

04;11

Низкоэмиссионные углеродные покрытия для управляющих сеток электровакуумных приборов высокой мощности

© Р.К. Яфаров, Н.О. Шабунин

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, Россия
E-mail: pirpc@yandex.ru

Поступило в Редакцию 21 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 27 декабря 2022 г.

Принято к публикации 28 декабря 2022 г.

Исследовано влияние дипольной поляризации углеродных пленочных покрытий на их вторичную эмиссию электронов. Показано, что плазменное фторирование углеродных покрытий с низким удельным поверхностным сопротивлением, полученных в микроволновой плазме паров этанола низкого давления, увеличивает работу выхода электронов на 0.6 eV и уменьшает вторичную электронную эмиссию более чем в 2 раза. Результаты могут быть использованы для получения коллекторов и антиэмиссионных покрытий на сеточных электродах мощных электровакуумных устройств СВЧ- и субтерагерцевого диапазонов.

Ключевые слова: микроволновая плазма, углеродная пленка, плазменное фторирование, работа выхода, вторичная электронная эмиссия.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.05.54669.19227

Мощные электровакуумные приборы (ЭВП) СВЧ- и субтерагерцевого диапазонов широко применяются как в наземных, так и в воздушно-космических радиотехнических устройствах, для которых требуется постоянное совершенствование эксплуатационных характеристик. Все более высокие требования по надежности и долговечности предъявляются, в частности, к радиоаппаратуре, используемой для систем навигации и космической связи.

В СВЧ ЭВП с низковольтным управлением для формирования электронного пучка используются катодно-сеточные узлы, которые включают в себя металлопористый катод (МПК) с порами, заполненными барийсодержащей примесью, которая уменьшает температурный коэффициент работы выхода электронов. Увеличение излучательных мощностей достигается за счет повышения рабочей температуры МПК. При этом одновременно с увеличением плотностей электронных потоков увеличивается скорость термического испарения активных примесей, входящих в состав МПК. Осаждение примесей с низкой работой выхода на управляющую сетку в совокупности с радиационным нагревом и токоперехватом электронов первичного пучка переводит управляющую сетку в эмитирующее состояние, что отрицательно влияет на характеристики ЭВП. Это является одним из основных факторов, определяющих допустимую мощность и долговечность ЭВП.

В последние годы наиболее перспективным материалом антиэмиссионных покрытий является углерод [1–4]. Получение низких коэффициентов вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ) достигается за счет создания развитого рельефа поверхности углеродной пленки. Для этого используются наноуглеродные покрытия, включающие совокупность различных аллотропных соединений углерода с большим аспектным отношением (графена,

углеродных волокон и др.) [2], что существенно снижает коэффициент вторичной эмиссии электронов с их поверхности. Однако такие покрытия обладают высокой адсорбционной способностью из-за быстрой термализации испаренных с МПК атомов примесей. Это приводит к постепенному „зарастанию“ микрорельефа и ухудшению коэффициентов ВЭЭ в процессе эксплуатации мощных генераторных ламп.

Цель настоящей работы — получение и исследование низкоэмиссионных углеродных покрытий пассивных элементов конструкции катодно-сеточных узлов мощных СВЧ ЭВП, имеющих более высокую по сравнению с традиционными углеродными покрытиями работу выхода электронов и низкую скорость переосаждения на их поверхность активных примесных добавок МПК.

Углеродные пленочные покрытия были получены плазмохимическим осаждением в микроволновой плазме паров этанола по методике, изложенной в работе [5]. Мощность микроволнового излучения и индукция магнитного поля составляли 250 W и 875 G соответственно. Полученные на поликорковых подложках при давлении паров этанола $(1-2) \cdot 10^{-2}$ Pa, напряжении смещения на подложкодержателе в процессе плазмохимического осаждения -300 V и температуре $300 \pm 10^\circ\text{C}$ углеродные пленки имеют на рентгенограммах доминирующий пик с межплоскостным расстоянием $d = 3.36 \text{ \AA}$, который соответствует отражению от плоскостей (002) кристаллической фазы графита. Указанные углеродные пленки обрабатывались в микроволновой плазме, где в качестве плазмообразующего использовался фторсодержащий газ CF_4 [5]. Обработка производилась при давлении 0.1 Pa и смещениях на подложкодержателе в интервале от 100 до 300 V в течение 5 min (рис. 1).

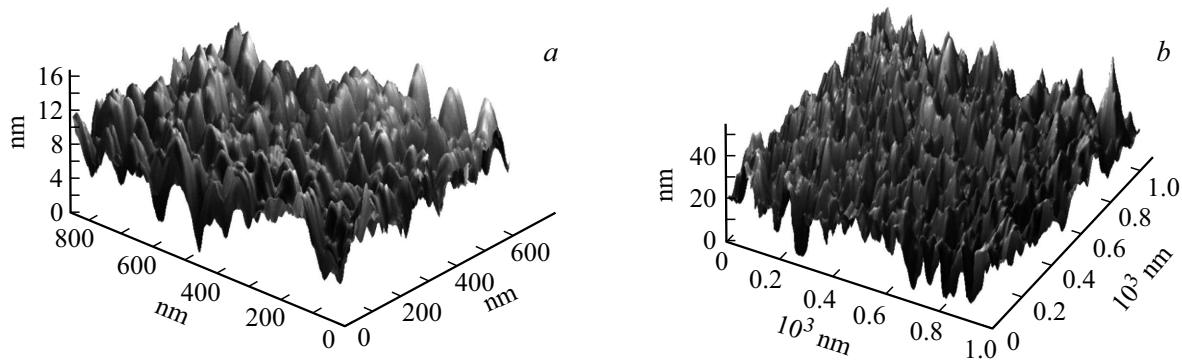


Рис. 1. АСМ-изображения углеродных пленочных структур с поверхностным сопротивлением $90 \text{ k}\Omega/\square$ до (a) и после (b) плазмохимической обработки в CF_4 .

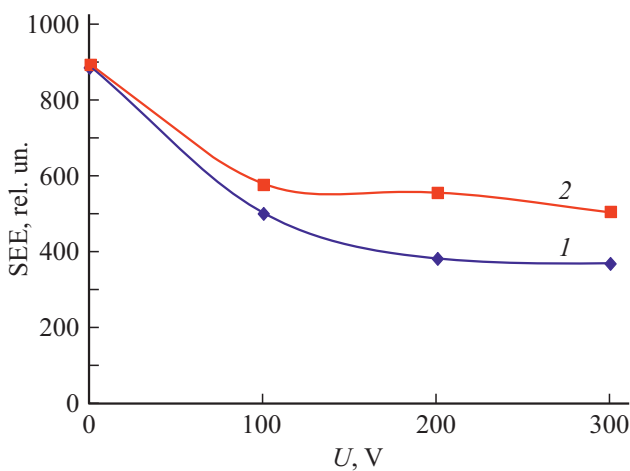


Рис. 2. Зависимости ВЭЭ от напряжения смещения на подложкодержателе при обработке в плазме CF_4 углеродных пленок до (1) и после (2) вакуумного отжига.

Измерения ВЭЭ углеродных покрытий до и после обработки в плазме CF_4 осуществлялись по изменению яркости изображений в сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-7600F согласно методике, изложенной в [6]. Определение ВЭЭ проводилось при энергии первичного пучка электронов 1 keV и напряжении на сетке детектора вторичных электронов, равном 50 V . В связи с высокотемпературными условиями эксплуатации антиэмиссионных сеточных покрытий исследованы аналогичные зависимости для обработанных в плазме CF_4 углеродных структур после их вакуумного термического отжига. Отжиг проводился при давлении 10^{-3} Pa и температуре 300°C в течение 30 min . Установлено, что обработка в плазме CF_4 уменьшает ВЭЭ углеродных пленок более чем в 2 раза. На рис. 2 представлены результаты измерений коэффициента вторичной эмиссии обработанных в CF_4 плазме углеродных пленок до (кривая 1) и после (кривая 2) отжига в вакууме. С увеличением смещения на подложкодержателе в процессе плазменной обработки ВЭЭ уменьшается, а вакуумный

отжиг обработанных в плазме CF_4 углеродных пленок увеличивает ВЭЭ их поверхности.

Расчет изменений работы выхода электронов для углеродных структур до и после плазмохимической модификации их поверхностей проводился по методике, изложенной в [7]. Оценка коэффициентов усиления электрического поля на остриях поверхностей углеродных пленок осуществлялась с использованием результатов измерений с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) P4-SPM-MDT. До обработки в плазме CF_4 наибольшую поверхностную плотность имели острия высотой около 18 nm с радиусом закругления вершин $1\text{--}2 \text{ nm}$. После плазменной обработки в CF_4 за счет травления углеродной пленки высота остриев с максимальной поверхностной плотностью увеличилась до 23 nm . Поверхностная плотность и радиус закругления вершин остриев при этом уменьшились соответственно до $4 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ и $0.5\text{--}1.0 \text{ nm}$.

Коэффициенты усиления поля K при таких микрогеометриях поверхностей, в первом приближении представляющие собой отношение высот остриев к радиусу закругления их вершин, имеют значения около $10\text{--}20$ до обработки в плазме CF_4 и $25\text{--}50$ после обработки соответственно. Эти значения коэффициентов усиления поля K использованы для определения работы выхода электронов исходя из автоэмиссионных вольт-амперных характеристик (ВАХ), построенных в координатах Фаулера–Нордгейма (рис. 3).

Автоэмиссионные свойства углеродных структур исследовались с использованием импульсных электрических полей микросекундной длительности в высоком вакууме (10^{-6} Pa) на диодной структуре, способной изменять расстояние между электродами с точностью до $1 \mu\text{m}$. Расстояние между катодной структурой и анодом составляло $40 \mu\text{m}$.

Установлено, что автоэмиссионные ВАХ углеродных пленочных структур до плазменной модификации в CF_4 и после нее существенно различаются, а ВАХ структур после плазменной модификации и отжига практически совпадают между собой (рис. 3). Идентичность автоэмиссионных ВАХ углеродных структур после плаз-

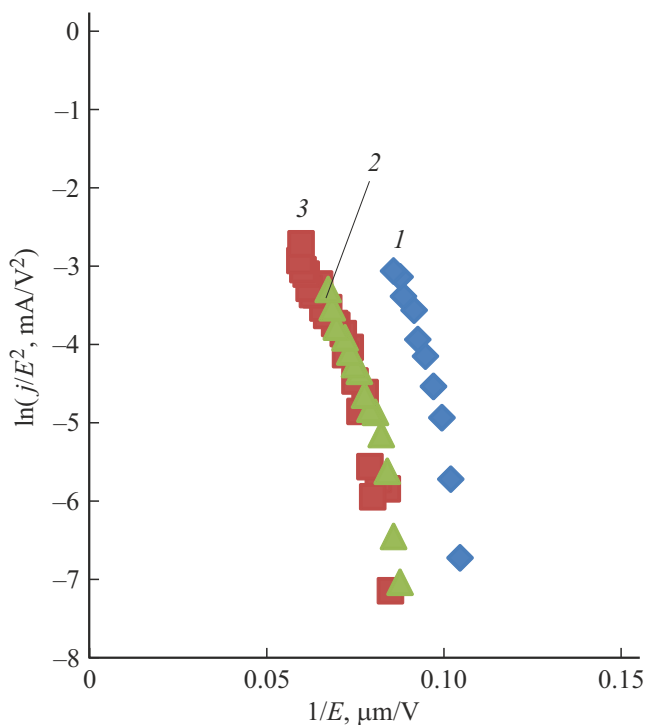


Рис. 3. ВАХ в координатах Фаулера–Нордгейма для углеродных пленочных структур до обработки в CF_4 (1), после обработки в CF_4 (2) и после обработки в CF_4 и вакуумного отжига (3).

менной обработки в CF_4 до отжига и после него хорошо коррелирует с зависимостями ВЭЭ от напряжения смещения на подложкодержателе при обработке в плазме CF_4 (рис. 2). Расчеты работы выхода электронов углеродных структур с коэффициентами усиления поля до обработки в плазме CF_4 $K_1 = 15$ и после нее $K_2 = 30$ показали увеличение указанной величины от исходных 4.6 до 5.2 eV после обработки в плазме CF_4 .

При обработке в высокоионизованной микроволновой плазме фторсодержащей газовой среды (CF_4) химически активными частицами являются ионы CF_n^+ , где $n = 0-4$, а также радикалы CF_n и нейтральные атомы фтора. При хемосорбции на углеродном покрытии они образуют адкомплексы $\text{C}=\text{CF}_m$, где $m = 1-3$ [5]. Эти комплексы пассивируют оборванные в результате ионной бомбардировки химические связи поверхностных атомов углеродного покрытия. Ввиду высокой электроотрицательности атомов фтора результатом пассивации является увеличение суммарного дипольного момента поверхности углеродного покрытия. Дипольный момент, вызванный адсорбацией, направлен от поверхности покрытия в вакуум и приводит к увеличению работы выхода электронов. При плазменной обработке с увеличением ускоряющего потенциала на подложке увеличиваются энергия и плотность тока ионов CF_n^+ [5]. Это увеличивает эффективность пассивации и суммарный дипольный момент поверхности, что выражается в увеличении

работы выхода электронов и, как следствие, уменьшении ВЭЭ с увеличением ускоряющего потенциала (рис. 2). Следствием этого является уменьшение коэффициента ВЭЭ более чем в 2 раза по сравнению с таковым для необработанного во фторсодержащей плазме углеродного покрытия.

Хемосорбированные комплексы CF_m имеют большие энергии химической связи. Наиболее сильной энергией связи обладают комплексы $\text{C}-\text{F}$ (5.6 eV), она более чем в 2 раза превышает энергию разрыва химической связи $\text{C}-\text{C}$ (2.74 eV). С увеличением индекса m прочность связей адкомплексов уменьшается. Вследствие этого при вакуумном отжиге часть адкомплексов с высокими индексами m в результате термической десорбции покидает поверхность углеродных покрытий. Это уменьшает суммарный дипольный момент поверхности и работу выхода электронов и, как следствие, увеличивает вторичную эмиссию при бомбардировке покрытий первичным пучком электронов.

Плазменное фторирование углеродных пленочных структур одновременно с увеличением работы выхода электронов уменьшает вероятность прилипания термически испаренных атомов легирующих примесей МПК. Последнее обусловлено низкой электронной поляризуемостью комплексов CF_m и, как следствие, низкой поверхностной энергией покрытия и диполь-дипольного взаимодействия Ван-дер-Ваальса при адсорбции. Это уменьшает время жизни адатомов и скорость зародышеобразования новой фазы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.М. Анпилов, Э.М. Бархударов, И.А. Косский, М.А. Мисакян, *Способ получения наноструктурированного углеродного покрытия*, патент RU № 2565199 (заявка 26.07.2013, опубл. 20.10.2015).
- [2] C. Jin, T. Huang, Y. Yang, D. Yang, Y. Hu, L. Zhuge, X. Wu, *Material for suppressing secondary electron emission*, patent CN104241061A (publ. 24.12. 2014).
- [3] N. Bundaleska, A. Dias, N. Bundaleski, E. Felizardo, J. Henriques, D. Tsyganov, M. Abrashev, E. Valcheva, J. Kissovski, A.M. Ferrara, A.M. Botelho do Rego, A. Almeida, J. Zavašnik, U. Cvelbar, O.M.N.D. Teodoro, Th. Strunskus, E. Tatarova, *Sci. Rep.*, **10**, 13013 (2020). DOI: 10.1038/s41598-020-69844-9
- [4] W. Hu, X. Yi, J. Li, B. Gao, Y. Li, S. Wu, S. Lin, *A kind of carbon-base film and preparation method thereof for inhibiting secondary*, patent CN110396668A (publ. 01.11.2019).
- [5] Р.К. Яфаров, *Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий* (Физматлит, М., 2009).

- [6] Р.К. Яфаров, Н.О. Шабунин, В.Я. Шаныгин, А.М. Захаревич, Изв. Саратов. ун-та. Новая серия. Физика, **20** (2), 134 (2020). DOI: 10.18500/1817-3020-20-2-134-143
- [7] Д.А. Усанов, Р.К. Яфаров, *Методы получения и исследования самоорганизующихся наноструктур на основе кремния и углерода* (Изд-во Саратов. ун-та, Саратов, 2011).