

Министерство образования и науки Российской Федерации
Автономное государственное бюджетное образовательное
учреждение

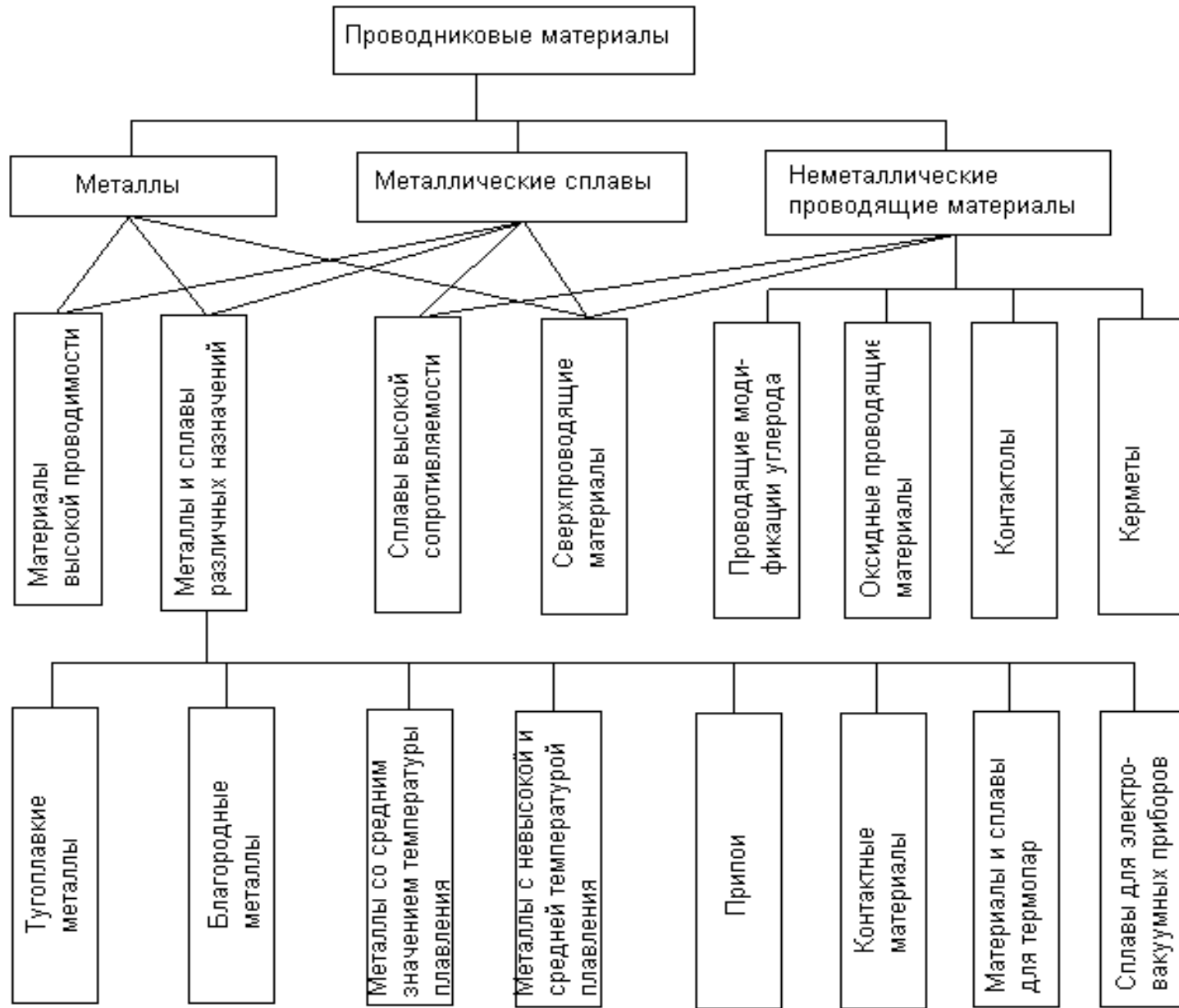
высшего профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт неразрушающего контроля

Дисциплина «Материалы электронной техники»

ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Гормаков А.Н., доц. каф. ТПС
ИНК НИ ТПУ, 2017 г.



Металл проводника	Химический индекс	Удельн. эл. сопротивление ρ мкОм·м или Ом·мм ² /м	Темпер. коэфф. удельного сопротивления TK_ρ , 1/град	Коэфф. теплопроводности λ Вт/м·град	Работа выхода электрона из металла, $W_{\text{вых}}$, эВ	Температура плавления, $T_{\text{пл}}$, °С
1	2	3	4	5	7	8
Чистые металлы						
Серебро	Ag	0,016	$4 \cdot 10^{-3}$	425	4,4	961
Медь	Cu	0,0172	$4,3 \cdot 10^{-3}$	390	4,3	1083
Золото	Au	0,024	$3,8 \cdot 10^{-3}$	293	4,8	1063
Алюминий	Al	0,028	$4,2 \cdot 10^{-3}$	209	4,3	657
Индий	In	0,09	$4,7 \cdot 10^{-3}$	25	—	156
Олово	Sn	0,12	$4,4 \cdot 10^{-3}$	65	4,4	232
Свинец	Pb	0,21	$3,7 \cdot 10^{-3}$	35	3,7	327
Никель	Ni	0,073	$6,5 \cdot 10^{-3}$	95	5	1455
Железо	Fe	0,098	$6 \cdot 10^{-3}$	73	4,5	1535

Металл проводника	Химический индекс	Удельн. эл. сопротивление ρ мкОм·м или Ом·мм ² /м	Темпер. коэфф. удельного сопротивления ТК _ρ , 1/град	Коэфф. теплопроводности λ Вт/м·град	Работа выхода электрона из металла, $W_{\text{вых}}$, эВ	Температура плавления, $T_{\text{пл}}$, °С
1	2	3	4	5	7	8
Чистые металлы						
Титан	Ti	0,42	$4,4 \cdot 10^{-3}$	15	4,1	1680
Платина	Pt	0,105	$3,9 \cdot 10^{-3}$	71	5,3	1773
Молибден	Mo	0,057	$4,6 \cdot 10^{-3}$	151	4,2	2620
Тантал	Ta	0,135	$3,8 \cdot 10^{-3}$	54	4,1	2970
Вольфрам	W	0,055	$4,6 \cdot 10^{-3}$	168	4,5	3380
Графит поли-кристалл	C	8	$-1 \cdot 10^{-3}$	—		
Графит	C	10...50	$-2 \cdot 10^{-4}$	—		

Металл проводника	Химический индекс	Удельн. эл. сопротивление ρ мкОм·м или Ом·мм ² /м	Темпер. коэфф. удельного сопротивления ТК _ρ , 1/град	Термо-ЭДС относительно меди, мкВ/град	Температура правления, T _{пл} , °С
1	2	3	4	6	8
Сплавы					
Манганин	Cu – 86% Mn - 12%	0,42...0,48	$(5...30) \cdot 10^{-6}$	1...2	940
Константан	Cu – 60% Ni – 40%	0,48...0,52	$(5...20) \cdot 10^{-6}$	40...50	1270
Нихром	Ni – 60% Cr – 15%	1...1,2	$1,7 \cdot 10^{-4}$		1360
Фехраль	Cr – 15% Al – 5% Ост. Fe	1,3	$1,2 \cdot 10^{-4}$		1450
Хромаль	Cr – 23% Al – 5% Ост. Fe	1,5	$6,5 \cdot 10^{-5}$		
Ижорский		0,25	$2 \cdot 10^{-6}$		1050

Классификация проводниковых материалов по ρ

1. Проводниковые материалы с малым электрическим сопротивлением ($\rho=(0.015...0.2)\times 10^{-6}$ Ом·м).

2. К ним относятся:

1.1. Материалы для точных изделий, проводного монтажа, печатных и пленочных проводников;

1.2. Металлы и сплавы для электрических контактов;

1.3. Припой;

1.4. Неметаллические проводниковые материалы.

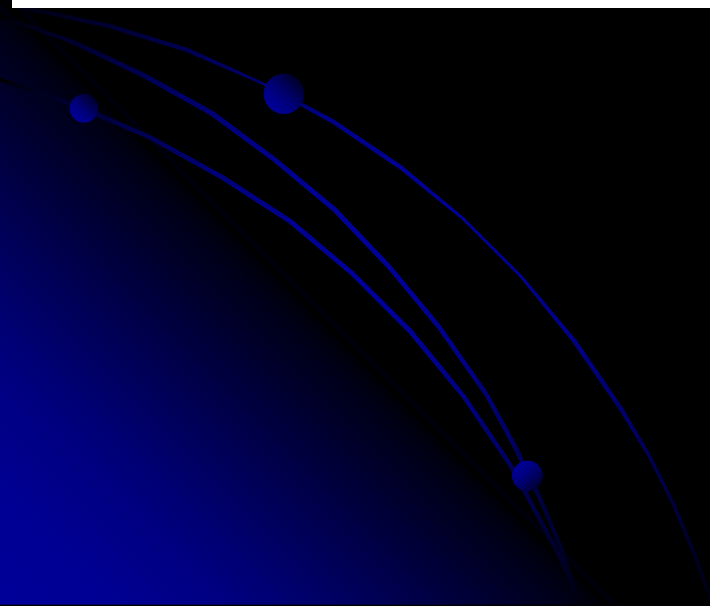
2. Проводниковые материалы с удельным электросопротивлением более $0,2\times 10^{-6}$ Ом·м:

2.1. Высокоомные сплавы и материалы для проволочных резисторов;

2.2. Материалы для пленочных резисторов;

2.3. Сплавы для выводов электровакуумных и полупроводниковых приборов.

**Проводниковые материалы для
моточных изделий, проводного и
печатного монтажа**



Чистые металлы для проводников

Медь (Cu) плавится при температуре 1083 °С и кристаллизуется в ГЦК решетку. Является наиболее распространенным проводниковым материалом, поскольку имеет малое значение удельного электросопротивления, составляющее $(0,017...0,018) \times 10^{-6}$ Ом·м. Лучшими проводниковыми свойствами обладает только серебро ($r_{Ag} = 0,016 \times 10^{-6}$ Ом·м). Медь характеризуется достаточно высокой механической прочностью, сопротивление разрыву достигает 360...450 МПа. Обладая высокой пластичностью (предел текучести 60...380 МПа) медь хорошо протягивается в проволоку, прокатывается в листы и ленты.. В результате протяжки из меди получают два вида неизолированной проволоки диаметром 0,02...10 мм:
МТ, твердая неотожженная, предел текучести 230...380 МПа, при изгибе несколько пружинит;
ММ, мягкая отожженная, предел текучести 60...70 МПа.
Мягкую медную проволоку используют для изготовления

Основные характеристики обмоточных проводов

Марка провода	Характеристика изоляции	Диаметр проволоки, мм	T_{\max} , °C
ПЭВ-1	Один слой высокопрочной эмали ВЛ-931	0,02...2,5	105
ПЭВ-2	Два слоя высокопрочной эмали ВЛ-931	0,06...2,5	105
ПЭВЛ	Высокопрочная эмаль и обмотка из лавсановой нити	0,02...1,56	120
ПЭВТЛ-1	Один слой высокопрочной полиуретановой эмали	0,05...1,56	130
ПЭТ-155	Лак ПЭ-955 на полиэфиримидной основе	0,06...2,5	155
ПСДК	Два слоя обмотки из стекловолокна с пропиткой кремнийорганическим лаком	0,5...5,2	180
ПНЭТ	Высокопрочная нагревостойкая эмаль на основе полиамидов	0,06...2,5	220

Обмоточные провода с эмалевой изоляцией

В качестве эмалевых покрытий проводов применяются различные электроизоляционные лаки:

лак винифлекс (ВЛ-931) представляет собой раствор поливинилформальэтиланеовой и резольной фенолоформальдегидной смол в смеси этилцеллозольва и технического хлорбензола (растворитель РВЛ). Лаковое покрытие винифлекс не плавится и не размягчается при нагреве, сохраняя гибкость и эластичность;

лак металвин (ВЛ-941) по качеству лакового покрытия превосходит винифлекс, в частности, по устойчивости к воздействию органических растворителей и воды;

Обмоточные провода с эмалевой изоляцией

полиэфирный лак (ПЭ-939, ПЭ-943) получается при взаимодействии глицерина и расплавленной полиэфирной смолы (лавсан). Нагревостойкость проводов с изоляцией этими лаками соответствует 130 оС;

полиэфиримидный лак ПАК-1 и *полиуретановый лак* УЛ-1 обеспечивают более высокую нагревостойкость изоляции - до 155о...180 оС;

масляные лаки - лаки на основе высыхающих тунговых и льняных масел. В качестве растворителя используется керосин. Лаковые покрытия имеют высокие электроизоляционные параметры, сравнительно невысокую механическую прочность и стойкость к растворителям. В настоящее время покрытия на основе масляных лаков используются при изготовлении около 5% принятых к производству проводов.

Монтажные провода и кабели



Для
Прессован
одинаков
гибкий ди
полиэтилена

Плетеные плоские кабели представляют из себя совокупность проводов, переплетенных связующей изолирующей нитью из лавсана или капрона и предназначены для выполнения фиксированного и гибкого монтажа.

Для изготовления плетеных кабелей используют одножильные и многожильные провода диаметром 0,06...0,35 мм: ПЭВТЛК - с полиамидной изоляцией; МГТФ - провод с фторопластовой изоляцией; МГШВ, МШВ - провода с ПВХ изоляцией.

Тканые плоские кабели выполнены в виде отрезков ткани, вырабатываемой из электропроводящих и диэлектрических нитей. Таким образом, возможно изготовить кабели, в которых провода выходят из кабеля в точках монтажа для подключения необходимых радиокомпонентов. В качестве электропроводящих нитей используется неизолированная проволока из меди марки ММ, а также самолудящийся провод ПЭВТЛК в полиуретановой и полиимидной изоляции. Диэлектрические нити изготавливают из полиэтилена, стекловолокна или капрона диаметром 0,1...0,25 мм.

Тканые плоские кабели выполнены в виде отрезков ткани, вырабатываемой из электропроводящих и диэлектрических нитей. Таким образом, возможно изготовить кабели, в которых провода выходят из кабеля в точках монтажа для подключения необходимых радиокомпонентов. В качестве электропроводящих нитей используется неизолированная проволока из меди марки ММ, а также самолудящийся провод ПЭВТЛК в полиуретановой и полиимидной изоляции. Диэлектрические нити изготавливают из полиэтилена, стекловолокна или капрона диаметром 0,1...0,25 мм. Полученное изделие называется *тканевым устройством коммутации (ТУК)*, или *тканевой объединительной платой (ТОП)*. Соединение электропроводников в контактных узлах осуществляется через элементарные ячейки

Гибкие печатные кабели и шлейфы

Гибкие печатные кабели и шлейфы - это кабельные соединения, выполненные методом пленочной технологии на гибких изоляционных подложках и предназначенные для передачи высокочастотных сигналов. В качестве основы используются гибкие диэлектрические пленки толщиной 25... 30 мкм из лавсана, фторопласта или полиимида (рис.).

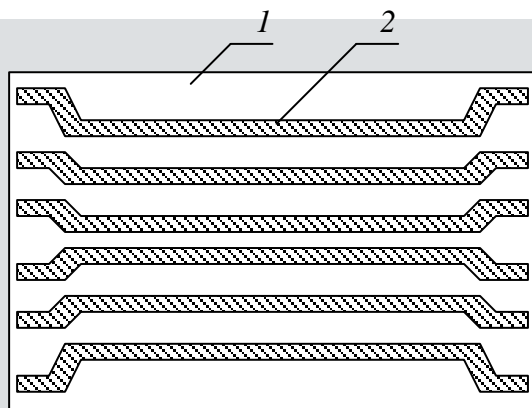


Рис. Конструкция гибкого печатного кабеля (шлейфа)

1 - подложка, 2 - проводник

Гибкие печатные кабели и шлейфы

Нанесение проводников на поверхность диэлектрической основы гибкого печатного кабеля осуществляется в следующей последовательности:

сплошное вакуумное осаждение подслоя пленки сплава Cr-Si толщиной 1...2 мкм;

вытравливание рисунка проводников шлейфа, ширина проводника 70...100 мкм;

гальваническое наращивание на поверхность проводников подслоя проводниковой меди толщиной 10...20 мкм;

электрохимическое наращивание на поверхность проводников защитного слоя из сплавов системы Sn-Bi, Sn-Ni или Sn-Pb;

защита поверхности шлейфа слоем полиимидного лака толщиной 20...30 мкм.

Чистые металлы для проводников

Золото (Au) - микропроводолока



1.2. Металлы и сплавы для электрических контактов

Проводниковые материалы для токоведущих и упругих элементов контактных устройств

Латуни - это сплавы системы Cu-Zn с содержанием 10...40% цинка. Цинк кристаллизуется в ГПУ решетку и характеризуется ограниченной растворимостью в меди. Практическое применение нашли сплавы **Л85** и **Л80**, содержащие 15 и 20% Zn, соответственно. Удельное сопротивление латуней $r=(0,05...0,06)\times 10^{-6}$ Ом×м, что в 3 раза превышает сопротивление чистой меди.

Бронзы характеризуются более высокими упругими свойствами, чем латуни. К бронзам относятся сплавы системы Cu-Sn (3... 6% Sn). Находят также применение алюминиевые бронзы Cu-Al (около 5% Al), а также кремнистые бронзы Cu-Si (1...3% Si). Для улучшения характеристик бронз в них, кроме перечисленных элементов, добавляют в небольшом количестве фосфор, цинк, никель, марганец, железо.

Проводниковые материалы для токоведущих и упругих элементов контактных устройств

Сплавы бронзы в технической документации обозначаются буквами Бр с указанием дополнительных легирующих элементов и их концентрации. При этом пользуются следующими условными обозначениями легирующих элементов: О-олово, А-алюминий, К-кремний, Ф-фосфор, Ц-цинк, Н-никель, Мц-марганец, Ж-железо, Б-бериллий, Т-титан.

Широкое практическое применение нашли бронзы марок **БрОЦ4-3** (содержит 4% Sn и 3% Zn), **БрА7** (7% Al), **БрКМц3-1** (3% Si и 1% Mn), **БрБ2** (2% Be) - бериллиевая бронза. После термообработки изделия из бронзы имеют в 1,25...1,5 раза более высокий модуль упругости, чем латуни. Однако удельное электрическое сопротивление лент, пружин, токоведущих деталей из бронзы выше, чем у латуни примерно в 2 раза и составляет $(0,09...0,27) \times 10^{-6} \text{ Ом} \times \text{м}$.

Материалы для изготовления слаботочных контактов

Серебро (Ag). Используется серебро марок **Ср999...999,9**. Серебро является полублагородным металлом. Это мягкий материал белого цвета, кристаллизующийся в ГЦК решетку. Температура плавления серебра равна $960,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, удельное электросопротивление составляет $0,016 \times 10^{-6}\text{ Ом}\times\text{м}$, плотность $10,5 \times 10^3\text{ кг/м}^3$.

Материалы для изготовления слаботочных контактов

Золото (Au) применяют для покрытий при очень высоких требованиях к надежности электрического контакта. Используется золото марок **Зл999...999,9**. Золото пластичный металл желтого цвета, кристаллизуется в ГЦК решетку. Температура плавления золота равна $1063\text{ }^{\circ}\text{C}$, удельное электросопротивление равно $0,022 \times 10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{м}$, плотность $19,3 \times 10^3\text{ кг/м}^3$. Сплавы системы золото-серебро, например **ЗлСр600-400** (60% Au, 40% Ag), а также сплавы системы золото-никель **ЗлН95-5** (95% Au, 5% Ni).

Палладий (Pd) не относится к благородным металлам, но обладает хорошими электрическими свойствами и в 4...5 раз дешевле, чем золото. В качестве контактного покрытия используется палладий марок **Пл99,7...99,8**

Материалы для изготовления слаботочных контактов

Платина (Pt). Платина - это пластичный металл белого цвета, кристаллизирующийся в ГЦК решетку. Температура плавления платины составляет 1773 оС, удельное электросопротивление достигает $0,105 \times 10^{-6}$ Ом \times м, плотность равна $21,4 \times 10^3$ кг/м³. Практическое применение получили сплавы систем Pt-Ni, Pt-Ir и Pt-Rh. Никель, иридий и родий образуют с платиной твердые растворы.

Иридий (Ir) - редкий металл, кристаллизирующийся в ГЦК решетку, имеет температуру плавления 2410 оС и удельное электросопротивление $0,054 \times 10^{-6}$ Ом \times м. Плотность иридия $22,4 \times 10^3$ кг/м³, а твердость почти в четыре раза выше, чем у платины. Добавка иридия в платину в количестве 10...25% позволяет получить сплавы марок **ПЛИ-10** (10% Ir) и **ПЛИ-25** (25% Ir).

Родий (Rh) применяется как самостоятельный контактный материал. По своим характеристикам он близок к иридию, но гальванические покрытия из родия обладают исключительной твердостью и износостойкостью. Их твердость в 10 раз выше, чем у серебра или золота.

Основные физические параметры контактных материалов

Материал	Удельное электрическое сопротивление, 10^{-6} Ом мм	Поверхностная твердость по Бринелю H_B , ~ГПА (Н/мм ²)	Модуль упругости E , ~ГПА (10^4 Н/мм ²)
Золото	24	0,185 (185)	84 (8,4)
Платина	105	0,5 (500)	0,0154 (0,00154)
Палладий	107	0,8 (800)	0,0119 (0,00119)
Серебро	16	0,25 (250)	77 (7,7)
Родий	45	0,1 (1000)	300 (30)
Медь	16,72	0,4...1,2 (400...1200)	112 (11,2)
Никель	70	0,73 (730)	210 (21)
Бронза БрКМц3-1	150	1,7...1,9 (1700...1900)	120 (12)
Бронза БрОФ 6,5-0,15	178	1,6...2 (1600...2000)	50...1000 (5...10)
Бронза БрБ2	70	3,78...4 (3780...4000)	130 (13)
Бронза БрОЦ4-3	87	1,5...1,7 (1500...1700)	90...120 (9...12)
Латунь Л-63	74	1,2 (1200)	90...120 (9...12)

1.3. Неметаллические ПМ

Углеродистые материалы

Среди твердых неметаллических проводников наиболее широкое применение получил графит – одна из аллотропных форм чистого углерода. Наряду с малым удельным сопротивлением ценными свойствами графита являются значительная теплопроводность, стойкость ко многим химически агрессивным средам, высокая термостойкость, легкость механической обработки. Для производства электроугольных изделий используют природный графит, антрацит и пиролитический углерод.

1.3. Неметаллические ПМ

Природный графит

Природный графит представляет собой крупнокристаллический материал с очень высокой температурой плавления (900°C).

Пиролитический углерод получают путем термического разложения паров углеводородов в вакууме или в среде инертного газа (пиролиз). Пленки пиролитического углерода применяют для получения линейных резисторов поверхностного типа.

Мелкодисперсной разновидностью углерода является *сажа*. Графит широко используется в технологии полупроводниковых материалов.

1.3. Неметаллические ПМ

Стеклоуглерод

Особую модификацию графита представляет стеклоуглерод, который получают полимеризацией

органических полимерных смол.

Изготавливаемые изделия имеют блестящую поверхность, стеклоподобный вид.

Стеклоуглерод отличается от обычного графита повышенной химической стойкостью.

Фуллереноподобный углерод

1.3. Неметаллические ПМ

Композиционные проводящие материалы

Композиционные материалы представляют собой механическую смесь проводящего наполнителя с диэлектрической связкой. Путем изменения состава и характера распределения компонентов можно управлять электрическими свойствами таких материалов.

Особенностью всех композиционных материалов является частотная зависимость проводимости и старение при длительной нагрузке.

1.3. Неметаллические ПМ

В качестве компонентов проводящей фазы используют металлы, графит, сажу, некоторые оксиды и карбиды. Функции связующего вещества могут выполнять как органические, так и неорганические диэлектрики.

Среди многообразия комбинированных проводящих материалов внимания заслуживают **контактолы и керметы.**

1.3. Неметаллические ПМ

Контактолы, используемые в качестве токопроводящих клеев, красок, покрытий и эмалей, представляют собой маловязкие либо пастообразные полимерные композиции. В качестве связующего вещества используют синтетические смолы (эпоксидные, фенолформальдегидные, кремнийорганические и др.), а токопроводящим наполнителем являются мелкодисперсные порошки металлов (серебра, никеля, палладия). Необходимая вязкость контактолов перед их нанесением на поверхность обеспечивается введением растворителей (ацетон, спирт и т. п.).

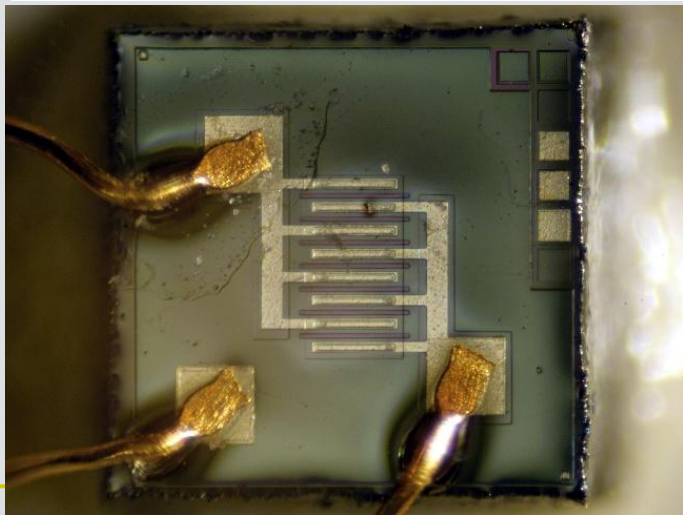
1.3. Неметаллические ПМ

Контактолы используют для получения контактов между металлами, металлами и полупроводниками, создания электродов на диэлектриках, экранирования помещений и приборов от помех, для токопроводящих коммуникаций на диэлектрических подложках, в гибких волноводах и других изделиях электронной промышленности.

1.3. Неметаллические ПМ

Керметами называют металлодиэлектрические композиции с неорганическим связующим. Они предназначены для изготовления тонкопленочных резисторов. Существенным преимуществом таких пленок является возможность варьирования удельным сопротивлением.

В толстопленочных микросхемах используют резисторы, которые получают на основе композиции стекла с палладием и серебром.



1.3. Неметаллические ПМ

Проводящие материалы на основе оксидов

Такие материалы используют в качестве контактных и резистивных слоев.

Наибольший практический интерес в этом плане представляет **двуоксид олова**. В радиоэлектронике она используется преимущественно в виде тонких пленок. Такие пленки отличаются очень сильным сцеплением с керамической или стеклянной подложкой. Прочность сцепления достигает 20 МПа, что намного больше, чем у металлических пленок. Вместе с тем пленки устойчивы к воздействию многих химических сред – разрушаются только плавиковой кислотой и кипящей щелочью. Тонкие слои двуоксида олова обладают высокой прозрачностью в видимой и инфракрасной частях спектра.

1.4. Припои и флюсы

Припои – спецсплавы, применяемые при пайке. Пайка нужна либо для создания механически прочного (иногда герметичного) шва, либо электрического контакта с малым переходным сопротивлением.

Припои делят на две группы - *мягкие*, с температурой плавления ниже 300 °С и *твердые*, с температурой плавления выше 300 °С. Временное сопротивление разрыву мягких припоев составляет величину 16...70 МПа, а для твердых припоев эта величина больше и равна 100...500 МПа. Следовательно, механическая прочность твердых припоев выше, чем мягких.

1.4. Припой и флюсы

ПОС-61 ($T_{\text{пл}} = 190 \text{ }^{\circ}\text{C}$), содержит 61% олова и 0,8% сурьмы, применяется для пайки выводов радиокомпонентов и полупроводниковых приборов;

ПОС-40 ($T_{\text{пл}} = 183 \dots 238 \text{ }^{\circ}\text{C}$), содержит 40% олова и 1,5...2% сурьмы, используется для пайки токопроводящих деталей, проводов, наконечников;

ПОСК-50-18 ($T_{\text{пл}} = 145 \text{ }^{\circ}\text{C}$), содержит 50% олова и 18% кадмия, применяется для пайки деталей, чувствительных к перегреву;

ПСрОС-3-58 ($T_{\text{пл}} = 190 \text{ }^{\circ}\text{C}$), содержит 3% серебра и 58% олова, применяется для лужения (поверхностного покрытия) пассивной части (проводников) интегральных схем, предварительно покрытой

1.4. Припой и флюсы

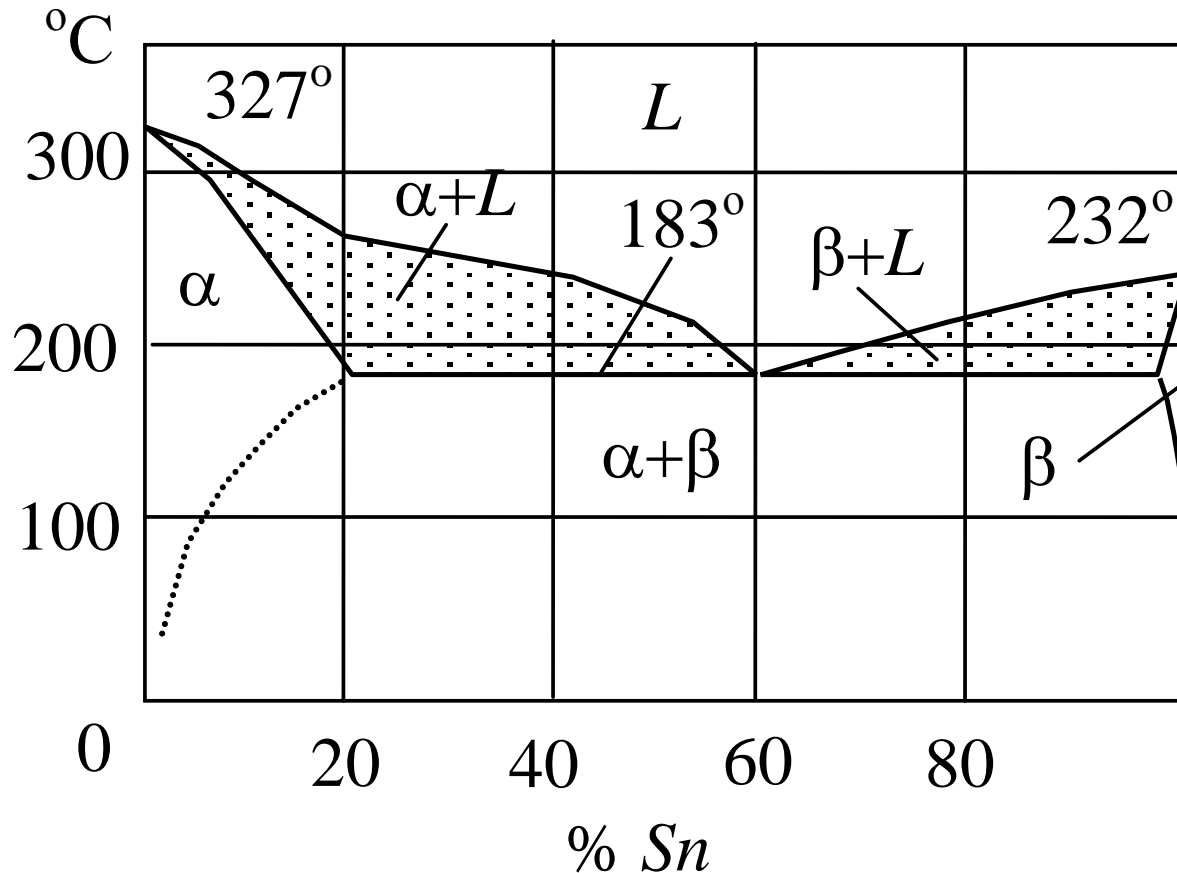


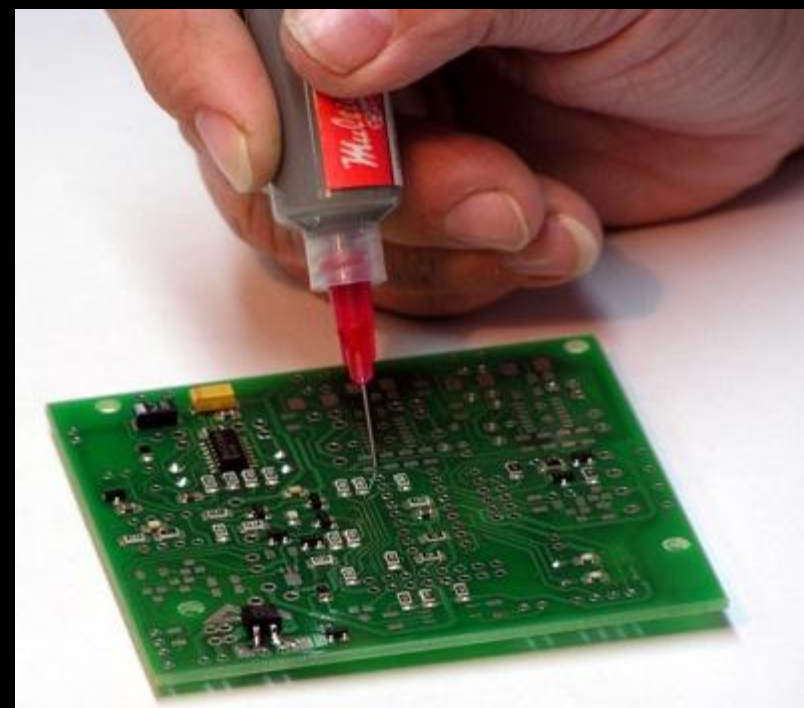
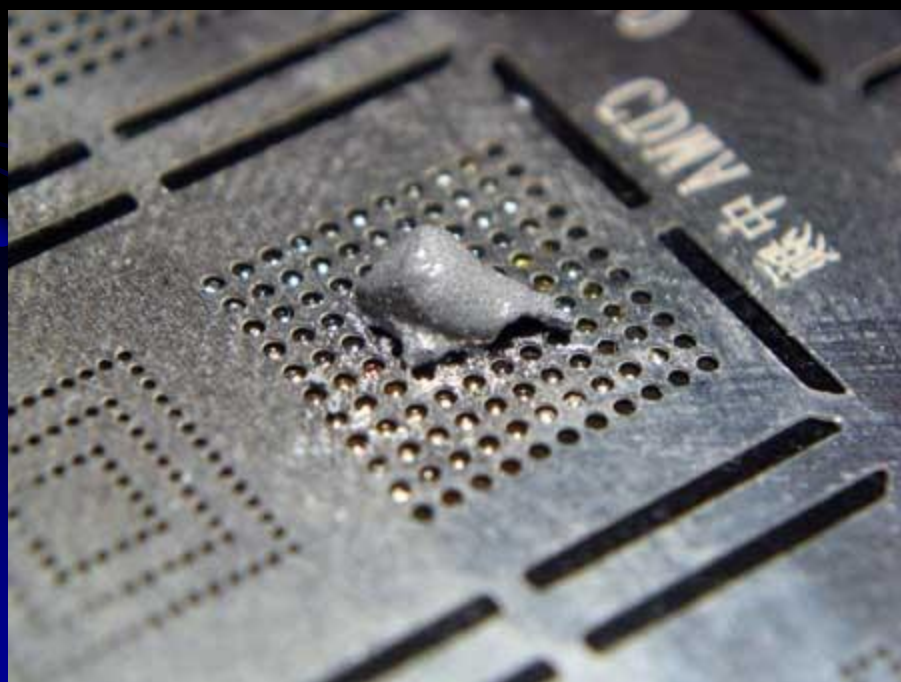
Диаграмма состояния свинец-олово

L – жидкий расплав, α - эвтектическая смесь Pb (Sn), β - эвтектическая смесь Sn (Pb)

1.4. Припой и флюсы



1.4. Припой и флюсы



1.4. Припой и флюсы

Флюсы – вспомогательные материалы для получения надежной пайки. Их задача:

- растворять и удалять окислы и загрязнения с поверхности спаиваемых металлов;
- защищать в процессе пайки поверхность металла, а также расплавленный припой от окисления;
- уменьшать поверхностное натяжение расплавленного припоя;
- улучшать растекаемость припоя и смачиваемость им соединяемых поверхностей

1.4. Припой и флюсы

Активные или кислотные флюсы приготавливаются на основе активных веществ – HCl, хлорных и фтористых соединений металлов и т. д. Они интенсивно растворяют оксидные пленки, что обеспечивает хорошую адгезию и высокую механическую прочность спая. Но остаток флюса вызывает коррозию. Промывать! При монтажной пайке РЭА категорически не использовать.



1.4. Припой и флюсы

2. Бескислотные флюсы – канифоль и флюсы на ее основе с добавлением неактивных веществ



1.4. Припои и флюсы

3. Активированные флюсы – на основе канифоли с добавкой активаторов – небольших количеств солянокислого или фосфорнокислого анимана, салициловой кислоты, солянокислого диэтиламина и т. п. Высокая активность некоторых активированных флюсов позволяет проводить пайку без предварительного удаления окислов после обезжиривания.



1.4. Припой и флюсы

4. Антикоррозионные флюсы
изготавливают на основе ортофосфорной кислоты с добавлением различных органических соединений и растворителей, а также флюсы на основе органических кислот. Остатки флюсов не вызывают коррозии.



**Проводниковые
материалы с высоким
электрическим
сопротивлением**

Проволочные высокоомные материалы

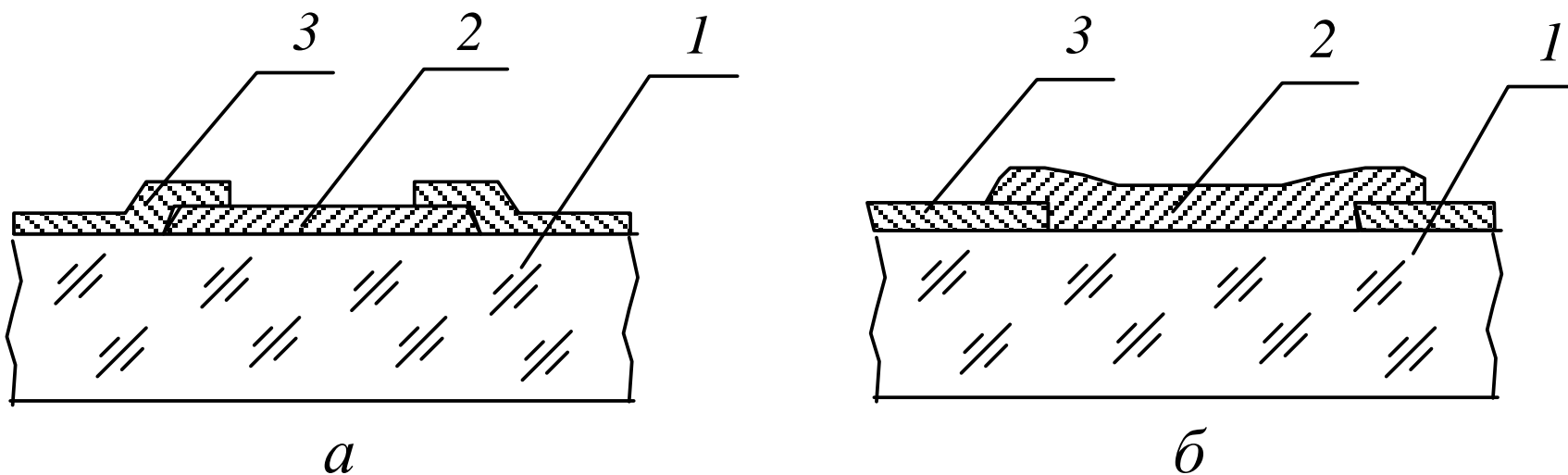
Манганин марки **МНМц3-12** содержит 3% Ni, 12% Mn, остальное медь. Удельное электросопротивление манганина равно $(0,4...0,5) \times 10^{-6}$ Ом \times м, а $TCS=(0,01..0,1) \times 10^{-4}$ 1/К. Увеличение содержания марганца в манганине до 60...67% ведет к повышению удельного электросопротивления до 2×10^{-6} Ом \times м, а TCS становится отрицательным и уменьшается до минус 1×10^{-4} 1/К. На основе манганина выпускается манганиновый провод диаметром от 0,02 до 1,00 мм. Провода выпускаются с эмалевой изоляцией (ПЭВМТ, ПЭММ, ПЭМТ, ПЭМС) и с дополнительной изоляцией шелком (ПЭШОММ, ПЭШОМТ).

Проволочные высокоомные материалы

Константан марки МНМц40-1,5 содержит 40% Ni и 1,5% Mn, остальное медь. Удельное электросопротивление константана составляет $(0,45...0,52) \times 10^{-6}$ Ом \times м, а $TКС$ равен $(-0,2...+0,6) \times 10^{-4}$ 1/К. Выпускаются эмалированные провода из твердых и мягких сортов константана марок ПЭВКТ, ПЭВКМ, ПЭКМ, ПЭКТ, провода с эмалево-волокнистой изоляцией марок ПЭШОКМ, ПЭШОКб, нагревостойкий провод со стеклоизоляцией марки ПОЖКМ.

Нихромы. Нихромовая проволока используется для изготовления гасящих резисторов и нагревательных элементов. Наиболее распространен нихром марки Х20Н80, содержащий 20% Cr и 80% Ni. Удельное электросопротивление нихрома $1,1 \times 10^{-6}$ Ом \times м, а $TКС$ выше, чем у манганина и константана и составляет $0,9 \times 10^{-4}$ 1/К. Выпускаются нихромовые провода с эмалевой изоляцией марок ПЭВНХ, ПЭНХ, ПЭТНХ, жаростойкие со стеклоизоляцией марки ПЭЖ-НХ диаметром 0,02...1,2 мм.

Высокоомные материалы для плёночных резисторов



Структура плёночных резисторов:

а - тонкопленочного; *б* – толстопленочного. *1* – изоляционная подложка, *2* – резистивная пленка, *3* – контактная площадка

Материалы для тонкоплёночных резисторов

Кремниевые резистивные сплавы марки РС - это измельченные в порошок сплавы системы Si-Cr-Ni-Fe. Выпускаются сплавы марок **РС-4800**, **РС-3710**, **РС-3001**, **РС-1714**, **РС-1004** и др. В обозначении сплава две первых цифры указывают номинальное содержание основного легирующего компонента в процентах - хрома или никеля. Две последние цифры обозначают содержание в процентах другого легирующего элемента, обычно железа. Например, сплав РС-4800 содержит 48% Cr, остальное Si (52%), в сплаве РС-1714 содержится 17% Cr, 14% Fe, 69% Si, а сплав РС-1004 содержит 10% Ni, 4% Fe, 86% Si. Температура плавления кремниевых резистивных сплавов достигает 1250...1550 °С. Резистивные пленки в зависимости от состава характеризуются широким диапазоном значений удельного электрического сопротивления квадрата поверхности 50...50000 Ом при значении $TCS=2 \times 10^{-4}$ 1/К. Удельная мощность рассеяния полученных резистивных элементов достигает 5 Вт/см².

Материалы для тонкоплёночных резисторов

Металлосилицидные сплавы марки МЛТ

представляют собой многокомпонентные сплавы системы Si-SiO₂-Fe-Cr-Ni-Al-W и содержат 25...50% Si. Выпускается 12 марок этого сплава, отличающихся составом и электрическими характеристиками изготовленных из них резисторов. Например, для напыления тонкоплёночных резисторов интегральных схем широко применяется сплав **МЛТ-3М**. Предельные значения параметров изготовленных резисторов: $r=200...500$ Ом, $TКС=(1,2...2,4)\times 10^{-4}$ 1/К, $P_{уд}<1$ Вт/см².

Контакты к резистивному элементу напыляются из меди.

Материалы для толстоплёночных резисторов

Распространенным материалом для толстоплёночных резисторов является смесь порошков чистых металлов Ag и Pd и их оксидов AgO-PdO. Исходная паста содержит также стекло марки 660a и органическое связующее. В процессе отжига происходит частичное окисление Pd до PdO, а также образование твердого раствора Ag-Pd. Сформированные на подложке в результате отжига паст толстоплёночные резистивные элементы имеют сложную структуру. Она состоит из стеклообразной фазы, содержащей хорошо проводящие зерна оксидов AgO, PdO и сплава AgPd. Электропроводящие зерна имеют аморфную структуру с размером частиц 0,01...1 мкм.

Материалы для толстоплёночных резисторов

Условное обозначение марок серебропалладиевых паст на основе стекла 660а состоит из букв ПР (паста резистивная) и числа через дефис, представляющего код сопротивления квадрата поверхности полученного резистора. Например, паста марки ПР-5 характеризуется $r=5$ Ом, пасты ПР-6К и ПР-1М имеют r , равные 6 кОм и 1 МОм, соответственно.

Значение $TКС$ серебропалладиевых композиционных паст равно $(-3,5...+9) \times 10^{-4}$ 1/К.

Материалы для толстоплёночных резисторов

Высокая стоимость серебропалладиевых паст привела к тому, что были найдены более дешёвые заменители серебра и палладия, являющиеся компонентами паст для изготовления толстоплёночных резисторов.

Композиционные толстоплёночные резисторы на основе *рутениевых паст* системы Ru-RuO, а также RuPb-RuVi обладают более стабильным электросопротивлением, имеют меньшее значение *ТКС* равное $\pm(1,5...2,5) \times 10^{-4} \text{ 1/К}$.

Обозначение марок рутениевых резистивных паст осуществляется с помощью цифрового кода, начинающегося с цифры 5. Последующие две цифры обозначают порядок величины электросопротивления, последняя цифра представляет мантиссу значения электросопротивления.

Материалы для толстоплёночных резисторов

Например, резисторы, изготовленные на основе паст марок 5045 и 5061 имеют удельное электросопротивление 5×10^4 Ом/кв и 1×10^6 Ом/кв, соответственно.

Разработана также рецептура резистивных паст на основе дешевых *полупроводниковых оксидов* $\text{SnO}_2 + \text{Sb}_2\text{O}_3$ ($r_{\text{кв}} = 5 \dots 100000$ Ом, $T_{\text{КС}} = (9 \dots 12) \times 10^{-4}$ 1/К), $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{Sb}_2\text{O}_3$ ($r_{\text{кв}} = 100 \dots 1000$ Ом, $T_{\text{КС}} = (9 \dots 13) \times 10^{-4}$ 1/К), Te_2O_3 ($r_{\text{кв}} = 0,05 \dots 1300$ Ом, $T_{\text{КС}} = -(8 \dots 17) \times 10^{-4}$ 1/К).

В качестве *проводниковых паст* в толстопленочных ИС используются Ag-Pd пасты марок ПП-1, ПП-3 ($r = 0,05$ Ом) с высоким содержанием дисперсного серебра, пасты на основе меди (ПМП, $r = 0,01$ Ом), пасты на основе алюминия (АП-2, $r = 0,03$ Ом). Особенностью проводниковых паст является повышенная температура вжигания, достигающая $780 \dots 900$ оС

Спасибо за внимание!