-система приобретает новые свойства, протекает в локальных участках диэлектрика, примыкающих к микроостриям электрода [1, 2]. При этом для увеличения электрической прочности диэлектрика требуется использование электродов с минимальными микронеровностями, а для осуще-

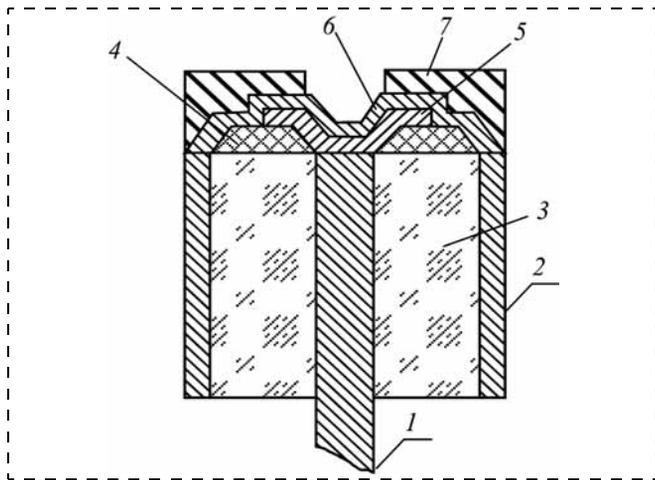


Рис. 1. Конструкция образца с МДМ-системой:

1 — центральный металлический ввод (нижний электрод); 2 — внешний металлический цилиндр; 3 — изолятор; 4 — защитный диэлектрик; 5 — диэлектрический слой; 6 — тонкий металлический слой (верхний электрод); 7 — контакт к верхнему электроду

ствления электрической формовки необходима развитая система микроострий на поверхности электрода.

Эксперименты по электрической формовке МДМ-систем с различными материалами верхнего электрода показали, что наибольшую скорость и степень формовки, определяемую как отношение силы тока в максимуме вольтамперной характеристики $I_{C\text{MAX}}$ к силе тока в минимуме $I_{C\text{MIN}}$ (рис. 2), имеют системы с электродами из Au, Ag, Cu. Существенно медленнее процесс электрической формовки протекает в системах с электродами из Al, Mg, Ba.

Данные ОЖЕ-спектроскопии указывают, что при напылении металлического электрода атомы металла могут в различной степени проникать в пленку диэлектрика. В системах Mo—SiO₂—Mo в пленке диэлектрика присутствует до 10 % атомов

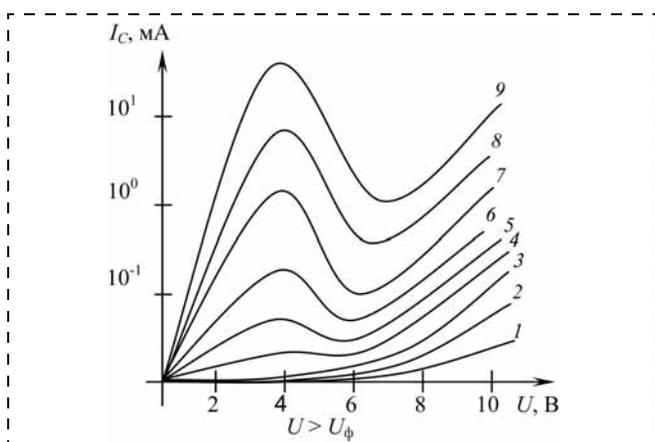


Рис. 2. ВАХ МДМ-системы Mo—Si_xN_yO_z—Al при последовательных циклах измерения

молибдена, тогда как в системе Mo—SiO₂—In доля атомов индия не превышает 2—3 % в объеме диэлектрика и достигает 30 % вблизи границы верхний электрод—диэлектрик.

Для оптимального осуществления электрической формовки следует использовать в качестве верхнего электрода МДМ-системы тонкую пленку из алюминия, полученную методом термического испарения в вакууме при температуре подложки 550...600 К, и диэлектрическую пленку на основе оксинитрида кремния толщиной 50...80 нм, полученную методом ионно-реактивного распыления.

Общие закономерности электрической формовки проявляются в том, что при приложении напряжения $U \geq U_{\phi} \approx 4$ В между электродами МДМ-системы, находящейся в вакууме при давлении $p \leq 10^{-2}$ мм рт. ст., через некоторое время (1—3 мин) возникает и интенсивно возрастает с течением времени ток, протекающий через образец. Окончанием электрической формовки можно считать момент, когда ток через МДМ-систему приобретает тенденцию к медленному возрастанию с течением времени.

Изменения вольтамперной характеристики тока I_C через МДМ-систему в процессе электрической формовки приведены на рис. 2.

В результате электрической формовки на поверхности верхнего электрода МДМ-системы образуются светящиеся точки, число и параметры которых изменяются с течением времени. Экспериментально доказано, что области свечения совпадают с центрами эмиссии в вакуум, что дает возможность по картине свечения оценивать распределение эмиссионных центров МДМ-системы.

Электронно-микроскопические исследования показали наличие на поверхности МДМ-системы образований двух типов, которые существенно отличаются друг от друга [3]: каналов пробоя и формованных каналов. Каналы пробоя на поверхности электрода имеют диаметр 1...20 мкм, в то время как диаметр формованных каналов — 0,01...0,05 мкм. Поверхностная плотность составляет $10^2...10^3$ см⁻² для каналов пробоя и $10^2...10^7$ см⁻² для формованных каналов.

Исследования МДМ-систем, выполненные методом электронно-зондового рентгеновского микроанализа (рис. 3), показывают на существенное уменьшение концентрации материала верхнего электрода (с 35 до 13 %) в области формованного канала и увеличение концентрации несвязанного кремния (с 42 до 84 %).

На основании экспериментальных данных и оценок предлагается следующая модель изменения структуры элементов МДМ-системы в процессе электрической формовки.

На первом этапе электрической формовки происходит эмиссия электронов из микроострий отрицательного электрода по механизму Фаулера—

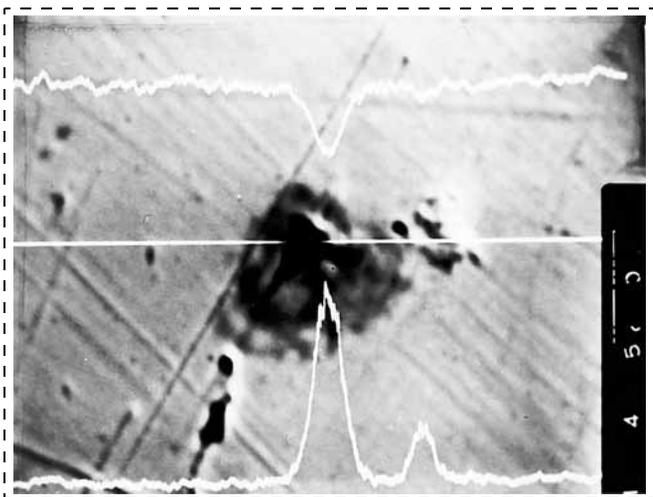


Рис. 3. Фотография МДМ-системы $\text{Mo-Si}_x\text{O}_y\text{N}_z\text{-Al}$ и линии анализа содержания алюминия (вверху) и кремния (внизу) в области формованного канала

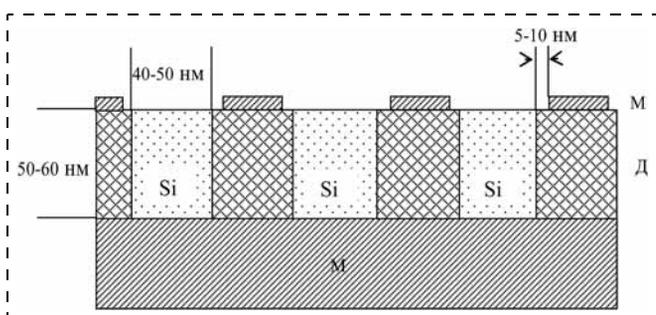


Рис. 4. Наноструктура МДМ-системы в результате электрической формовки

Нордгейма. В результате взаимодействия электронов, ускоренных в сильном электрическом поле [4, 5], с атомами диэлектрика происходит образование дефектов вследствие разрыва ослабленных или деформированных связей Si-O , Si-H , Si-OH . Несвязанные атомы кремния приобретают положительный заряд и усиливают локальную напряженность электрического поля, что приводит к увеличению силы тока через диэлектрический слой. Длительность данного этапа достигает нескольких минут.

С ростом концентрации дефектов в диэлектрике начинается второй этап электрической формовки. При этом на локальных участках за время $10^{-8} \dots 10^{-6}$ с

происходит резкое возрастание плотности тока и осуществляется плавление и испарение фрагментов металлической пленки электрода с образованием микроотверстий над формованными каналами.

Третий этап электрической формовки заключается в процессе адсорбции газов остаточной атмосферы в область формованных каналов. Адсорбция молекул воды и углеводородов способствует росту проводимости и качественному изменению вольт-амперной характеристики тока через МДМ-систему.

Процесс электрической формовки МДМ-системы сопровождается самоорганизацией пространственной наноструктуры материала [6]. В результате электрической формовки в МДМ-системе происходит образование наноструктуры, схематично представленной на рис. 4. При этом можно предположить, что в области формованных каналов образуются квантовые точки на основе кремния, атомов материала верхнего электрода и адсорбированных газов остаточной атмосферы.

Такие свойства МДМ-системы, как эмиссия электронов в вакуум, электролюминесценция с длиной волны излучения 480 нм определяются в первую очередь свойствами квантовых точек и нанозора между квантовыми точками (Si) и участком верхнего электрода (M) в условиях сильного электрического поля, напряженность которого составляет $10^8 \dots 10^9$ В/м при напряжении 10...15 В между электродами МДМ-системы.

Список литературы

1. Галанский В. Л., Троян П. Е., Янкевич Ю. Б. О природе электрической формовки тонкопленочного холодного катода // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22, № 6. С. 1302–1304.
2. Biederman H. Emission patterns at various conditions of imaging the electron emission of Al-LiF-Au structures // Phys. Stat. Sol. (a). 1976. V. 36, N 2. P. 783–789.
3. Гуляев П. Ю., Зеленский В. И., Сахаров Ю. В., Троян П. Е. Контроль формовки МДМ-структур нанoeлектроники в сильных электрических полях // Ползуновский вестник. 2010. № 2. С. 68–71.
4. Баранов А. В., Троян Л. А. Механизм электропроводности в структурах $\text{Al-Si}_3\text{N}_4\text{-Al}$ // Изв. вузов. Физика. 1973. № 10. С. 20–24.
5. Баранов А. В., Троян Л. А. Влияние пространственного заряда на электропроводность структур $\text{Al-Si}_3\text{N}_4\text{-Al}$ // Изв. вузов. Физика. 1973. № 5. С. 151–153.
6. Валиев К. А., Мордвинцев В. М., Левин В. Л. Электроформовка как процесс самоорганизации нанометрового зазора в углеродистой среде // ЖТФ. 1997. Т. 67, № 11. С. 39–44.

Д. В. Вагин, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
e-mail: serkasat@ipu.ru,

С. И. Касаткин, д-р техн. наук, зав. лаб.,
ИПУ РАН,

В. В. Амеличев, канд. техн. наук, нач. отдела
ИПУ РАН, НПК "Технологический центр",
ст. науч. сотр. МИЭТ,

Д. В. Костюк, нач. лаб. НПК "Технологический
центр", аспирант МИЭТ,
e-mail: D.Kostyuk@tcen.ru,

П. А. Беляков, мл. науч. сотр. НПК
"Технологический центр", аспирант ГУП НПЦ
"СПУРТ"

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПИН-ВЕНТИЛЬНЫХ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ НАНОСТРУКТУР

Поступила в редакцию 25.01.2013

Представлены результаты анализа высокочастотных свойств спин-вентильных магниторезистивных (СВМР) наноструктур на основе уравнения Ландау—Лифшица—Гильберта для трехслойной полоски ($\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}/\text{Cu}/\text{Fe}_{18}\text{Ni}_{76}\text{Co}_6$). Приведено сравнение высокочастотных свойств СВМР наноструктур с высокочастотными свойствами анизотропных магниторезистивных наноструктур. Представлены результаты исследований частотных характеристик наноструктуры $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}/\text{Cu}/\text{Fe}_{18}\text{Ni}_{76}\text{Co}_6$ с разными геометрическими размерами сформированных полосок. Предложена конструкция СВМР датчика магнитного поля на основе исследованных наноструктур.

Ключевые слова: спин-вентильная магниторезистивная наноструктура, преобразователь магнитного поля, высокочастотные свойства

В настоящее время учеными развитых стран активно ведутся исследования и разработки магниторезистивных (МР) чувствительных элементов на основе металлических многослойных магнитных наноструктур, обладающих спин-вентильным магниторезистивным (СВМР) эффектом. Достоинствами этих чувствительных элементов являются большая величина МР эффекта, высокое быстродействие, радиационная стойкость. Некоторыми ведущими производителями выпускаются СВМР преобразователи магнитного поля и тока, гальванические развязки, головки считывания для магнитных дисков и лент. Кроме того, ведутся разработки биосенсорных устройств, запоминающих и логических элементов и спиновых транзисторов как с планарным, так и вертикальным протеканием сенсорного тока [1–3].

СВМР преобразователи магнитного поля и тока представляют собой, как правило, мостовую схему, каждое плечо которой составлено из многослой-

ных полосок, соединенных последовательно низкорезистивными немагнитными перемычками. При этом верхний слой изготавливается из сплава $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$, имеющего высокое поле перемagnичивания и намагниченность насыщения и выполняющего функцию "фиксированного слоя". В рабочем диапазоне магнитного поля его вектор намагниченности остается практически неподвижным. Для нижнего "свободного" слоя, напротив, используют низкоанизотропный материал ($\text{Fe}_{18}\text{Ni}_{76}\text{Co}_6$), чтобы его вектор намагниченности мог вращаться при внешнем воздействии магнитного поля. Материал, разделяющий верхний и нижний слои, представляет собой тонкую пленку из немагнитного материала Cu . Толщина магнитных слоев составляет 10 нм, толщина немагнитной медной прослойки — 3 нм. При таких толщинах, как было установлено в работах [4–6], прецессионное движение практически полностью вырождается во вращательное. Сверху, над изолирующими покрытиями, могут быть сформированы один или два планарных проводника для коррекции вольт-эрседных характеристик (ВЭХ). Вид ВЭХ $V(H) = I\Delta R(H)$, где I — ток в полоске, $\Delta R(H)$ — изменение магнитосопротивления полоски, определяется структурой СВМР полосок, их расположением в мостовой схеме и конфигурацией проводников управления. Для СВМР эффекта $\Delta R \sim \cos\varphi$, где φ — угол между векторами намагниченности "фиксированного" и "свободного" слоев.

В рамках теории Ландау—Лифшица—Гильберта (ЛЛГ) поведение вектора намагниченности определяется следующим уравнением [4, 5]:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma \left[\mathbf{M} \frac{\delta W}{\delta \mathbf{M}} \right] + \alpha \frac{[\mathbf{M} \dot{\mathbf{M}}]}{M},$$

где W — полная магнитная энергия системы; \mathbf{M} — вектор намагниченности; α — параметр рассеяния (диссипации). Рассмотрим однородно намагниченную частицу произвольной формы при наличии в ней одноосной магнитной анизотропии, находящейся под воздействием внешнего магнитного поля, имеющего как переменную, так и постоянную составляющие. Направим декартовы оси координат вдоль главных осей тензора размагничивающих коэффициентов исследуемой частицы.

Ограниченные размеры частицы приводят к возникновению дополнительного слагаемого в магнитной энергии, которая в случае однородно намагниченной частицы выражается через размагничивающие коэффициенты: N_x , N_y , N_z . Таким образом, плотность магнитной энергии в полярной системе координат можно записать в виде

$$w = -(\mathbf{M}\mathbf{H}_0) + K\sin^2\Theta + 2\pi M^2(N_z\cos^2(\Theta) + N_x\sin^2(\Theta)\cos^2(\varphi) + N_y\sin^2(\Theta)\sin^2(\varphi)),$$

где $K > 0$ — константа анизотропии.

Тогда из предыдущего уравнения для сферических координат Θ и φ вектора намагниченности \mathbf{M}

можно получить следующую систему дифференциальных уравнений [4, 5]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\Theta}{d\tau} &= p_y \cos\varphi - \alpha p_z \sin\tau \sin\Theta + \alpha p_y \cos\Theta \sin\varphi - \\ &- p_K \sin\Theta \cos\Theta - p_m((N_y - N_x) \sin\Theta \sin(2\varphi) + \\ &+ \alpha \sin\Theta \cos\Theta \{3(N_y + N_x) - 2 + (N_x - N_y) \cos(2\varphi)\}); \\ \frac{d\varphi}{d\tau} &= \frac{1}{\sin\Theta} (p_z \sin\tau \sin\Theta - p_y \sin\varphi \cos\Theta + \\ &+ p_K \cos\Theta \sin\Theta + \alpha p_y \cos\varphi - \\ &- p_m(\alpha(N_y - N_x) \sin\Theta \sin(2\varphi) + \sin\Theta \cos\Theta \times \\ &\times \{3(N_y + N_x) - 2 + (N_x - N_y) \cos(2\varphi)\})), \end{aligned} \right.$$

где управляющие параметры определены следующим образом:

$$p_y = \frac{1}{1 + \alpha^2} \frac{\gamma H_y}{\omega}, \quad p_z = \frac{1}{1 + \alpha^2} \frac{\gamma H_z}{\omega}, \\ p_K = \frac{1}{1 + \alpha^2} \frac{2\gamma K}{\omega M}, \quad p_m = \frac{1}{1 + \alpha^2} \frac{2\pi\gamma M}{\omega}, \quad \tau = \omega t.$$

До сих пор основное внимание уделялось исследованию частотных свойств ферромагнитных полосок, намагниченных вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН), направленной вдоль длины полоски [4]. При этом надо подавать достаточно большое H_0 и это случай не максимальной чувствительности и минимального гистерезиса. Линейность, минимальный гистерезис и максимальная чувствительность в анизотропных магниторезистивных (АМР) датчиках достигаются при подаче измеряемого магнитного поля поперек длины полоски и когда вектор намагниченности направлен под углом 45° относительно ОЛН [4–6]. В случае СВМР структуры наиболее перспективной представляется топология, при которой верхний слой $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}$ намагничен перпендикулярно ОЛН нижнего слоя $\text{Fe}_{18}\text{Ni}_{76}\text{Co}_6$.

Корректность работы используемого расчетного алгоритма для уравнения ЛЛГ во внешнем высокочастотном поле уже была подтверждена в работах [7, 8] при сравнении с результатами аналитического подхода в линейном случае и результатами экспериментов.

Рассмотрим частотные характеристики трехслойных СВМР полосок $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}/\text{Cu}/\text{Fe}_{18}\text{Ni}_{76}\text{Co}_6$ с различными параметрами при малом внешнем переменном поле $h = 0,01 \text{ Э}$ ($h \ll H_K$ — поле анизотропии) для случая, когда h перпендикулярно H_K . Ток через полоску задается 1 мА. Коэффициент затухания Гильберта $\alpha = 0,01$. Исследования проводились при постоянных магнитных полях, много меньших $4\pi M_s$, где M_s — намагниченность насыщения, что исключает возникновение спиновых волн [9].

Вначале были проанализированы свойства структуры $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}/\text{Cu}/\text{Fe}_{18}\text{Ni}_{76}\text{Co}_6$ при измене-

нии ее длины при воздействии переменного магнитного поля $h = 0,01 \text{ Э}$, направленного поперек длины полосок, с величиной СВМР эффекта 7 % $M_s(\text{Fe}_{18}\text{Ni}_{76}\text{Co}_6) = 875 \text{ мТл}$, $H_K = 10 \text{ Э}$, ось анизотропии направлена вдоль длины полоски, $M_s(\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}) = 225 \text{ мТл}$. Для обеспечения оптимальных параметров было использовано постоянное магнитное поле "фиксирующего" слоя, направленное поперек длины полоски. На рис. 1 приведены частотные характеристики трехслойной СВМР структуры с толщинами ферромагнитных пленок 10 нм и толщиной немагнитной медной прослойки 3 нм для разной длины полосок. Из рис. 1 видно, что характеристики представляют собой пики на частотах в несколько гигагерц, при этом, в отличие от случая АМР полосок [6], нет необходимости прикладывать дополнительное постоянное магнитное поле благодаря наличию верхнего "фиксирующего" слоя.

Большой практический интерес представляет зависимость частотной характеристики СВМР структуры от ее ширины. Это объясняется технологической простотой изготовления полосок с переменной шириной и длиной. Наличие такой зависимости позволит разрабатывать СВМР наноземельные с заданной, в определенных пределах, частотной характеристикой. На рис. 2 приведены зависимости выходного сигнала СВМР наноструктуры от частоты внешнего магнитного поля для отношения ширины полосок к длине 50:7 мкм (штриховая линия), 200:28 мкм (пунктирная линия), 100:14 мкм (сплошная линия).

Из рис. 2 видно, что существует сильная зависимость частотной характеристики СВМР структуры от ее ширины. С уменьшением ширины полосок пик частотной характеристики f_0 сдвигается в область более высоких частот (1,25, 1,7 и 2,3 ГГц для ширины полоски 28, 14 и 7 мкм соответственно). Увеличение значения f_0 и уменьшение амплитуды пиков с уменьшением ширины ферромагнитной пленки объясняется увеличением магнитных раз-

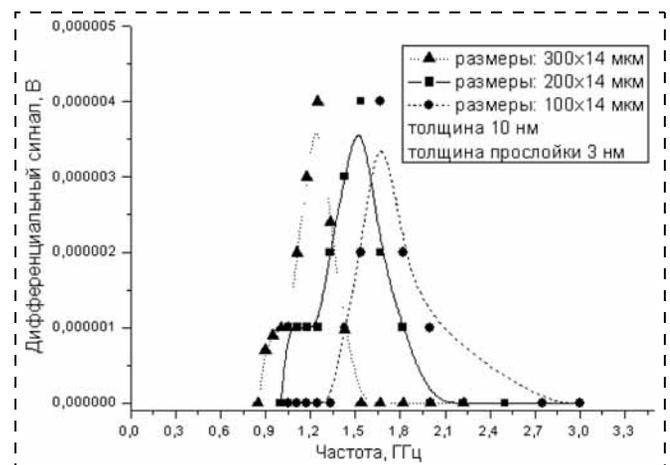


Рис. 1. Частотные характеристики трехслойной СВМР структуры с толщинами ферромагнитных пленок 10 нм и толщиной немагнитной прослойки 3 нм для разной длины полосок

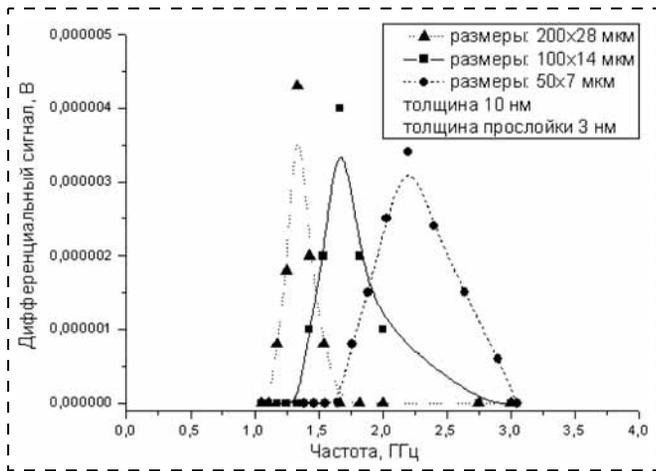


Рис. 2. Частотные характеристики СВМР полосок с различными геометрическими размерами

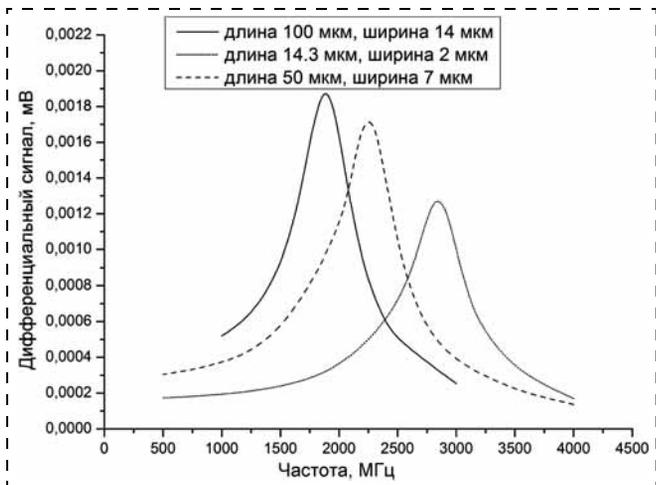


Рис. 3. Частотные характеристики АМР полосок с различными геометрическими размерами

магнитных полей на краях полоски в соответствии с уменьшением чувствительности полоски.

При сравнении частотных характеристик СВМР и АМР полосок (рис. 2 и рис. 3 соответственно), можно заметить, что при использовании спин-вентильных структур сигнал увеличивается, а частотный диапазон остается тем же. Кроме того, при размерах 14×2 мкм и толщине 10 нм дифференциальный сигнал СВМР (в отличие от АМР) вообще отсутствует. Это происходит вследствие увеличения постоянной составляющей поля "фиксирования" слоя при уменьшении ширины элемента (так как "фиксированный" слой намагничен ортогонально намагнитности длинной стороны). Это увеличение выводит элемент из максимума чувствительности (наклон вектора намагнитности нижней пленки 45°), и сигнал перестает детектироваться. Для таких малых размеров следует увеличивать толщину "свободных" пленок, чтобы уменьшить влияние поля "фиксированного" слоя, или уменьшить саму намагнитность "фиксированного" слоя за счет применения другого материала.

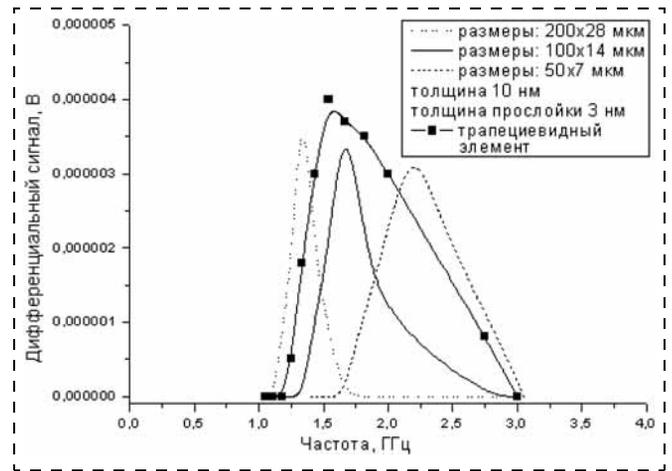


Рис. 4. Частотные характеристики СВМР полосок трапециевидной формы

К недостатку полученных частотных характеристик следует отнести узкую полосу в области экстремумов частотной кривой. С точки зрения практического применения это означает, что такой элемент будет работоспособен только в узком диапазоне частот. Чтобы улучшить технические характеристики такого элемента, можно использовать трапециевидную форму чувствительного элемента вместо прямоугольной формы [10].

Технологически можно изготовить наноэлемент из СВМР трехслойных полосок различной длины и ширины, но с одним углом наклона ОЛН ферромагнитной пленки относительно длины полоски (или, как предельный случай, — элемент трапециевидной формы). Результаты расчетов трапециевидных элементов приведены на рис. 4, из которого следует, что элемент трапециевидной формы, в отличие от элемента в форме прямоугольной полоски, позволяет получить пологую частотную характеристику в более широком диапазоне частот. Расширение частотной характеристики в обе стороны можно достичь, изменяя суммарное магнитное поле, действующее на вектор намагнитности пленки за счет варьирования топологии полоски, магнитного сплава, режима напыления ферромагнитной пленки, используя дополнительные магнитомягкие пленки.

Заключение

Таким образом, теоретический анализ показал наличие у СВМР наноструктур высокочастотных свойств, зависящих от топологии наноэлементов. При этом форма амплитудно-частотной характеристики полоски в определенных пределах может подбираться под заранее заданную частотную характеристику путем формирования на подложке СВМР наноструктур с определенной топологией. Увеличение верхней границы частотного диапазона СВМР наноструктур возможно при использовании в качестве фиксирующего слоя антиферромагнитных слоев FeMn или IrMn, обладающих повышенным полем магнитной анизотропии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007—2013 годы", государственный контракт № 16.513.11.3140 от 22 мая 2012 г., а также гранта РФФИ № 12-08-31451.

Список литературы

1. Касаткин С. И., Васильева Н. П., Муравьев А. М. Спинтронные магниторезистивные элементы и приборы на их основе. М.: Электронсервис, 2005. 180 с.
2. Амеличев В. В., Гамарц И. А., Галушков А. И. и др. Анизотропные магниторезистивные датчики магнитного поля и тока // Автоматика и телемеханика. 2009. № 6. С.155—167.
3. Касаткин С. И., Васильева С. И., Муравьев А. М. Биосенсоры на основе тонкопленочных магниторезистивных датчиков // Автоматика и телемеханика. 2010. № 1. С. 164—176.
4. Vagin D. V., Polyakov O. P. Control of chaotic and deterministic magnetization dynamics regimes by means of sample shape varying // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105(3). P. 033914.

5. Vagin D. V., Polyakov O. P. Effect of sample shape on nonlinear magnetization dynamics under an external magnetic field // J. Magn. Magn. Mater. 2008. Vol. 320. P. 3394.

6. Вагин Д. В., Касаткин С. И., Поляков О. П. Частотные характеристики однослойных анизотропных чувствительных наноэлементов // Автоматика и телемеханика. 2008. № 10. С. 168.

7. Kuang B., Camley R. E., Celinski Z. Effect of Shape Anisotropy on Stop-Bond Response of Fe and Permalloy Based Tunable Microstrip Filter // IEEE Trans. Magn. 2004. Vol. 40. N 4. P. 2841—2843.

8. Дягилев В. В., Касаткин С. И., Муравьев А. М., Резнев А. А., Сауров А. Н. Однослойный анизотропный магниторезистивный датчик с наклонными полосками // Микроэлектроника. 2007. № 2. С. 87—103.

9. Gubbiotti G., Carlotti G., Ona T., Roussigne Y. High frequency magnetic excitations in patterned NiFe/Cu/FeNi trilayered stripes subjected to a transverse magnetic field // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100. P. 023096-1.

10. Касаткин С. И., Вагин Д. В. Высокочастотный магнито-чувствительный наноэлемент // Патент РФ № 1433422.2011.

УДК 539.23.21:548.527

В. А. Галперин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
П. К. Кондратьев, мл. науч. сотр.,
Д. Н. Зубов, мл. науч. сотр.,
Е. А. Кельм, мл. науч. сотр.,
А. А. Павлов, канд. техн. наук, науч. сотр.,
Институт нанотехнологий микроэлектроники
РАН, Москва
e-mail: RiverIslander@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ МЕДИ В МАССИВЫ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Поступила в редакцию 22.01.2013

Описаны результаты исследований по электрохимическому осаждению меди в различные конфигурации массивов углеродных нанотрубок. Рассмотрены традиционные методы с использованием растворов CuSO_4 и CuCl_2 в качестве электролитов; выявлены их недостатки. Предложена новая методика с применением раствора электролита в виде метанолюно-глицератного комплекса меди и проведен анализ влияния его концентрации на структуру синтезируемого материала.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, УНТ, электрохимическое осаждение меди, метанолюно-глицератный комплекс, нанокompозиты УНТ/медь, межсоединения ИС, металлизация, 3D ИС

Введение

В настоящий момент медь является основным материалом, используемым для создания межсоединений современных ИС (как горизонтальных, так и вертикальных (TSV)), а также в качестве основы столбиковых контактных выводов (*bumps*) при создании 3D-сборок [1].

С увеличением степени интеграции происходит уменьшение топологического размера, что приводит к повышению плотности тока и удельного сопротивления проводников, усилению процессов электро- и термомиграции, снижению механической прочности элементов межсоединений, т. е. в целом негативно сказывается на надежности и сроке службы ИС. При рассмотрении 3D-структур данные недостатки проявляются еще заметнее в связи с увеличением концентрации источников тепловыделения в условиях ограниченного объема. Дополнительной проблемой является то, что медь имеет с кремнием различные коэффициенты теплового расширения, а это также пагубно сказывается на надежности ИС. В задачах передачи высокочастотных сигналов медные межсоединения также имеют ряд недостатков.

По этим причинам ведется поиск новых материалов для создания межсоединений ИС. В том числе рассматриваются композиционные материалы на основе углеродных нанотрубок и меди [2—5, 9].

Нанокompозиты представляют собой материалы со специфическими свойствами, получаемые упорядочением компонентов в нанометровом масштабе. Углеродные нанотрубки (УНТ) являются в данном случае многообещающим компонентом ввиду их небольшого диаметра, оптимальных механических, термических и электрических характеристик.

Возможны два метода получения нанокompозиционных материалов с использованием УНТ. Первый метод представляет собой одновременное осаждение компонентов с низкой концентрацией случайно ориентированных УНТ. Второй метод — выращивание массивов УНТ с последующим осаждением в них металла [6]. В данной работе приведены результаты исследований композитов, получаемых вторым методом.

Методики подготовки образцов

В работе исследовано осаждение меди на образцы с массивами УНТ в виде сетки проводников и в виде бампов. Образцы с УНТ получают осаждением атомов углерода на подготовленную кремниевую подложку с нанесенным катализатором FeNiCo_6 методами термического химико-парового осаждения (TCVD) либо плазмотимულიрованного осаждения из газовой фазы (PECVD). Также были исследованы образцы с массивами, выращенными данными методами на Al-металлизации. Для увеличения скорости роста массивов использовали преобработку в виде окислительных отжигов. Вариант массивов УНТ на Al-металлизации представлен на рис. 1.

Эксперименты проводили также с массивами, представляющими собой УНТ-бампы (рис. 2). Конструкции, получаемые в этом случае, можно применять для создания 3D-сборок ИС.

Для повышения плотности пучков УНТ в работе использовали уплотнение массивов путем помещения образцов в этиловый спирт с последующей сушкой. Данная операция позволяет оптимизировать геометрическую форму пучков УНТ, а также повышает их плотность.

Метод электрохимического осаждения меди

Метод электрохимического осаждения основан на электролизе — совокупности окислительно-восстановительных процессов, протекающих на электродах, помещенных в раствор электролита, под действием электрического тока, приложенного от внешнего источника. В работе использована стандартная электрохимическая ячейка с источником на постоянном токе (рис. 3).

Основу конструкции представляет схема, где на катод (пластину) подается отрицательный потенциал с источника питания, на анод — положительный потенциал, в результате формируется замкнутая цепь через раствор.

Традиционно в качестве электролита для осаждения меди используется водный раствор CuSO_4 с серной кислотой [7, 8]. Однако у данного электролита есть несколько недостатков. Во-первых, серная кислота может повредить нижние слои металлизации. Во-вторых, данный раствор недостаточно хорошо смачивает поверхность кремния, что сказывается на равномерности осаждения. Для устране-

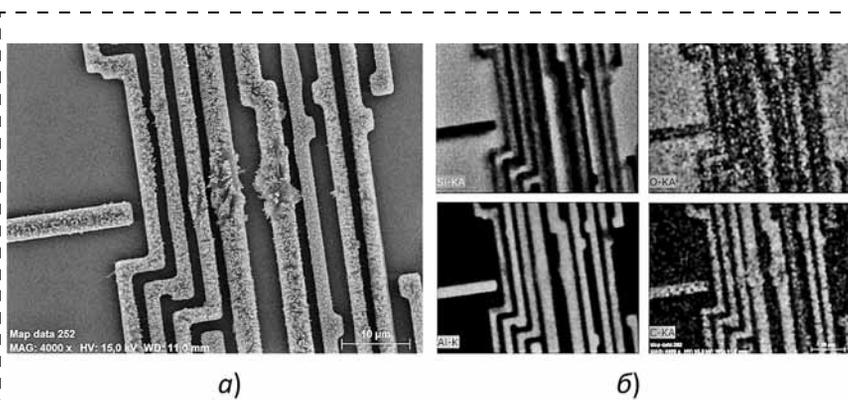


Рис. 1. Образец с массивами УНТ на Al-металлизации:

а — СЭМ-изображение; б — карта распределения химических элементов

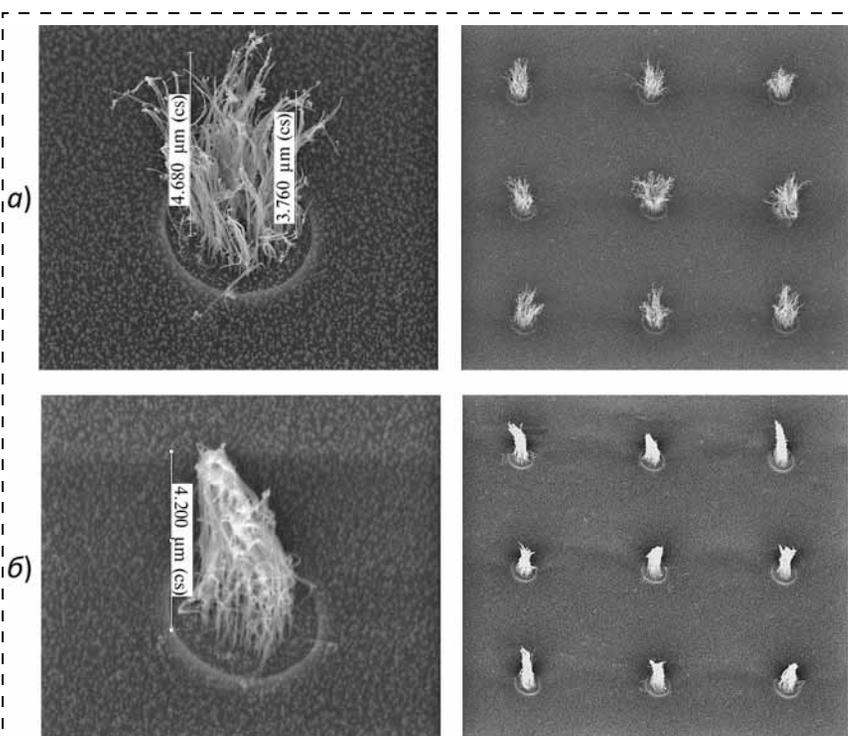


Рис. 2. Образец с массивами УНТ в виде бампов:

а — до уплотнения; б — после уплотнения

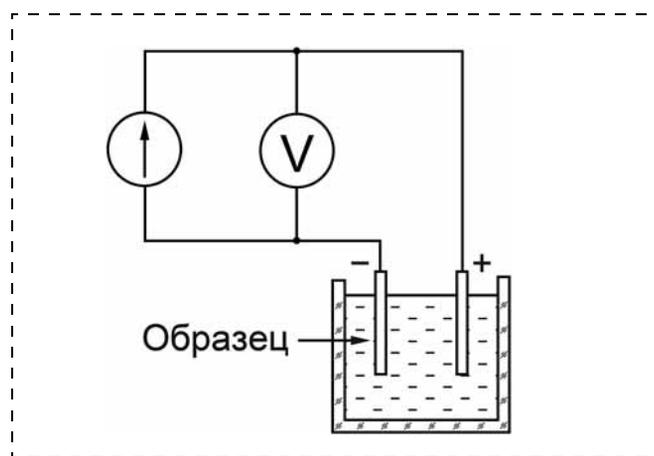


Рис. 3. Электрохимическая ячейка

ния этих недостатков было предложено использовать осаждение меди из раствора хлорида меди в метаноле.

Методика осаждения из раствора хлорида меди в метаноле

Первоначально использовали раствор хлорида меди (II) в метаноле (с концентрацией 12 %). Пластины с углеродными нанотрубками, подключенные к катоду с помощью серебряного клея, опускали в раствор. В качестве анода использовали медный электрод. Регулирование силы тока осуществлялось источником питания в диапазоне от 0,5 до 35 мА. Время осаждения составляло 1...4 мин.

В процессе работы выяснилось, что для осаждения меди на образцы с большой площадью массивов УНТ требуются большие значения силы тока (от 35 мА). После электролиза образцы промывали в метаноле и сушили. Часть образцов, помимо этого, подвергали кратковременной (1 мин) обработке раствором аммиака (25 %).

При электролизе данного раствора на катоде (кремниевая пластина) происходит выделение меди, однако она очень сильно загрязнена монохлоридом (рис. 4). Это связано с тем, что в метанольном растворе хлорид меди (II) окисляет медь до монохлорида:



Решением этой проблемы может служить либо увеличение плотности тока при электролизе, с последующей отмыжкой от примеси одновалентного хлорида в растворе аммиака, либо введение в раствор комплексообразующей добавки, которая изменяет потенциалы окислительно-восстановительных полуреакций и тем самым предотвращает окисление меди. Способ увеличения плотности тока наиболее прост, однако отрицательной стороной этого способа является сильная неравномер-

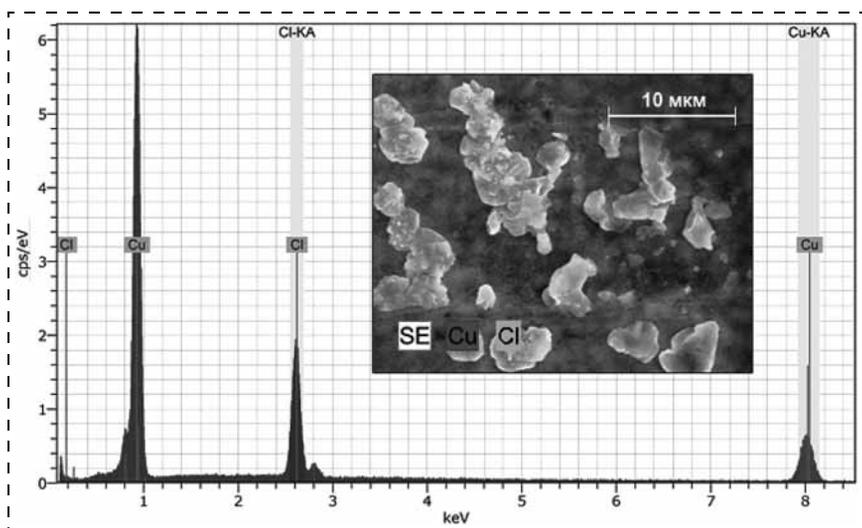


Рис. 4. Иллюстрация "паразитного" окисления меди до монохлорида при осаждении из хлорида меди (II): спектрограмма и поверхностное распределение химических элементов

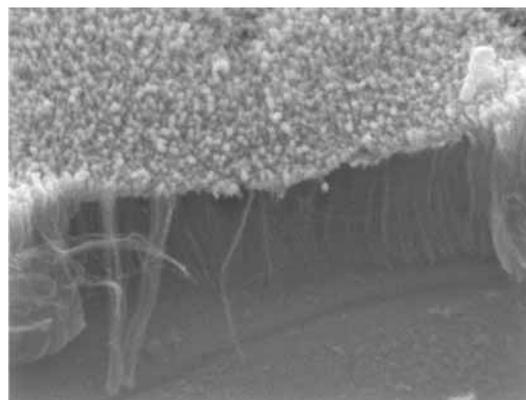


Рис. 5. Образец с медью, осажденной исключительно на поверхность массива УНТ

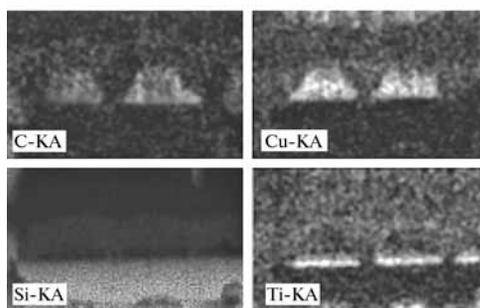
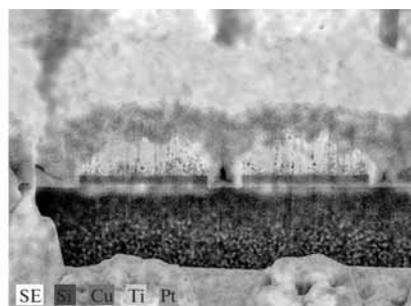


Рис. 6. Кросс-секция с картой распределения химических элементов на примере образца с медью, осажденной внутрь массивов УНТ из глициратного комплекса

ность процесса осаждения меди (в виде отдельных кристаллов и друз).

Также выяснилось, что осаждение из раствора хлорида меди (II) идет преимущественно на поверхности пучков нанотрубок (рис. 5).

Осаждение меди из глициратного комплекса

Для реализации задачи осаждения меди вглубь массивов УНТ было смешано 13 мл 12 %-ного раствора хлорида меди (II) в метаноле с 22 мл глицерина. Далее этот раствор доводили до объема в 40 мл и при нагревании и перемешивании добавляли твердый гидроксид натрия

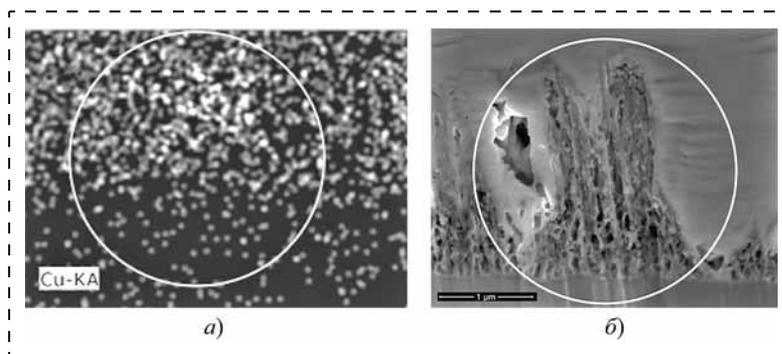


Рис. 7. Результат осаждения меди при концентрации глицератного комплекса 0,25 М:
a — карта распределения химического элемента; *б* — изображение кросс-секции в электронном микроскопе

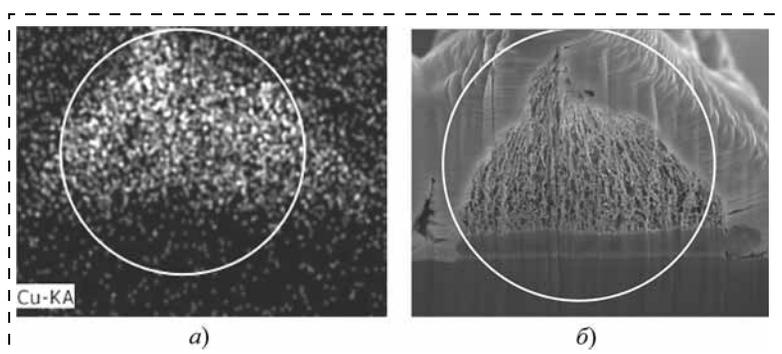


Рис. 8. Результат осаждения меди при концентрации глицератного комплекса 0,063 М:
a — карта распределения химического элемента; *б* — изображение кросс-секции в электронном микроскопе

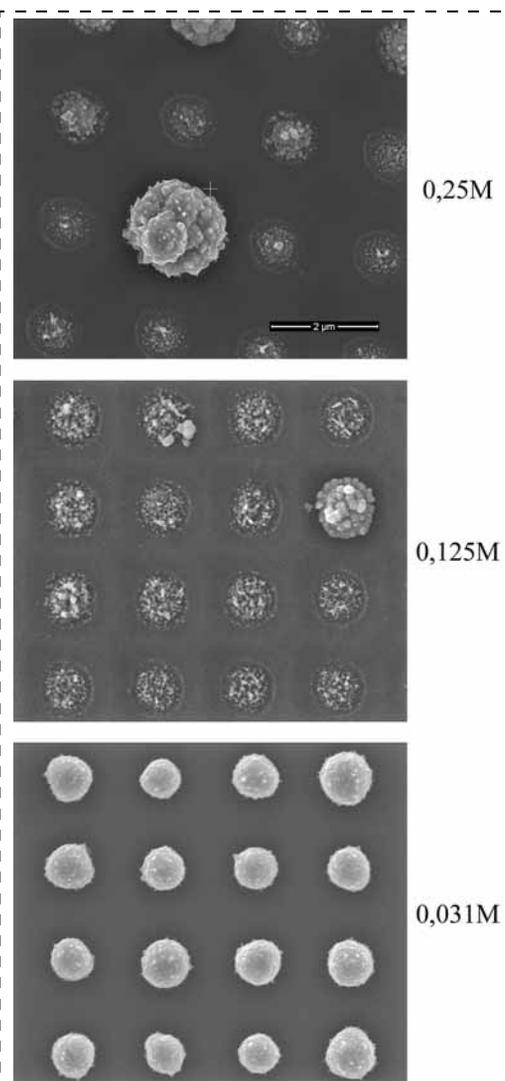
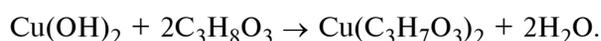
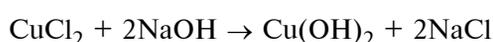


Рис. 9. Влияние концентрации глицератного комплекса на равномерность осаждения на УНТ-бампы (вид сверху)

до насыщения. Таким образом, путем следующих реакций был получен раствор, содержащий глицератный комплекс меди:



Осаждение меди из этого раствора на образец со структурами в виде шин происходило при силе тока 0,5 мА в течение 5 мин. В результате наблюдалось улучшение равномерности проникновения меди вглубь массивов УНТ (рис. 6).

Было выяснено, что равномерность и глубина осаждения меди также зависят от концентрации глицератного комплекса меди. Исследования проводили с концентрациями от 0,25 до 0,031 моль/л. На рис. 7, *a* видно, что концентрация меди в верхней части массива выше, чем в нижней части. В то время как рис. 8, *a* иллюстрирует глубокое и равномерное осаждение меди внутри массива УНТ.

Аналогичный результат наблюдается и при осаждении меди вглубь матрицы массивов УНТ в виде бампов (рис. 9). Равномерность осаждения при концентрации 0,031 М оптимальна.

Заключение

В результате экспериментов выяснено, что оптимальным раствором электролита для осаждения меди в массивы углеродных нанотрубок при создании межсоединений ИС является метанольно-глицератный комплекс меди.

Перевод меди в глицератный комплекс позволяет смещать значения потенциалов полуреакций и предотвращает повторное окисление осажденной меди до монохлорида. Кроме того, наличие избытка глицерина (для лучшего растворения глицерата меди в метаноле) повышает вязкость раствора и способствует более равномерному осаждению меди. В результате получается медь без примесей и имеется возможность выбора режима осаждения, в том числе при малых плотностях тока. Осаждение меди на катоде (кремниевая пластина) идет в виде равномерной пленки с размером зерна около 100 нм.

Для данного случая побочным процессом, идущим на катоде, является выделение водорода за счет наличия в растворе некоторого избытка щелочи. Данный побочный процесс особенно заме-

тен при высоких разностях потенциалов катода и анода (более 7 В) и при длительном осаждении.

Оптимальной концентрацией глицератного комплекса для осаждения меди в массивы УНТ является 0,063...0,031 М.

Список литературы

1. Uhlig A. Electroplating aspects in 3D IC Technology // Atotech @ Sematech Workshop. San Diego. Ca. 2008.
2. Cho G. S., Jang H., Lim J. K. et al. Decoration of carbon nanotubes with copper particles by metal displacement reaction // Proc. of the 18th international conference on composite materials, ICC Jeju, Korea, august 2011.
3. Cho G. S., Lim J. K., Jang H. et al. Cu particles deposition onto MWCNTs by chemical reaction // Materials science forum. Switzerland. Trans Tech Publications. 2011. Vol. 695. P. 211–214.

4. Martínez-Hernández A. L., Velasco-Santos C., Castaño V. M. Carbon Nanotubes Composites: Processing, Grafting and Mechanical and Thermal Properties // Current Nanoscience. Bentham Science Publishers Ltd. 2010. N 6. P. 12–39.

5. Deng M., Ding G., Wang Y. et al. MEMS-based carbon nanotube and carbon nanofiber Cu micro special electric contact // Journal of Micromechanics and Microengineering. IOP Publishing Ltd. UK. 2009. N 19.

6. Chai Y., Zhang K., Zhang M. et al. Carbon Nanotube/Copper Composites for Via Filling and Thermal Management // Proc. of Electronic Components and Technology Conference, 2007.

7. Diasio M. Electrodeposition of metals onto aligned carbon nanotube microstructures // NNIN REU Research Accomplishments. USA. 2011. P. 190–191.

8. Ji C., Oskam G., Searson P. C. Electrodeposition of Copper on Silicon from Sulfate Solution // Journal of the Electrochemical Society. 2001. N 148. P. 746–752.

9. Chai Y., Chan Philip C. H. High Electromigration-Resistant Copper/Carbon Nanotube Composite for Interconnect Application // Hong Kong University of Science and Technology. Hong Kong. 2009.

УДК 538.915, 541.67

А. В. Тучин, аспирант,
Л. А. Битюцкая, канд. хим. наук, доц.,
Е. Н. Бормонтов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Воронежский государственный университет,
e-mail: mel44@phys.vsu.ru, a.tuchin@bk.ru

ЭФФЕКТ ШТАРКА В ФУЛЛЕРЕНЕ C_{60}

Поступила в редакцию 23.01.2013

Методом теории функционала плотности проведено исследование расщепления h_u и t_{1u} уровней нейтрального фуллерена C_{60} с учетом ориентационной деформации углеродного скелета в интервале электрических полей E от 0 до 1,2 В/Å при трех ориентациях молекулы: $E||C_{2v}$, $E||C_{3v}$ и $E||C_{5v}$. Показана возможность модуляции внешним электрическим полем энергетического зазора между нижней свободной и высшей занятой молекулярными орбиталями.

Ключевые слова: фуллерен C_{60} , сильное электрическое поле, эффект Штарка, энергетический зазор между нижней свободной и высшей занятой молекулярными орбиталями

Введение

Фуллерены и их производные перспективны для применения в энергетике, материаловедении, нано-, опто- и молекулярной электронике, устройствах памяти [1–5]. Активно исследуются гибридные структуры на основе фуллеренов, имеющие высокие твердость, напряжение пробоя, коэффициент усиления по полю, ширину запрещенной зоны, позволяющей создавать устройства, излучающие в оптическом диапазоне [1]. Особый интерес вызывают полевые устройства на основе фуллеренов и фуллеритов ввиду возможности полевого ле-

гирования и возникновения металлической проводимости, а в некоторых случаях сверхпроводимости [6]. Известно, что сильное электрическое поле приводит к увеличению числа колебательных мод в ИК спектре фуллерена C_{60} [7], что можно использовать для увеличения эффективности солнечных элементов. Поэтому исследования влияния сильных локальных электрических полей на электронную структуру фуллеренов актуальны и позволяют установить способы управления основными электрофизическими и оптическими свойствами углеродных наноматериалов.

Наибольший интерес вызывает молекула C_{60} ввиду высокой стабильности, массовости получения и высокой симметрии усеченного икосаэдра I_h . Отличительная особенность молекулы такой симметрии, не встречающаяся в системах более низкой симметрии, заключается в существовании в основном состоянии электронных оболочек g^N и h^N с кратностью вырождения 4 и 5 [8]. Внешнее электрическое поле приводит к поляризации и ориентационной деформации фуллеренов [7]. В работе [9] авторы показали расщепление t_{1u} и h_u уровней нейтрального фуллерена C_{60} вследствие эффекта Штарка. Однако в расчетах не учитывалось изменение геометрии молекулы под действием электрического поля. В настоящей работе методом теории функционала плотности исследуется влияние сильного электрического поля E в интервале от 0 до 1,2 В/Å на расщепление t_{1u} и h_u уровней нейтрального фуллерена C_{60} с учетом полевой ориентационной деформации углеродного скелета при трех ориентациях молекулы $E||C_{2v}$, $E||C_{3v}$ и $E||C_{5v}$.

Симметрия и электронная структура фуллерена C_{60}

При синтезе фуллеренов в дуговом разряде или при лазерной абляции графитовой подложки из 1812 возможных изомеров C_{60} в подавляющем большинстве случаев синтезируются фуллерены с симметрией I_h . Данный изомер имеет 60 вершин и 90 граней, 10 осей третьего порядка C_{3v} , проходящих через 20 граней, представляющих собой неправильные шестиугольники, шесть осей пятого порядка C_{5v} , проходящих через 12 противоположно лежащих правильных пятиугольников, 30 осей второго порядка C_{2v} , проходящих через противоположно лежащие 60 ребер шестиугольник-шестиугольник [6, 10–11].

В соответствии с простой и общепринятой моделью Хюккеля [6] икосаэдрическую симметрию молекулы заменяют сферической. В таком случае из 240 валентных электронов на σ -связях расположено 180. На 30 π -орбиталях расположено 60 электронов. Уровни с орбитальным квантовым числом $l = 0, 1, 2, 3$ и 4 принимают 2, 6, 10, 14 и 18 электронов. Оставшиеся 10 электронов заполняют уровень с $l = 5$.

В икосаэдрической симметрии уровень с $l = 5$ расщепляется на неприводимые представления $H_u + T_{1u} + T_{2u}$, кратности вырождения соответствующих энергетических уровней 5, 3 и 3. В нейтральной молекуле нижний уровень h_u оказывается полностью заполнен электронами и формирует высшую занятую молекулярную орбиталь (ВЗМО). Уровень t_{1u} формирует низшую свободную молекулярную орбиталь (НСМО), t_{2u} — НСМО + 1 (рис. 1).

Малое число электронов и высокая симметрия C_{60} позволяют успешно использовать методы вычислительной химии при исследовании электронной структуры фуллерена как в основных, так и в возбужденных состояниях. Для моделирования электронной структуры фуллеренов широкое применение получил метод теории функционала плотности (DFT) [7, 9, 13].

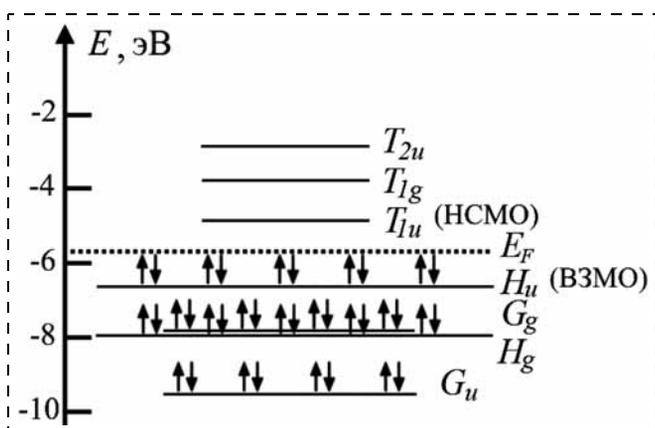


Рис. 1. Электронная структура нейтральной молекулы фуллерена C_{60} в основном состоянии вблизи уровня Ферми

Результаты расчетов

Для проверки применимости метода DFT LSDA [14, 15] для расчета электронной структуры фуллеренов проведена оптимизация изолированной молекулы C_{60} в отсутствии внешних полей. Рассчитанные значения длин одинарной $R_{c-c} = 1,45 \text{ \AA}$ (0,145 нм) и двойной $R_{c=c} = 1,39 \text{ \AA}$ (0,139 нм) связей хорошо согласуются с литературными данными $R_{c-c} = 1,44 \text{ \AA}$ (0,144 нм) и $R_{c=c} = 1,39 \text{ \AA}$ (0,139 нм) [10, 16, 17]. Потенциал ионизации $I = 6,69 \text{ эВ}$ и энергетический зазор $E_{\text{НСМО-ВЗМО}} = 1,83 \text{ эВ}$. Значение полной энергии $E_{\text{tot}} = -2260,60 \text{ a.u.}$ согласуется с результатами расчетов методом Хартри—Фока [19] $E_{\text{tot}} = -2259,05 \text{ a.u.}$ Таким образом, метод DFT в приближении LSDA применим для расчетов электронной структуры фуллерена C_{60} .

Далее проведены расчеты электронной структуры фуллерена C_{60} во внешнем электрическом поле в интервале значений напряженности E от 0 до 1,2 В/Å при трех ориентациях молекулы в электрическом поле: $E \parallel C_{2v}$, $E \parallel C_{3v}$ и $E \parallel C_{5v}$. Во всем интервале полей молекула остается устойчивой, однако наблюдаются заметные изменения в молекулярной структуре и ориентационная деформация углеродного скелета. Значение модуля максимального индуцированного эффективного заряда и дипольный момент пропорциональны значению приложенного электрического поля и не зависят от его ориентации, что обусловлено высокой поляризуемостью молекулы вследствие большой доли π -электронов.

На рис. 2 представлены результаты расчетов расщепления h_u и t_{1u} — уровней нейтрального фуллерена C_{60} в зависимости от напряженности электрического поля при трех ориентациях молекулы в электрическом поле: $E \parallel C_{2v}$, $E \parallel C_{3v}$ и $E \parallel C_{5v}$ с учетом ориентационной деформации углеродного скелета. ВЗМО и НСМО остаются вырожденными при $E < 0,01 \text{ В/Å}$, независимо от направления поля. Увеличение напряженности поля приводит к существенным изменениям в электронной структуре фуллерена C_{60} вследствие эффекта Штарка.

Расщепление уровня t_{1u} почти не зависит от ориентации молекулы в поле (рис. 2, б, 2, г и 2, е). Расщепление уровней h_u существенно зависит от ориентации молекулы в поле. Полное снятие вырождения происходит при $E \parallel C_{2v}$. При напряженности поля 1,2 В/Å уровни смещены вверх по энергии на 0,018; 0,065; 0,138; 0,169 и 0,200 эВ (рис. 2, а). Поле $E \parallel C_{3v}$ расщепляет h_u на три уровня смещенных по энергии вверх на 0,035, 0,12 и 0,19 эВ ($E = 1,2 \text{ В/Å}$) относительно основного состояния (рис. 2, в). Неожиданным является расщепление уровня h_u при $E \parallel C_{5v}$, так как происходит стабилизация одного из расщепленных уровней на 0,022 эВ. Два близко расположенных энергетических уровня смещены вверх по энергии на 0,142 и 0,150 эВ вверх по энергии при $E = 1,2 \text{ В/Å}$.

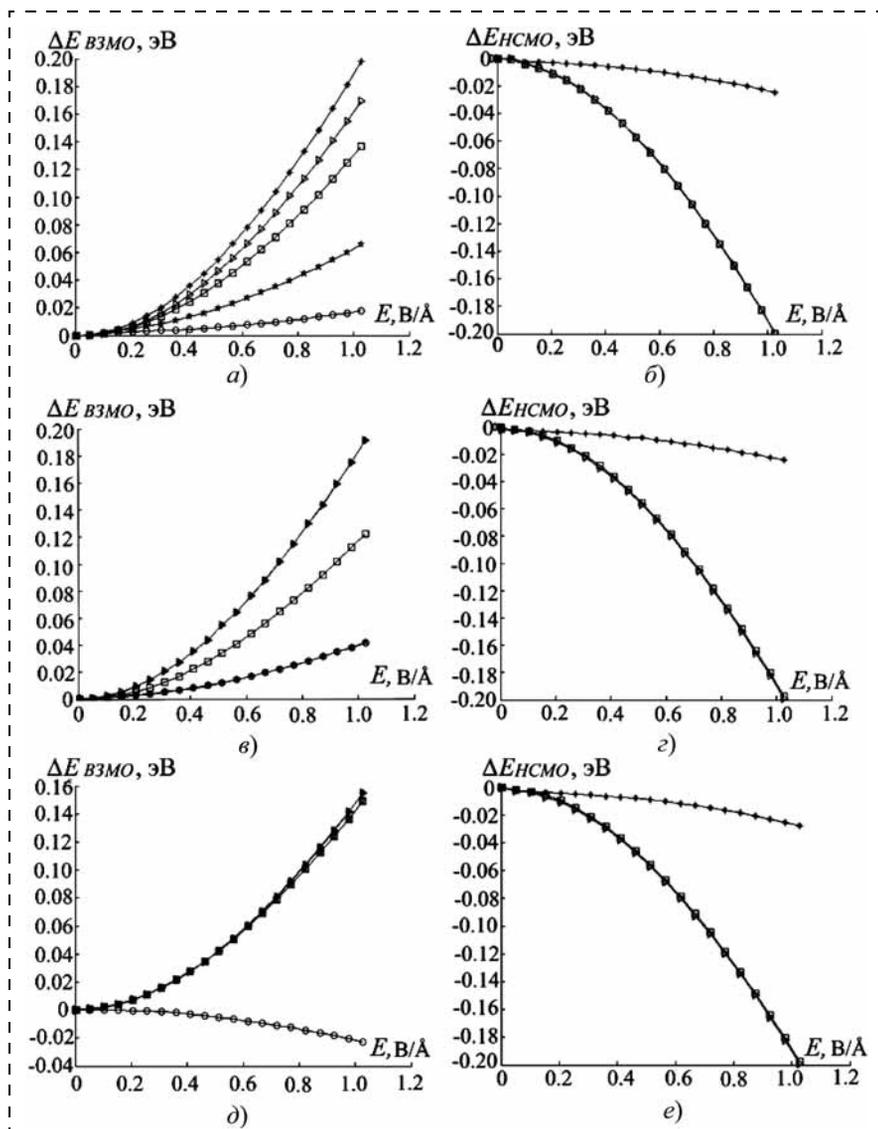


Рис. 2. Расщепление высшей занятой (левый столбец) и низшей свободной (правый столбец) молекулярных орбиталей фуллерена C_{60} в интервале электрических полей от 0 до 1,2 В/Å при трех ориентациях молекулы: $E||C_{2v}$ (а и б), $E||C_{3v}$ (в и з), $E||C_{5v}$ (д и е)

Заключение

Методом теории функционала плотности исследовано влияние электрических полей в интервале от 0 до 1,2 В/Å на расщепление t_{1u} и h_u уровней нейтрального фуллерена C_{60} в зависимости от значения и направления ($E||C_{2v}$, $E||C_{3v}$ и $E||C_{5v}$) напряженности с учетом ориентационной деформации молекулы. Показано, что во всем интервале полей σ -электронная система молекулы остается стабильной. Заметные изменения в электронной структуре происходят при напряженности $E > 0,01$ В/Å, что сопровождается расщеплением вырожденных уровней под действием квадратичного эффекта Штарка. Характер с расщепления низшей свободной (t_{1u}) орбитали почти не зависит от направления поля, что согласуется с расчетами Wehrli [9, 13]. Расщепление высшей занятой молекулярной орбитали (h_u) существенно зависит от направления

поля. Дестабилизация расщепленных h_u уровней и понижение энергии расщепленных t_{1u} уровней приводят к квадратичному уменьшению энергетического зазора между нижней свободной и высшей занятой молекулярными орбиталями. Модуляция $E_{НСМО-ВЗМО}$ электрическим полем может найти широкое применение в молекулярной опто- и наноэлектронике.

Список литературы

- Huang C.-P., Su C.-C., Su W. C. et al. Nanomeasurements of electronic and mechanical properties of fullerene embedded Si(111) surface // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. № 6. P. 061908(3).
- Yu H. Y. Electrical evidence for the encapsulation of C_{60} inside a carbon nanotube: Random telegraph signal and hysteric current-voltage characteristics // Phys. Rev. B. 2008. № 78. P. 155415.
- Harneit W., Meyer C. Architectures for a Spin Quantum Computer Based on Endohedral Fullerenes // Phys. Stat. Sol. B. 2002. № 3. P. 453–461.
- Yang W. L., Xu Z. Y. Quantum-information-processing architecture with endohedral fullerenes in a carbon nanotube // Phys. Rev. A. 2010. V. 81. P. 032303 (8).
- Li C., Chen Y., Wang Y. et al. A fullerene-single wall carbon nanotube complex for polymer bulk heterojunction photovoltaic cells // J. of Mat. Chem. 2007. V. 17. P. 2405–2411.
- Forro L., Mihaly L. Electronic properties of doped fullerenes // Rep. Prog. Phys. 2001. V. 64. P. 649–699.
- Тучин А. В., Битюцкая А. В. Поляризация фуллерена C_{60} в постоянном электрическом поле // Конденсированные среды и межфазные границы. 2010. Т. 12. № 12. С. 168–172.
- Николаев А. В., Плахутин Б. Н. Фуллерен C_{60} как псевдоатом икосаэдрической симметрии // Успехи химии. 2010. Т. 79. № 9. С. 803–831.
- Wehrli S., Koch E., Sigrist M. Field doping of C_{60} crystals: Polarization and Stark splitting // Phys. Rev. B. 2003. V. 68. N 11. P. 115412(14).
- Дьячков П. Н. Электронные свойства и применение нанотрубок. М.: Бином-Лаб. знаний, 2011. 488 с.
- Тучин А. В., Битюцкая Л. А. Фуллерен C_{60} . Электронное строение в электрическом поле. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2011. 80 с.
- Макарова Т. Л. Электрические и оптические свойства мономерных и полимеризованных фуллеренов // ФТП. 2001. Т. 35. № 3. С. 257–293.
- Wehrli S. Electronic and Vibrational Properties of Doped C_{60} // Dissertation for degree of Doctor of Natural Sciences. 2004. 151 p.
- Hohenberg P. Inhomogeneous Electron Gas // Phys. Rev. 1964. V. 136. N 3B. P. 864–871.
- Kohn W., Sham L. J. Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects // Phys. Rev. 1965. V. 140. N 4A. P. 1133–1138.
- Елецкий А. В. Фуллерены // УФН. 1993. Т. 163, № 2. С. 33–60.
- Елецкий А. В., Смирнов Б. М. Фуллерены и структуры углерода // УФН. 1995. Т. 165. № 9. С. 977–1008.
- Бутырская Е. В., Запругаев С. А. Компьютерное моделирование ИК-спектров эндодральных металлофуллеренов Li_2C_{60} и Na_2C_{60} // ФТТ. 2009. Т. 51. № 3. С. 613–619.

УДК 621.382.037

Е. В. Благоев, д-р физ.-мат. наук, зам. директора,
В. В. Амеличев, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Д. В. Костюк, лаборант-исследователь,
e-mail: D.Kostyuk@tcen.ru,
Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН

МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ТОКА

Поступила в редакцию 27.11.2012

Рассмотрены основные типы преобразователей магнитного поля, применяемые в современных датчиках тока. Представлены результаты измерения основных электрофизических характеристик магниторезистивного преобразователя с проводником управления. На основе результатов исследования макета магниторезистивного преобразователя для датчиков тока приведена оценка возможности измерения с его помощью токов силой до 60 А.

Ключевые слова: преобразователь магнитного поля, датчик тока, магниторезистивный элемент

Введение

В системах контроля и управления электротехнической аппаратурой, электродвигателями, генераторами, релейными устройствами и приборами силовой электроники применяются датчики электрического тока (ДЭТ). Все существующие конструкции ДЭТ можно разделить на приборы, содержащие шунты (калиброванные резисторы), трансформаторы и магнитные усилители [1]. Конструкции ДЭТ с шунтом просты и компактны, но имеют существенный недостаток из-за отсутствия гальванической развязки от контролируемой токовой шины. Другие типы конструкций, обладающие гальванической развязкой, как правило, громоздкие, тяжелые и имеют большую погрешность.

В настоящее время все более широко используют бесконтактные датчики тока с полной гальванической развязкой от измеряемой цепи. Эти датчики представляют собой магнитоэлектронные устройства, принцип действия которых основан на измерении магнитной индукции, создаваемой током, проходящим по проводнику. В качестве преобразователей магнитного поля в таких датчиках могут использоваться элементы Холла, магниторезисторы, магнитотранзисторы и др.

Среди широко применяемых датчиков измерения силы электрического тока наиболее распространены конструкции, представляющие собой

устройство с отверстием, сквозь которое продевается проводник с контролируемым током [2, 3]. Необходимой составной частью подобных конструкций является разомкнутый магнитопровод, огибающий проводник с протекающим в нем током и концентрирующий магнитное поле в зазоре. Полупроводниковый элемент Холла располагается определенным образом в зазоре магнитопровода и, как правило, интегрируется со схемами усиления и нормирования выходного сигнала либо на одном кристалле, либо в гибридном исполнении. Несмотря на все преимущества датчиков Холла, таких как возможность измерения больших токов (до 1000 А), использование магнитопровода вносит существенные недостатки в работу конструкции в целом. Эти недостатки обусловлены, прежде всего, свойствами ферромагнитных материалов: гистерезисом, разогревом в переменном магнитном поле, массивностью и т. д. Необходимость использования магнитопровода приводит также к повышению трудоемкости процесса сборки и калибровки готового прибора. Это определяет их применение в основном в системах промышленного энергоснабжения.

Однако существуют конструкции с токовыми шинами, где применение датчиков тока с кольцевыми магнитопроводами крайне затруднительно, например, в печатных платах. В данных конструкциях протекающие токи относительно невелики, но требуют повышенной точности измерения, при этом датчик тока может располагаться только на поверхности платы. В этом случае целесообразно применять датчики тока с магниторезистивными элементами, обладающими высокой чувствительностью при малых размерах к тангенциальной составляющей магнитного поля.

Магниторезисторы могут быть двух типов: "монокристаллические" и тонкопленочные. "Монокристаллические" магниточувствительные элементы изготавливаются из полупроводниковых материалов с высокой подвижностью свободных носителей заряда (например, InSb, InAs, сплавы на их основе и др.). Тонкопленочные элементы создаются на основе одно- или многослойных пленок (Ni—Co, Ni—Fe и других сплавов).

На рис. 1 приведены типичные вольт-эрстедные характеристики различных преобразователей магнитного поля при одинаковом напряжении питания, равном 5 В [1].

Как видно из рис. 1, при измерении относительно небольших значений магнитной индукции чувствительность преобразователей магнитного поля на основе тонкопленочных магниторезисторов значительно выше, чем у преобразователей на основе других магниточувствительных элементов.

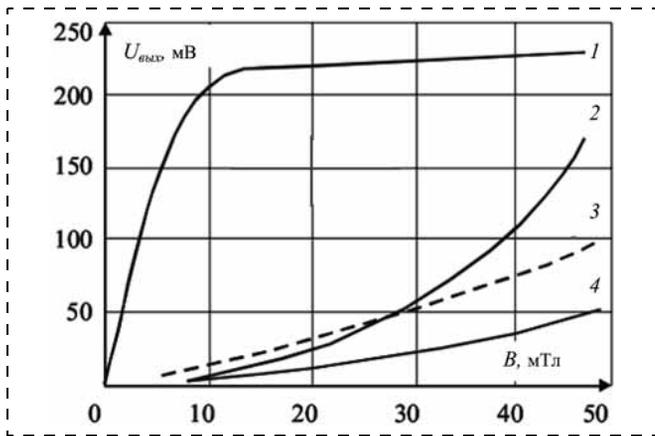


Рис. 1. Типичные вольт-амперные характеристики различных преобразователей магнитного поля при одинаковом напряжении питания [1]:

1 — тонкопленочный магниторезистор; 2 — "монолитный" магниторезистор; 3 — элемент Холла на основе InSb; 4 — элемент Холла на основе GaAs

Конструкция магниторезистивного преобразователя

В данной работе использовался интегральный магниторезистивный преобразователь, состоящий из магниторезистивной мостовой схемы, управляющего проводника и проводника корректировки уровня выходного сигнала "Offset". Электрическая схема этого преобразователя представлена на рис. 2.

Магниточувствительные резисторы $R1-R4$ собраны в мостовую схему с выводами питания ($+U_{пит}$, Земля) и выводами контроля $U_{вых1}$, $U_{вых2}$. Управляющий проводник имеет сопротивление $R_{упр.пр} = 12$ Ом и служит для вывода магниторезистивных элементов в область максимальной чувствительности за счет отклонения магнитного момента доменной структуры

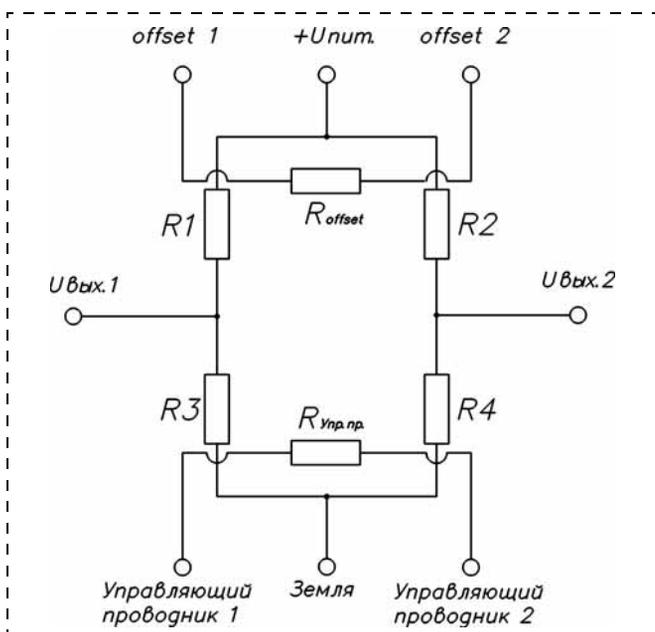


Рис. 2. Электрическая схема магниторезистивного преобразователя

относительно протекающего тока в магниторезисторе. Катушка "Offset" обладает сопротивлением $R_{offset} = 24$ Ом и служит для корректировки начального разбаланса моста за счет генерации магнитного поля коллинеарно оси чувствительности.

Магниторезистивный преобразователь изготавливается по планарной технологии с использованием многослойной металлизации на кремниевой пластине [2–4]. Магниторезисторы формируются из пленок Ni–Fe–Co и Ti общей толщиной 35...40 нм. Управляющий проводник, катушка "Offset", межэлементные соединения и контактные площадки формируются из алюминиевых пленок толщиной до 2 мкм.

Параметры магниторезистивного преобразователя

Для оценки основных параметров изготовленных магниторезистивных преобразователей использовался соленоид с диаметром 50 мм и длиной 220 мм. Соленоид откалиброван по напряженности магнитного поля внутри него в зависимости от протекающего через него тока. Регистрация изменения уровня выходного дифференциального напряжения с магниторезистивного моста в зависимости от величины и направления магнитного поля, воспроизводимого соленоидом, измерялась вольтметром типа В7-40. Напряжение питания моста магниторезистивного преобразователя составляло 10 В. Для задания рабочей точки в управляющий проводник подавался ток 100 мА.

Чувствительность мостовой схемы магниторезистивного преобразователя составила $0,3$ мВ/(В · Э) в диапазоне напряженности магнитного поля ± 10 Э. На рис. 3 представлены зависимости выходных дифференциальных напряжений четырех образцов магниторезистивных преобразователей от напряженности магнитного поля.

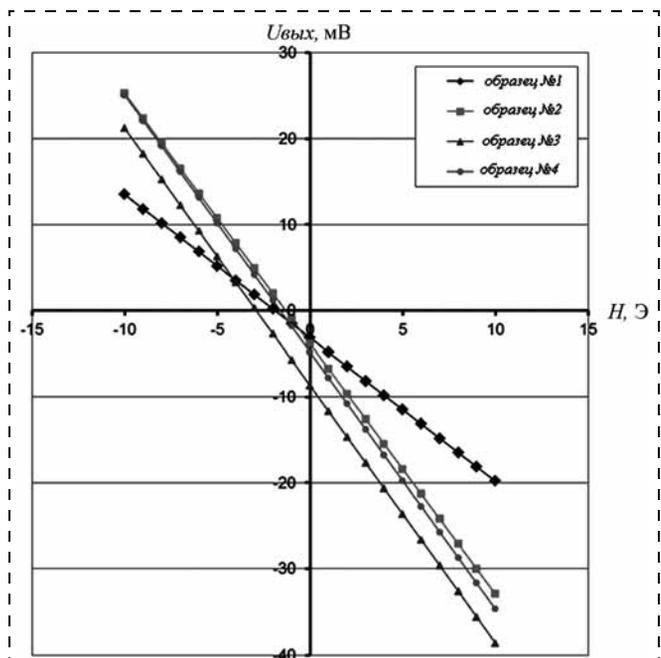


Рис. 3. Зависимости выходных напряжений магниторезистивных преобразователей от напряженности H магнитного поля

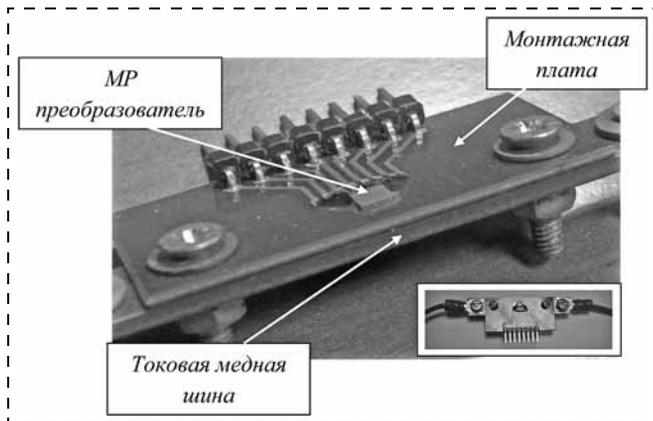


Рис. 4. Фотоснимок макета магниторезистивного преобразователя тока, смонтированного на медную шину

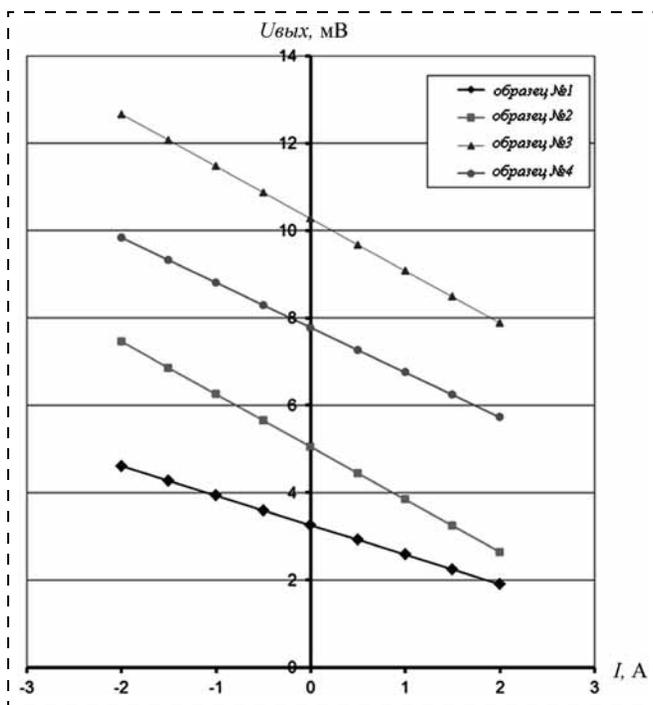


Рис. 5. Зависимость выходных дифференциальных напряжений четырех образцов магниторезистивных преобразователей от тока, протекающего в шине

Для измерения зависимости характеристик магниторезистивных преобразователей (MP) от тока они были смонтированы на медную шину толщиной 1,5 мм, шириной 10 мм и длиной 60 мм (рис. 4). Чувствительные элементы размером 3×3 мм располагались посередине шины на расстоянии 1,4 мм от ее поверхности. На рис. 5 представлена зависимость выходных дифференциальных напряжений четырех образцов магниторезистивных преобразователей от тока, протекающего в шине.

Измерения показали, что чувствительность магниторезистивного преобразователя к току, протекающему в шине, составила 0,1...0,13 мВ/(В·А). Для данной конструкции токопроводящей шины ток 2,5 А на расстоянии 1,4 мм от середины шины создает магнитное поле с напряженностью 1 Э. Линейность характеристики магниторезистивного

преобразователя соблюдается в диапазоне ± 10 Э. Таким образом, измеряемый ток при линейной характеристике преобразования может ограничиваться диапазоном ±25 А.

Для датчиков тока подобной конструкции весьма существенным является расположение чувствительного элемента относительно шины с измеряемым током. Так, например, напряженность магнитного поля для тонкого проводника конечной длины определяется формулой [5]

$$H = \frac{I}{4\pi r} (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2),$$

где I — сила тока в проводнике; r — расстояние от точки измерения до проводника; α_1 и α_2 — углы между линией отрезка проводника и линией, соединяющей концы отрезка с точкой измерения. Напряженность магнитного поля прямоугольной токопроводящей шины определяется более сложной формулой [5].

Измерения чувствительности магниторезистивного преобразователя, подключенного к напряжению питания 10 В, в зависимости от расстояния между ним и токопроводящей медной шиной показали, что при увеличении расстояния с 1,4 мм до 7 мм чувствительность снижается с 1,21 мВ/А до 0,45 мВ/А соответственно. Напряженность магнитного поля прямо пропорциональна силе тока при любой конфигурации медной шины. Отношения чувствительностей преобразователя на разном расстоянии от токопроводящей шины равны отношению напряженностей магнитного поля на тех же расстояниях. Таким образом, при расположении преобразователя тока на расстоянии 7 мм от токопроводящей шины напряженность магнитного поля будет в 2,7 раза меньше, чем при расстоянии 1,4 мм. Следовательно, диапазон измерений тока с помощью данного магниторезистивного преобразователя может быть расширен до ±60 А.

Заключение

Датчики тока на основе разрабатываемых преобразователей магнитного поля за счет высокой гальванической развязки могут быть использованы как контрольные элементы в устройствах интеллектуальной силовой электроники для бесконтактного измерения силы тока и его флуктуаций в диапазоне токов от 0,01 до 60 А, при чувствительности магниторезистивного преобразователя к магнитному полю не менее 0,3 мВ/(В·Э) может быть получена чувствительность по току 0,12 мВ/(В·А). При использовании совмещенной технологии [6], обеспечивающей формирование на одном кристалле магниторезистивных элементов и интегральных схем, возможно изготовление миниатюрных интеллектуальных датчиков тока для силовой электроники с характеристиками, не уступающими зарубежным аналогам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" на 2008—2015 годы, государственный контракт № 16.426.11.0047.

Список литературы

1. Бараночников М. Л. Микромагнитоэлектроника. Т. 1. М.: ДМК Пресс, 2001. 544 с.
2. Амеличев В. В., Галушков А. И., Дягилев В. В., Касаткин С. И., Муравьев А. М., Лопатин В. В., Резнев А. А., Сауров А. Н., Суханов В. С. Микроэлектронная магниторезистивная технология // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 22–26.
3. Касаткин С. И., Муравьев А. М., Плотникова Н. В., Амеличев В. В., Дягилев В. В., Гамарц И. А., Лопатин В. В., Сауров А. Н. Тонкопленочные анизотропные магниторезистивные наноэлементы для систем контроля // Датчики и системы. 2009. № 8. С. 2–4.

4. Амеличев В. В., Гамарц И. А., Касаткин С. И., Лопатин В. В., Муравьев А. М., Плотникова Н. В., Резнев А. А., Решетников И. А., Чаплыгин Ю. А. Анизотропные магниторезистивные преобразователи на основе ферромагнитных наноструктур с различным содержанием кобальта // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 2. С. 22–24.
5. Лабутин С. А. Методы расчета магнитных полей. Н. Новгород: Изд-во ООО "Котес", 2008. С. 1–8.
6. Амеличев В. В., Сауров А. Н., Аравин В. В., Резнев А. А., Демин А. А., Хохлов М. В. Беспроводная магниторезистивная микросистема измерения магнитного поля // Изв. высших учебных заведений. Электроника. 2012. № 6(98). С. 57–63.

УДК 62-791.2.537.211

А. Я. Гаршин¹, гл. конструктор,
А. В. Тучин², аспирант, e-mail: a.tuchin@bk.ru,
Е. Н. Бормонтов², д-р физ.-мат. наук, проф.
¹ОАО "Воронежский завод полупроводниковых приборов — Сборка"
²Воронежский государственный университет
e-mail: orppisvzpp@gmail.ru

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ С ИМПУЛЬСНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

Поступила в редакцию 23.01.2013

Рассмотрены МЭМС-датчики с емкостным съемом информации, использующие принцип обратного электростатического преобразования. Представлены конструкции и рабочие характеристики экспериментальных образцов: акселерометра и датчика дифференциального давления. Рассмотрены перспективные направления разработок компенсационных МЭМС-датчиков.

Ключевые слова: МЭМС, датчик давления, акселерометр, электростатическая компенсация

Направление МЭМС в настоящее время является одним из самых динамично развивающихся направлений микроэлектроники [1, 2], что обусловлено преимущественностью технологий. Это позволило:

- создавать механические конструкции любой сложности с точностью исполнения до долей микрометра;

- резко снизить себестоимость изделий за счет группового способа изготовления.

Все это привело к созданию изделий, существенно превосходящих ранее выпускаемые приборы. Одним из стратегических направлений разработок МЭМС являются акселерометры и датчики давлений с емкостным съемом сигнала как наиболее надежные и перспективные. Развитие технологий и постоянно расширяющиеся области применения МЭМС-датчиков предъявляют все новые требования к их конструкциям и характеристикам.

На "Воронежском заводе полупроводниковых приборов — Сборка" (ВЗПП-С) в период с 01.2010 по 09.2011 выполнена НИР "МЭМС", в процессе которой были разработаны и изготовлены экспериментальные образцы емкостных компенсационных акселерометров с заданными характеристиками. На базе конструкции и технологии изготовления акселерометра проводится НИР "МЭМС-1", в рамках которой разрабатывается датчик дифференциального давления газа (ДДД). Данный датчик позволит измерять перепады давлений менее 500 Па с высокой точностью. Разрабатываемые на "ВЗПП-С" ДДД ориентированы на бытовые расходомеры газа, промышленные системы контроля параметров технологических процессов, контроль вентиляционных систем и т. д., так как существующие образцы ДДД не позволяют измерять с достаточной точностью малые перепады давления.

Технические характеристики акселерометра и ДДД

Параметр	Акселерометр осевой	ДДД
Диапазон преобразования (верхняя граница диапазона измерения)	0,001...1000 м/с ²	±500...±100 Па
Порог чувствительности	<0,001 от верхней границы диапазона измерения	>1000
Динамический диапазон	>1000	<1 %
Основная приведенная погрешность	<0,5 %	<1 %
Диапазон рабочих температур	–50...+70 °С	–50...+70 °С
Диапазон частот измеряемых величин	0...1000 Гц	0...1000 Гц
Ток потребления	<3 мА	<3 мА
Дополнительная приведенная температурная погрешность	<0,01%/°С	<2%/°С
Характеристика преобразования	Линейная	Линейная
Напряжение питания	5...30 В	5...30 В
Выходной сигнал	Напряжение или частота	Напряжение или частота
Габаритные размеры	40×30×10 мм	35×30×10 мм

Основные метрологические требования к разрабатываемому акселерометру и ДДД представлены в таблице.

Элемент чувствительный (ЭЧ), как первичный преобразователь, в наибольшей степени определяет эксплуатационные характеристики всего прибора, такие как точность, стабильность, долговечность, надежность, устойчивость, прочность и др. [2, 3]. Чувствительный элемент ДДД представляет собой дифференциальный конденсатор, крайние обкладки которого выполнены в виде электродов на стеклянных пластинах. Между стеклянными пластинами расположена кремниевая структура, представляющая собой рамку, внутри которой расположена мембрана, изготовленная по технологии жидкостного анизотропного травления с использованием "стоп-слоя".

В центре мембраны расположен жесткий центр, выполняющий роль среднего электрода в дифференциальном конденсаторе (рис. 1). При отсутствии разности давления по обе стороны мембраны жесткий центр находится строго посередине между электродами, при этом зазоры и емкости дифференциального конденсатора равны.

При возникновении разности давлений жесткий центр смещается в сторону одного из электродов. При этом возникает разница емкостей. Электрическая схема преобразует эту разницу в выходное напряжение, подаваемое на рабочие электроды таким образом, что возникающая электростатическая сила компенсирует силу давления газов.

Особенностью конструкции ЭЧ является дифференциальное включение как по цепи контроля положения подвижной пластины, так и по цепи электростатической компенсации. Такое включение позволяет линеаризовать функцию преобразования, упростить электрическую схему обработки, снизить влияние дестабилизирующих факторов.

Преимуществами такого подхода являются [4]:

- уменьшение влияния дестабилизирующих факторов, возникающих в конструкции ЭЧ за счет его симметрии и снижения механической жесткости мембраны;
- простота технических решений;
- расширение частотного диапазона преобразования;
- возможность работы при очень малом потреблении энергии.

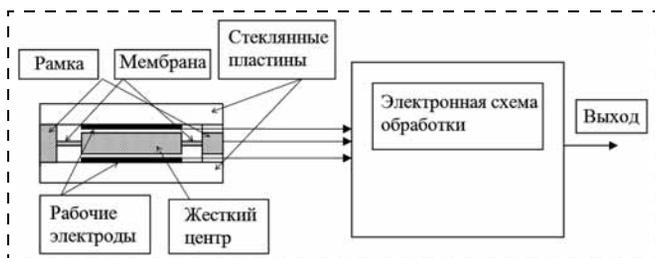


Рис. 1. Функциональная схема емкостного компенсационного датчика дифференциального давления

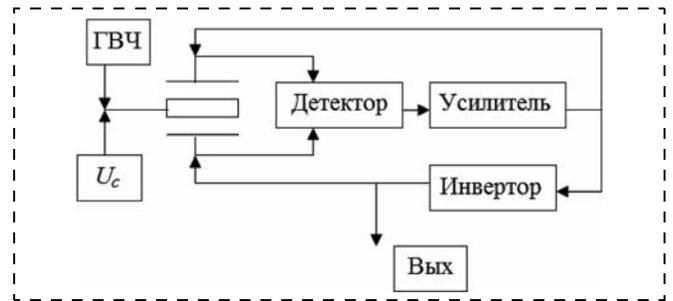


Рис. 2. Блок-схема акселерометра и ДДД. ГВЧ-генератор высокочастотный; U_c — постоянный потенциал, подаваемый на подвижную пластину

Для реализации компенсационного метода измерения с электростатическим уравниванием мембраны разработана аналоговая и цифровая схемы преобразования. Для аналоговой схемы (рис. 2) разработан эффективный метод настройки и контроля линейности функции преобразования сигнала без использования специальных стенов.

На подвижную пластину ЭЧ, являющуюся средним электродом дифференциального конденсатора, образованного подвижной пластиной и электродами, расположенными на верхней и нижней планках, подается постоянный потенциал U_c и переменное напряжение с ГВЧ. Под действием переменного напряжения через емкости дифференциального конденсатора на входы детектора текут токи. Сила этих токов зависит от емкостей, которые, в свою очередь, зависят от расстояния между обкладками в дифференциальном конденсаторе, т. е. от положения подвижной пластины относительно электродов на планках. Детектор сравнивает силу входных переменных токов и на выходе выдает сигнал, пропорциональный разности. Сигнал с выхода детектора усиливается и подается на верхний рабочий электрод и на вход инвертора. Инвертор преобразует напряжение на входе в напряжение равной величины противоположной полярности. Напряжение с выхода инвертора поступает на нижний рабочий электрод и на выход акселерометра и ДДД.

Импульсная схема не требует настройки линейности и может быть реализована в интегральном исполнении по КМОП-технологии.

Список литературы

1. **Mohamed Gad-al-Hak.** MEMS Design and fabrication. Taylor & Francis Group, 2006. 647 p.
2. **Джексон Р. Г.** Новейшие датчики. М.: Техносфера, 2007. 384 с.
3. **Осадчий Е. П., Тихонов А. И., Карпов В. И.** и др. Проектирование датчиков для измерения механических величин. М.: Машиностроение, 1979. 480 с.
4. **Гаршин А. Я.** Чувствительный элемент емкостного акселерометра. Авт. свид. RU 2098832. 1997.

Л. П. Ичкитидзе, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., доц., e-mail: leo852@inbox.ru, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Зеленоград, Москва

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ ПЛЕНОЧНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР МАГНИТНОГО ПОТОКА С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ВЕТВЯМИ ДЛЯ ДАТЧИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Поступила в редакцию 11.02.2013

Рассматривается сверхпроводниковый пленочный трансформатор магнитного потока в форме кольца с суженной активной полосой, перекрывающей пленочный магниточувствительный элемент с гигантским магнитосопротивлением, отделенный с помощью изолирующей пленки.

Показано, что микро- и наноструктурирование активной полосы в виде фрагментирования последней на параллельные сверхпроводящие ветви и прорезы, имеющие микро- и нанометровые размеры, увеличивает в несколько раз фактор умножения трансформатора, т. е. концентрацию внешнего магнитного поля на магниточувствительном элементе, и, тем самым, повышает эффективность трансформатора и датчика магнитного поля (≤ 10 пТл).

Ключевые слова: сверхпроводящие пленки, магнитное поле, трансформатор магнитного потока, магниточувствительный элемент, топологическое наноструктурирование

Трансформаторы магнитного потока (ТМП) на основе сверхпроводящих пленок используются во многих магнитометрах для переноса без потерь магнитного потока измеряемого магнитного поля на магниточувствительный элемент (МЧЭ). В качестве МЧЭ выступают:

- джозефсоновские переходы [1];
- датчики Холла [2];
- датчики на эффекте гигантского магнитосопротивления (ГМС) [3];
- датчики на магниторезистивном эффекте в керамических высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) [4–6] и др.

В работах [7, 8] было показано, что оптимальное фрагментирование активной полосы ТМП на многочисленные параллельные ветви и прорезы с микрометровыми и субмикрометровыми размерами приводит к значительному повышению эффективности ТМП. В частности, в некоторых случаях концентрация (т. е. фактор умножения F) измеряемого магнитного поля на МЧЭ выросла на два порядка. В настоящей работе приводятся расчеты фактора умножения F для случаев фрагментирова-

ния активной полосы ТМП на несколько ветвей и прорезей с микро- и нанометровыми размерами.

Рассматривается конструкция датчика магнитного поля (ДМП), состоящего из кольцеобразного сверхпроводникового пленочного ТМП с суженной активной полосой и МЧЭ в виде пленки с ГМС. При этом активная полоса ТМП полностью перекрывает МЧЭ, отделенный изолирующей пленкой, а все элементы ДМП имеют планарное исполнение, что иллюстративно показано на рисунке.

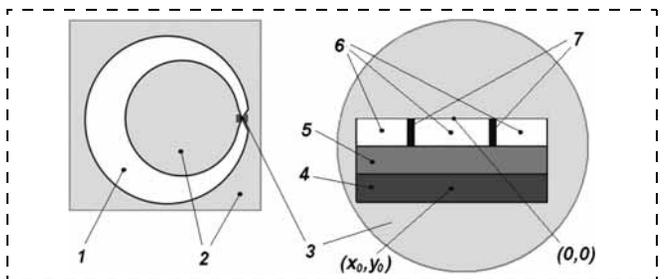
Проводился расчет F при варьировании ширины прорезей w_p , ширины сверхпроводящих ветвей w_i и значения лондоновской глубины проникновения λ . При этом учитывалась только проекция магнитного поля, параллельная поверхности подложки, поскольку именно эта проекция сильно влияет на МЧЭ в виде элемента с ГМС типа спин-туннельной структуры. В расчетах использовались известные формулы:

$$B = \frac{\mu_0 I_s}{8\pi\lambda h} \left[\begin{array}{c} 0 \ 0 \ \frac{e^{-\frac{x+l}{\lambda}}}{(y_0-y)} \\ \int \int_{-2h-l}^0 \frac{dx dy}{(y_0-y)^2 + (x_0-x)^2} \\ 0 \ +l \ \frac{e^{-\frac{l-x}{\lambda}}}{(y_0-y)} \\ \int \int_{-2h}^0 \frac{dx dy}{(y_0-y)^2 + (x_0-x)^2} \end{array} \right]; \quad (1)$$

$$F = \left(\frac{1}{K_L} \right) \left(\frac{\langle B \rangle}{\langle B_0 \rangle} \right); \quad (2)$$

$$K_L \approx \frac{w_s}{j \sum_{i=1} w_i}, \quad (3)$$

где l и h — полуширина и полутолщина пленки активной полосы ТМП соответственно; μ_0 — постоянная магнитного поля; $I_s/(4\lambda h) \leq J_c$; I_s — сила экранирующего сверхпроводящего тока в активной полосе, протекающего над МЧЭ и действующего на него в точке (x_0, y_0) (точка отсчета $(0, 0)$ находится в центре верхней поверхности пленки); J_c —



Иллюстративная схема ДМП и его элементы:

1 — сверхпроводящее кольцо ТМП; 2 — диэлектрическая подложка; 3 — активная полоса ТМП в увеличенном масштабе (пропорции не сохранены); 4 — МЧЭ; 5 — изолирующая пленка; 6 — ветви активной полосы; 7 — прорезы активной полосы

плотность критического тока Гинзбурга—Ландау; $B, \langle B \rangle$ — локальное и усредненное по ширине МЧЭ магнитные поля, генерируемые током I_s в активной полосе с прорезями соответственно; $B_0, \langle B_0 \rangle$ — локальное и усредненное по ширине МЧЭ магнитные поля для случая без прорезей (сплошная полоса) соответственно; K_L — фактор роста суммарной индуктивности активной полосы; w_s — ширина активной полосы; w_i — ширина i -й ветви; j — число ветвей в активной полосе; $n = j - 1$ — число прорезей.

Согласно формуле (2) при $j = 1, n = 0$ выполняется $F = 1$, что описывает ТМП со сплошной активной полосой. Значение F существенно изменяется относительно случая $j = 1$, если проводить фрагментирование ($j > 1$) сплошной активной полосы на параллельные ветви и прорези (см. рисунок). В табл. 1 приведены типичные результаты расчетов с указанием размеров ветвей и их расположения в активной полосе, а также соответствующего значения F для случая трех ветвей и двух прорезей (черные жирные полосы). В расчетах использовались следующие параметры ДМП: $J_c = 10^6$ А/см², $\lambda = 50$ нм, $w_s = 7000$ нм и $h = 25$ нм, ширина прорези $w_p = 100$ нм, толщина изолирующего слоя $h_{iz} = 20$ нм, толщина слоя МЧЭ $h_{mse} = 50$ нм.

Получено, что при различных конфигурациях ветвей величина F изменяется незначительно — уменьшается в пределах $< 10\%$ от своего максимального значения F_{max} . Видно, что при значительном приближении прорезей к краям или середине активной полосы значения F падают. При фиксированном значении $\lambda = 50$ нм с увеличением ширины прорезей в области $w_p = 20...500$ нм величина F_{max} уменьшается монотонно. Также она монотонно уменьшается при росте λ . Описанное поведение F_{max} отражено в табл. 2. Видно, что при

Таблица 1

Размеры ветвей и прорезей в нанометрах для различных вариантов фрагментирования активной полосы и соответствующие им значения F

№ по пор.	Разбиение при $\lambda = 50$ нм	F
1		3,6646
2		3,8335
3		3,8555
4		3,8590
5		3,8590
6		3,8587
7		3,8577
8		3,8563
9		3,8546
10		3,8522
11		3,8493
12		3,8454
13		3,8404
14		3,8336

Таблица 2

Значения F_{max} при варьировании значений параметров λ и w_p

λ , нм	w_i (обычный шрифт), нм; w_p (жирный курсив), нм	F_{max}
50	3040-20-880-20-3040	3,8609
	2950-100-900-100-2950	3,8591
	2500-500-1000-500-2500	3,4040
	2000-1000-1000-1000-2000	2,8345
	1400-1400-1400-1400-1400	2,3766
150	2490-20-1980-20-2490	3,4668
	2400-100-2000-100-2400	3,4214
	2000-500-2000-500-2000	3,0150
	2000-1000-1000-1000-2000	2,4821
	1400-1400-1400-1400-1400	2,0884
250	2360-20-2240-20-2360	3,2953
	2300-100-2200-100-2300	3,2395
	2000-500-2000-500-2000	2,8341
	2000-1000-1000-1000-2000	2,2630
	1400-1400-1400-1400-1400	1,8901

незначительном числе сверхпроводящих ветвей ($j = 3$) и прорезей ($n = 2$) наибольшее значение F_{max} приблизительно равно 3,9 при минимальных $\lambda = 50$ нм и $w_p = 20$ нм, а наименьшее значение $F_{max} \approx 1,89$ соответствует $\lambda = 250$ нм и $w_p = 1400$ нм.

Высокое значение $F_{max} \approx 4$ при низких λ говорит о большей эффективности чистых НТСП материалов (например, гетероэпитаксиальные слои (ГЭС) ниобия $\lambda \approx 60$ нм [9]) относительно гранулярных или ВТСП материалов $F_{max} \approx 3$ (например, у керамики системы Bi-2223 $\lambda \approx 250$ нм [10]), используемых в сверхпроводниковых пленочных ТМП.

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что фрагментирование активной полосы на небольшое число ветвей (3 шт.) и прорезей (2 шт.) с нанометровыми размерами позволяет добиться ощутимого роста фактора умножения ТМП. Следовательно, можно полагать, что соответствующим образом улучшатся показатели магниточувствительного элемента: например, в датчике слабого магнитного поля на основе ГМС пороговая чувствительность уменьшится с ~ 15 фТл/Гц^{1/2} [11] до ~ 4 фТл/Гц^{1/2}.

Таким образом, микро- и наноструктурирование активной полосы сверхпроводникового пленочного трансформатора магнитного потока повышает его эффективность, улучшая характерные параметры датчика слабого магнитного поля. При микроструктурировании ($w_p = 1,0...1,4$ мкм) рост фактора умножения в 1,4...1,8 раз меньше, чем при наноструктурировании ($w_p = 20...100$ нм). Однако первый случай, по-видимому, более предпочтителен, поскольку широко распространенные традиционные методы фотолитографии позволяют легко реализовать элементы микрометровых размеров. Можно ожидать, что с увеличением числа ветвей и прорезей наноструктурирование становится еще более эффективным, чем микроструктурирование активной полосы ТМП.

Полученные результаты будут востребованы в магнитных системах, фиксирующих сверхслабые

магнитные поля (≤ 10 пТл) для биомедицинской неинвазивной диагностики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госконтракт: 16.0740.11.0765, соглашение 14.В37.21.0567), Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-08-12014/12) и Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (контракт 10678р/19537).

Автор выражает благодарность проф. С. В. Селищеву за поддержку данной работы, а также А. Н. Миронюку за помощь в расчетах.

Список литературы

1. Bär L. R., Daalmans G. M., Uhl D. and Bömmel F. A niobium planar SQUID gradiometer operating in an unshielded environment // *Supercond. Sci. Technol.* 1996. Vol. 9, N 4A. P. 109–112.
2. Linzen S., Schmidt F., Schmidl F. et al. A thin film HTSC-Hall magnetometer-development and application // *Physica C.* 2002. Vol. 372–376. P. 146–149.
3. Pannetier M., Fermon C., Le Goff G. et al. Femtotesla magnetic field measurement with magnetoresistive sensors // *Science.* 2004. Vol. 304, N 5677. P. 1648–1650.

4. Ichkitidze L. P. Resistive film sensor of a weak magnetic field based on the HTS $(\text{Bi}, \text{Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ceramics // *Physica C.* 2006. Vol. 435, Is. 1–2. P. 140–143.

5. Ichkitidze L. P. Weak magnetic field superconductor resistive sensors in comparison with semiconductor and magnetoresistive sensors // *Physica C.* 2007. Vol. 460–462. Part 2. P. 781–782.

6. Ичкитидзе Л. П. Резистивный датчик слабого магнитного поля на основе толстых пленок ВТСП-материалов // *Изв. РАН. Сер. Физическая.* 2007. Т. 71, № 8. С. 1180–1182.

7. Ichkitidze L. P., Mironyuk A. N. Superconducting film flux transformer for a sensor of magnetic field // *Physica C.* 2012. Vol. 472, Is. 1. P. 57–59.

8. Ичкитидзе Л. П., Миронюк А. Н. Топологический наноструктурированный пленочный сверхпроводниковый трансформатор магнитного потока // *Нано- и микросистемная техника.* 2012. № 1. С. 47–50.

9. Ичкитидзе Л. П., Скобелкин В. И., Баблidge Р. А. Критический ток в сверхпроводящих пленках ниобия, имеющих различные размеры зерен // *Физика твердого тела.* 1985. Т. 27, № 10. С. 3116–3119.

10. Третьяков Ю. Д., Гудилин Е. А. Химические принципы получения металлоксидных сверхпроводников // *Успехи химии.* 2000. Т. 69, № 1. С. 3–40.

11. Порохов Н. В., Левин Э. Е., Чухаркин М. Л., Раков Д. Н., Воробьева А. Е., Варлашкин А. В., Снигирев О. В. Высокотемпературные сверхпроводящие пленки на гибких подложках для трансформатора магнитного потока // *Радиотехника и электроника.* 2012. Т. 57, № 10. С. 1128–1134.

УДК 534.1, 539.3

И. В. Уваров, мл. науч. сотр.,
e-mail: ilnik88@mail.ru,

В. В. Наумов, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
e-mail: vvnau@rambler.ru,

И. И. Амиров, д-р физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе,
Ярославский филиал Физико-технологического института РАН, Ярославль

РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОКАНТИЛЕВЕРОВ

Поступила в редакцию 25.12.2012

Исследованы резонансные свойства трехслойных металлических кантилеверов, имеющих толщину 40 нм. Были изготовлены два типа кантилеверов: Cr–Al–Cr и Ti–Al–Ti. Резонансные частоты кантилеверов определялись по экспериментально полученным резонансным кривым. Возбуждение колебаний кантилеверов осуществлялось электрическими силами, для регистрации колебаний применялся метод светового рычага. Экспериментально получены зависимости первой и второй резонансных частот кантилеверов от длины и ширины. Проведен анализ экспериментальных данных, а также сравнение с результатами расчетов. Обсуждается связь резонансных свойств с формой и материалом нанокантилеверов.

Ключевые слова: наноэлектромеханические системы, нанокантилевер, резонансная частота, изгибные колебания, световой рычаг, шероховатость

Кантилеверы широко применяются в МЭМС и НЭМС. Они используются в биосенсорах [1], детекторах различных веществ [2] и др. Уменьшение размеров кантилеверов позволяет снизить энергопотребление и повысить чувствительность устройств, поэтому использование нанокантилеверов возрастает. Применение металла в качестве структурного материала кантилеверов связано с определенными трудностями, так как металлические пленки имеют зернистую структуру, высокую шероховатость поверхности и содержат остаточные напряжения. В то же время металлы пластичны и являются проводниками. Для производства изделий, в которых кантилевер должен быть проводящим (например, наномеханических переключателей [3]), необходимо уметь изготавливать металлические кантилеверы. В данной работе исследуются резонансные свойства сверхтонких металлических кантилеверов, имеющих трехслойную структуру.

Исследованные нанокантилеверы состояли из трех слоев металла и изготавливались в двух вариантах: Cr–Al–Cr и Ti–Al–Ti. Маршрут изготовления кантилеверов показан на рис. 1. На окисленную КДБ-пластину (кремний дырочного типа проводимости, легированный бором) (толщина слоя SiO_2 составляла 0,9 мкм) магнетронным напылением наносился жертвенный слой аморфного кремния ($\alpha\text{-Si}$) толщиной 2 мкм. Затем пластина покрывалась слоем позитивного фоторезиста, в котором методом контактной фотолитографии выполнялся рисунок кантилеверов (рис. 1, а). Магнетронным напылением на пластину наносились

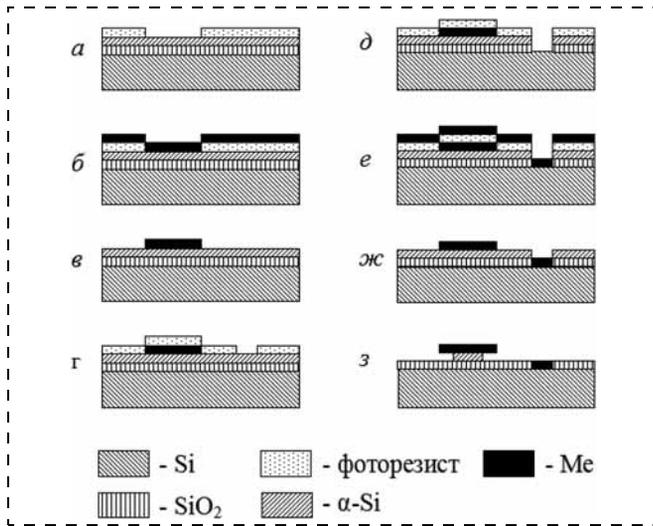


Рис. 1

структурные слои металла (Cr—Al—Cr или Ti—Al—Ti толщами 5—30—5 нм), затем оставшийся фоторезист удалялся (взрывная литография, рис. 1, б, в). Далее пластина снова покрывалась слоем фоторезиста, в котором методом контактной фотолитографии наносился рисунок контактной площадки (рис. 1, г). Через окно в слое фоторезиста выполнялось травление слоя α -Si в плазме SF_6 и травление слоя SiO_2 в растворе HF/NH_4F (рис. 1, д). Затем напылялся слой Al толщиной 100 нм и осуществлялся "взрыв" (рис. 1, е, ж). Далее удалялся жертвенный слой α -Si из-под кантилеверов в плазме SF_6 и происходило освобождение кантилеверов (рис. 1, з). Таким образом, воздушный зазор между кантилеверами и слоем SiO_2 составлял 2 мкм. Изготавливаемые кантилеверы имели длину от 10 до 100 мкм, ширину от 2 до 10 мкм и толщину 40 нм. На рис. 2 показано СЭМ-изображение нанокантилеверов размерами 10 мкм \times 4 мкм \times 40 нм. Толщина кантилеверов измерялась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Zeiss Supra-40 и профилометра TALYSTER фирмы Taylor—Hobson. Наличие тонких слоев Cr и Ti контролировалось с помощью ВИМС (вторично-ионный масс-спектрометр) IONTOF SIMS5.

Измерялись резонансные кривые нанокантилеверов. Колебания кантилеверов возбуждались электромагнитным полем и регистрировались методом светового рычага. Описание экспериментальной установки и процедуры измерения можно найти в работе [4]. Измерения проводили в воздухе при нормальных условиях. По резонансным кривым определялись резонансные частоты кантилеверов.

На экспериментально полученных резонансных кривых (рис. 3) наблюдались, как правило, не менее двух пиков. Пики могут соответствовать изгибным и крутильным колебаниям кантилевера. Согласно классической теории балок Эйлера—Бернулли собственные частоты изгибных колебаний кантилевера длиной L и толщиной t , состоящего в

направлении оси z (по толщине) из N слоев с толщинами t_i , плотностями ρ_i и модулями Юнга E_i , задаются выражением [5]

$$f_n^{\text{изг}} = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{k_n^2}{2\pi L^2} \left(\frac{\int E(z-z_0)^2 dz}{\sum_{i=1}^N (t_i \rho_i)} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где ω_n — круговая частота; k_n — соответствующая n -й частоте постоянная ($k_n = 1,8751; 4,6941$ для первой и второй моды соответственно); z_0 — координата нейтральной линии кантилевера. Собственные частоты крутильных колебаний кантилевера задаются выражением

$$f_n^{\text{крут}} = \frac{(2n-1)\sqrt{3}}{wL} \left(\frac{\int G(z-z_0)^2 dz}{\sum_{i=1}^N (t_i \rho_i)} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$, w — ширина кантилевера, G — модуль сдвига. Выражения (1) и (2) использовались при расчете собственных частот кантилеверов. При этом кантилеверы полагались трехслойными: внешние слои Cr или Ti толщиной по 5 нм каждый, внутренний слой Al толщиной 30 нм. Использовались следующие значения модулей Юнга, модулей сдвига и плотностей: $E_{Cr} = 279$ ГПа, $E_{Ti} = 112$ ГПа, $E_{Al} = 70$ ГПа, $G_{Cr} = 115$ ГПа, $G_{Ti} = 41$ ГПа, $G_{Al} = 26$ ГПа, $\rho_{Cr} = 7150$ кг/м³, $\rho_{Ti} = 4506$ кг/м³, $\rho_{Al} = 2700$ кг/м³.

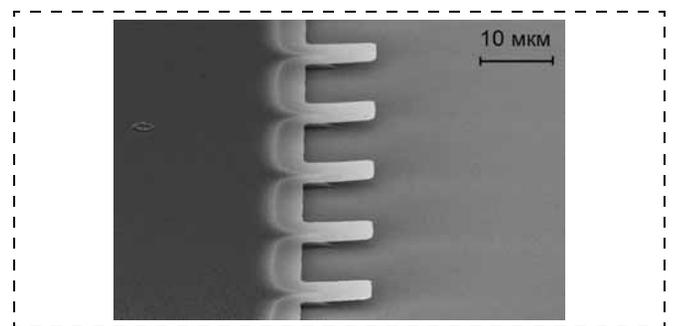


Рис. 2

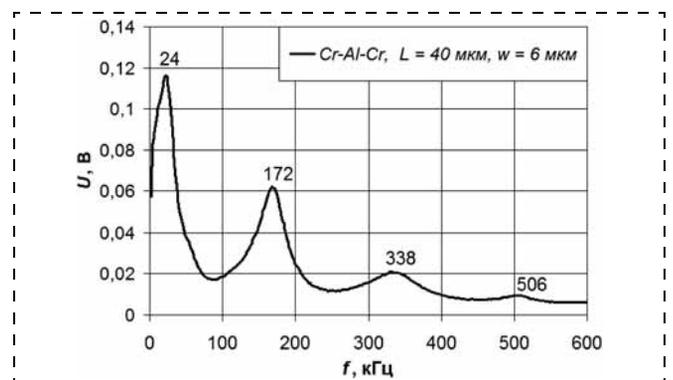


Рис. 3

Добротности кантилеров, рассчитанные по первым двум резонансным пикам, составляли порядка 4. Расчеты показывают, что таким добротностям соответствует сдвиг резонансной частоты относительно собственной не более чем на 3%. Это позволяет не учитывать демпфирование при сравнении измеренных резонансных частот с собственными частотами нанокантилеров.

На рис. 4, а и б показаны зависимости 1-й и 2-й резонансных частот кантилеров Cr—Al—Cr от длины кантилера. Маркеры соответствуют экспериментальным данным, линии — результатам расчетов с помощью выражения (1). Видно, что в случае первой резонансной частоты (рис. 4, а) экспериментальные данные хорошо согласуются с теорией для первой изгибной моды. Характер зависимости соблюдается для кантилеров различной ширины. В случае второй резонансной частоты наблюдается расхождение эксперимента с теорией для второй изгибной моды, особенно у кантилеров длиной 10 мкм (рис. 4, б). Если предположить, что вторая резонансная частота соответствует крутильной моде, то должна наблюдаться обратная зависимость частоты от ширины кантилера (см. выражение (2)). На рис. 4, б такой зависимости не наблюдается.

На рис. 5, а и б показаны экспериментально полученные зависимости 1-й и 2-й резонансных частот кантилеров от ширины кантилера. Видно, что с увеличением ширины резонансные частоты кантилеров увеличиваются. Это говорит о том, что и 1-я, и 2-я частоты не могут соответствовать крутильным модам, так как согласно (2) частоты крутильных мод должны уменьшаться с ростом ширины кантилера. В то же время, согласно (1), частоты изгибных мод не должны зависеть от ширины. Наблюдаемый рост частоты может быть вызван дефектами, возникающими в процессе изготовления кантилеров [6]. Одним из таких дефектов является неполное удаление жертвенного слоя из-под кантилера. На рис. 2 виден остаток слоя α -Si под кантилерами в области крепления к опорной площадке. Чем больше ширина кантилера, тем больше аморфного кремния необходимо удалить, чтобы освободить его. Кантилеры различных длин и ширин освобождались одновременно. Поэтому чем шире был кантилер, тем длиннее была неосвобожденная область и тем меньше была эффективная длина кантилера. Поэтому более широкие кантилеры имели более высокие резонансные частоты изгибных колебательных мод.

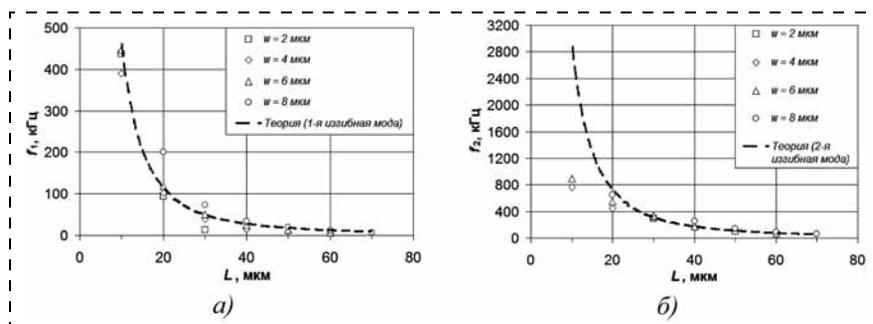


Рис. 4

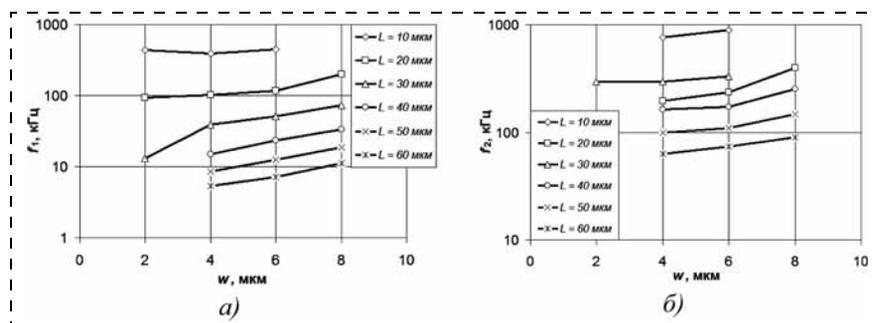


Рис. 5

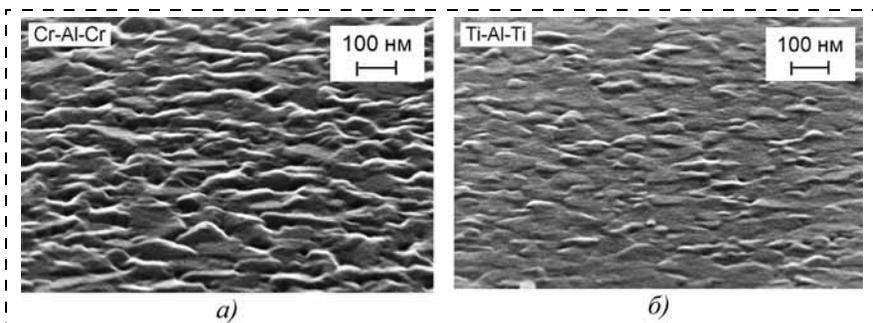


Рис. 6

На рис. 6 показаны СЭМ-изображения поверхности кантилеров Cr—Al—Cr и Ti—Al—Ti, полученные под углом 30° к поверхности. Видна зернистая структура металлической пленки. Латеральные размеры зерен у образцов Cr—Al—Cr и Ti—Al—Ti были одинаковыми и составляли порядка 50...100 нм. Также видно, что неровности на поверхности кантилера Ti—Al—Ti имеют меньшую высоту, чем на поверхности Cr—Al—Cr.

На рис. 7 показаны экспериментально полученные значения 1-й резонансной частоты кантилеров Cr—Al—Cr и Ti—Al—Ti шириной 6 мкм, а также рассчитанные по формуле (1) зависимости 1-й резонансной частоты от длины кантилера. Согласно расчетам, резонансные частоты кантилеров Cr—Al—Cr должны быть несколько выше, чем Ti—Al—Ti. В эксперименте не было обнаружено систематических различий в резонансных частотах кантилеров Cr—Al—Cr и Ti—Al—Ti. Это может говорить о том, что слои Cr и Ti толщиной 5 нм с учетом шероховатости поверхности кантилера практически не отличались друг от друга по упругим свойствам.

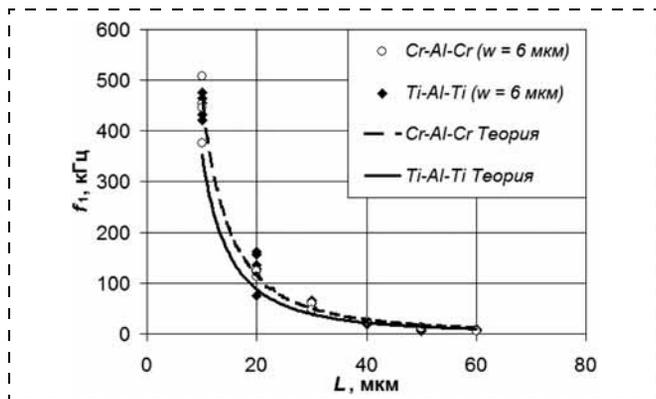


Рис. 7

В работе исследовались резонансные свойства трехслойных металлических кантилеверов Cr—Al—Cr и Ti—Al—Ti толщиной 40 нм. Были экспериментально получены зависимости 1-й и 2-й резонансных частот от длины и ширины кантилеверов. Обе резонансные частоты соответствовали изгибным колебаниям кантилевера. Экспериментально полученные значения 1-й резонансной частоты хорошо согласуются с расчетной зависимостью частоты от длины кантилевера. В случае 2-й резонансной частоты наблюдается расхождение с теорией для кантилеверов длиной 10 мкм. Наблюдается увеличение резонансных частот с ростом

ширины кантилевера. Возможно, это связано с неполным освобождением широких кантилеверов. Cr—Al—Cr кантилеверы имели более шероховатую поверхность, чем Ti—Al—Ti. Разница в шероховатости поверхности могла привести к тому, что кантилеверы двух типов имели практически одинаковые резонансные свойства.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП "Диагностика микро- и наноструктур" при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, а также РФФИ (грант № 10-07-00447-а).

Список литературы

1. Arlett J. L., Myers E. B., Roukes M. L. Comparative advantages of mechanical biosensors // Nature Nanotechnology. 2011. Vol. 6. P. 203—215.
2. Boisen A., Dohn S., Keller S. S. et al. Cantilever-like micromechanical sensors // Reports on Progress in Physics. 2011. Vol. 74, N 3. 036101.
3. Loh O. Y., Espinosa H. D. Nanoelectromechanical contact switches // Nature Nanotechnology. 2012. Vol. 7. P. 283—295.
4. Уваров И. В., Наумов В. В., Аминов М. К. и др. Исследование резонансных характеристик металлических микро- и нанобалок // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 12. С. 45—48.
5. Sandberg R., Svendsen W., Molhave K. et al. Temperature and pressure dependence of resonance in multi-layer microcantilevers // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2005. Vol. 15, V. 8. P. 1454—1458.
6. Guillon S., Saya D., Mazonq L. et al. Effect of non-ideal clamping shape on the resonance frequencies of silicon nanocantilevers // Nanotechnology. 2011. Vol. 22, N 24. 245501.

УДК 681.586.7

Н. С. Земляничков, лаборант-исследователь,
e-mail: skiv89@gmail.com,
Н. Л. Данилова, ст. науч. сотр.,
e-mail: n.danilova@tcen.ru,
В. В. Панков, ст. науч. сотр.,
В. С. Суханов, нач. лаб., e-mail: vs@tsen.ru,
Ю. А. Михайлов, канд. техн. наук, руководитель группы,
ИНМЭ РАН (г. Москва)
НПК "Технологический центр"
(г. Москва, Зеленоград)

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЛОЖНОПРОФИЛИРОВАННЫХ КРЕМНИЕВЫХ МЕМБРАН

Поступила в редакцию 22.01.2013

Приведены результаты исследования тензорезистивных преобразователей давления, изготовленных по микроэлектронной технологии на основе сложнопрофилированных кремниевых мембран со встроенной защитой от перегрузки. Показаны преимущества разработанных преобразователей давления в сравнении с преобразователями давления, созданными на основе кремниевых плоских мембран и мембран с жестким центром.

Ключевые слова: кристалл ЧЭ давления, модуль чувствительного элемента давления (ЧЭД), преобразователь избыточного давления ТДМ-И, преобразователь абсолютного давления ТДМ-А, сложнопрофилированная кремниевая мембрана

Известны различные конструктивно-технологические методы изготовления тензорезистивных кремниевых преобразователей давления с применением объемной или поверхностной микромеханики [1—4]. Кристаллы чувствительных элементов (ЧЭ) давления, полученные с помощью групповых интегральных технологий, позволяют достичь хороших метрологических характеристик, в частности, по нелинейности и гистерезису порядка 0,1...0,5 %. Опыт последних лет в области создания тензорезистивных ЧЭ давления показал, что для улучшения их характеристик необходимо оптимизировать как конструкцию кристалла, так и технологию его изготовления. На смену кристаллов преобразователей с плоской кремниевой мембраной пришли кристаллы с жестким центром [5, 6]. В настоящее время их сменяют кристаллы ЧЭ со сложнопрофилированной мембраной, имеющие значительно лучшие параметры по чувствительности и нелинейности выходного сигнала, в частности, за счет оптимальных размеров нескольких жестких центров и выступов наружного контура мембраны.

Благодаря высокой передаточной характеристике ЧЭ со сложнопрофилированной мембраной можно применять для измерения давления в широком динамическом диапазоне.

Посадка в корпус может значительно ухудшить метрологические характеристики преобразователей и датчиков давления на их основе. Для обеспечения механической развязки кристалла ЧЭ давления от корпуса и с учетом спектра применений разработаны несколько видов модулей ЧЭ давления для преобразователей абсолютного, избыточного и дифференциального давления.

Модуль чувствительного элемента давления (ЧЭД) представляет собой сборку, состоящую из кристалла и переходных деталей в виде кремниевых прокладок и основания [7]. Элементы модуля ЧЭД, как правило, соединяются стеклом при температурах 410...420 °С под давлением в вакууме. Вакуум для соединения ЧЭД не хуже 10^{-6} мм рт. ст. Конструкция модуля ЧЭД обеспечивает развязку кристалла ЧЭД от корпуса, в котором он размещается, в широком интервале температур (от -60 до +125 °С) [8]. Типовая конструкция модуля ЧЭД избыточного (дифференциального) давления показана на рис. 1, абсолютного давления — на рис. 2.

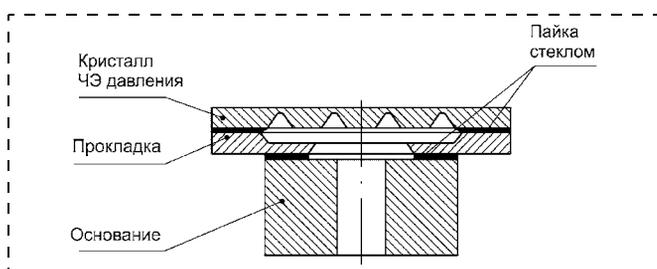


Рис. 1. Конструкция модуля ЧЭД избыточного (дифференциального) давления

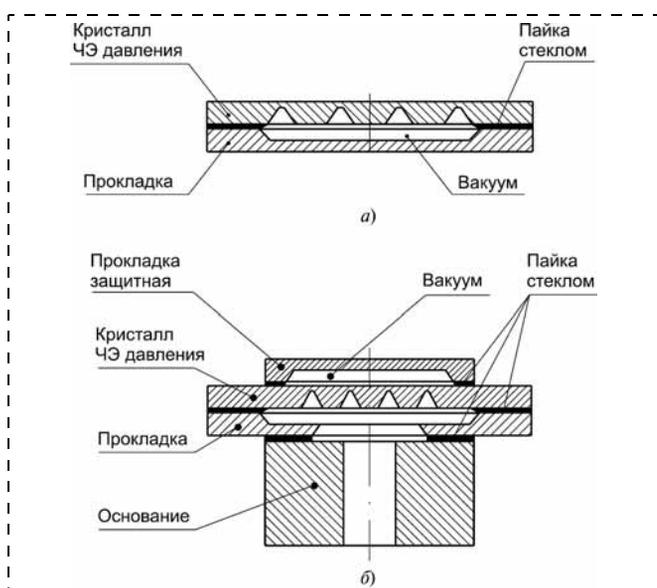


Рис. 2. Модули ЧЭД абсолютного давления: а — базовый вариант модуля ЧЭД абсолютного давления; б — новая конструкция модуля ЧЭД абсолютного давления (ЧЭД-1)

Конструкция модулей ЧЭД принципиально различается для преобразователей абсолютного и избыточного давлений.

В преобразователях избыточного давления конструкция модуля ЧЭД обеспечивает механическую развязку кристалла ЧЭ давления от корпуса и воздействие на мембрану кристалла ЧЭ измеряемого давления с одной стороны, а давления окружающей среды — с другой.

Для преобразователей абсолютного давления конструкция модуля ЧЭД обеспечивает механическую развязку кристалла ЧЭ давления от корпуса, создание под мембраной кристалла вакуумной полости и воздействие на мембрану измеряемого давления с лицевой стороны кристалла ЧЭ.

Из условий необходимости расположения контактных площадок кристалла и выводов корпуса на одном уровне ЧЭД монтируется в углубление корпуса. Корпус преобразователя давления в общепринятом смысле не герметичен. В преобразователях абсолютного давления крышка корпуса имеет штуцер для подсоединения к измеряемой среде, которая воздействует непосредственно на лицевую рабочую поверхность кристалла ЧЭД. В преобразователях избыточного давления корпус имеет аналогичный штуцер для подсоединения к измеряемой среде и дополнительное отверстие в основании корпуса, через которое окружающая среда воздействует на обратную сторону кристалла ЧЭД. Герметичность должна обеспечиваться в части разделения измеряемой и окружающей сред. Конструктивные варианты исполнения преобразователей избыточного давления серии ТДМ-И приведены на рис. 3.

Для защиты конструкции преобразователя давления от воздействия окружающей среды предложена новая конструкция модуля ЧЭД абсолютного давления — ЧЭД-1 (см. рис. 2, б) и, соответственно, новая конструкция преобразователя давления на его основе — ТДМ-А (рис. 4), на которую получен патент на изобретение [8]. Разработанная конструкция модуля ЧЭД-1 позволяет полностью изолировать электрическую схему кристалла и ме-

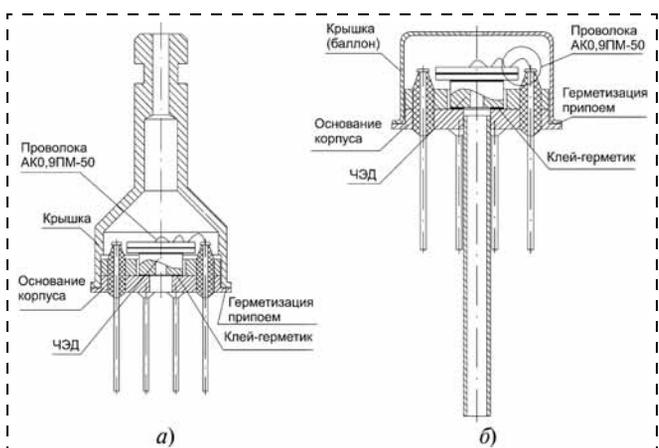


Рис. 3. Конструкция преобразователей избыточного давления

Зависимость основных характеристик от параметров кристаллов ЧЭД

Параметры	Тип кристалла		
	ИПД2.1	ИПД9	ИПД4М
Тип мембраны	Плоская	С жестким центром	
Давление P , МПа	0,1	0,1	0,01
Чувствительность S , мВ/В, не менее	24	24	12
Расстояние между резисторами по краям мембраны a_m , мкм	1960	2190	3380
Расстояние между резисторами по краям жесткого центра a_o , мкм	—	1350	2300
Толщина мембраны, мкм	38 ± 4	33 ± 3	20 ± 3
Размер кристалла, мм ²	4×4	4×4	$6,2 \times 6,2$
Площадь мембраны, мм ²	2,0	2,2	3,4
Площадь жесткого центра, мм ²	—	1,32	2,56
Длина тензорезистора, мкм	—	400	—
Ширина тензорезистора, мкм	—	20	—

таллизованные выводы от воздействия внешней среды. Измеряемая среда воздействует на кристалл с обратной стороны, что существенно повышает надежность конструкции преобразователя давления.

В табл. 1 представлены основные характеристики и геометрические параметры кристаллов ЧЭД серийных изделий, созданных по технологии объемной микромеханики и выпускаемых в 2001—2008 гг. НПК "Технологический центр".

Типовые конструкции кристаллов ЧЭД имеют относительно большие значения нелинейности выходных характеристик (до 0,4 %).

На рис. 5 представлены графики зависимости нелинейности выходного сигнала от диапазона выходного напряжения для типовых конструкций кристаллов ЧЭД серий ИПД9 и ИПД4М, имеющих разные толщины мембран.

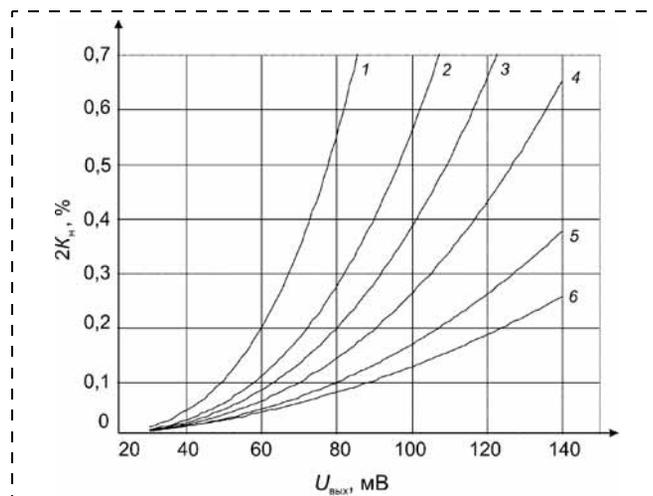


Рис. 5. График зависимости нелинейности $2K_n$ выходной характеристики от диапазона выходного напряжения $\Delta U_{вых}$ и типа кристалла ЧЭД:

1 — ИПД4М, диаметр мембраны $d_M = 20$ мкм; 2 — ИПД4М, $d_M = 24$ мкм; 3 — ИПД9, $d_M = 35$ мкм; 4 — ИПД9, $d_M = 39$ мкм; 5 — ИПД9, $d_M = 42$ мкм; 6 — ИПД9, $d_M = 49$ мкм

Таблица 2

Конструктивные варианты кристаллов ЧЭД

Габаритные размеры мембраны	Тип конструкции			
	1	2	3	4
Площадь тонкой части мембраны S , мм ²	5,63	10,58	7,32	12,69
Размер мембраны L , мм	3,39	4,23	3,39	4,23

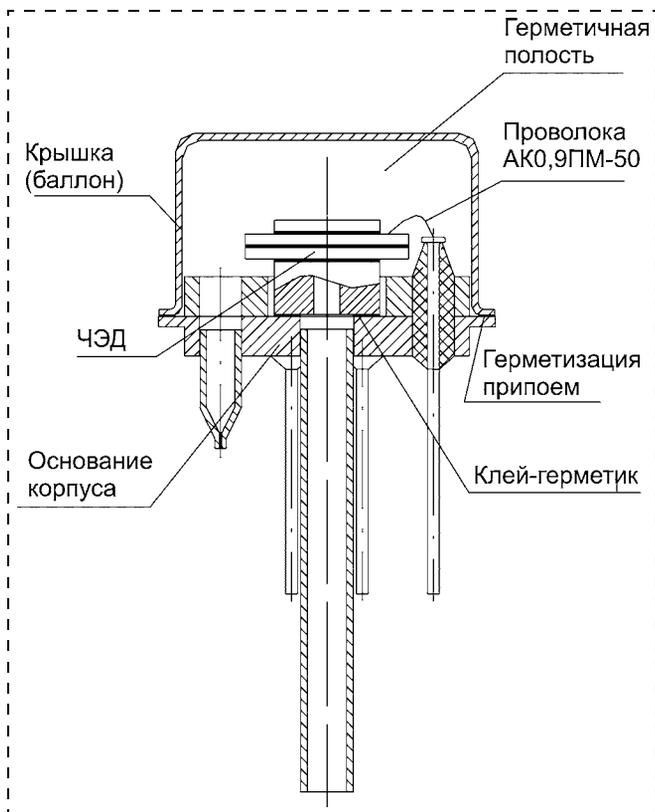


Рис. 4. Конструкция преобразователей абсолютного давления

Применение конструкции кристалла ЧЭ с тремя жесткими центрами [6] имеет ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с конструкциями без концентраторов и с одним жестким центром. На их основе удастся получить воспроизводимые преобразователи давлений с верхним пределом измерения от 2,5 до 25 кПа для кристалла ИПД5,2, от 0,04 до 2,5 МПа для кристалла ИПД6. Кристаллы ЧЭД, созданные в данном конструктиве, показали ряд преимуществ относительно конструкции кристаллов ЧЭД с плоской мембраной и жестким центром, во-первых, в виде высокого выходного сигнала, во-вторых, минимального гистерезиса и нелинейности.

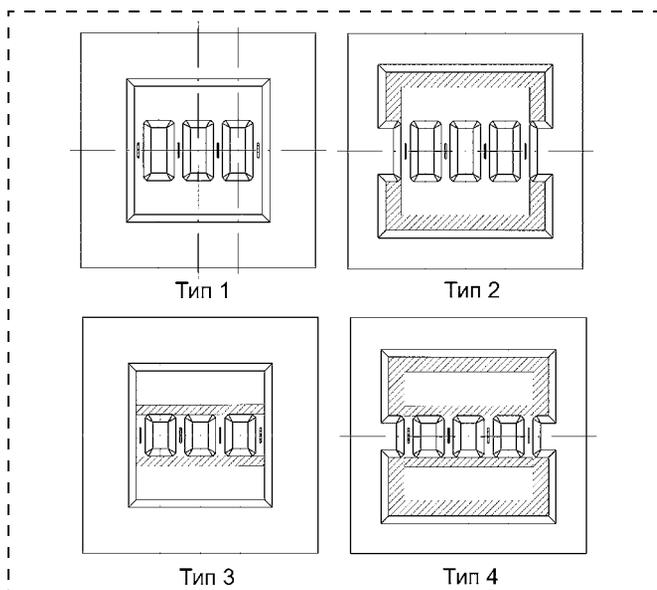


Рис. 6. Варианты конструктивного расположения жестких центров на тонкой мембране

Для исследований были разработаны разные типы конструкций кристаллов ЧЭД, различающихся размером жестких центров на тонкой части мембраны и габаритным размером мембраны при неизменном расположении тензорезисторов мостовой схемы. Габаритные размеры мембраны приведены в табл. 2.

Варианты конструктивного расположения жестких центров на тонкой мембране показаны на рис. 6, 7. Увеличение площади тонкой части мембраны относительно базовой конструкции ЧЭ с тремя жесткими центрами (тип 1) заложено в конструкцию кристаллов за счет формирования на границах мембраны выступов, составляющих по размеру половину жесткого центра.

Для исследований конструкции изготавливались кристаллы ЧЭД разных типов в одном технологическом цикле. При этом все четыре типа кристаллов ЧЭД были получены на каждой пластине опытной партии в одном технологическом процессе, что сводило к минимуму влияние прочих конструктивно-технологических факторов. Для сопоставления результатов были исследованы образцы ЧЭД с одинаковой толщиной мембраны в составе

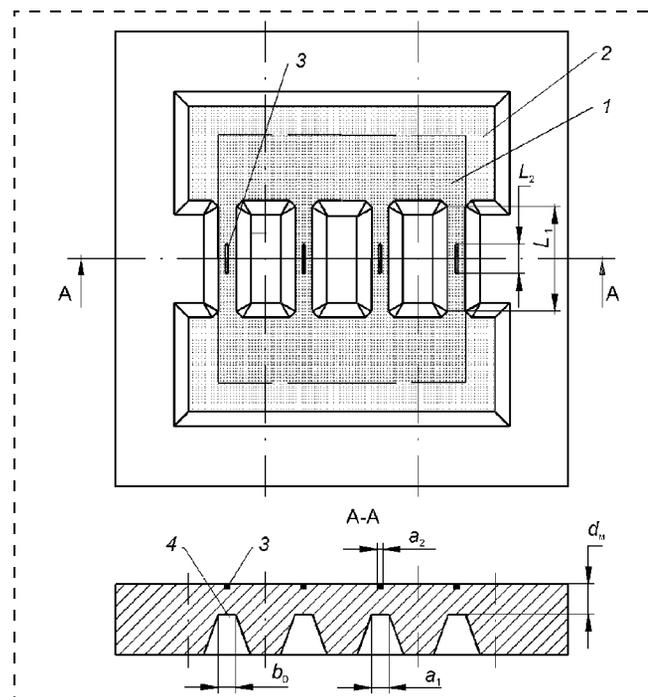


Рис. 7. Конструкция кристалла ЧЭ с рассредоточенным жестким центром:

1 — плоская часть мембраны для ЧЭ типа 1, типа 3; 2 — дополнение к площади мембраны для ЧЭ типа 2, типа 4; 3 — тензорезисторы на лицевой стороне мембраны; 4 — участок дна мембраны под тензорезистором; L_2 — длина тензорезистора; L_1 — длина грани концентратора в плоскости мембраны

преобразователей давления. Результаты исследований приведены в табл. 3.

Из таблицы видно, что конструкция мембраны влияет на основные характеристики кристаллов ЧЭД: чувствительность, нелинейность выходной характеристики и температурный гистерезис "нуля".

Приращение тонкой части мембраны позволило увеличить чувствительность в 2,3 раза относительно базового варианта (тип 1). При этом чем ближе добавляемая площадь к тензорезисторам (тип 4), тем больше прирост чувствительности в расчете на 1 мм^2 . Сохранилась низкая нелинейность ($<0,1\%$) при значительном росте чувствительности. Для кристаллов типа 2 и, особенно, типа 4 снижено значение температурного гистерезиса "нуля". Следует отметить, что значение этого параметра не удастся снизить при цифровой обработке сигнала. Экспери-

Таблица 3

Зависимость параметров кристаллов ЧЭД от конструкции мембраны

Параметр	Обозначение	ЧЭД			
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
Выходное напряжение при $P = 0$, мВ	U_0	+/-6	+/-6	+/-6	+/-6
Диапазон изменения выходного напряжения при номинальном давлении, мВ	$\Delta U_{\text{вых}}$	30,3	54,6	43,04	69,83
Чувствительность, мВ/В	S	11,7	21,1	16,6	26,9
Нелинейность выходной характеристики, %	$2K_H$	0,001	0,024	0,009	-0,031
Температурный гистерезис "нуля", +/-, мкВ	$\Gamma_{\text{ТН}}$	29,0/10,3	22,0/2,7	45,0/9,3	11,4/3,6
Толщина мембраны, мкм	d_M	29...31	29...31	29...31	29...31
Ширина плоской части под резистором, мкм	b_0	11...22	11...22	11...22	11...22
Длина жесткого центра в плоскости мембраны, мкм	L	1200	1200	700	700
Номинальное давление, кПа	P_H	10	10	10	10

ментальные данные показывают, что температурный гистерезис резко возрастает при уменьшении толщины мембраны. Так, для кристалла типа 1 уменьшение толщины мембраны до 23...25 мкм приводит к возрастанию чувствительности \approx до 21 мВ/В, а температурного гистерезиса до 99/60 мкВ.

Таким образом, в результате проведенных исследований определена конструкция сложнопрофилированной мембраны кристаллов, использование которой позволило создать ЧЭД и интегральные преобразователи давления с улучшенными метрологическими параметрами и высокой чувствительностью.

Исследование и измерение параметров проводились на оборудовании ЦКП "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" при финансовой поддержке Минобрнауки России (госконтракт от 19 апреля 2011 г. № 16.513.11.3054).

Список литературы

1. Аш Ж., Андре П., Бофрон Ж. и др. Датчики измерительных систем. В 2-х кн. / Пер. с франц. М.: Мир, 1992. Кн. 2. 424 с.

2. **Проектирование** датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е. П. Осадчего. М.: Машиностроение, 1979. 480 с.

3. **Ваганов В. И.** Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.

4. **Трухачев Б. С., Удалов Н. П.** Полупроводниковые тензопреобразователи. М.: Энергия, 1968. 76 с.

5. **Амеличев В. В., Данилова Н. Л., Михайленко В. А., Панков В. В.** Оптимизация конструктивных и технологических факторов для повышения точностных характеристик интегральных преобразователей давления / IV Междунар. научно-техн. конф. МИЭТ, 19–21 ноября 2002 г. Электроника и информатика 2002. Тезисы докл. Ч. 2. М.: МИЭТ, 2002. С. 7–8.

6. **Игнатъева Е. В., Михайлов Ю. А., Тимошенков С. П.** О проектировании мембраны с жестким центром кристаллов кремниевых тензопреобразователей на давления от 0,025 до 25 МПа // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 2. С. 25–30.

7. **Патент** № 21699912 РФ С1 кл. G01L9/04. Микроэлектронный датчик давления / В. Н. Зимин, А. В. Ковалев, В. В. Панков, С. П. Тимошенков, Н. А. Шелепин. 2001. 06.27 г.

8. **Патент** 2362133 RU С1. Микроэлектронный датчик абсолютного давления и чувствительный элемент абсолютного давления / Н. Л. Данилова, В. В. Панков, В. С. Суханов. 20.07.2009. Бюл. № 20.

УДК 621.3.049.77.002

С. В. Никифоров, мл. науч. сотр.,
С. А. Поломошнов, канд. техн. наук,
Р. Д. Тихонов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
А. А. Черемисинов, аспирант,
НПК "Технологический центр" МИЭТ,
e-mail: CheremisinovA.A@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Поступила в редакцию 24.12.2012

Проведено исследование макета микросистемы мехатронного устройства, изготовленного на магнитотранзисторных преобразователях. Установлено, что микросистема мехатронного устройства с кремниевой консолью, микромагнитом и магнитотранзисторным преобразователем позволяет проводить контроль микроперемещений и вибраций по изменению магнитного поля на резонансных частотах консоли с микромагнитом.

Ключевые слова: магнитотранзистор, МЭМС—микроэлектромеханическая система

В настоящее время широкое распространение получила микромагнитоэлектроника. Это научно-техническое направление возникло в результате синтеза микроэлектроники и преобразователей магнитного поля. Суммарный годовой объем производства изделий микромагнитоэлектроники в мире составляет несколько миллиардов штук. Изделия микромагнитоэлектроники используют в системах

управления производственными процессами, в автомобильной и авиакосмической электронике, в измерительной и вычислительной технике, в дефектоскопии, в медицинских и бытовых приборах [1]. В России изделия микромагнитоэлектроники производят в небольшом количестве.

Развитие этого научно-технического направления возможно при существенном улучшении качества разрабатываемых изделий. Одним из перспективных направлений является создание мехатронных устройств на магнитотранзисторных преобразователях [2].

Для создания микросистемы мехатронного устройства разработан экспериментальный макет на основе магнитотранзисторного преобразователя ЗКБМТБК, который содержит (рис. 1) кремниевую консоль 1 с микромагнитом ЮНКДК25А и кристалл 2 с интегральным преобразователем магнитного поля ЗКБМТБК. Интегральный преобразователь ЗКБМТБК представляет собой трехколлекторный биполярный магнитотранзистор с базой в кармане, изготовленный на кремниевой подложке с проводимостью *p*-типа. Кремниевая консоль приклеена на печатную плату таким образом, что конец

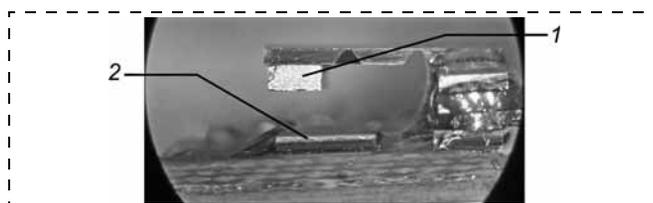


Рис. 1. Фотография макета микросистемы мехатронного устройства: 1 — кремниевая консоль с магнитом; 2 — кристалл магнитотранзистора

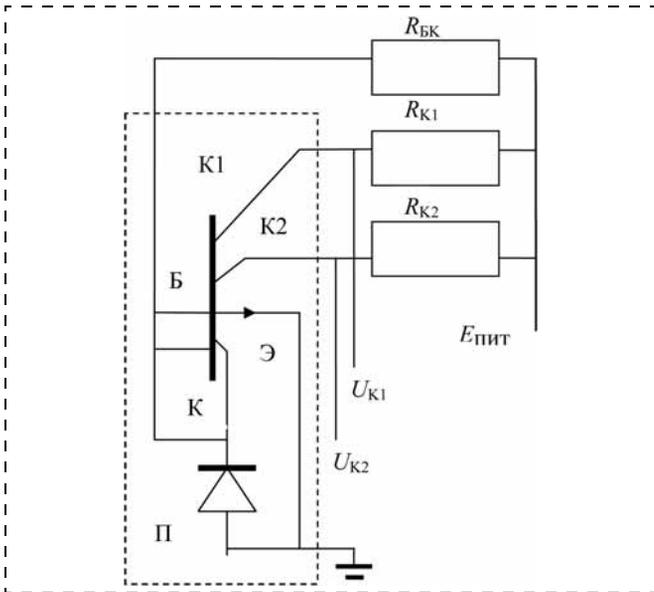


Рис. 2. Схема включения напряжения на электроды магнитотранзистора микроэлектромеханического датчика

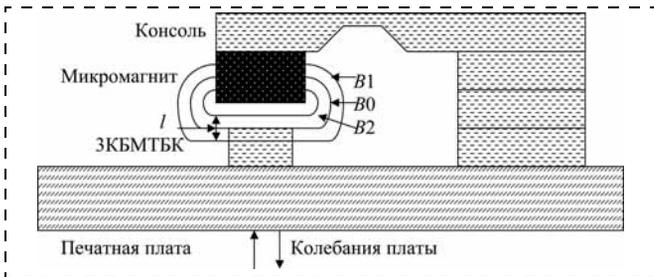


Рис. 3. Схема перемещений микромагнита на консоли относительно магнитотранзистора и изменения магнитной индукции B

консоли с микромагнитом имеет возможность по инерции перемещаться при воздействии механических перемещений перпендикулярно плате. Кристалл ЗКБМТБК приклеен на печатную плату так, что длинная сторона эмиттера расположена в направлении действия магнитного поля. К выводам ЗКБМТБК подключены источники питания через сопротивления нагрузки коллекторов и сопротивление смещения кармана совместно с базой (рис. 2).

При перемещении микромагнита на расстояние l изменяется магнитное поле около магнитотранзистора (рис. 3). Изменение разности напряжений на коллекторах магнитотранзистора соответствует изменениям магнитного поля при механических перемещениях микромагнита, закрепленного на консоли.

Центр коллективного пользования (ЦКП) научного и испытательного оборудования "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" оснащен необходимым оборудованием для измерений и испытаний МЭМС-преобразователей физических величин. Микроперемещения на макет микросистемы мехатронного устройства на основе магнитотранзисторов задает калибровочная станция модели 9155 фирмы TMS. В рабочее место также входят двоярный лабораторный источник питания постоянного тока типа GPS-3303 фирмы G^W INSTEK, цифровой мультиметр

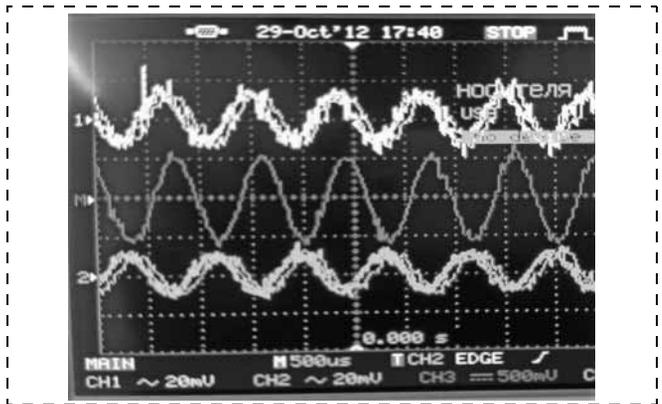


Рис. 4. Осциллограмма напряжения на коллекторах макета микросистемы мехатронного устройства с использованием магнитотранзисторов на резонансной частоте консоли 1200 Гц (1 — U_{K1} ; $U_{K1}-U_{K2}$; 2 — U_{K2})

типа $GDM-8145$ фирмы G^W INSTEK и четырехканальный цифровой осциллограф типа $GDS-2064$ фирмы G^W INSTEK, с помощью которых задается рабочий режим магнитотранзистора и контролируются выходные сигналы напряжения на коллекторах: U_{K1} ; $U_{K1}-U_{K2}$; U_{K2} .

При измерении устанавливалась частота колебаний столика вибростенда 1200 Гц, соответствующая частоте собственных колебаний консоли с микромагнитом с магнитной индукцией 150 мТл и чувствительности магнитотранзистора 11 В/Тл. На осциллограмме рис. 4 амплитуда выходного сигнала магнитотранзистора в виде напряжения на коллекторе К1 составляет +20 мВ, на коллекторе К2 — 20 мВ, между коллекторами — 40 мВ. Таким образом, микроперемещения при вибрации платы передаются консоли и микромагниту. Изменение магнитного поля, воздействующего на магнитотранзистор, фиксируется по выходному сигналу и позволяет определить микроперемещения и вибрации. По сравнению с наиболее часто применяемым емкостным методом контроля перемещений при магнитном методе значительно увеличиваются допустимые пределы амплитуды перемещений без возникновения эффекта залипания.

Можно сделать вывод, что проведенные исследования макета микросистемы мехатронного устройства с кремниевой консолью, с микромагнитом и магнитотранзисторным преобразователем показали, что разработанная конструкция позволяет проводить контроль микроперемещений по изменению магнитного поля на резонансных частотах консоли с микромагнитом. Предложенная структура МЭММС — микроэлектромеханической системы дает возможность магнитного считывания сигнала о перемещениях и вибрации.

Список литературы

1. Баранчиков М. Л. Микромагнитоэлектроника. М.: ДМК Пресс, 2001.
2. Козлов А. В., Королев М. А., Жуков А. А., Тихонов Р. Д., Черемисинов А. А. Влияние конструктивно-технологических параметров на характеристики трехколлекторного биполярного магнитотранзистора // Известия ВУЗов. Электроника. 2012. № 6. С. 43—50.

В. В. Амеличев¹, канд. техн. наук, нач. НИЛ ТМ,
В. Г. Сницар¹, зам. директора по науке,
Д. В. Костюк¹, мл. науч. сотр.,
С. И. Касаткин², д-р техн. наук, ст. науч. сотр.

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение "Научно-производственный комплекс "Технологический центр" МИЭТ,

e-mail: tc@tcen.ru

²Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН,
 e-mail: snv@ipu.ru

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЙ СЕНСОР ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРИБОРОВ СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Поступила в редакцию 07.11.2012

Представлены конструкция и принцип действия высокочувствительного магниторезистивного сенсора для применения в современных приборах считывания информации. Проведен анализ и сделан вывод о практической значимости разрабатываемого сенсора для бесконтактного контроля слабых магнитных полей от проводников с током, находящихся в составе плат и микросхем.

Ключевые слова: бесконтактный контроль, магниторезистивный эффект, магнитное поле, проводник, сенсор, электрический ток

Микромагнитоэлектроника в настоящее время получила широкое распространение в ряде прикладных приложений и продолжает развиваться в новых направлениях. На данный момент в мире разработаны и производят тысячи различных типов изделий микромагнитоэлектроники. Их широко используют в различных системах управления наземными и воздушными транспортными средствами, в дефектоскопии, медицинских приборах, бытовых приборах, в ряде изделий мобильной техники как индивидуального, так и общего применения.

Коллективом НПК "Технологический центр" накоплен многолетний опыт в области технологии изготовления изделий микромагнитоэлектроники. Достигнуты высокие показатели по чувствительности в преобразователях с анизотропным магниторезистивным эффектом, получены спин-вентильные наноструктуры с гигантским магниторезистивным эффектом, ведутся исследования конструкций и технологий изготовления спин-туннельных наноструктур.

Одним из перспективных приложений высокочувствительных магниторезистивных наноструктур является создание диагностических приборов с прямым считыванием электрического сигнала токовых шин. Для получения информационной картины о качестве прохождения сигнала в токовых шинах на плате или микросхеме необходим миниатюрный высокочувствительный сенсор магнитного поля и система высокоточного позиционирования и сканирования. Современные конструкции магниторезистивных элементов достаточно миниатюрны и могут быть расположены на небольшой плоской области кремниевого кантилевера или кристалла, в непосредственной близости от заостренного края выступающего микроэлемента (рис. 1). Если же монтировать данный сенсор в штатное крепление на атомно-силовом микроскопе (АСМ), то можно проводить прямое измерение магнитного поля, образованного вокруг проводника с током, с помощью хорошо отработанной системы сканирования и позиционирования. При этом методика сканирования поверхности с помощью АСМ, позволяющая достаточно точно определить микротопографию токовых проводников, должна быть дополнена методикой измерения электрического сигнала с магниторезистивного сенсора, что позволит определить направление и силу токов в них.

Преимущество сенсора на основе тонкопленочных магниторезистивных наноструктур заключается не только в высокой чувствительности и большом динамическом диапазоне, но и в том, что ось чувствительности всегда направлена параллельно плоскости, на которой он сформирован. Технологии микросистемной техники позволяют создавать микромеханические структуры с различной ориентацией плоской поверхности, расположенной под магниточувствительным элементом, относительно направления вектора магнитной индукции. Таким образом, с помощью магниторезистивного сенсора, сформированного на кремниевом кантилевере (см. рис. 1), можно регистрировать как нормальную составляющую вектора магнитной индукции B_n , так и тангенциальную составляющую B_t .

Конструкция сенсора представляет собой микромеханический консольный элемент 2 (кантилевер) с тонкопленочным магниторезистором, находящимся у края кремниевого кристалла заостренной формы. Для повышения чувствительности к B_n магниторезистор может быть дополнен тонкопленочным микроконцентратором магнитного поля.

Принцип работы магниторезистивного сенсора заключается в регистрации нормальной составляющей

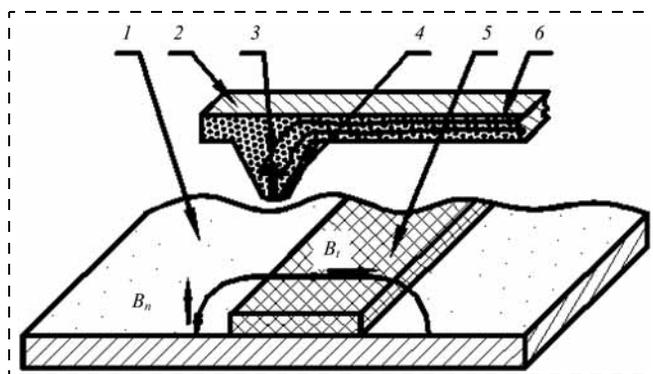


Рис. 1. Эскиз кремниевого кантилевера с магниторезистивным элементом у остроконечного края

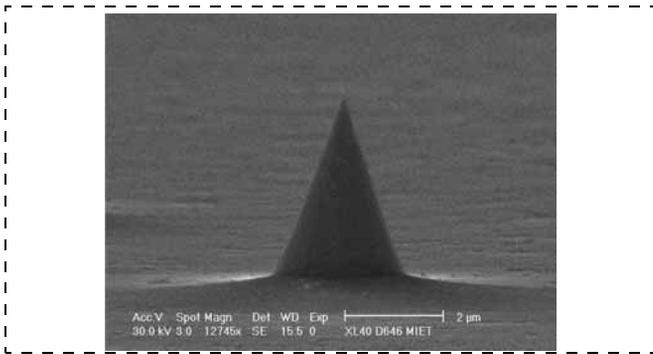


Рис. 2. Фотоснимок низкопрофильного остроконечного кремниевого микроэлемента кантилевера

ляющей B_n магнитного поля, созданного проводником 5, расположенным на подложке 1. Микроконцентраторы 4 субмикрометрового размера фокусируют B_n на активную область тонкопленочного магниторезистивного элемента 3, включенного в мостовую схему преобразователя, с которого дифференциальный сигнал поступает на схему усиления и далее для математической обработки в ПЭВМ [1].

Отработанная технология формирования остроконечных кремниевых кантилеверов при совмещении с технологией тонкопленочных магниторезистивных наноструктур может быть использована для создания прецизионного инструмента контроля токов в проводниках современных микросхем. При этом конструктивной особенностью такого кантилевера является относительно небольшая высота кремниевой иглки (рис. 2), рядом с которой может быть сформирован миниатюрный магниторезистивный элемент.

В конструкции кантилевера с низкопрофильным остроконечным кремниевым микроэлементом магниторезистивный элемент, чувствительный к B_p , будет находиться в 4...5 мкм от поверхности исследуемого образца (рис. 3). При этом принцип управления системы сканирования и позиционирования "кремниевый кантилевер—объект исследования" остается тот, который обычно используется у АСМ. Для визуализации токовой диаграммы объекта сканирования потребуется разработка соответствующего программного обеспечения, позволяющего осуществить привязку к топографии, полученной с помощью кремниевой иглки.

Для того чтобы оценить значения индукции магнитных полей вокруг токовых шин была создана математическая модель проводника с током на основе закона Био—Савара—Лапласа. Анализ расчетов с помощью созданной модели токовых проводников



Рис. 3. Схематичное изображение кремниевого кантилевера

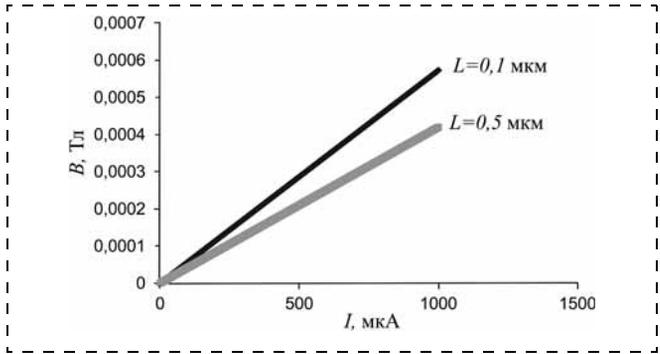


Рис. 4. Зависимость индукции магнитного поля от силы тока в проводнике диаметром 1,0 мкм на расстоянии 0,1 и 0,5 мкм

диаметром 0,01...10 мкм, с протекающими в них токами 1...1000 мкА, показал, что значение индукции магнитного поля у поверхности проводника, на расстоянии 0,1...0,5 мкм составляет 0,01...0,6 мТл (рис. 4). Такие значения индукции магнитного поля достаточно хорошо регистрируют магниторезистивные преобразователи магнитного поля с анизотропным магниторезистивным эффектом (АМР). Крутизна преобразования АМР сенсоров обычно составляет 0,1...1,0 мВ/(Э·В), при значении магниторезистивного эффекта 1,5...2,0 %.

Убывание магнитного поля от поверхности проводника происходит обратно пропорционально расстоянию, поэтому на удалении от поверхности в 4...5 мкм целесообразнее использовать магниторезистивный элемент с гигантским магниторезистивным (ГМР) эффектом. В настоящее время известны различные наноструктуры, обладающие ГМР эффектом от 5 до 400 % [2, 3].

Таким образом, разработанная совмещенная технология изготовления магниторезистивного элемента на микромеханическом кантилевере позволит создавать новые диагностические приборы для контроля качества печатных плат и современных микросхем.

Представленные результаты получены при выполнении работы в рамках Федеральной целевой программы "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники на 2008—2013 годы", Государственного контракта № 16.426.11.0033 от 15 июня 2011 г., с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" на базе НПК "Технологический центр".

Список литературы

1. Пат. 2139602 Российская Федерация, МПК Н 01 L43/08. Магниторезистивный датчик / Касаткин С. И., Киселева И. Д., Лопатин В. В., Муравьев А. М.; заявитель и патентообладатель Войсковая часть 35533 — № 98106254/28; заявл. 02.04.1998; опубл. 10.10.1999.
2. Касаткин С. И., Муравьев А. М., Плотникова Н. В., Амеличев В. В., Галушков А. И., Гамарц И. А., Лопатин В. В., Сауров А. Н. Анизотропные магниторезистивные датчики магнитного поля и тока // Автоматика и телемеханика. 2009. № 6. С. 141—152.
3. Касаткин С. И., Муравьев А. М., Плотникова Н. В., Амеличев В. В. и др. Магниторезистивные нанозаготовки для систем контроля // Датчики и системы. 2009. № 8. С. 2—5.

УДК 621.396.677.3

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф., директор,
e-mail: infseras2010@yandex.ru,
Институт СВЧ полупроводниковой электроники
РАН

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ ДЛЯ СВЧ И КВЧ ДИАПАЗОНОВ

Поступила в редакцию 24.02.2013

Показана возможность создания российских систем на кристалле (СнК) для СВЧ и КВЧ диапазонов частот, включающих интегрированные антенны, усилители, МЭМС-коммутаторы, преобразователи частоты и генераторы, управляемые напряжением. Все микросхемы производятся на основе единой базовой технологии изготовления монокристаллических интегральных схем с использованием РНЕМТ и МНЕМТ гетероструктур арсенида галлия, что позволяет интегрировать их в единую СнК, обеспечивающую малые потери в тракте между элементами системы, низкий уровень шумов и большую передаваемую мощность. Приведены измеренные характеристики полученных в ИСВЧПЭ РАН МИС в сравнении с зарубежными аналогами для диапазона от 5 до 60 ГГц.

Ключевые слова: система на кристалле (СнК), микроэлектромеханические системы (МЭМС), монокристаллические интегральные схемы (МИС), арсенид галлия (GaAs), нитрид (GaN), антенна, антенна на кристалле, малошумящий усилитель (МШУ), усилитель мощности (УМ)

ИСВЧПЭ РАН в последние годы проводил НИР по созданию встроенных антенн и МЭМС-коммутаторов для диапазонов частот 5 ГГц и 10...12 ГГц в рамках ФЦП "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" на 2008—2015 годы по заказу Минобрнауки России. В результате разработаны новые технологические приемы и конструктивно-технические решения, на которые получены свидетельства о регистрации топологий интегральных схем [1—6].

Низший тип резонанса в антенне возникает при длине излучателя $L \approx \lambda/2$, где $\lambda \approx \lambda_0/\sqrt{\epsilon_r}$; ϵ_r — диэлектрическая проницаемость подложки; λ_0 — длина волны в вакууме. Таким образом, габаритные размеры антенны пропорциональны длине волны и обратно пропорциональны диэлектрической проницаемости подложки, т. е. при увеличении частоты, а также при переходе на наногетероструктуры АЗВ5 с большей диэлектрической проницаемостью размер антенны будет уменьшаться [7].

Эти технологические достижения позволят от традиционной схемы ячейки активной фазированной антенной решетки (АФАР) (рис. 1) перейти к схеме с индивидуальными встроенными антеннами для передающего и приемного трактов (рис. 2), реализуемой в виде одной или нескольких монокристаллических интегральных схем.

Данная схема обеспечивает малые потери в тракте между малошумящим усилителем (МШУ) и антенной, что снижает коэффициент шума приемного тракта, повышает передаваемую мощность передающего тракта. МЭМС коммутатор на входе усилителя мощности (УМ) оперирует сигналом малого уровня по сравнению с первой схемой.

В качестве основной базовой технологии создания СВЧ и КВЧ монокристаллических интегральных схем (МИС) применяются РНЕМТ и МНЕМТ гетероструктуры на арсениде галлия. Основные параметры гетероструктур приведены в табл. 1.

При создании систем на кристалле (СнК) с базовой технологией РНЕМТ на пластине арсенида галлия формируются МИС УМ или МШУ и встроенные антенны [8].

На рис. 3 изображено поперечное сечение пластины. Пассивные элементы формируются на непроводящем слое, образованном путем жидкостного химического травления активных проводящих слоев гетероструктуры.

Следует отметить, что создание РНЕМТ МИС связано с развитием электронно-лучевой литографии в ИСВЧПЭ РАН на базе электронно-лучевого нанолитографа RAITH150-TWO. На рис. 4 показано, что полученные в ИСВЧПЭ РАН характеристики транзисторов ложатся на прямую, отражающую зависимость внутренней частоты отсечки транзисторов от длины затвора, составленную в

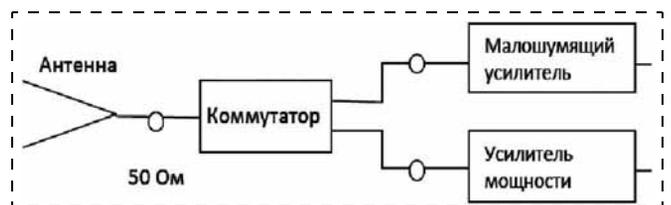


Рис. 1. Схема с общей антенной для малошумящего усилителя и усилителя мощности

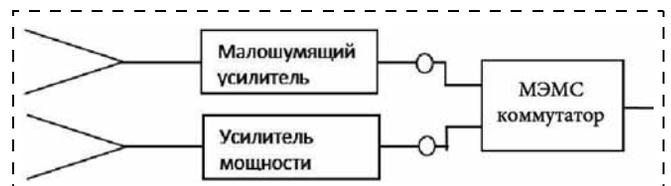


Рис. 2. Схема с индивидуальной встроенной антенной для малошумящего усилителя и усилителя мощности

Таблица 1

Тип образца	Содержание In в канале, %	T = 300 К		T = 77 К	
		n_S^* , 10^{12} см^{-2}	$\mu_{2\text{DEG}}^{**}$, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	n_S , 10^{12} см^{-2}	$\mu_{2\text{DEG}}$, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
PHEMT на GaAs	21	1,68	7690	2,1	27 100
dd-PHEMT на GaAs	21	2,3	7500	2,5	20 900
MHEMT на GaAs	34	2,6	10 390	2,42	41 300
	53	3,2	12 176	3,15	32 853

Примечание:
 n_S^* — слоевая концентрация, 10^{12} см^{-2} .
 $\mu_{2\text{DEG}}^{**}$ — подвижность электронов, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

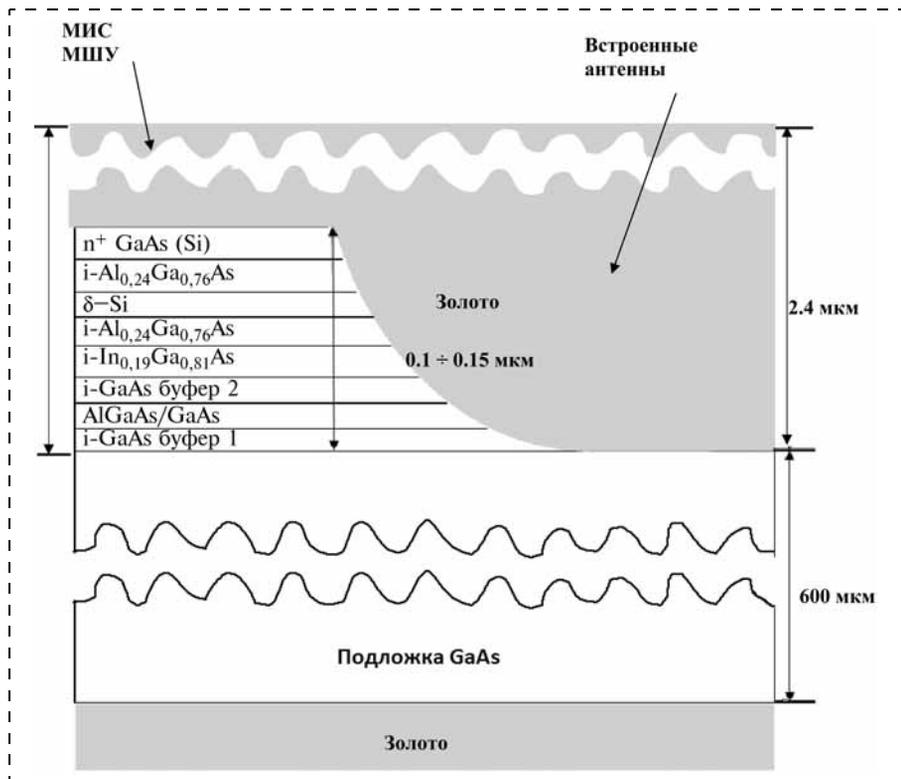


Рис. 3. Поперечное сечение пластины для активных и пассивных элементов СнК

ETRI (Научно-исследовательский институт электроники и телекоммуникаций, Республика Корея) и соответствуют мировому уровню.

В качестве иллюстрации приведен ряд полученных в ИСВЧПЭ РАН грибообразных затворов с 2008 по 2011 г. (рис. 5).

минимумах достигает значений 1...1,3, что соответствует значениям потерь отражения порядка -18...-35 дБ.

Следует отметить, что в мире наметилась тенденция по использованию МЭМС коммутаторов в СВЧ диапазоне. Основные параметры МЭМС коммутатора, разработанные в МИРЭА и изготовленные по технологии ИСВЧПЭ РАН, и его зарубежных аналогов

Примеры разработанных СнК, включающих антенный элемент и усилитель, представлены на рис. 6. Размеры СнК: $9,5 \times 6,5$ мм для 5 ГГц, $5,4 \times 6,5$ мм для диапазона частот 10...12 ГГц.

В процессе измерений антенный излучатель устанавливался на земляной экран разных размеров, что влияет на форму диаграммы направленности. При исследовании антенны размером 6×8 мм для 5 ГГц размер земляного экрана составил 30×30 мм. Минимум потерь отражения составил -13 дБ на частоте 5,5 ГГц (коэффициент стоячей волны (КСВ) ~1,6), полученная диаграмма направленности близка к кардиоидной (рис. 7, а, б). Область излучения расположена над антенным элементом, направление максимальной интенсивности излучения перпендикулярно плоскости антенного элемента. Топология антенного элемента для диапазона 10...12 ГГц построена на основе топологии антенны для 5 ГГц, но с уменьшением размеров в соответствии с меньшей длиной волны, так что размер составил $3,8 \times 5$ мм. Измерения проводились при земляном экране большего размера, а именно 50×50 мм. Измеренная диаграмма направленности оказалась тороидальной и имеет два лепестка (рис. 7, в). Полученные при измерениях потери отражения имеют два резко выраженных минимума: в полосе 9...10 ГГц и 10,6...10,8 ГГц (рис. 7, г). При этом КСВ в минимумах достигает значений 1...1,3, что соответствует значениям потерь отражения порядка -18...-35 дБ.

Таблица 2

Варианты СВЧ МЭМС	Размер, мкм	Напряжение, В	Время переключения, мкс	Емкость, пФ	"Изоляция", дБ	Диапазон частот, ГГц	Потери, дБ	Материал подложки
ИСВЧПЭ РАН	750×250	10...20	—	0,2...2,5	-35 (24 ГГц)	20...25	-0,2	GaAs
Raytheon	310×120	30...50	3	1...6	-20 (10 ГГц)	10...40	-0,07	Si, GaAs
Мичиганский университет	600×250	6...20	20...40	1...3	-25 (30 ГГц)	1...40	-0,1	Si, GaAs
Мичиганский университет	300×90	15...25	6...15	0,5...3	-30 (30 ГГц)	10	-0,03	Si, GaAs
HRL	140×100	40...60	2...4	0,002	-44 (2...4 ГГц)	5...10	-0,2	GaAs

Примечание: "Изоляция" — режим пропускания в открытом и закрытом режимах (см. рис. 9).

Показатель	МИС МШУ	Зарубежный аналог Triquint TGA4511-EPU
Диапазон частот, ГГц	30...37,5	30...38
Коэффициент усиления, дБ, не менее	18	15...18
Коэффициент шума, дБ, не более	2,5...4	2,5...3
КСВ входа, не более	2	2,2
Напряжение питания, В	5	3,5
Ток потребления, мА	Не более 60	110
Габаритные размеры, мм	1,15 × 1,0	1,8 × 2,7

Показатель	МИС усилитель средней мощности	Зарубежный аналог Avago AMMC-5040
Диапазон частот, ГГц	30...37,5	30...38
Коэффициент усиления, дБ, не менее	18	25
Выходная мощность по снижению усиления 1 дБ, мВт, не менее	300	100
КСВ входа, не более	2	2,2
Напряжение питания, В	5	4,5
Ток потребления, мА	Не более 500	300
Габаритные размеры, мм	1,0 × 1,6	0,76 × 1,7

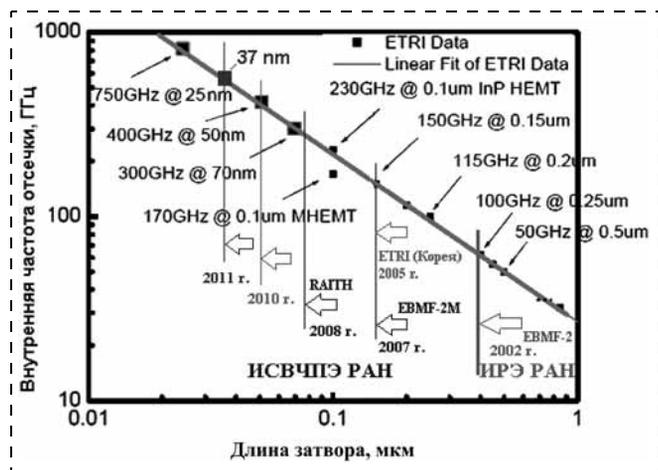


Рис. 4. Развитие технологий в ИСВЧПЭ РАН: уменьшение длины затвора в сравнении с мировым уровнем

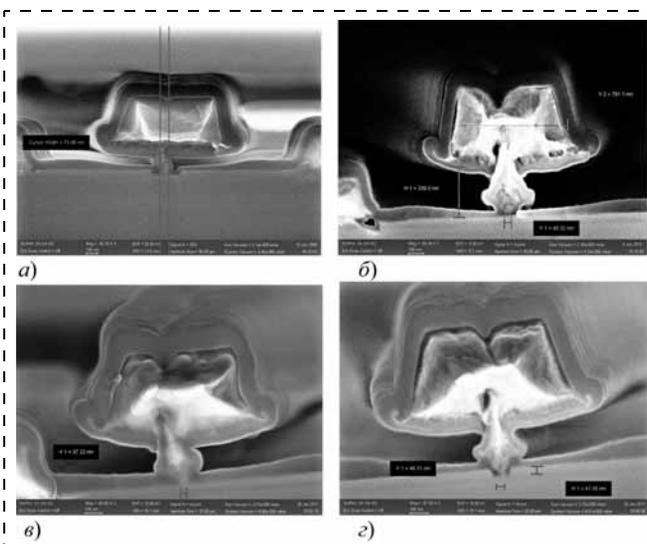


Рис. 5. Грибообразные затворы, полученные с помощью электронно-лучевого нанолитографа RAITH150:

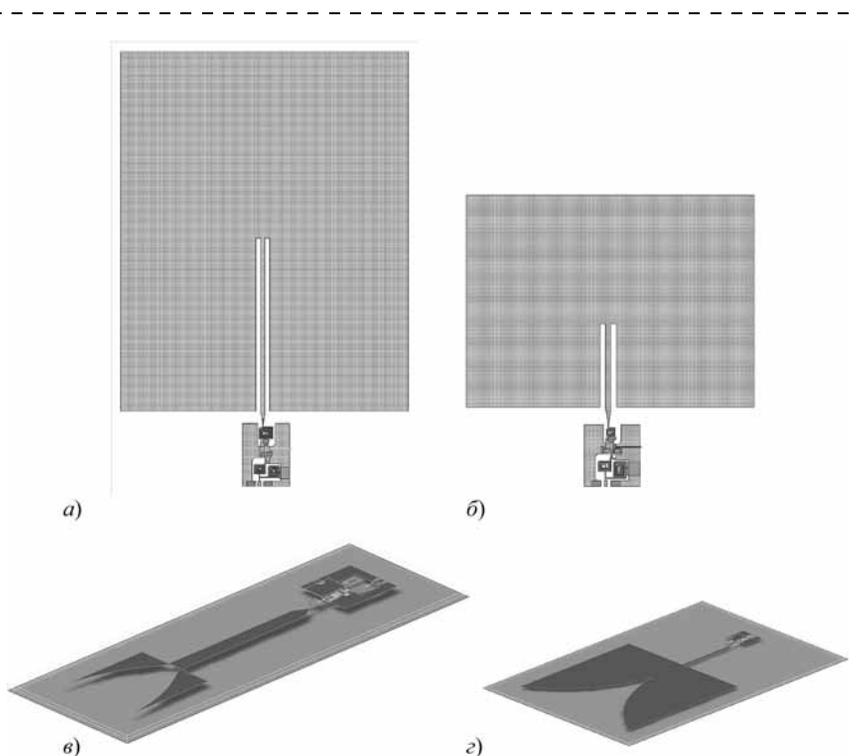
a — 75 нм, 2008 г.; б — 50 нм, 2010 г., в — 41 нм, 2011 г.; г — 37 нм, 2011 г.

для диапазонов 1...40 ГГц сведены в сравнительную табл. 2. Их внешний вид представлен на рис. 8.

Для формирования МЭМС коммутатора использовались те же технологические приемы и имеющееся технологическое оборудование, что и при формировании усилителей и антенн на подложках GaAs. Изготовление переключателей в виде мембран с емкостным соединением возможно с использованием отработанного при изготовлении МИС на GaAs технологического приема

Рис. 6. Топология и внешний вид всей SnK, включающей антенные элементы прямоугольного типа (а, б) и типа Вивальди (в, г):

а — для 5 ГГц; б — для 10...12 ГГц; в — МШУ для 10...12 ГГц; г — УМ для 5 ГГц



формирования "воздушных мостов". На рис. 9 представлены полученные с помощью векторного анализатора потери пропускания МЭМС коммутатора в открытом и закрытом режимах.

Важно отметить, что в ИСВЧПЭ РАН продолжается освоение крайне высокочастотного (КВЧ) диа-

Таблица 5

Показатель	МИС смеситель	Зарубежный аналог НИТТИТЕ НМС266
Диапазон частот, ГГц	30...37,5	20...40
Диапазон частот гетеродина, ГГц	18	10...20
Диапазон промежуточных частот (ПЧ), ГГц	1...2	1...3
Коэффициент шума, дБ, не более	9	12
КСВ входа, не более	2	2,2
Развязка сигнал гетеродина — входной сигнал, дБ, не менее	40	20
Развязка сигнал гетеродина — выход ПЧ, дБ, не менее	40	48
Напряжение питания, В	6	—
Ток потребления, мА	Не более 80	—
Габаритные размеры, мм	1,9 × 2,5	1,34 × 1,5

пазона частот (30...300 ГГц) и создание первого комплекса МИС для К (30...40 ГГц) диапазона. В рамках ФЦП "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" на 2008—2015 годы по заказу Госкорпорации "Росатом" создан комплект МИС, включающий:

- монолитную интегральную схему трехкаскадного маломощного усилителя на основе РНЕМТ наногетероструктур арсенида галлия;
- монолитную интегральную схему трехкаскадного усилителя средней мощности на основе НЕМТ

Таблица 6

Показатель	МИС генератор, управляемый напряжением	Зарубежный аналог НИТТИТЕ НМС398QS16G
Диапазон частот, ГГц	15...18	14...15
Число выходных каналов	2	1
Выходная мощность в канале, мВт	5...10	2...4,6
Подавление второй гармоники дБ, не менее	15	12
Напряжение питания, В	5	5
Ток потребления, мА	Не более 200	260
Габаритные размеры, мм	1,4 × 2,2	В корпусе 4 × 6,2

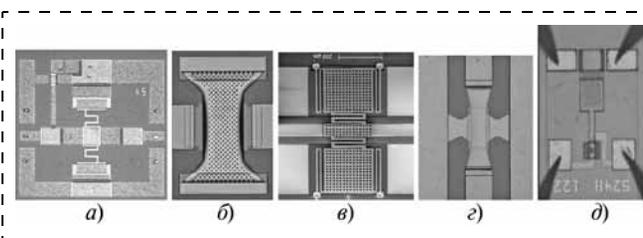
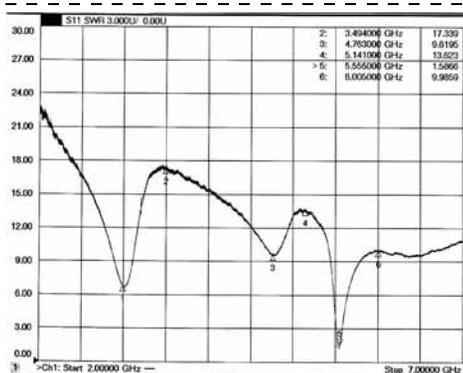
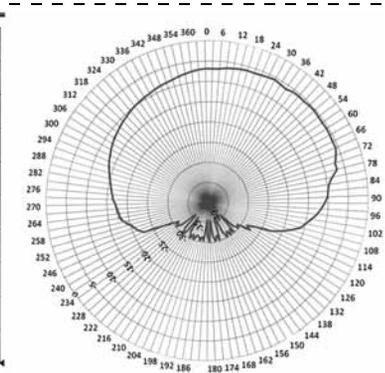


Рис. 8. Внешний вид СВЧ МЭМС коммутаторов:

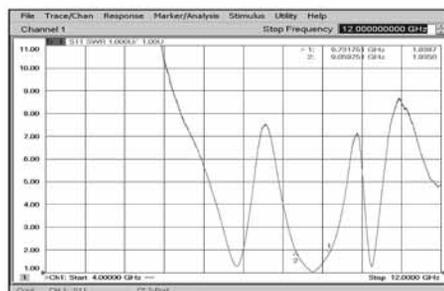
a — выполнен в ИСВЧПЭ РАН; *b* — в компании Raytheon; *c* и *d* — в Мичиганском университете; *d* — в лаборатории Hughes Research



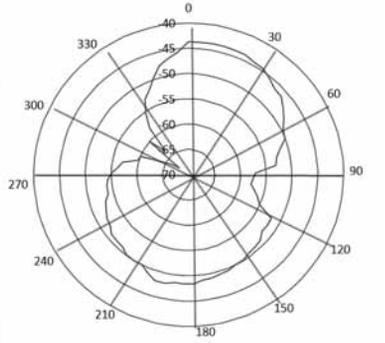
a)



b)



v)



z)

Рис. 7. Потери отражения и диаграмма направленности антенных элементов:

a и *b* — для 5 ГГц; *v* и *z* — для диапазона 10...12 ГГц

наногетероструктур нитрида галлия;

- монолитную интегральную схему резистивного смесителя с активными элементами в транзисторном включении на основе РНЕМТ наногетероструктур арсенида галлия;
- монолитную интегральную схему генератора, управляемого напряжением, на основе РНЕМТ наногетероструктур арсенида галлия.

Полученные характеристики МИС и их зарубежных аналогов приведены в табл. 3—6. На рис. 10, 11 (см. третью сторону обложки) и рис. 12 представлены фотографии МИС, входящих в комплект.

Впервые в России разработаны и изготовлены монолитные интегральные схемы (МИС) маломощных усилителей (МШУ) P-, L-, C-, X- и K-диапазонов частот на широкозонных НЕМТ гетероструктурах AlGaIn/AIn/GaN отечественного производства, имеющие низкий коэффициент шума, сравнимый с коэффициентом шума традиционных МШУ на РНЕМТ гетероструктурах

**Примерный перечень СВЧ приборов, изготавливаемых в ИСВЧПЭ РАН
по "Технологии производства СВЧ МИС с длиной затворов транзисторов 0,25 мкм"**

Дискретные псевдоморфные (PHEMT) маломощные полевые транзисторы на подложках GaAs в бескорпусном исполнении									
Номер изделия	Описание	F , ГГц	КУ, дБ		КШ, дБ	$U_{пр}$, В	$I_{пр}$, мА	Ближайший аналог	Стоимость (розн/опт)
W174p0,25×120	0,25×120 мкм PHEMT	0...18	>13 (10 ГГц)	50/130	0,4 дБ (10 ГГц)	3	15	MGF-4919G (Mitsubishi)	4,14/3,4 \$
								MGFATF-36077 (Agilent)	5,32/4,4 \$
W174p0,25×300	0,25×300 мкм PHEMT	0...22	>14 (10 ГГц)	50/130	<1,0 дБ (10 ГГц)	3	37	TGF4350 (TriQuint)	11,5 \$
Дискретные широкозонные мощные полевые транзисторы (HEMT) на основе гетероструктур AlGaIn/(AlN)/GaN на подложках из сапфира и SiC в бескорпусном исполнении									
Номер изделия	Описание	F , ГГц	F_i/F_{max} , ГГц	КУ, дБ	$P_{вых}$, дБм	$U_{пр}$, В	$I_{пр}$, мА	Ближайший аналог	Стоимость (розн/опт)
W1285_0,25×600 с.26	0,25×600 мкм HEMT на SiC	0...18	30/70	>15 (10 ГГц)	> 35	28	200	—	—
W1285_0,25×1000 с.26	0,25×1000 мкм HEMT на SiC	0...18	30/70	>14 (10 ГГц)	> 37	28	320	—	—
W1285_0,25×1200 с.26	0,25×1200 мкм HEMT на SiC	0...18	30/70	>14 (10 ГГц)	>38	28	400	TGF2023-01 (TriQuint)	53/45 \$
Маломощные усилители (МИС) на основе PHEMT на подложках GaAs									
Номер изделия	Описание	F , ГГц	КУ, дБ	КШ, дБ	$P_{вых}$, дБ, дБм	$U_{пр}$, В	$I_{пр}$, мА	Ближайший аналог	Стоимость (розн/опт)
LNA3_0408	Полностью интегрированная ММИС МШУ 0,25 мкм PHEMT	0,4...0,8	> 30	< 2	> 18	5	< 60	MGA-631P8 (Avago Tech.)	8/4 \$
LNA4_1020	Полностью интегрированная ММИС МШУ 0,25 мкм PHEMT	1...2	> 30	< 2	> 18	5	< 60	MGA-632P8 (Avago Tech.)	8/4 \$
Маломощные усилители (МИС) на основе широкозонных HEMT гетероструктур AlGaIn/(AlN)/GaN на подложках из сапфира и SiC для применения в экстремальных условиях									
Номер изделия	Описание	F , ГГц	КУ, дБ	КШ, дБ	$P_{вых}$, дБ, дБм	$U_{пр}$, В	$I_{пр}$, мА	Ближайший аналог	Стоимость (розн/опт)
AlGaIn_WB_LNA1	Широкополосная маломощная ММИС на основе 0,25 мкм AlGaIn HEMT	0,1...1	>22	<1,5	>20	7...15	<60		
AlGaIn_CBand_LNA3	ММИС МШУ для С-диапазона на основе 0,25 мкм AlGaIn HEMT	4,5...8,5	>20	<2,5	>18	3...15	120		
Усилители мощности (МИС) на основе широкозонных HEMT гетероструктур AlGaIn/(AlN)/GaN на подложках из сапфира и SiC для применения в экстремальных условиях									
Номер изделия	Описание	F , ГГц	КУ, дБ	КШ, дБ	$P_{вых}$, дБ, дБм	$U_{пр}$, В	$I_{пр}$, мА	Ближайший аналог	Стоимость (розн/опт)
UWB_PA1 С27, УМ v.1.1	Сверхширокополосная средномощная ММИС с каскадом на основе 0,25 мкм AlGaIn HEMT	0,03...3	>18	<3,5	>30	28	<200		
UWB_PA2 С27, УМ v.5.1	Сверхширокополосная средномощная трехкаскадная ММИС на основе 0,25 мкм AlGaIn HEMT	0,03...4	>30	—	>33	28	240		
UWB_PA3 С27, УМ v.4.1	Сверхширокополосная трехкаскадная ММИС на основе 0,25 мкм AlGaIn HEMT с открытым выходом	0,03...4	>32	—	>38	28	320	RF3826 (RFMD)	770 \$
PA4_1020 С28, УМ v.4.1	Трехкаскадный 1—2 GHz ММИС УМ на основе 0,25 мкм AlGaIn HEMT с открытым выходом	1...2	>32	—	>38	28	320		
PA5_1020	Полностью интегрированный ММИС УМ 1—2 GHz на основе 0,25 мкм AlGaIn HEMT	1...2	>34	—	>35	28	300		
PA6_1020	Полностью интегрированный высокоомощный ММИС 1—2 GHz на основе 0,25 мкм AlGaIn HEMT	1...2	>34	—	>40	28	600	TGA2540-FL (TriQuint)	

**Примерный перечень СВЧ приборов, изготавливаемых в ИСВЧПЭ РАН
по "Технологии производства СВЧ МИС с длиной затворов транзисторов 0,13 мкм"**

Дискретные псевдоморфные (PHEMT) маломощные полевые транзисторы на подложках GaAs в бескорпусном исполнении										
Номер изделия	Описание	F , ГГц	КУ, дБ	F_i/F_{max} , ГГц	КШ, дБ	$U_{п}$, В	$I_{п}$, мА	Ближайший аналог	Стоимость (розн/опт)	
W736p0,15×150	0,15×150 мкм PHEMT	0...30	>13 (18 ГГц)	75/150	0,8 дБ (18 ГГц)	3	15	MGF-4951G (Mitsubishi)	15,6/14,8 \$	
W736p0,15×120	0,15×120 мкм PHEMT	0...40	9,2 (40 ГГц)	75/150	1,7 (40 ГГц)	2,5	20	EC2612 (UMS)	42,88 \$	
Дискретные широкозонные мощные полевые транзисторы (HEMT) на основе гетероструктур AlGaIn/(AlN)/GaIn на подложках из сапфира и SiC в бескорпусном исполнении										
Номер изделия	Описание	F , ГГц	F_i/F_{max} , ГГц	КУ, дБ	$P_{вых}$, дБ, дБм	$U_{п}$, В	$I_{п}$, мА	Ближайший аналог		
W1095_0,15×240 с. 32	0,15×240 мкм HEMT на сапфире	0...60	78/180	11,5 (35 ГГц)	>27	28	80	Промышленностью в виде дискретных приборов не выпускаются, используются в составе КВЧ МИС		
Маломощные усилители (МИС) на основе PHEMT на подложках GaAs										
Номер изделия	Описание	F , ГГц	КУ, дБ	КШ, дБ	$P_{вых}$, дБ, дБм	$U_{п}$, В	$I_{п}$, мА	Ближайший аналог	Стоимость (розн/опт)	
UWB_LNA1 с.3	Сверхширокополосный МШУ на основе 0,15 мкм PHEMT	0,03...3	>15	<1,2	>15	5...6	<70	TGA8061 (TriQuint) SPF-5122Z (RFMD) CGY2109 (OMMIC)	300/80 \$ 65/48 \$	
UWB_LNA2 с.4	Сверхширокополосный МШУ на основе 0,15 мкм PHEMT	0,03...5	>15	<1,5	>15	5...6	<50	SPF-5043Z (RFMD)	67/50 \$	
LNA6_40160 с. 8	Широкополосный трехкаскадный МШУ, 0,15 мкм PHEMT	4...16	>30 ($U_{п} = 5$ В)	<1,6 (8...12 ГГц)	>10	3...6	92 ($U_{п} = 5$ В)	TGA2512 (TriQuint)	76,7/61,6 \$	
LNA7_260400 с.9, тип 2	Трехкаскадный PHEMT МШУ, 0,15 мкм PHEMT для К-диапазона	26...40	22...17	2,8...4	>5	2	60	AMMC-6241 (Avago Tech)	24/18 \$	
LNA8_370440 с.9, тип 1	Трехкаскадный PHEMT МШУ 0,15 мкм PHEMT для К-диапазона	37...44	18...20	2,5...3,3	>5	2	60	HMC-ALH376 (Hittite)	43,7/36,3 \$	
Маломощные усилители (МИС) на основе широкозонных HEMT гетероструктур AlGaIn/(AlN)/GaIn на подложках из сапфира и SiC для применения в экстремальных условиях										
Номер изделия	Описание	F , ГГц	КУ, дБ	КШ, дБ	$P_{вых}$, дБ, дБм	$U_{п}$, В	$I_{п}$, мА	Ближайший аналог	Стоимость (розн/опт)	
AlGaIn_UWB_LNA2	Сверхширокополосная маломощная двухкаскадная ММИС на основе 0,15 мкм AlGaIn HEMT	0,2...20	10...15	<2,5	>20	7...15	70	По параметрам близок к PHEMT GaAs LNA TGA2526 (TriQuint)		
AlGaIn_KaBand_LNA4	Трехкаскадный ММИС МШУ на основе 0,15 мкм AlGaIn HEMT для К-диапазона	25...35	>16	<4,5	>20	7...15	250			
Усилители мощности (МИС) на основе широкозонных HEMT гетероструктур AlGaIn/(AlN)/GaIn на подложках из сапфира и SiC для применения в экстремальных условиях										
Номер изделия	Описание	F , ГГц	КУ, дБ	КШ, дБ	$P_{вых}$, дБ, дБм	$U_{п}$, В	$I_{п}$, мА	Ближайший аналог	Стоимость (розн/опт)	
PA7_200300 С.34, 38	Усилитель мощности ММИС на основе 0,15 мкм AlGaIn HEMT для К-диапазона	20...35	>20	—	25	15	150			
PA8_260400	Усилитель мощности ММИС на основе 0,15 мкм AlGaIn HEMT для К-диапазона	26...40	>18	—	30	28	250			
PA9_260400	Усилитель мощности ММИС на основе 0,15 мкм AlGaIn HEMT для К-диапазона	26...40	>20	—	37	28	550			

**Примерный перечень СВЧ приборов, изготавливаемых в ИСВЧПЭ РАН
по "Технологии производства СВЧ МИС с длиной затворов транзисторов 90 нм"**

Псевдоморфные (PHEMT) и метаморфные (MHEMT) малошумящие полевые транзисторы на подложках GaAs в бескорпусном исполнении									
Номер изделия	Описание	F , ГГц	KV, дБ	КШ, дБ	$P_{\text{вых}}$, дБ, дБм	$U_{\text{п}}$, В	$I_{\text{п}}$, мА	Ближайший аналог	
W716p0,1×100 C.14, 16, 18, 21	0,1×100 мкм PHEMT	0...60	>10 (60 ГГц)	120/250	<3 (60 ГГц)	2,5	35	Промышленностью в виде дискретных приборов не выпускаются, используются в составе КВЧ МИС	
W226m0,1×60 C.14, 16, 21	0,1×60 мкм MHEMT	0...60	>14,5 (60 ГГц)	150/350	<2 (60 ГГц)	1,5	40	Промышленностью в виде дискретных приборов не выпускаются, используются в составе КВЧ МИС	
Широкозонные мощные полевые транзисторы (HEMT) на основе гетероструктур AlGaIn/(AlIn)/GaN на подложках из SiC в бескорпусном исполнении									
Номер изделия	Описание	F , ГГц	KV, дБ	КШ, дБ	$P_{\text{вых}}$, дБ, дБм	$U_{\text{п}}$, В	$I_{\text{п}}$, мА	Ближайший аналог	
W1284_0,1×200	0,1×200 мкм HEMT на SiC	0...90	90/200	6 (90 ГГц)	>20	15	60	Промышленностью в виде дискретных приборов не выпускаются, используются в составе КВЧ МИС	
Малошумящие усилители (МИС) на основе MHEMT на подложках									
Номер изделия	Описание	F , ГГц	KV, дБ	КШ, дБ	$P_{\text{вых}}$, дБ, дБм	$U_{\text{п}}$, В	$I_{\text{п}}$, мА	Ближайший аналог	Стоимость (розн/опт)
LNA9_300400 C.10	Трехкаскадный MHEMT МШУ 0,1 мкм MHEMT для К-диапазона	30...40	>20	1,6...2,2	>5	2	90	CGY2128XUH (OMMIC) HMC-ALH369 (Hittite)	80/68 \$
LNA10_560640	Трехкаскадный MHEMT МШУ 0,1 мкм MHEMT для V-диапазона	56...64	>15	<4	>3	2	80	HMC-ALH382 (Hittite)	—
Усилители мощности (МИС) на основе широкозонных HEMT гетероструктур AlGaIn/(AlIn)/GaN на подложках SiC для применения в экстремальных условиях									
Номер изделия	Описание	F , ГГц	KV, дБ	КШ, дБ	$P_{\text{вых}}$, дБ, дБм	$U_{\text{п}}$, В	$I_{\text{п}}$, мА	Ближайший аналог	Стоимость (розн/опт)
PA9_560640	Усилитель мощности ММИС на основе 0,1 мкм AlGaIn HEMT для V-диапазона	56...64	>18	—	25	15	160	HRL Laboratory, USA	
PA10_860950	Усилитель мощности ММИС на основе 0,1 мкм AlGaIn HEMT для W-диапазона	86...95	>16	—	25	15	250	HRL Laboratory, USA	

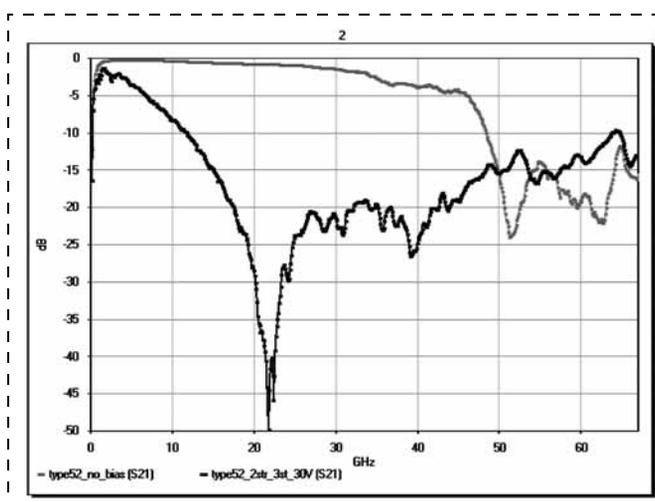


Рис. 9. Потери пропускания МЭМС коммутатора в открытом (светлая линия) и закрытом (темная линия) режимах

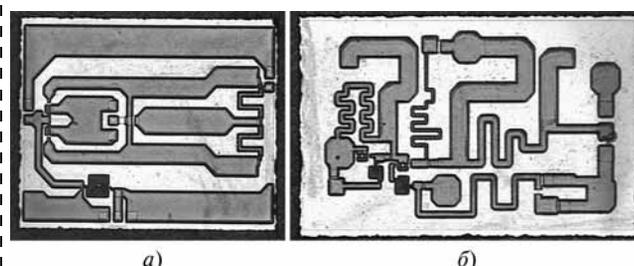


Рис. 12. МИС смеситель (а); МИС генератор, управляемый напряжением (б)

**Примерный перечень СВЧ приборов, изготавливаемых в ИСВЧПЭ РАН
по "Технологии производства СВЧ МИС с длиной затворов транзисторов 45 нм"**

Псевдоморфные (PHEMT) и метаморфные (MHEMT) малошумящие полевые транзисторы на подложках GaAs в бескорпусном исполнении									
Номер изделия	Описание	F , ГГц	КУ, дБ	$F_i/F_{i\max}$, ГГц	КШ, дБ	$U_{п}$, В	$I_{п}$, мА	Ближайший аналог	
W716p0,05×60 С. 14, 15, 16, 17, 18, 21	0,05×60 мкм PHEMT	0...120	>7 (90 ГГц)	248/300	<5 (90 ГГц)	2	30	Промышленностью в виде дискретных приборов не выпускаются, используются в составе КВЧ МИС	
W226m0,05×60 С. 14, 15, 16, 19, 20,21	0,05×60 мкм MHEMT	0...150	>10 (90 ГГц)	300/650	<3,5 (90 ГГц)	1,5	40	Промышленностью в виде дискретных приборов не выпускаются, используются в составе КВЧ МИС	
Малошумящие усилители (МИС) на основе MHEMT на подложках GaAs									
Номер изделия	Описание	F , ГГц	КУ, дБ	КШ, дБ	$P_{\text{вых}}$, дБ, дБм	$U_{п}$, В	$I_{п}$, мА	Ближайший аналог	Стоимость (розн/опт)
LNA11_300400	Трехкаскадный MHEMT МШУ 0,05 мкм MHEMT для Q-диапазона	70...80	>18	<4	>5	2,5	<80	CGY2128XUH (OMMIC) HMC-ALH508 (Hittite)	—
LNA12_560640	Трехкаскадный MHEMT МШУ 0,05 мкм MHEMT для W-диапазона	90...100	>15	<5	>3	1,5	<60	CGY2190UH (OMMIC)	—

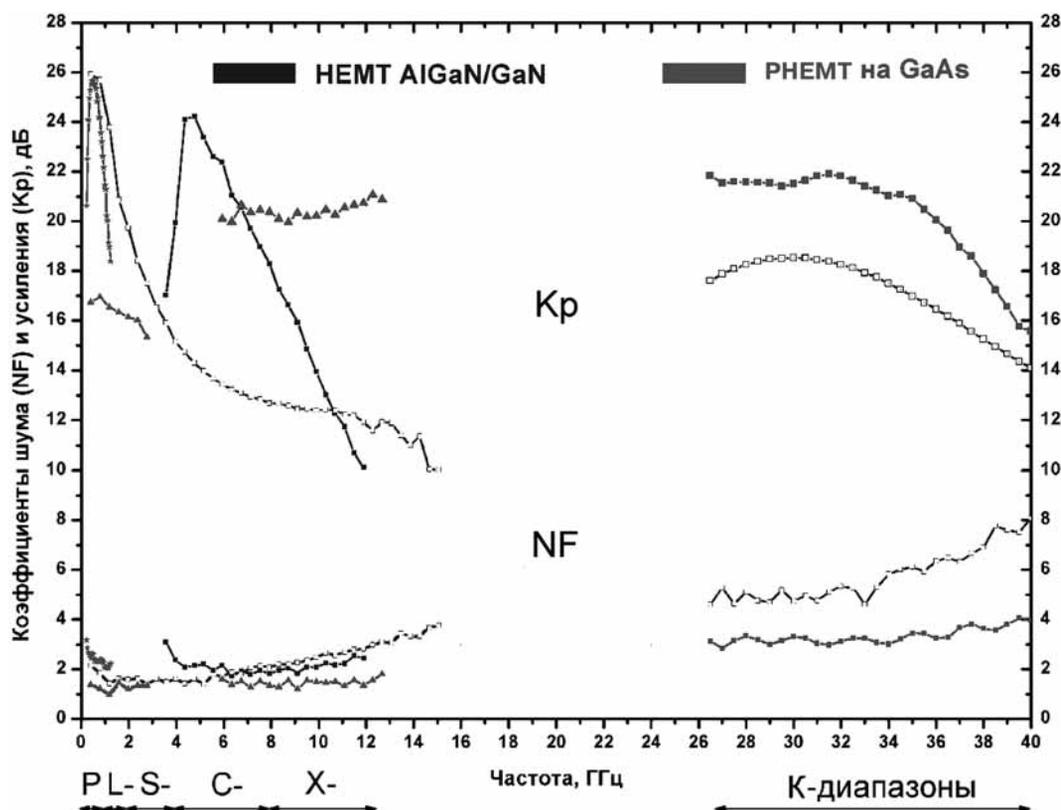


Рис. 13. Сравнение СВЧ параметров МИС МШУ на различных гетероструктурах

Оценка уменьшения размеров элементов СпК с увеличением рабочей частоты

Компоненты СВЧ и КВЧ СпК	Размеры компонентов, мм				
	5 ГГц	10...12 ГГц	18...20 ГГц	30...40 ГГц	57...64 ГГц
	РНЕМТ	РНЕМТ	РНЕМТ	РНЕМТ, МНЕМТ	МНЕМТ
МШУ	1,1×1,2 (эксперимент)	1,1×1,2 (эксперимент)	1,1×1,0 (эксперимент)	1,0×1,0 (эксперимент)	1,1×1,0 (эксперимент)
Встроенная антенна	8×6 (эксперимент)	5×4 (эксперимент)	3×2 (расчет)	1×0,9 (расчет)	0,7×0,6 (расчет)
МЭМС коммутатор	0,75×0,25 (эксперимент)	0,75×0,25 (эксперимент)	0,75×0,25 (эксперимент)	0,75×0,25 (расчет)	0,75×0,25 (расчет)

на подложках GaAs (ИСВЧПЭ РАН), при высоких пробивных напряжениях затворов (до 80 В).

Результаты сравнения СВЧ параметров МИС МШУ на различных гетероструктурах представлены на рис. 13, а схемы МИС МШУ AlGaIn/GaN и МИС МШУ РНЕМТ GaAs на рис. 14 и 15 (см. третью сторону обложки) соответственно.

В настоящее время разработаны базовые лабораторные технологии 0,25 и 0,13 мкм и 90 и 45 нм (табл. 8, 9, 10, 11 и рис. 16, см. четвертую сторону обложки), которые позволяют надеяться на создание СпК СВЧ и КВЧ диапазона в ближайшее время.

В таблицах приняты следующие обозначения: F — частота; F_l — предельная частота по току; F_{\max} — предельная частота по усилению; КШ — коэффициент шума; КУ — коэффициент усиления; $U_{\text{п}}$ — напряжение питания; $I_{\text{п}}$ — ток питания; $P_{\text{вых}}$ — выходная мощность.

Учитывая накопленный опыт в разработке МИС можно предположить интенсивное развитие систем на кристалле СВЧ и КВЧ диапазона. Сравнение размеров компонентов СВЧ и КВЧ представлено в табл. 11. Как видно из таблицы, антенны в К-диапазоне и выше не вносят существенного прироста площади в МИС. На частоте 60 ГГц (пятимиллиметровый диапазон) можно располагать на длине полуволны на расстоянии 2,5 мм приемную и передающую антенны, с расположением между ними МШУ и УМ, которые будут представлять интегрированный приемно-передающий модуль.

Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований, договор № 12-07-12031/12 от 15.11.2012 г.

Список литературы

1. Мальцев П. П., Федоров Ю. Ф., Гнатюк Д. Л. Свидетельство на топологию ИМС "Широкополосный малошумящий усилитель". Регистрационное свидетельство № 2011630032 от 04.02.2011 г.
2. Мальцев П. П., Федоров Ю. Ф., Гнатюк Д. Л. Свидетельство на топологию ИМС "Монолитный интегральный трехкаскадный малошумящий усилитель КВЧ диапазона". Регистрационное свидетельство № 2011630034 от 11.02.2011 г.
3. Мальцев П. П., Федоров Ю. Ф., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л. Свидетельство на топологию ИМС "Интегральный антенный элемент со встроенным малошумящим усилителем для диапазона 5 ГГц". Регистрационное свидетельство № 2011630058 от 05.05.2011 г.
4. Мальцев П. П., Федоров Ю. Ф., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л. Свидетельство на топологию ИМС "Интегральный антенный элемент со встроенным малошумящим усилителем для диапазона 10—12 ГГц". Регистрационное свидетельство № 2011630059 от 05.05.2011 г.
5. Мальцев П. П., Федоров Ю. Ф., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л. Свидетельство на топологию ИМС "Прямоугольный интегральный антенный элемент со встроенным малошумящим усилителем для диапазона 10—12 ГГц". Регистрационное свидетельство № 2012630008 от 10.01.2012 г.
6. Мальцев П. П., Федоров Ю. Ф., Матвеев О. С., Гнатюк Д. Л. Свидетельство на топологию ИМС "Прямоугольный интегральный антенный элемент со встроенным малошумящим усилителем для диапазона 5 ГГц". Регистрационное свидетельство № 2012630001 от 10.01.2012 г.
7. Пи Ж., Хан Ф. Введение в широкополосные системы связи миллиметрового диапазона // Электроника: наука, технология, бизнес. 2012. № 3. С. 86—94.
8. Гнатюк Д. Л., Галиев Р. Р., Матвеев О. С., Федоров Ю. В. Интегрированные антенны на наногетероструктурах арсенида галлия // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 12. С. 37—38.

А. А. Зайцев, вед. инженер,
e-mail: andazaitsev@mail.ru,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Национальный
исследовательский университет "МИЭТ"

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЯЕМОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ "СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ" СУБМИКРОННОГО КМОП-БАЗИСА

Поступила в редакцию 19.10.2012

Представлены новый метод и схема построения высокочастотного помехоустойчивого КМОП-генератора, управляемого напряжением и предназначенного для использования в составе "системы на кристалле". Технический результат — расширение диапазона генерируемых частот и повышение помехоустойчивости. Приведены диаграммы математического моделирования при реализации генератора в субмикронном КМОП-базисе 180 нм.

Ключевые слова: КМОП-генератор, управляемый напряжением, расширение диапазона частот ГУН, повышение помехоустойчивости ГУН

Современная методика проектирования микросхем класса "система на кристалле" (СнК) предполагает широкое использование библиотеки ранее разработанных и верифицированных сложнофункциональных (СФ) блоков. Технология изготовления кристалла СнК подразумевает технологическую и конструктивную совместимость СФ блоков. При этом необходимо решать следующие задачи:

- минимизация площади, занимаемой СФ блоками на кристалле СнК;
- минимизация энергопотребления и уровня помех по цепям питания;
- повышение помехоустойчивости СФ блоков.

Одними из наиболее широко применяемых СФ блоков являются встроенные программируемые синтезаторы сетки частот (ССЧ) тактовой синхронизации, основанные на использовании генератора, управляемого напряжением (ГУН). Частоту и фазу выходного сигнала ГУН стабилизируют с помощью контура импульсной фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Высокочастотный ГУН является источником помех по цепям питания и по подложке кристалла СнК для соседних СФ блоков, а также сам подвержен влиянию помех, нарушающих его работу. Кроме того, во многих СнК для уменьшения энергопотребления используют режи-

мы динамического масштабирования напряжения питания и частоты (ДМНЧ) под запросы исполняемого приложения. При этом диапазон перестройки ГУН СФ блока ССЧ должен составлять не менее одной октавы. Так как на сегодняшний день микросхемы СнК в основном изготавливают по субмикронным КМОП-технологиям, актуальными являются вопросы разработки методов построения КМОП-ГУН для реализации в субмикронном КМОП-базисе.

При проектировании ГУН для СФ блока ССЧ тактовой синхронизации СнК должны быть выполнены следующие условия:

- реализация по стандартному маршруту выбранной технологии изготовления кристалла СнК;
- малая потребляемая мощность, напряжение питания должно быть равным напряжению питания логических элементов СнК;
- диапазон генерируемых частот не менее одной октавы;
- во всем диапазоне частот амплитуда сигнала колебания должна быть близкой к значению напряжения питания, длительность фронта и спада должны быть примерно равны, коэффициент заполнения близок к значению 0,5.

В качестве ГУН для СФ блоков ССЧ тактовой синхронизации СнК наибольшее распространение получили полностью интегральные кольцевые ГУН, состоящие только из КМОП-транзисторов [1, 2]. Типовым решением является использование в генерирующем кольце ГУН фиксированного числа управляемых элементов задержки, а расширение диапазона генерируемых частот достигается за счет изменения длительностей фронта и спада сигнала колебания. При этом одновременно изменяется амплитуда сигнала колебания. В случае генерации сигнала из низкочастотной части диапазона меньшая амплитуда и более пологие фронт и спад сигнала колебания будут более чувствительны к помехам по цепям питания и по подложке кристалла СнК. В результате моменты переключения элементов генерирующего кольца будут перемещаться от своего идеального местоположения во времени, тем самым увеличивая значение фазового шума в выходном сигнале генерируемой частоты, что является недостатком типового решения. Использование переменного числа элементов задержки в генерирующем кольце решает проблему уменьшения амплитуды сигнала колебания, но усложняет схему управления ГУН.

Для защиты от помех питания в ГУН используют схемы стабилизации напряжения питания и фильтрующие конденсаторы. Для снижения влияния помех по подложке вокруг ГУН используют охранные кольца с чередованием типа проводимости и подключением напряжений соответствующих потенциалов. Для гальванической изоляции P -кармана от P -подложки, под транзисторами N -типа

создают карман — глубокий N -слой, подключаемый к потенциалу источника питания. Также используется электростатическое экранирование слоями металлизации, имеющими контакты с подложкой по всему периметру ГУН. Однако с переходом на субмикронные технологии, при всевозрастающей плотности расположения элементов на кристалле СнК, повышении уровня перекрестных помех и снижении напряжения питания, этих мер защиты часто оказывается недостаточно.

Цель настоящей статьи — проектирование октавного высокочастотного КМОП-ГУН, удовлетворяющего сформулированным выше условиям использования в составе СФ блока ССЧ тактовой синхронизации для СнК субмикронного КМОП-базиса.

Для преодоления ограничений расширения частотного диапазона предлагается метод построения ГУН, включающий [3]:

- управляемую внутреннюю нелинейную отрицательную обратную связь, обеспечивающую самовозбуждение генератора;
- управляемый гистерезис уровней переключения схемы генератора;
- изменение длительностей фронта и спада сигнала колебания.

На рис. 1 представлена основанная на предлагаемом методе схема построения помехоустойчивого широкодиапазонного генератора, состоящего из схемы формирования управляющих напряжений и собственно ГУН. Транзисторы $P1$ и $N1$ образуют внутреннюю нелинейную отрицательную обратную связь, через которую вход внутреннего инвертора $P3, N3$ попеременно переключается между выходными потенциалами источников тока,

образованных транзисторами $P2, N2$ и управляемых напряжениями $Pbias$ и $Nbias$. Направление подключения входа инвертора связано с состоянием выхода $Fout$ так, что обеспечивается самовозбуждение ГУН.

При генерации сигнала из низкочастотной части диапазона с уменьшением значений токов транзисторов $P2$ и $N2$ происходит не только завал фронта и спада сигнала колебания, но и расхождение входных уровней потенциалов напряжений внутреннего инвертора $P3, N3$, требуемых для его переключений в направлениях VDD и GND . Расхождение уровней переключений происходит благодаря токам, протекающим через попеременно включаемые транзисторы $P4, N4$. В результате происходит увеличение задержки переключения внутреннего инвертора и, соответственно, уменьшение частоты выходного сигнала ГУН.

При генерации сигнала высокой частоты с увеличением значений токов транзисторов $P2$ и $N2$ одновременно происходит не только обострение фронта и спада сигнала колебания, но и сближение входных уровней потенциалов напряжений, требуемых для переключений внутреннего инвертора. Это приводит к уменьшению задержки переключений инвертора и увеличению частоты выходного сигнала. Результатом такого комбинированного взаимодействия длительностей и уровней переключений внутреннего инвертора является расширение диапазона рабочих частот ГУН при практически неизменной амплитуде сигнала колебания.

На приведенных далее рисунках представлены результаты математического моделирования рассмотренного ГУН при реализации по КМОП-процессу 180 нм. На рис. 2, a представлена модуляци-

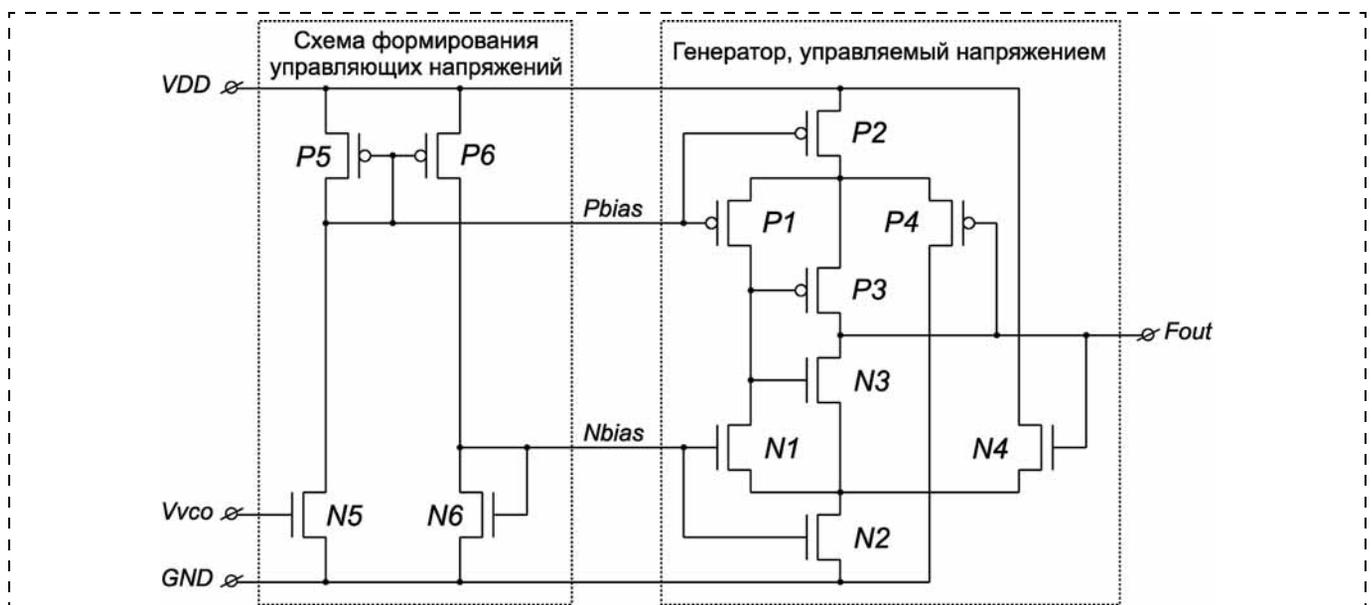


Рис. 1. Схема построения помехоустойчивого широкодиапазонного КМОП-ГУН

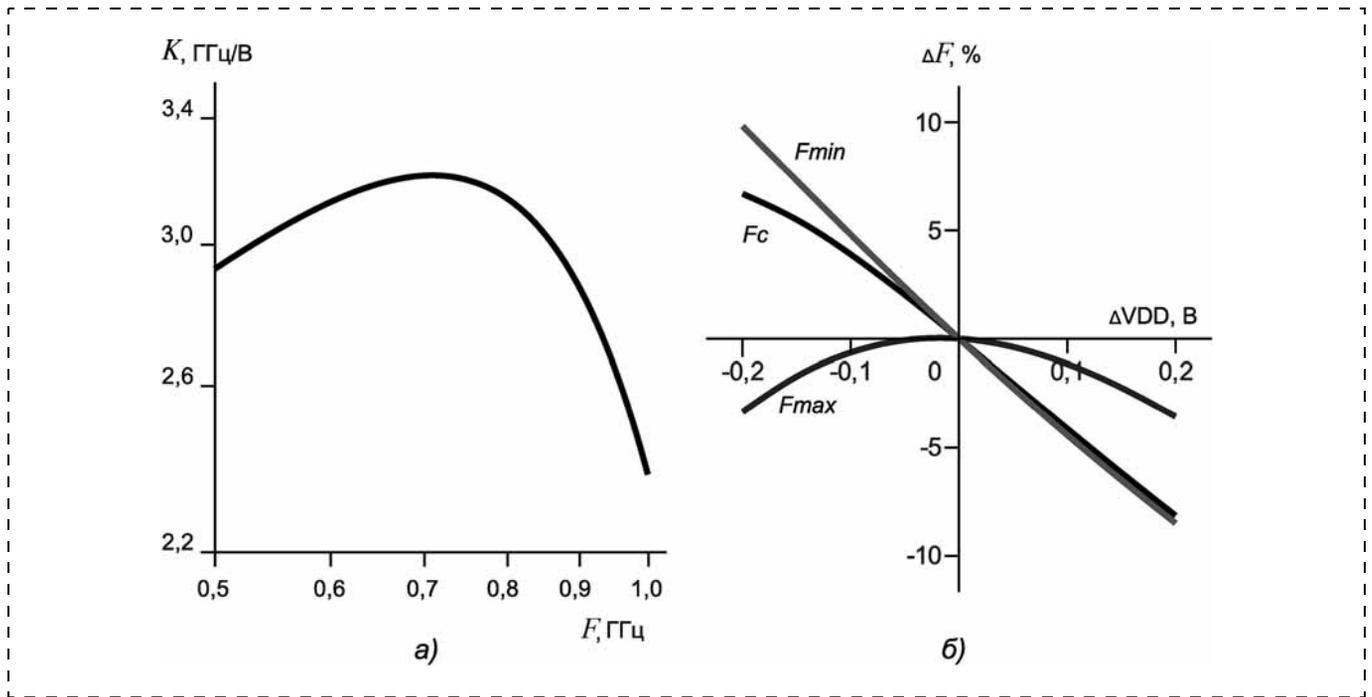


Рис. 2. Статические характеристики ГУН:

а — модуляционная характеристика; б — изменения значений частот генерируемых сигналов при изменении напряжения питания

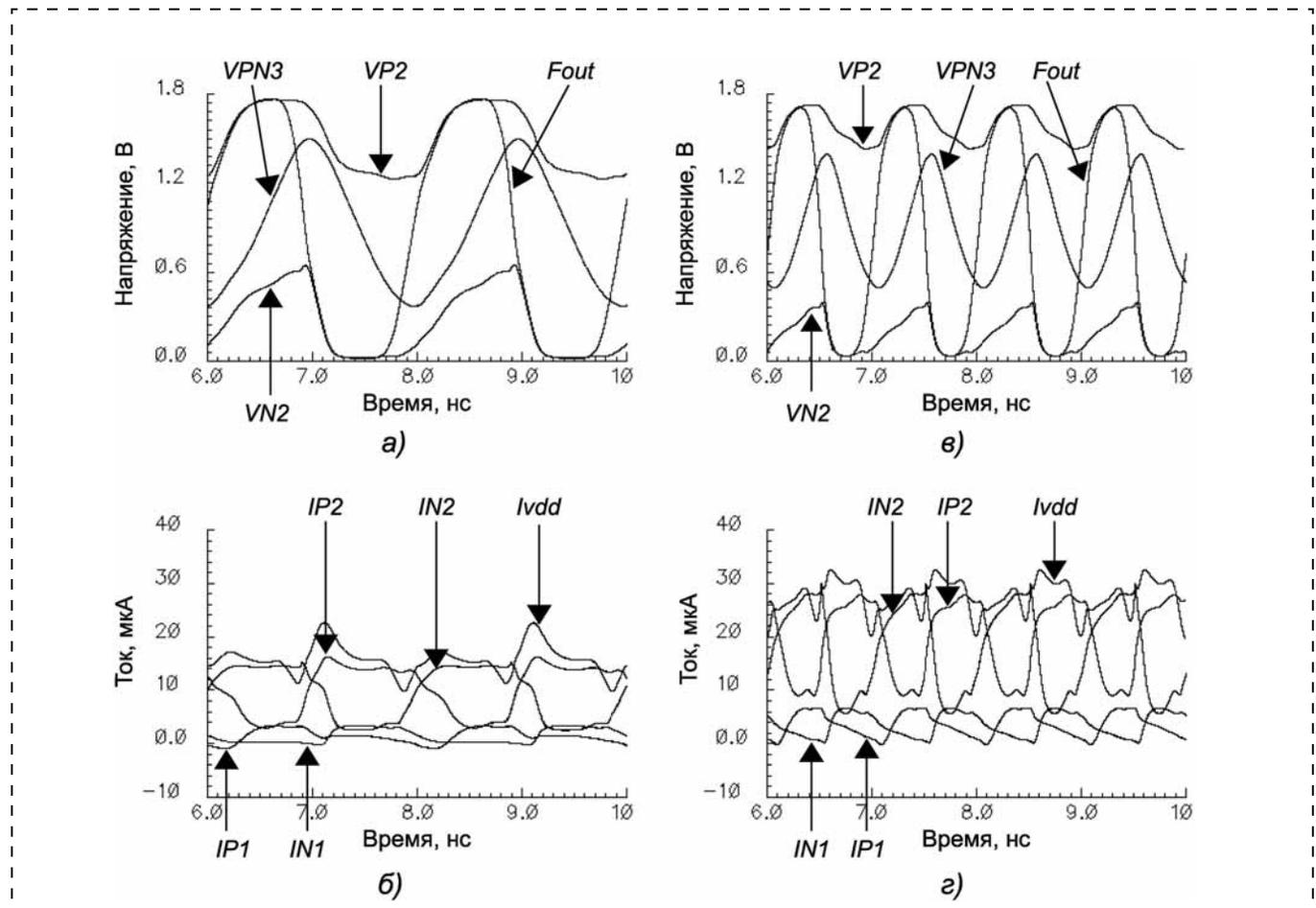


Рис. 3. Диаграммы напряжений и токов схемы ГУН при генерации сигналов частотой:

а, б — 0,5 ГГц; в, г — 1,0 ГГц

онная характеристика ГУН, имеющая среднее значение 2,8 ГГц/В. Изменение модуляционной характеристики не превышает $\pm 14\%$, что вполне приемлемо для построения устойчивого контура ФАПЧ. Для оценки значения фазового шума ГУН, вызванного помехами по цепям питания, на рис. 2, б представлены изменения значений частот генерируемых сигналов при изменении напряжения питания в диапазоне $\pm 0,2$ В. Изменения даны для частот 0,5, 0,7 и 1,0 ГГц, соответственно обозначенных на рисунке как F_{\min} , F_c и F_{\max} .

Диаграммы на рис. 3 соответствуют генерации схемой ГУН сигналов выходных частот 0,5 ГГц (рис. 3, а, б) и 1,0 ГГц (рис. 3, в, г). На рис. 3, а, в представлены диаграммы напряжений, на рис. 3, б, г — диаграммы токов.

Обозначения на рисунке соответствуют:

$VP2$ — напряжение на выходе источника тока $P2$;

$VN2$ — напряжение на выходе источника тока $N2$;

$VPN3$ — напряжение нелинейной обратной связи на входе внутреннего инвертора $P3$, $N3$;

F_{out} — сигнал выходной частоты ГУН;

$IP1$ — ток, протекающий через транзистор $P1$;

$IN1$ — ток, протекающий через транзистор $N1$;

$IP2$ — ток, протекающий через транзистор $P2$;

$IN2$ — ток, протекающий через транзистор $N2$;

I_{vdd} — ток, потребляемый ГУН по линии напряжения питания VDD .

В обоих случаях амплитуда сигнала F_{out} поддерживается близкой к напряжению питания схемы, равному 1,8 В, а амплитуда сигнала нелинейной обратной связи $VPN3$ превышает половину значения напряжения питания. При этом сигнал F_{out} имеет практически симметричную форму и осуществляется относительно уровня половины напряжения питания с коэффициентом заполнения, равным $0,5 \pm 5\%$.

При генерации сигнала частотой 0,5 ГГц среднее значение потребляемого тока составляет 16 мкА

(30 мкВт), значение пульсаций тока составляет $+7/-6$ мкА. При генерации сигнала частотой 1,0 ГГц среднее значение потребляемого тока составляет 27 мкА (50 мкВт), значение пульсаций $+6/-7$ мкА.

По представленным результатам можно сделать следующие выводы. Предложенный метод построения ГУН с управляемым током отрицательной обратной связи, скоростью и уровнями переключения позволил спроектировать устройство, обеспечивающее диапазон генерируемых частот, равный одной октаве. Во всем диапазоне ГУН поддерживает постоянную, практически симметричную и близкую к значению напряжения питания амплитуду выходного сигнала со стандартными логическими уровнями, что повышает его помехоустойчивость и упрощает дальнейшее подключение к логическим элементам. При этом генератор имеет малое постоянное значение и малые пульсации потребляемого тока и не создает помех для других СФ блоков СнК. Генератор содержит только КМОП-транзисторы, что определяет его компактность, технологическую и конструктивную совместимость с другими блоками микросхемы СнК.

Предложенные метод и схема построения ГУН могут быть рекомендованы при разработке СФ блоков высокочастотных октавных ССЧ тактовой синхронизации, предназначенных для использования в составе СнК самого широкого назначения с поддержкой функций ДМНЧ.

Список литературы

1. **Oscal T.-C. Chen, Robin Ruey-Bin Sheen.** A Power-Efficient Wide-Range Phase-Locked Loop // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2002. Vol. 37, N 1. P. 51—62.
2. **Abidi A. A.** Phase Noise and Jitter in CMOS Ring Oscillators // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2006. Vol. 41, N 8. P. 1803—1816.
3. **Зайцев А. А.** Октавный микропотребляющий высокочастотный КМОП генератор, управляемый напряжением // Заявл. № 2012129707/08(046721) от 16.07.2012 о выдаче патента Российской Федерации на изобретение.

УДК 621.3.049.77.002

И. В. Прокофьев, ст. науч. сотр.,
e-mail: ip_icnt@mail.ru,
В. С. Суханов, нач. лаб., e-mail: vs@tcen.ru,
В. В. Амеличев, нач. лаб., e-mail: avv@tcen.ru,
НПК "Технологический центр"

ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Поступила в редакцию 20.11.2012

Приведены результаты исследований характеристик тонкопленочных резистивных преобразователей магнитного поля. Исследованы технические характеристики магнитного компаса, созданного на их основе, в составе модуля комплексной навигационной системы.

Ключевые слова: преобразователи магнитного поля, тонкопленочный магниторезистор, магнитный компас, инерциальная система, навигационная система, комплексирование данных

Недостатком систем спутниковой навигации является их зависимость от внешних факторов в виде естественных и искусственных помех. Наиболее перспективной в настоящее время является комбинация магнитной, инерциальной и спутниковой навигации. Объединение в составе одного устройства как магнитоинерциальных, так и спутниковых систем навигации Глонасс/GPS (СН) существенно расширяет спектр решаемых задач в области создания систем мониторинга транспортных средств [1]. Применительно к системам определения координат движущихся объектов можно говорить, что появилась возможность создания достаточно надежной системы позиционирования и мониторинга транспорта при отсутствии сигналов от спутников. Последние разработки ведущих фирм направлены на комплексирование данных от разных датчиков и показаний от спутниковых систем навигации для решения задач непрерывного мониторинга транспорта в местах высотной застройки городов, в туннелях, под мостами [2]. Одним из перспективных направлений комплексирования является коррекция курсового угла по магнитно-

му склонению, реализованного на основе электронного компаса. Принцип действия магнитного компаса, созданного на основе тонкопленочных магниторезистивных преобразователей, основан на взаимодействии с горизонтальными составляющими индукции магнитного поля Земли, значение которых составляет 0,1...0,5 Гс в зависимости от широты. Поле Земли имеет компоненты, параллельные земной поверхности, и в любой точке вектор магнитного поля ориентирован в направлении Северного магнитного полюса.

Конструкции анизотропного магниторезистивного преобразователя магнитного поля

Кристалл анизотропного магниторезистивного преобразователя (АМРП) магнитного поля изготовлен на основе кремниевой подложки с применением групповой интегральной технологии [3, 4]. Габаритные размеры кристалла АМРП составляют 5×5 мм и содержат в своем составе четыре составных тонкопленочных магниторезистора, объединенных в мост Уитстона, а также две функционально-интегрированные катушки подмагничивания (ФИКП).

Составные тонкопленочные магниторезисторы (СТПМР) состоят из двадцати полосок, включенных последовательно, и ориентированы так, что в двух противоположных плечах моста Уитстона СТПМР расположены под углом 45°, а в двух других противоположных плечах моста Уитстона — под углом 135° относительно оси легкого намагничивания (ОЛН). Такое расположение СТПМР относительно ОЛН позволяет реализовать нечетный тип передаточной характеристики АМРП.

Первая ФИКП предназначена для корректировки уровня выходного сигнала и называется "offset". Она электрически изолирована от СТПМР и реализована на основе 2-го уровня металла так, что генерируемое током магнитное поле имеет коллинеарное направление с измеряемым. Вторая ФИКП предназначена для снижения влияния гистерезиса СТПМР путем их перемангничивания с помощью кратковременных импульсов тока и называется "Set/Reset", по аналогии с зарубежными аналогами АМРП. Изготовлена вторая ФИКП на основе 3-го уровня металла и расположена так, что генерируемое ею магнитное поле совпадает с направлением ОЛН [5].

Кристалл АМРП, смонтированный на стекло-текстолитовую плату с припаянными разъемами, может быть использован в радиоэлектронной аппаратуре в бескорпусном виде (рис. 1, см. четвертую сторону обложки).

Характеристики анизотропного магниторезистивного преобразователя магнитного поля

Для исследования характеристик АМРП использовали меру магнитной индукции (ММИ), представляющую собой протяженный соленоид с картой распределения магнитной индукции в нем. В области расположения исследуемого образца АМРП задавалось постоянное магнитное поле с напряженностью до 40 Э. При напряжении питания на мосте Уитстона 10 В и с помощью ММИ была получена передаточная характеристика АМРП (рис. 2). Крутизна преобразования АМРП, полученного на основе пленки $Ti/FeNiCo_{20}/Ti$, составила 0,3...0,4 мВ/В·Э, в линейном диапазоне ± 6 Э. Применение в конструкции АМРП ферромагнитных пленок с меньшим содержанием кобальта ($FeNiCo_6$) увеличивает крутизну преобразования до 0,53 мВ/В·Э, но линейный диапазон при аналогичных с предыдущей структурой критериях оценки снижается до ± 4 Э [6].

Разработка и исследование характеристик магнитного компаса

Магнитный компас изготовлен на основе трехкоординатного преобразователя магнитного поля в виде электронного модуля. В качестве ЧЭ применены образцы на основе пленок $Ti/FeNiCo_6/Ti$. Полученные данные от преобразователей магнитного поля усиливаются, оцифровываются и передаются в микроконтроллер для вычисления вектора направления магнитного поля компаса. Магнитный компас создается путем установки трех преобразователей под углами 90° на плоской горизонтальной опоре. Каждый преобразователь измеряет одну из компонент вектора поля, которые используются для вычисления положения относительно Северного магнитного полюса. Реальное направление курса вычисляет микроконтроллер с учетом компенсации наклонов относительно горизонта и широты конкретной местности. Данные с магнитного компаса хорошо комплексуются с данными акселерометров и микрогирископов и вместе с показаниями приемника Глонасс/GPS используются для непрерывного мониторинга дви-

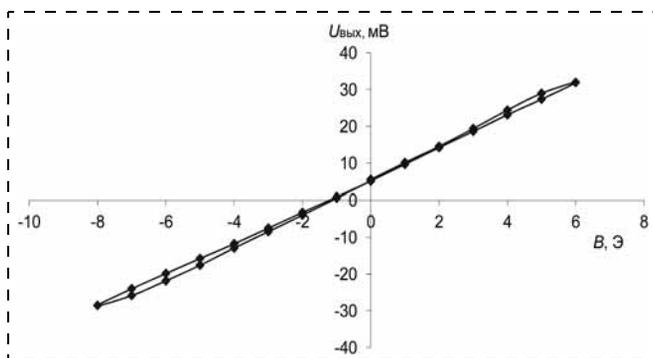


Рис. 2. Передаточная характеристика АМРП магнитного поля на основе пленки $Ti/FeNiCo_{20}/Ti$

жения транспорта. В качестве приемника Глонасс/GPS применяется серийный приемник фирмы "Навис" NV08C-CSM.

Магнитный компас на основе магниторезистивных преобразователей включен в состав модуля комплексной навигационной системы, изготовленной на стеклотекстолитовой подложке толщиной 1,5 мм и состоящей из схемы управления, приемника Глонасс/GPS, датчиков угловых скоростей и акселерометров. Выходной сигнал с модуля передается по цифровому интерфейсу RS232.

Фотография магнитного компаса в составе модуля комплексной навигационной системы представлена на рис. 3 (см. четвертую сторону обложки).

В результате применения магнитного компаса в составе комплексной навигационной системы получены следующие технические характеристики:

Азимутальная точность магнитного компаса . . .	0,5°
Скорость обновления данных	50 Гц
Интерфейс	RS232
Напряжение питания	3,7 В
Потребление	350 мВт

Применение магнитного компаса, инерциальных систем и спутниковых систем навигации позволяет реализовать алгоритмы расчета навигационных данных, обеспечивающих определение параметров движения транспортного средства по информации с ССН, сглаживание "скачков" навигационных данных, возникающих вследствие скачкообразных изменений показаний при смене состава созвездия спутников. По информации, полученной от преобразователей магнитного поля и ССН, выполнен непрерывный расчет траектории движения транспортного средства в условиях ограниченной видимости.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой научно-технической программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2007—2013 годы" (Государственный контракт от 19 апреля 2011 г. № 16.513.11.3058).

Список литературы

1. Прокофьев И. В., Тихонов Р. Д. Нано- и микросистемы для мониторинга параметров движения транспортных средств // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 12. С. 48—50.
2. Honeywell Sensor Products uPoint / Solid State Electronics Center. URL: <http://www.magneticsensors.com>.
3. Галушков А. И., Голишников А. А., Прокофьев И. В., Суханов В. С. Исследование технологии изготовления интегральных магниторезистивных преобразователей для устройства регистрации магнитных полей // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2007. С. 81—83.
4. Амеличев В. В., Галушков А. И., Дягилев В. В., Касаткин С. И., Муравьев А. М., Лопатин В. В., Резнев А. А., Сауров А. Н., Суханов В. С. Микроэлектронная магниторезистивная технология // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 22—26.
5. Касаткин С. И., Муравьев А. М., Плотникова Н. В., Амеличев В. В., Дягилев В. В., Гамарц И. А., Лопатин В. В., Сауров А. Н. Тонкопленочные анизотропные магниторезистивные наноэлементы для систем контроля // Датчики и системы. 2009. № 8. С. 2—4.
6. Амеличев В. В., Гамарц И. А., Касаткин С. И., Лопатин В. В., Муравьев А. М., Плотникова Н. В., Резнев А. А., Решетников И. А., Чаплыгин Ю. А. Анизотропные магниторезистивные преобразователи на основе ферромагнитных наноструктур с различным содержанием кобальта // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 2. С. 22—24.

CONTENTS

- Ichkitidze L. P., Podgaetsky V. M., Putria B. M., Selichshev S. V., Blagov E. V., Galperin V. A., Shaman Yu. P., Kitshyk E. P.** *Electrical Conductivity Composite Nanomaterial with Multiwall Carbon Nanotubes* 2
The conductivity of the micron size layers of composite nanomaterials, consisting of carboxymethyl cellulose and multi-walled carbon nanotubes with different aspect ratios was investigated. Ultradispersive aqueous slurry was applied by screen printing on substrates on the cover glass and silicon with a layer of silicon oxide. Electrical conductivity was measured by four-probe method. For layers in thickness range of 0.5–10 μm maximum specific volume conductivity was ~ 350 S/m. Some aspects of the electrical conductivity increases under the action of laser radiation were described.
Keywords: carboxymethyl cellulose, multi-walled carbon nanotubes, composite nanomaterials, layers, electrical conductivity, laser radiation, substrates
- Gridchin V. A., Chebanov M. A., Zinov'ev V. B.** *Pressure Sensors Design Using Finite Element Method* 5
Piezoresistive pressure sensor on the base of a square membrane elastic element (EE) with four cavities on its front side has been considered. An influence of the cavity geometrical sizes on the EE strained state has been observed. An estimations of the sensitivity, nonlinearity and strength of the new type EE have been done. It has been shown theoretical and experimentally proved 30 % increase in sensitivity of the pressure sensor on the base of the introduced EE against to the traditional pressure sensors with flat membrane.
Keywords: piezoresistive pressure sensor, sensitivity, nonlinearity, strength, finite element method
- Troyan P. E., Selenskij V. I.** *Emission Structures Based on Moulded Thin-Film Systems* 9
The article deals with technology of the thin-film metal–dielectric–metal system, properties acquired by the system as a result of electrical moulding in a high electric field at the vacuum: volt-ampere characteristics, emission of electrons to the vacuum. It discusses model of nanostructure obtained as a result electrical moulding.
Keywords: technology of the thin-film system, metal–dielectric–metal system, electrical moulding, current transport, emission, nanostructure, quantum dots
- Vagin D. V., Kasatkin S. I., Amelichev V. V., Kostyuk D. V., Belyakov P. A.** *Frequency Characteristics of Spin-Valve Magnetoresistive Nanostructures* 12
Presents the results of the analysis of high-frequency properties of the spin-valve magnetoresistive (SVMR) nanostructures based on the Landau–Lifshitz–Gilbert for a three-layer strips ($\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}/\text{Cu}/\text{Fe}_{18}\text{Ni}_{76}\text{Co}_6$). Presents the comparison of the high-frequency properties of nanostructures with high SVMR properties of anisotropic magnetoresistive (AMR) nanostructures. Presents the results of studies of frequency characteristics of nanostructures $\text{Co}_{80}\text{Ni}_{20}/\text{Cu}/\text{Fe}_{18}\text{Ni}_{76}\text{Co}_6$ with different geometric dimensions shaped strips. A design SVMR magnetic field sensor based on the studied nanostructures.
Keywords: spin-valve magnetoresistive nanostructure, transducer magnetic field, high-frequency properties
- Galperin V. A., Kondratiev P. K., Zubov D. N., Kelm E. A., Pavlov A. A.** *The Copper Electrochemical Deposition on CNT Arrays Process Optimization* 15
The copper electrochemical deposition on various configuration CNT arrays is described in this article. Traditional methods using CuSO_4 and CuCl_2 solutions as electrolyte are reviewed and their disadvantages are described. So, we proposed new technique using electrolyte solution such as methanol-glycerate complex of copper. And further it's concentration influence on synthesized material structure is investigated.
Keywords: carbon nanotubes, CNT, copper electrochemical deposition, methanol-glycerate complex, Cu/CNT composite, nanocomposites, IC interconnection, metallization, 3D IC
- Tuchin A. V., Bityutskaya L. A., Bormontov E. N.** *The Stark Effect in the Fullerene C_{60}* 19
The method of density functional theory was used for study of splitting of h_u and t_{1u} levels of the neutral fullerene C_{60} with the considering of orientational deformation of carbon cage in the range of electric fields E from 0 to 1.2 V/Å at three orientations of the molecule: $E||\text{C}_{2v}$, $E||\text{C}_{3v}$ and $E||\text{C}_{5v}$. The possibility of an external electric field modulation of the energy gap between the lowest unoccupied and highest occupied molecular orbitals was shown.
Keywords: fullerene C_{60} , a strong electric field, the Stark effect, the energy gap between the lowest unoccupied and highest occupied molecular orbitals
- Blagov E. V., Amelichev B. B., Kostyuk D. V.** *Magnetoresistive Transducer for Current Sensor* 22
The main types of transducers magnetic field sensors used in modern current sensors. The results of the measurement of basic electrical characteristics of magnetoresistive transducer with the conductor management. Based on the research results the layout of the magnetoresistive sensor transducer to assess the possibility of foreseeing the current measurement with the help of the power of the currents to 60 A.
Keywords: transducer magnetic field, a current sensor, magnetoresistive element
- Garshin A. Ya., Tuchin A. V., Bormontov E. N.** *Differential Pressure Sensor with Pulse Compensation* 25
MEMS sensors with capacitive type of readout, with the principle of electrostatic reverse conversion were considered. The design and performance of the experimental samples: an accelerometer and a differential pressure sensor were submitted. Promising directions of development of compensatory MEMS sensors were considered.
Keywords: MEMS, pressure sensor, accelerometer, electrostatic compensation
- Ichkitidze L. P.** *Superconducting Film Magnetic Flux Transformer Based on Nanoscale Branches for Magnetic Field Sensor* . . 27
The research object is the superconducting film magnetic flux transformer in the shape of a ring with a narrowed region of the active strip that overlaps the magnetosensitive film element based on the giant magnetoresistance effect, which is separated by an insulating film.
It is shown that micro- and nanostructuring of the active strip, which specifically is the fragmentation of the latter into micro- and nanoscale superconducting parallel branches and slits, increases by several times the multiplication factor of the transformer, that is the level of concentration of the external magnetic field on the magnetosensitive element, thus increasing the efficiency of the magnetic flux transformer and the weak magnetic field sensor (≤ 10 pT).
Keywords: superconducting films, magnetic field, magnetic flux transformer, magnetosensitive element, micro- and nanostructuring

Uvarov I. V., Naumov V. V., Amirov I. I. Resonant Properties of Multilayer Metallic Nanocantilevers 29
Resonant properties of three-layer metallic cantilevers with 40 nm thickness are investigated. Two types of nanocantilevers were fabricated: Cr—Al—Cr and Ti—Al—Ti. Resonant frequencies of nanocantilevers were determined from experimentally obtained resonant curves. Cantilever oscillations were excited by electric force, registration of cantilever motion was performed by optical lever method. Dependencies of first and second resonant frequencies on cantilever length and width were experimentally obtained. Experimental data analysis and comparison with theoretical predictions were performed. Relations between cantilever resonant properties and its dimensions and material are discussed.

Keywords: nanoelectromechanical systems, nanocantilever, resonant frequency, bending mode, optical lever, surface roughness

Zemlyannikov N. S., Danilova N. L., Pankov V. V., Sukhanov V. S., Mihaylov Yu. A. Tensorresistive Pressure Sensors on the Basis of Complex-Profiled Silicon Membranes. 32
Article describes research results for tensorresistive pressure sensors manufactured according to microelectronic technology on the basis of complex-profiled membranes. There are shown advantages of developed pressure sensors over existing ones with flat membranes and with membranes that have one hard center.

Keywords: pressure sensor die, pressure sensitive element, gauge pressure sensor, absolute pressure sensor, complex-profiled silicon membrane

Nikiforov S. V., Polomoshnov S. A., Tikhonov R. D., Cheremisinov A. A. Vibration Microsystem with Magnetic Field Transducer 36

Production and research of the model of the vibration microsystem with magnetotransistor transducer is carried out. It is established that the vibration microsystem with the silicon MEMS cantilever, with a micromagnet and the magnetotransistor transducer allows carrying out control of displacements and vibrations on change of a magnetic field at resonant frequencies of the console with a micromagnet.

Keywords: magnetotransistor, MEMMS-microelectromagnetomechanic system

Amelichev V. V., Snicar V. G., Kostuyk D. V., Kasatkin S. I. High Sensitive Magnetoresistive Sensor for Use in Modern Devices Information Read-out 38

The paper presents the design and function of a highly sensitive magnetoresistive sensor for use in modern devices read information. The analysis and conclusion on the practical relevance of the developed sensor for non-contact detection of weak magnetic fields on the current carrying wires that are in the boards and chips.

Keywords: contactless, magnetoresistance, magnetic field, the conductor, the sensor, the electric current

Maltsev P. P. Prospects of Creating Systems on a Chip for Microwave and Ultra-high Frequency Bands 40

This work shows the possibility of Russian systems-on-chip (SoC) for microwave and ultra-high frequency bands, whose include integrated antennas, amplifiers, MEMS switches, frequency converters and voltage-controlled oscillators. All devices are based on a single basic technology of MIC using PHEMT and MHEMT GaAs heterostructures, which allows to integrate them into a single SoC, provides small loss between the elements of the system, low noise and high output power. Measured data of MMIC's produced by IUHFSE RAS are presented and compared to foreign analogs for 5 to 60 GHz range.

Keywords: system-on-a-chip (SoC), microelectromechanical systems (MEMS), monolithic integrated circuit (MIC), gallium arsenide (GaAs), gallium nitride (GaN), antenna, on-chip antenna, low-noise amplifier (LNA), power amplifier (PA)

Zaitsev A. A. Method of Implementation for Noise-Immunity High-Frequency Controlled Oscillator for on Submicron CMOS Based "Systems on Chip". 49

The new method and circuit of implementation for low-power high-frequency CMOS voltage controlled oscillator for "systems on chip" is considered. Technical advantage is increase of a frequency range and a noise-immunity for the circuit. The diagrams of mathematical modeling for the oscillator on CMOS 180 um based are submitted.

Keywords: CMOS voltage controlled oscillator, VCO frequency range increase, VCO noise-immunity increase

Prokofiev I. V., Sukhanov V. S., Amelichev V. V. Thin-film Resistive Magnetic Field Transducer Application for Vehicle Orientation and Intellectual Monitoring Systems 53

This article describes the results of the thin-film resistive magnetic field transducers research. Technical characteristics of the magnetic compass on the basis of these transducers were researched as a part of the complex navigation system module.

Keywords: magnetic field transducers, thin-film magnetoresistor, magnetic compass, inertial system, navigation system, data complexification

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)

The journal bought since november 1999.

Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev

ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(499) 269-5510.

E-mail: nmst@novtex.ru; http://novtex.ru/nmst/

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 18.02.2012. Подписано в печать 25.03.2013. Формат 60×88 1/8. Заказ МС413.

Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Авансед солюшнз».

Отпечатано в ООО «Авансед солюшнз». 105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятничская, д. 5/7, стр. 2, офис 2.