

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет
информационных технологий
и электроники
наименование факультета

Кафедра
Нано – и микроэлектроника
наименование кафедры

Направление подготовки

11.04.04. «Электроника и микроэлектроника»
код и наименование

Магистерская программа

Нано – и микроэлектроника
наименование

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ПензГУ02. 11.04.04. 013 ПЗ
обозначение, присваиваемое кафедрой

на тему

Повышение стабильности керметных резистивных композиций
тема магистерской диссертации

Студент группы 22ПДм1
номер группы

В.А. Россеев
подпись, дата 03.06.24
инициалы, фамилия

Руководитель К.Т.Н., доцент
должность

А.Ю. Доросинский
подпись, дата 03.06.24
инициалы, фамилия

Рецензент
директор-главный конструктор
ООО НПК «Крона»
должность, наименование организации

В.Г. Ханбеков
подпись, дата 04.06.24
инициалы, фамилия

Нормоконтролер ст. преподаватель
должность

Т.Н. Рыжова
подпись, дата 10.06.24
инициалы, фамилия

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 10.06.24 № 10)

Заведующий кафедрой

И.А. Пронин
подпись, дата 10.06.24
инициалы, фамилия

Работа защищена с оценкой хор. (протокол ГЭК от 25.06.24 № 7)

Секретарь ГЭК

А.А. Вольсков
подпись, дата 25.06.24
инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка содержит 102 страниц текста, включает 3 приложения, 24 рисунка, 6 таблиц, 16 слайдов презентаций, список использованных источников из 11 наименований.

Целью исследования является анализ проводимости в резистивных материалах на основе толстых пленок различного состава и структуры. В работе рассматриваются различные аспекты проводимости и их влияние на электрические характеристики материалов.

Методы исследования включают экспериментальные исследования, анализ температурной зависимости сопротивления, а также изучение термоэлектродвижущей силы в резистивных пленках.

Результаты исследования подтверждают важность температурного режима обработки и содержания проводящей фазы для стабильности электрических характеристик резистивных материалов.

Работа имеет практическую значимость для улучшения производства и применения резистивных материалов в электронике и смежных областях.

Ключевые слова: резистивные материалы, толстые пленки, проводимость, электроника, температурная зависимость.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Резистивные композиционные материалы	7
1.1 Проводящие и резистивные композиционные материалы.....	7
1.2 Стабильность резисторов в условиях эксплуатации.....	13
1.3 Подложки толстоплёночных микросхем.....	14
1.4 Основные свойства резистивных плёнок	14
2 Влияние технологических факторов на электрические характеристики резистивных плёнок	19
2.1 Влияние температуры обжига	19
2.2 Влияние дисперсности материалов проводящей фазы и стекла	23
2.3 Влияние органической связки	25
2.4 Влияние типа керамики.....	32
3 Исследование зависимости разброса величины сопротивления от технологических факторов.....	34
3.1 Распределение величин сопротивления	34
3.2 Постановка эксперимента.....	36
3.3 Действие нагрузки в нормальных условиях	39
3.4 Действие электрической нагрузки для разных режимов обжига	43
4 Исследование механизма проводимости в толстых плёнках на основе рутениевых композиций.....	47
4.1 Исследование температурной зависимости сопротивления	47
4.2 Исследование температурной зависимости сопротивления порошков проводящей фазы	50
4.3 Исследование термоэдс резистивных пленок.....	52
4.4 Средства автоматизации измерения ТКС	57
5 Безопасность жизнедеятельности при работе с компьютером.....	72
5.1 Требования к помещениям для работы с компьютером.....	72

5.2 Требования к уровням шума и вибрации на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ	73
Заключение	74
Список использованных источников	76
Приложение А. Задание на ВКР	78
Приложение Б. Заявление и протокол о проверке на антиплагиат	82
Приложение В. Материал, иллюстрирующий результаты магистерской диссертации	86

ВВЕДЕНИЕ

Исследование электрических свойств материалов имеет важное значение для разработки современных электронных устройств и технологий. В данной работе рассматривается экспериментальное исследование проводимости резистивных паст и пленок на основе различных составов, а также анализируется их температурная зависимость сопротивления. Особое внимание уделяется влиянию температурного режима обработки на стабильность электрических характеристик материалов и механизму проводимости в толстых пленках.

Первая часть работы посвящена изучению влияния электрической нагрузки на стабильность сопротивления резистивных паст при различных уровнях электрической мощности. В результате экспериментов было установлено, что при правильно подобранном режиме термообработки повышение нагрузки до 8 Вт/см^2 практически не влияет на стабильность сопротивления, что открывает перспективы их применения в более сложных условиях эксплуатации.

Вторая часть работы посвящена исследованию температурной зависимости сопротивления резистивных пленок на основе рутениевых композиций. В ходе экспериментов было установлено, что изменение содержания проводящей фазы и типа стекла значительно влияет на температурную зависимость сопротивления, что имеет важное значение при разработке новых материалов для электроники.

Третья часть работы посвящена исследованию термоэлектродвижущей силы в резистивных пленках различного состава. Полученные результаты позволяют более глубоко понять механизмы проводимости в этих материалах и использовать эту информацию для разработки новых электронных устройств.

В целом, представленное исследование вносит важный вклад в понимание электрических свойств резистивных материалов и может быть

полезным для инженеров и научных исследователей, занимающихся разработкой новых электронных устройств и технологий.

Четко определенные электрические характеристики материалов играют ключевую роль в создании надежных и эффективных устройств, таких как сенсоры, резисторы, и другие элементы электроники. Понимание зависимостей между структурой, составом и электрическими свойствами материалов является важным шагом для оптимизации их производства и применения.

В данном исследовании уделено внимание как фундаментальным аспектам проводимости в толстых пленках на основе различных композиций, так и практическим аспектам применения резистивных материалов в реальных условиях эксплуатации. Полученные результаты могут быть полезны как для научного сообщества, стремящегося к углубленному пониманию процессов проводимости в сложных системах, так и для промышленности, ищущей новые способы улучшения электрических характеристик своей продукции.

Исходя из вышеизложенного, данное исследование представляет собой важный вклад в развитие области материаловедения и электроники, открывая новые перспективы для разработки более эффективных и надежных электронных устройств.

1 Резистивные композиционные материалы

1.1 Проводящие и резистивные композиционные материалы

Проводящие композиционные материалы применяются в виде паст или порошков. По назначению их можно разделить на композиционные материалы для получения беспроволочных композиционных резисторов, проводников и резисторов толстопленочных микросхем, металлизации металлокерамических корпусов.

Для изготовления композиционных резисторов смешивают проводящий материал, органические и неорганические связующие, наполнитель, пластификатор.

В качестве проводящей фазы используют проводники – порошки серебра, палладия, золота, родия; полупроводниковые материалы – двуокись олова, окись кадмия, карбиды кремния, вольфрама, силициды металлов, а также графит или сажу.

В качестве органических связующих используют фенольные или эфирные смолы – эпоксидную, глифталевую, кремний-органическую. Предельные рабочие температуры их не превышают 150°C.

Кермет – композиция в виде порошка от светло- до темно-серого цвета. В состав кермета входят окись кремния и порошок хрома (вместо хрома в композицию могут входить серебро и палладий в соотношении 5:4) – 90%.

Композиционные материалы типа кермета получили название металлоглазуревых. Технология их приготовления сводится к размельчению и смешиванию порошков металлов с окисью кремния при наличии растворителя. Пасту наносят на подложку, подвергают термообработке при температуре 1100°C и получают пленки толщиной 20...25 мкм. Такие пленки обладают термостойкостью, влагостойкостью, стабильностью характеристик, точностью поддержания сопротивления после термоциклов 0,1%, сопротивлением от 10^3 до 10^6 Ом и удельным электрическим сопротивлением от 1000 до 10000 Ом/кв.см.

В качестве материала для изготовления элементов толсто пленочных схем применяют проводящие и резистивные пасты. Эти материалы должны обладать определенной текучестью, так как при большой текучести происходит растекание пасты и искажение рисунка схемы, а при малой текучести паста плохо продавливается через трафарет. Под действием механических нагрузок текучесть паст увеличивается. После снятия давления паста затвердевает, сохраняя полученную форму. Эта способность паст называется тиксотропностью. Вследствие тиксотропности паста проникает на подложку через отверстия в трафарете только при приложении вдавливающих усилий, а после снятия усилий не растекается по подложке. Для придания пастам тиксотропных свойств в их состав вводят высокомолекулярные соединения (например, терефталатную кислоту).

Проводящие пасты должны обеспечивать низкое удельное электрическое сопротивление пленок и малую активность при контакте с химически активными материалами при высокой температуре.

В состав проводящих паст входят функциональный материал (мелкодисперсные порошки металлов), постоянное связующее (стекло) и временное связующее вещество (смесь нескольких органических жидкостей).

Электрические свойства проводящей пасты определяются входящими в ее состав порошками металлов. Наибольшее применение нашли пасты на основе благородных металлов – серебра, золота, платины, палладия и их сплавов.

Адгезию пленки к подложке обеспечивает постоянное связующее вещество – порошок стекла. Предназначенный для применения в пасте порошок стекла называют фриттом. Его получают быстрым охлаждением расплавленного стекла в воде или распылением сжатым воздухом с последующим размолотом частиц до размера 1...3 мкм.

Равномерное распределение компонентов и требуемая вязкость паст зависят от временного связующего вещества – органических жидкостей, в качестве которых используют жидкие смолы, этилцеллюлозу и др.

Пленки, полученные в результате вжигания проводящих паст на основе серебра, обладают хорошей адгезией к подложкам; низкой стоимостью; низкой коррозионной стойкостью; подвержены миграции частиц серебра на поверхности подложки, интенсивность которой усиливается с повышением влажности и при действии электрических полей.

Для снижения стоимости и уменьшения нежелательных явлений применяют пасты на основе серебра и палладия.

Серебряно-палладиевые пасты применяют для изготовления проводящих слоев, токоведущих дорожек и контактных площадок на керамических подложках методом сеткографии. Температура вжигания 800°C . Удельное поверхностное электрическое сопротивление пленок $0,02...0,05$ Ом/квadrat. Прочность сцепления покрытия с поверхностью керамики $5 \cdot 10^6$ Н/м².

Пасты на основе золота применяют для изготовления токоведущих дорожек и проводниковых элементов на подложках из керамики и кварцевого стекла. Содержание золота 75...80%. Удельное поверхностное сопротивление получаемых пленок $0,002...0,005$ Ом/квadrat. Прочность сцепления покрытия с керамикой 10^7 Н/м², а со стеклом – $5 \cdot 10^6$ Н/м². Пленки, полученные в результате вжигания паст на основе золота, обладают высокой стабильностью, надежностью в эксплуатации, стойкостью при повышенных температурах, высокой стоимостью, но в ряде случаев являются незаменимыми.

Резистивные пасты отличаются от проводящих по составу функциональных материалов, в качестве которых используются те же металлы в комбинации с изоляционными и полупроводниковыми материалами. Проводящие и временные связующие элементы у них те же. Изменяя процентное содержание компонентов в пасте, можно получать резистивные пленки с сопротивлением в широком диапазоне [1].

Пасты на основе серебра с палладием позволяют получать резисторы с удельным электрическим сопротивлением 10^6 Ом/квadrat.

Состав биндера 1: коллоксилин (нитроклетчатка) – 2,5 г; изоамилацетат – 100 мл (биндер – связка порошков).

Для приготовления металлизационной пасты компоненты (порошки и биндер) тщательно перемешивают в шаровой мельнице в течение нескольких часов и процеживают через сито. Готовую пасту хранят в стеклянных банках с плотно закрывающимися пробками с указанием на этикетках состава пасты и даты ее изготовления.

Металлизационные пасты имеют ограниченный срок хранения, так как быстро загустевают и расслаиваются, поэтому в процессе работы их постоянно перемешивают и периодически контролируют вязкость. Независимо от состава паст попадание в них воды нежелательно, так как при этом происходит свертывание (коагуляция) пасты.

Пасты наносятся на керамику кисточкой, пульверизацией, контактным переносом, окунанием, шелкографией, запрессовкой, напылением.

При вжигании паст происходят сложные процессы спекания металлизационного слоя и образования его прочной связи с керамикой вследствие химического взаимодействия компонентов металлизации и керамики, а также вследствие миграции стекла в металлизационный слой.

Для получения электрических контактов в радиоэлектронике применяют токопроводящие пасты, клеи, эмали, объединяемые общим названием – контактолы. Они представляют собой композиции на основе эпоксидных и кремнийорганических смол с добавлением порошков металлов с высокой теплоэлектропроводностью. Адгезионные свойства таких композиций определяются связующей основой (смолой), а проводимость достигается применением наполнителей (мелкозернистых порошков металлов). Скорость полимеризации контактолов зависит от состава и количества растворителя. Приготовленный состав хранится при температуре ниже нуля в парах растворителя. Контакттолы обладают следующими свойствами: высокая прочность и эластичность; хорошие антикоррозионные свойства; низкая плотность; удельное электрическое сопротивление в 5...100

раз выше, чем у мягких припоев (удельное электрическое сопротивление ρ находится в пределах $1 \cdot 10^{-2} \dots 6 \cdot 10^{-4}$ Ом·см).

В зависимости от типа металлического наполнителя выделяют контактолы, содержащие серебро, никель, палладий, золото, посеребренный никель и др.

Токопроводящий клей К-3 – пастообразная жидкость стального цвета, которая обладает следующими свойствами: удельное электрическое сопротивление $\rho = 0,05$ Ом·см; жизнеспособность 24 ч; выдерживает пять термоциклов при изменении температуры от -60 до $+120^{\circ}\text{C}$; адгезия к алюминию, ковару, никелю и золоту, $\sigma_{\text{сдв}} = 2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$.

В состав клея входят лак ПЭ-933 (100 мас. ч.), порошок серебра (200 мас. ч.).

Используют для крепления кристаллов цифро-знаковых индикаторов к подложкам и основаниям корпусов с обеспечением электрического контакта.

Токопроводящий клей АС-40В – пастообразная жидкость стального цвета, которая обладает следующими свойствами: удельное электрическое сопротивление $\rho = 0,01$ Ом·см; жизнеспособность 24 ч; выдерживает десять термоциклов при изменении температуры от -60 до $+450^{\circ}\text{C}$; адгезия к алюминию, ковару, никелю, $\sigma_{\text{сдв}} = 2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$; диапазон рабочих температур от -60 до $+450^{\circ}\text{C}$.

В состав клея входят клей АС-40 (100 мас.ч.), глицидиловый эфир (10...15 мас.ч.), толуол (20 мас.ч.), порошок серебра (200 мас. ч.). Используют для крепления кристаллов цифро-знаковых индикаторов к основанию корпусов с обеспечением электрического контакта.

Токопроводящий клей ЭВТ – пастообразная однородная масса серого цвета, которая обладает следующими свойствами: удельное электрическое сопротивление $\rho = 0,005$ Ом·см; жизнеспособность в открытом объеме не более 12ч; диапазон рабочих температур от -60 до $+200^{\circ}\text{C}$; может выдерживать температуру до 400°C в течение 15 мин; время отверждения при температуре 250°C равно 3 ч; предел прочности при сдвиге для

алюминия $\sigma_{\text{сдв}} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$, для меди $\sigma_{\text{сдв}} = 4 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$, для никеля $\sigma_{\text{сдв}} = 4,5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$; прочность склеивания золоченных поверхностей $3 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$.

Используют вместо пайки в сборочных операциях в производстве полупроводниковых приборов и микросхем.

Никельсодержащие контактолы обладают:

- более низким удельным электрическим сопротивлением, чем серебросодержащие клеящие композиции;
- хорошей адгезией к различным материалам (предел прочности при сдвиге $\sigma_{\text{сдв}} = 2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$);
- низкой жизнеспособностью;
- высокой стабильностью свойств при климатических и механических воздействиях.

Токопроводящий клей КН-1 – жидкая однородная масса черного цвета, которая обладает следующими свойствами: удельное электрическое сопротивление $\rho = 0,01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$; жизнеспособность 30 мин; диапазон рабочих температур от -60 до $+120^\circ\text{C}$; выдерживает три термоцикла при изменении температуры от -60 до $+120^\circ\text{C}$; предел прочности на сдвиг для алюминия, никеля, золота, кобальта $\sigma_{\text{сдв}} = 2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$.

В состав клея входят эпоксидная смола ЭД-20 (100 мас. ч.), смола ТЭГ-1 (9 мас. ч.), отвердитель (полиэтиленполиамин) (20...30 мас. ч.), порошок никеля (200...300 мас. ч.).

Используется для крепления полупроводниковых кристаллов к диэлектрической подложке с токоведущими дорожками с обеспечением электрического контакта.

Палладийсодержащие контактолы – пасты, которые обладают высоким удельным электрическим сопротивлением $\rho = 10...20 \text{ мОм} \cdot \text{м}$; высокой стабильностью контактных соединений; хорошей адгезией ко всем металлам и ряду полупроводниковых материалов ($\sigma_{\text{сдв}} = 4...10^6 \text{ Н/м}^2$).

Контактолы наносятся с помощью дозаторов (шприцев). Это позволяет дозировать количество клеящего состава, что имеет важное значение для обеспечения высокого качества контактного соединения [1].

1.2 Стабильность резисторов в условиях эксплуатации

Воздействия эксплуатационных факторов в процессе испытаний и работы резисторов в составе аппаратуры, а также в условиях хранения изделий и аппаратуры приводят к изменению их параметров, в первую очередь к изменению основного параметра — омического сопротивления

Изменение сопротивления резисторов складывается из обратимого временного изменения сопротивления, обусловленного наличием температурного коэффициента сопротивления и шунтирующим влиянием проводимости изоляционных материалов и воздуха (наличие влаги на поверхности резистора, ионизация воздушного промежутка), и необратимого (остаточного) изменения сопротивления.

Наибольшие необратимые изменения сопротивления резисторов вызываются электрической нагрузкой, повышенной температурой и повышенной влажностью окружающей среды и в ряде случаев действием проникающей радиации.

Характер действия электрической нагрузки и температуры на резисторы идентичен (тепловое старение). Однако за счет локальных перегревов в резистивном элементе и контактных узлах повышение электрической нагрузки приводит, как правило, к большему изменению сопротивления, чем соответствующее повышение окружающей температуры.

Степень влияния электрической нагрузки и температуры на параметры резисторов зависит от конструктивного исполнения резисторов, примененных материалов и особенностей технологии их производства [2].

1.3 Подложки толстоплёночных микросхем

Для изготовления подложек обычно используются керамические материалы или стекла. Чаще всего употребляется керамика на основе 96%-ной поликристаллической окиси алюминия. Для мощных микросхем применяется также бериллиевая керамика, обладающая хорошей теплопроводностью, но требующая особых мер обеспечения безопасности при обработке вследствие ее токсичности.

Точность получаемого в процессе трафаретной печати рисунка микросхемы в значительной степени зависит от плоскостности поверхности подложки и ее шероховатости. Максимальная кривизна поверхности (макронеровность) не должна превышать 4 мкм на 1 мм длины. Шероховатость (микронеровность) рабочей поверхности подложки должна быть не ниже восьмого класса ($R_a = 0,32—0,63$ мкм). Необходимо также иметь в виду, что слишком малая шероховатость может приводить к ухудшению адгезии наносимых пленок.

Размеры плат определяются конкретной конструкцией применяемых корпусов микросхем. Рекомендуются размеры 8x15 мм², 10x16 мм² и кратные им. Толщина плат составляет 0,6 мм.

1.4 Основные свойства резистивных плёнок

Толсто пленочные элементы должны обеспечивать: широкий диапазон номиналов сопротивлений; высокую точность получения номиналов сопротивлений; высокую временную и температурную стабильности сопротивлений резисторов; хороший электрический контакт с проводниковыми элементами микросхем.

Среди названных требований важнейшее значение имеет требование температурной стабильности, которая характеризуется температурным коэффициентом сопротивления (ТКС).

Удельное сопротивление сплошной толстой пленки может быть описано следующим выражением, известным как правило Матиссена:

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 \quad (1)$$

где ρ_1 — удельное сопротивление объема проводящих частиц, вносимое рассеянием носителей тока на колебаниях кристаллической решетки; ρ_2 - удельное сопротивление, вносимое рассеянием носителей тока на дефектах кристаллической решетки проводящих частиц; ρ_3 — удельное сопротивление границ раздела (контактов) между проводящими частицами.

Схематично прохождение тока через толсто пленочную структуру можно представить так, как это показано на рисунке 1.

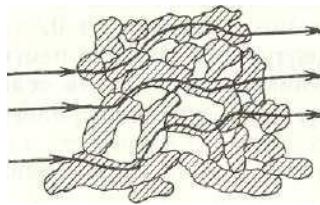


Рисунок 1 – Перенос электрического тока через толсто пленочную структуру

Помимо указанных трех компонентов полного сопротивления, в толсто пленочных структурах необходимо учитывать возможность проявления полупроводникового характера проводимости, связанной с наличием окислов металлов. Полагая, что в сравнительно узком рабочем диапазоне температур микросхем (обычно — 60...+ 125°C) сопротивление резисторов изменяется в зависимости от температуры линейно, можно записать следующее выражение для ТКС:

$$TKC = \frac{1}{R} \cdot \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

где R_1, R_2 —сопротивления резистора при соответствующих температурах T_1 и T_2 .

При повышении температуры рассеяние носителей тока на колебаниях кристаллической решетки возрастает, а рассеяние на дефектах почти не

зависит от температуры. Вероятность проникновения носителей тока через контактные промежуточные слои между проводящими частицами с повышением температуры возрастает. В соответствии с этим ρ_1 в выражении (1) определяет положительный компонент, ρ_2 и ρ_3 , а также полупроводниковая проводимость способствуют возрастанию отрицательного компонента в общем ТКС пленки. Будет ли окончательная величина ТКС пленки положительной, отрицательной или нулевой, зависит от соотношения величин этих компонентов.

Резистивные пасты приготавливаются на основе композиции палладий — серебро. Они обеспечивают номинальные сопротивления резисторов от 25 Ом до 1 МОм. Сопротивление квадрата резистивной пленки соответствует следующему ряду значений: 5, 100, 500, 1000, 3000, 6000, 20 000, 50 000 Ом/кв.

В последнее время разработаны пасты, обладающие повышенной температурной и временной стабильностью. В их состав входят такие редкие металлы, как рутений и иридий, а также платина.

Обычная толщина резистивных пленок 18—25 мкм.

Расчет резисторов. Номинальное значение сопротивления резистора определяется по формуле

$$R = \rho_{\text{кв}} k_{\phi} \quad (3)$$

где $\rho_{\text{кв}}$ — сопротивление квадрата резистивной пленки, Ом/кв;
 $k_{\phi} = l/b$ — коэффициент формы, зависящий от длины и ширины резистора.

Ширина резистора

$$b \gg \sqrt{\frac{k_p P \rho_{\text{кв}}}{P_0 R}} \quad (4)$$

где P — расчетное значение мощности рассеяния резистора, Вт;
 P_0 — максимальная удельная мощность рассеяния резистивной пленки, Вт/мм²;

k_p — коэффициент запаса мощности, учитывающий подгонку резистора:

$$k_p = \frac{2n}{100} + 1 \quad (5)$$

n — допустимое отрицательное отклонение сопротивления резистора от номинального до подгонки, %. Максимальное значение n составляет 52%. Расчетная длина резистора находится по формуле (3).

Удельная мощность рассеяния резисторов на основе композиции палладий — серебро обычно принимается равной 0,5 Вт/см², однако резисторы могут быть нагружены и сильнее, до 6 Вт/см² и более, при условии правильной организации охлаждения.

Стабильная работа толсто пленочных резисторов зависит также от величины падения напряжения на них.

На рисунке 2 представлены различные варианты изготовления подгоняемых резисторов и конфигурации подгоночных резов (шлицев) [3].

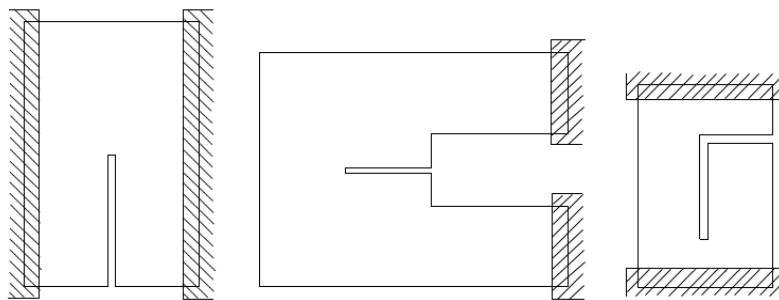


Рисунок 2 — Формы подгоняемых толсто пленочных резисторов.

Допустимая нагрузка по напряжению не должна превышать 20 В/мм по длине резистивной полоски. Изменение номинала сопротивления (стабильность) в зависимости от приложенного напряжения составляет: для напряжения от 0 до 40 В — $(0,5—1) \cdot 10^{-4}\%$ /В; для напряжения от 40 до 400 В — $(1—5) \cdot 10^{-4}\%$ /В.

Влияние напряжения на сопротивление объясняется проявлением частично-полупроводникового характера проводимости толсто пленочных резисторов в связи с наличием в их структуре окислов металлов.

Повышение точности резисторов путем подгонки. Погрешность номинального сопротивления резисторов из паст на основе композиции серебро — палладий при подгонке лазером составляет $\pm 2\%$. Точность подгонки зависит от инерционности устройства, перемещающего подложку с резисторами или инструмент, а также от инерционности измерительно-контрольного устройства. Прецизионная подгонка позволяет достичь в необходимых случаях погрешности номинала резистора не более $0,03\%$ [2].

2 Влияние технологических факторов на электрические характеристики резистивных плёнок

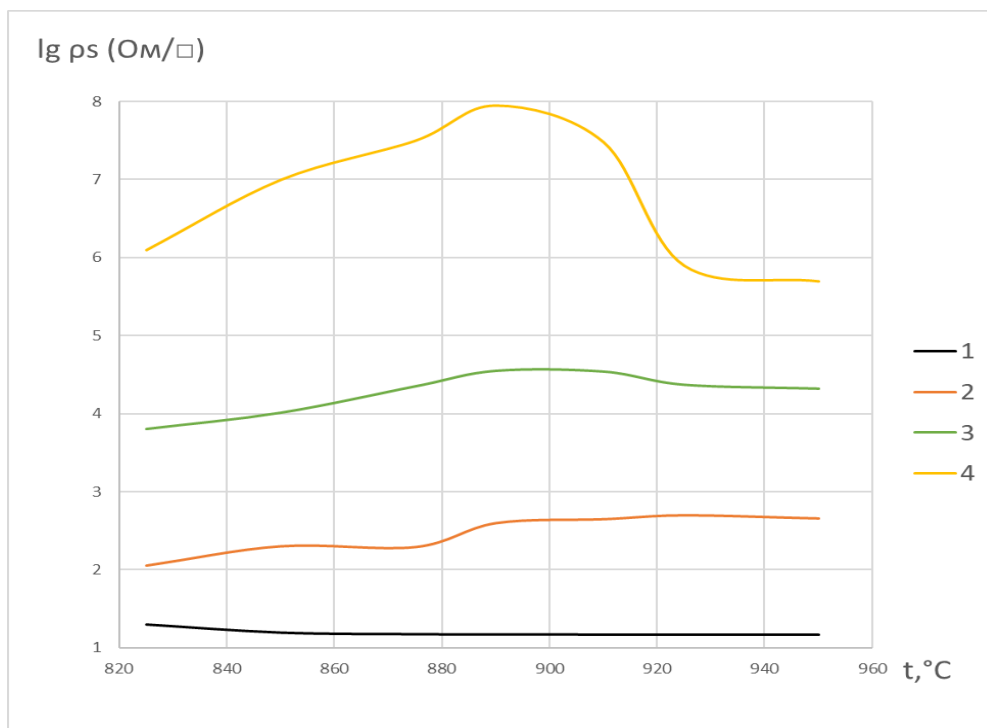
2.1 Влияние температуры обжига

Керметные пасты представляют собой, как правило, высококонцентрированную суспензию мелкодисперсных металлических, металлоокисных и стеклянных порошков в некотором органическом связующем, роль которого заключается в том, чтобы сделать возможным нанесение резистивной композиции через трафарет на подложку. После термообработки образуется слой, прочно связанный с основанием, представляющий собой стеклянную матрицу с распределёнными в ней частицами проводящей фазы. Так, с некоторым упрощением, можно представить структуру в толстых плёнках. Естественно, что в них могут иметь место процессы, свойственные как металлам, так и полупроводникам.

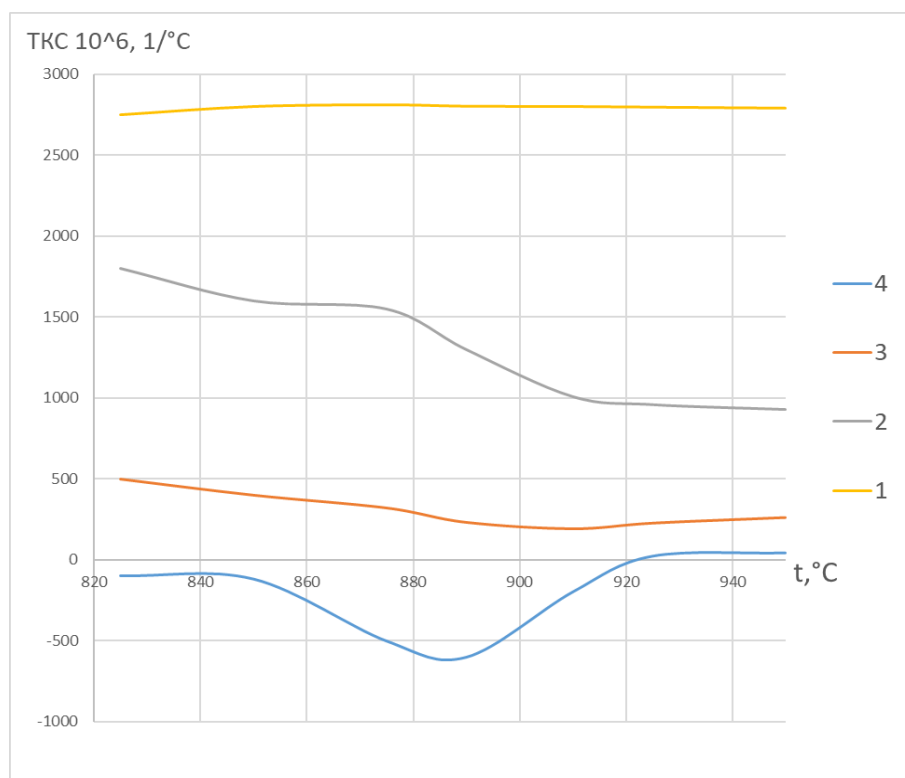
Можно выделить большое число факторов, влияющих на процесс проводимости в таких системах, а, следовательно, и на их свойства.

В данной работе были рассмотрены основные технологические факторы, такие, как: химическая природа проводящей и изолирующей частей, содержание их в композиции, дисперсность составляющих, температурный режим обработки и другие.

Влияние температурного режима термообработки на характеристики резистивных плёнок изучалось нами на примере композиций на основе двуокиси рутения и стекол 279 и *Ru-34* в интервале температур 825-950°C. Содержание проводящей фазы варьировалось от 25 до 50%. Результаты представлены на рисунках 3 и 4.



а)

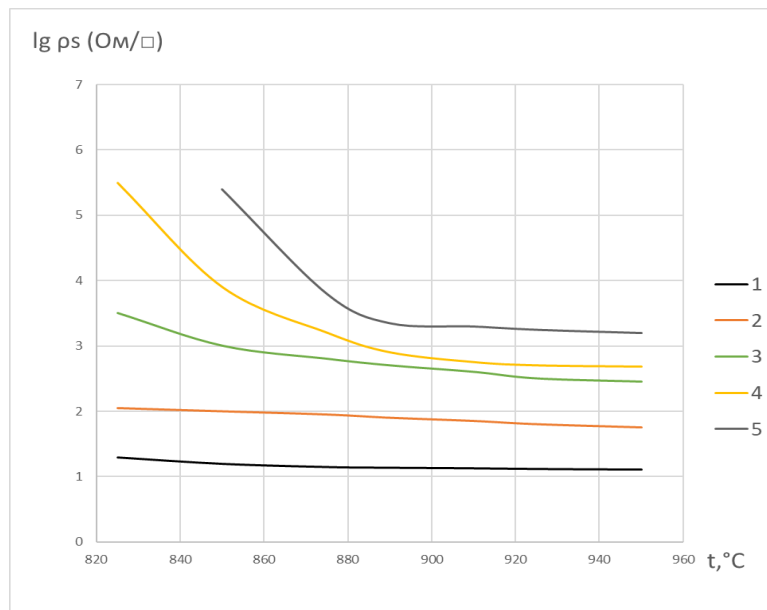


б)

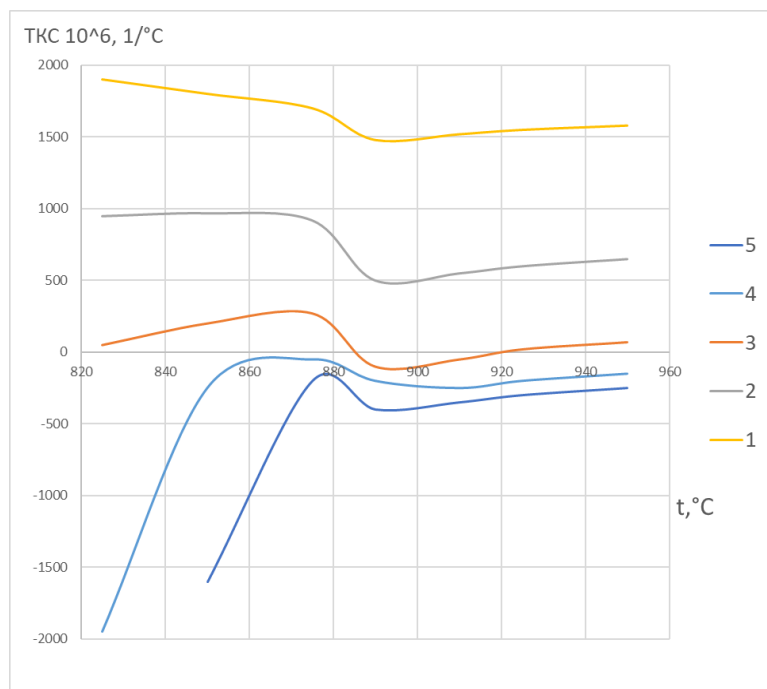
Содержание проводящей фазы: 1- 50 %; 2- 45 %; 3 - 35 %; 4 - 30 %

а) - удельное сопротивление; б) – ТКС

Рисунок 3 – Зависимость величин от температуры обжига для композиций со стеклом 279



а)



б)

Содержание проводящей фазы: 1- 50 %; 2- 45 %; 3 - 35 %; 4 - 30 %; 5 – 25 %

а) - удельное сопротивление; б) – ТКС

Рисунок 4 – Зависимость величин для композиций со стеклом *Ru* - 34

Из приведенных рисунков следует, что влияние температур обжига на электрические характеристики резистивных плёнок проявляется по-разному для композиций различного состава. Причем, различие это наблюдается, как

при изменении соотношения проводящая фаза: стекло, так и при изменении типа стекла. Например, для состава с пониженным содержанием проводящей фазы для стекла 279 кривая сопротивления в исследуемом интервале температур проходит через максимум, а для стекла – *Ru-34* эта зависимость монотонная.

Зависимость ТКС для таких высокоомных композиций со стеклом 279 имеет минимум в области 900°C, для стекла *Ru -34* - более сложный характер.

Из представленного следует также, что зависимость электрических параметров паст проявляется в большей степени по мере увеличения содержания стекла в резистивной композиции. Наибольшее изменение ρ_s и ТКС при изменении температуры обжига от 825 до 950°C наблюдается у составов с наименьшим содержанием проводящей фазы (25-30 %) как для композиций на стекле 279, так и для композиций на стекле *Ru-34*. Пасты с большим содержанием двуокиси рутения (50 %) оказались практически нечувствительными к температуре обжига.

Учитывая тот факт, что с увеличением содержания стекла влияние температуры обжига становится более заметным, а также, что характер этого влияния различный для композиций с разными стеклами, можно утверждать, что поведение рутениевых паст при изменении температуры обжига в значительной мере определяется свойствами изолирующей фазы.

Хорошо известно, что в процессе обжига стекло плавится, частицы проводящей фазы в той или иной степени обволакиваются расплавленным стеклом. Понятно, что поведение стекла, изменение его вязкостных свойств с ростом температуры вполне определенным образом будет влиять на процесс формирования структуры в керметных плёнках [3].

Очевидно, при установлении оптимальной температуры обжига керметных паст необходимо для каждой серии, отличающейся типом стекла, получить характерную зависимость электрических параметров, например, ρ_s от температуры обжига, затем выбрать область температур, где её влияние на

данный параметр минимально. В приведенных нами случаях на рисунках 3 и 4 оптимальной температурой обжига будет, очевидно, следующая:

- для композиций на стекле 279 в интервале 890-950°C в зависимости от состава;
- для композиций на стекле *Ru-34* выше 870°C.

2.2 Влияние дисперсности материалов проводящей фазы и стекла

При выполнении данной части работы были взяты двуокись рутения, полученная двукратным прокаливанием в течение 1 часа гидрооксихлорида рутения при 500°C, и в качестве стеклоосвязки стекло 279.

Для получения двуокиси рутения с различной дисперсностью варьировалось время её помола от 1 до 10 часов. Размеры частиц определялись на растровом электронном микроскопе МРЭМ-200. Для разного времени помола они составили:

-1ч	-	0,20	+ - 0,05	мкм;
-5ч	-	0,08	+ - 0,02	мкм;
-10 ч	-	0,07	+ - 0,02	мкм.

Для получения стекол разной дисперсности по методу отмучивания были выделены три фракции стеклянного порошка с размером частиц до 5, до 3 и до 1,5 мкм. Величина удельной поверхности, измеренная на приборе АДП-1АМ, каждой фракции составила соответственно 1,52; 1,55 и 1,81 м²/г.

Различным сочетанием исходных порошков были приготовлены пасты с содержанием проводящей фазы 20 и 50 %.

Пасты наносились на подложку стандартным методом и вжигались при пиковой температуре 850 и 950°C. После обжига измерялись сопротивления резистивных плёнок и ТКС в диапазоне 20-155°C. Ход кривых зависимости величины сопротивления и ТКС от дисперсности металлоокисной фазы композиций на стеклах с разной удельной поверхностью приведен для

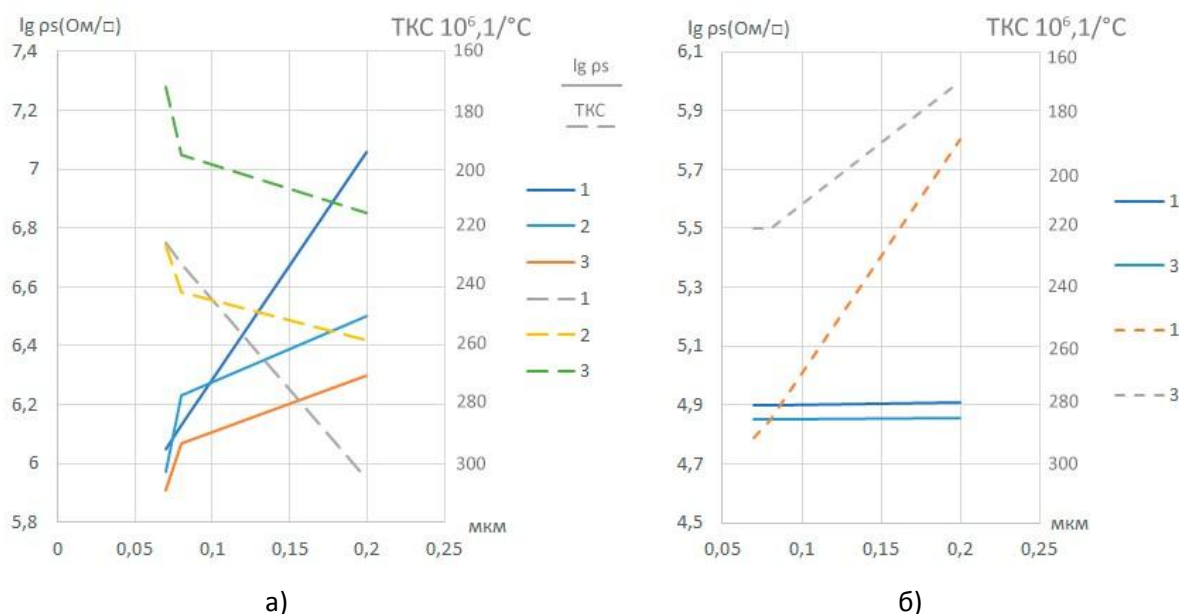
$T_{\text{обж.}}$ - 950°C на рисунке 5 (для температуры 850°C эта зависимость аналогичная).

Как следует из представленного, сопротивление резистивных плёнок снижается с уменьшением размеров частиц проводящей фазы. Особенно это проявляется в высокоомной области.

Очевидно, снижение величины сопротивления в данном случае можно объяснить следующим образом, предложенной в [4] исходя из модели,

По этой модели частицы окислов металлов при их небольшой концентрации образуют проводящие цепочки.

Уменьшение размеров частиц двуокиси рутения, очевидно, приводит к увеличению в определенных пределах числа проводящих цепочек.



1 – $d_{\text{ст}} \leq 1,5 \text{ мкм}$; 2 – $d_{\text{ст}} \leq 3 \text{ мкм}$; 3 – $d_{\text{ст}} \leq 5 \text{ мкм}$

а) 20: 80; б) 50: 50.

Рисунок 5 – Зависимость величины сопротивления и ТКС от размера частиц проводящей фазы для соотношения фаза: стекло

Естественно, что сопротивление при этом падает, а ТКС - возрастает. При большом содержании проводящей фазы в композиции (50%) вероятность нахождения среди множества мелких частиц более крупных достаточно велика. Последние, как описывается в [4], будут шунтировать

мельчайшие частицы, и сопротивление, таким образом, слабо зависит от дисперсности проводящей фазы. ТКС имеет большое положительное значение и его относительное изменение незначительно.

Из рисунка 3 видно также, что дисперсность стекла определенным образом влияет на характеристики резистивных плёнок. Уменьшение размеров стеклянных частиц повышает сопротивление слоя (кривые на рисунке 5, соответствующие сопротивлению, располагаются выше с повышением дисперсности стекла). Величина ТКС при этом снижается (кривые, характеризующие изменение ТКС, располагаются ниже с увеличением дисперсности стекла).

Уменьшение размеров стеклянных частиц способствует формированию изолирующих прослоек и следствием этого, очевидно, является наблюдаемое поведение сопротивления и ТКС.

Таким образом, из вышеуказанного с очевидностью следует, что дисперсность как проводящей фазы, так и стекла может оказать значительное влияние на электрические характеристики резисторов. Поэтому для улучшения воспроизводимости свойств резистивных паст необходимо при подготовке исходных материалов осуществлять тщательный контроль их удельной поверхности.

2.3 Влияние органической связки

Для трафаретного печатания резистивной композиции и удерживания её на керамике до вжигания основные материалы композиции замешиваются в однородную пасту с помощью полужидкого связующего вещества, или связки. Связки представляют собой разнообразные смеси органических соединений.

Выбор органической связки для паст представляет большую трудность. Потребителю нужна паста, которая ведет себя, как жидкость и как твердое вещество на разных стадиях трафаретной печати и после неё. Высокая текучесть требуется во время продавливания пасты через ячейки сетчатого

трафарета и во время отделения трафарета от напечатанного элемента, но сразу же вслед за этим должно наступить состояние упругости, когда паста не поддается деформации или течению. Это свойство связок называется тиксотропностью, оно очень важно и при хранении готовых паст, т.к. препятствует осаждению твердых частиц пасты на дно.

Но тиксотропные связки (и пасты) имеют тот недостаток, что снова значительно снижают свою вязкость, т.е. растекаются, при повышении температуры среды, например, во время обжига или подсушки.

Известны также и нетиксотропные, так называемые, быстросохнущие связки, которые представляют собой растворы высокомолекулярных полимерных материалов в каком-либо растворителе. Вследствие большой летучести растворителя подобные пасты сохнут при комнатной температуре уже во время трафаретной печати. Это, с одной стороны, способствует лучшему воспроизведению геометрической формы, то есть топологии резистивного элемента, и его размеров, а с другой стороны, сильно затрудняет процесс печатания, очистки трафарета, а также и последующего хранения паст. Быстросохнущая связка в пасте, определенно, не может способствовать сохранению пастой стабильных реологических и связанных с этим качеством электрических свойств и часто не обеспечивает воспроизводимость свойств резистивных элементов.

Роль органической связки в пасте сравнительно кратковременна - связка должна быть удалена из пасты до того, как произойдет расплавление стекла - но очень важна, т.к. определенным образом может влиять на многие свойства будущего резистора:

- заданную топологию и размеры;
- однородность состава и структуры;
- внешний вид, отсутствие трещин и пор и другие.

В конечном счёте связка, как показали в том числе и наши исследования, является важнейшей составной частью резистивной пасты.

В настоящее время в отрасли используются, в основном, два вида связок:

- тискеотропная - смесь ланолина, вазелинового масла и циклогексанола;
- быстросохнущая - раствор этилцеллюлозы в терпинеоле с добавлением касторового масла.

Ланолиновая связка распространена значительно шире этилцеллюлозной [5].

В данной работе было проведено опробование нескольких вариантов ланолиновых связок и этилцеллюлозной связки. Работа носила технологический характер. Исследовалось влияние предварительной сушки ланолина на свойства пасты и резистивных элементов (РЭ) из неё.

После того, как было обнаружено отсутствие положительного влияния сушки на свойства пасты и РЭ, в работу было включено опробование нескольких вариантов несущеного, затем специально увлажненного ланолина, ланолина, смешанного с перегнанной фракцией циклогексанола, ланолиновой связки без циклогексанола и других. В сравнении с ланолиновыми связками опробовалась быстросохнущая этилцеллюлозная связка.

Изучались следующие свойства:

- вязкость связок при различных температурах по диаметру круга растекания;
- вязкость паст аналогично;
- исходная ширина РЭ после нанесения;
- конечная ширина РЭ после вжигания;
- изменение ширины по сравнению с первоначальной;
- Δ , растекание по ширине;
- удельное сопротивление;
- ТКС при +155 и минус 60°C;
- влагостойкость.

Перечисленные свойства изучались не на всех нижеприведенных пастах, а выборочно.

Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты исследования паст на различных связках

№№ ПП	Шифр Паст	Вид связки	Вязкость пасты, мм		Ср.исх. ширина элемента СПЗ-37, мм	Ср.кон. ширина элемента, мм	Ср. Расте- кание	R, OM	ТКС		Влаго- стойкость, %
			20°С	24°С					+155°С	-60°С	
1	P-35	Обычная связка (ЮУО.054.265 ТК)	-	-	3,09	3,16	+0,07	2к	+200	-130	-
2	— —	То же с перегнанным циклогексанолом:	-	-	3,06	3,11	+0,05	2,2к	+100	+20	-
3	— —	То же с несущим ланолином (влажн.7 %)	-	-	3,07	3,13	+0,06	2,3к	+150	-60	-
Повторно											
1	— —		-	-	3,05	3,12	+0,07	2к	+150	+12	-
2	— —		-	-				1,7к	+115	+2	-
3	— —		-	-	3,06	3,12	+0,06	1,7к	+107	-12	-
4	— —	То же с влажным ланолином (вл. 20%)	-	-	3,05	3,15	+0,1	2,5к	+50	-35	-
5	РНЮ-30	Обычная связка	17	19			+0.013	12к	-200		-
			19	19			+0.01	12к	-200		
			17	19			+0.03	16к	-235		
6	— —	Несушенный ланолин (влажн. 5%)	18	19			+0.009	13к	-220		-
			18	18			+0.01	16к	-220		
			17	17			+0.02	13к	-210		

Продолжение таблицы 1

№№ ПП	Шифр Паст	Вид связки	Вязкость пасты, мм		Ср.исх. ширина элемента СПЗ-37, мм	Ср.кон. ширина элемента, мм	Ср. Расте- кание	R, OM	ТКС		Влаго- стойкость, %
			20°C	24°C					+155°C	-60°C	
7	__	Влажный ланолин (10%)	16	17			-0,01	17к	-250		-
8	__	Этилцеллюлозная связка	15	19			+0,01	70к	-400		-
9	P-35	Обычная связка	-	-	3,08	3,16	+0,08	3к	+95	+8	+0,02
10	__	Циклогексанол заменен на 10 % H ₂ O	-	-	3,07	3,13	+0,06	3,4к	+55	-30	+0,04
11	__	на 20 % H ₂ O	-	-	3,07	3,11	+0,04	2к	+40	-48	+0,035
12	__	на 30 % H ₂ O			3,06	3,09	+0,03	1,7к	+40	-60	+0,03
13	__	на 40 % H ₂ O			3,04	3,09	+0,05	1,7к	+22	-70	+0,02
14	__	на 50 % H ₂ O			3,09	3,13	+0,04	1.7к	+19	-75	+0,02

Следует отметить, что работа заняла с перерывами большой промежуток времени и поэтому выполнялась на разных партиях ланолина, разных трафаретах, керамике, при разных температурах и других условиях нанесения и вжигания и так далее. Отсюда некоторые колебания в исходной и конечной ширине РЭ, растекании, сопротивлении и ТКС.

Однако рутениевые пасты во всех экспериментах с ланолиновой связкой не обнаружили ухудшения каких-либо физических и электрических свойств от наличия влаги в связке. Более того, отмечено понижение ТКС паст, замешанных на влажном ланолине (7 - 20 % влаги) примерно на 50×10^{-6} единиц по сравнению с пастами на сушеном ланолине. Поверхность РЭ при этом не ухудшается, край становится ровнее, растекание паст при вжигании так же, как и их вязкость, определенная по диаметру круга при 20 и 24°C, не изменяется, оставаясь в тех же пределах 16 - 19 мм, то есть реологию паст можно считать неизменной. Влагостойкость после 56 суток колеблется в пределах 0,02 - 0,04 %. По результатам этой части проделанной работы в настоящее время проведено изменение технологического процесса приготовления связки для рутениевых резистивных паст - исключена операция сушки ланолина [6].

В этилцеллюлозной пасте при некоторой нетехнологичности, то есть высокой требовательности к специальным условиям приготовления и использования, были обнаружены следующие преимущества:

- высокая разрешающая способность, то есть легкость печатания тонких линий 0,1 мм или серии параллельных тонких линий с небольшими расстояниями между ними;

- минимальное растекание отпечатка при нагревании или вжигании.

Такое поведение паст на этилцеллюлозной связке делает возможным печатание более тонких линий с повышенной разрешающей способностью, поэтому этилцеллюлозная связка может быть рекомендована для таких применений, когда предъявляются повышенные требования по разрешению.

2.4 Влияние типа керамики

Влияние материала подложки на электрические свойства резистивных плёнок изучалось на примере керамики четырёх типов:

М-7, 22ХС, ГМ, "Поликор".

В таблице 2 сведены некоторые характеристики данных типов керамики.

Таблица 2 – Свойства и состав различной керамики

№№ ПП	Показатели	Ед. изм .	М-7	22ХС	ГМ	Поликор
1	Содержание осн.комп.	%	95,14 Al_2O_3	95,14 Al_2O_3	99,7 Al_2O_3	99,7 Al_2O_3
2	Фазовый состав	%				
	Кристаллич.		79	79	97	-
	Стеклообр.		14	14	1	-
	поры		7	7	2	-
3	Плотность	г/см ³	3,72	3,72	3,92	3,96
4	Коэффициент термического линейного расширения от 20-900°С	1/°С	78×10^{-7}	78×10^{-7}	78×10^{-7}	$(80 \pm 5) \times 10^{-7}$
5	Цвет		белый	розовый	белый	Белый полупроз- рачный

Как видно из представленных в таблице данных, отдельные марки керамики довольно сильно различаются по свойствам.

Нами было рассмотрено влияние материала подложки на такие важные параметры, как величина сопротивления и ТКС резистивных паст.

На подложки из разной керамики наносились опорные пасты различного удельного сопротивления: 10 Ом/□, 1 кОм/□ и 500 кОм/□, затем вжигались по действующей технологии.

Результаты измерения величины сопротивления и ТКС приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения сопротивления и ТКС резистивных элементов на основе керамики разных марок

Марка керамики	Опорная паста					
	10 Ом/□		1 кОм/□		500 кОм/□	
	R, Ом	ТКС 10^6 , I/°C	R, кОм	ТКС 10^6 , I/°C	R, МОм	ТКС 10^6 , I/°C
М7	37,8	+110	5,0	+36	2,3	-150
22ХС	20,6	+154	5,0	-40	1,0	-185
ГМ	24,2	+340	5,0	26	1,2	-133
Поликор	26,5	+320	5,9	0	1,4	-125

Хорошо видно, что материал подложки оказывает влияние на сопротивление резистивной плёнки и особенно на величину ТКС.

Таким образом, свойства керамического основания являются важным фактором и требуется более детальное исследование для выяснения их роли в формировании свойств резистивных плёнок.

3 Исследование зависимости разброса величины сопротивления от технологических факторов

3.1 Распределение величин сопротивления

Наряду с температурным коэффициентом сопротивления и значением удельного поверхностного сопротивления одной из важных характеристик, определяющих технический уровень керметных паст, является отклонение величины сопротивления от заданного.

По проспектам иностранных фирм разброс сопротивлений керметных паст укладывается в интервал +10, +20 %.

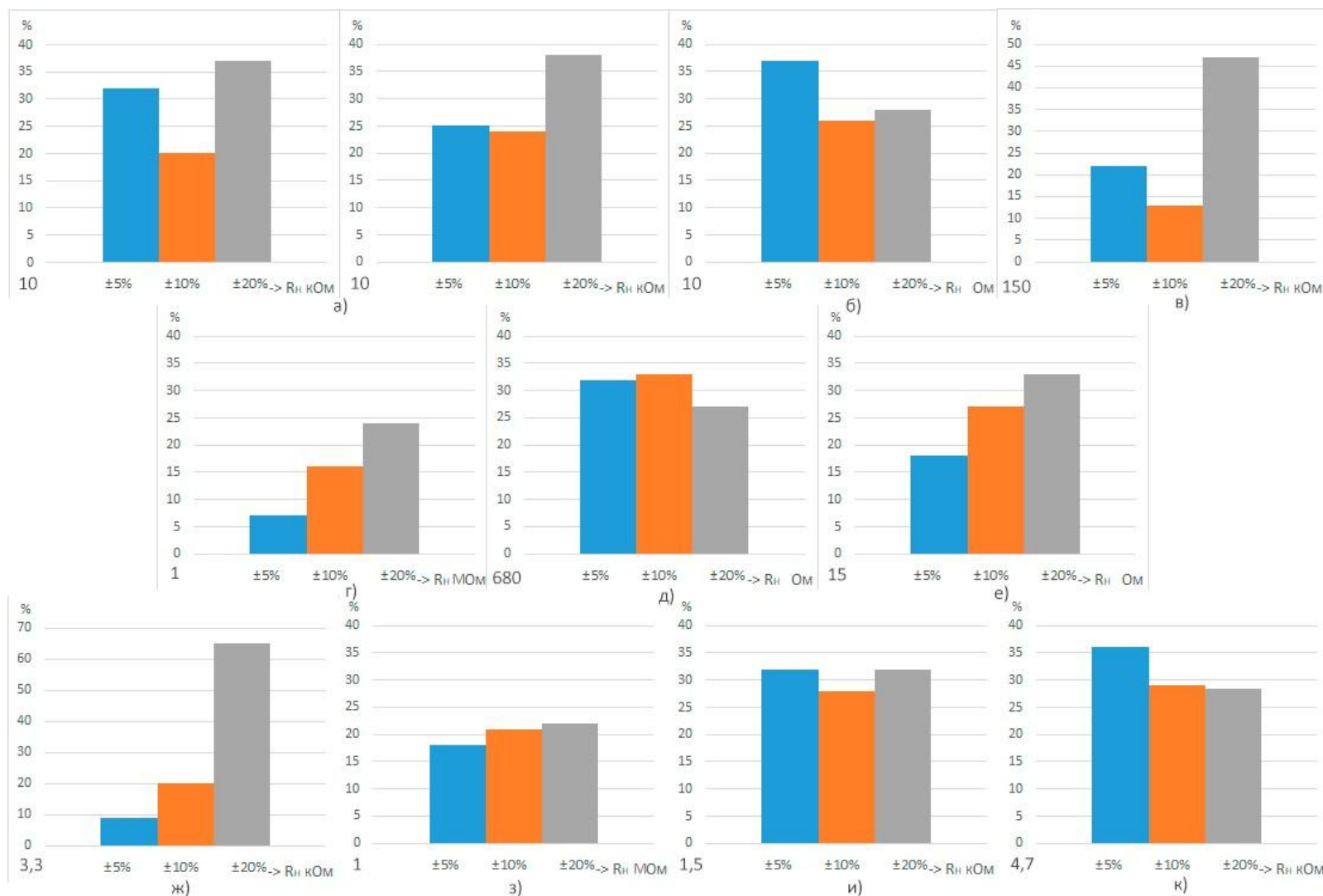
Для керметных паст отечественного производства допустимая величина отклонения от номинального сопротивления составляет, как правило, +20 %.

На рисунке 6 приведены гистограммы распределения по допусковым группам величины сопротивления резистивных элементов различных номиналов с разной топологией, изготавливаемых в опытном производстве.

Одним из направлений исследования, было установление зависимости электрических параметров паст от технологических факторов.

Решать эту проблему необходимо в два этапа, выделив среди многообразия технологических факторов, определяющих параметры резисторов, две основные группы:

- 1) резистивная композиция (её состав, метод подготовки, дисперсность составляющих частей и т.д.) и
- 2) технологические режимы печати и термообработки (скорость движения и давление ракеля, трафарет, температура обжига и так далее).



а) 10кОм, СПЗ-44; 0,25 Вт; б) 10 Ом, СПЗ-44; 0,25 Вт; в) 150кОм, СПЗ-44; 0,25 Вт; г) 1 МОм, ”Эвклаз-4”;

д) 680 Ом, ”Эвклаз-4”; е) 15 Ом, СПЗ-37; ж) 3,3 кОм, СПЗ-37; з) 1 МОм, СПЗ-44; 0,25 Вт;

и) 1,5 кОм, СПЗ-44; 1 Вт; к) 4,7 кОм, СПЗ-44; 1 Вт.

Рисунок 6 – Гистограммы распределения по допусковым группам величины сопротивления резистивных элементов

В работе изучалось влияние второй группы технологических факторов на разброс величины сопротивления.

Так как эта группа факторов относится к технологическим операциям печатания и обжига, задача сводится по сути дела к совершенствованию технологического процесса путём оптимизации операций нанесения пасты и обжига, то есть отысканием условий, при которых разброс величины сопротивления наименьший [7].

3.2 Постановка эксперимента

На выходные параметры резистивных элементов, в том числе и на разброс величины сопротивления, влияет множество факторов. Целью технологического процесса изготовления резистивных элементов является получение резистивных элементов с наименьшим отклонением от номинального сопротивления.

Следовательно, задача исследования заключается в нахождении условий технологического процесса, при котором разброс величины сопротивления будет минимальным.

Предполагаем, что на величину разброса сопротивления влияют следующие факторы:

- $\tilde{X}_1$ - время подъёма температуры, мин;
- $\tilde{X}_2$ - время выдержки в зоне с T_{max} , мин;
- $\tilde{X}_3$ - время спада температуры, мин;
- ($\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \tilde{X}_3$ - Факторы, определяющие температурный профиль);
- $\tilde{X}_4$ - пиковая температура вжигания, °C;
- $\tilde{X}_5$ - содержащиеся органической связки в пасте, %;
- $\tilde{X}_6$ - толщина керамической подложки, мм;
- $\tilde{X}_7$ - величина зазора между трафаретом и кассетой, мм;
- $\tilde{X}_8$ - положение ракеля относительно кассеты;
- $\tilde{X}_9$ - скорость протяжки ракеля;
- $\tilde{X}_{10}$ - тип фотоэмульсии на трафарете.

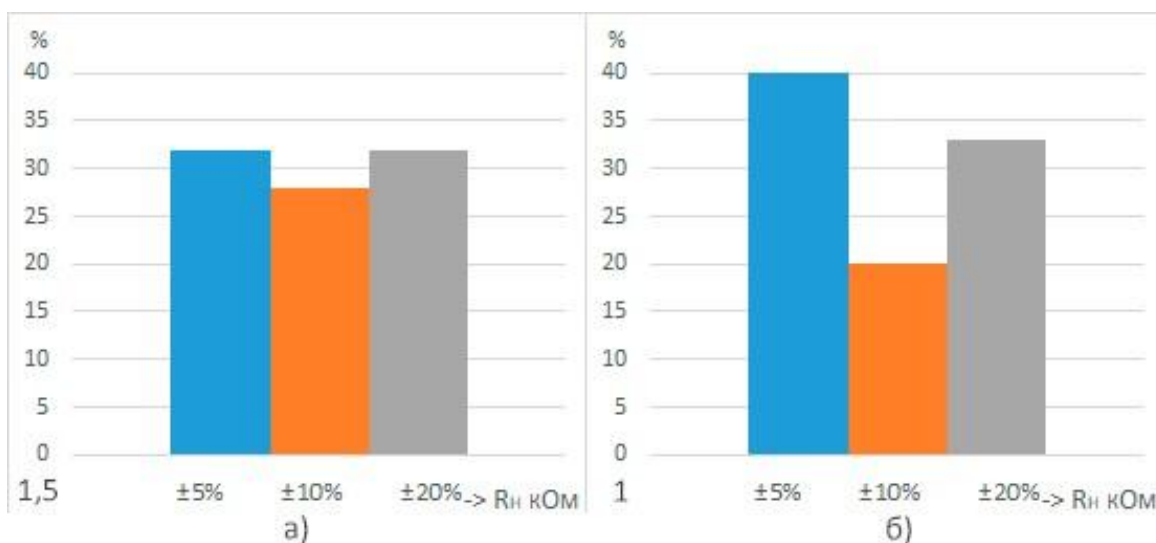
Таблица 4 – Средние значения сопротивления и среднеквадратичное отклонение

№ опыта	R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	$R_{ср}$, кОм	$\bar{\sigma}_1$	$\bar{\sigma}_2$	$\bar{\sigma}_3$	$\bar{\sigma}_{ср}$
1	2,1952	2,3024	2,4727	2,3234	0,0287	0,0175	0,0205	0,0808
2	2,7680	2,3616	2,2095	2,4464	0,0447	0,0600	0,0466	0,0621
3	2,2514	2,0080	2,3655	2,2083	0,0259	0,0313	0,0354	0,1054
4	2,2738	2,5261	2,5430	2,4476	0,0260	0,0178	0,0482	0,0871
5	0,9673	0,8957	0,8918	0,9183	0,0109	0,0075	0,0079	0,0192
6	1,7824	1,8606	1,9788	1,8739	0,0170	0,0251	0,0183	0,0571
7	1,8876	1,6141	2,2445	1,9154	0,0093	0,0336	0,0117	0,1825
8	1,4549	2,2679	1,7044	1,8091	0,0185	0,0275	0,0201	0,2327
9	2,0756	2,0966	2,1337	2,1020	0,0602	0,0171	0,0346	0,0168
10	1,8176	2,4908	1,9604	2,0896	0,0617	0,0573	0,0128	0,1907
11	1,9953	1,6724	2,4103	2,0260	0,0532	0,0233	0,0228	0,2134
12	1,127	1,0939	0,8393	1,0201	0,0143	0,0203	0,0212	0,0909
13	1,0423	1,0062	1,0333	1,0273	0,0311	0,0293	0,0238	0,0108
14	1,0257	1,0771	1,0266	1,0431	0,0129	0,0276	0,0349	0,0170
15	1,1470	1,0012	1,1922	1,1135	0,0491	0,0085	0,0109	0,0576
16	1,0659	1,0249	1,0855	1,0588	0,0166	0,0094	0,0053	0,0176
17	0,8689	1,0587	1,2020	1,0432	0,0272	0,0735	0,0114	0,0965

Добавим, что в каждой серии опытов изготавливали по 10 образцов резистивных элементов, каждая серия повторялась три раза. Кроме того, для усреднения влияния неконтролируемых и неучтенных факторов порядок постановки опытов был рандомизирован. Рандомизацию осуществляли по таблице случайных чисел.

Экспериментальные данные по средним значениям сопротивления образцов в каждом повторном опыте и общее среднее по всей серии, а также среднеквадратичное отклонение представлены в таблице 4.

Для партии резистивных элементов, изготовленных по режимам лучшего (№ 13) опыта, на рисунке 7 б) приведена гистограмма распределения величины сопротивления по допусковым группам $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ и $\pm 20\%$. Здесь же для сравнения на рисунке 7 помещена гистограмма для образцов, изготовленных по действующей технологии.



а) по действующей технологии; б) по рекомендуемым режимам.

Рисунок 7 – Гистограммы распределения по допусковым группам

Анализ гистограмм показывает, что отклонение величины сопротивления у всей партии резистивных элементов, изготовленных по режиму опыта 13, не превысило $\pm 20\%$, причём, распределение по

допусковым группам +5, +10, +20 % было следующее: 47, 20 и 33% соответственно.

Для партии, изготовленной по действующей технологии, распределение по тем же группам допуска было соответственно 32, 28 и 32%. 8 % образцов не попали в номинал.

Таким образом, проведенный эксперимент позволяет сделать вывод о возможности управления попаданием в заданный номинал с тем или иным допуском.

Для определения факторов, в наибольшей степени влияющих на разброс сопротивления, необходимо было провести проверку всех исследуемых факторов на значимость и отбросить все незначимые факторы.

На основании проведенного исследования можно утверждать, что определяющим фактором для разброса величины сопротивления будет также ещё один фактор - толщина керамической подложки. Тот факт, что значимость этого фактора не выявилась, когда за функцию отклика была принята величина разброса сопротивления, объясняется самой постановкой эксперимента: каждая серия опытов выполнялась на подложках одинаковой толщины.

3.3 Действие нагрузки в нормальных условиях

Стабильность величины сопротивления во времени, а также при воздействии различных внешних факторов является одной из важнейших характеристик, определяющих технический уровень изделий. Поэтому, одним из требований технического задания устанавливалось проведение поиска путей увеличения стабильности величины сопротивления под электрической нагрузкой.

Накопленный опыт говорит о том, что наиболее нестабильными, как правило, являются пасты высокого удельного сопротивления (свыше 100 кОм/□). Поэтому для исследования была выбрана опорная паста с наибольшим удельным сопротивлением 500 кОм/□.

Параллельно, для сравнения, испытывалась паста 10 Ом/□. Пасты наносились на подложки *HPI-I*.

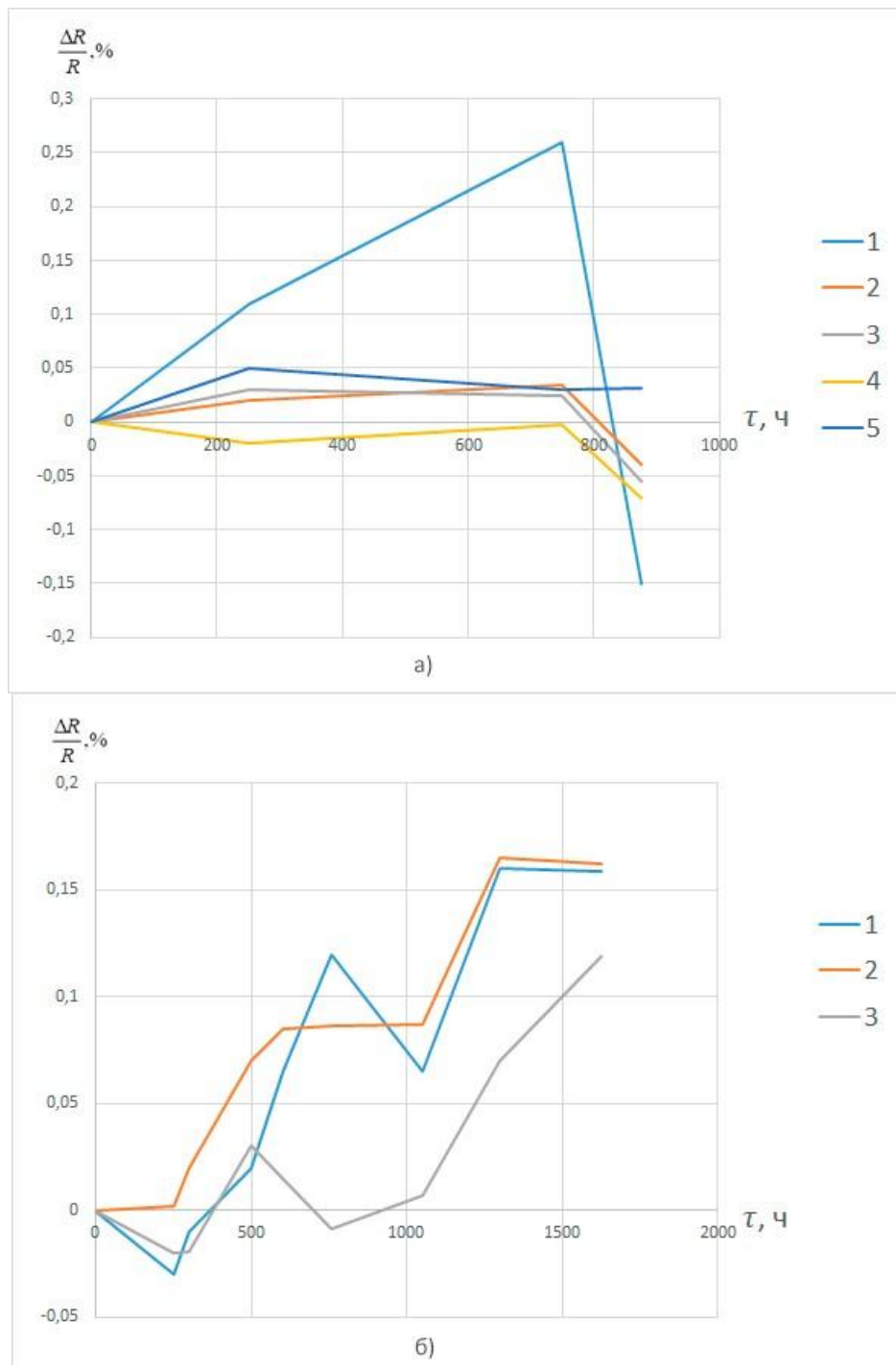
Перед испытанием под электрической нагрузкой одна часть образцов НР была оставлена на хранение в нормальных условиях, а другая помещена в камеру тепла с температурой +155°C. Периодически измерялось сопротивление образцов и рассчитывалось относительное его изменение.

Следует добавить к вышесказанному, что пасты вжигались по различным технологическим режимам.

Результаты испытаний для разных режимов обжига представлены на рисунке 8 для стабильности при хранении в нормальных условиях и на рисунке 9 при выдержке образцов в камере тепла.

Как видно из рисунков, стабильность обеих паст хорошая и не превышает 0,25 % в первом случае и 2,0 % во втором.

Третья партия образцов была поставлена на испытание под электрической нагрузкой, причём нагрузка была номинальной 2 Вт/см² для пасты 10 Ом/□ и ограничена величиной подаваемого напряжения 100 В для пасты 500 Ом/□. Испытания проводились в камере тепла при температуре среды +70°C.

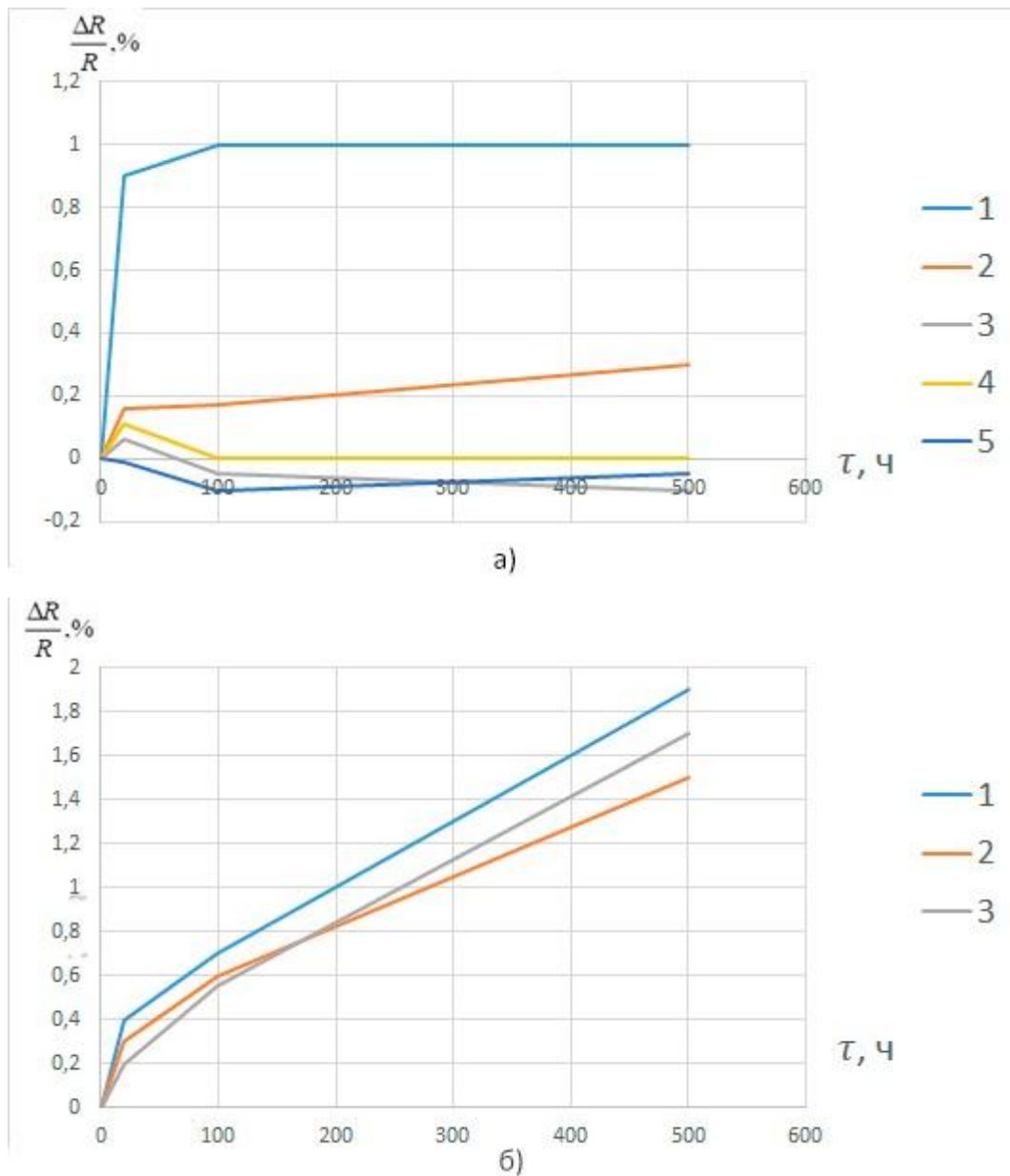


а) 500 кОм/□; б) 10 Ом/□ в нормальных условиях для разных режимов обжига:

а) 1 - 880°C; 2 - 910°C; 3 - 910°C; 4 - 930°C; 5 - 950°C.

б) 1 - 830°C; 2 - 850°C; 3 - 870°C.

Рисунок 8 – Стабильность величины сопротивления опорных паст



а) 500 кОм/□; б) 10 Ом/□ при выдержке при +155°C для разных режимов обжига: а) 1- 880°C; 2 - 910°C; 3 - 910°C; 4 - 930°C; 5- 950°C.

б) 1- 830°C; 2 - 850°C; 3 - 870°C.

Рисунок 9 – Стабильность величины сопротивления опорных паст

3.4 Действие электрической нагрузки для разных режимов обжига

Результаты испытаний после 24, 100, 200 и 500 час представлены на рисунке 10.

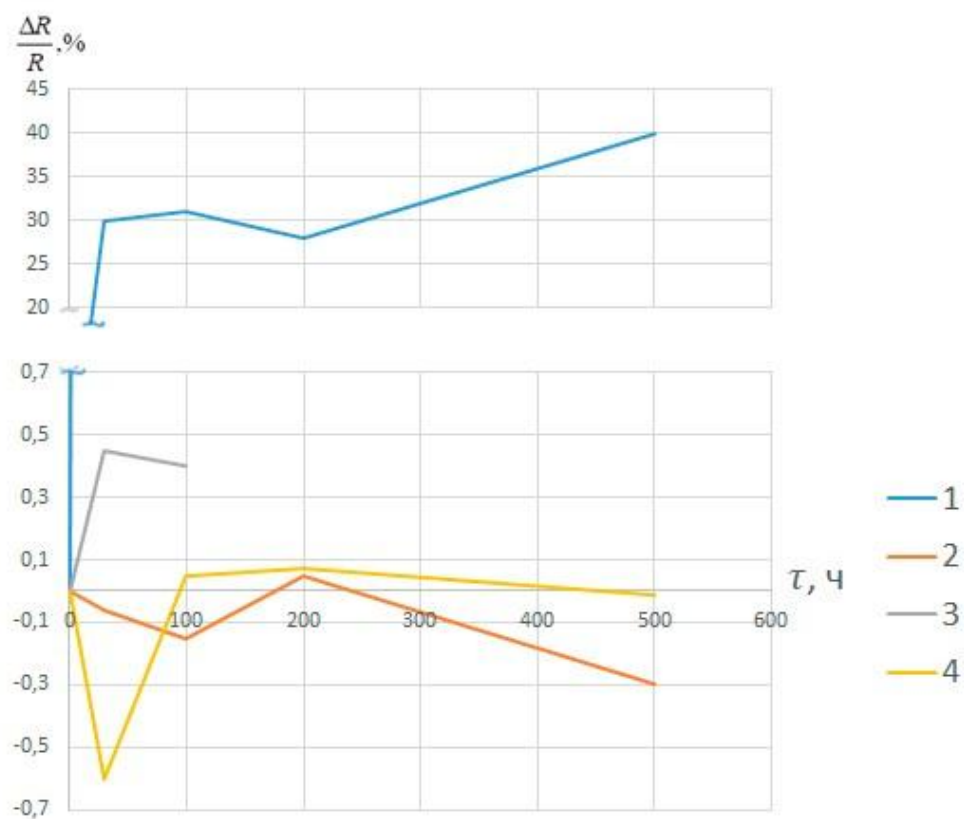
Из рисунка следует, что стабильность величины сопротивления для высокоомных паст очень сильно зависит от температуры обжига. Если для пасты 10 Ом/□ она не превышает 0,2 % для всех режимов, то для пасты 500 кОм/□ становится удовлетворительной лишь с 910°C.

После проведения первой серии испытаний из пасты 500 кОм/□ повторно была изготовлена партия образцов в большем количестве.

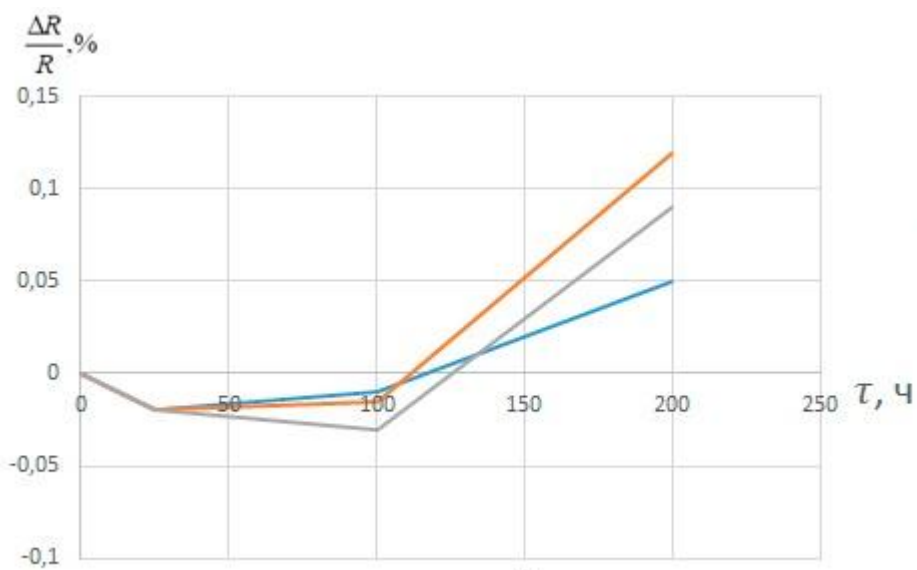
Обжиг производился при температуре 880°C и 930°C. После выдержки резистивных элементов при температуре +70°C под электрической нагрузкой в течение 24 и 100 час у образцов, вожженных при 880°C, вновь наблюдается значительный (до 100 %) уход сопротивления; у образцов, вожженных при 930°C, среднее относительное отклонение величины сопротивления от первоначального составило 0,53 % после 24 ч и 0,41 % после 100 ч воздействия тепла и электрического поля и не превышало + 5,0 %.

Следует отметить, что внешний осмотр резистивных элементов, изготовленных при разных температурах обжига, показал, что поверхность неудовлетворительная для температуры обжига ниже 900-910°C.

Полученные данные подтверждают высказанное в разделе о влиянии технологических факторов на характеристики плёнок предположение о существовании для каждого стекла температурного интервала, в котором изменения его свойств наиболее благоприятны для формирования однородной структуры резистивной плёнки. Очевидно, граница такого интервала не фиксированы, их можно смещать в некоторых пределах в ту или иную сторону изменением скорости движения конвейерной ленты или времени выдержки при пиковой температуре обжига.



а)



б)

а) 500 кОм/□; б) 10 Ом/□ под действием электрической нагрузки для разных режимов обжига:

а): 1 - 880°C; 2 - 930°C; 3 – 930°C; 4 – 950°C;

б): -830°C; -850°C; -870°C;

Рисунок 10 – Стабильность величины сопротивления опорных паст

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют, что повышения стабильности величины сопротивления можно добиться, тщательно подбирая температурный режим обработки резистивных паст, учитывая свойства и содержание стеклянной фазы в их составе.

С целью определения возможности применения опорных паст в более жестких условиях эксплуатации, например, при подаче электрической нагрузки больше номинальной, нами изучалась стабильность величины сопротивления в зависимости от величины электрической нагрузки.

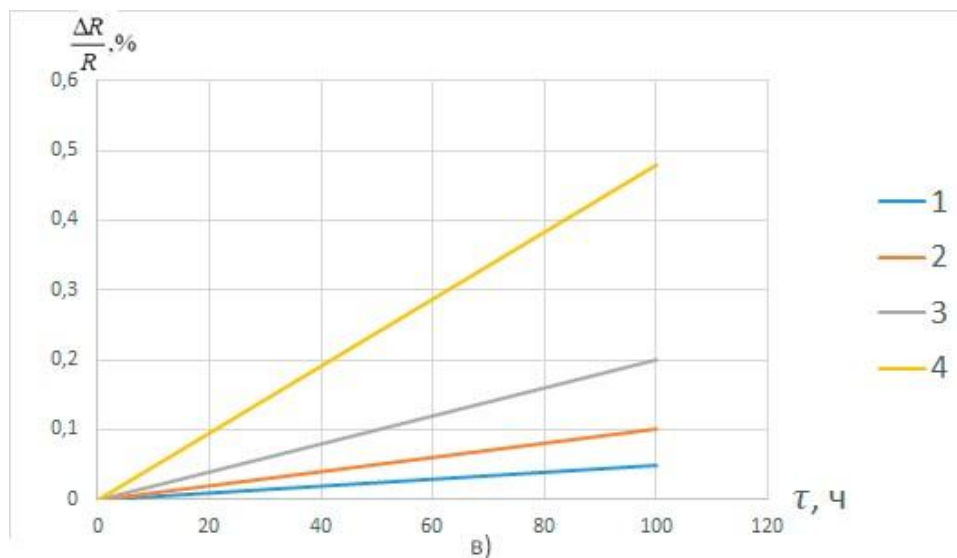
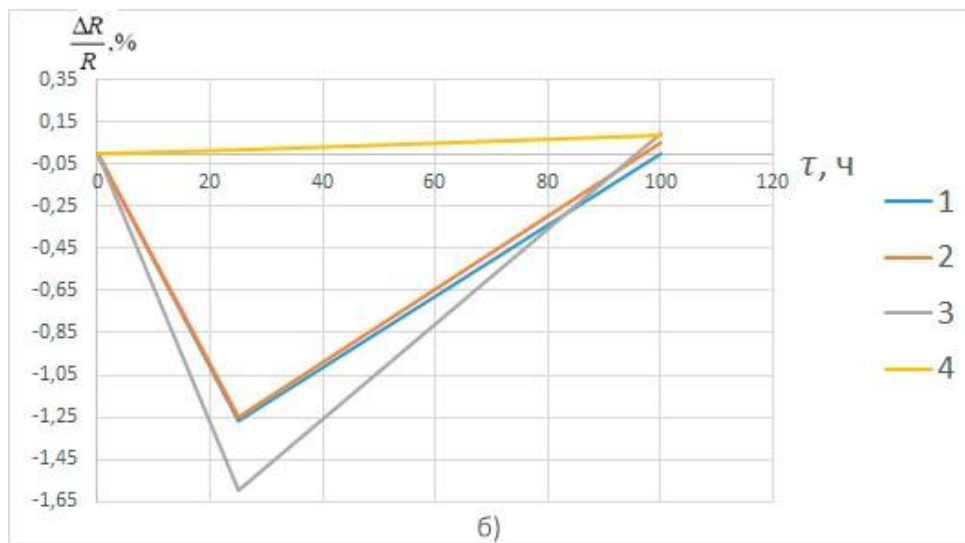
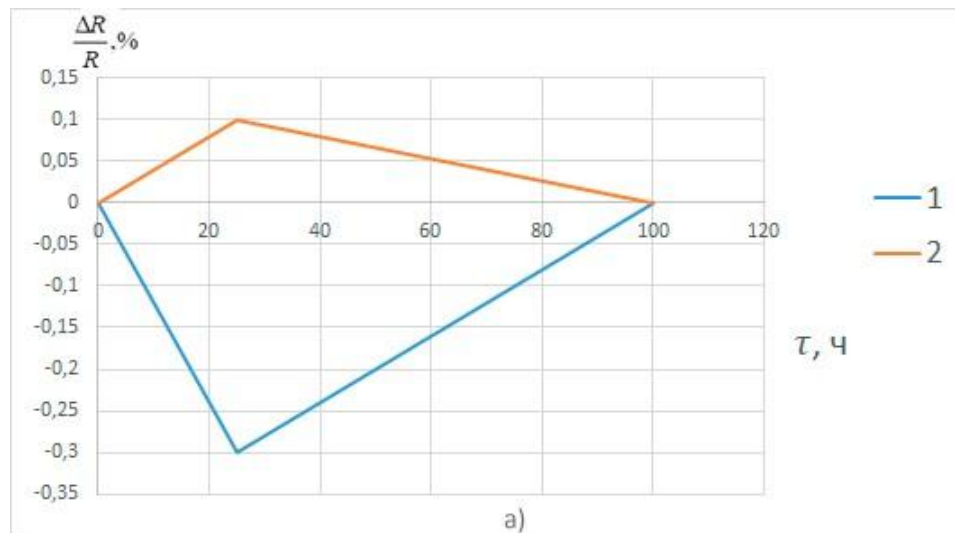
Испытывались пасты различного удельного сопротивления 10 Ом/□, 1 кОм/□ и 500 кОм/□. Испытательными образцами служили подложки *HPI-I*.

Величины электрической нагрузки были выбраны следующие: 2, 3, 5, 8 Вт/см² для паст 10 Ом/□ и 1 кОм/□ и 0,1; 0,5 Вт/см² ($U = 100, 250$ В соответственно) для пасты 500 кОм/□

Результаты испытаний приведены на рисунке 11.

Так как уход сопротивления наблюдается, как правило, в первые часы при подаче напряжения и в дальнейшем сопротивление практически не меняется, а в обсуждаемом случае уход сопротивления для всех паст не превышал $\pm 0,5$ % при воздействии нагрузки в течение 100 час, то решено было более длительного испытания не проводить.

Таким образом, результаты испытаний показали, что опорные пасты удельных сопротивлений от 10 Ом/□ до 500 кОм/□ допускают увеличение нагрузки на резистивные элементы в исследованных пределах при правильно подобранном режиме термообработки до 8 Вт/см².



а) 500 кОм/□, б) 1 кОм/□, в) 10 Ом/□ для разных величин нагрузки:

а) 1 – 0,1 Вт/см² (U = 100 В); 2 – 0,5 Вт/см² (U = 250 В)

б), в): 1 – 2 Вт/см²; 2 – 3 Вт/см²; 3 – 5 Вт/см²; 4 – 8 Вт/см²;

Рисунок 11 – Стабильность величины сопротивления опорных паст

4 Исследование механизма проводимости в толстых плёнках на основе рутениевых композиций

4.1 Исследование температурной зависимости сопротивления

Ранее отмечалось, что существует несколько теорий и взглядов на процессы проводимости в толстых плёнках. Наиболее достоверными, являются модели механизма проводимости, основанные на процессах прыжковой проводимости и барьерном туннелировании. Однако обе эти теории имеют специфические недостатки, как в интерпретации экспериментальных данных, так и в теоретическом плане и не могут дать универсального представления о закономерностях, имеющих место в толстых резистивных плёнках [8].

Очевидно, все это связано с целым рядом процессов, происходящих в сложных композиционных системах, состав которых часто бывает неизвестен исследователю. Поэтому вопрос о накоплении экспериментальных данных стоит достаточно остро и решать его необходимо проведением широкого комплекса исследований.

Температурная зависимость сопротивления резистивных слоёв изучалась в широком интервале температур от -175°C (98 K) до $+155^{\circ}\text{C}$ (428 K).

Снимались кривые зависимости для различных проводящих систем на основе двуокиси рутения. На рисунке 12 приведены зависимости $\frac{\Delta R}{R} = f(T)$ для системы $\text{RuO}_2 + \text{Nb}_2\text{O}_5$ со стеклом 279 с содержанием проводящей фазы 40, 45, 50 %.

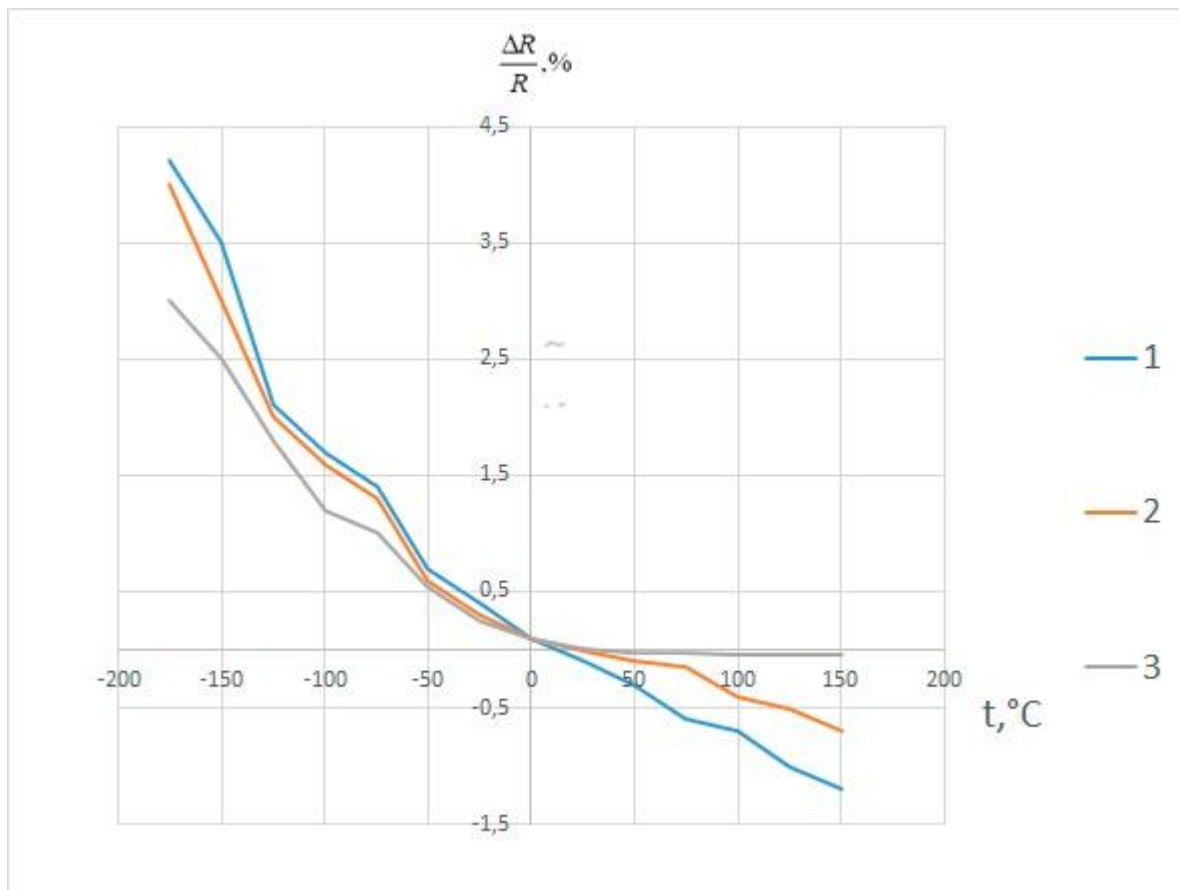
Хорошо видно закономерное изменение температурной зависимости величины сопротивления по мере увеличения количества в проводящей фазе, а именно: угол наклона кривых изменяется.

К аналогичному изменению хода кривых приводит и уменьшение содержания проводящей фазы.

Также на рисунке 13 показан характер зависимости сопротивления композиции $\text{RuO}_2 + \text{Nb}_2\text{O}_5$ на разных стеклах с содержанием проводящей фазы 50 %.

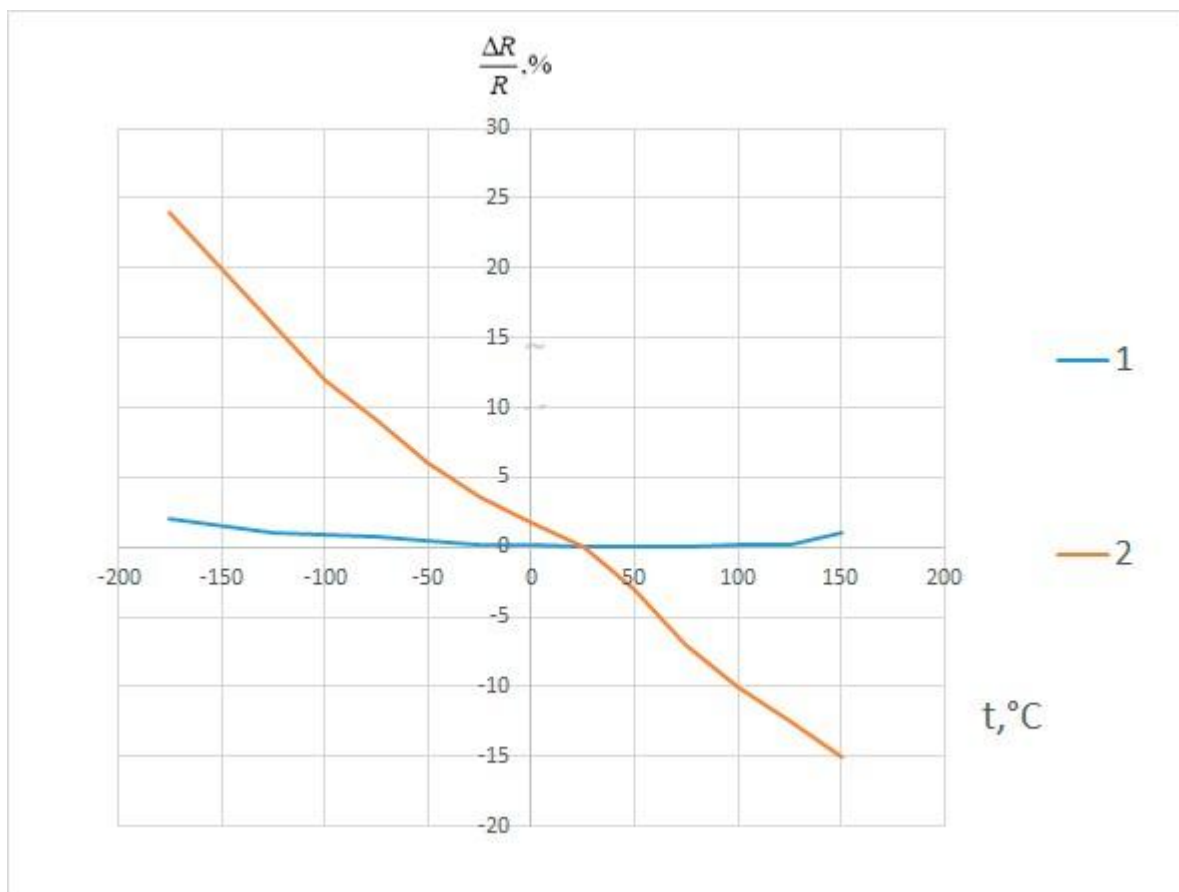
Из рисунка следует, что значительный вклад в характер проводимости в керметных плёнках вносят свойства самого стекла.

Факт определенного влияния условий приготовления исходных материалов подтверждается и на других системах.



содержание проводящей фазы 1 - 40%; 2 - 45%; 3 - 50%

Рисунок 12 – Температурная зависимость сопротивлений композиций с различным содержанием проводящей фазы



1 - на основе стекла 279; 2 - на основе стекла *Ru-34*

Рисунок 13 – Температурная зависимость сопротивлений для композиций

Таким образом, становится очевидным, насколько важно, выбрав исходные материалы для разработок новых керметных паст, тщательно отработать условия их подготовки, обеспечивающие получение материалов со стабильными свойствами (структурой, дисперсностью и другими).

4.2 Исследование температурной зависимости сопротивления порошков проводящей фазы

Представляется интересным проследить, как меняются электрические свойства самих порошков исходных материалов проводящей фазы в процессе термообработки. Такие данные позволили бы значительно дополнить и расширить наши представления о механизме переноса зарядов в сложных композиционных системах.

Необходимую и достаточно обширную информацию можно получить, измерив температурную зависимость сопротивления порошков проводящей фазы и экстрагированных из отожженной резистивной плёнки.

Однако, в настоящее время нет установленного ГОСТом метода измерения удельного сопротивления порошкообразных материалов.

Разными авторами разработаны различные методики измерения удельного сопротивления порошков, имеющие свои особенности как в подготовке образцов (спекание, таблетирование), так и в методе измерения.

В данной работе была измерена температурная зависимость сопротивления некоторых порошков. Схема измерения представлена на рисунке 15.

По этой методике навеска порошка засыпается в кювету, прессуется под давлением 10 кг/см^2 , прогревается до температуры 300°C , выдерживается в течение некоторого времени для удаления адсорбированных газов и уплотнения порошка. После охлаждения измеряется сопротивление от комнатной температуры до $+200 \dots +250^\circ\text{C}$ [9].

Кривая зависимости $\frac{R}{R_k(298)} = f(t)$ для рутенита висмута представлена на рисунке 14.

Из представленного хода кривых следует отрицательное значение ТКС рутенита висмута, что противоречит действительности.

Очевидно, снижение сопротивления с ростом температуры обусловлено усилением контакта между частицами за счёт теплового расширения.

Следовательно, методика требует доработки в части подготовки образцов.

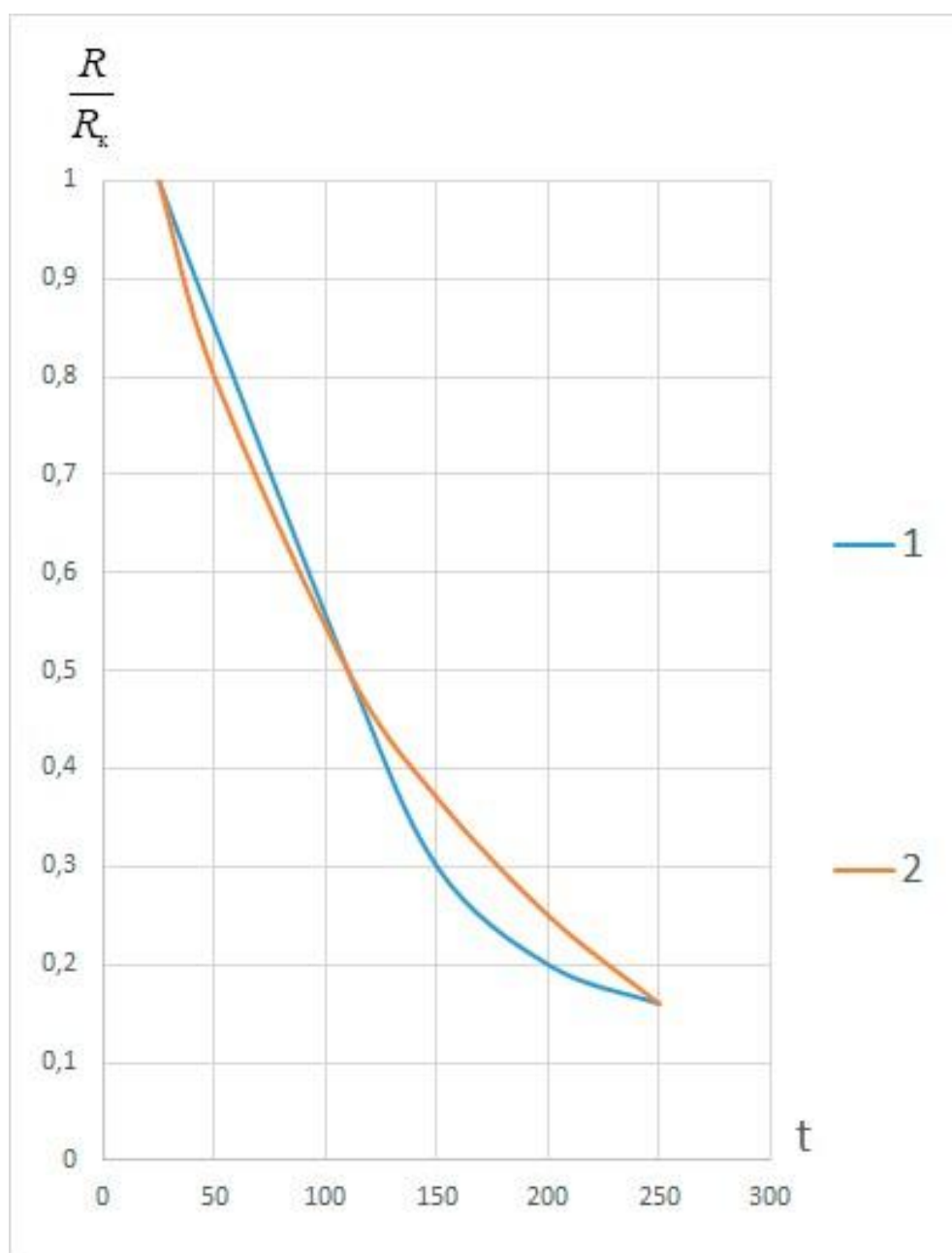
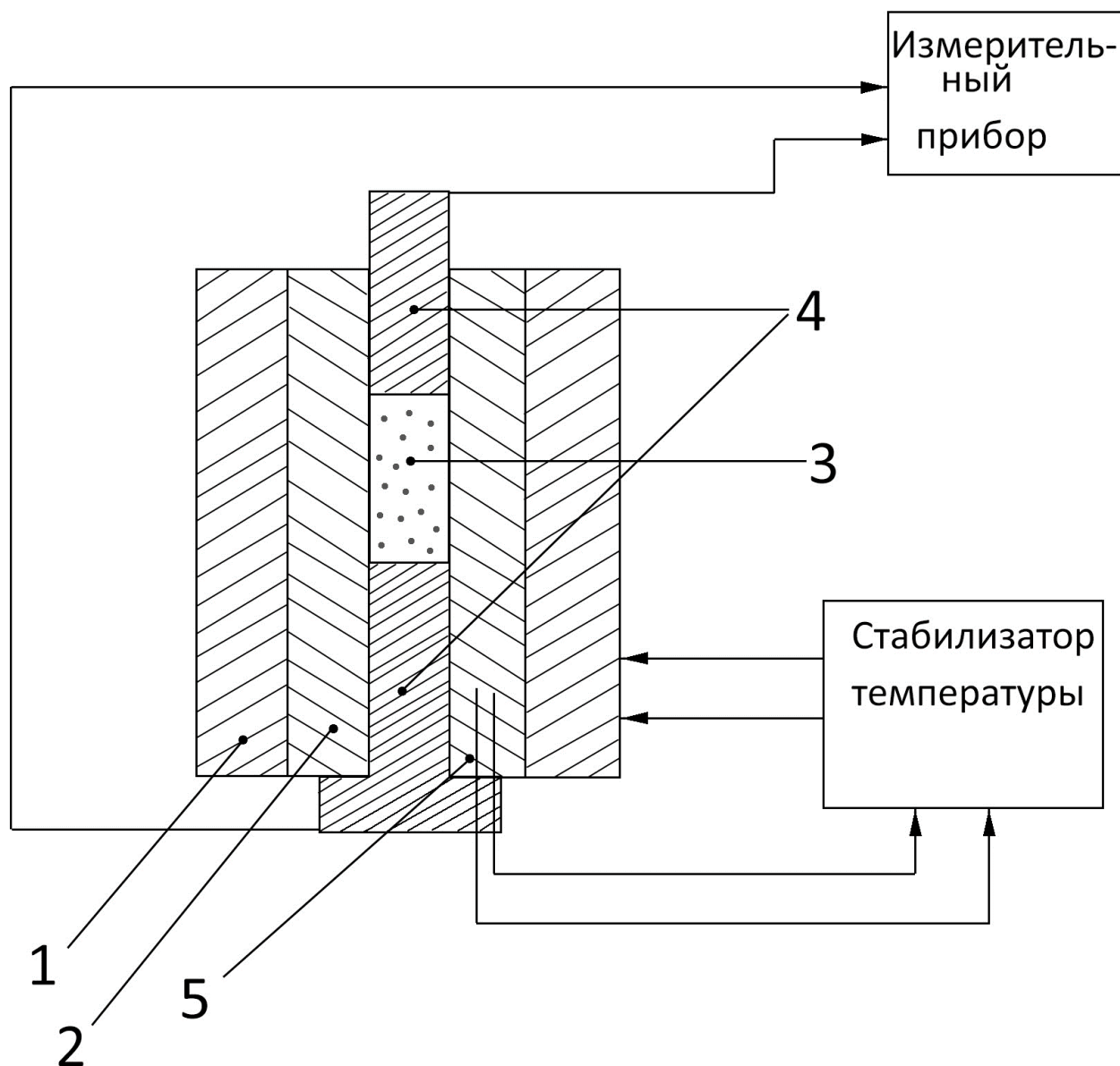


Рисунок 14 – Температурная зависимость сопротивления порошков рутенита висмута



1- нагреватель; 2 – кювета из непроводящего материала; 3- порошок исследуемого материала; 4 – контакты; 5 – термопара.

Рисунок 15 – Схема измерения температурной зависимости порошков

4.3 Исследование термоэдс резистивных пленок

Одним из методов исследования механизма проводимости в материалах является изучение термоэлектродвижущей силы, возникающей в них при создании температурного градиента.

Ранее отмечалось, что резистивные плёнки представляют собой стеклянную матрицу с распределенными в ней проводящими частицами

металлов и (или) их окислов. Поэтому в плёнках могут иметь место процессы, свойственные как металлам, так и полупроводникам.

В процессе возникновения т-э.д.с. (т-э.д.с.) особенно четко проявляется дырочный и электронный механизм проводимости полупроводников.

Величина и знак коэффициента т-э.д.с. являются дополнительной информацией в процессе исследования.

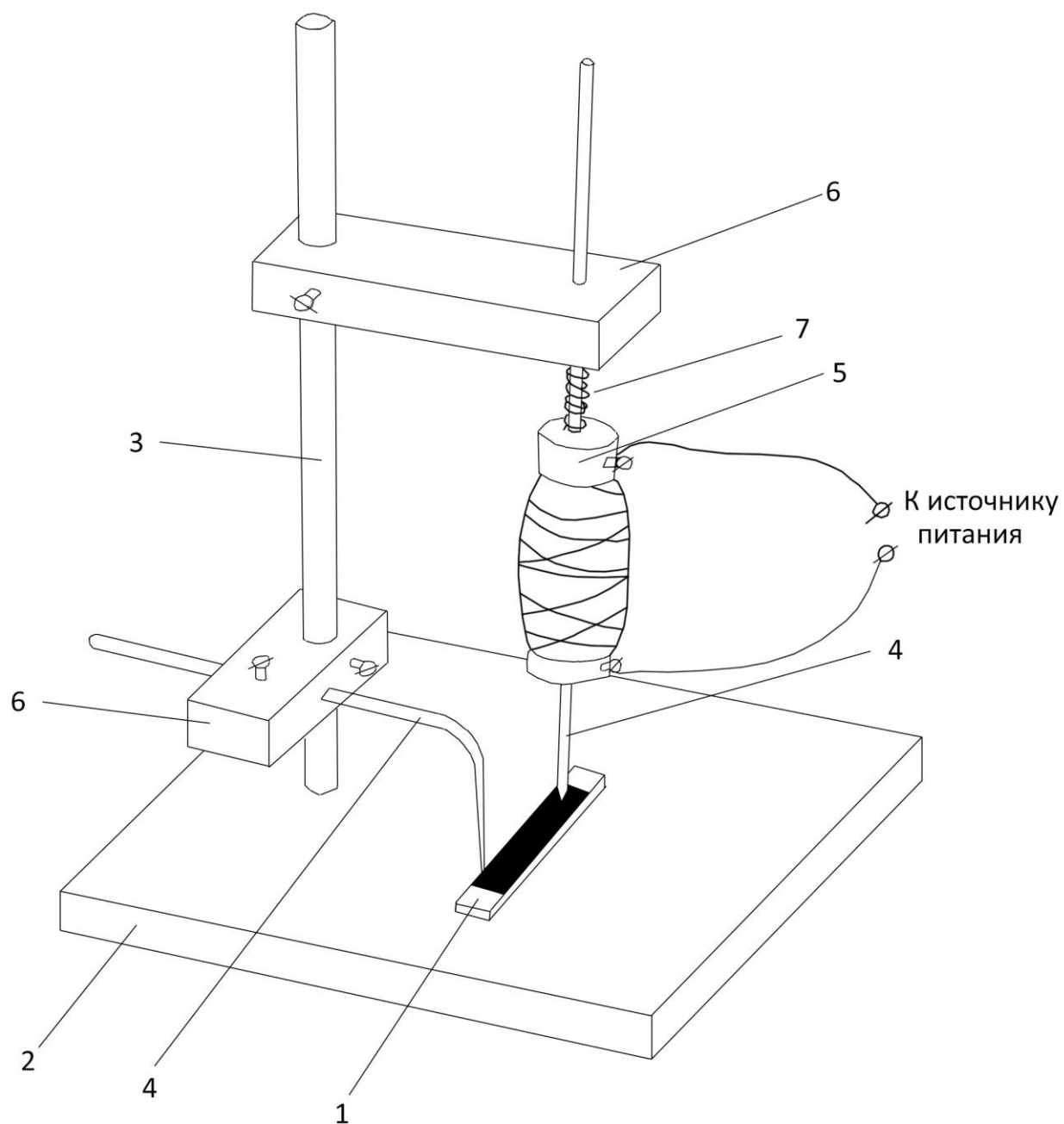
Нами проводились исследования т-э.д.с. в некоторых системах, отличающихся как материалом проводящей и изолирующей частей, так и относительным их содержанием.

Общий вид установки для измерения представлен на рисунке 16. Установка позволяет проводить измерения в широком интервале температур ($-150 \dots +200^{\circ}\text{C}$). Нами проводились измерения т-э.д.с. в температурном интервале $20-200^{\circ}\text{C}$ для следующих систем:

- а) опорные пасты $100 \text{ Ом}/\square$, $10 \text{ кОм}/\square$, $500 \text{ кОм}/\square$;
- б) пасты на основе рутенита свинца и двухкомпонентного стекла ($\text{PbO} \square \text{n SiO}_2$) с весовым соотношением 50:50; 40:60; 30:70;
- в) пасты на основе рутенита висмута и различных стекол: 279, *Ru* – 34 и двухкомпонентного стекла $\text{PbO} \square \text{n SiO}_2$ с весовым соотношением проводящей фазы к стеклу 50:50.

Результаты измерений представлены на рисунке 17. Как следует из представленного, зависимость т-э.д.с. керметных слоёв в интервале невысоких температур ($20-120^{\circ}\text{C}$) имеет линейный характер для всех исследованных систем. Для этого интервала были рассчитаны значения коэффициента т-э.д.с.. Расчёт производился по формуле $\alpha = \frac{dE}{dT}$ [10].

Результаты сведены в таблице 5.

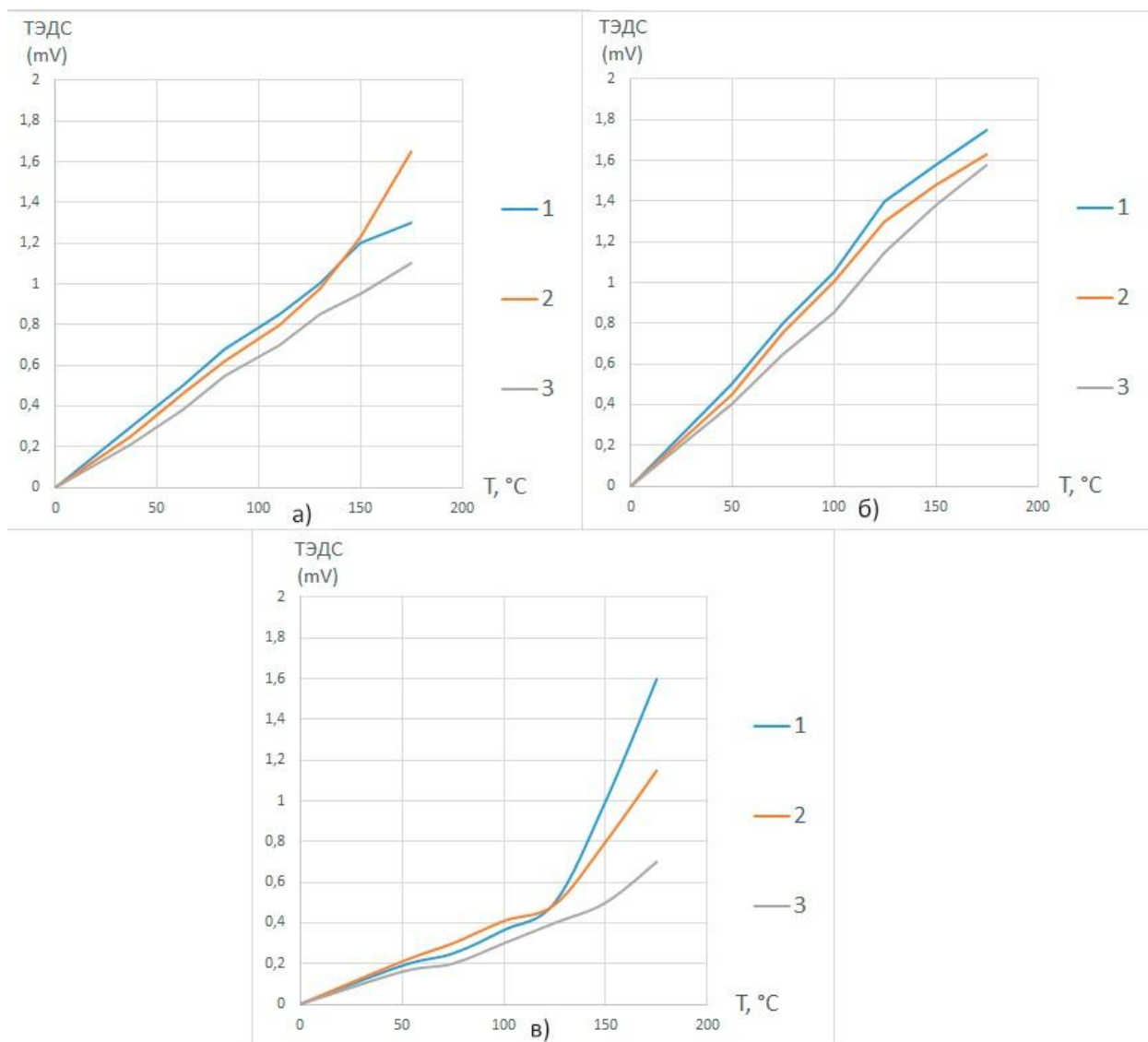


1- образец; 2: основание; 3 – шток; 4 – электроды; 5 – нагревательный элемент; 6 – кронштейн; 7 – пружина.

Рисунок 16 – Общий вид установки:

Таблица 5 – Значения коэффициента т-э.д.с. (α) резистивных плёнок.Опорная паста α , мкВ/град

Опорная паста		α , мкВ/град	
100 Ом/□		8,5	
10 кОм/□		8,2	
500 кОм/□		6,5	
Проводящая фаза (ПФ)	Стекло (С)	Состав композиции ПФ:С, %	α , мкВ/град
Рутенит свинца	Двухкомпонентное ($PbO \cdot nSiO_2$)	50:50	8,4
-“-	-“-	40:60	9,2
-“-	-“-	30:70	9,6
Рутенит висмута	279	50:50	3,4
-“-	<i>Ru</i> -34	50:50	4,5
-“-	Двухкомпонентное ($PbO \cdot nSiO_2$)	50:50	4,1



- а) опорные пасты: 1 – 100 Ом/□, 2 – 10 кОм/□, 3 – 500 кОм/□;
 б) рутенит свинца, стекло ($\text{PbO} \square \text{nSiO}_2$) с соотношением: 1 – 30:70, 2 – 40:60, 3 – 50:50; в) рутенит висмута, стекла: 1 – 279, 2 – $\text{Ru} - 34$, 3 – ($\text{PbO} \square \text{nSiO}_2$) с соотношением 50:50.

Рисунок 17 – Зависимость ТЭДС керметных слоёв от градиента температур

Величина (α - определяется, очевидно, материалом проводящей фазы, так как для двух композиций с одинаковым (50 %) содержанием двухкомпонентного стекла, но с различной проводящей фазой (рутенитом свинца и рутенитом висмута) получены значения 8,4 и 4,1 мкВ/град соответственно.

Если же сравнить значение α для серий составов на основе рутенита свинца и рутенита висмута, то можно отметить, что внутри каждой серии, отличающейся или количеством стекла, или типом стекла, разброс значений α небольшой.

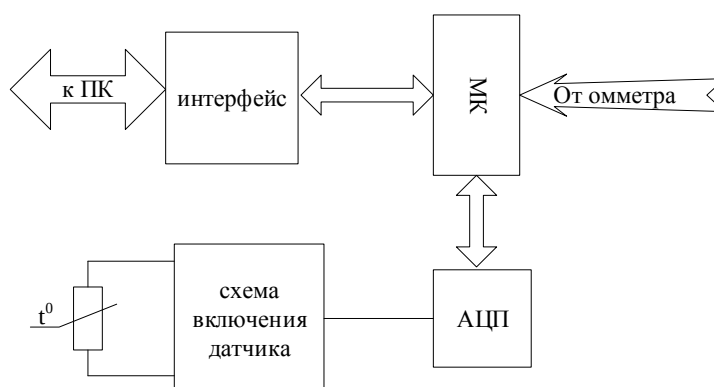
Незначительное влияние стекла проявляется в некотором увеличении α с ростом содержания стекла в резистивной плёнке на основе рутенита свинца, а также некотором изменении α при замене стекла в плёнке на основе рутенита висмута.

Небольшие положительные значения коэффициента т-э.д.с. говорят о том, что проводимость в керметных системах на основе рутения (в исследованном интервале температур) преимущественно *P*-типа и близка к проводимости в металлах [11].

4.4 Средства автоматизации измерения ТКС

Для автоматизации процесса измерения ТКС предлагается использование блока комбинированного измерительного (БКИ), который предназначен для интеграции стандартных измерительных устройств в единую систему. Основная задача БКИ – сбор данных от компаратора и датчика температуры, а также их передача на компьютер.

Структурная схема БКИ представлена на рисунке 18.



МК – Микроконтроллер, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

Рисунок 18 – структурная схема блока сопряжения

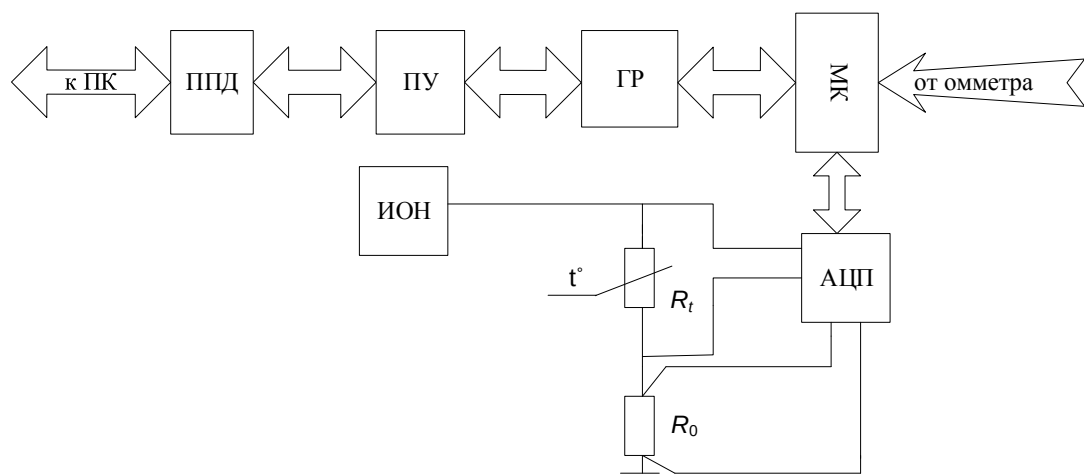
Схема работает следующим образом: микроконтроллер (МК)

осуществляет чтение данных с шин омметра, которые затем отправляются в компьютер. Кроме того, МК управляет АЦП. АЦП преобразует аналоговые показания в цифровые данные, которые затем считывает МК и передает в компьютер. Поскольку используется резистивный датчик температуры, необходимо обеспечить ему постоянный ток, чтобы преобразовать сопротивление в напряжение. Это преобразование осуществляется схемой, включенной в датчик.

Для корректной работы системы требуется интерфейс, который преобразует уровень сигнала для совместимости с стандартным уровнем напряжения выбранного протокола.

Элемент связи выполняет роль автономного устройства, которое предназначено для получения данных о результатах измерений от омметра и их дальнейшего отправления в компьютер через последовательный интерфейс RS232. Кроме того, данный узел включает в себя функцию измерения температуры, осуществляемую с использованием подключаемого датчика температуры ТСП-100, после чего информация о температуре также отправляется в компьютер.

Функциональная схема детализирует особенности реализации отдельных узлов устройства. Функциональная схема блока сопряжения представлена на рисунке 19.



И

ОН – источник опорного напряжения.

Рисунок 19 – функциональная схема блока сопряжения

В качестве универсального стандарта для передачи данных измерения в компьютер был выбран *USB*-протокол. Учитывая, что в контроллерах на основе ядра *C-51* предусмотрен внутренний интерфейс *RS232*, который является наиболее распространенным и легко встраиваемым, мы используем стандартный переходник протоколов данных *USB-RS232*. Для коррекции уровней сигналов -10 В и $+5\text{ В}$ применяется уровень-преобразователь (УП). Чтобы предотвратить изменения напряжения по сигнальным линиям, которые могут привести к перегоранию микросхем как ПК, так и блока сопряжения, в системе предусмотрен гальванический разъем (ГД). Схема подключения датчика представляет собой логарифмическую схему, где ток определяется на основе двух напряжений (измеряемого и опорного). Так как в процессе преобразования, происходящем в используемом дельта-сигма АЦП, учитывается соотношение напряжений, это гарантирует, что ток будет учтен и колебания опорного напряжения не окажут влияние на точность преобразования.

Для точного определения температуры применяются терморезисторы, изготовленные из сплавов с высокой температурной стабильностью коэффициента температурного сопротивления и линейным характером изменения сопротивления с увеличением температуры. Ключевым материалом для изготовления таких сенсоров является платина.

В пределах температур от нуля до 650°C Цельсия сопротивление платиновых терморезисторов описывается следующим соотношением:

$$R_\theta = R_0(1 + A\theta + B\theta^2), \quad (6)$$

где R_0 – сопротивление при 0°C ; θ – температура, $^\circ\text{C}$.

Для платиновой проволоки с коэффициентом $R_{100}/R_0=1,385$ коэффициенты A и B равны $3,90784 \cdot 10^{-3}\text{ К}^{-1}$ и $5,7841 \cdot 10^{-7}\text{ К}^{-2}$ соответственно. В температурном диапазоне от нуля до минус 200°C Цельсия зависимость сопротивления платины от температуры выражается следующим образом:

$$R_\theta = R_0(1 + A\theta + B\theta + C(\theta - 100)\theta^3), \quad (7)$$

где $C = -4,482 \cdot 10^{-12} \text{K}^{-4}$.

Промышленные платиновые термометры, соответствующие стандарту ГОСТ 6651-78, применяются для измерения температур от минус 260 до плюс 1100 градусов Цельсия. Градуировочные характеристики терморезистивного датчика ТСП-100 представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Градуировочные характеристики терморезистивного датчика ТСП-100

температура	-260	-200	-150	-100	-50	-20	0
сопротивление	0,406	17,307	38,799	59,621	79,983	92,032	100,000
температура	20	40	60	80	100	150	200
сопротивление	107,919	115,791	123,613	131,388	139,113	158,221	177,033
температура	300	400	500	600	700	750	800
сопротивление	213,779	249,358	283,760	316,960	348,931	364,470	379,719
температура	850	900	950	1000	1050	1100	-
сопротивление	394,672	409,333	423,699	437,776	451,555	465,052	-

Фрагмент принципиальной схемы иллюстрирующий подключение датчика температуры к АЦП представлен на рисунке 20.

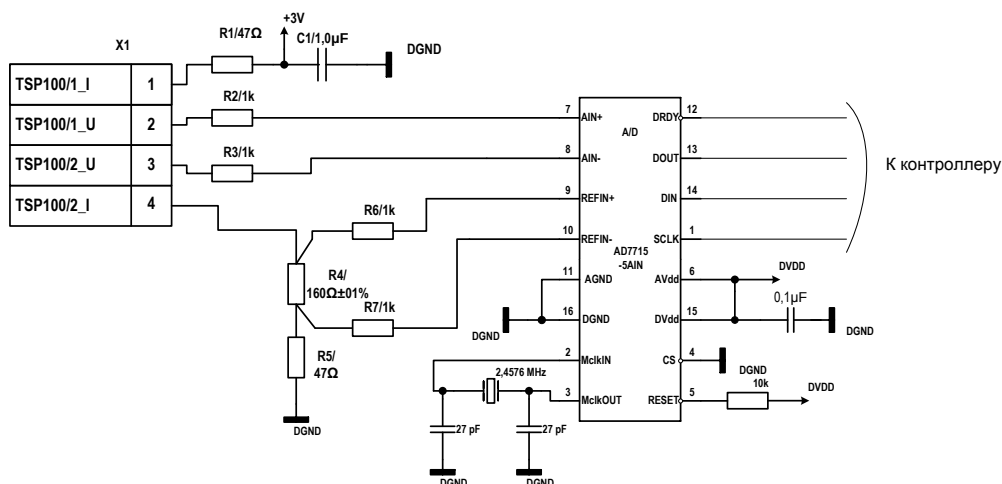


Рисунок 20 – структура измерительной части установки

В качестве микроконтроллера на котором реализована система использован восьмиразрядный высокопроизводительный однокристальный микроконтроллер фирмы *Atmel* – *AT89C52ED2*.

В состав микроконтроллера входят:

8 - разрядный микропроцессор;

8 Кбайтная электрически стираемая и программируемая, используемая только для чтения энергонезависимая *Flash* память;

- 256 - байтное оперативное запоминающее устройство ОЗУ;
- 32 программируемые линии ввода / вывода;
- три 16 - разрядных таймера / счетчика;
- система прерываний из 8 видов;
- программируемый дуплексный последовательный интерфейс;
- тактовый генератор;
- 32 регистра общего назначения;
- набор специальных функциональных регистров (*SFR*).
- Микроконтроллер полностью совместим со стандартом *MCS-51*.

Контроллер состоит из следующих основных блоков функции:

- блока управления;
- арифметические логические устройства;
- блок таймера / счетчика;
- блок последовательного интерфейса и прерываний;
- канал ввода / вывода;
- программные счетчики;
- память данных ОЗУ;
- памяти программ *Flash*.

Обмен информацией двухсторонний между функциональными единицами выполняется с помощью соединения данных 8 бит.

Блок управления предназначен для получения синхронизации и управления сигналами, обеспечивающих координацию совместной работы блоков микроконтроллера во всех допускаемых режимах его работы.

Арифметические логические устройства (АЛУ) представляют собой параллельные 8 битов, обеспечивающие выполнения арифметических, логических операций и сдвига.

Таймеры / счетчики (Т/С) используется, чтобы найти внешние события, чтобы получить программное обеспечения, управляемые сроки.

В состав блока входят:

- два 16 - разрядных регистра Т/С0 и Т/С1;
- восьмиразрядный регистр режимов (*TMOD*);
- восьмиразрядный регистр управления (*TCON*).

Два 16 - разрядных регистра Т/С0 и Т/С1 выполняют функцию хранения содержимого счета. Каждый из них состоит из пары 8 разрядных регистров.

Код значения учета отправляется в регистры Т/С программно. В процессе учетной записи содержимое регистров Т/С меняется. Знак конца счета, как правило, является переполнение регистра Т/С, т.е. переход его содержимого из состояния "все единицы" в состояние "все нули".

Регистр режимов Т/С (*TMOD*) предназначен для приема и хранения кода, определяющего:

- один из 4-х возможных режимов работы каждого Т/С;
- работу в качестве таймеров или счетчиков;
- управление Т/С от внешнего вывода.

Регистр контроля (*TCON*) используется для приема и хранения кода слова.

Режим работы каждого Т/С определены в регистре *TMOD*. Блок последовательного интерфейса (порта) и прерываний (ПИП) предназначен для организации ввода - вывода последовательных поток информации и организации системы прерывания программ.

В состав блока ПИП входят:

- буфер ПИП;
- логика управления ПИП;
- регистр управления;
- буфер передатчика;
- буфер приемника;

- приемник/передатчик последовательного порта;
- регистр приоритетов прерываний;
- регистр разрешения прерываний.

Блок управления предназначен для выработки сигналов управления, предлагая четыре режима работы последовательного интерфейса, и организации прерывания программ.

Регистр управления (*SCON*) предназначен для приема и хранения кода 8 бита слова, управляющего последовательным интерфейсом.

Буфер передатчика предназначен для приема с информации ПИП параллельной информации и выдачи ее в виде последовательного потока символов на передатчик последовательного порта.

Буфер приемника, предназначенный для приема данных в виде последовательной передачи данных из последовательного порта, преобразования в параллельный вид, хранения и выдачи в параллельном виде на внутреннюю шину ПИП.

Буфер приемника и буфер передатчика имеют одинаковое имя *SBUF*. Если их использует *SBUF* как регистр источника, то обработка происходит к буферу приемника. Если команда использует *SBUF* как регистр назначения, то обработка происходит к буферу передатчика.

Приемник и передатчик последовательного порта используется для приема последовательного потока символов со входа последовательного порта, выделяемых данных и выдачи их в буфера приемника, а также для использования последовательных данных с буфера передатчика, улучшения их в последовательный поток символа и получение его на выходе последовательного порта.

Счетчик команд предназначен для формирования текущего адреса программной памяти.

Порты *P0*, *P1*, *P2*, *P3* являются ввода и выводами и используются для обеспечения обмена информацией микроконтроллера с внешними устройствами, образуя 32 линии ввода и вывода. Каждый из портов содержит

8 регистров, имеющий байтов и адресацию битов для установки или сброса битов с помощью программного обеспечения.

В дополнение работы в качестве портов ввода - вывода, линии портов могут выполнять несколько дополнительных функций. Так, например, один раз в число порта $P3.0$ (RxD) может быть вход порт и предназначен для ввода последовательных данных в приемник последовательного порта, а разряд $P3.1$ (TxD) – на выход последовательного порта и предназначен для вывода последовательных данных из передатчика последовательного порта.

Последовательный порт может быть использован в виде смещения записи для расширения ввода - вывода или в качестве универсального асинхронного приема - передатчика (УАПП) с фиксированной или переменной скоростью последовательного обмена и возможностью дуплексного включения (т.е. через последовательный порт можно принимать и передавать данные одновременно). Последовательный порт может принимать очередной байт даже если уже принятый до этого байт не был прочитан из регистра приемника. Если до окончания приема находящийся в регистре приемника байт не будет прочитан, принятый байт теряется.

Последовательный порт может использоваться в 4-х режимах.

Режим 0. Информация передается и принимается через вход приемника RxD . Через выход передатчика TxD выдаются импульсы синхронизации, стробирующие каждый передаваемый или принимаемый бит информации. Формат послылки - 8 бит. Частота приема или передачи - $fBQ/12$, где fBQ - тактовая частота микроконтроллера.

Режим 1. Информация передается через выход передатчика TxD , а принимается через вход приемника RxD . Формат послылки - 10 бит: старт - бит (ноль), восемь бит данных, и стоп - бит (единица). Частота приема и передачи задается $T/C1$.

Режим 2. Информация передается через выход передатчика TxD , а принимается через вход приемника RxD . Формат послылки - 11 бит: старт - бит (ноль), восемь бит данных, программируемый девятый бит (контроль

четности) и стоп - бит (единица). Частота приема и передачи задается программно и может быть равна $fBQ/32$ или $fBQ/64$.

Режим 3. Полностью идентичен режиму 2 за исключением частоты приема и передачи, которая задается $T/C1$.

Память предназначена для приема, хранения и выдачи информации, использованной в процессе выполнения программы. Объем памяти - 256 байт. Память программ (*Flash*) предназначена для хранения программ и имеет объем 8 Кбайт. Описание 16 битного сигма-дельта АЦП AD7715.

Существует класс АЦП, использующих сигма-дельта (*SD*) преобразование, обладающее рядом преимуществ. Сигма-дельта АЦП выпускаются многими фирмами, среди которых ведущее место занимает *Analog Devices*.

В современных сигма-дельта АЦП преобразование используется с избыточной дискретизацией (передискретизацией), цифровой фильтрацией и децимацией преобразуемого сигнала. Сигма-дельта модулятор и квантование частоты. Сигма-дельта модулятор является преобразователем аналогового сигнала в частотно-модулированную последовательность отсчетов, синхронизированную тактовыми импульсами. Основой сигма-дельта модулятора является ЧИМ модулятор с непрерывным интегрированием и уравниванием заряда, но без цепи тактовых импульсов.

Частота следования импульсов ЧИМ модулятора

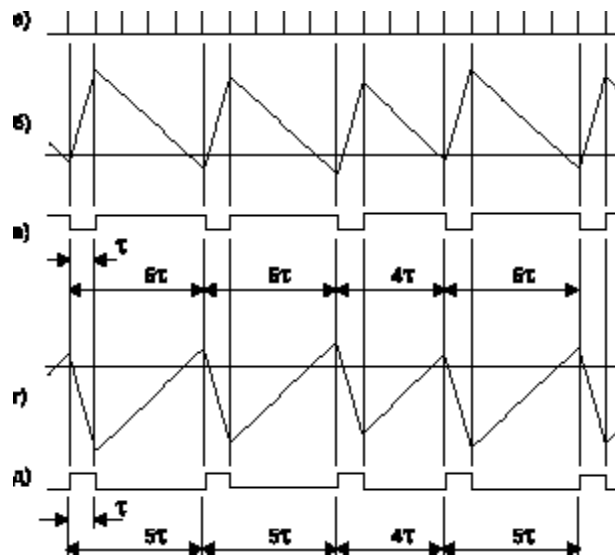
$$f_{\text{мод}}(t_i) = K_{\text{мод}} i_{\text{вх}} t_i = [i_{\text{вх}}(t_i)/I]/t, \quad (8)$$

где $K_{\text{мод}} = 1/S_I$ — коэффициент преобразования, а $f_{\text{мод}}(t_i)$ и $i_{\text{вх}}(t_i)$ — мгновенные значения частоты и тока в дискретных точках t_i , определяемых временным положением импульсов модулятора.

Процесс формирования последовательностей импульсов сигма-дельта модулятора показан на рисунке 21.

На рисунках 21 б, г также обозначены уровни сравнения. В отличие от компараторного импульсно-кодовой модуляции, генераторы импульсов в сигма-дельта модуляторе активируются после того, как компаратор

отработал при подаче следующего тактирующего импульса. На рисунке 21 г, д первые два интервала напряжения интегратора соответствуют времени $5t$.



а – тактовые импульсы; б, в – напряжение интегратора и выходная последовательность импульсов при $i_{\text{вх}} = (11/14)I > I/2$; г, д – напряжение интегратора и выходная последовательность импульсов при $i_{\text{вх}} = (3/14)I < I/2$.

Рисунок 21 – процесс формирования последовательностей импульсов сигма-дельта модулятора

В пределах до половины верхней границы используемого частотного спектра ($f_d/2$) допустимо применение удвоенного дискретизационного шага, равного Kf_d . Вместо исходного f_d следует применять Kf_d . Это приводит к увеличению частотного диапазона в K раз, что обеспечивает почти равномерное распределение частот на промежутке до $f_d/2$. Уровень этой равномерности зависит от выбранного значения K . После преобразования, для предотвращения избыточного расширения частотного спектра, необходимо применить цифровой фильтр на выходе с децимацией отсчетов.

Выше мы рассмотрели модулятор сигма-дельта первого порядка. Чтобы улучшить точность преобразования в АЦП, применяются модуляторы более высоких порядков. Они характеризуются усиленным шумом квантования за пределами диапазона полезного сигнала, что ведет к снижению общего уровня шума. Важно помнить, что модуляторы с высоким

порядком имеют асимметричную частотную характеристику, которая зависит от времени интеграции элементов интегратора, входящих в их состав. Сигма-дельта модуляторы второго и более высокого порядка описываются системой дифференциальных уравнений:

$$t_1 f_{\text{мод}}(t) + f_{\text{мод}}(t) = K_{\text{мод}} i_{\text{вх}}(t),$$

$$(t_{n-1} \dots t_1) f_{\text{мод}}(n-1)(t) + \dots + t_{n-1} f_{\text{мод}}(t) + t_{\text{мод}}(t) = K_{\text{мод}} i_{\text{вх}}(t), \quad (9)$$

где $f_{\text{мод}}(t)$ – непрерывная функция частоты, представляемая как результат интерполяции дискретных значений $f_{\text{мод.ср}}(Dt_j)$, а $t_{n-1}, \dots, t_1$ – постоянные времени дополнительных интеграторов, включенных в модуляторе в перечисленной последовательности номеров, $(t_{n-1} \dots t_1)$ – их произведение.

Представленные здесь уравнения являются аналогом дифференциальных уравнений, характерных для полиномиальных фильтров с импульсной характеристикой, что позволяет применять к модуляторам теорию, разработанную для данных фильтров. К примеру, модуляторы третьего порядка, которые определяются с помощью фильтра второго порядка, обладают характерной частотой ω_0 , равной $1/\omega(t_1 t_2)$, и добротностью Q , равной $\omega(t_1/t_2)$. При установлении Q на уровень $1/\omega^3$ и $1/\omega^2$ можно достичь аппроксимации по Бесселю и Баттерворту соответственно. Чтобы минимизировать частотные искажения, вызванные такой фильтрацией, необходимо подобрать оптимальные значения ω_0 и Q .

Сигнал, выходящий из сигма-дельта модулятора, представляет собой частотно модулированный сигнал, который подвергся квантованию и содержит шум квантования, который сглаживает частоту модуляции, делая ее пропорциональной входному аналоговому сигналу. Чем выше разрешение квантования, тем более точно происходит усреднение. Полоса частот модулятора простирается от нуля до $f_t(2N-1)/2N$. Максимальная амплитуда шумовой манипуляции, равная $f_t/6$, наблюдается в центре частотного диапазона модулятора, от $f_t/3$ до $2f_t/3$, в то время как максимальная частота

шумовой манипуляции, равная $f_T/5$, достигается на частотах $2f_T/5$ и $3f_T/5$.

Далее происходит цифровое преобразование с частотой дискретизации f_d , равным $f_T/2N$, приводящее к уменьшению амплитуды сигнала в его высокочастотной части из-за фильтрующих свойств преобразования. Дополнительная дискретизация, сочетаемая с цифровой фильтрацией и децимацией, способствует уравниванию частотной характеристики преобразования.

Модуляторы сигма-дельта высших порядков демонстрируют характеристики, аналогичные полиномиальным фильтрам нижних частот, что сужает круг требований к их спектральным характеристикам.

AD7715 – это 16-битный АЦП с сигма-дельта модуляцией, потребляющий 450 мкА и работающий на напряжение 3/5 В. Основные преимущества устройства:

- АЦП с сбалансированной накачкой, обеспечивающий 16-битное разрешение;
- Коэффициент нелинейности не более 0.0015 %;
- Гибкое настраивание усиления, охватывающее значения от 1 до 128;
- Встроенный интерфейс, совместимый с *SPI*, *QSPI*, *MICROWIRE* и *DSP*;
- Опция буферизации аналогового сигнала;
- Работа на однополярном питании 3 В (AD7715-3) или 5 В (AD7715-5);
- Экономия энергии – потребляет 450 мкА при 3 В;
- Возможность использования корпусов *DIP*, *SOIC* и *TSSOP* с 16 выводами;

Схема функционирования АЦП представлена на рисунке 22.

AD7715 – это интегрированный модуль, предназначенный для решения задач измерения на низких частотах. Этот модуль с тремя каналами может быть непосредственно подсоединен к источнику сигнала и осуществляет его преобразование в цифровой формат. Используемый в нем сигма-дельта АЦП с разрешением 16 бит обеспечивает полное покрытие кодового пространства

без утечек. Входной сигнал направляется на усилитель с регулируемым коэффициентом усиления, а затем на аналоговый модулятор. Далее сигнал проходит через внутренний цифровой фильтр, где возможно перенос предыдущего состояния фильтра из управляющего регистра, что дает возможность настройки порога фильтрации и частоты обновления. Конфигурация выводов модуля *AD7715* описана на рисунке 23.

Модуль *AD7715* оснащен дифференциальными аналоговыми входами и опорным входом. Он функционирует при использовании однополярного источника питания напряжением 3 В или 5 В.

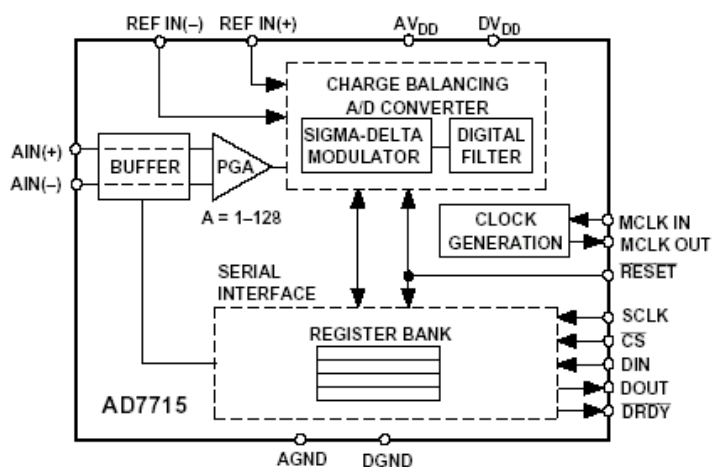


Рисунок 22 – функциональная схема АЦП

Устройство оснащено динамическим диапазоном от 0 до 20 мВ, от 0 до 80 мВ, от 0 до 1,25 В и от 0 до 2,5 В, а также двухполярными диапазонами от -20 мВ до +20 мВ, от -80 мВ до +80 мВ, от -1,25 В до +1,25 В и от -2,5 В до +2,5 В.

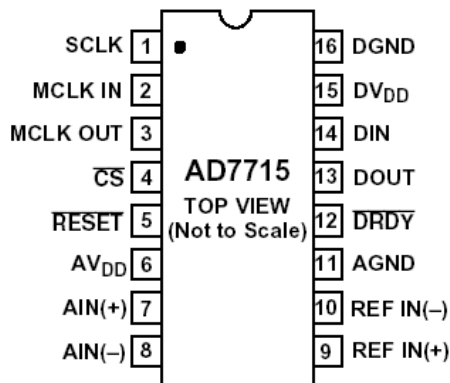


Рисунок 23 – расположение выводов

AD7715 является отличным выбором для применения в компактных системах с микроконтроллерами или *DSP*. Он оснащен универсальным последовательным интерфейсом с тремя выводами, позволяющим настраивать коэффициент усиления, направление сигнала и частоту снятия. Устройство оснащено внутренней калибровкой и системой градуировки, что исключает возможные ошибки усиления и смещения.

Производство устройства на основе КМОП-технологии обеспечивает низкое энергопотребление – типичное потребление в рабочем режиме составляет всего 50 мкВт. Корпусы устройства доступны в вариантах с 16 выводами: *DIP* размером 0,3 дюйма, *SOIC* и *TSSOP*.

Для поддержки интерфейса RS-232 рекомендуется использовать микросхему *ADM232*.

Серия *ADM222*, *ADM232A* и *ADM242* представляет собой линейку высокоскоростных модулей управления RS-232, способных работать со скоростями до 200 кбит/с. Эти устройства оснащены инновационной схемой зарядки, которая позволяет генерировать биполярные уровни RS-232 при использовании единственного источника питания +5 В и небольших внешних конденсаторов (0,1 мкФ). Каждый из элементов семейства включает в себя по два модуля управления RS-232 и два модуля приема RS-232.

На рисунке 24 демонстрируется условное графическое представление и схема устройства *ADM232A*.

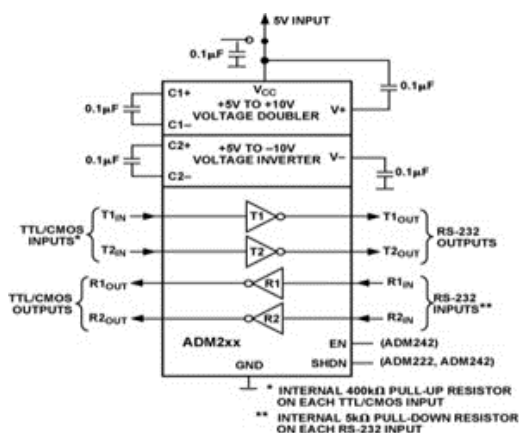


Рисунок 24 – условно-графическое изображение *ADM232* и его принципиальная схема

Производство этих компонентов осуществляется на основе передового метода *BiCMOS*, который сочетает в себе энергосберегающие КМОП-транзисторы с высокопроизводительными биполярными транзисторами. Этот подход обеспечивает работу на скоростях до 200 кбит/С при одновременном снижении энергопотребления до значения менее 5 мА.

ADM232A – это высокоскоростной аналог для замены *AD232* и *ADM232L*, отличающийся полной совместимостью выводов. Он доступен в корпусах *DIP* с 16 выводами, а также в вариантах с широкими и узкими корпусами *SOIC*. Данный компонент оснащен встроенными преобразователями, которые увеличивают входное напряжение +5 В до требуемого для *RS-232* +10 В. *AD232A* обеспечивает скорость передачи данных 20 Кбит/С, соответствуя стандартам *EIA/TIA – 232C* и *CCITT V.28*.

5 Безопасность жизнедеятельности при работе с компьютером

5.1 Требования к помещениям для работы с компьютером

Использование персональных электронно-вычислительных машин (ПЭВМ) в помещениях с отсутствием естественного освещения разрешается при наличии расчётов, доказывающих удовлетворение нормам естественного освещения и отсутствие опасности для здоровья работников.

Необходимо, чтобы и искусственное, и естественное освещение соответствовали требованиям текущей нормативной документации. Окна в комнатах, где используются ПЭВМ должны быть ориентированы преимущественно на север и северо-восток.

На оконных проёмах должны быть регулируемые устройства типа: занавеси, жалюзи, внешние козырьки и другие.

Размещение мест для работы с ПЭВМ в образовательных и культурно-развлекательных организациях для детей в цокольных помещениях и подвалах не допускается.

На одно пользовательское место ПЭВМ с видеодисплейным терминалом (ВДТ) на основе электронно-лучевой трубки должна выделяться площадь не меньше 6 м^2 , если ВДТ на базе плоского дискретного экрана, то, выделяемая, площадь должна быть не менее $4,5 \text{ м}^2$

При использовании ПЭВМ с ВДТ в основе ЭЛТ, соответствующих условиям международных норм безопасности компьютеров, с длительностью работы меньше 4 часов в день разрешается использовать минимальную площадь $4,5 \text{ м}^2$ на одно рабочее место.

При отделке комнат должны применяться материалы с коэффициентами отражения – 0,7 - 0,8 для потолка; 0,3 - 0,5 – для пола; 0,5 - 0,6 – для стен.

Для внутренней отделки комнат с ПЭВМ могут применяться полимерные материалы при наличии санитарно-эпидемиологического решения.

Помещение, в котором располагаются трудовые зоны с ПЭВМ необходимо оборудовать защитным заземлением в строгом соответствии с условиями эксплуатации.

Не следует располагать рабочие места с компьютерами поблизости к силовым кабелям и вводам, трансформаторам высокого напряжения, технологическому оборудованию, создающему помехи в работе.

5.2 Требования к уровням шума и вибрации на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ

Во время выполнения работ на ПЭВМ уровень шума не должен превышать максимально разрешённых значений, принятых для данных работ в согласовании с функционирующими санитарно-эпидемиологическими нормами.

Во всех помещениях образовательных и культурно-развлекательных организациях для детей и подростков, оборудованных рабочими местами с ПЭВМ, громкость шума не может подниматься выше допустимого уровня, принятого для общественных зданий и жилых помещений.

При исполнении работ с применением ПЭВМ в производственных помещениях степень вибрации не может превышать допустимых значений вибрации для рабочих мест в строгом соответствии с актуальными санитарно-эпидемиологическими нормами.

В зданиях всех типов образовательных и культурно-развлекательных учреждений, эксплуатирующих ПЭВМ, значение вибраций не должно быть выше максимума, разрешённого в связи с санитарно-эпидемиологическими нормативами.

Техника, производящая шумы, уровень которых выше максимально допустимого нормативами значения должна находиться за пределами помещения с ПЭВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данного исследования были изучены различные аспекты проводимости в резистивных материалах на основе толстых пленок различного состава и структуры. Экспериментальные данные, полученные в процессе исследования, позволяют сделать важные выводы, которые могут иметь значительное значение для улучшения производства и применения таких материалов в электронике и смежных областях.

Одним из ключевых результатов исследования является выявление влияния температурного режима обработки и содержания проводящей фазы на стабильность электрических характеристик резистивных пленок. Оптимально подобранный режим термообработки способствует повышению стабильности сопротивления при различных условиях эксплуатации, что является важным аспектом при производстве электронных компонентов.

Кроме того, исследование температурной зависимости сопротивления порошков проводящей фазы расширяет наши представления о механизмах переноса зарядов в сложных композиционных системах. Установлено, что усиление контакта между частицами при повышении температуры существенно влияет на электрические свойства материалов, что может быть ключевым при выборе материалов для конкретных приложений.

Наконец, исследование термоэлектродвижущей силы в резистивных пленках позволяет выявить различные механизмы проводимости, которые характерны как для металлов, так и для полупроводников. Эти результаты могут быть полезны при проектировании новых электронных устройств и материалов, а также при оптимизации их работы в различных условиях эксплуатации.

Таким образом, данное исследование представляет собой значимый вклад в развитие области материаловедения и электроники. Оно обогащает наши знания о проводимости в сложных композиционных системах и открывает новые перспективы для создания более эффективных и надежных

электронных устройств, что является важным шагом в развитии современных технологий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *"Introduction to Solid State Physics" by Charles Kittel.* Год издания: 2004. Издательство: Wiley. – 736 - с. ISBN: 9780471415268.
2. *"Principles of Electronic Materials and Devices" by Safa O. Kasap.* Год издания: 2005. Издательство: mcgraw-Hill Education. – 832 - с. ISBN: 9780072957914.
3. Методы измерения термо-ЭДС Крудю А.В., Доросинский А.Ю., Недорезов В.Г., Розен А.Е. Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2019. Т. 1. С. 297-299.
4. *"Electronic Properties of Materials" by Rolf E. Hummel.* Год издания: 2011. Издательство: Springer. - 488- с.
5. Особенности изготовления металлокерамических резистивных элементов Доросинский А.Ю., Недорезов В.Г. Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2018. Т. 2. С. 230-231.
6. Исследования возможности использования различных методов неразрушающего контроля качества резисторов Доросинский А.Ю., Недорезов В.Г., Виньчаков А.Н., Березин М.Н. Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2019. Т. 1. С. 211-214.
7. Способы улучшения механических характеристик резистивных элементов и методы их расчета Доросинский А.Ю., Данилова Е.А., Герасимов О.Н., Лысенко А.В., Кузина Е.А. Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1 (21). С. 84-92.
8. Расчет линейности резистивных элементов доросинский А.Ю. Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2020. Т. 1. С. 284.
9. Расчет линейности резистивных элементов Доросинский А.Ю. Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2020. Т. 1. С. 284.

10. Оценка теплофизических свойств резистивных материалов
доросинский А.Ю. Труды международного симпозиума "Надежность и
качество". 2018. Т. 2. С. 231-232.

11. *"Thermoelectric Nanomaterials" edited by Mercouri G. Kanatzidis.* Год
издания: 2013. Издательство: Wiley-VCH. – 1008- с. ISBN: 9783527332397.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)
Задание на ВКР

«Утверждаю»
Заведующий кафедрой НиМЭ
Пронин И.А.
(фамилия, инициалы)
« 22 » мая 2024 г.

З А Д А Н И Е
на магистерскую диссертацию

1. Студент гр. 22ПДм1 факультета информационных технологий и электроники

Направление подготовки 11.04.04. «Электроника и наноэлектроника»

Магистерская программа Нано- и микроэлектроника

Россеёв Владислав Александрович

(фамилия, имя, отчество)

2. Руководитель Доросинский Антон Юрьевич

(фамилия, имя, отчество)

3. Тема магистерской работы Повышение стабильности керметных резистивных композиций

Тема утверждена приказом ПГУ № 1059/0 от « 30 » ноября 2022 г.

4. Техническое задание на магистерскую работу (вид работы: разработка, проектирование, исследование, и т.д.; назначение; основные параметры; условия функционирования и т.д.)

В работе необходимо выполнить ряд исследований, направленных на повышение стабильности керметных резистивных композиций, для более точного и надежного функционирования электронных схем.

Необходимо провести поиск путей увеличения стабильности величины сопротивления под электрической нагрузкой и исследовать зависимости электрических параметров паст от технологических факторов

5. Объем и содержание основной части магистерской работы

5.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, обоснований, описаний, расчетов и т.д.)

1 Резистивные композиционные материалы

1.1 Проводящие и резистивные композиционные материалы

1.2 Стабильность резисторов в условиях эксплуатации

1.3 Подложки толстоплёночных микросхем

1.4 Основные свойства резистивных плёнок

2 Влияние технологических факторов на электрические характеристики резистивных плёнок

2.1 Влияние температуры обжига

2.2 Влияние дисперсности материалов проводящей фазы и стекла

2.3 Влияние органической связки	
2.4 Влияние типа керамики	
3 Исследование зависимости разброса величины сопротивления от технологических факторов	
3.1 Распределение величин сопротивления	
3.2 Постановка эксперимента	
3.3 Действие нагрузки в нормальных условиях	
3.4 Действие электрической нагрузки для разных режимов обжига	
4 Исследование механизма проводимости в толстых плёнках на основе рутениевых композиций	
4.1 Исследование температурной зависимости сопротивления	
4.2 Исследование температурной зависимости сопротивления порошков проводящей фазы	
4.3 Исследование термоэдс резистивных пленок	
4.4 Средства автоматизации измерения ТКС	
5. Безопасность жизнедеятельности при работе с компьютером	
5.1 Требования к помещениям для работы с компьютером	
5.2 Требования к уровням шума и вибрации на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ	

5.2. Иллюстративная часть (перечень и содержание чертежей и слайдов презентации)

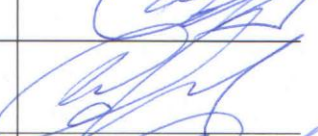
1. Состав композиционных резисторов	Слайд 1
2. Факторы, влияющие на стабильность композиционных резисторов	Слайд 2
3. Основные свойства резистивных пленок	Слайд 3
4. Формы толстопленочных резисторов и их подгонка	Слайд 4
4. Влияние температуры обжига	Слайд 5
5. Влияние дисперсности материалов проводящей фазы и стекла	Слайд 6
6. Влияние органической связки	Слайд 7
7. Влияние типа керамики	Слайд 8
8. Стабильность величины сопротивления в нормальных условиях	Слайд 9
9. Стабильность величины сопротивления под действием электрической нагрузки	Слайд 10
10. Исследование механизмов проводимости в толстых пленках	Слайд 11
11. Исследование термо-эдс резистивных пленок	Слайд 12

6. Консультанты и содержание дополнительных разделов

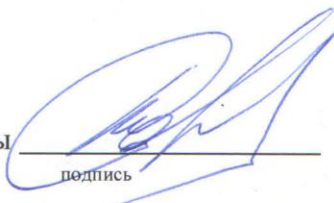
6.1. _____

Консультант Доросинский А.Ю.

7. Календарный график по выполнению бакалаврской работы

Наименование этапов работы	Объем работы	Срок выполнения	Подпись руководителя, консультанта
Обзор и анализ резистивных композиционных материалов	10%	23.05.2024	
Обзор толстоплёночной технологии производства	10%	25.05.2024	
Обзор и анализ способов повышения характеристик керметных композиций	10%	26.05.2024	
Планирование, постановка задачи и проведение эксперимента	20%	27.05.2024	
Графические работы	30%	30.05.2024	
Оформление пояснительной записки	20%	1.06.2024	

Руководитель магистерской работы


подпись

Доросинский А.Ю.

фамилия, инициалы

Дата выдачи задания

«22__» _____ мая _____ 2024 г.

Задание к исполнению принял


подпись

Россеев В.А.

фамилия, инициалы

«22__» _____ мая _____ 2024 г.

Магистерскую диссертацию к защите допустить

Декан факультета


подпись

Кревчик В.Д.

фамилия, инициалы

«10__» _____ 06 _____ 2024 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Заявление и протокол о проверке на антиплагиат

Ректору Пензенского
государственного университета
А.Д. Гулякову
студента 2 курса ФИТЕ
очной формы обучения
Россеева Владислава Александровича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Россеев Владислав Александрович, студент 2 курса очной формы обучения направления подготовки 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника, магистерская программа «Нано- и микроэлектроника», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат» магистерской диссертации на тему «Повышение стабильности керметных резистивных композиций», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования — программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления из университета.

Владислав
Подпись студента

17.06.24
дата

ВКР Предоставлена на проверку 17.06.24
дата

Руководитель ВКР А.Ю.Доросинский

Протокол

Проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной квалификационной работы на тему «Повышение стабильности керметных резистивных композиций»

студента 2 курса В.А. Россеева направления подготовки/специальности

11.04.04 Электроники и нанoeлектроника

Магистерской программы «Нано- и микроэлектроника»

Руководитель ВКР Доросинский А.Ю.



СПРАВКА

Пензенский государственный университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Россеев Владислав Александрович
Самодитирование
рассчитано для: Россеев Владислав Александрович
Название работы: Повышение стабильности керметных резистивных композиций
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЕ	30.14%	СОВПАДЕНИЕ	30.14%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	64.91%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	64.91%
ЦИТИРОВАНИЕ	4.95%	ЦИТИРОВАНИЕ	4.95%
САМОЦИТИРОВАНИЕ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЕ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 11.06.2024

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 11.06.2024 14:39

Структура
документа:
Модули поиска:

Проверенные разделы: библиография с.59-60, содержание с.2-3, основная часть с.1, 4-58

IEEE; Публикации РГБ; Патенты СССР, РФ, СНГ; Диссертации НББ; СПС ГАРАНТ: аналитика; Шаблоны фраз; СМИ России и СНГ; Цитирование; ИПС Адилет; Библиография; Коллекция НББ; Коллекция вузов; Перефразирование по коллекции IEEE; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Переводные заимствования; Публикации eLIBRARY; Медицина; Переводные заимствования по коллекции Интернет (EnRu); Сводная коллекция ЗБС; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирования); Переводные заимствования по коллекции Гарант; аналитика; Перефразирования по Интернету (EN); Переводные заимствования (RuEn); Перефразирования по Интернету; Переводные заимствования IEEE; Переводные заимствования по коллекции

Работу проверил: Головишкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи:

Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.

11.06.24
дата

А.Ю.Доросинский

СПРАВКА

Пензенский государственный университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Россеев Владислав Александрович
Самоцитирование
рассчитано для: Россеев Владислав Александрович
Название работы: Повышение стабильности керметных резистивных композиций
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ		30.14%	СОВПАДЕНИЯ		30.14%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ		64.91%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ		64.91%
ЦИТИРОВАНИЯ		4.95%	ЦИТИРОВАНИЯ		4.95%
САМОЦИТИРОВАНИЯ		0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ		0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 11.06.2024

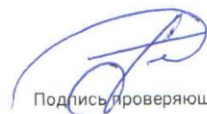
ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 11.06.2024 14:39

Структура документа: Проверенные разделы: библиография с.59-60, содержание с.2-3, основная часть с.1, 4-58
Модули поиска: IEEE; Публикации РГБ; Патенты СССР, РФ, СНГ; Диссертации НББ; СПС ГАРАНТ: аналитика; Шаблонные фразы; СМИ России и СНГ; Цитирование; ИПС Адилет; Библиография; Коллекция НБУ; Кольцо вузов; Перефразирования по коллекции IEEE; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Переводные заимствования*; Публикации eLIBRARY; Медицина; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Сводная коллекция ЭБС; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирования); Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Перефразирования по Интернету (EN); Переводные заимствования (RuEn); Перефразирования по Интернету; Переводные заимствования IEEE; Переводные заимствования по коллекции

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи: 11.06.24


Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Материал, иллюстрирующий результаты магистерской диссертации

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Пензенский государственный университет»
Кафедра «Нано- и микроэлектроника»

магистерская диссертация на тему:

Повышение стабильности керметных резистивных композиций

Руководитель:
к.т.н., доцент, генеральный директор ООО НПП «Сонар»
Доросинский А.Ю.
Выполнил:
Студент группы 22ПДм1 Россеев В.А.

Цель работы и решаемые задачи

Цель работы: исследование проводимости в резистивных материалах на основе толстых пленок различного состава и структуры, с целью выявления способов повышения стабильности.

Задачи:

- Оценка влияния технологических факторов на электрические характеристики резистивных плёнок;
- Анализ зависимости разброса величины сопротивления от технологических факторов;
- Исследование механизма проводимости в толстых плёнках на основе рутениевых композиций;
- Исследование температурной зависимости резистивных пленок.

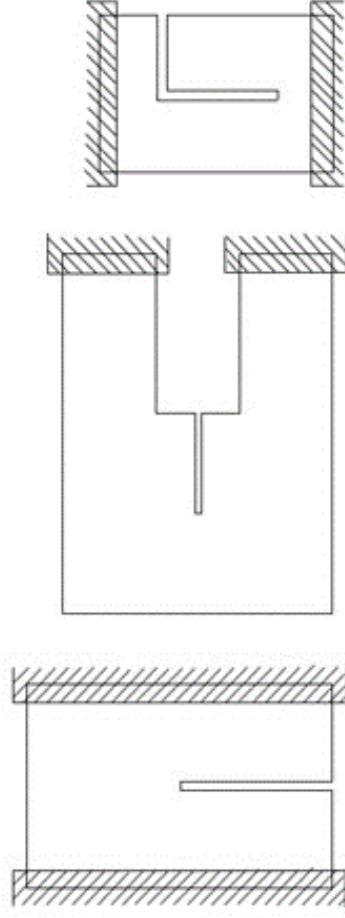
Основные преимущества керметной технологии

- Широкий диапазон номиналов сопротивлений.
- Высокая временная и температурная стабильность сопротивлений.
- Хороший электрический контакт с проводниковыми элементами микросхем.
- Температурная стабильность, характеризуемая температурным коэффициентом сопротивления (ТКС).

Эти свойства обеспечивают надежность и точность работы толстопленочных резистивных элементов в различных электронных схемах.

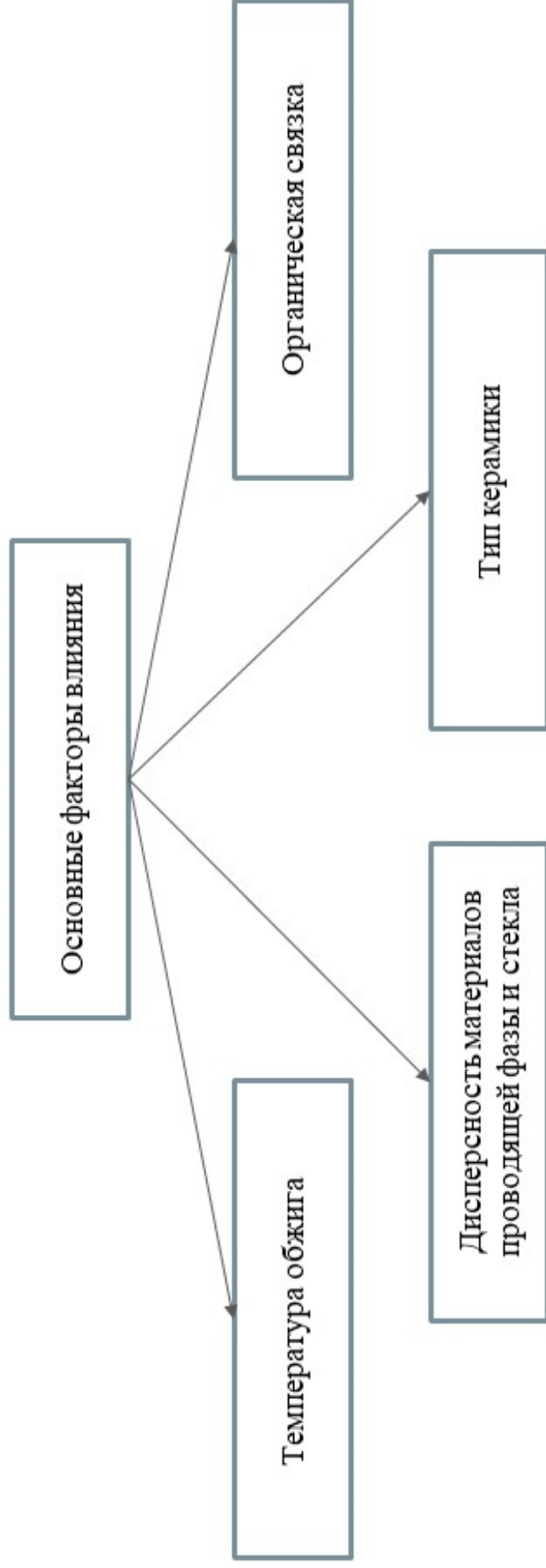
Формы толсто пленочных резисторов и способы их подгонки

Лазерная подгонка: Один из самых распространенных методов подгонки толсто пленочных резисторов — это лазерная корректировка. Лазер управляется компьютером и применяется к определенным участкам резистора, чтобы изменить его сопротивление. Лазерный луч микроскопически удаляет материал на поверхности резистора, изменяя его геометрию и, соответственно, сопротивление.

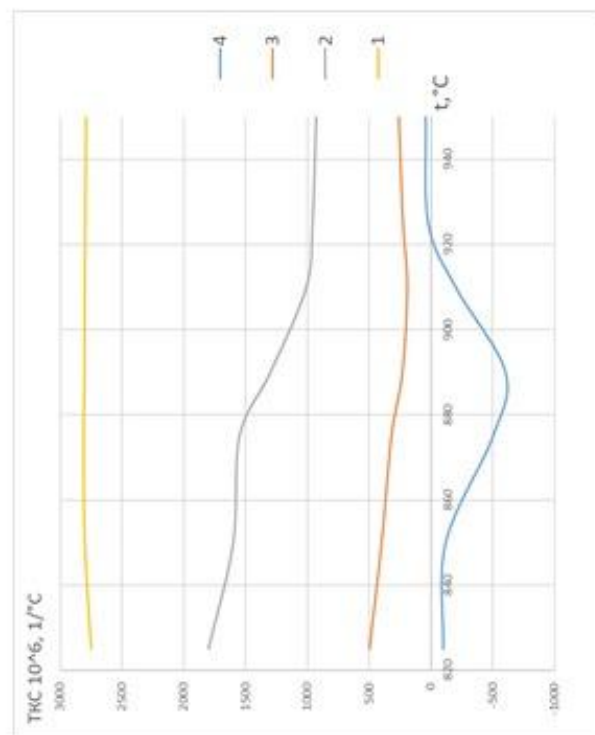


Механическая подгонка: В некоторых случаях подгонку можно выполнять механическими методами, например, с помощью точного абразивного инструмента, который аккуратно удаляет материал с поверхности резистора.

Факторы, влияющие на стабильность композиционных резисторов

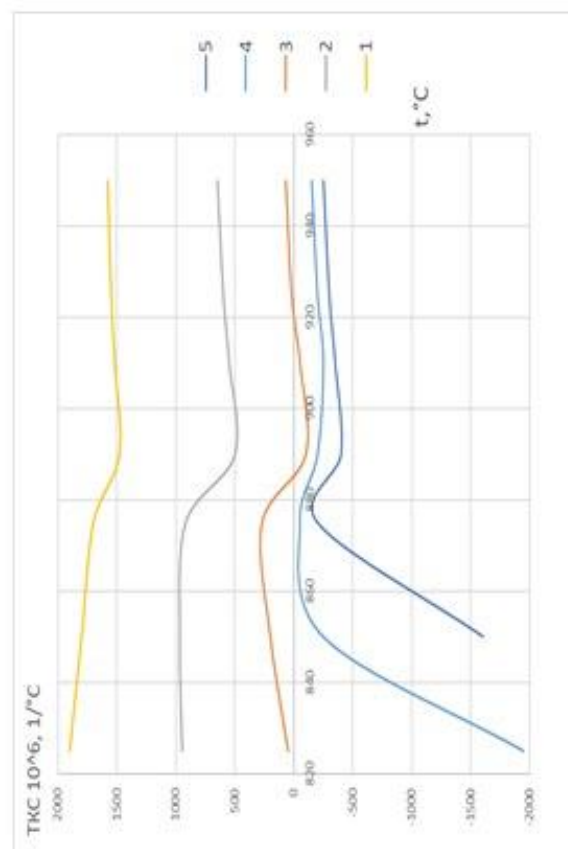


Влияние температуры обжига на ТКС



Содержание проводящей фазы: 1- 50 %; 2- 45 %; 3 - 35 %; 4 - 30 %

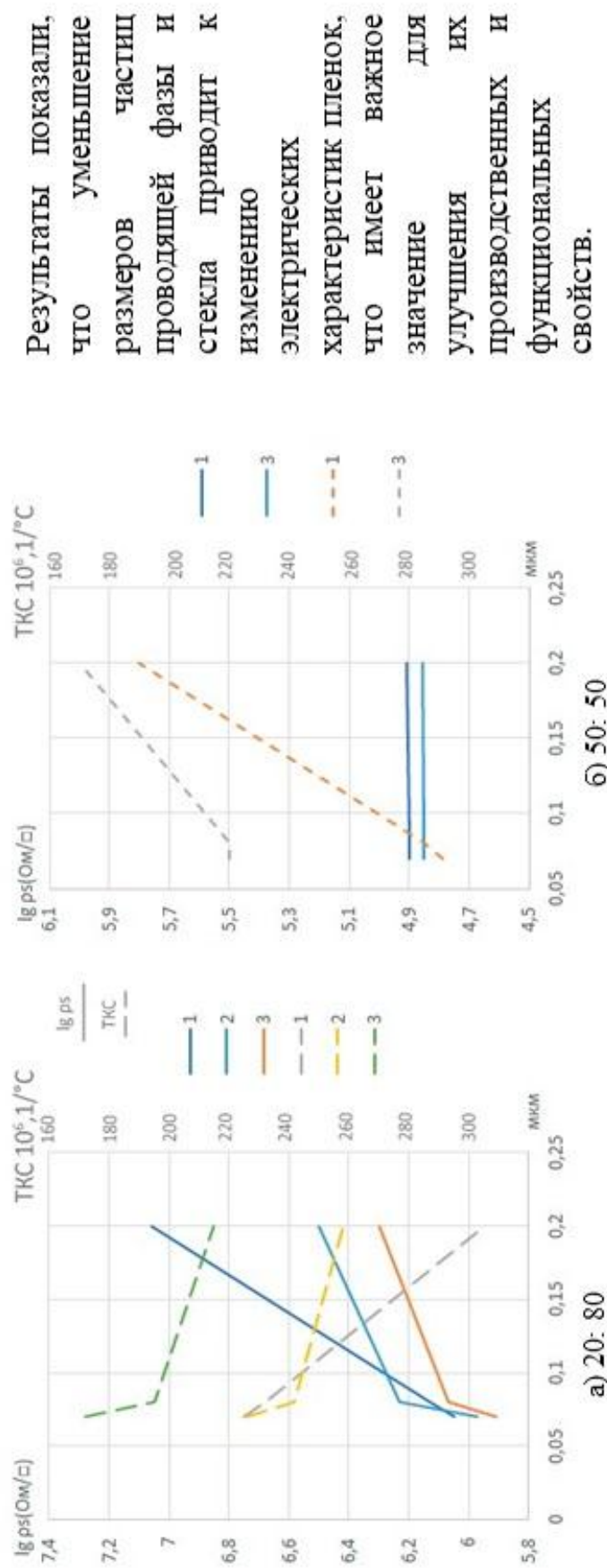
Зависимость величин от температуры обжига для композиций со стеклом 279



Содержание проводящей фазы: 1- 50 %; 2- 45 %; 3 - 35 %; 4 - 30 %; 5 - 25 %

Зависимость величин для композиций со стеклом R11 - 34

Влияние дисперсности материалов проводящей фазы и стекла



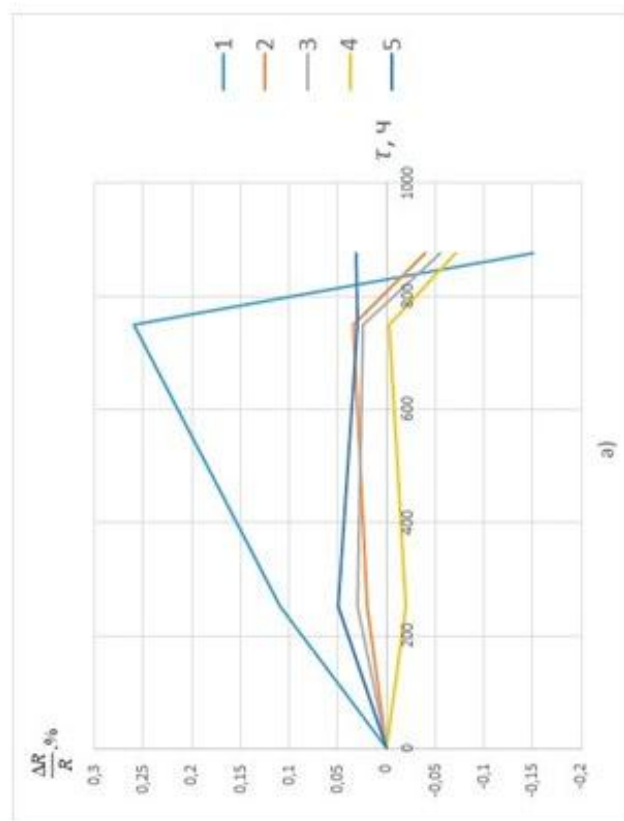
Зависимость величины сопротивления и ТКС от размера частиц проводящей фазы для соотношения фазы: стекло

1 – $d_{ст} \leq 1,5$ мкм; 2 – $d_{ст} \leq 3$ мкм; 3 – $d_{ст} \leq 5$ мкм

Значения сопротивления и ТКС резистивных элементов на основе керамики разных марок

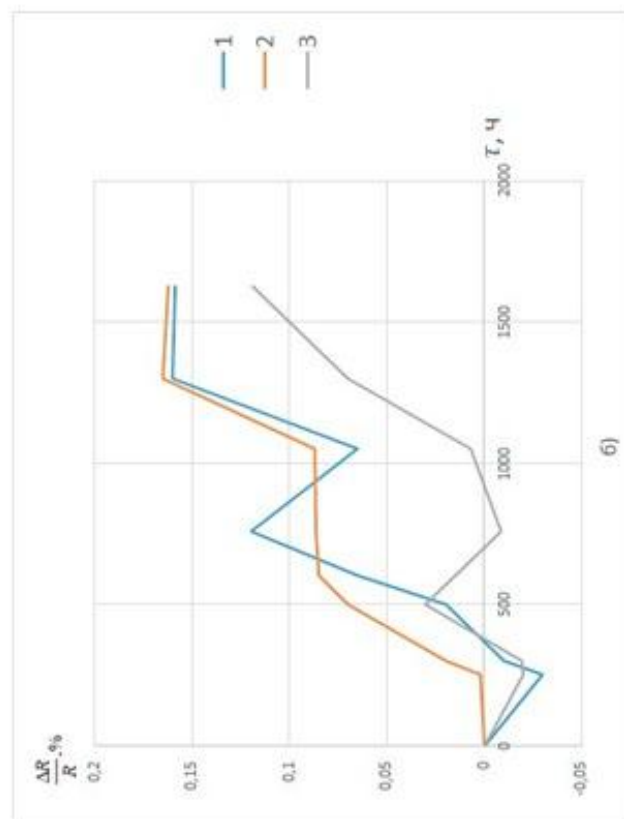
керамика	Образец пасты					
	10 Ом/□		1 кОм/□		500 кОм/□	
	R, Ом	ТКС10 ⁶ , I/°C	R, кОм	ТКС10 ⁶ , I/°C	R, МОм	ТКС10 ⁶ , I/°C
М7	37,8	+110	5,0	+36	2,3	-150
22ХС	20,6	+154	5,0	-40	1,0	-185
ГМ	24,2	+340	5,0	26	1,2	-133
Поликор	26,5	+320	5,9	0	1,4	-125

Стабильность величины сопротивления в нормальных условиях для разных режимов обжига



а) 500 КОМ/□;

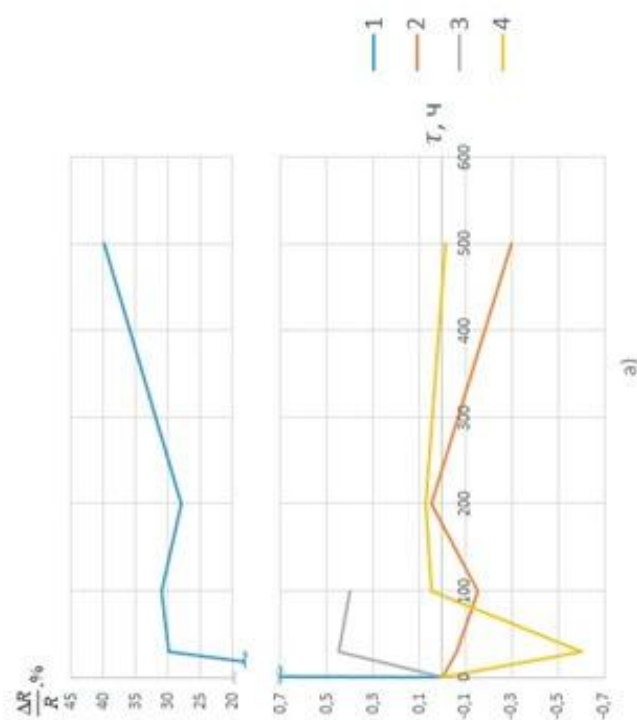
а) 1 - 880°C; 2 - 910°C; 3 - 910°C; 4 - 930°C; 5 - 950°C;



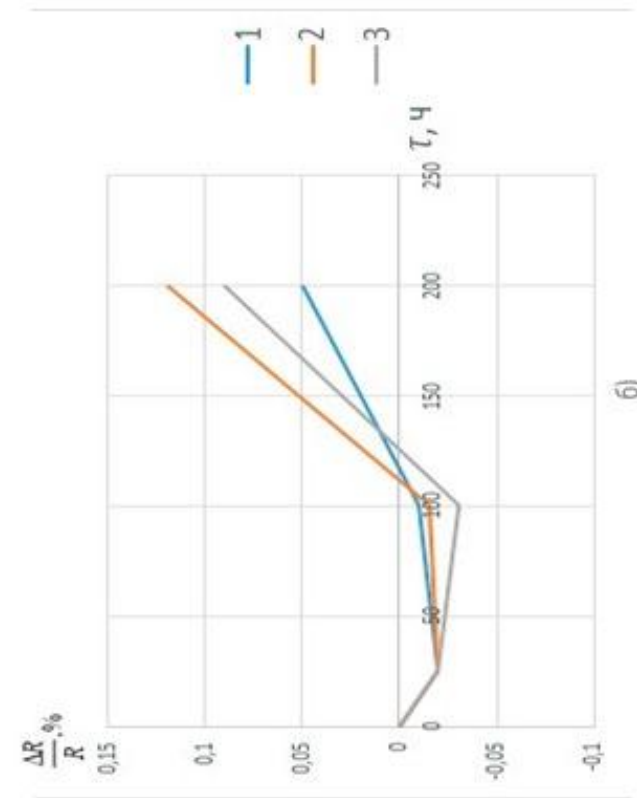
б) 10 КОМ/□;

б) 1 - 830°C; 2 - 850°C; 3 - 870°C.

Стабильность величины сопротивления под действием электрической нагрузки

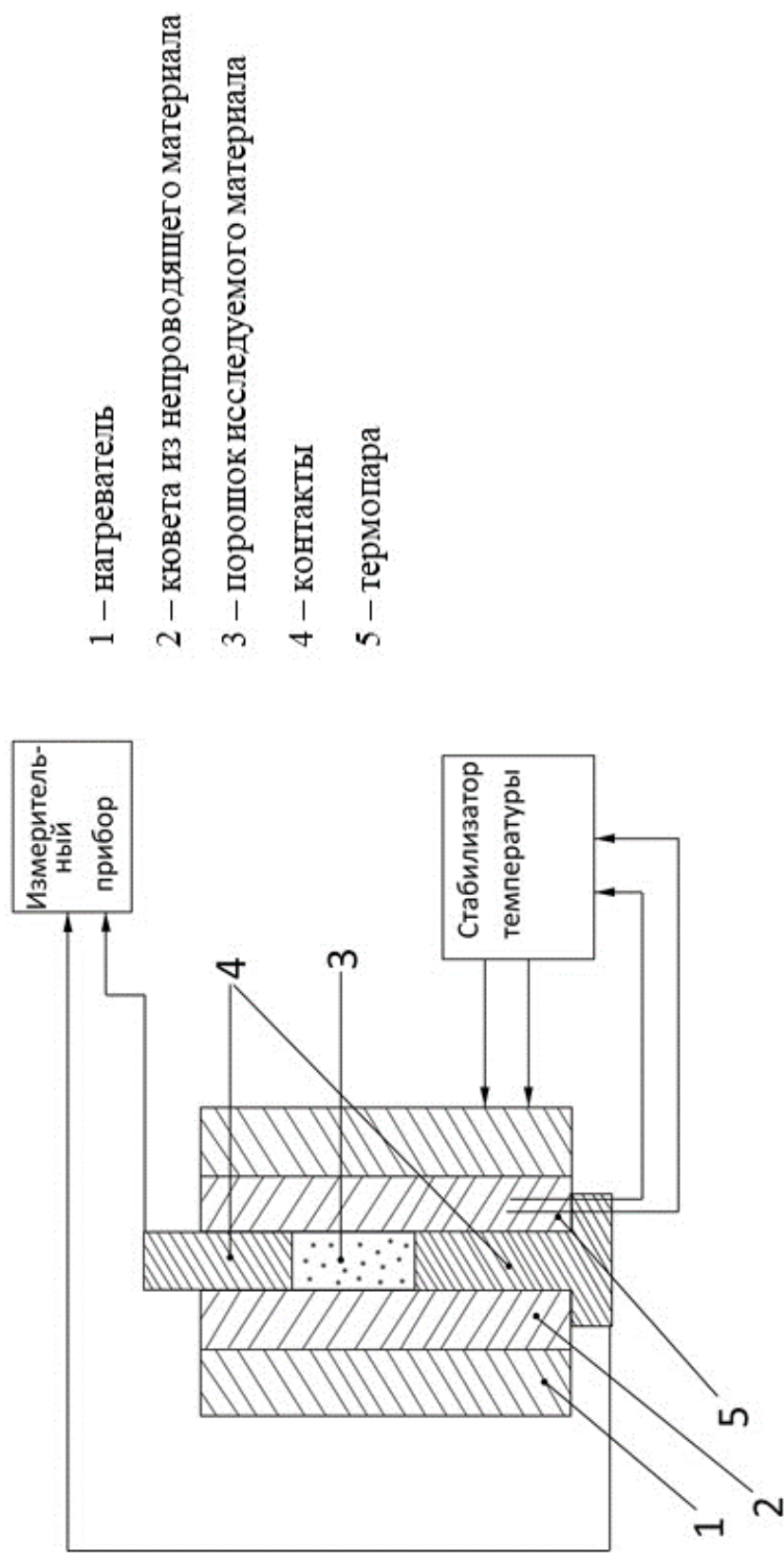


а) 500 кОМ/□;
а): 1 - 880°С; 2 - 930°С; 3 – 930°С; 4 – 950°С;

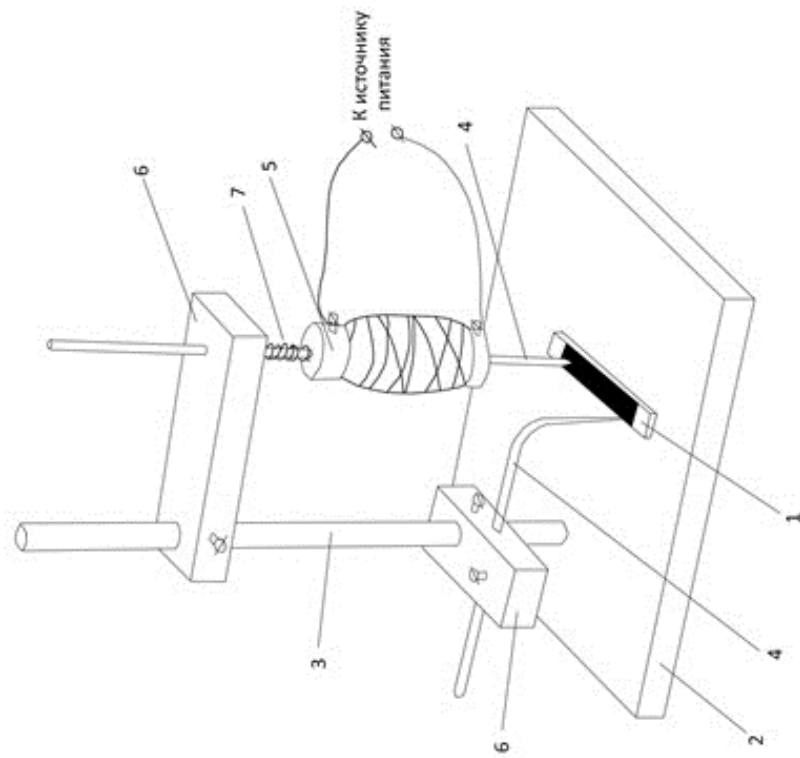


б)10 Ом/□;
б): -830°С; -850°С; -870°С.

Схема измерения температурной зависимости порошков

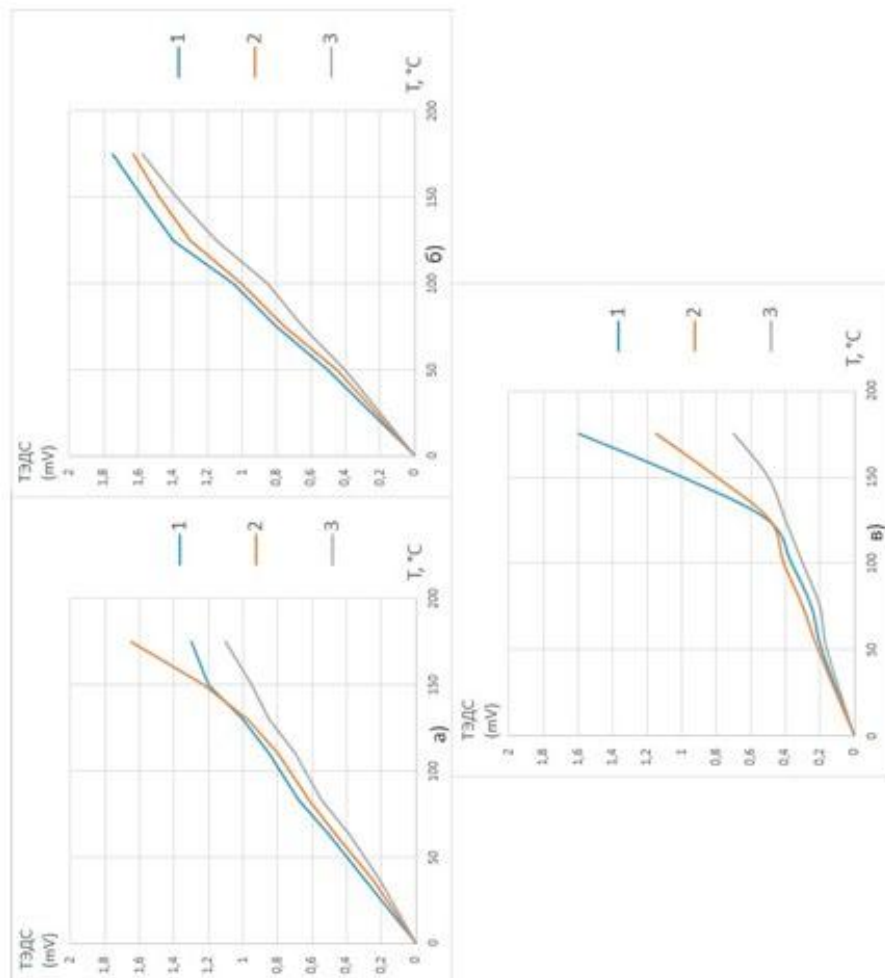


Вид установки для измерения термо-ЭДС



- 1 – образец;
- 2 – основание;
- 3 – штوك:
- 4 – электроды;
- 5 – нагревательный элемент;
- 6 – кронштейн;
- 7 – пружина.

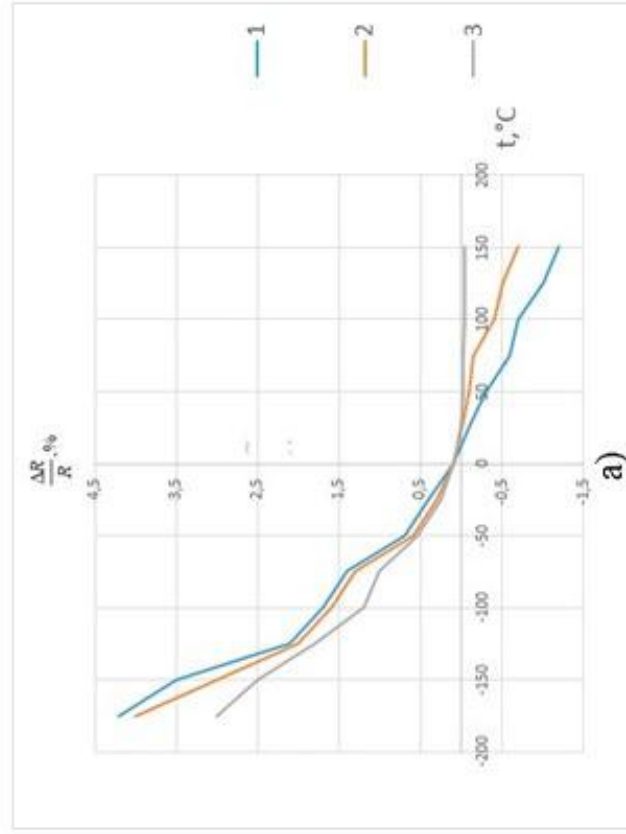
Исследование термо-ЭДС резистивных плёнок



- а) опорные пасты: 1 – 100 Ом/□, 2 – 10 Ом/□, 3 – 500 Ом/□;
- б) рутенит свинца, стекло (PbO·nSiO₂) с соотношением: 1 – 30:70, 2 – 40:60, 3 – 50:50;
- в) рутенит висмута, стекла: 1 – 279, 2 – R_И-34, 3 – (PbO·nSiO₂) с соотношением 50:50.

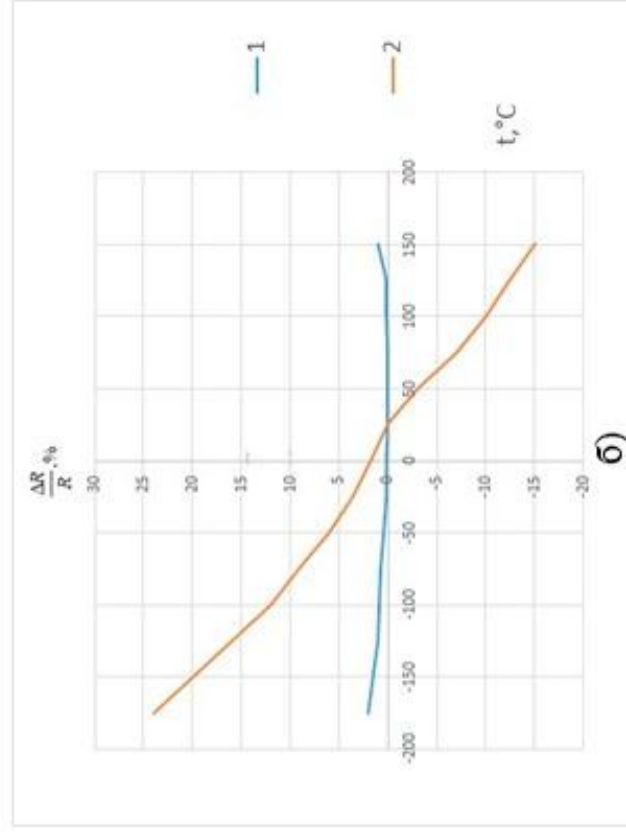
Небольшие положительные значения коэффициента т-э.д.с. говорят о том, что проводимость в керметных системах на основе рутения (в исследованном интервале температур) преимущественно *P*-типа и близка к проводимости в металлах

Исследование температурной зависимости сопротивления



а) С различным содержанием проводящей фазы

1 - 40%; 2 - 45%; 3 - 50%



б) С разными стеклами, 1 - на основе стекла 279;

2 - на основе стекла RU-34

Выводы

- правильно подобранный температурный режим обработки существенно повышает стабильность сопротивления резистивных плёнок при различных условиях эксплуатации;
- изменение содержания проводящей фазы и типа стекла значительно влияет на температурную зависимость сопротивления резистивных плёнок. Эти данные важны для разработки новых материалов для электроники, обеспечивающих стабильные характеристики при различных температурах;
- изучение влияния содержания проводящей фазы и типа стекла на электрические свойства резистивных плёнок показало, что эти параметры играют ключевую роль в формировании стабильных характеристик сопротивления.

Благодарю за внимание!

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ОТЗЫВ
РУКОВОДИТЕЛЯ ВЫПУСКНОЙ РАБОТЫ МАГИСТРА

Выпускная работа магистра на тему

«Повышение стабильности керметных резистивных композиций»

Выполнена студентом В.А.Россеевым
(инициалы, фамилия)

Факультет ИТЭ

Кафедра «НиМЭ». Группа 22ПДм1.

Направление подготовки, профиль .

11.04.04. «Электроника и нанoeлектроника»,

«Нано- и микроэлектроника»

Квалификация (степень) Магистр

Руководитель Доросинский Антон Юрьевич
(фамилия, имя, отчество)

к.т.н., доцент, генеральный директор ООО НПП «Сонар»
(должность и место работы)

Качества выпускника, выявленные в ходе выполнения выпускной работы магистра

В ходе выполнения ВКР Россеев В.А. продемонстрировал навыки и умения самостоятельного решения задач в области проведения исследований и создания методик оценки параметров электронной компонентной базы, а также хорошие знания дисциплин, формирующих общепрофессиональные компетенции.

Высокий уровень освоения профессиональных компетенций подтверждается качеством решённых задач в рамках профессиональной деятельности.

При выполнении задач по поиску способов повышения стабильности керметных резистивных композиций, продемонстрировал высокий уровень практической и теоретической подготовленности.

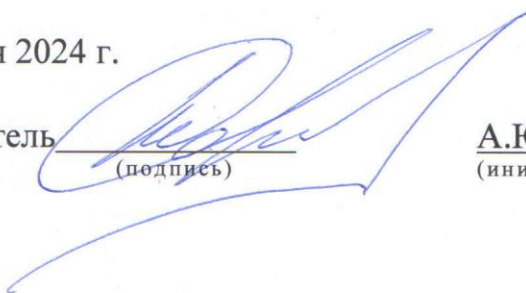
На заключительном этапе работы выпускник самостоятельно провёл анализ влияния технологических режимов и различных факторов на параметры и характеристики изделия, что является частью функций профессиональных стандартов, на которые ориентирована ОПОП по профилю «Нано- и микроэлектроника».

Заключение

Выполненная выпускником ВКР полностью соответствует техническому заданию. Степень соответствия подготовленности выпускника соответствует требованиям к результатам освоения программы бакалавриата ФГОС ВО по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника». На основании вышеизложенного считаю, что ВКР заслуживает оценки «отлично», а ее автор, Россеев В.А, присвоения квалификации «магистр» по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника».

«10» июня 2024 г.

Руководитель



(подпись)

А.Ю. Доросинский

(инициалы, фамилия)

РЕЦЕНЗИЯ

на выпускную квалификационную работу

Росеева Владислава Александровича

На тему «Повышение стабильности керметных резистивных композиций»
по направлению 11.04.04 – Электроника и нанoeлектроника

Магистерская диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников.

Работа посвящена повышению стабильности керметных резистивных композиций. Решение таких задач актуально для обеспечения надежности и долговечности электронных устройств в условиях различных эксплуатационных сред, так как устойчивость к изменениям окружающей среды и температурных колебаний существенно повышает качество и долговечность электронных компонентов.

В диссертации изучено влияние технологических факторов на электрические характеристики резистивных плёнок, исследована зависимость разброса величины сопротивления от технологических факторов.

Анализ рецензируемых материалов, а также основных выводов, полученных в результате выполнения разработки, показывает хорошую подготовку автора работы, способность работать с тематической литературой при выполнении поставленных задач.

Задание на выпускную квалификационную работу магистрантом выполнено в полном объеме. Текст и иллюстрационный материал оформлены в соответствии с действующими стандартами.

К достоинствам работы необходимо отнести ее целостность и последовательность изложения материала.

К недостаткам работы можно отнести отдельные стилистические и терминологические неточности. При этом указанные недостатки не снижают общего впечатления от выполненной разработки.

Считаю, что магистерская диссертация Россеева Владислава Александровича выполнена на высоком уровне, соответствует требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям, и заслуживает оценки «отлично», а Россеев В.А. заслуживает присвоения классификации магистра по направлению 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника».

Рецензент, директор-главный

конструктор

ООО НПК «Крона»,

Ханбеков Валентин Геннадьевич



