

На правах рукописи

**ВОРОНОВ Андрей Юрьевич**

**НАНОМЕТРОВЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ  
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ**

Специальность – 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и наноэлектроника  
на квантовых эффектах

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете  
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
заведующий НИЛ НИЯУ МИФИ Симаков Андрей Борисович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, начальник лаборатории института прикладной  
химической физики НИЦ “Курчатовский институт”  
Васильев Алексей Андреевич

кандидат технических наук, начальник лаборатории ФГУП НИИ «Квант»  
Ротнов Сергей Васильевич

Ведущая организация:  
ФГУП НИИ "Полюс" им. М.Ф. Стельмаха

Защита состоится 21 ноября 2011 г. в 15-00 часов в аудитории К-608 на  
заседании диссертационного совета Д.212.130.02 Национального  
исследовательского ядерного университета «МИФИ» по адресу: 115409, г.  
Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Национального  
исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Автореферат разослан 18 октября 2011 года

Ученый секретарь  
Диссертационного совета

П.К. Скоробогатов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** На крупнейшем в мире коллайдере протонов в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН Швейцария) проводится эксперимент ATLAS. Исследовательская аппаратура эксперимента ATLAS находится в зоне, недоступной для технического обслуживания в течение всего срока проведения эксперимента – 6 лет. Одной из многочисленных детекторных систем в эксперименте является трековый детектор переходного излучения (ТДПИ), который обеспечивает надежное выделение электронов в продуктах взаимодействия встречных потоков протонов. ТДПИ содержит около 450000 элементарных детекторных трубок, называемых “straw”. Особенности конструкции “straw” делают весьма вероятной аварийную ситуацию в отдельной детекторной трубке, напряжение питания которой превышает 1500 В. Организация ТДПИ такова, что при этом выходит из строя весь детекторный блок ТДПИ. Эта проблема впервые в экспериментальной физике возникла в эксперименте ATLAS из-за большого количества “straw” и недоступности ремонта, причем проблема была обнаружена на завершающей стадии проектирования ТДПИ. Для устранения этих аварийных ситуаций разработчиками аппаратуры было предложено отключение аварийного элемента “straw” от высоковольтного источника питания с помощью плавкого предохранителя. В результате данный элемент детектора не сможет регистрировать частицы, однако весь детекторный блок в целом, содержащий сотни тысяч элементарных детекторов, сохраняет работоспособность. Анализ сотрудниками ЦЕРНа мирового рынка предохранителей показал, что предохранителей, имеющих требуемые электрические и геометрические параметры, в мире не существует.

Использование предохранителей позволяет обезопасить дорогие детекторные блоки и сравнительно дешево повысить их живучесть в условиях долговременного физического эксперимента. Поэтому задача создания простого, дешевого и эффективного высоковольтного предохранителя, который бы управляемым способом мог отключать напряжение в аварийных детекторных элементах является актуальной.

Работа соискателем выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники НИЯУ МИФИ в рамках программ:

- «Государственная поддержка региональной научно-технической политики высшей школы и развитие ее научного потенциала», подпрограмма «Международное научно-техническое сотрудничество высшей школы России» Минобразования РФ – госбюджетная НИР «Микроэлектронные средства электрической защиты высоковольтных детекторов в фундаментальных исследованиях по физике высоких энергий в международных проектах в лабораториях CERN и DEZY», гос. Рег. №01.2001.07720, 2001-2002 гг.;
- «Фундаментальные исследования и высшая школа (BRHE)» Минобразования РФ и Американского фонда гражданских исследований (Научно-образовательный центр CRDF REC-011 «Фундаментальные исследования свойств материи в экстремальных состояниях»;  
а также по проектам: ИНТАС №99-1079 (поддержка CERN) и МНТЦ №1900р (поддержка CERN).

**Целью работы** является обеспечение надежной работы трековых детекторов переходного излучения в эксперименте ATLAS путем использования высоковольтных предохранителей за счет разработки теоретических основ конструирования и технологии их изготовления. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Обосновать и разработать конструкцию предохранителя.
2. Исследовать и обосновать выбор материалов, пригодных для изготовления предохранителей.
3. Провести анализ тепловых процессов в предохранителе при всех возможных режимах его работы.
4. Провести анализ процессов пережигания предохранителя.
5. Разработать технологию изготовления предохранителя.
6. Изготовить разработанные предохранители.
7. Исследовать работоспособность полученных предохранителей.

**Объекты и методы исследования.** Объектами исследования являются тонкопленочные резистивные структуры нанометровой толщины на диэлектрических подложках. Структуры получены методом магнетронного распыления в среде аргона мишени из титана и последующей фотолитографии.

Исследование химического состава поверхности проводилось методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии на спектрометре XSAM-800 (фирма Kratos).

Исследование тепловых процессов проводилось методом математического моделирования с использованием известных аналитических решений уравнения теплопроводности и Программы MATCAD.

Исследование процессов пережигания проводилось методом математического моделирования и экспериментов с использованием специально разработанного высоковольтного блока питания и осциллографа TDS 3052C фирмы Tektronix.

**Достоверность результатов** в проведенных экспериментах подтверждается воспроизводимой технологией изготовления высоковольтных предохранителей с заданными свойствами, корректностью применения методов измерения параметров, внутренней непротиворечивостью результатов измерений, опытом успешного применения тонкопленочных высоковольтных предохранителей в аппаратуре ТДПИ в эксперименте АТЛАС в ЦЕРНе, а также в других электрофизических устройствах.

**Научная новизна** заключается в создании теоретических основ проектирования и изготовления тонкопленочных высоковольтных предохранителей с заданными свойствами. При этом получены следующие **научные результаты**:

1. Разработана конструкция нанометрового высоковольтного предохранителя для защиты детекторных систем в физике высоких энергий. Токоведущая дорожка наносится на подложку без промежуточных теплоизолирующих слоев.
2. Предложено использовать новый способ разрушения токоведущей дорожки – сквозное окисление вместо традиционного плавления. Поэтому внутренний объем корпуса предохранителя обязательно должен содержать кислород.
3. Проведен анализ взаимосвязи свойств металлов и технических требований к предохранителю, показавший, что материал токоведущей дорожки должен обладать высокой скоростью окисления, высоким удельным сопротивлением и высокой температурой плавления – таким материалом является титан.
4. Разработана методика и проведен расчет тепловых характеристик и процесса пережигания предохранителей, позволивший определить размеры токоведущей дорожки и теплофизические параметры подложки, по которым определен материал подложки – ниобат лития.

5. Определены критические параметры основных технологических режимов. Нанесение токоведущего слоя должно осуществляться без ионной очистки методом магнетронного распыления на подложки, имеющие температуру около 200°С. Отжиг для подгонки и стабилизации параметров осуществляется при температуре в диапазоне от 350°С до 380°С.
6. Введены новые обязательные этапы технологического цикла – неоднократные выдержки в течение нескольких дней с последующей проверкой дрейфа сопротивлений резисторов, а также испытание серий высоковольтных импульсов напряжения со скважностью 5-10 и общей энергией не менее 0,1 энергии пережигания.

**Личный вклад автора.** Общая постановка и обоснование задач исследований, обсуждение полученных результатов, были выполнены автором совместно с научным руководителем.

Личный вклад автора заключается в разработке методик и проведении расчетов тепловых процессов и процессов пережигания в тонкопленочных предохранителях, обосновании технологических режимов и выборе конструкции и материалов для изготовления предохранителей, а также в проведении практических работ по их созданию и исследованию.

**Практическая значимость.**

1. Разработана технология изготовления высоковольтных тонкопленочных предохранителей. Изготовлено более 60 000 предохранителей.
2. Разработанные предохранители служат надежной защитой трековых детекторов переходного излучения, обеспечивая время отключения около 4 мс в режиме короткого замыкания дефектного элемента и не более 180 мс при протекании через элементарный детектор повышенных токов. При этом ток утечки сгоревшего предохранителя не превышает 5 нА при напряжении около 2 кВ.
3. Получен патент РФ на изобретение «Высоковольтный резистор-предохранитель».

**Внедрение результатов работы.**

1. Разработанные предохранители используются для защиты высоковольтных цепей в слаботочных физических установках, таких как дозиметр альфа – излучения и спектрометр ионной подвижности, разработанных в ООО «МИФИ-МИКРО» и на кафедре физики твердого тела и наносистем НИЯУ МИФИ.

2. В Европейский центр ядерных исследований (ЦЕРН, Швейцария) для защиты ТДПИ в эксперименте АТЛАС поставлена партия из 60 000 высоковольтных предохранителей.

### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту.**

1. Конструкция нанометрового высоковольтного предохранителя представляет из себя узкую металлическую дорожку толщиной в десятки нм, нанесенную непосредственно на поверхность диэлектрической подложки без промежуточных слоев.
2. Новый способ разрушения токоведущей дорожки – сквозное окисление вместо традиционного плавления. Поэтому токоведущая дорожка должна находиться в среде, содержащей кислород.
3. Анализ взаимосвязи свойств металлов и технических требований к предохранителю, показавший, что лучшим материалом токоведущей дорожки является титан.
4. Методика и результаты расчета тепловых характеристик и процесса пережигания предохранителей, позволившие определить размеры токоведущей дорожки и теплофизические параметры подложки, по которым определен материал подложки – ниобат лития. Диапазон материалов, пригодных для изготовления таких предохранителей, весьма ограничен. Оптимальным материалом токоведущей дорожки является титан, подложки – ниобат лития.
5. Проведение критических операций технологического цикла изготовления предохранителей в указанных режимах: магнетронное напыление токоведущего слоя на подложки при температуре 200°C без ионной очистки и последующий отжиг кристаллов предохранителей в воздушной среде в диапазоне температур 350-380 °C., позволяет получить максимальный выход годных.
6. Обязательными этапами в технологическом цикле изготовления являются неоднократные выдержки в течение нескольких дней с последующей проверкой дрейфа их сопротивления а также испытание серией высоковольтных импульсов напряжения со скважностью 5-10 и общей энергией не менее 0,1 энергии пережигания.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 5, 6, 7, 8 и 10 научных сессиях НИЯУ МИФИ (г.

Москва, 2003- 2006; 2008), на международной конференции ICMNE (октябрь 2005, г.Москва, Звенигород) и на 13й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Микро-электроника и информатика-2006» (апрель 2006 г. г.Москва, МИЭТ).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и один патент РФ на изобретение.

В совместных работах автору принадлежит проведение расчетов, разработка технологического маршрута и режимов процессов напыления и отжига, выполнение экспериментальных работ по изготовлению тонкопленочных высоковольтных предохранителей.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, 4-х приложений и списка литературы, включающего 107 наименований. Общий объем диссертации составляет 168 страниц, включая 65 рисунков и 10 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна полученных результатов и их практическая значимость, приведены сведения об апробации результатов, публикациях, структуре и объеме работы.

**В первой главе** проведен анализ технических требований к предохранителям и сделан краткий литературный обзор по теме диссертации. В рабочем режиме предохранитель должен выполнять функции сопротивления нагрузки номиналом около 90 кОм, надежно выдерживать искровые пробои в детекторах, иметь время пережигания в импульсном режиме менее 200 мс, габаритные размеры не более 6×4×2 мм и ток утечки после пережигания не более 10 нА при напряжении 2 кВ. На основе литературного обзора сформулированы основные задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** проведена конструктивно-топологическая разработка высоковольтных тонкопленочных предохранителей. Оценка параметров плавкого предохранителя традиционной конструкции показала невозможность использования конструкции открытого плавкого предохранителя для работы в составе ТДПИ.

Для снижения температуры нагрева токоведущей дорожки предохранителя предложено наносить ее на подложку из диэлектрического материала. Проведена



оценка температуры нагрева подложек из пяти различных материалов при воздействии тепловой энергии, выделяющейся от импульса тока, протекающего через предохранитель при искровом пробое в детекторе. Температура подложки возрастает менее чем на  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Это свидетельствует о возможности того, что температура токоведущей дорожки окажется допустимой и мгновенного испарения проводящего слоя от воздействия импульса тока не произойдет.

Предложен новый способ разрушения токоведущей дорожки предохранителя – сквозное окисление металлической пленки вместо расплавления.

Для токоведущей дорожки был выбран титан. Он имеет самое высокое из чистых металлов удельное сопротивление ( $0,48 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ) и высокую температуру плавления ( $1668^{\circ}\text{C}$ ). Кроме того, титан обладает высокой адгезией к диэлектрическим подложкам и высокой скоростью окисления. Оценка показала, что толщина дорожки должна составлять 20-50 нм, длина не более 12 мм, ширина не менее 2,5 мкм. Для более точного определения ширины, а также для определения материала подложки требуется проведение расчетов температуры нагрева резистивной дорожки.

При разработке топологии резистора-предохранителя важно, прежде всего, обеспечить необходимую величину сопротивления. Вторым важным требованием является необходимость работы при высоком напряжении. Это требование проявляется в запрете на близкое расположение параллельных токоведущих дорожек. Отсюда вытекает ограничение на длину токоведущей дорожки. Размер подложки выбран равным  $3\times 5 \text{ мм}$  – максимальный размер, допустимый для предохранителя в ТДПИ. Топология резистивной дорожки одного из разработанных предохранителей представлена на рис. 1. Длина дорожки составляет 10 мм.

**В третьей главе** проведено математическое моделирование тепловых процессов в высоковольтных тонкопленочных резисторах-предохранителях. Анализ температуры токоведущей дорожки проводился для двух режимов – рабочего, моделирующего искровые пробои в детекторе, которые предохранитель должен надежно выдерживать, и режима пережигания.

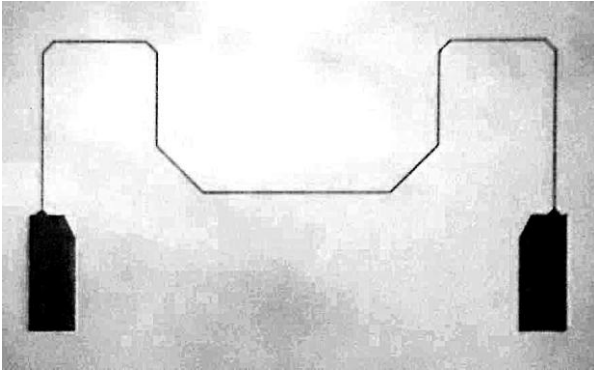


Рис. 1. Топология резистивной дорожки

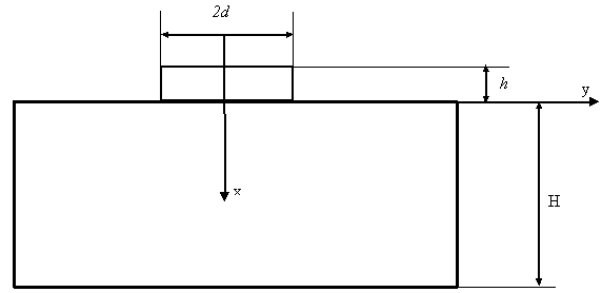


Рис.2. Фрагмент сечения резистора-предохранителя

Фрагмент сечения резистора-предохранителя схематично показан на рис. 2.

Расчет температуры резистивной дорожки проводился на основе следующей модели: на поверхность полубесконечного тела с момента времени  $t = 0$  падает постоянный тепловой поток  $q$  в виде бесконечно длинной полосы шириной  $2d$ . По этой модели температура на поверхности подложки определяется по формуле

$$T_x = \frac{q}{\lambda} \sqrt{\frac{at}{\pi}} \left\{ \operatorname{erf} \frac{d+y}{2\sqrt{at}} + \operatorname{erf} \frac{d-y}{2\sqrt{at}} - \frac{d+y}{2\sqrt{\pi at}} E_i \left[ -\frac{(d+y)^2}{4at} \right] - \frac{d-y}{2\sqrt{\pi at}} E_i \left[ -\frac{(d-y)^2}{4at} \right] \right\},$$

где  $y$  – расстояние на поверхности от оси полосы,  $\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\xi^2} d\xi$  – функция

ошибок,  $E_i(-z) = \int_{-\infty}^{-z} \frac{e^{\xi}}{\xi} d\xi$  – интегральная показательная функция. Для представления

решений в удобном виде использовался математический аппарат программы MathCAD. Адекватность этой модели была доказана путем расчета пяти других моделей, описывающих отличия данной модели от реального предохранителя.

Был проведен расчет температуры предохранителя в зависимости от теплопроводности ( $\lambda$ ) для нескольких значений температуропроводности ( $a$ ). Пример графика такой зависимости представлен на рис. 3 для рабочего режима. Как видно из графика, температура очень резко зависит от теплопроводности при значениях менее примерно  $4 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  и слабо зависит от температуропроводности. Теплопроводность и температуропроводность у всех материалов взаимосвязаны. Для большей наглядности на рис. 4 представлена зависимость температуры в центре токоведущей дорожки от времени для двух материалов с существенно отличающимися значениями теплопроводности: ниобат лития – теплопроводность равна  $4,2 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  (кривая 1) и сапфир – теплопроводность  $25 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  (кривая 2). Как видно из рисунка, температура

поверхности сапфира в режиме пережигания ниже температуры ниобата лития почти в 6 раз и составляет всего 220 °С за 100 мс, следовательно сапфир не может быть использован в качестве подложки для высоковольтных предохранителей.

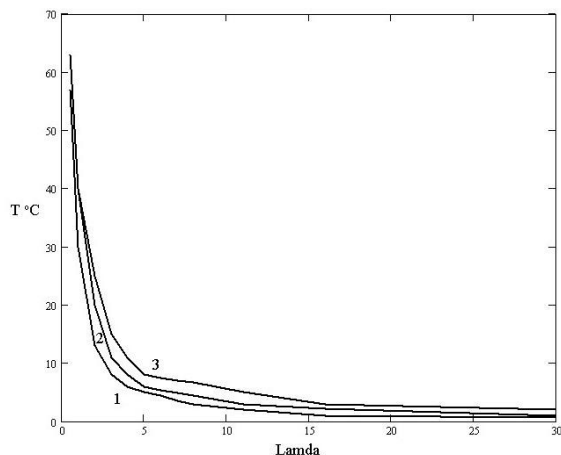


Рис.3. Зависимость температуры в центре токоведущей дорожки от теплопроводности для рабочего режима, параметр - температуропроводность,  $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ : 1- 0,5; 2 – 1; 3 - 30

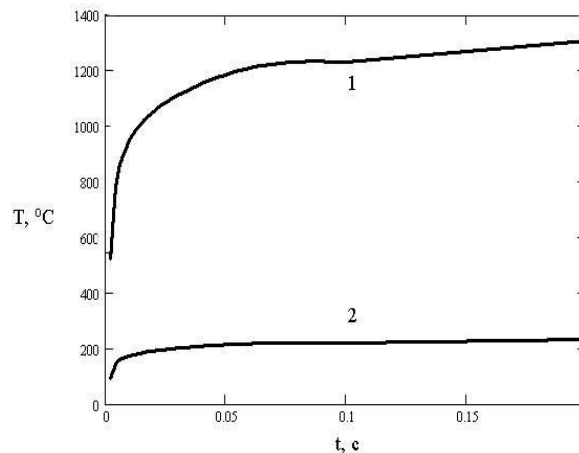


Рис.4. Зависимость температуры в центре токоведущей дорожки от времени для ниобата лития(1) и сапфира(2)

На рис. 5 представлена зависимость температуры в центре токоведущей дорожки от ее полуширины. Температура заметно повышается с шириной полосы. Однако выбирать большую ширину полосы нецелесообразно, т.к. при этом ее толщина становится менее 10 нм и пленка перестает быть сплошной. Поэтому с учетом полученной ранее оценки минимальной ширины дорожки 2,5 мкм была выбрана ширина дорожки 15 мкм.

Была проведена оценка значимости дефектов в виде проколов в рабочей полоске предохранителя. На рис.6 представлены зависимости температуры в рабочем режиме в центре полосы от ее ширины, при условии протекания через полосу любой ширины одного и того же тока (модель прокола). Как видно, зависимость весьма слабая. Это обусловлено тем, что для узкой полосы более существенную роль играет рассеяние тепла вдоль поверхности подложки. Из представленных зависимостей следует, что снижение ширины токоведущей дорожки за счет прокола даже в 3 раза (с 15 до 5 мкм) приведет к повышению температуры менее чем на 20%. Следовательно, дефекты фотолитографии оказывают несущественную роль на работоспособность предохранителей и последние могут быть изготовлены в лабораторных условиях.

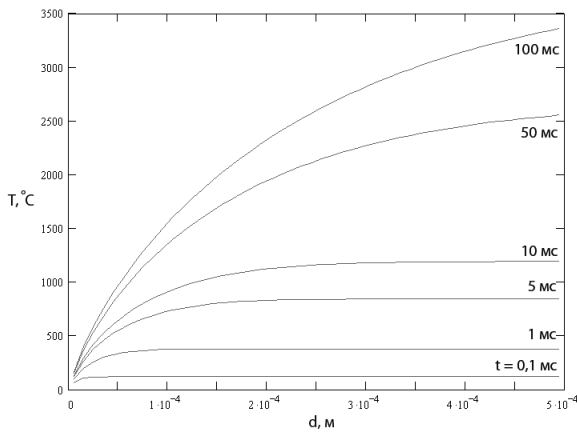


Рис. 5. Зависимость температуры в центре токоведущей дорожки от ее полуширины для режима импульсного пережигания

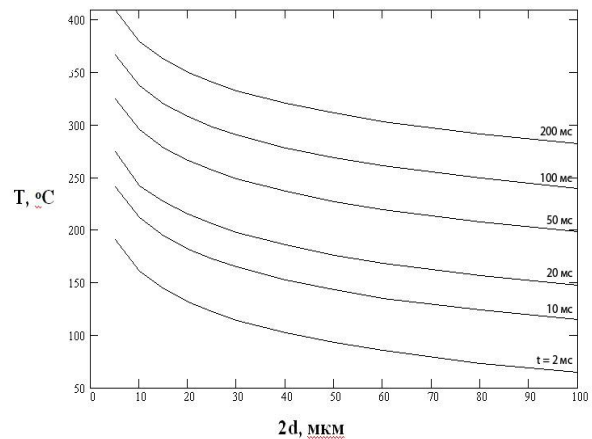


Рис. 6. Зависимость температуры в центре полосы от ее ширины для различного времени при постоянном токе через полосу

На рис. 7 представлены временные зависимости температуры меандра от времени для рабочего режима. Здесь же приведена температура одиночной полосы шириной 5 мкм и 15 мкм. Температура меандра со временем возрастает быстрее, чем для одиночной полосы и вскоре оказывается выше температуры одиночной полосы.

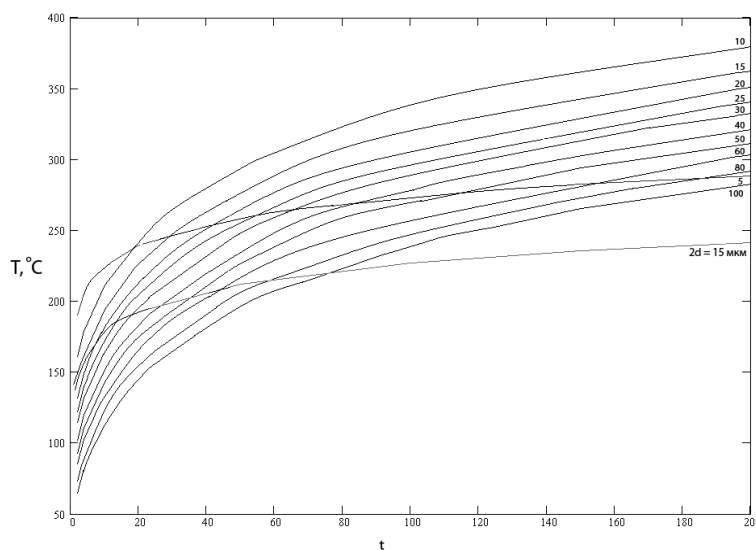


Рис. 7. Зависимость температуры полосы меандра от времени для шага 200 мкм и различной ширины полосы. Параметр – ширина полосы.

Поэтому изготовление предохранителя в виде широкого меандра и узкого прямого участка не может обеспечить надежное пережигание предохранителя в узкой части дорожки. Это подтверждается экспериментом по пережиганию предохранителей с топологией меандра. В 90% экспериментов пережигание происходило на широкой полосе в области меандра, а не узкой прямой полосы. При этом ток утечки

сгоревшего предохранителя превышал допустимый. Из этого следует, что токоведущая дорожка предохранителя должна иметь постоянную ширину как показано на рис. 1 и не содержать близко расположенных параллельных участков.

**В четвертой главе** проводится моделирование процесса разрушения токоведущей дорожки предохранителя. Модель строится на предположении что разрушение происходит за счет окисления токоведущей дорожки на всю глубину. Рост пленки оксида металла подчиняется параболическому закону:  $w^2 = At$ ,  $A = A_0 \exp(-\frac{E_a}{kT})$ , где  $w$  – толщина пленки диоксида титана,  $A_0$  – константа,  $E_a$  – энергия активации процесса окисления,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $t$  – время, отсчитываемое от начала процесса окисления. Величины  $A_0$  и  $E_a$  были определены на основе литературных данных. Сравнение расчетных данных толщины по найденным  $A_0$  и  $E_a$  с приведенными экспериментальными результатами показало погрешность не более 12%.

Для расчета толщины окисла при возрастании температуры токоведущей дорожки, использовалась дифференциальная форма закона окисления  $2wdw = Adt$ , где  $dw$  и  $dt$  – дифференциалы соответствующих величин. Погрешность расчета приращения  $\Delta w$  не превышает 1%.

Расчет процесса пережигания токоведущей дорожки предохранителя проводится на основе следующего алгоритма.

1. Считаем, что токоведущая дорожка предохранителя была покрыта слоем диоксида толщиной  $w_0$ , поэтому окисление при пережигании начинается не с чистого титана, а продолжается увеличение уже имеющегося окисла.
2. Проводим расчет зависимости температуры предохранителя от времени. При температуре выше 400°C рассчитываем приращение толщины и полную толщину окисной пленки. Интервалы времени при расчете равны 0,2 мс.
3. Расчет ведется до тех пор, пока толщина окисла  $w_i$  не окажется равной полной толщине пленки титана  $h_0$ . Как только это произойдет, расчет оканчивается и полное время, при котором это происходит, считается временем пережигания.

С использованием описанного алгоритма в системе программирования Delphi была написана программа расчета. Результаты расчета показывают, что время

пережигания резко возрастает с ростом теплопроводности. С ростом температуропроводности время пережигания наоборот снижается.

Для правильного выбора материала подложки удобно воспользоваться номограммами, показывающими диапазон значений теплопроводности и температуропроводности соответствующих определенному значению времени пережигания (рис.8). На этом же графике указаны сочетания параметров, соответствующих некоторым диэлектрическим материалам. Цифрами в квадратных рамках указаны следующие материалы: 1 – ситалл, 2 – танталат лития, 3 – ниобат лития, 4 – рутил (диоксид титана), 5 - монокристаллический кварц (диоксид кремния). Единственным материалом, пригодным для подложек высоковольтных тонкопленочных предохранителей, параметры которых удовлетворяют требованиям по времени пережигания, является ниобат лития. Для него время пережигания составляет около тридцати миллисекунд. Несколько хуже параметры танталата лития.

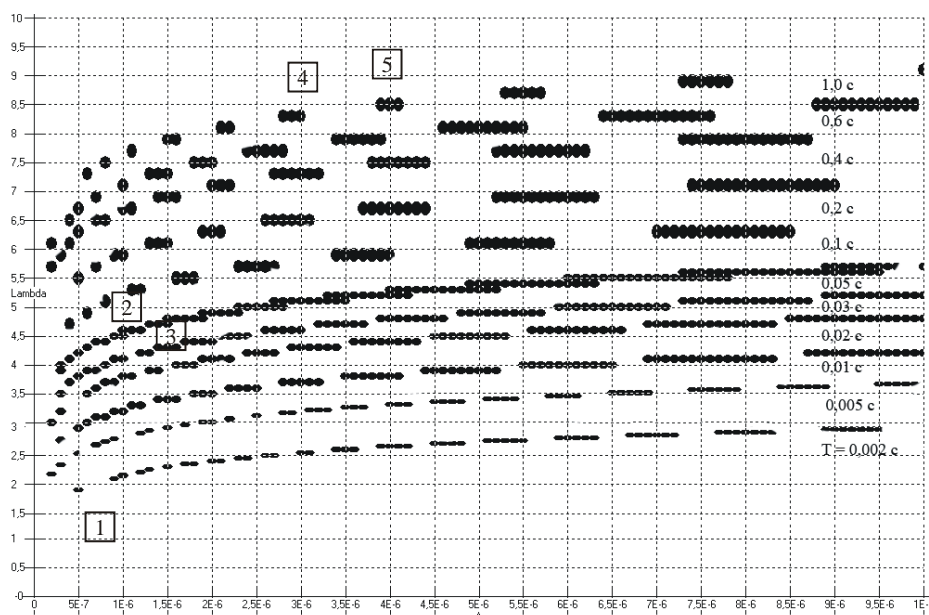


Рис. 8. Номограммы процесса пережигания предохранителя

Остальные известные материалы абсолютно непригодны. По результатам этих расчетов был выбран материал для подложки высоковольтных предохранителей.

Для оценки влияния технологического разброса параметров были проведены расчеты времени пережигания в зависимости от поверхностного сопротивления напыленной пленки титана и сопротивления резистора. Результаты для резисторов-предохранителей номиналом 90 кОм представлены на рис. 9. Зависимости построены для диапазона изменения сопротивлений в реальном технологическом процессе

изготовления резисторов-предохранителей. Время пережигания растет с ростом сопротивления резистора и падает с ростом поверхностного сопротивления. Расчетные значения укладываются в заданный диапазон.

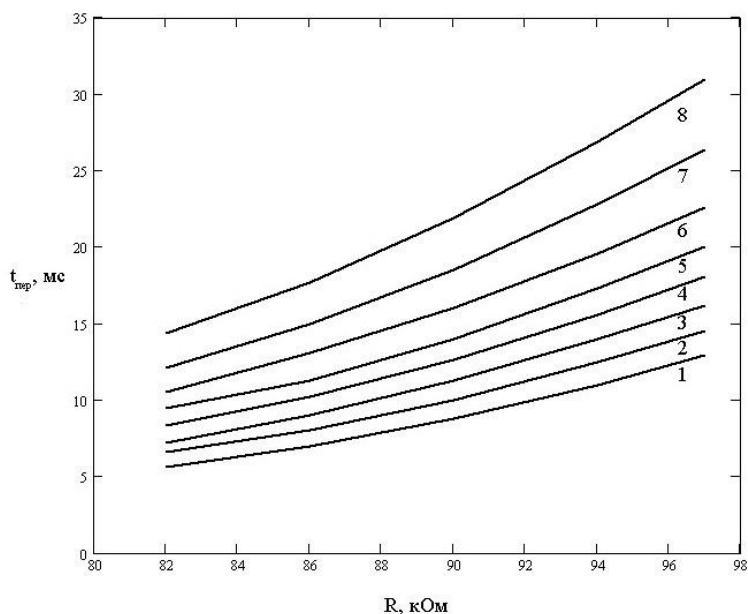


Рис. 9. Зависимость времени пережигания от сопротивления резистора – предохранителя.

Параметр – поверхностное сопротивление, Ом/кв: 1- 100;

2– 90; 3 – 80; 4 – 70; 5 – 60; 6 – 50; 7 – 40; 8 – 30.

**В пятой главе** описан технологический цикл изготовления высоковольтных тонкопленочных резисторов-предохранителей. Операции технологического цикла можно разбить на несколько групп операций, существенно отличающихся друг от друга по характеру выполняемых работ.

Первая группа операций – операции с подложками. Это традиционные операции технологии интегральных микросхем – напыление металлических пленок и фотолитография для формирования рисунка тонкопленочных предохранителей и контактных площадок. Завершающей операцией этой группы является контроль сопротивления резистивных дорожек всех кристаллов на пластине.

Вторая группа операций начинается с разделения пластины на кристаллы и дальнейшая обработка ведется по группам. Сюда входят операции термического отжига и контроля с целью подгонки сопротивлений резисторов-предохранителей до заданного диапазона, после чего следуют операции сборки и контроля, составляющие третью группу операций.

Очистка подложек осуществлялась отмывкой в хромпике при температуре  $80 \pm 2^\circ\text{C}$  в течение 20 минут. Нагрев и охлаждение раствора до температуры  $35 \pm 5^\circ\text{C}$  проводились вместе с подложками. После охлаждения в хромпике подложки отмывались в проточной деионизированной воде с удельным сопротивлением не менее 10 МОм·см и высушивались струей воздуха.

Нанесение слоев титана и алюминия проводилось в едином вакуумном цикле методом магнетронного распыления мишеней из титана и алюминия в атмосфере аргона с нагревом подложек до температуры  $200^\circ\text{C}$ . Ионная очистка не проводилась, т.к. при этом выход годных снижается в 1,5 – 2 раза.

После напыления пленок Ti – Al проводились последовательно две фотолитографии для формирования рисунка контактных площадок из алюминия и резистивных дорожек из титана. После формирования рисунка резисторов-предохранителей следует операция зондового контроля – измерение сопротивления резисторов и разделение подложек на кристаллы методом резки алмазным диском. После резки проводилась отмывка последовательно в толуоле и изопропиловом спирте марки ХЧ или ОСЧ при температуре  $80 \pm 5^\circ\text{C}$  в течение 5 минут с последующей протиркой ватным тампоном в нагретом реактиве. Завершалась отмывка кипячением в ацетоне марки ОСЧ. Затем кристаллы всех пластин партии разбивались на группы. Номиналы сопротивлений резисторов в каждой группе лежали в пределах одного килоома.

Последующая обработка – подгонка сопротивлений за счет термического окисления проводилась по группам. При этом на поверхности резистивной дорожки образуется пленка диоксида титана, которая выполняет двойную роль. Во-первых, повышается сопротивление резистивной дорожки за счет уменьшения толщины токопроводящего слоя. Во-вторых, диэлектрическая пленка защищает поверхность дорожки от внешней среды, выполняя роль пассивирующего слоя, повышающего стабильность свойств токоведущих дорожек. Отжиг проводился в температурном диапазоне  $350 - 380^\circ\text{C}$ . Все отобранные после отжига кристаллы хранились в течение четырех суток. Затем проверялось их сопротивление. Если дрейф сопротивления был менее  $\pm 0,5$  кОм, то кристаллы поступали на сборку. Кристаллы с большим дрейфом собирались в группы и хранились в течение четырех суток, затем проверка



сопротивлений повторялась. Эта процедура повторялась три раза. Выход годных кристаллов после отжига – выдержки составлял для различных партий от 30 до 50%.

Сборка резисторов-предохранителей заключалась, по существу, в изготовлении герметичного корпуса. Схема корпуса представлена на рис. 10.

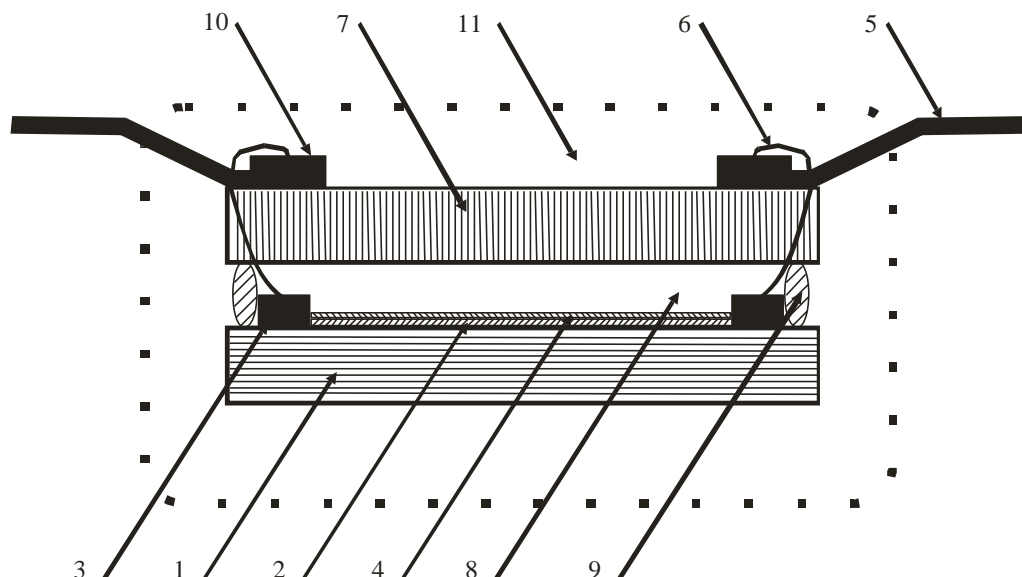


Рис.10. Схематический разрез корпуса резистора-предохранителя: 1 – кристалл резистора-предохранителя; 2 - пленка титана; 3 - контактные площадки; 4 - пассивирующее покрытие из диоксида титана; 5 - внешние контактные ножки корпуса; 6 - золотая проволока диаметром 30 мкм; 7 – крышка; 8 – воздушный зазор; 9 – акриловый герметик; 10 – эпоксидная смола; 11 – высоковольтный компаунд.

Во внутреннем объеме обязательно должен быть кислород или воздух. Межсоединения контактных площадок с внешними контактными ножками корпуса выполнялись методом сварки расщепленным электродом с использованием золотой проволоки диаметром 30 мкм. Для крышки использован ситалл марки СТ50-1. Внешние контактные ножки корпуса выполнены из биметаллической проволоки медь-серебро диаметром 0,26 мм. Герметизация резисторов-предохранителей должна обеспечить два условия: не допустить попадания внутрь корпуса продуктов из внешней среды, а также герметизирующего состава. Поэтому герметизация проводилась в 2 этапа: предварительная герметизация акриловым герметиком и окончательная герметизация специальным компаундом. Сушка акрилового герметика выполнялась в 2 этапа: в течение суток при комнатной температуре и 1 час при температуре 90 °С. Сушка компаунда проводилась также в два этапа: в течение суток

при комнатной температуре и затем 1 час при температуре 130°C. Внешний вид готовых изделий показан на рис. 11.

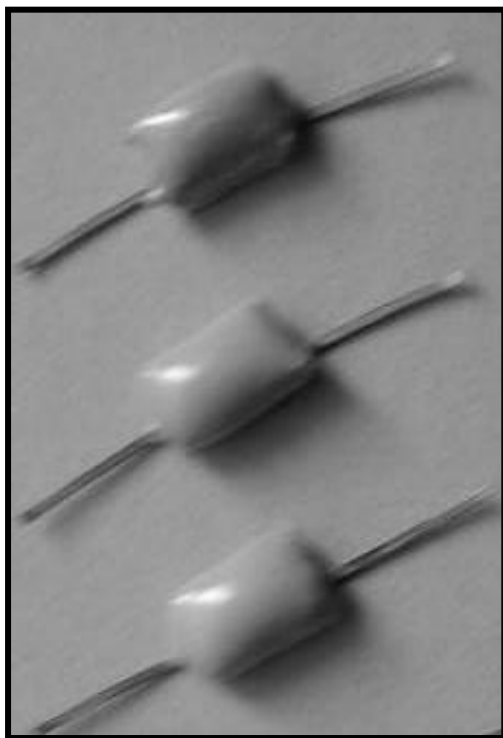


Рис. 11. Готовые резисторы-предохранители

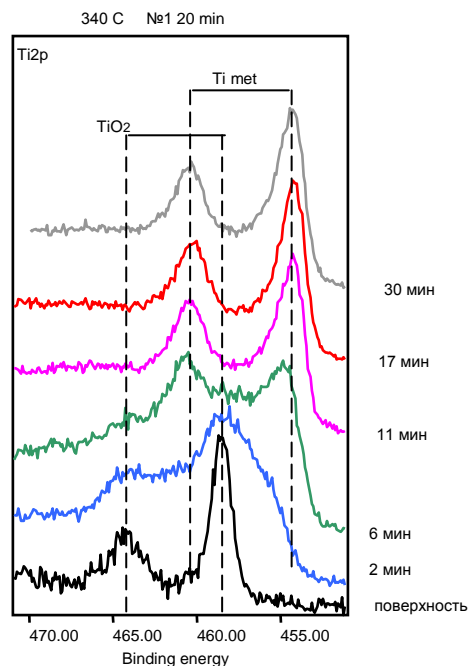


Рис. 12. Послойные рентгеновские фотоэлектронные спектры полоски предохранителя после технологической термообработки

**В шестой главе** рассмотрены вопросы экспериментального исследования резисторов-предохранителей. Химический состав поверхностного слоя токопроводящей полоски, прошедшей различные режимы термообработки при пассивации, исследовался с помощью методики рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). На рис. 12 показаны послойные рентгеновские фотоэлектронные спектры токоведущей дорожки после операции стандартного отжига в течение 20 минут при температуре 350°C. Время травления ионами аргона в минутах указано справа от графика. Энергия связи электронов для металлического Ti составляет 453.8 эВ, для TiO<sub>2</sub> – 458.5 эВ. На спектрах хорошо видно изменение состава пленки от TiO<sub>2</sub> на поверхности образца до чистого Ti.

Для экспериментальной оценки материала подложки в едином технологическом цикле были изготовлены партии предохранителей на подложках из сапфира, ниобата лития, ситалла, поликора и монокристаллического кварца (диоксид кремния). Операцию «стандартного высоковольтного теста», т.е моделирования рабочего

режима в очень жестких условиях, выдержали только подложки из ниобата лития, кварца и сапфира. Дальнейшие испытания предохранителей на пережигание показали, что на ниобате лития пережигание происходит быстро за время менее секунды, на кварце время пережигания лежит в диапазоне 1-2 секунд и подложка становится заметно теплой, на сапфире время пережигания составляет более 10 секунд и кристалл нагревается до температуры более 100°C. Это подтвердило правильность выбора материала подложки на основе расчетных данных. Исследование пережигания макетных образцов резисторов-предохранителей проводилось с видеосъемкой внешнего вида и измерением протекающего тока на осциллографе. Установлено, что пережигание в режиме короткого замыкания происходит за время около 5 мс на участке длиной 2 – 5 мм. Причем завершающим этапом пережигания является дуговой разряд. Тепловые и климатические испытания предохранителей показали их высокую надежность. Облучение в высокоинтенсивном пучке Пи-мезонов в условиях, соответствующих условиям функционирования эксперимента ATLAS в течение 6 лет показало достаточную радиационную стойкость.

В целом экспериментальные исследования показали полное соответствие резисторов-предохранителей предъявляемым к ним требованиям.

## **ВЫВОДЫ**

В диссертационной работе проведена разработка теоретических основ конструирования и технологии изготовления высоковольтных резисторов-предохранителей, обеспечивающих надежную работу трековых детекторов переходного излучения.

Основные научные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Предложена новая конструкция и новый принцип срабатывания высоковольтного резистора-предохранителя. Предохранитель представляет тонкопленочный резистор в виде узкой дорожки из высокоомного тугоплавкого металла, нанесенного на поверхность диэлектрической подложки. Пережигание предохранителя осуществляется за счет окисления резистивной дорожки. Конструкция корпуса обеспечивает наличие кислорода во внутреннем объеме.
2. Проведено исследование свойств диэлектрических и токопроводящих материалов. Показано, что лучшим материалом токоведущей дорожки является титан.

Расчетами показано, что толщина пленки титана должна составлять десятки нанометров.

3. Обоснован выбор аналитической модели для анализа тепловых процессов в резисторе-предохранителе при всех возможных режимах его работы. Показано, что температура резистора-предохранителя определяется энергией тока, протекающего через резистор и теплофизическими характеристиками материала подложки, и не зависит от материала резистивной дорожки. Рассчитана оптимальная ширина резистивной дорожки, составляющая 15 мкм. Расчет показывает, что дефекты в ширине дорожки не оказывают существенного влияния на ее работу.

Рассчитана температура резистивной дорожки в форме меандра с близким расположением участков повышенной ширины. Температура таких участков растет быстрее, чем отдельных более узких участков. Поэтому топология токоведущей дорожки резистора-предохранителя не допускает формы типа меандра с близким расположением фрагментов дорожки.

4. Составлены математическая модель процесса пережигания резистора-предохранителя и программа ее расчета на языке Delphi и проведен ее анализ. Получены номограммы, позволяющие для заданного времени пережигания определить диапазон допустимых сочетаний теплофизических параметров подложки. По сочетанию теплофизических характеристик существующих диэлектрических материалов только ниобат лития может служить подложкой для тонкопленочных высоковольтных предохранителей.
5. Определены критические параметры технологического цикла: напыление пленок титана и алюминия ведется в едином вакуумном цикле методом магнетронного распыления без ионной очистки при температуре подложек 200 °С; подгонка номиналов и стабилизация параметров резисторов осуществляются путем отжига в воздушной среде в диапазоне температур 350 - 380°С после разделения подложек на кристаллы. В процессе изготовления обязательно многократное проведение операций выдержки и тестирования.

Основные практические результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Разработана технология изготовления высоковольтных резисторов-предохранителей. Изготовлено более 60 000 предохранителей.

2. Проведены экспериментальные исследования электрических и эксплуатационных характеристик полученных резисторов-предохранителей, подтвердившие правильность технических решений и соответствие параметров всем заданным техническим требованиям.
3. Поставлена в ЦЕРН для проведения эксперимента «ATLAS» на крупнейшем в мире коллайдере протонов большая партия (60 000 штук) резисторов-предохранителей двух номиналов (50 кОм и 90 кОм). Небольшие партии предохранителей поставлены ряду организаций для защиты высоковольтных блоков в аппаратуре физического эксперимента. Имеются Акты о внедрении из трех организаций.
4. Получен патент РФ на изобретение на разработанный резистор-предохранитель.

**Основные положения диссертации представлены в следующих работах:**

1. Воронов А.Ю., Бескурников А.Ю., Воронов Ю.А., Воронов С.А. Технологические особенности изготовления высоковольтных плавких предохранителей. //Научная сессия МИФИ-2003. Конференция НОЦ- CRDF “Фундаментальные исследования материи в экстремальных состояниях”: Тез. докл. – М., 2003, с. 11-12.
2. Воронов А.Ю., Бескурников А.Ю., Дикунов М.А. Семенов А.В. Автоматизированная система измерения сопротивления высоковольтных предохранителей. //Там же – М., 2004, с. 10-11.
3. Воронов А.Ю., Бескурников А.Ю., Симаков А.Б. Анализ процесса пережигания высоковольтных тонкопленочных предохранителей.//Там же–М., 2005, с. 51-52.
4. Воронов А.Ю. Моделирование тепловых процессов в высоковольтных предохранителях. // Там же – М., 2005, с. 53-54.
5. Voronov A.Y. Simakov A.B. Choice of materials for high-voltage safety fuses. International Conference ICMNE. October 2005. Moscov, Zwenigorod.
6. Воронов А.Ю., Симаков А.Б. Тепловые режимы высоковольтных тонкопленочных предохранителей. //Научная сессия МИФИ-2006. IV Конференция НОЦ- CRDF “Фундаментальные исследования материи в экстремальных состояниях”: Тез. докл. – М., 2006, с. 53-54.
7. Воронов А.Ю. Технологические особенности тонкопленочных предохранителей для высоковольтной аппаратуры. Труды 13й Всероссийской межвузовской

научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика-2006», апрель 2006 г. г. Москва, МИЭТ.

8. Воронов А.Ю., Симаков А.Б. Аналитический подход к расчету температуры высоковольтных тонкопленочных предохранителей. //Научная сессия МИФИ-2008. VI Конференция НОЦ- CRDF “Фундаментальные исследования материи в экстремальных состояниях”: Тез. докл. – М., 2008, с. 71.
9. Воронов А.Ю., Симаков А.Б. Выбор материалов для высоковольтных тонкопленочных предохранителей. // Инженерная Физика. 2006. № 4. С.5-10 (из перечня изданий, рекомендованных ВАК).
10. Воронов А.Ю., Симаков А.Б. Тепловые режимы электротермических преобразователей для детекторов ионизирующего излучения. // Датчики и системы. 2008. № 10. С. 44-47. (из перечня изданий, рекомендованных ВАК)
11. Воронов А.Ю. Воронов С.А., Онищенко Е.М., Симаков А.Б. Высоковольтный резистор-предохранитель. // Патент РФ №2367051, МПК: H01H85/048; H01H85/042 приоритет 21.04.08.
12. Воронов А.Ю., Воронов Ю.А., Мирошниченко В.П., Онищенко Е.М., Симаков А.Б., Тайдаков Л.О. Микроэлектронный предохранитель для электрической защиты газоразрядных аэроионных детекторов альфа и бета-радиоактивности. // Инженерная Физика. 2011. № 3. С.3-11 (из перечня изданий, рекомендованных ВАК).