

# Формирование пиролитических углеродных плёнок на диэлектрических стержнях с помощью плазменного разряда

Е.А. Богомолова, А.Н. Савин, Н.П. Зубков, Е.В. Медянцева

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

**Аннотация:** В работе рассмотрен способ формирования пиролитических углеродных плёнок с заданным профилем градиента сопротивления на диэлектрических стержнях с помощью плазменного разряда. Источник питания дуги переменного тока, изготовлен на основе автогенератора-инвертора по схеме ZVS-драйвера (Zero Voltage Switching). Разработанное программное обеспечение реализует управление параметрами техпроцесса и контроль их величин в процессе изготовления СВЧ поглотителей для ЛБВ. Погрешность профиля градиента сопротивления пиролитического углеродного покрытия не превышает 10%.

**Ключевые слова:** диэлектрические опоры, спиральная ЛБВ, СВЧ поглотитель

## 1. Введение

В настоящее время в спиральных ЛБВ широко применяются пленочные СВЧ поглотители энергии, наносимые на диэлектрические опоры замедляющей системы. В качестве материала СВЧ поглотителей наиболее привлекательны пиролитические пленки углерода, характеризующиеся хорошей электро- и теплопроводностью, широким спектром электромагнитного поглощения, термостойкостью, химической инертностью, хорошей адгезией к несущим деталям [1].

Как известно, получение минимальных отражений от СВЧ поглотителя обеспечивается плавным изменением затухания по определенному закону. Получение таких нерегулярных по длине пиролитических углеродных покрытий в классических тепловых реакторах вызывает технологические проблемы, т.к. скорость осаждения углерода пропорциональна температуре, а температура внутри реактора практически постоянна (невозможно создать перепад температур до  $10^{\circ}/\text{мм}$ ).

Следовательно, актуальными являются исследования по разработке новых способов осаждения пиролитических пленок углерода на диэлектрические опоры и оптимизации технологического процесса для получения плёнок требуемого состава и свойств.

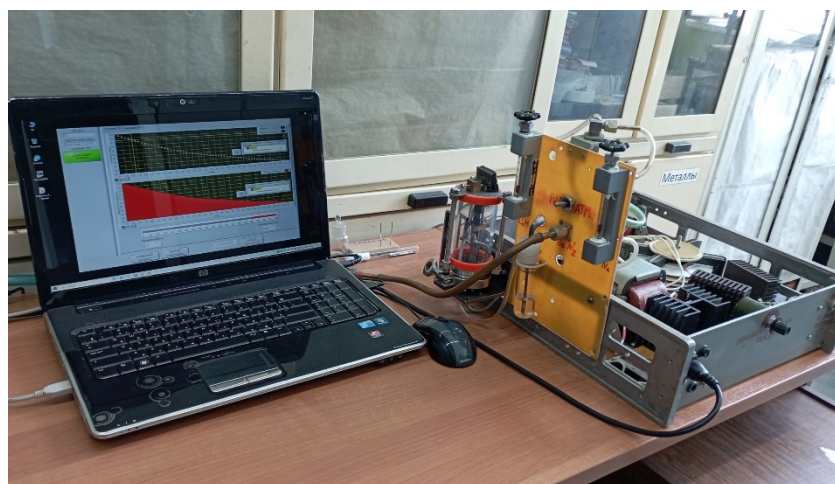
В работе рассмотрен способ формирования пиролитических углеродных плёнок с заданным профилем градиента сопротивления на диэлектрических стержнях с помощью плазменного разряда в потоке газовой смеси инертный газ-углеводороды.

## 2. Установка нанесения пиролитических углеродных плёнок с помощью плазменного разряда

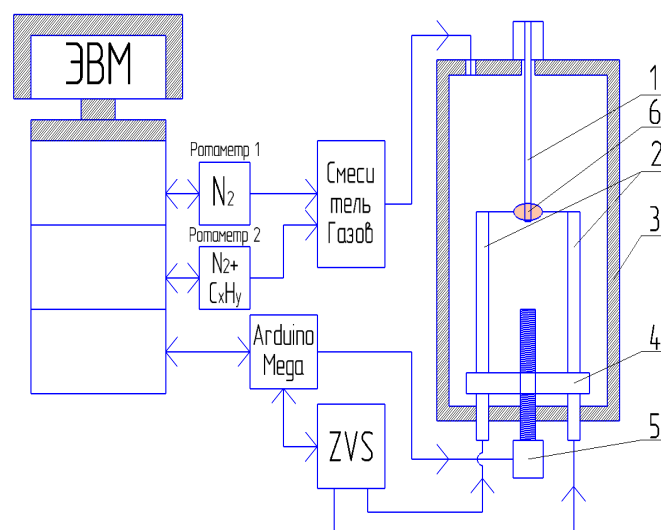
Формирование нерегулярного пиролитического углеродного покрытия на достаточно тонких диэлектрических стержнях возможно осуществить, например, в относительно узком плазменном дуговом разряде в газовой среде, состоящей из инертного газа и углеводорода. Однако при этом требуется точно контролировать и жёстко поддерживать требуемые параметры процесса пиролиза: время нанесения углерода на заданном участке диэлектрика, мощность плазменного генератора, процентное содержания углеводородов в проточном плазменном реакторе и т.д.

Такой подход предполагает полную автоматизацию процесса пиролиза на основе использования современных микроконтроллерных средств измерения и управления параметрами техпроцесса, объединённых в систему с помощью ЭВМ, функционирующей под управлением соответствующей программы.

На рисунке 1 представлен внешний вид разработанного варианта такой автоматизированной установки, осуществляющей формирование пиролитических углеродных плёнок с заданным профилем градиента сопротивления на диэлектрических стержнях с помощью плазменного разряда. На рисунке 2 приведена функциональная схема установки.



**Рисунок 1.** Установка пиролиза для нанесения пиролитических углеродных покрытий на диэлектрические стержни с помощью плазменного разряда.



**Рисунок 2.** Функциональная схема установки нанесения пиролитических углеродных плёнок на диэлектрические стержни. 1 – диэлектрический стержень; 2 – вольфрамовые электроды; 3 – корпус проточного реактора; 4 – устройство перемещения электродов; 5 – шаговый двигатель; 6 – плазменный разряд.

Источник питания высоковольтной электрической плазменной дуги переменного тока, изготовлен на основе автогенератора-инвертора, выполненного на базе двух MOSFET-транзисторов, по схеме ZVS-драйвера (Zero Voltage Switching) [2], подключенного к первичной обмотке повышающего, резонансного трансформатора с ферритовым магнитопроводом. Изменение питающего автогенератор-инвертор

постоянного напряжения позволяет управлять мощностью плазменной дуги.

Использование ZVS-драйвера обеспечивает защиту от выгорания транзисторов при коротком замыкании на выходе трансформатора и автоматическое поддержание стабильной генерации на резонансной частоте (в нашем случае ~6 кГц) трансформатора, при изменении нагрузочных параметров плазменной дуги переменного тока в процессе пиролиза.

Электрическая дуга зажигается в рабочей смеси газов при нормальном атмосферном давлении за счёт высоковольтного пробоя межэлектродного промежутка между вольфрамовыми электродами по управляющей команде, поступающей на твердотельное реле, включающее питание ZVS-драйвера (рисунок 3). Мощность разряда 20÷40 Вт определяет температуру и требуемый диаметр (1÷2 мм) плазменного шнура, при которых обеспечивается процесс пиролиза.



**Рисунок 3.** Процесс формирования пиролитического углеродного покрытия на диэлектрическом стержне с помощью плазменного разряда.

Переменное по толщине (с определенным заданным профилем сопротивления) углеродное покрытие формируется за счёт установленной и контролируемой управляющей программой скорости механического перемещения вольфрамовых электродов с высоковольтным плазменным разрядом между ними вдоль диэлектрического стержня, на который осаждается пироуглерод из проточной смеси паров углеводородов и инертного газа внутри реактора при нормальных атмосферных условиях.

Программно задаваемый поток газовой смеси в реакторе обеспечивает удаление продуктов распада углеводородов из области плазменной дуги и требуемое постоянное содержание в диапазоне 10÷25 % углеводородов от общего объема в газовой смеси инертный газ-углеводороды, что в свою очередь обеспечивает требуемый качественный состав и скорость осаждаемой углеродной пленки на диэлектрическом стержне. При меньших концентрациях углеводородов скорость осаждения пиролитической пленки низкая, при больших появляется сажа.

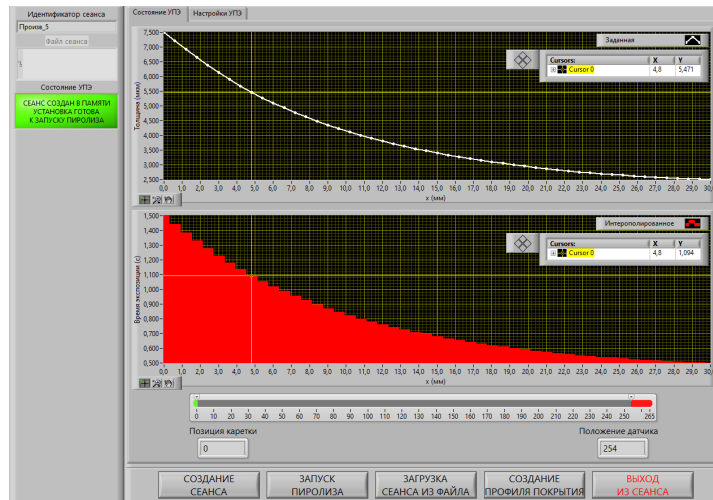
Плазменный высоковольтный электрический разряд при нормальных атмосферных условиях экономически выгоден, так как для процесса пиролиза не требуется дорогих вакуумных установок и, в тоже время, обеспечивает большую скорость осаждения углеродной пленки, чем при низких давлениях.

В качестве «инертного» газа на данном этапе использовался азот, а качестве углеводородов – пары этилового и изопропилового спиртов, гексан.

На рисунке 4 показан полученный на установке в результате сеанса пиролиза диэлектрический стержень из нитрида бора длиной 50 мм с нерегулярным по длине пиролитическим углеродным покрытием. При его изготовлении задавался профиль близкий к экспоненциальному (рисунок 5). Процесс изготовления вместе с установкой стержня в реактор занял не более 2-х минут.

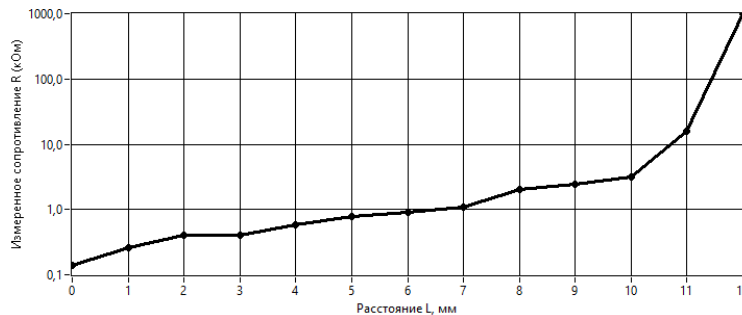


**Рисунок 4.** Диэлектрический стержень из нитрида бора с нанесённым углеродным покрытием. м. Длина стержня 50 мм.



**Рисунок 5.** Задаваемые толщина и соответствующее время экспозиции по длине диэлектрического стержня из нитрида бора в области напыления.

На рисунке 6 приведено измеренное распределение сопротивления по длине показанного на рисунке 4 диэлектрического стержня из нитрида бора в области напыления.



**Рисунок 6.** Измеренное распределение сопротивления по длине диэлектрического стержня из нитрида бора в области напыления.

Как видно из рисунка 6, измеренное распределение сопротивления по длине

диэлектрического стержня, как и требовалось, близко к экспоненциальному (с учётом логарифмического масштаба по оси сопротивления) в области значимых толщин (на участке от 0 мм до 10 мм вдоль стержня).

### 3. Заключение

Показана принципиальная возможность плазменного нанесения пиролитических пленок углерода с требуемым градиентом СВЧ потерь без использования вакуумного оборудования на диэлектрические стержни, применяемые в качестве опор замедляющих систем спиральных ЛБВ.

Применение разработанной методики позволяет изготавливать СВЧ-поглотители с заранее программируемым профилем градиента сопротивления с погрешностью не более 10%, при этом затрачиваемое на изготовление одного поглотителя время не превышает двух минут.

Данная методика заявлена в качестве изобретения (заявка №2023132703, приоритет 11.12.2023, решение о выдаче патента 28.03.2024).

#### Список литературы

1. Будник В.В., Хахилева Г.А. Методы измерения параметров высокочастотных систем ЭВП с протяженным взаимодействием / Обзоры по электронной технике, вып.3(188). Серия: Электроника СВЧ. –М: ЦНИИ "Электроника", 1974. – 129 с.
2. ZVS генератор, сборка и принцип работы. – URL: <https://habr.com/ru/articles/549872> (15.05.2023).