

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 537.9,537.31,537.521.7

Шманай  
Егор Евгеньевич

Взаимосвязь структуры алмазоподобных (*DLC*) наноразмерных слоев с их  
электрическими свойствами

**АВТОРЕФЕРАТ**  
на соискание степени магистра  
по специальности 1-41 80 01 «Микро- и наноэлектроника»

\_\_\_\_\_ Шманай Е.Е.

Научный руководитель  
Федотова Юлия Александровна  
доктор физ.-мат. наук, профессор

\_\_\_\_\_

Минск 2023

Работа выполнена в лаборатории «Физика перспективных материалов» Научно-исследовательского учреждения «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета

Научный руководитель

**Федотова Юлия Александровна**  
доктор физико-математических  
наук, профессор научно-  
исследовательского учреждения  
«Институт ядерных проблем»  
Белорусского государственного  
университета

Рецензент

**Галузо Валерий Евгеньевич**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры проектирования  
информационно-компьютерных систем  
учреждения образования «Белорусский  
государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Защита магистерской диссертации состоится «24» января 2023 г. года в 9:00 часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 114, тел.: 293-89-26, *e-mail*: kafme@bsuir.by.

С магистерской диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

## ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в современной физике элементарных частиц во многом обусловлен функциональными характеристиками детекторов, к числу которых относятся газоразрядные электронные умножители (ГЭУ). Актуальной задачей является повышение устойчивости ГЭУ к пробоям, возникающим в газовой среде вследствие флуктуации электронной плотности в лавине и напряжённости электрического поля. Для ограничения тока разряда можно использовать резистивные покрытия, которые, с одной стороны, будут препятствовать развитию пробоя, а с другой стороны, будут отводить избыточный заряд из электронной лавины. В качестве такого резистивного материала может быть использован алмазоподобный углерод.

Алмазоподобные покрытия (*DLC*) представляют собой разновидность аморфного углерода, в которой присутствует как  $sp^2$ -, так и  $sp^3$ -гибридизация. Айзенберг и Чабот, в первых работах провели серию экспериментов по осаждению *DLC* покрытий с использованием пучка ионов углерода и подтвердили образование алмазоподобного аморфного углерода, что и положило начало исследования *DLC*.

Данный материал отличается высокой твердостью и износостойкостью, низким коэффициентом трения, высокими изолирующими свойствами, хорошей химической стабильностью, а также высокой проницаемостью для инфракрасного излучения, что исследовано на достаточно высоком уровне. Вместе с тем, электрические характеристики *DLC* исследованы чрезвычайно мало.

Электрическое сопротивление является основным свойством материала при рассмотрении его различных применений в области сенсорики, электронных устройств, включая и ГЭУ. В соответствии со структурой *DLC* его электрические характеристики *DLC* могут варьироваться от значений, характерных для полупроводника до свойств изолятора с широкой запрещенной зоной. Они, очевидно, определяются примесями, легирующими элементами, типом гибридизации ( $sp^2$  и/или  $sp^3$ -гибридизацией), структурой и иными дефектами, которые возникают в процессе роста. На стойкость покрытий также влияют параметры технологического процесса осаждения *DLC*, а именно: энергия и угол падения ионов, температура подложки и скорость осаждения.

Во время работы ГЭУ, первичные электроны, рожденные ионизирующим излучением в газовом промежутке перед ГЭУ, дрейфуют вдоль силовых линий и фокусируются в отверстия, в которых под действием сильного электрического поля развиваются электронные лавины. Таким образом, каждое отверстие

представляет собой независимый пропорциональный счетчик. *DLC* в данном детекторе играет роль собирающего электрода (коллектора) через который протекает ток между отверстиями и *DLC*. Умноженные электроны, которые образуют лавину, а также ионизирующее излучение, которым создается первичная ионизация, вызывают деградацию *DLC*.

Все выше написанные явления так или иначе влияют на работу ГЭУ, что сказывается на его важнейших характеристиках, а именно: коэффициент усиления и энергетическое разрешение.

Таким образом, выявление взаимосвязи структуры и химического состояния осаждаемых *DLC* покрытий с соответствующими характеристиками электросопротивления позволят оптимизировать режимы их получения с целью увеличения ресурса эксплуатации ГЭУ и иных функциональных характеристик данных устройств.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы магистерской диссертации.**

Выявление взаимосвязи структуры и химического состояния осаждаемых *DLC* покрытий с соответствующими характеристиками электросопротивления позволят оптимизировать режимы их получения с целью увеличения ресурса эксплуатации ГЭУ и иных функциональных характеристик данных устройств.

### **Цель исследования.**

Установить корреляцию между электросопротивлением  $R$  покрытия *DLC*, толщиной и коэффициентом усиления в ГЭУ; структурные особенности.

### **Объект исследования.**

Наноразмерные плёнки *DLC*, осажденные на подложки кремния марки КДБ-8 площадью  $2 \times 2$  см<sup>2</sup>, стеклотекстолита на основе  $Al_2O_3$  площадью  $10 \times 10$  см<sup>2</sup> и полимера *ABS* площадью  $2 \times 2$  см<sup>2</sup>.

### **Предмет исследования.**

Структурные особенности и зависимость поперечного электросопротивления плёнок *DLC* от их толщины, взаимосвязь электросопротивления *DLC* на коэффициент усиления газовых электронных умножителей (ГЭУ).

### **Область исследования.**

Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-41 80 01 «Микро- и наноэлектроника».

### **Практическое применение.**

Основным качественным применением *DLC* является препятствие развития дуговой стадии пробоя путем локального снижения напряжения в области газового усиления. Создание резистивного покрытия, которое бы обеспечивало отведение электрического заряда за время, меньшее, чем обратная величина частоты следования электронных лавин, что позволит улучшить временное разрешение детектора.

Создание материала с оптимальным значением электросопротивления на собирающем электроде (*DLC*) умножителя позволит получать большие коэффициенты усиления частиц, вследствие повышения номинального предпробойного напряжения (увеличение напряженности поля).

#### **Теоретическая и методологическая основа исследования.**

В основу магистерской диссертации лежат результаты известных исследования белорусских и зарубежных ученых в области изучения структурных особенностей аморфных наноразмерных алмазоподобных покрытий.

Обработка полученных данных производилась с использованием программного обеспечения «*OriginPro*», объемного моделирования структуры – «*Sharp3D*».

#### **Научная новизна.**

Магистерская диссертация основана на потребности по улучшению газовых электронных умножителей колодезного типа для последующей замены вместо проволочных детекторов.

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

1. Увеличении толщины *DLC* покрытия с 22 до 70 нм приводит к уменьшению значений удельного электросопротивления с  $1,75 \cdot 10^{10}$  до  $2,4 \cdot 10^9$  Ом·м, что обусловлено уменьшением содержания  $sp^3$ -гибридизованных электронных орбиталей с 13,50% до 7,30%.

2. Увеличение значения удельного электросопротивления *DLC* покрытий позволяет повысить временную стабильность работы ГЭУ, включая высокий коэффициент усиления ( $7,8 \cdot 10^3$ ), расширенный диапазон рабочих напряжений (50 В) при пониженном активном (рабочем) токе – 0,54 мкА.

#### **Теоретическая и практическая значимость.**

Использование уже заданного значения толщины и удельного электросопротивления позволит ускорять производство коллекторных электродов для газовых электронных умножителей.

#### **Апробация результатов исследования.**

Результаты исследования были неоднократно представлены на Electronic Systems and Technologies : collection of materials of the 58th Scientific Conference of Postgraduates, Undergraduates and students of BSUIR, Minsk, April 18-22,

2022; Углеродные наноструктуры, тонкие пленки и композиты: синтез, физико-химические свойства и применения : VI Белорус.- Рос. семинар-конф., Минск, 2–5 нояб. 2022 г.; XXI International Conference Foundations Advances in Nonlinear Science: IX Intern. Conf. FANS ANPh, Minsk, 26 September-1 October, 2022.

### **Публикации.**

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в трех опубликованных работах (авторский объем 3,0 п.л).

### **Структура и объем работы.**

Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, пяти глав и заключения, библиографического списка и приложения. Общий объем диссертации – 65 страниц. Работа содержит 2 таблицы, 55 рисунков. Библиографический список включает 48 наименований.

### **Для достижения целей работы были поставлены следующие задачи.**

1. При помощи спектроскопии комбинационного рассеивания света установить взаимосвязь  $sp^3$ -гибридизованных электронных орбиталей от толщины покрытия и частоты электродугового испарителя;
2. Определить возможную модель электропереноса;
3. Определить зависимость удельного электросопротивления от толщины *DLC* покрытия;
4. Определить оптимальную толщину *DLC* покрытия для стабильности функционирования газовых электронных умножителей.

### **Краткое содержание работы.**

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

В первой главе представлен литературный обзор по исследованию структурных особенностей тонких пленок *DLC*, а также применение их в качестве коллекторного электрода в газовых электронных умножителях колодезного типа.

Во второй главе приводится краткое описание метода синтеза *DLC* покрытия и экспериментальных методик их исследования.

В третьей главе приведены результаты калибровки толщины *DLC* покрытия на кремнии от количества импульсов при синтезе пленок и изменение  $sp^3$ -гибридизованных электронных орбиталей от толщины покрытия (подложка – кремний) и частоты электродугового испарителя (подложка – ситалл).

В четвертой главе представлены результаты измерения вольт-амперных характеристик структуры  $W//DLC//Si//W$  при комнатной температуре и проведено численное определение сечения токового канала и зависимости

удельного электросопротивления от толщины *DLC* покрытий.

В последней главе исследованы газовые электронные умножители с различной толщиной *DLC* покрытия на коллекторном электроде в интегральном и индукционном режиме работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Толщина полученных *DLC* покрытий с ростом количества импульсов электродугового испарителя в процессе синтеза от 500 до 1500 увеличивается от  $d \sim 22$  до  $\sim 70$  нм, что подтверждается независимыми методами эллипсометрии и СЭМ.

По результатам спектроскопии КРС определено, что при увеличении толщины *d DLC* пленки от 22 до 70 нм, положение *G*-пика монотонно смещается от 1546 до 1562  $\text{см}^{-1}$ , а процентное содержание  $sp^3$ -гибридизованных электронных орбиталей уменьшается с 13,5% до 9,75%. При увеличении частоты электродугового испарителя в процессе синтеза от 3 Гц до 7 Гц положение *G*-пика смещается по экспоненциальному закону от 1560 до 1567  $\text{см}^{-1}$ , а процентное содержание  $sp^3$ -гибридизованных электронных орбиталей уменьшается от 9,35% до 7,3%.

Для структуры *W//DLC//Si//W* определена высота потенциального барьера, которая равна порядка  $\sim 0,8$  эВ при комнатной температуре, что очень близко к барьеру Шоттки для контактов *W//Si*.

Перестроение ВАХ в двойных логарифмических координатах  $\ln(j/AT^2) - E^{1/2}$  привело к двум линейным участкам с разными наклонами: 1 в области низких *E* и 2 при более высоких *E*, что указывает на возможность описания моделью тока, ограниченного объемным зарядом (идеальная модель Мотта-Гурни).

Из численного определения зависимости удельного электросопротивления от толщины вытекает тенденция уменьшения значения  $\rho$  для *DLC* от  $1,75 \cdot 10^{10}$  до  $2,4 \cdot 10^9$  Ом·м.

Коэффициент усиления для детекторов с различными толщинами покрытий изменяется в диапазоне от  $3,5 \cdot 10^3$  до  $7,8 \cdot 10^3$ . Прототип детектора с резистивным покрытием толщиной 94 нм характеризуется наибольшим диапазоном рабочих напряжений (50 В) при небольшом активном токе  $\sim 0,54$  мкА, коэффициентом усиления ( $7,8 \cdot 10^3$ ), временной стабильностью функционирования и считается оптимальным.

# СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

## Статьи в рецензируемых журналах

1. Влияние толщины на удельное электросопротивление тонких покрытий из алмазоподобного углерода на кремнии / И. А. Зур, Е. Е. Шманай, Ю. А. Федотова, А. А. Харченко, С. А. Мовчан // Физика твердого тела, – 2023, – Т. 65, № 1, с. 49.

2. Optimization of electrical conductivity of the anodic DLC coating of the charged particle detector // I. A. Zur, A. S. Fedotov, A. A. Kharchanka, Y. E. Shmanay, J. A. Fedotova, and S. A. Movchan / PrePrint (Nonlinear Phenomena in Complex Systems) – 2023.

3. Erosion mechanisms of DLC coatings deposited on polyimide and silicon oxide substrates exposed to a pulsed gas discharge // I. Zur, Y. Shmanay, J. Fedotova, G. Remnev, V. Uglov, S. Movchan / PrePrint (Surf. Coat. Technol) – 2023.

## Статьи в сборниках материалов конференций

4. Shmanay, Y. E. Influence of diamond-like structure of nanosized layers on their electrical conductivity / Y. E. Shmanay // Electronic Systems and Technologies : collection of materials of the 58th Scientific Conference of Postgraduates, Undergraduates and students of BSUIR, Minsk, April 18-22, 2022 / Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics ; editorial Board: D. V. Likhachevsky [et al.]. – Minsk, 2022. – pp. 921-924.

## Тезисы докладов на научных конференциях

5. Эрозия DLC-покрытий GEM-детекторов при воздействии поверхностного разряда атмосферного давления / И.А. Зур, Е.Е. Шманай, Г.Е. Ремнёв, Ю.А. Федотова // Углеродные наноструктуры, тонкие пленки и композиты: синтез, физико-химические свойства и применения : VI Белорус.-Рос. семинар-конф., Минск, 2–5 нояб. 2022 г. : тез. докл. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: С. А. Максименко (гл.ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2022. – С. 33.

6. Optimisation of electrical propriertis of resestive coating of anode GEM detector/ Zur, I., E. Shmanay // XXI International Conference Foundations Advances in Nonlinear Science: IX Intern. Conf. FANS ANPh, Minsk, 26 September-1 October, 2022.