

УДК 537.525

О ДОПИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОМ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНКАХ, ПОЛУЧЕННЫХ В РАЗРЯДЕ С ПОЛЫМ КАТОДОМ

© 2024 г. И. А. Сорокин^{a,b,*}, Д. В. Колодко^{a,b}

^aФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино, Московская обл., 141190 Российская Федерация

^bНациональный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское шос., 31, Москва, 115409 Российская Федерация

*E-mail: iasorokin@mail.ru

Поступила в редакцию 12.12.2023 г.

После доработки 12.12.2023 г.

Принята к публикации 11.01.2024 г.

Представлены результаты измерения вольт-амперных характеристик допированных железом алмазоподобных пленок, полученных комбинированным методом физического распыления железного катода и плазмохимического осаждения в разряде с полым катодом. Показан нелинейный характер поперечной проводимости пленки, а также отмечено значительное влияние амплитудного значения напряжения развертки на амплитудное значение тока и форму вольт-амперной характеристики.

Ключевые слова: алмазоподобный углерод, плазмохимическое осаждение, разряд с полым катодом, тонкая пленка, нелинейная вольт-амперная характеристика, электропроводность

DOI: 10.31857/S0033849424100099, **EDN:** HPSZRU

1. МЕТОДИКА НАНЕСЕНИЯ ПЛЕНОК И ХАРАКТЕРИЗАЦИИ DLC(Fe)

Нанесение допированных железом алмазоподобных пленок осуществлялось в соответствии с ранее разработанной методикой нанесения, включающей в себя плазмохимическое осаждение алмазоподобной пленки из газовой фазы с помощью разряда с полым катодом (РПК) на смеси реакционного газа (пропана) и плазмообразующего газа (аргона) с параллельным физическим распылением поверхности железного катода [1].

Эксперименты проводили на вакуумном стенде объемом 5 л, откачиваемом до предельного остаточного давления 10^{-3} Па пластинчато-роторным форвакуумным и диффузионным насосами с криоловушкой. Предельное остаточное давление и парциальное давление реакционного газа (пропана) измеряли ионизационным вакуумметром ПМИ-2, давление рабочей смеси газов (пропана и аргона) — емкостным датчиком Thyracont VCC200VF4.

Напуск рабочего газа осуществляли с помощью двух регуляторов расхода газа РРГ-12.

Электродная система РПК состоит из цилиндрического железного катода (внутренний диаметр 18 мм, длина 35 мм, толщина стенки 1 мм), установленного на подвижном вводе Вильсона, который обеспечивает возможность изменения расстояния между катодом и подложкой, и анода — стенки вакуумной камеры. Подложка, на которую происходит осаждение DLC(Fe), расположена напротив катода РПК на неподвижном вводе под плавающим потенциалом, и в процессе нанесения находится на фиксированном расстоянии 40 мм. На рис. 1а представлена схема нанесения DLC(Fe) в РПК.

Пленки DLC(Fe) были синтезированы на подложке в наиболее стабильном режиме работы РПК: напряжение разряда составляло 500 В, ток 200 мА. Общее давление рабочей смеси газов (пропана и аргона) составляло 65 Па; количество металлической примеси в DLC определялось

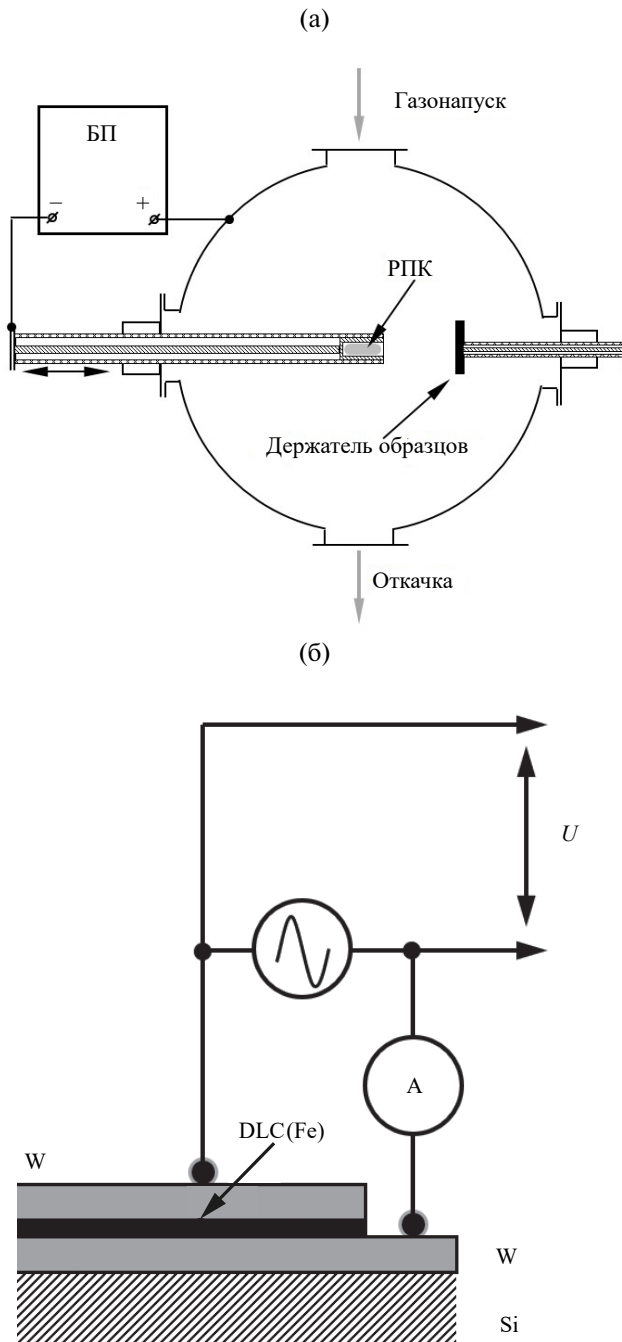


Рис. 1. Схема эксперимента (а) и измерения проводимости (б) алмазоподобной пленки: БП — блок питания, А — пикоамперметр.

значением парциального давления пропана, которое варьировалось в пределах от 0.03 до 0.1 Па, при этом доля железа в пленке составляла от 40 до 1 ат. % соответственно. Малая доля пропана в газовой смеси не влияла на рабочие параметры РПК во всем используемом диапазоне.

В качестве подложек были использованы пластины Si(100). Для исследования электрических свойств получаемых пленок на поверхность крем-

ния предварительно был нанесен слой вольфрама толщиной 500 нм методом физического распыления в разряде с полым катодом [2]; после осаждения DLC для обеспечения верхнего электрического контакта наносились площадки вольфрамовой пленки диаметром 3 мм толщиной более 200 нм. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) полученных пленок DLC(Fe) исследовались двухзондовым методом. На вольфрамовые контактные площадки подавалась пилообразная развертка генератором Tektronix AFG3252; напряжение развертки измерялось 16-битным аналого-цифровым преобразователем в составе модуля ввода-вывода ICP-DAS ET-7026, а ток в цепи исследуемой пленки — пикоамперметром Keithley 6485 (А на рис. 1). Частота развертки составляла 10 мГц, амплитудное значение напряжения от 1 до 10 В. ВАХ измеряли при комнатной температуре. На рис. 1б представлена схема измерения поперечной проводимости DLC(Fe).

2. ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ DLC(Fe)

Нелинейность зависимости тока, проходящего через пленку DLC(Fe), от прикладываемого напряжения наблюдается при концентрации металлической примеси от 10 до 40 ат.%. Необходимо отметить, что увеличение доли металлической примеси снижает напряжение пробоя пленки и, как следствие, безопасный для целостности DLC диапазон развертки сужается. Значение напряженности электрического поля в пленке, при котором происходит необратимое изменение проводимости (пробой) в работе оценивается $\sim 10^8$ В/м.

На рис. 2 представлен пример временных зависимостей тока для различных значений амплитудного значения напряжения развертки, $U_m = 1.0, 5.0, 7.5, 10$ В.

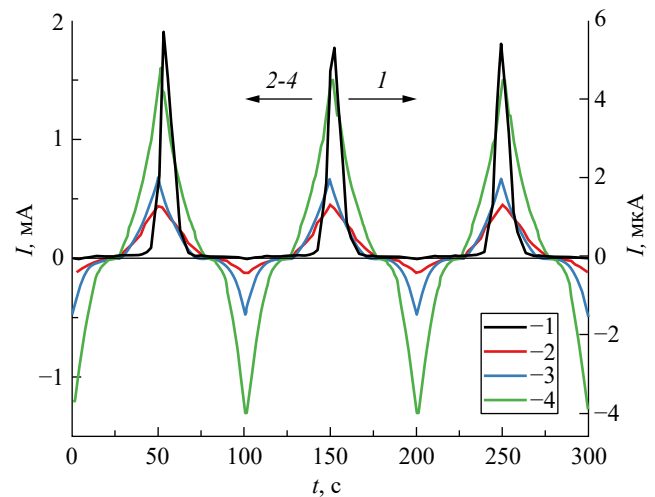


Рис. 2. Зависимость тока в цепи DLC(Fe) при различных значениях амплитуды напряжения развертки: $U_m = 1$ (1), 5 (2), 7.5 (3) и 10 В (4).

По мере увеличения напряжения развертки наблюдается изменение как величины тока, проходящего через пленку, так и формы ВАХ. При низком значении амплитудного значения напряжения развертки $U_m = 1$ В характеристика асимметрична относительно нуля. По мере увеличения U_m зависимость от полярности прикладываемого напряжения становится менее выраженной, при этом амплитудное значение тока увеличивается пропорционально U_m . На рис. 3 представлены ВАХ пленки DLC(Fe).

При переходе напряжения развертки через ноль наблюдается нелинейность зависимости тока через DLC(Fe) от прикладываемого напряжения, характерная для наноструктур на основе DLC [3, 4]. Для более толстых (от 100 нм) пленок DLC(Fe) при постоянной развертке напряжения было обнару-

жено, что в течение длительного периода времени (до 30 мин) происходит плавное увеличение тока до стационарного значения (см. рис. 4).

Возможно, данный эффект может быть связан с перестройкой внутренней структуры нанокompозита и миграцией областей различной проводимости под действием внешнего электрического поля.

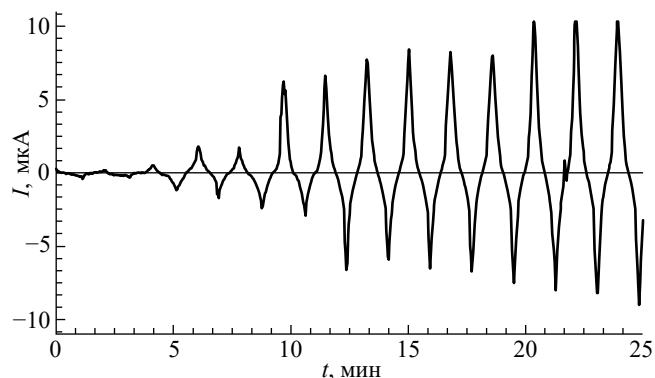


Рис. 4. Динамика тока в цепи DLC(Fe) толщиной 200 нм при постоянной развертке напряжения, $U_m = 1$ В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что вольт-амперная характеристика допированных железом алмазоподобных пленок, полученных комбинированным методом физического распыления железного катода и плазмохимического осаждения в разряде с полым катодом, имеет нелинейный характер при концентрации металлической примеси от 10 до 40 ат.%. Для пленок толщиной ~50 нм показано, что при напряжении развертки до 1 В наблюдается асимметричная ВАХ. При толщине аналогичных пленок более 100 нм обнаружен эффект постепенного увеличения проводимости, время которого может достигать 30 мин при непрерывной развертке ВАХ с частотой 10 МГц, что может свидетельствовать о постепенном формировании токового канала в DLC(Fe).

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00276).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокин И.А., Колодко Д.В., Краснобаев К.И. // РЭ. 2020. Т. 65. №3. С. 288.
2. Sorokin I.A., Kolodko D.V. // Vacuum. 2023. V. 207. Article No. 111570.
3. Vedenev A. S., Luzanov V. A., Rylkov V. V. // Semiconductors. 2019. V. 53. № 14. P. 1970.
4. Николаев С.Н., Веденев А.С., Лузанов В.А. и др. // РЭ. 2021. Т. 66. № 10. С. 1024.

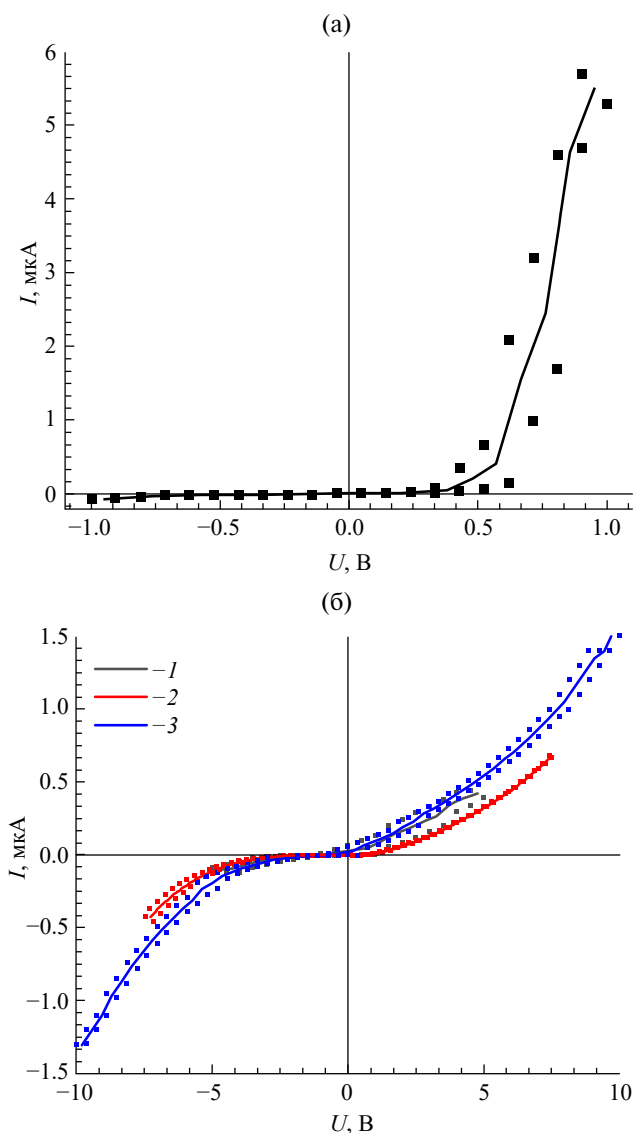


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики тонкой пленки DLC(Fe) для различных значений амплитуды напряжения развертки: а) $U_m = 1$ В (сплошная кривая), б) $U_m = 5$ (1), 7.5 (2) и 10 В (3).

ON IRON-DOPED DIAMOND-LIKE FILMS PRODUCED IN A HOLLOW CATHODE DISCHARGE

I. A. Sorokin^{a,b,*}, D. V. Kolodko^{a,b}

^a*Fryazino Branch Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS,
Vvedenskii Squar. 1, Fryazino, Moscow Region, 141190 Russian Federation*

^b*National Research Nuclear University MEPhI,
Kashirskoe Shosse, 31, Moscow, 115409 Russian Federation*

**E-mail: iasorokin@mail.ru*

Received December 12, 2023, revised December 12, 2023, accepted January 11, 2024

The paper presents the results of measuring the current-voltage characteristics of iron-doped diamond-like films obtained by a combined method of physical sputtering of an iron cathode and plasma-chemical deposition in a hollow-cathode discharge. The nonlinear nature of the transverse conductivity of the film and a significant influence of the amplitude value of the sweep voltage on the amplitude value of the current and the shape of the current-voltage characteristic were shown.

Keywords: diamond-like carbon, plasma-chemical deposition, hollow-cathode discharge, thin film, nonlinear current-voltage characteristic, electrical conductivity