

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

УДК 621.315.3—181.4 : 621.315.612.6 : 681.2—181.4

З. И. ЗЕЛИКОВСКИЙ, В. И. ШНАЙДЕРМАН

(Кишинев)

МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИЯ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ НА ОСНОВЕ МИКРОПРОВОДА В СТЕКЛЯННОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Развитие микроминиатюризации в приборостроении связано с созданием микроэлементов, удовлетворяющих специфическим метрологическим требованиям. В настоящей работе рассмотрена возможность создания таких элементов на основе литого микропровода в стеклянной изоляции (МП).

Серийно выпускаемый по методу проф. А. В. Улитовского МП обладает особыми механическими и электрическими свойствами, которые обеспечили широкое применение МП в приборостроении [1, 2]. В табл. 1 приведены некоторые параметры МП [3, 4].

Таблица 1

Характеристики	Материал жилы				
	медь	серебро	никель	марганец	сплав Н60ГХ
Диаметр жилы, мк	2—200	10—70	3—20	2—10	3—20
Диаметр в изоляции, мк	8—280	20—105	10—32	10—26	10—30
Интервал рабочих температур, °С	-60 ÷ +400	-60 ÷ +400	-60 ÷ +400	-60 ÷ +100	-60 ÷ +150
Разрывное усилие, г	5—250	20—200	5—20	5—10	10—20
Отношение допустимого диаметра намотки к диаметру провода (без нагрева)	70—200	70—200	70—200	70—200	70—200

Электрические параметры МП и коаксиального МП [5] приведены в табл. 2.

Геометрические размеры и механические свойства МП (см. табл. 1) позволяют использовать его для создания микроминиатюрных элементов.

Электрические свойства МП (см. табл. 2) обеспечивают таким элементам высокую стабильность [6], надежность [7, 8] и точность, соответствующую требованиям приборостроения.

При этом конструктивно изделия из МП могут быть выполнены в виде миниатюрных дискретных элементов, в виде микроэлементов для микромодулей и в корпусах для интегральных схем. По своей конфигу-

Таблица 2

Характеристики	МП из проводниковых сплавов	МП из сплавов сопротивления	Коаксиальный МП
Погонное сопротивление, <i>ком/м</i>	0,01—10	2—200	25—200 (по коаксиалу)
Погонная индуктивность, <i>мкГн/м</i>	2,5	2,5	—
Погонная емкость, <i>пф/м</i>	—	—	200
ТКС, 10^{-5} <i>1/град</i>	+300—600	± 5	Зависит от материала жилы
Пробивное напряжение изоляции, <i>кв</i>	1—3	1—3	1
Тензочувствительность	—	2	—
Тепловая постоянная времени, <i>мсек</i>	2—20	2—20	—
Время задержки, <i>мксек/м</i>	—	—	10^{-3}
Термоэлектродвижущая сила в паре с медью, <i>мкв/град</i>	—	3 (40)	—
Допустимая плотность тока, <i>а/мм²</i>	5000	100—500	—

рации и технологии изготовления элементы из МП могут быть объемными и плоскостными, изготовленными методами моточной технологии, и нитевидными, выполненными методами филаментарной технологии.

Наиболее перспективно применение МП в микроминиатюрных пассивных измерительных элементах, первичных измерительных преобразователях и вторичных измерительных преобразователях. Кроме того, МП может найти и находит широкое применение при микроминиатюризации различных элементов общего применения, например в качестве монтажных проводов, в частности для использования в интегральных схемах, плавких вставок предохранителей на малые токи и др.

МИКРОМИНИАТЮРНЫЕ ПАССИВНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Микрорезисторы. Наиболее широкое применение МП нашел при изготовлении прецизионных резисторов [9] и схемных элементов сопротивления (СЭС) [10], которые наиболее полно удовлетворяют требованиям приборостроения и метрологии.

Несмотря на то, что пленочная технология позволяет получать резисторы с достаточно высокими точностными характеристиками, за рубежом наметилась тенденция к выпуску проволочных микроминиатюрных резисторов [11], в особенности в приборостроении [12].

В табл. 3 приведены предельные характеристики лучших зарубежных микроминиатюрных резисторов, резисторов из МП типа МРГЧ [13] и теоретически достижимые характеристики микроминиатюрных резисторов из МП. Как видно из табл. 3, наибольшей стабильностью обладают резисторы из МП.

Промышленностью освоен выпуск микрорезистора из МП типа С5-6 [3] с плотностью упаковки около 5 элем/см^3 . Теоретически плотность упаковки объемных и плоскостных резисторов из МП составляет

Таблица 3

Тип резистора	Номинал, <i>ком</i>	Допуск, %	ТКС, 10^{-5} <i>1/град</i>	Стабильность, % за год	Плотность упаковки, <i>эле/см³</i>
Пленочный	0,01—1,5·10 ³	0,02—0,2	2—50	0,2	3,5—35
Полупроводниковый	0,05—20	10—30	10—30	0,2	35—350
МРГЧ-серийный	10—10 ⁴	0,03	1,5—5	0,02	—
Расчетный из МП	10 ⁻⁵ —10 ⁵	0,002	0,2	0,002	5—50

около 100 *эле/см³* при общем сопротивлении 10⁸ *ом/см³*, нитевидных — 10⁶ *эле/см³* при общем сопротивлении 10¹⁰ *ом/см³*.

Микроделители. Более высокой плотности упаковки при значительном улучшении метрологических характеристик можно достигнуть при создании микроминиатюрных СЭС. Так, при изготовлении СЭС из МП резисторов типа МПР-3 [14] можно достигнуть плотности упаковки до 30 *эле/см³*.

В делителях, разработанных в КНИИЭП, плотность упаковки повышена в 2—2,5 раза по сравнению с широко известными СЭС-10 [15]. Теоретически и экспериментально доказана возможность получения объемных резисторов с линейной частотной характеристикой до частоты 1 *Мгц* [16]. Частотная характеристика резисторов и делителей из МП может быть улучшена при их изготовлении в виде плоских спиральных катушек либо в виде отрезков МП [17].

Микро-RC-элементы. Достаточно широкое применение получили пленочные элементы с распределенными сопротивлениями и емкостью, так называемые *RC-элементы* [18]. Такие элементы были созданы и на основе МП [19].

Разработанные *RC-элементы* из коаксиального МП имеют следующие параметры: резонансная частота 0,1 *гц* — 10 *Мгц*, статическая емкость 1 *пф* — 0,5 *мкф*, сопротивление 0,1—10⁴ *ком*. Размеры этих элементов: диаметр 3,5 *мм*, длина 10 *мм*.

Необходимо также отметить, что создание микроминиатюрных *RC-фильтров* низких частот более целесообразно только на основе МП. Теоретически достижимая плотность упаковки таких элементов значительно выше, чем у тонкопленочных. Так, *RC-фильтр* на частоту 500 *гц* из тонкой пленки занимает объем 1 *см³*, а из МП всего 0,01 *см³*.

Микроиндуктивности. По сообщениям зарубежной печати [20], некоторые фирмы изготавливают микроминиатюрные проволочные катушки индуктивности на ферритовых сердечниках. В нашей стране также выпускается большое число микроиндуктивностей на ферритовых кольцах и микроплатах.

В табл. 4 приведены усредненные данные различных микроиндуктивностей, а также теоретически достижимые параметры индуктивности из МП. Из табл. 4 видно, что применение МП в катушках индук-

Таблица 4

Тип индуктивности	Номинал, <i>мкгн</i>	Добротность <i>Q</i>	Плотность упаковки, <i>эле/см³</i>
Пленочная спиральная (примерно)	20	40	5—10
Зарубежные проволочные	0,1—10 ⁴	5—130	до 100
Отечественные проволочные	1—4·10 ⁵	20—90	5
Расчетные из МП	2,5·10 ² —4,5·10 ⁵	20	до 200

тивности позволит получить значительно более высокие индуктивности при сравнительно хорошей добротности.

Микроиндуктивности из МП могут быть выполнены в виде объемных катушек и в виде плоских спиральных индуктивностей. Индуктивность объемных катушек из МП составляет 1 мкГн/см^3 , а индуктивность плоских катушек при равных площадях в 2—4 раза выше, чем у тонкопленочных.

МИКРОМИНИАТЮРНЫЕ ПЕРВИЧНЫЕ И ВТОРИЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Наиболее широкое применение может найти МП для создания резистивных и индуктивных преобразователей.

Как видно из изложенного ранее, МП с успехом может быть применен при микроминиатюризации различных преобразователей, выполненных в виде катушек. В частности, из МП можно создать индуктивные преобразователи перемещений, уровня вибраций, ускорения, магнитных полей и др.

На основе МП создаются и могут быть созданы нитевидные тензорезисторы [21], на базе которых возможен выпуск различных модификаций [22], датчики теплопроводности токопроводящих жидкостей [23], датчики давления [24] и разрежения, термометры сопротивления и др. со следующими параметрами:

малобазные тензорезисторы: длина 1—5 мм, сопротивление 50—300 ом, предел измеряемой деформации 0,3%, тензочувствительность 2—2,5, ползучесть 0,2—2%;

термотензорезисторы: длина до 5 мм, сопротивление до 120 ом, тензочувствительность 1, ТКС терморезистора $3 \cdot 10^{-3}$, ТКС тензорезистора $5 \cdot 10^{-5}$;

датчик разрежения: предел измерений 10^{-3} — 10 мм рт. ст. , диаметр 5 мм, длина 50 мм, сопротивление 150 ом, диапазон рабочих температур до 450°C ;

термометр сопротивления: предел измерения 5 — 40°C , сопротивление 100 ом, инерционность 0,01 сек.

Весьма перспективны разработки малобазных термоанемометров из МП, в частности для работы в агрессивных и электропроводящих средах. Число первичных преобразователей из МП будет увеличиваться как за счет дальнейшего изучения свойств серийных МП, так и за счет выпуска МП со специальными свойствами. Широкое применение, например, сможет найти МП из магниторезистивных материалов, в частности из висмута.

МП может быть применен при микроминиатюризации как первичных, так и вторичных измерительных преобразователей, выполненных в виде различных катушек как объемных, так и плоскостных и в виде нитевидных элементов.

В настоящее время из МП серийно выпускается термовакуумный преобразователь переменного тока в постоянный типа ТВБ с нагревателем из МП длиной 4 мм на номинальный ток 1—2 ма. В перспективе возможно понижение номинального тока до 200—500 мка [25]. Закончена разработка подогревного нитевидного терморезистора с косвенным подогревом [26]. Постоянная времени этого преобразователя 1—2 мсек [27]; мощность управления 1—10 мвт. В ближайшее время возможно создание дифференциального термопреобразователя из МП.

Кроме отмеченных выше преимуществ первичных и вторичных из-

мерительных преобразователей из МП, они, как правило, могут работать в агрессивных средах и при высоких значениях температуры и напряжения, как это следует из табл. 1 и [23, 24].

МОТОЧНАЯ И ФИЛАМЕНТАРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

В настоящее время большинство элементов из МП выполнено методоммоточной технологии. Разработана серия намоточных станков, в том числе и полуавтоматических, позволяющих вести намотку различных типов (рядовую, упорядоченный навал и др.) на различные каркасы с достаточно высокой точностью [28]. Минимально допустимый диаметр каркаса при намотке без подогрева (примерно 1 мм) позволяет получить плотность упаковки порядка 50 элем/см³.

Этот диаметр можно уменьшить при намотке МП с подогревом в процессе намотки. Подогрев МП в процессе намотки, кроме уменьшения диаметра намотки, создает предпосылку для изготовления бескаркасных объемных элементов [29]. В этом случае нагрев МП ведут до температуры, при которой происходит размягчение стеклянной изоляции и спекание отдельных витков.

Станки для намотки МП с подогревом уже нашли применение при производстве микрорезисторов [30], в том числе и бескаркасных.

Большое и специфическое значение для микроминиатюризации элементов и преобразователей из МП имеет уменьшение габаритов контактного узла, так как в отдельных случаях его размеры становятся соизмеримыми с размерами элемента. В микроминиатюрных изделиях из МП нашли применение как классические способы создания контактного узла (пайка, сварка и др.), так и вновь разработанные (гальванический [31] и термохимический [25]). Наименьшая площадь контактного узла, достигнутая в настоящее время, составляет 0,01—0,05 мм².

При разработке малобазных тензорезисторов с базой 1—2 мм и предохранителей на малые токи с плавкой вставкой длиной 1—3 мм была создана филаментарная технология изготовления этих изделий из МП. В этой связи представляет особый интерес рассмотрение преимуществ филаментарного (нитевидного) проектирования.

Известно, что микроминиатюризация в своем развитии прошла два этапа: первый — использование объемных микроминиатюрных элементов; второй — использование пленочной техники, позволившей получить планарные, т. е. двухмерные элементы. В настоящее время (в особенности в связи с развитием микромощной электроники) микроминиатюризация стоит на пороге широкого применения филаментарных элементов.

Кроме получения сверхминиатюрных элементов, применение методов филаментарного проектирования обеспечивает особо важные для измерительных элементов и преобразователей свойства:

1) в соответствии с условием теплоотдачи тонких цилиндров [32] такие элементы обладают очень малой тепловой постоянной времени;

2) реактивность прямолинейного провода во много раз меньше, чем у любого типа намотки, и нитевидные элементы имеют минимальную электрическую постоянную времени;

3) филаментарные элементы обладают значительно меньшей паразитной емкостью, чем планарные, что особенно важно для быстродействия схем нановаттного диапазона [33].

Применение этой технологии позволяет получить нитевидные измерительные элементы из МП с плотностью упаковки (без учета токопроводов) до 10⁶ элем/см³.

Следует также отметить возможность дальнейшего значительного уменьшения диаметра жилы МП за счет его утоньшения [34, 35], либо создания в нем системы шаров и перемычек [36], что позволяет увеличить погонное сопротивление на один-три порядка. Этими способами были получены экспериментальные образцы МП с сопротивлением свыше $5 \cdot 10^6$ ком/м.

Применение филаментарной техники позволяет использовать довольно короткие (порядка 1—2 мм) отрезки провода, т. е. отрезки, на которых свойства литого микропровода в стеклянной изоляции особенно стабильны. Кроме того, поскольку для изготовления изделия не требуется больших длин, открывается широкая возможность применения микропроводов в стеклянной изоляции, изготовленных по методу Тейлора [37, 38].

ВЫВОДЫ

По своим геометрическим размерам, а также электрическим и механическим параметрам микропровод в стеклянной изоляции является весьма перспективным материалом для создания микроминиатюрных элементов, необходимых для развития микроминиатюризации в приборостроении.

Наиболее перспективными разработками микроминиатюрных элементов из МП следует считать микроминиатюрные пассивные измерительные элементы (резисторы, делители, индуктивности, RC-элементы и др.) и микроминиатюрные первичные и вторичные измерительные преобразователи (температуры, деформации, давления, скорости и др.).

Значительного уменьшения размеров микроминиатюрных элементов, необходимых для приборостроения, можно достигнуть при использовании филаментарной техники с МП.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Улитовский. Тонкая проволока в сплошной стеклянной изоляции и возможности ее применения.— ПТЭ, 1957, № 3.
2. З. А. Тимофеева и др. Доклад XIII. Применение специальных материалов в электроприборостроении. Раздел 6. Литой микропровод в электроприборостроении.— Доклады II Всесоюзной конференции по электроприборостроению. Л., ОНТИ ВНИИЭП, 1965.
3. К. И. Мартюшов, Ю. В. Зайцев. Резисторы. М.—Л., «Энергия», 1966.
4. Е. Я. Бадинтер, З. И. Зеликовский. Исследование свойств литых микропроводов из сплавов сопротивления в стеклянной изоляции.— Кабельная техника, 1965, вып. 35.
5. С. А. Трескин и др. Разработка способа получения коаксиального микропровода.— В сб. «Микропровод и приборы сопротивления», вып. IV. Кишинев, 1966.
6. Е. Я. Бадинтер и др. О стабильности резисторов из литого марганцевого микропровода.— Сб. «Микропровод и приборы сопротивления», вып. IV. Кишинев, 1966.
7. В. П. Цетенс. О надежности сопротивлений из микропровода, выпускаемых серийно.— В сб. «Микропровод и приборы сопротивления», вып. II. Кишинев, 1964.
8. В. Д. Кибенко и др. Перспективы повышения надежности и расширения диапазона рабочих температур микропроволочных сопротивлений.— В сб. «Вопросы надежности электроизмерительных приборов». М., ОНТИПрибор, 1965.
9. Я. П. Борисов и др. Проволочные сопротивления. Авторское свидетельство № 154916.— Бюллетень изобретений, 1963, № 11.
10. З. И. Зеликовский и др. Доклад V. Устройство для расширения пределов измерений. Раздел V. Устройство для расширения пределов на активных сопротивлениях.— Доклады II Всесоюзной конференции по электроприборостроению. Л., ОНТИ ВНИИЭП, 1965.
11. Уэллард. Улучшение параметров сопротивлений при уменьшении габаритов.— Электроника, 1964, № 5.

12. Шмид. Дешевые измерительные приборы.— Электроника, 1964, № 24.
13. В. О. Кибенко и др. Микропроводочные резисторы типа МРЧГ.— В сб. «Микропровод и приборы сопротивления», вып. IV. Кишинев, 1966.
14. Резистор постоянный микроминиатюрный МПР-3. Рекламный лист МЭП, 1965.
15. З. И. Зеликовский и др. Наборы прецизионных резисторов из микропровода для аналоговых вычислительных машин.— В сб. «Микропровод и приборы сопротивления», вып. III. Кишинев, 1965.
16. Л. Э. Дегтярь, Л. М. Зафрина. Реактивность однослойной катушки.— В сб. «Микропровод и приборы сопротивления», вып. II. Кишинев, 1964.
17. В. Г. Красиньков и др. Герметизированные теплостойкие проволочные сопротивления повышенной точности.— Радиотехническое производство, 1957, № 14.
18. Миниатюризация и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. Под ред. П. А. Барканова, М. С. Лихачева. Перевод с англ. М., «Мир», 1965.
19. Л. Э. Дегтярь и др. Сопротивление. Авторское свидетельство № 174250.— Бюллетень изобретений, 1965, № 17.
20. Сленджер. Катушки индуктивности для интегральных схем.— Электроника, 1965, № 11.
21. В. А. Агоронник и др. Малобазный тензодатчик. Авторское свидетельство № 164999.— Бюллетень изобретений, 1964, № 17.
22. Японская общепромышленная автоматика.— Приборы и системы управления, 1967, № 4.
23. И. В. Литвиненко и др. Сварка остеклованной микропровода с толстыми остеклованными проводами.— ПТЭ, 1965, № 5.
24. Р. Х. Бурштейн, Д. Л. Кондрашов. Манометр для измерения давления агрессивных газов.— ЖФХ, 1959, 33, № 7.
25. В. И. Червякова. Термоэлектрические приборы. М., Госэнергоиздат, 1963.
26. В. М. Геллер и др. Термосопротивление с косвенного подогрева. Авторское свидетельство № 183814.— ИПОТЗ, 1966, № 4.
27. В. М. Геллер, З. И. Зеликовский. Нестационарный режим подогревных сопротивлений.— ИВУЗ, Приборостроение, 1965, № 6.
28. Ю. И. Аввакумов и др. Особенности и пути совершенствования промышленного производства резисторов из литого микропровода.— В сб. «Микропровод и приборы сопротивления», вып. IV. Кишинев, 1966.
29. А. А. Меркулов, В. В. Трояновский. Способ изготовления электрических сопротивлений. Авторское свидетельство № 112240.— Бюллетень изобретений, 1958, № 4.
30. Ю. И. Аввакумов и др. Полуавтомат для намотки микромодульных резисторов под нагревом.— В сб. «Микропровод и приборы сопротивления», вып. III. Кишинев, 1965.
31. З. И. Зеликовский и др. Способ присоединения обмотки из остеклованного микропровода к токопроводам. Авторское свидетельство № 171895.— Бюллетень изобретений, 1965, № 12.
32. З. И. Зеликовский, Е. А. Серний. Теплоотдача тонкого горизонтального цилиндра в условиях свободной конвекции.— В сб. «Микропровод и приборы сопротивления», вып. II. Кишинев, 1964.
33. Микро мощная микроэлектроника. Обзор № 5. Серия «Полупроводниковые материалы и микроэлектроника». М., ЦНИИТЭИИ МЭП, 1966.
34. А. В. Улитовский и др. Способ изготовления электрических сопротивлений. Авторское свидетельство № 114718.— Бюллетень изобретений, 1958, № 8.
35. R. G. S. Clarke. Microwire — a New Engineering Material.— Electronic Components, 1963, № 9.
36. А. Н. Балашов, В. И. Шнайдерман. Способ изготовления электрических сопротивлений. Авторское свидетельство № 179367.— ИПОТЗ, 1966, № 5.
37. G. F. Taylor. A Method of Drawing Metallic Filaments and a Discussion of their Properties and Uses.— The Physical Review, 1924, v. 23, seconde serie, № 5.
38. Herbert Wagner. Class-coated Microwire.— Wire and Wire Products, 1964, № 6.

*Поступила в редакцию
10 августа 1967 г.,
окончательный вариант —
23 октября 1967 г.*