

## **ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭКРАНА ДЛЯ ЗЕРКАЛ ТЕЛЕСКОПА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ.**

Демина Виктория Денисовна

*Студентка 5 курса*

*Кафедра «Материаловедение в машиностроении»*

*Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана*

*Научные руководители: Алексеев Сергей Владимирович,*

*кандидат технических наук,*

*ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина»;*

*Баженова Ольга Петровна,*

*ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина»;*

*Крапошин Валентин Сидорович,*

*доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение в машиностроении»,*

*Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана*

Долгое время астрономы мечтали об исследовании звезд прямо из космоса. Ведь там нет не только пыли, но даже воздуха, и звезды будут видны особенно хорошо. Их мечта сбылась в 1990 г., когда на орбиту был выведен телескоп им. Хаббла. К сожалению, выяснилось, что на главном зеркале телескопа имеется дефект. Но всё было исправлено в 1993 г. с помощью дополнительных линз. С тех пор с помощью телескопа на Земле был сделан ряд открытий, было получено множество уникальных снимков звёзд, планет, туманностей, пополнивших наши знания о Вселенной.

Космический телескоп им. Хаббла планируется снять с орбиты в 2014 году. На замену ему на исследование Вселенной в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне (110 - 320 нм), недоступном для наблюдений с помощью наземных инструментов, будет направлен международный проект «Спектр-УФ» («Всемирная космическая обсерватория - ультрафиолет», ВКО-УФ). По возможностям проект ВКО-УФ аналогичен космическому телескопу им. Хаббла., а по некоторым характеристикам даже превосходит его.

В состав космического аппарата входит телескоп Т-170М - разрабатываемый крупный автоматический космический телескоп, основной рабочий инструмент ВКО-УФ для работы в ультрафиолетовом участке электромагнитного спектра. Телескоп будет оснащён главным зеркалом диаметром 1,7 м, спектрографами и камерами для построения высококачественных изображений в видимом и УФ диапазоне.

Как и в любой оптической системе, для её стабильной работы необходимо постоянство геометрических размеров каждого элемента. Поэтому зеркало для телескопа было решено изготовить из материала ситалл СО115 - стеклокристаллического материала со сверхнизким коэффициентом теплового расширения. Это идеальный материал для астрономических зеркал и других оптических деталей, в которых отсутствие изменений линейных размеров и формы поверхности при значительных изменениях температуры имеет важное значение. ТКЛР ситалла СО115 от -60 до +60°C равен  $(0 \pm 1,5) \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Для еще большей стабильности температура зеркала будет поддерживаться постоянной с помощью нагревателя, расположенного под ним.

Главная задача, поставленная перед разработчиками - выбор материалов для изготовления нагревателя. Ведь нагревателю предстоит работать в вакууме, да еще непосредственно рядом с зеркалом, следовательно, материалы должны иметь минимальное газовыделение, иначе работа зеркала, а также всей оптической системы будет невозможна.

В процессе теоретической проработки появилась идея конструкции нагревателя на металлической подложке из алюминиевого сплава, обладающего высокой теплопроводностью для равномерного распределения температурного поля, с последовательно нанесенными методами

вакуумного напыления тонкопленочными слоями диэлектрика, токопроводящего слоя и окончательного диэлектрического слоя (рис.1).

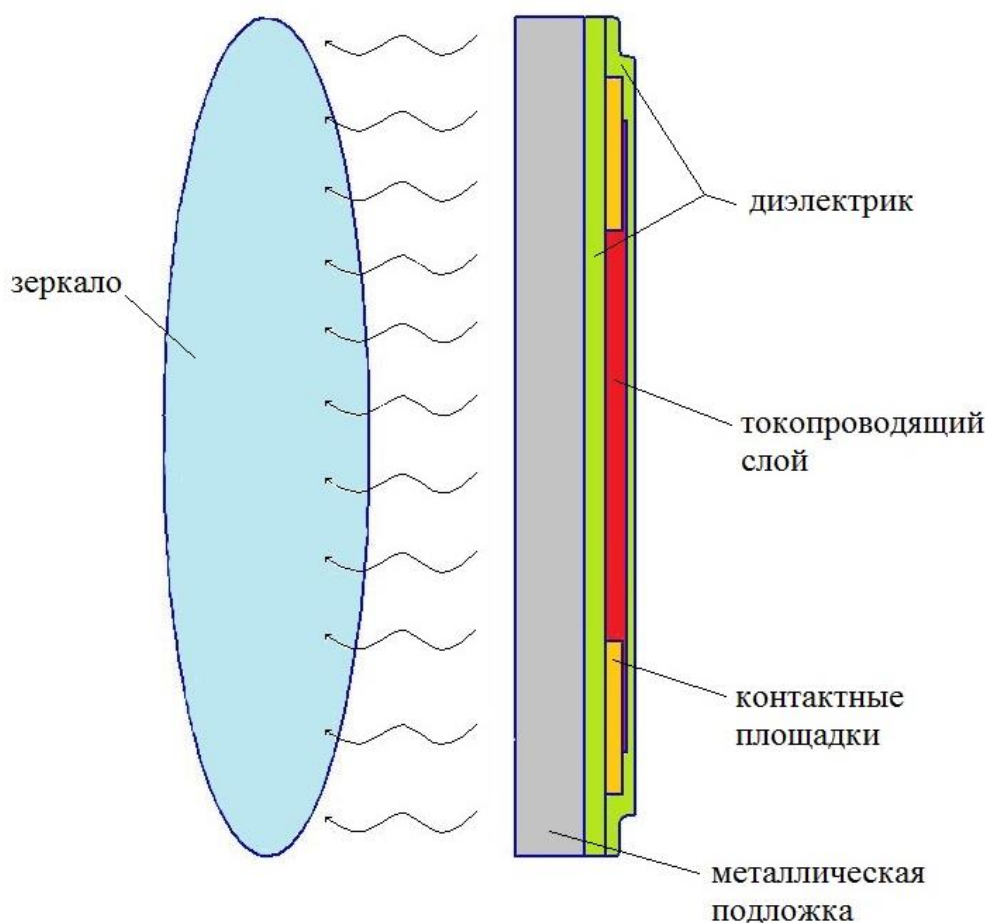


Рис.1. Составляющие нагревателя.

Материалы, которые будут использоваться в работе, относятся к так называемым электротехническим материалам, основными характеристиками изучения которых являются электрические свойства твердых тел. По назначению такие материалы можно разделить на следующие группы:

- а) проводники. Эти материалы служат для передачи электричества из одной области пространства в другую. Им должна быть присуща высокая проводимость. Указанному требованию соответствуют металлы и их сплавы, которые подразделяются на материалы с малым удельным сопротивлением и материалы с большим удельным сопротивлением. Для производства всевозможных нагревательных элементов используются, как правило, материалы с большим удельным сопротивлением.
- б) полупроводники. Материалы, необходимые в производстве средств связи и автоматического регулирования.
- в) изоляторы. В противоположность проводникам изоляторы используют для того, чтобы воспрепятствовать перемещению электричества из одной области пространства в другую. Изоляторы должны иметь весьма низкую проводимость или совсем не проводить электричества. Поэтому сопротивление изоляторов должно быть как можно большим. Эти вещества характеризуются сильной ковалентной или ионной связью, такой же, как многие керамики, стекла и полимеры. Один из видов изоляторов, известных под названием «диэлектрики», вследствие высокой поляризуемости способен усиливать электрические поля. Электрическое поле может несколько смещать электроны относительно положительно заряженных ионов, что приводит к образованию диполей. Переменный ток смещения может постоянно протекать по материалу, который является изолятором для постоянного тока.

Материал, используемый в качестве нагревательного элемента должен удовлетворять следующим требованиям:

- для обеспечения постоянства рассеиваемой мощности в условиях меняющихся температур (например, в заданном интервале от 0 до 1000С) необходима температурная стабильность удельного сопротивления  $\rho$ , т.е. низкий температурный коэффициент ТК  $\rho$ ;
- резистивный элемент должен иметь постоянные характеристики во времени;
- так как материал работает в вакууме, то он должен иметь минимальную испаряемость;
- температурные коэффициенты расширения материала подложки и материала нагревательного элемента должны быть близкими;
- материал нагревателя должен иметь хорошую адгезию к подложке.

Классифицировать данные материалы можно с точки зрения величины электрических сопротивлений. Соответствующие данные для некоторых твердых тел представлены в табл. 1.

Таблица 1. Электрические сопротивления некоторых твердых веществ при 20° С.

Металл	Удельное электрическое сопротивление $10^{-8}$ Ом·м	Полупроводник	Удельное электрическое сопротивление Ом·м	Изолятор	Удельное электрическое сопротивление Ом·м
Серебро	1,6	Германий	0,47	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$10^{13}$
Медь	1,7	Кремний	$5 \cdot 10^3$	Слюда	$9 \cdot 10^{14}$
Алюминий	2,8			Алмаз	$10^{14}$
Свинец	20			Стекла разных сортов	$10^9 - 10^{15}$
Никель	7,3				
Олово	12				
Цинк	5,9				

Сопротивление металла увеличивается с ростом температуры вследствие термического рассеяния электронов. Сопротивление полупроводников и изоляторов снижается при повышении температуры в большей части всего температурного интервала.

Твердыми проводниками электрического тока, необходимыми в данном случае, могут являться металлы и их сплавы. Среди металлических проводниковых материалов имеются материалы, обладающие высокой проводимостью, и материалы, обладающие высоким сопротивлением. Металлы с высокой проводимостью используют для изготовления проводов, кабелей, обмоток трансформаторов, волноводов и т.д. Металлы и сплавы с высоким сопротивлением применяют в электронагревательных приборах, лампах накаливания, реостатах, резисторах и т.п.

Величина, с помощью которой количественно оценивается электрическое сопротивление материала, называется удельным электрическим сопротивлением -  $\rho$ . Эта величина определяется из формулы (1).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1)$$

где R - общее сопротивление проводника длиной l, м

S - поперечное сечение проводника, постоянное по всей его длине, мм<sup>2</sup>,

$\rho$  - удельное электрическое сопротивление проводника.

Общее электрическое сопротивление проводника R находят непосредственным измерением, а по формуле (2) вычисляют величину удельного сопротивления проводника.

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l} \quad (2)$$

Удельное сопротивление в данном случае выражается в Ом·мм<sup>2</sup>/м. Если единицей измерения длины взять сантиметр, а площади - квадратный сантиметр, то получим более привычную единицу измерения удельного сопротивления проводника в более крупных единицах - Ом·см (омсантиметрах): 1 Ом·см = 10000 Ом·мм<sup>2</sup>/м. В системе СИ единицей удельного сопротивления является Ом·м (1 Ом·м = 10<sup>6</sup> Ом·мм<sup>2</sup>/м). Дольная от системной единицы 1 мкОм·м = 1 Ом·мм<sup>2</sup>/м. Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  - основная электрическая характеристика, так как она позволяет оценить сопротивление, оказываемое материалом при протекании через него электрического тока. Чем меньше  $\rho$ , тем в большей степени материал проводит электрический ток. Так, у проводниковой меди  $\rho = 0,0175 \div 0,0182$  Ом·мм<sup>2</sup>/м, у проводникового алюминия  $\rho = 0,0279 \div 0,0283$  Ом·мм<sup>2</sup>/м. Эти значения удельного электрического сопротивления показывают, что медь лучше проводит ток по сравнению с алюминием.

Свойство различных металлов, в том числе и проводниковых, проводить электрический ток часто оценивается еще величиной удельной проводимости  $\gamma$ . Это величина обратна удельному электрическому сопротивлению, вычисляемая по формуле (3).

$$\gamma = \frac{l}{\rho} \quad (3)$$

Удельная проводимость измеряется в Ом<sup>-1</sup> · см<sup>-1</sup> или (у проводниковых материалов) в м/Ом мм<sup>2</sup>. Она непосредственно указывает, в какой мере тот или иной материал проводит ток. Так у серебра удельная проводимость  $\gamma = 65,8$  м/Ом мм<sup>2</sup>, а у меди  $\gamma = 57$  м/Ом мм<sup>2</sup>, т.е. серебро лучше проводит электрический ток, так как его удельная проводимость больше, чем у меди.

Температурный коэффициент линейного расширения металлических проводников интересен в данной работе с точки зрения сопряженной работы различных материалов в конструкции нагревателя.

В качестве электропроводящих материалов, когда необходима высокая электропроводность, как, например, в кабелях, шинах, электрических цепях и т.п., то обычно используют чистую медь. Серебро, характеризующееся несколько большей проводимостью, как правило, не применяют вследствие высокой его цены. Алюминий, электропроводность которого вдвое ниже чем у меди, используют при больших габаритах проводников. Для ряда практических применений, например в резисторах для рассеяния энергии или в нагревательных элементах, желательны сплавы металлов с высоким электрическим сопротивлением. Такие свойства достигаются в сплавах переходных металлов. Нагревательные элементы часто изготавливают из материалов, подобных нихрому (сплав никеля и хрома) с высоким электросопротивлением и стойкостью против окисления при высоких температурах. Этот материал широко применяется в производстве тонкопленочных оптических покрытий и рекомендован для этих целей. Нихром – сплав с низким температурным коэффициентом линейного расширения. Имеет хорошую адгезию к окислам металлов, а его удельное электрическое сопротивление -  $1,12 \cdot 10^{-3}$  Ом·см. Температурный коэффициент электрического сопротивления,  $1,10 \cdot 10^{-5}$  1/°С.

Важнейшие усредненные физические характеристики металлов (при 20° С), применяемых в качестве проводниковых материалов в областях электротехники и радиоэлектроники, приведены в табл.2. [1].

Таблица 2. Физические характеристики металлов при 20° С.

Металл	Плотность 10 <sup>-3</sup> кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплопро водность дж/(кг·град)	Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_l \cdot 10^6$ град <sup>-1</sup>	Удельное электросопр отивление 10 <sup>-8</sup> Ом·м	Температурный коэффициент удельного сопротивления, град <sup>-1</sup>
Медь	8,9	390	16,5	1,72	0,0043
Алюминий	2,7	209	24	2,8	0,0042

Тантал	16,6	54	6,5	13,5	0,0038
Титан	4,5	15	8,1	42	0,0044
Цирконий	6,5	17	5,4	41	0,0045
Рений	21	71	4,7	21	0,0032
Золото	19,3	293	14,2	2,4	0,0038
Серебро	10,5	415	19,3	1,6	0,004
Палладий	12	72	11,9	11	0,0038
Железо	7,8	73	11	9,8	0,006
Никель	8,9	95	13	7,3	0,0065
Кобальт	8,7	79	12,5	6,2	0,006
Свинец	11,4	35	29	21	0,0037
Олово	7,3	65	23	12	0,0044
Цинк	7,1	111	31	5,9	0,004
Кадмий	8,6	93	30	7,6	0,0042
Индий	7,3	25	24,8	9	0,0047
Галлий	5,9	-	18,3	56	-

Диэлектрические материалы – один из классов электротехнических материалов, т.е. материалов, обладающих определенными свойствами при их взаимодействии с электромагнитным полем. Важнейшим признаком для классификации электротехнических материалов по их электрическим свойствам является электропроводность, т.е. способность пропускать через себя постоянный ток под действием приложенного к телу постоянного (не изменяющегося во времени) электрического напряжения. Под диэлектрическими материалами понимают материалы, оказывающие весьма значительное сопротивление прохождению через них постоянного электрического тока; в этих материалах возможно существование сильных электрических полей. Таким образом, диэлектрические материалы по их основным свойствам резко отличаются от проводниковых материалов, обладающих сильно выраженной электропроводностью, в связи с чем существование сильных электрических полей в этих материалах невозможно. В простейших случаях их применения диэлектрики используются в качестве электроизоляционных материалов, из которых создается электрическая изоляция устройства. Назначение электрической изоляции сводится к тому, чтобы воспрепятствовать прохождению электрических токов путями, нежелательными для работы данной электрической схемы. Иногда диэлектрики создают среду, в которой определенным образом распространяются электромагнитные волны. Во всех этих случаях диэлектрики являются пассивными: их роль сводится лишь к созданию изоляции или среды для передачи электромагнитных колебаний, а изменяемость электрических параметров диэлектрического материала при изменениях внешних факторов и прочих не важна для действия устройства. Существует также класс активных (управляемых) диэлектриков, которые играют не только «пассивную» роль подобно обычным электроизоляционным материалам, но используется их искусственно управляемая изменяемость свойств под действием различных факторов. В данном случае мы будем рассматривать класс пассивных диэлектриков.

Изоляционные материалы должны, например, иметь низкие диэлектрические потери, высокую электрическую прочность. Материалы по возможности должны быть легкими, механически прочными, не бояться тряски, вибраций и ударных нагрузок с большими ускорениями. Они должны обеспечивать надежную эксплуатацию как при температурах

150...200°C (а иногда и выше), так и при -60...-80°C. Чередование многократных температурных циклов не должно вызывать их порчи.

Одним из перспективных материалов для решения данной задачи может оказаться радиотехническая керамика. Радиокерамика – наиболее высококачественная керамика, используемая в радиоаппаратуре. Она отличается длительной нагревостойкостью, влагостойкостью и химической нейтральностью, не стареет и не обнаруживает остаточных деформаций, радиационно стойка. Радиокерамика допускает прочный контакт с металлами путем пайки твердыми и мягкими припоями. Основные компоненты радиокерамики: оксиды алюминия, кремния, титана, магния, олова и др. [2].

Разработка нового класса материалов – полупроводников и активных диэлектриков и устройств на их основе, начиная с конца 40-х – начала 50-х годов, обусловлено развитием электронной промышленности и необходимостью реализации процесса управляемого переноса носителей заряда не в вакуумных приборах (что тормозило развитие электроники из-за малого быстродействия, низкого коэффициента полезного действия и, как следствие, высокой энергоемкости и большого тепловыделения, препятствующего миниатюризации устройств), а в твердом теле. В результате был осуществлен переход от вакуумной к твердотельной полупроводниковой электронике, лишенной недостатков первой из них. Всем вышесказанным обусловлено применение данных материалов в основном в электронной промышленности на небольших габаритах исходной поверхности.

В качестве диэлектрических пленок чаще всего в полупроводниковой электронике используются оксиды, например диоксиды кремния  $\text{SiO}_2$ , алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и некоторых других металлов, а также нитрид и оксинитрид кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ .

В табл. 3 приведены свойства наиболее часто используемых диэлектрических пленок.

Таблица № 3. Физико-химические свойства диэлектриков.

Диэлектрик напыленный	Удельное сопротивление Ом см	Электрическая прочность В/см	Относительная радиационная стойкость	Коэффициент термического расширения $\text{K}^{-1}$
$\text{SiO}_2$	$10^{15} - 10^{16}$	$10^7$	1	$0,5 \cdot 10^{-6}$
$\text{Si}_3\text{N}_4$	$10^{15} - 10^{16}$	$10^7$	10	$3 \cdot 10^{-6}$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	$10^{14} - 10^{15}$	$10^6$	$10^2$	$4 \cdot 10^{-6}$
Гексаметил- дисилоксан	$10^{15}$	$10^6$	-	-

По мере увеличения поля, приложенного к изолятору, протекающие по нему малые токи, которые обусловлены присутствием небольшого числа электронов в зоне проводимости, а также ионной проводимостью и эффектами смещения, будут возрастать в соответствии с законом Ома. При некоторой довольно большой величине поля закон Ома перестает соблюдаться, сила тока резко возрастает до большой величины, что свидетельствует о катастрофически быстром падении сопротивления изолятора. Этот эффект обусловлен рядом явлений, известных под общим названием пробой. Напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика, называют пробивным напряжением, а соответствующую напряженность поля – пробойной или электрической прочностью диэлектрика.

Существует несколько разновидностей пробоя: а) электрический, б) термический, в) электрохимический, г) пробой при разряде, д) следовой пробой. У твердых диэлектриков могут наблюдаться три основных механизма пробоя: а) электрический, б) термический, в) электрохимический. Каждый из указанных механизмов пробоя может иметь место для одного и того же материала в зависимости от характера электрического поля – постоянного или переменного, импульсного, низкой или высокой частоты; времени воздействия напряжения; наличия в диэлектрике дефектов, в частности закрытых пор; толщины материала; условий охлаждения.

Так как изолирующий материал обычно используют для того, чтобы воспрепятствовать прохождению электричества, необходимо, чтобы пробой наступал при возможно более высоких полях. Величина такого критического поля характеризует электрическую прочность изолятора. Желательно знать, как поведет себя изолятор в весьма высоких полях (пробой) и в слабых переменных полях (диэлектрические свойства). Хороший изолятор не обязательно будет хорошим диэлектриком, и наоборот.

Проведем оценку конструктивных характеристик нагревателя. Рассеивающая мощность в нагревателе опытного образца равна 5 Вт, при напряжении 27 В. Тогда ток через нагреватель, который рассчитывается по формуле (4), равен  $I = 5 \div 27 = 0.185 \text{ А}$ , а сопротивление, по формуле (5), равно  $R = 27 \div 0.185 = 146 \text{ Ом}$ .

$$I = W \div U, \quad (4)$$

$$R = U \div I, \quad (5)$$

где  $I$  – ток, проходящий через нагреватель;

$R$  – сопротивление нагревателя;

$U$  – напряжение.

Геометрические размеры нагревателя оценим из предположения, что опытный образец, имеющий 10·20 см, будет заполнен по площади наполовину, т.е. площадь нагревателя будет равна 100 см<sup>2</sup>. Исходя из того, что толщина нихрома не должна превышать 1 мкм, и что удельное сопротивление пленки нихрома не превышает  $2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , определим ширину нагревателя. Приняв длину нагревателя равной 50 см, получим, что ширина меандра определится из выражения (6):

$$a = \frac{(\rho \cdot l)}{(R \cdot h)} \quad (6)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление;

$l$  – длина нагревателя;

$R$  – сопротивление нагревателя;

$h$  – толщина пленки нихрома.

Подставляя полученные значения определим, что ширина меандра равняется 7,5 см. Таким образом, при выбранной толщине пленки 1 мкм, соотношение длины к ширине равняется, примерно, 5 : 1.

Далее следует описания экспериментальных образцов нагревателей, приводятся измеренные значения сопротивлений нагревательных элементов, сопротивления изоляции при напряжениях 9, 100 и, в некоторых случаях, при 500 В.

*Структура: подложка – АМгб, диэлектрик – глубокая анодировка подложки, токопровод – нихром.*

На образцах № 6,7,8 (рис.2, 3, 4) изоляционные слои выращивались на алюминиевой подложке методом глубокой оксидировки. Размер каждого образца 60х50 мм, толщина 1,5мм. Контакты к нагревательному элементу - нихром + медь, нагревательный элемент- нихром. Контакты паянные, достаточно прочные. В образце №6 металл подложки полностью переведен в окисел алюминия, а в образцах 7 и 8 толщина изоляционного слоя не менее 200 мкм с каждой стороны. Все образцы выдерживают пробивное напряжение 500 В, при этом сопротивление изоляции всех образцов более 1000 МОм. Сопротивление слоя нагревателя в образцах №6 - 278 Ом, №7 - 63 Ом, №8 - 66 Ом.

*Структура: подложка - АМгб, диэлектрик - гексаметилдисилоксан, токопровод - нихром.*

Образцы 1, 9, 10 (рис. 5, 6, 7).

Диэлектрические пленки, полученные методом вакуумной плазменной полимеризации имеют высокую электрическую прочность  $E_{пр} 10^6 - 10^7 \text{ В/см}$ . Для каждого «конденсатора» существуют три пороговые значения напряжения: напряжение первого пробоя  $U_0$ , максимальное значение пробоя  $U_{мах}$  и минимальное значение напряжения  $U_{мин}$ , которое устанавливается на конденсаторе после пробоя.

Напряжение первого пробоя  $U_0$  линейно зависит от толщины пленки. Первый пробой происходит в условиях неоднородного поля на «остриях» электродов, частиц пыли и неоднородных включений (при изготовлении системы металл - диэлектрик - металл).

$U_{max}$  не зависит от размеров электродов, его полярности и оно постоянно для нескольких сотен пробоев.  $U_{max}$  характеризует электрическую прочность диэлектрической пленки.

Напряжение  $U_{min}$  определяется постоянной времени цепи разряда конденсатора и длительностью процесса разрушения верхнего электрода.

Известно, что слои, полученные из мономера гексаметилдисилоксана в высокочастотной кислородной плазме, приобретают структуру модифицированных окислов  $SiO_2$ . Эти материалы относятся к классу силиконов. Наличие кремния определяет повышенную нагревостойкость этих материалов. Высокие диэлектрические свойства кремнийорганических полимеров сохраняются при повышенных температурах. На подложку №1 из АМг6 был нанесен слой такого окисла толщиной порядка 10-13 мкм. В качестве контактных площадок использовалась структура нихром + медь, а в качестве нагревателя слой нихрома.

При контроле качества данного диэлектрика, без напыления на него металлических слоев, сопротивление изоляции было порядка 500 МОм при подаче напряжения 100 В. После напыления контактных площадок размером 20·20 мм, сопротивление изоляции стало 30 МОм, при том же напряжении.

После припайки оловянным припоем сопротивление изоляции на одном из контактов стало равно нулю, т.е. произошло разрушение изоляции. Сопротивление слоя нагревателя (нихрома) равно 140 Ом. На данном покрытии плохо держатся металлические слои.

На подложки №9 и №10 из АМг6, предварительно протравленные, были нанесены такие же слои комбинированного диэлектрического слоя электрохимического окисла + композит на основе оксида кремния и на них напылен нагреватель из нихрома. Без припайки контактов этот образец при напряжении 500 В имел сопротивление изоляции более 1000 МОм.

*Структура: подложка АМг6, диэлектрик - полимеризованный кремнийорганический лак К-85, токопровод – нихром.*

Образец №2 (рис.8) имел сопротивление нагревателя 215 Ом. Без напыления контактов сопротивление изоляции составляло порядка 500 МОм при напряжении 100 В. После припайки свинцово - оловянным припоем к контактам площадкам подводящих проводов произошло разрушение лакового слоя. Адгезия металла к лаковой пленке оставляет желать лучшего.

*Структура: подложка титан, диэлектрик - вакуумнонапыленные чередующиеся слои оксидов  $SiO_2$  и  $CrO_2$ , контактные площадки – медь + нихром.*

В образце №3 (рис.9) была сделана попытка использовать в качестве диэлектрика оксиды  $SiO_2$  и  $CrO_2$ . Оба эти окисла широко используются в оптической и электронной промышленности и известны как очень стойкие и прочные материалы. В качестве подложки был использован титан, имеющий близкий к этим окислам коэффициент линейного расширения  $(80-95) \cdot 10^{-7}$ . Для создания слоя этих окислов толщиной в несколько микрон для исключения внутренних напряжений изолятор пылился чередованием тонких слоев (толщиной 0,1 мкм)  $SiO_2$  и  $CrO_2$ . Всего было напылено 40 слоев, общей толщиной порядка 4 мкм.

В качестве контактных площадок использовалась структура: нихром + медь. Сопротивление изоляционного слоя между одной контактной площадкой и титановой пластиной было 3 кОм, для другой контактной площадки - 10 кОм. Механическая прочность припаянных проводников удовлетворительная. Сопротивление между контактными площадками по поверхности 60 кОм.

*Структура: подложка (как диэлектрик) – стекло, токопровод - нихром.*

При использовании диэлектрической подложки отпадает проблема создания надежного изоляционного слоя. Было изготовлено два образца № 4 (рис.10) и № 5 (рис.11). Механическая прочность паянных контактов достаточно надежная. Сопротивление слоя нагревателя образца №4 - 190 Ом, а образца № 5 - 175 Ом.

Результаты испытаний электрических характеристик опытных образцов сведены в табл.4.



Таблица 4. Испытания  
электрических характеристик опытных образцов нагревателей.

Номер образца	Описание структуры образца	Сопротивление нагревателя	Сопротивление изоляции		Прочность изоляции
			при 100 В	при 500 В	
№ 1	Подложка-АМг6, Диэлектрик - гексаметилдисилоксан, Токопровод - нихром	149,1 Ом	-	-	Пробой при 200 ÷ 300 В
№ 9	Подложка-АМг6, Диэлектрик - гексаметилдисилоксан + композит на основе SiO <sub>2</sub> , Токопровод - нихром	116,9 Ом	40 ÷ 50 МОм	500 МОм	Пробой при 400 В, Ток утечки > 10 мА
№ 10	Подложка-АМг6, Диэлектрик - гексаметилдисилоксан + композит на основе SiO <sub>2</sub> , Токопровод - нихром	135,8 Ом	-	500 ÷ 700 МОм	Пробой при 440 В, Ток утечки > 10 мА
№ 6	Подложка – АМг6, Диэлектрик – глубокая анодировка подложки (на данном образце металл подложки переведен в окисел полностью), Токопровод - нихром	299,5 Ом	40 ÷ 50 МОм	>500 МОм	Выдержали при 500 В 1 мин (пробоя нет)
№ 7	Подложка – АМг6, Диэлектрик – глубокая анодировка подложки (не менее 200 мкм с каждой стороны), Токопровод - нихром	63 Ом	40 ÷ 50 МОм	>500 МОм	Выдержали при 500 В 1 мин (пробоя нет)
№ 8	Подложка – АМг6, Диэлектрик – глубокая анодировка подложки (не менее 200 мкм с каждой стороны), Токопровод - нихром	67,4 Ом	40 ÷ 50 МОм	>500 МОм	Выдержали при 500 В 1 мин (пробоя нет); При 1000 В выдержал 0,5 мин, далее пробой
№ 2	Подложка АМг6, Диэлектрик - полимеризованный кремнийорганический лак К-85, Токопровод - нихром	20 Ом	40 МОм	-	Выдержали при 500 В 1 мин (пробоя нет); Выдержали при 1000 В 1 мин (пробоя нет).
№ 3	Подложка титан, Диэлектрик - вакуумнонапыленные чередующиеся слои оксидов	Токопроводящего слоя нет	Между одной площадкой и подложкой – 25 кОм; между	-	-

	SiO <sub>2</sub> и CrO <sub>2</sub> , Контактные площадки – медь + нихром, токопровода нет		второй и подложкой - 13 кОм		
№ 4	Подложка (как диэлектрик) – стекло, Токопровод - нихром	198, 6 Ом	-	-	-
№ 5	Подложка (как диэлектрик) – стекло, Токопровод - нихром	181,3 Ом	-	-	-

В результате проведенных испытаний были получены следующие выводы:

- Подложка из АМг6 + оксид алюминия + нихром с технологией глубокой оксидировки позволяет производить надежное контактирование и при этом не разрушается изолирующий слой. При напряжении 500 В сопротивление изоляции было более 1000 МОм
- Структуры АМг6 + полимер + нихром и титан + кремнийорганический лак + нихром имеют тенденцию к разрушению изоляционного слоя при проведении пайки. Сопротивление изоляции после такой операции падает до нескольких мегаом. Причем сцепление слоя нихрома с данными полимерами гораздо хуже, чем у образцов с глубокой оксидировкой.
- Структура титан + окислы кремния и циркония + нихром имели плохое сопротивление изоляции. По всей видимости, это вызвано недостаточным качеством обработки поверхности титановых пластин и малой толщиной слоя окисла (4 мкм). Паянные контакты имеют хорошую прочность.
- Структура стекло + нихром имеет прочные контакты, вопросы, связанные с надежностью изоляции полностью отпадают.
- В скором времени дополнительно будут проведены исследования на газовыделения.

По расчетному сопротивлению (146 Ом) больше всего подходит образец 1 со структурой металлическая подложка из АМг6 + мономер + нихром (сопротивление нагревателя 149 Ом), но эта структура имеет плохую прочность изоляции (пробой при 299-300 В). Структура образцов 7 и 8- металлическая подложка из АМг6 + оксид алюминия + нихром, наоборот, имеет недостаточное сопротивление нагревателя (63-67 Ом), но зато отличную прочность изоляции (при выдержки 500 В 1 минуту пробоя нет). Поэтому было принято решение в дальнейшем исследовать образцы со структурой металлическая подложка из АМг6 + оксид алюминия + мономер + нихром, т.е. будет произведено анодирование алюминиевой подложки (не глубокое ~ до 100 МКС) с запылением пор гексаметилдисилоксаном, а сверху будет напылен слой нихрома, верхний слой изоляции-мономер. Такая композиция должна иметь необходимое сопротивление нагревателя и высокую прочность изоляции.

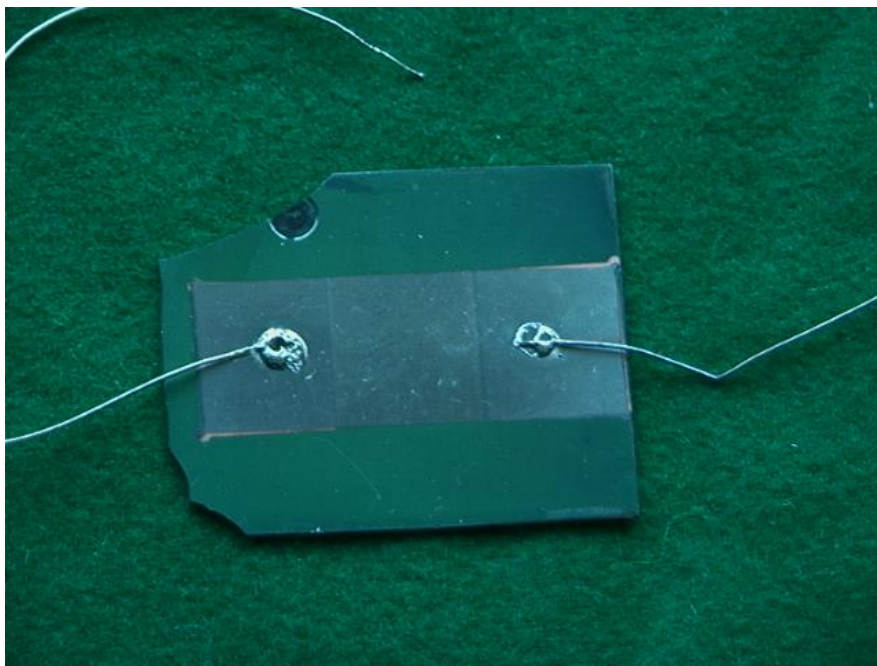


Рис.2. Образец № 6:

1. Подложка – алюминий;
2. 1-ый изоляционный слой – глубокая оксидировка поверхностного слоя, полностью переводящая материал подложки в окисел алюминия;
3. токопроводящий слой – нихром;
4. контактные площадки – медь + нихром.

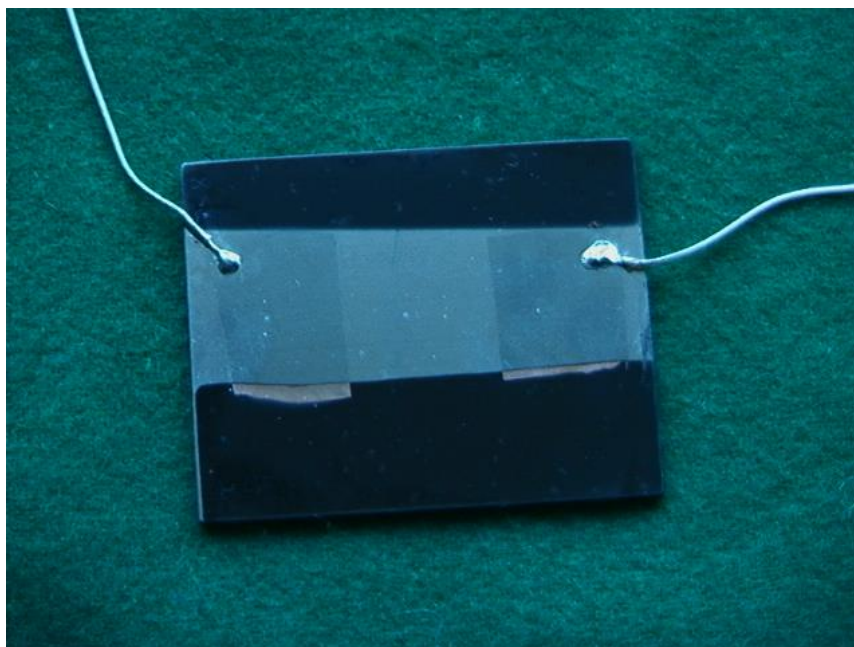


Рис.3. Образец № 7:

1. Подложка – алюминиевый сплав АМгб;
2. 1-ый изоляционный слой – глубокое оксидирование подложки на глубину не менее 200 мкм с каждой стороны;
3. Токопроводящий слой – нихром;
4. Контактные площадки – медь + нихром.

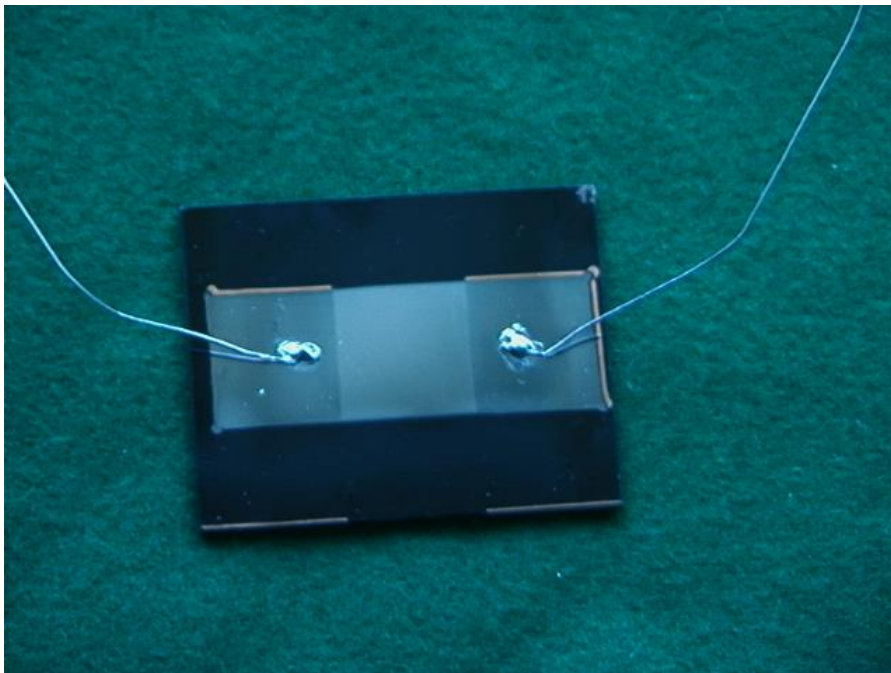


Рис.4. Образец № 8:

1. Подложка – алюминий толщиной 1,5 мм;
2. 1-ый изоляционный слой – глубокое оксидирование подложки (получение окисла алюминия толщиной не менее 200 мкм с каждой стороны)
3. Токопроводящий слой – нихром
4. Контактные площадки – медь + нихром



Рис.5. Образец № 1:

1. Подложка – алюминиевый сплав АМгб;
2. Диэлектрический слой – гексаметилдисилоксана, осажденный в высокочастотной кислородной плазме, приобретающий после осаждения структуру модифицированных окислов  $\text{SiO}_2$ , толщина слоя 10-13 мкм;
3. Токопроводящий слой – нихром;
4. Контактные площадки – медь + нихром.

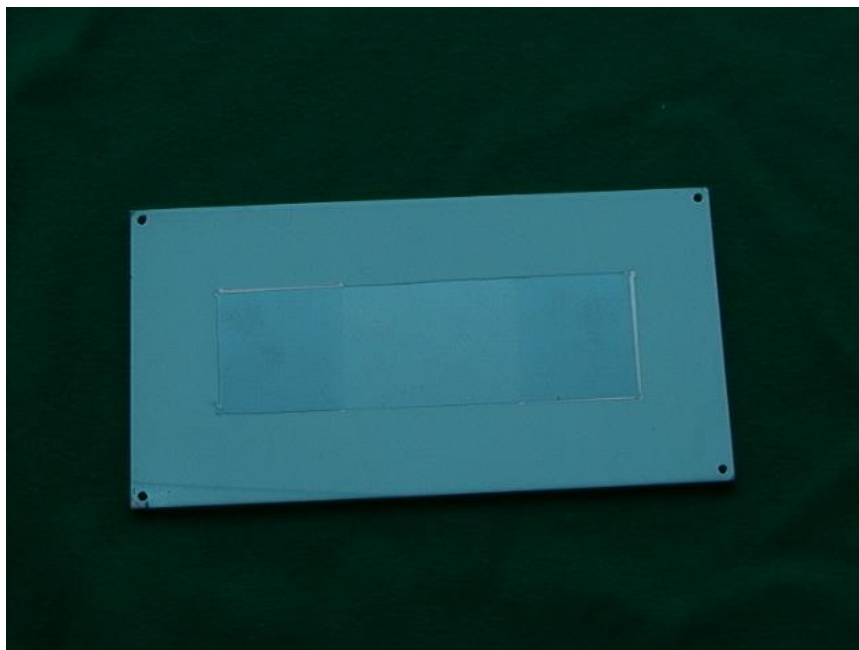


Рис.6. Образец № 9:

1. Подложка – алюминиевый сплав АМг6, с верхним слоем, подвергнутым химическому травлению;
2. 1-ый диэлектрический слой – комбинированный: электрохимический окисел гексаметилдисилоксана + композит на основе оксида кремния;
3. Токопроводящий слой – нихром;
4. Контактные площадки – медь + нихром.



Рис.7. Образец № 10:

1. Подложка – алюминиевый сплав АМг6, толщиной 3,0 мм, предварительно подвергнутый химическому травлению;
2. 1-ый диэлектрический слой – комбинированный из слоя электрохимического окисла гексаметилдисилоксана + композит на основе оксида кремния;
3. Токопроводящий слой – нихром;
4. Контактные площадки – медь + нихром.



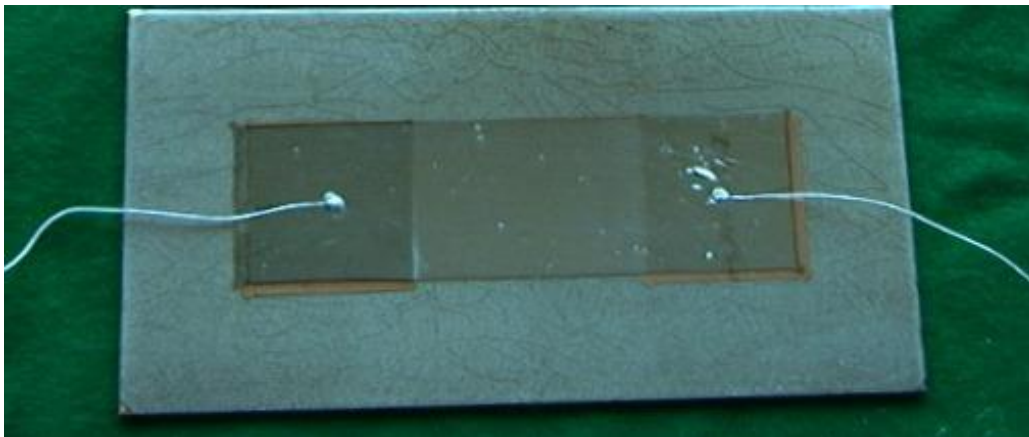


Рис.8. Образец № 2:

1. Подложка – алюминиевый сплав АМг6;
2. Диэлектрический слой – полимеризованный кремнийорганический лак К-85,;
3. Токопроводящий слой – нихром;
4. Контактные площадки – медь + нихром.

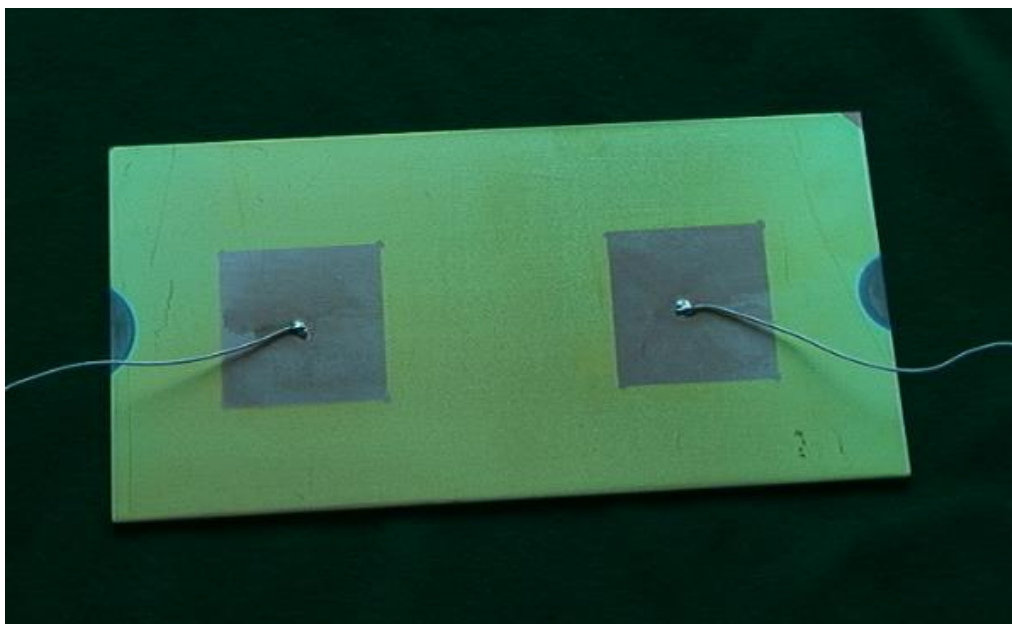


Рис.9. Образец № 3:

1. Подложка – титановый сплав, толщиной 1,5 мм;
2. 1-ый диэлектрический слой – вакуумнонапыленные чередующие слои оксидов  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CrO}_2$  ;
3. Токопроводящего слоя – нет;
4. Контактные площадки – медь + нихром.

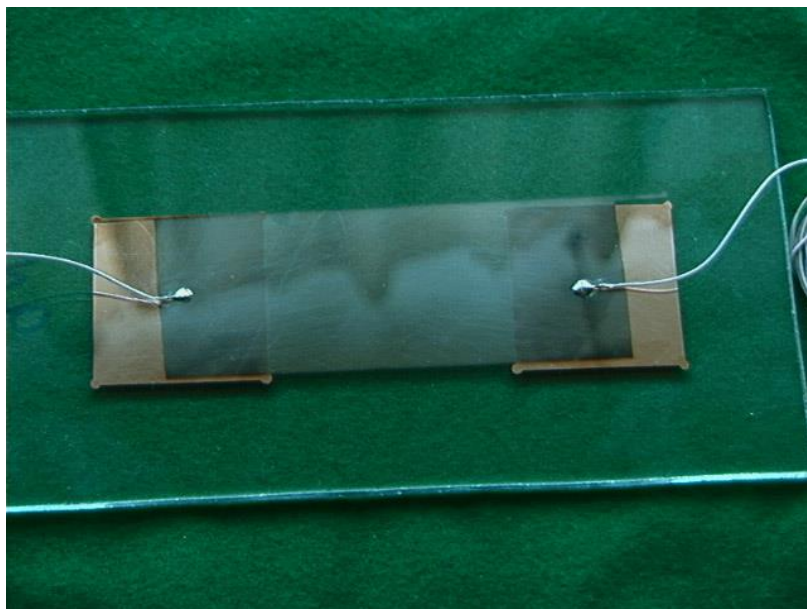


Рис.10. Образец № 4:

1. Подложка – стекло, выполняющая роль изолятора;
2. Токопроводящий слой – нихром;
3. Контактные площадки – медь + нихром.

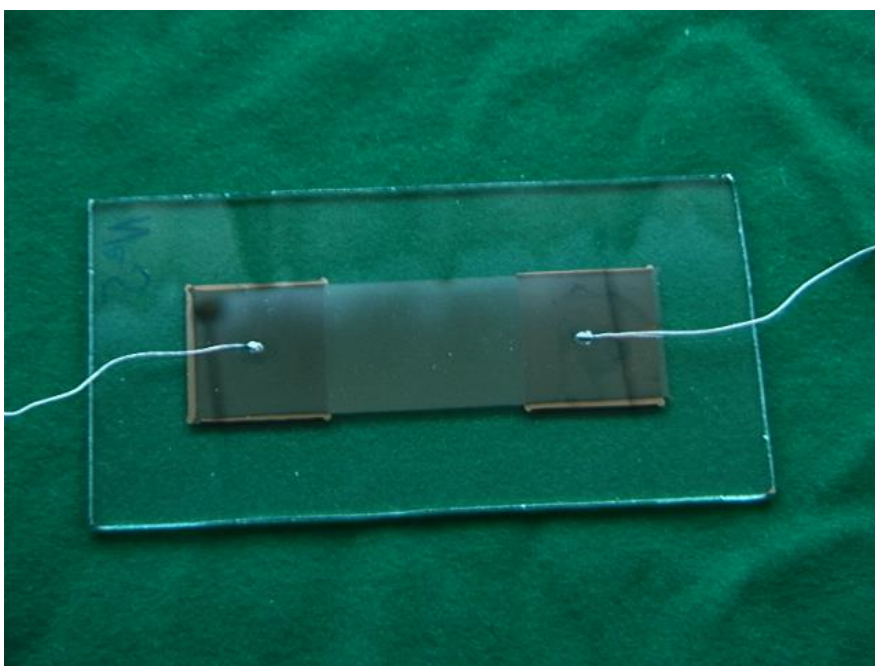


Рис.11. Образец № 5:

1. Подложка – стекло, выполняющая роль 1-го изолирующего слоя;
2. Токопроводящий слой – нихром;
3. Контактные площадки – медь + нихром.

## Литература

1. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. Справочник. Физические величины. М.: Энергоатомиздат - 1991. – 1234 с.
2. Горелик С.С., Дашевский М.Я. Материалы для производства изделий электронной техники. М.: Высшая школа - 1987. – 575 с.
3. Ткачук Б.В., Колотыркин В.М. Получение тонких полимерных пленок из газовой фазы. М.: Химия -1977. – 585 с.
4. Дроздов Н.Г., Никулин Н.В. Электроматериаловедение. Учебник для проф.-техн. учебных заведений и подготовки рабочих на производстве. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа - 1973. -312 с.
5. Горелик С.С., Дашевский М.Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков: Учебник для вузов. М.: Металлургия -1998. -547 с.