

А. И. ИЛЬЕНКОВ, М. И. КУДРЯШОВ

(Новосибирск)

О ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Дается краткий обзор основных электрических характеристик омических сопротивлений, применяемых в тонкопленочных схемах, а также физических явлений, определяющих их свойства. Обсуждаются специфические особенности тонкопленочных сопротивлений и схем, использование которых является перспективным для совершенствования измерительной аппаратуры.

Пленочные сопротивления, оформленные в виде отдельных элементов, уже давно [1, 2] используются в измерительной аппаратуре. Характеристики таких сопротивлений общеизвестны. С развитием микроминиатюризации электронных устройств предъявляются новые требования к конструкции и технологии изготовления тонкопленочных элементов. Оформление их в виде отдельных элементов стало неприемлемым. При выполнении микроминиатюрных пленочных схем на одну и ту же подложку наносятся все пассивные пленочные элементы: как сопротивления, так и конденсаторы, катушки индуктивности и соединительные проводники.

Несомненный практический интерес представляет оценка возможности использования тонкопленочных схем в измерительной аппаратуре. Для этого необходимо знать специфические особенности тонкопленочных пассивных элементов, в частности сопротивлений. Настоящая статья является кратким обзором сведений по тонкопленочным сопротивлениям, опубликованных в отечественной и иностранной литературе.

Процесс образования тонких пленок

Специфические особенности тонкопленочных сопротивлений проще понять, если предварительно ознакомиться хотя бы с качественной стороной процесса образования проводящей пленки на диэлектрической подложке.

В настоящее время тонкие проводящие пленки изготавливаются в основном либо путем испарения соответствующих веществ в вакууме, либо путем их катодного распыления.

Пленки, полученные катодным распылением, лучше сцепляются с подложкой, так как частицы распыляемого вещества, имеющие энергию в несколько сот электронвольт, лучше внедряются в подложку. При этом подложка лучше очищается от адсорбированных газов и окисных

слоев. Однако пленки получаются химически менее чистыми, чем при испарении в вакууме, хотя катодное распыление и проводится в атмосфере инертных газов. Наличие химически активных элементов не может быть исключено из-за низкой степени вакуума порядка $100-1,0 \text{ н/м}^2$ ($1-10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$), обычно используемой при катодном распылении. В последнее время метод катодного распыления применяется все реже и реже. Это обусловлено тем, что тонкопленочные активные элементы, исследования которых ведутся очень форсированно, пока могут быть изготовлены только путем испарения в вакууме.

Метод испарения в вакууме позволяет получать тонкопленочные сопротивления с большей степенью воспроизводимости и с улучшенными электрическими характеристиками. Для реализации этого метода необходим вакуум от 10^{-3} до 10^{-6} н/м^2 и даже до 10^{-8} н/м^2 (примерно $10^{-5}-10^{-8}$ и даже до $10^{-10} \text{ мм рт. ст.}$). Получение пленок из сплавов с компонентами, значительно отличающимися по физическим свойствам, достигается либо испарением компонент сплава с разных испарителей и смешиванием их в паровой фазе, либо испарением сплава при достаточно высокой температуре, либо последовательным испарением компонент с последующим прогревом пленки для получения однородного состава в результате диффузии.

Вне зависимости от метода изготовления весь процесс образования пленки можно разделить на три основных этапа: отрыв частиц вещества от основной массы, взаимодействие этих частиц со средой на пути движения к подложке и конденсация их на подложке с образованием пленки. В нашем случае целесообразно рассмотреть только последний этап.

Частицы вещества, опускающиеся на подложку, обладают относительно большой кинетической энергией, которую они передают в основном подложке, несколько повышая температуру последней. Однако процесс передачи энергии не может быть осуществлен мгновенно, поэтому частицы имеют возможность некоторое время перемещаться по подложке, заполняя в первую очередь имеющиеся микроуглубления и образуя, таким образом, островки напыляемого вещества. По мере увеличения количества осевших частиц эти островки увеличиваются и, наконец, соприкасаются друг с другом, создавая проводящие цепочки. Ориентация кристаллических решеток островков различная, поэтому получаются пленки поликристаллической структуры, если наносится неаморфное вещество.

Поскольку абсолютная толщина пленки в разных точках различна, то толщина пленки в целом (Δ) определяется как частное от деления объема нанесенного вещества на покрываемую площадь подложки. Толщина пленки, при которой возникают проводящие цепочки, называется критической. При толщинах, меньших критической, пленка как единое целое фактически не существует. Естественно, что критическая толщина пленки даже из одного и того же вещества очень сильно зависит от микрорельефа подложки. Совершенно очевидно также, что воспроизводимые электрические характеристики могут наблюдаться только у пленок, толщина которых существенно больше критической.

Электрические характеристики тонкопленочных сопротивлений

Рассмотрим теперь электрические характеристики тонкопленочных сопротивлений, обратив внимание на их специфические особенности.

Удельное сопротивление. Общеизвестный параметр проводящих материалов, объемное удельное сопротивление, несколько видоизменяется применительно к тонкопленочной форме материала. Для практических

расчетов оказалось более удобным характеризовать проводящие материалы листовым, а не объемным удельным сопротивлением. Листовое удельное сопротивление ρ_n — сопротивление квадратного образца тонкопленочного материала. Этот параметр обычно имеет размерность *ом/квдрат*, не зависит от геометрических размеров квадрата и зависит от толщины пленки. Однако это не является существенным недостатком, поскольку дает свободу выбору проводящего материала. Вполне очевидно, что, выбирая соответствующую толщину, можно получить пленки с одинаковым листовым удельным сопротивлением и из разных материалов.

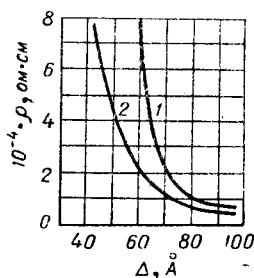


Рис. 1. Зависимость объемного удельного сопротивления пленок платины от толщины и термообработки: 1 — до прогрева; 2 — после прогрева [3].

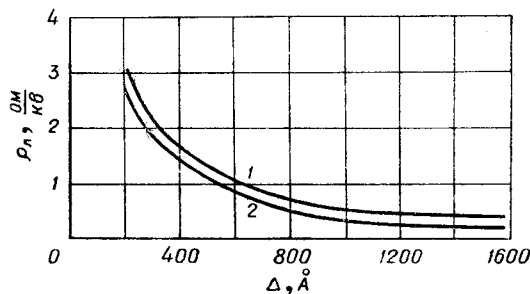


Рис. 2. Зависимость листового удельного сопротивления пленок алюминия от толщины и термообработки: 1 — до прогрева; 2 — после прогрева [4].

Объемное удельное сопротивление массивных образцов или тонких слоев, вырезанных из них, — постоянная величина. В случае же тонких пленок даже этот параметр является функцией толщины (рис. 1), не говоря уже о листовом удельном сопротивлении, которое заведомо зависит от толщины (рис. 2, 3). При толщине пленки меньше критической $\rho \rightarrow \infty$, поскольку отсутствуют проводящие цепочки островков. С увеличением толщины удельное сопротивление, как объемное, так и листовое, уменьшается в результате увеличения числа проводящих цепочек. При больших толщинах пленок объемное удельное сопротивление стремится к постоянной величине, существенно превышающей ρ_m мас-

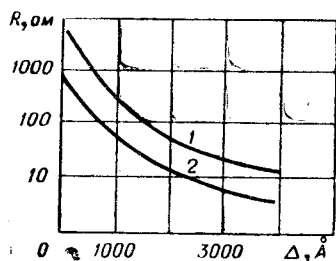


Рис. 3. Зависимость сопротивления пленок никрома от толщины и термообработки: 1 — до прогрева; 2 — после прогрева [5].

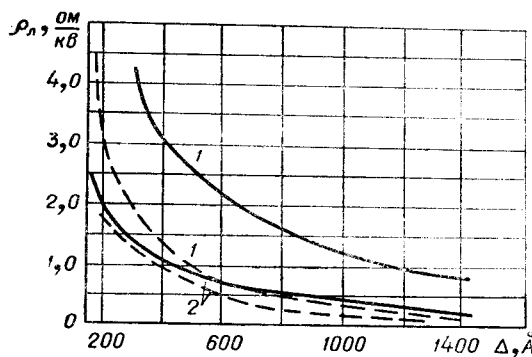


Рис. 4. Зависимость листового удельного сопротивления пленок золота от способа нанесения, толщины и термообработки: пунктирные линии — испарение в вакууме; сплошные линии — катодное распыление; 1 — до прогрева, 2 — после прогрева [4].

сивных образцов. Массивные образцы имеют упорядоченную кристаллическую структуру, поэтому они хотя бы в одном направлении однородны. Пленки имеют поликристаллическую структуру, и сопротивление перехода между кристаллами выше, чем внутри их. Следовательно, объемное удельное сопротивление даже толстых пленок будет больше, чем удельное сопротивление массивных образцов.

Зависимость объемного удельного сопротивления от толщины пленки является еще одним аргументом в пользу практической целесообразности использования листового удельного сопротивления в качестве параметра материалов в пленочной форме.

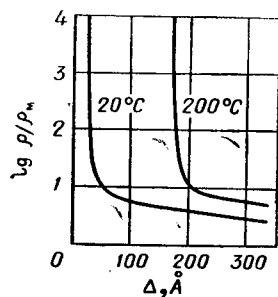


Рис. 5. Влияние температуры подложки на сопротивление пленок золота [3].

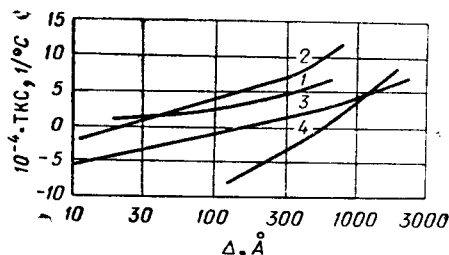


Рис. 6. Зависимость ТКС пленок металлов от их толщины: 1 — золото; 2 — платина; 3 — родий; 4 — никель [3].

Термообработка пленок после их нанесения ведет к необратимому уменьшению удельного сопротивления (см. рис. 1—3). Это объясняется увеличением размеров кристаллов и, следовательно, уменьшением числа переходов между кристаллами, а также удалением газов, поглощенных или растворенных в процессе нанесения пленки. Пленки, полученные испарением в вакууме, изменяют удельное сопротивление после прогрева меньше, чем полученные катодным распылением (рис. 4).

Листовое удельное сопротивление зависит также от микрорельефа и температуры подложки. Пленки, нанесенные на холодную подложку, имеют более поликристаллическую структуру, меньшую стабильность и прочность. Повышение температуры подложки при нанесении пленки облегчает процесс миграции частиц, что ведет к образованию более крупных островков материала; в результате увеличивается критическая толщина пленки (рис. 5). Соответственно изменяются и электрические характеристики пленок. Другими словами, повышение температуры подложки во время нанесения пленки во многом эквивалентно проведению термообработки.

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Характерной особенностью тонкопленочных сопротивлений является зависимость ТКС от толщины. С увеличением толщины пленки ТКС изменяется от отрицательных значений до положительных (рис. 6, 7). Поликристаллическую пленку можно представить в виде последовательно соединенных сопротивлений кристаллов и переходов между ними. Кристаллы имеют положительный ТКС, как и массивные образцы. Переходы между кристаллами имеют отрицательный ТКС, обусловленный характером проводимости от кристалла к кристаллу. На границе кристаллов имеется поверхностный потенциальный барьер, преодолеть который могут только электроны, обладающие достаточной энергией. Этим, в частности, можно объяснить в первом приближении тот факт, что сопротивление

переходов больше сопротивления кристаллов. С повышением температуры энергия электронов увеличивается и большее количество их переходит в соседний кристалл, либо «перепрыгивая» через барьер, либо «туннелируя» сквозь него. Увеличение количества электронов, перешедших в соседний кристалл, эквивалентно уменьшению сопротивления перехода с повышением температуры.

При малых толщинах пленки длина границ соприкосновения кристаллов относительно мала. Следовательно, сопротивление переходов является доминирующей частью сопротивления пленки в целом, поэтому и ТКС будет отрицательным. С повышением толщины пленки длина границ соприкосновения кристаллов увеличивается и роль сопротивления переходов уменьшается, что приводит к уменьшению отрицательного ТКС, а при дальнейшем увеличении толщины пленки — к изменению его знака. Термообработка пленок повышает ТКС (рис. 8), поскольку роль сопротивления переходов уменьшается в результате увеличения размеров кристаллов. Кривая на рис. 8 построена по данным [4].

Толщина пленки, при которой ТКС равен нулю, различна даже для одного и того же материала и зависит от условий нанесения пленки. Получать тонкопленочные сопротивления с нулевым ТКС очень заманчиво. Однако в настоящее время практически реализовать это очень трудно. Для воспроизводимого изготовления таких сопротивлений нужно очень тщательно соблюдать идентичность исходных материалов, чистоты и микрорельефа подложки, температурных режимов испарителя, подложки и объема, в котором происходит перенос испарившихся частиц, и др. Напыление таких сопротивлений надо проводить в глубоком вакууме. Эти задачи пока еще не решены. Однако, учитывая бурное развитие микроэлектроники, есть все основания считать, что эта проблема будет решена в недалеком будущем.

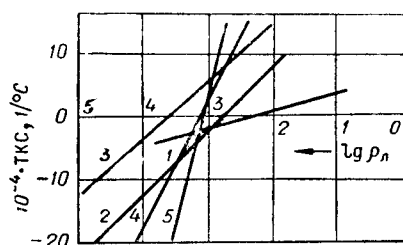


Рис. 7. Зависимость ТКС пленок различных сплавов от логарифма удельного сопротивления:

1 — Pa (42%), Au (40%), Ro (18%); 2 — Pa (65%), Ro (28%), Mn (6%), Ge (1%); 3 — Pt (85,5%), Ru (9,5%), Mn (5%); 4 — Cr — Ti — N; 5 — Cr — N [3].

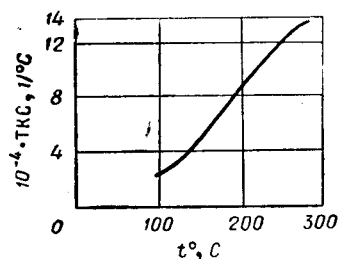


Рис. 8. Зависимость ТКС пленок платины от температуры термообработки.

Высокочастотные свойства. Объемные сопротивления, в том числе и проволочные, неприменимы в области высоких частот вследствие поверхностного эффекта. Большинство тонкопленочных сопротивлений, по существу, свободны от каких-либо высокочастотных паразитных явлений, поскольку их толщина обычно бывает значительно меньше толщины скин-слоя для данного материала. Почти единственным фактором, влияющим на высокочастотные свойства, является шунтирующая емкость между концами сопротивления, величина которой составляет десятые доли пикофарды.

Старение. С течением времени могут происходить необратимые изменения параметров тонкопленочных сопротивлений. Обычно старение

сопротивлений определяют за 1000 часов. Основной причиной изменения параметров пленок во времени является воздействие внешней среды. Пленки, не защищенные от внешних воздействий, окисляются и разбухают от влаги. Как известно, сопротивление окислов значительно выше сопротивления чистых материалов. В окисленной пленке толщина чистого материала уменьшается, что ведет к повышению сопротивления. В разбухших от влаги пленках сопротивление тоже увеличивается, так как молекулы воды, проникая в пленку по границам между кристаллами, увеличивают сопротивление переходов. Чем тоньше пленка, тем более заметное влияние оказывает внешняя среда на ее характеристики (рис. 9). Для защиты от внешних воздействий тонкопленочные сопротивления покрывают лаками, эпоксидными смолами, различными окислами, например, SiO_2 и др. Однако введение защитных покрытий усложняет технологию изготовления.

Характеристики старения определяются свойствами материала, используемого для тонкопленочных сопротивлений. В последнее время стали применять танталовые пленки. Использование тантала объясняется его высоким удельным сопротивлением ($200\text{--}600 \text{ мком} \cdot \text{см}$), хорошей стабильностью и низким температурным коэффициентом сопротивления (от $1 \cdot 10^{-6}$ до $100 \cdot 10^{-6}$ на 1°C), получаемыми в частично окисированных или нитрированных осажденных пленках [6]. Танталовые пленки обладают хорошей устойчивостью к химическим и атмосферным воздействиям и не требуют противокоррозийной защиты. Для пленок с листовым удельным сопротивлением до 500 ом/кв получена стабильность порядка $0,3\%$ на 1000 часов. Малым старением обладают титановые тонкопленочные сопротивления, но они имеют довольно большой положительный ТКС.

Основные электрические характеристики тонкопленочных сопротивлений, изготовленных из различных материалов, для сравнения сведены в таблицу.

Материал	ом/кв	ТКС, 1°C	Стабильность во времени		Литература
			%	часы	
Хром	500+30000	$3 \cdot 10^{-4}$	0,5	1000	[7,8]
Нихром Х20Н80	1+300	$+0,5 \cdot 10^{-4} \div$ $\div -0,25 \cdot 10^{-4}$	0,2	7000	[5,9,10]
Сплав Карма (Ni 73%, Cr 20%, Al 7%)	—	$2 \cdot 10^{-5}$	0,5	2000	[8]
Кермет (Cr+SiO ₂ , Ta+Ta ₂ O ₅)	1000+5000	$-(10^{-4} \div 10^{-3})$	—	—	[9]
Тантал	25+80	10^{-4}	0,5	1700	[11]
Нитрид тантала	До 200	$+0,25 \cdot 10^{-4} \div$ $\div -0,75 \cdot 10^{-4}$	0,1	1000	[7]
Тантал нитрированный	До 600	$10^{-4} \div 10^{-6}$	0,3	1000	[6]
Титан	500+2000	$\pm 0,1 \cdot 10^{-3}$	1,0	1000	[7]
Окись олова	До 500	$\pm 0,3 \cdot 10^{-3}$	1,0	1000	[7]
Проводящая краска на основе углерода	До 10^4	$(0,5 \div 1) \cdot 10^{-3}$	5+10	1000	[7]

Технологические ограничения точности тонкопленочных сопротивлений

Необходимость использования сопротивлений с возможно меньшим отклонением от номинальной величины наиболее ярко проявляется в измерительных цепях.

При заданном листовом удельном сопротивлении величина сопротивления в омах определяется геометрическими размерами пленки. Современный уровень тонкопленочной технологии может обеспечить воспроизводимость листового удельного сопротивления с погрешностью до 5%. Точность размеров и формы тонкопленочных сопротивлений являются функцией точности изготовления и установки масок. Эти два фактора создают неопределенность линейных размеров пленки. При использовании металлических масок абсолютная неопределенность размеров получается порядка 10 мк, а при фотолитографическом маскировании — 5 мк. Обычно ширина (b) тонкопленочного сопротивления значительно меньше его длины, поэтому точность сопротивления зависит в основном от неопределенности ширины (рис. 10).

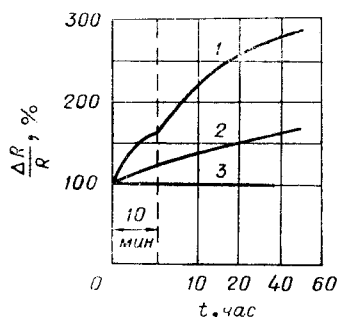


Рис. 9. Изменение сопротивления трех пленок никрома различной толщины при хранении на воздухе:

$$1 - \rho_{\text{л}} = 6260 \text{ ом/кв}; 2 - \rho_{\text{л}} = 2700 \text{ ом/кв}; 3 - \rho_{\text{л}} = 115 \text{ ом/кв} [4].$$

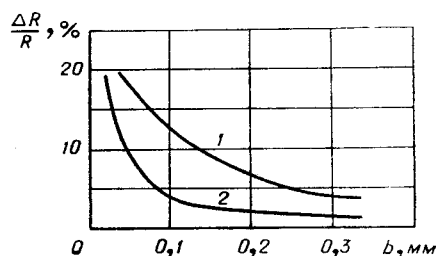


Рис. 10. Влияние способа маскирования на точность пленочного сопротивления:

1 — механический способ; 2 — фотолитографический способ [12].

На точность сопротивлений оказывает влияние также погрешность в расположении выводов. Уменьшение этой погрешности достигается обычно рациональным конструированием выводов. Ряд примеров конструктивных решений приведен в [12]. Несомненный практический интерес представляет нанесение на подложку сначала выводов, а затем резистивного материала. В этом случае появляется возможность контролировать величину сопротивления в процессе нанесения пленки.

Современная тонкопленочная технология позволяет воспроизводить номинальные значения сопротивлений с погрешностью до единиц процентов. В ряде случаев, особенно в измерительных цепях, такая погрешность неприемлема. Разработаны способы подгонки сопротивлений после их нанесения на подложку. Эти способы сводятся к механическому удалению отдельных участков пленки или к ее локальному травлению, окислению.

Для механического способа подгонки сопротивления должны иметь специальную конструкцию. Несколько конструктивных вариантов приведено в [13]. Травление или окисление осуществляется путем нанесения капли электролита на часть пленки. В эти капли часто помещаются зонды из благородных металлов, на которые подается напряжение и с помощью которых измеряется сопротивление. Путем подгонки можно получить сопротивления с погрешностью до 0,1% и лучше.

З а к л ю ч е н и е

Выше рассмотрены основные свойства тонкопленочных сопротивлений. Однако надо отметить, что такие сопротивления все реже используются как отдельные элементы. Обычно на одной подложке размещается полная цепь, состоящая из активных и пассивных элементов, а также соединительных проводников, в тонкопленочном исполнении. Это открывает дополнительные возможности улучшения измерительных цепей путем применения тонкопленочных сопротивлений.

Преимущества тонкопленочных сопротивлений, заключающиеся в малых размерах, уже достигнутой высокой стабильности и малом старении, хороших высокочастотных свойствах, не требуют подробного обсуждения с точки зрения использования в измерительной аппаратуре.

Одновременное изготовление сопротивлений на одной подложке приводит к тому, что относительный разброс сопротивлений уменьшается. Относительный разброс сопротивлений определяется как процент отклонения отношения двух сопротивлений в схеме от отношения их номинальных величин. Если одно из сопротивлений окажется завышенным по отношению к номинальной величине, то и остальные сопротивления будут завышены примерно в такой же степени. Обычно относительный разброс сопротивлений получается менее 2%. Аналогичное положение наблюдается и с ТКС, т. е. все одновременно наносимые сопротивления будут иметь примерно одинаковую величину ТКС.

Тонкопленочные сопротивления, составляющие схему на одной подложке, находятся в почти однородном «микроклимате», поскольку занимаемое ими пространство мало и градиент температуры и влажности в этом пространстве ничтожен, особенно при малых рассеиваемых мощностях. Следует иметь в виду примерно одинаковую величину ТКС. Следовательно, использование тонкопленочных схем, особенно во входных устройствах, может привести к повышению климатической стабильности измерительной аппаратуры. Отметим, что и другие пассивные элементы тонкопленочных схем также обладают малым относительным разбросом параметров и находятся в однородном микроклимате.

Применение тонкопленочных сопротивлений, равно как и других тонкопленочных пассивных элементов, в измерительных цепях является перспективным направлением дальнейшего совершенствования измерительной аппаратуры.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Б. Т. Коломиец, Ю. П. Маслаковец. Безиндукционные сопротивления из металлического слоя, полученного методом катодного распыления.— ЖТФ, 1932, № 1.
2. В. И. Устьянов. Производство высокоомных сопротивлений методом катодного распыления.— ИЭСТ, 1937, № 5—6.
3. Б. С. Гальперин. Непроволочные сопротивления. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.
4. В. В. Слуцкая. Тонкие пленки в технике сверхвысоких частот. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
5. М. В. Белоус и др. Электрические свойства тонких пленок нихрома.— Физика металлов и металловедение, 1963, т. 16, № 5.
6. G. Siddall. Thin-film electronics in the USA.— Electronic Components, 1964, v. 5, N 2, p. 110—114; N 3, p. 212—215; N 5, p. 413—415; N 8, p. 670—673.
7. M. F. Wolff. Advances in microminiaturization.— Electronics, 1963, v. 36, N 7, p. 45—60.
8. А. Т. Белевцев. Микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. М.—Л., Изд-во «Энергия», 1965.
9. C. R. Scott, D. W. Brooks. Thin-film monolithic circuits — how and when to use them.— Electron. Design, 1964, v. 12, N 26, p. 64—68.

10. A. T e w e s. Neuentwicklungen auf dem Gebiete der Mikroelektronik.—Radio und Fernsehen, 1964, N 21, S. 659—661.
11. A. E. L e s s o r, L. I. M a i s s e r l, R. E. T h u n. The fabrication of thin-film circuits (part II).—Semicond. Products and Solid State Technol., 1964, v. 7, N 4, p. 19—22.
12. G. F r a n c e. The design of thin-film microcircuits.—Brit. Commun. and Electr., 1965, v. 12, N 1, p. 26—33.
13. Ю. П. Е р м о л а е в. Расчет и конструирование пригоняемых микропленочных сопротивлений.—ИВУЗ, Радиотехника, 1963, т. 6, № 6.

*Поступила в редакцию
23 июля 1965 г.*