УДК 621.793.09

# Реализация триодной системы электродов на установке плазменной обработки МРС

**Зиннатуллин Артур Расимович**(*) archi.zinna.2002@mail.ru
**Басов Богдан Алексеевич** basovba@bmstu.ru
**Моисеев Константин Михайлович** k.moiseev@bmstu.ru

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

***Аннотация.*** *Работа посвящена реализации триодной системы электродов на стенде плазменной поляризации ПВДФ пленок. Описана конструкция изолирующего кейса для балластных резисторов линий питания триодной системы электродов. Проведены эксперименты по поляризации ПВДФ пленок в плазме тлеющего разряда с целью сравнения эффективности работы диодной и триодной систем электродов стенда поляризации. Продемонстрировано большее повышение отклика* $d_{33}$ *у образца до* 17,5 *пКл/Н, поляризованного в течение* 5 *минут в триодной системе при потенциале* 4,2 *кВ на сетке, в сравнении с образцом с пьезомодулем* 11,4 *пКл/Н, полученным в результате поляризации в диодной системе в течение* 5 *минут при напряжении* 5,2 *кВ.*

***Ключевые слова*:** *ПВДФ, поляризация, плазма, сегнетоэлектричество, пьезокоэффициент*

# Implementation of a triode electrode system at the MPC plasma treatment plant

**Zinnatullin Artur Rasimovich**(*) archi.zinna.2002@mail.ru
**Basov Bogdan Alexeevich** basovba@bmstu.ru
**Moiseev Konstantin Mixailovich** k.moiseev@bmstu.ru

*BMSTU, Moscow, Russia*

**Absrtact.** The work is devoted to the implementation of a triode electrode system on a setup for plasma polarization of PVDF films. The design of an insulating case for ballast resistors of the power supply lines of the triode electrode system is described. Experiments on polarization of PVDF films in glow discharge plasma in order to compare the efficiency of the diode and triode electrode systems on the polarization stand were carried out. A greater increase in the $d_{33}$ response up to 17,5 pC/N was demonstrated in the sample poled for 5 minutes in the triode system at a grid potential of 4.2 kV, in comparison with the sample with a piezoelectric modulus of 11.4 pC/N, obtained as a result of poling in diode system for 5 minutes at a discharge voltage of 5.2 kV.

**Keywords:** PVDF, polarization, plasma, ferroelectricity, piezoelectric effect

**Введение.** Одними из наиболее перспективных материалов являются полимерные сегнетоэлектрические пленки на основе поливинилиденфторида (ПВДФ), которые активно используются в космическом приборостроении, гибкой электронике, акустике [1, 2]. Тенденция изучения ПВДФ пленок связана с их механической и технологической гибкостью, химической стойкости, высоким пробойным полям.

После синтеза пьезоэлектрические свойства ПВДФ пленки слабо выражены. Для придания пленке высоких пьезоэлектрических свойств применяется операция поляризации.

Процесс поляризации характеризуется ориентацией диполей сегнетоэлектрической пленки под действием электрического поля напряженностью более 100 МВ/м [3]. Одним из способов поляризации является метод поляризации с использованием плазмы тлеющего разряда.

Плазменная поляризация проводится на стенде плазменной поляризации, сконструированном на базе установки МРС и оборудованном тремя высоковольтными токовводами и диодной системой электродов.

Поляризация в плазме тлеющего разряда в диодной конфигурации имеет недостаток — значение потенциала, накапливаемого на поверхности пленки, расположенной на аноде, меньше значения потенциала, подаваемого на катод. Триодная конфигурация лишена данного недостатка.

Триодная система электродов включает в себя верхний электрод (катод) и электрод-сетку, между которыми зажигается тлеющий разряд, а также заземленный нижний электрод (анод), на котором располагается образец. Сетка позволяет варьировать потенциал зарядки поляризуемой пленки, повышает однородность поляризации и уменьшает вероятность возникновения пробоя [4].

Для реализации схемы триодной системы электродов (рис. 1) на стенде плазменной поляризации применяются балластные резисторы ТВО-10 с номинальным сопротивлением 300 кОм, предназначение которых — ограничение тока в случае перегрузки напряжения или замыкания между верхним электродом (катодом) и сеткой [5]. Требуется обеспечить изоляцию балластных резисторов, так как через линии питания на электроды подаются потенциалы до 30 кВ. В связи с этим необходимо разработать изолирующий кейс.

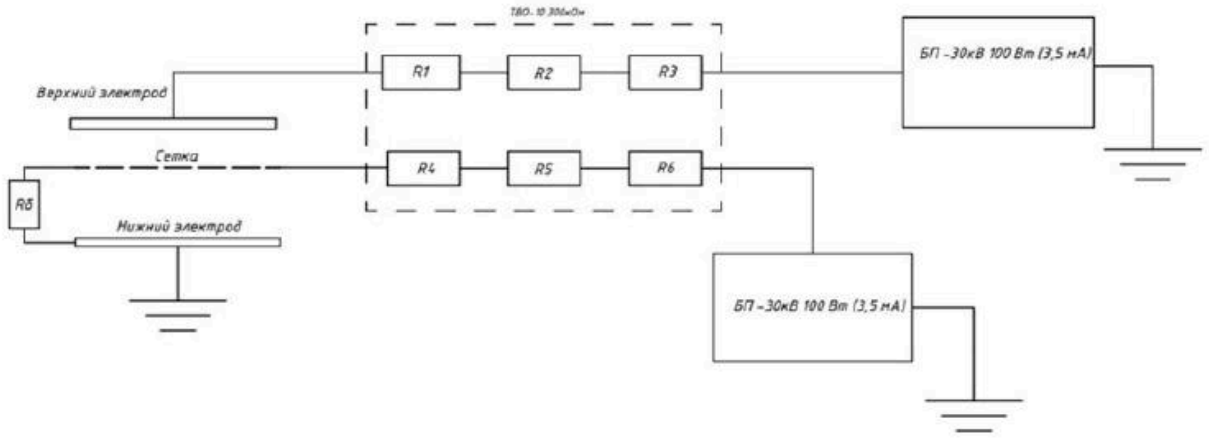



**Рис. 1.** Схема питания триодной системы электродов

Изготовление изолирующего кейса осуществляется методом 3D-печати из PLA-пластика. Для изготовления изолирующей крышки применен фторопласт (Ф-4).

Для обеспечения компактности конструкции и изоляции высоковольтных линий питания разработан специальный корпус из PLA пластика (рис. 2).

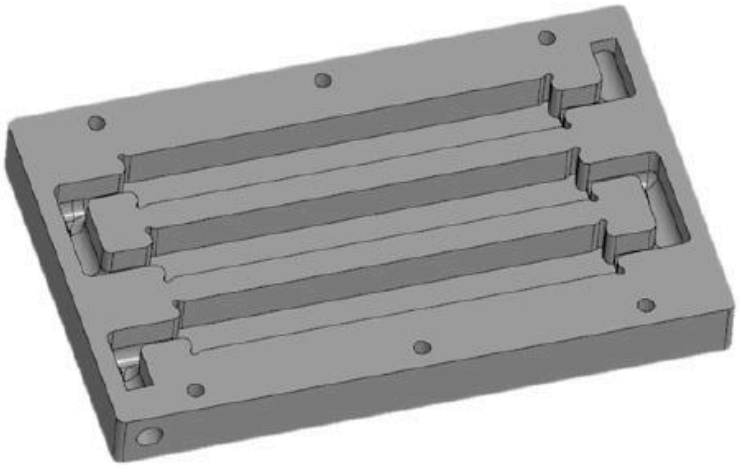


**Рис. 2.** Изолирующий корпус

Спаянные линии балластных резисторов каждой линии укладываются в пазы изолирующего корпуса, после чего кейс собирается по многоярусному принципу (рис. 3).

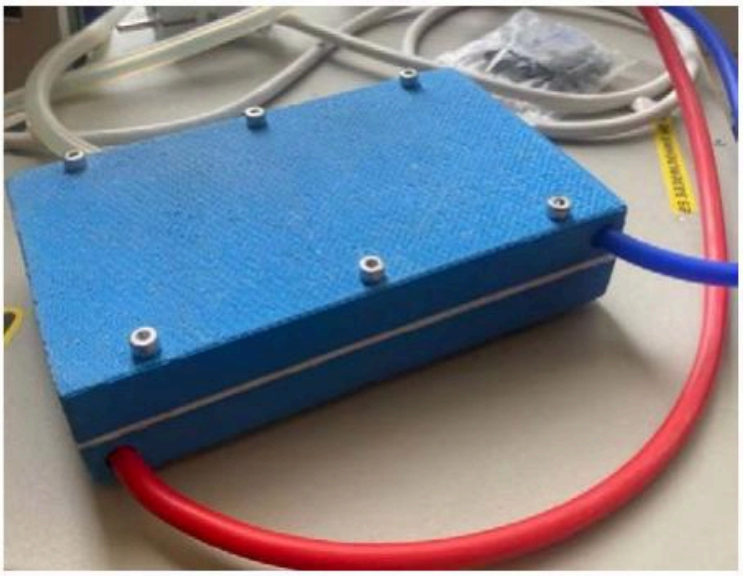


**Рис. 3.** Двухъярусный изолирующий кейс

Тестовые запуски демонстрируют факт того, что электропрочность стенок корпуса достаточна для изоляции элементов линий питания электродов при работе с потенциалами величиной до 30 кВ.

**Материалы и методы.** Для сравнения конфигураций стенда плазменной обработки проведены эксперименты по поляризации образцов ПВДФ пленки (PolyK, США) толщиной 25 мкм, размерами 20х20 мм с предварительно нанесенными на сторону №2 тонкопленочными медными электродами.

Пьезокоэффициент $d_{33}$ образцов измеряется с двух сторон методом Берлинкура на измерительном приборе YE2730A (Sinocera Piezotronics, КНР) при калиброванной нагрузке 0,25 Н и частоте 110 Гц в 12 точках.

**Результаты.** Измеренные значения пьезокоэффициента $d_{33}$ образцов, поляризованных при различных режимах плазменной обработки, приведены в таблице.

**Результаты эксперимента**

| № образца | Тип системы электродов | Напряжение, кВ | Время, мин | Среднее значение $d_{33}$, пКл/Н |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Диод | 5,6 | 3 | 9,2 |
| 2 | Диод | 5,2 | 5 | 9,4 |
| 3 | Диод | 5,2 | 5 | 11,4 |
| 4 | Триод | 4,7 — катод<br>4,2 — сетка | 5 | 17,5 |
| 5 | Триод | 5,2 — катод<br>4,5 — сетка | 5 | 13,4 |
| 6 | Триод | 5,2 — катод<br>4,5 — сетка | 6 | 13,8 |

Триодная система при сравнимом и меньшем напряжениях позволила достичь больших значений пьзокоэффициента, чем диод.

**Обсуждение полученных результатов.** В значениях пьезокоэффицента $d_{33}$ поляризованных пленок прослеживается прямая зависимость от времени поляризации, при увеличении времени поляризации повышается отклик образца. При диодной конфигурации максимальное значение пьезокоэффициента $d_{33}$ составляет 11,4 пКл/Н при напряжении 5,2 кВ, что значительно меньше, чем при триодной конфигурации, где значение составляет 17,5 пКл/Н при напряжении 4,2 кВ на сетке.

**Заключение.** Разработанный в рамках модернизации стенда плазменной поляризации изолирующий кейс для балластных резисторов обеспечивает безопасную и стабильную работу линий питания триодной системы электродов. Эксперимент по сравнению эффективности работы диодной и триодной систем электродов показал, что при меньшем напряжении и времени поляризации триодная система превосходит диодную систему.

В дальнейшем планируется отработка режимов с повышенными потенциалами, подаваемыми на сетку, что позволит увеличить значение пьезокоэффициента $d_{33}$, приобретаемое образцами ПВДФ пленки в результате процесса поляризации с использованием плазмы тлеющего разряда.

## Список источников

[1] Кочервинский В.В. *Применение сегнетоэлектрических полимеров в технике и медицине*. Москва, Palmarium Academic Publishing, 2021.

[2] Кочервинский В.В. Свойства и применение фторсодержащих полимерных пленок с пьезо- и пироактивностью. *Успехи химии*, 1994, т. 63, вып. 4, с. 383–388. https://doi.org/10.1070/RC1994v063n04ABEH000090

[3] Сергеева А.Е. *Поляризация и пространственный заряд в сегнетоэлектрических полимерах*. Одесса, ОНТУ, 2014.

[4] Giacometti J.A., Osvaldo N.O. Corona charging of polymers. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, vol. 27, iss. 5, pp. 924–943.

[5] Басов Б.А., Моисеев К.М. *Разработка системы электродов для поляризации ПВДФ пленок в малогабаритной плазменной установке*. Казань, КНИТУ, 2023.