



# ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 537.533.8

## Нанокуглеродные композиты для безнакальных магнетронов СВЧ и субтерагерцового диапазонов

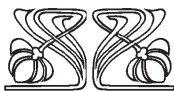
Р. К. Яфаров, Н. О. Шабунин, В. Я. Шаныгин, А. М. Захаревич

Яфаров Равиль Кяшшафович, доктор технических наук, заведующий лабораторией субмикронной электронно-ионной технологии, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, [pirpc@yandex.ru](mailto:pirpc@yandex.ru)

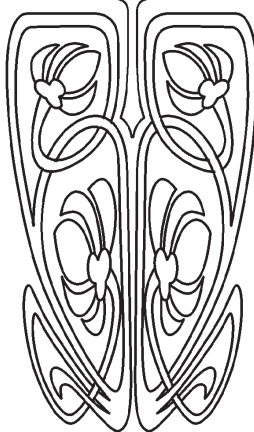
Шабунин Никита Олегович, студент, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, [n-shabunin@bk.ru](mailto:n-shabunin@bk.ru)

Шаныгин Виталий Яковлевич, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории субмикронной электронно-ионной технологии, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, [vitairegun@mail.ru](mailto:vitairegun@mail.ru)

Захаревич Андрей Михайлович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией диагностики наноматериалов и структур, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, [lab-15@mail.ru](mailto:lab-15@mail.ru)



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ



Разработана численная методика определения вторично-эмиссионных свойств пленочных алмазографитовых нанокompозитов по яркости изображений в зависимости от величины положительного потенциала на сетке детектора сканирующего электронного микроскопа. С использованием разработанной методики проведена оценка вторично-эмиссионных свойств нанокуглеродных пленочных структур, полученных в различных режимах микроволнового плазмохимического осаждения. Показана перспективность применения в безнакальных источниках электромагнитных излучений различной выходной мощности СВЧ и субтерагерцового диапазонов частот, взамен металлических, нанокуглеродных автокатодов, которые устраняют необходимость в использовании для этих целей традиционных вторично-эмиссионных катодов на основе сложных композиционных материалов с расходуемыми активными примесями.

**Ключевые слова:** вторичная электронная эмиссия, численная методика, яркость изображений, нанокуглеродный композит, микроволновая плазма.

Поступила в редакцию: 6.02.2020 / Принята: 26.03.2020 / Опубликовано: 01.06.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-134-143>

### Введение

В связи с повышением требований к техническим характеристикам аппаратуры в основном специального назначения весьма актуальными становятся работы, направленные на создание электровакуумных приборов (ЭВП) с безнакальным режимом работы, в которых взамен термокатодов используются «холодные» катоды, работающие на принципе автоэлектронной эмиссии. Это позволяет обеспечить практически мгновенную готовность к работе тех радиотехнических систем, в которых они применяются [1–3].



Типичная конструкция катодного узла магнетрона, предназначенного для генерирования электромагнитных колебаний сверхвысоких частот, главным образом сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн, содержит анод и коаксиально размещенный внутри него безнакальный катод. Последний включает в себя керн с расположенными на нем комбинациями чередующихся автоэлектронных эмиттеров (АЭК) в виде шайб и вторично-эмиссионных катодов (ВЭК) в виде втулок. ВЭК является активатором АЭК и обеспечивает необходимый уровень электрического заряда в пространстве взаимодействия магнетронов и, тем самым, позволяет получать высокую выходную мощность. В современных магнетронах в качестве материала АЭК, как правило, служит танталовая или вольфрамовая фольга толщиной ~ 4 мкм, а в качестве ВЭК используются пресованные палладий – бариевые втулки – эмиттеры [4]. Процесс активирования и эксплуатации эмиттеров происходит в условиях высоких температур (400–800°C, в зависимости от параметров магнетрона) и напряженностей внешнего электрического поля, вызывающих интенсивные электронную и ионную бомбардировки. Это приводит к постепенной их деградации, главным образом за счет катодного распыления и практически не контролируемого и не управляемого процесса термического переосаждения легирующей примеси между элементами катодного узла. Эти изменения влияют на стабильность работы магнетрона, приводят к изменению частоты генерируемых колебаний, падению электронного КПД, уменьшению долговечности, а также в ряде случаев к отказам по запуску магнетронов в радиотехнических системах. Проблема обеспечения надежности работы магнетронов в течение достаточного срока службы дополняется в настоящее время желанием создателей современных радиотехнических систем переходить к все более высоким рабочим частотам – вплоть до терагерцового диапазона. Задача выполнения необходимых требований осложняется тем, что конструкционные элементы в терагерцовых магнетронах оказываются весьма мелкоструктурными, что требует использования специальных высоких технологий. В настоящее время конструкции магнетронов и технология производства продолжают совершенствоваться [1–9].

Анализ литературных данных показывает, что в настоящее время наиболее перспективными для применения в качестве автоэмиссионных источников электронов являются не металли-

ческие, а нанокуглеродные материалы [10–13]. Это обусловлено устойчивостью углеродных структур к высоким температурам и бомбардировке ионами остаточных газов, которые присутствуют в приборах, работающих в условиях технического вакуума, а также высокой теплопроводностью и возможностью снижения работы выхода электронов при определенных структурных модификациях, характерных для алмазного типа гибридизации связей валентных электронов атомов углерода. Уменьшение рабочих напряжений автоэмиссии позволяет увеличить запас электрической прочности синтезированных структур и получить за счет этого источники холодных электронов с повышенными плотностью тока и деградационной стойкостью.

Таким образом, применение взамен металлических нанокуглеродных автокатодов может позволить устранить необходимость в активировании АЭК и, как следствие, необходимость использования для этих целей традиционных ВЭК на основе сложных композиционных материалов с расходуемыми активными примесями, а также применения высоких температур для реализации процесса активации.

В связи с возможными перспективами кардинального изменения состава, конструкции, надежности и долговечности катодного узла магнетронов за счет использования нанокуглеродных структур становится актуальным исследование их вторично-эмиссионных свойств.

Цель работы – разработка методик и исследование вторично-эмиссионных свойств пленочных алмазографитовых нанокompозитов, полученных в различных режимах микроволнового плазмохимического осаждения для источников электромагнитных излучений различной выходной мощности СВЧ и субтерагерцового диапазонов частот.

#### Материалы и методы

Получение пленочных наноалмазографитовых композитов проводилось в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника по методикам, изложенным в работах [11, 13, 14]. Осаждение осуществлялось на поликорковые подложки с использованием в качестве рабочего вещества паров этанола при давлении 0.05–0.07 Па. Напряжения смещения на подложкодержателе в процессах плазмохимического осаждения составляли +300 В и –300 В. Подложки в экспериментах нагревались до температуры  $300 \pm 10^\circ\text{C}$ . Исследование вторичной электронной



эмиссии (ВЭЭ) в наноклеродных пленочных структурах производилось с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) MIRA 2 LMU (Tescan, Чехия). Измерения яркости полученных изображений проводились при различных энергиях первичного пучка (10, 5, 1 и 0.65 кэВ) и различных напряжениях (300, 150, 75, 0 В) на сетке детектора вторичных электронов СЭМ.

Для количественной характеристики ВЭЭ наноклеродных покрытий определяли числен-

ные значения яркости полученных в СЭМ изображений. Для этого использовались программы Mathcad 15, Adobe Photoshop и ColorMania. Первым этапом обработки изображений являлось «размытие» их яркости, которое осуществлялось в графическом редакторе Adobe Photoshop CC. «Размытие» производилось с целью усреднения по площади яркости изображения анализируемых участков поверхности пленок. Примеры размытых изображений приведены на рис. 1.

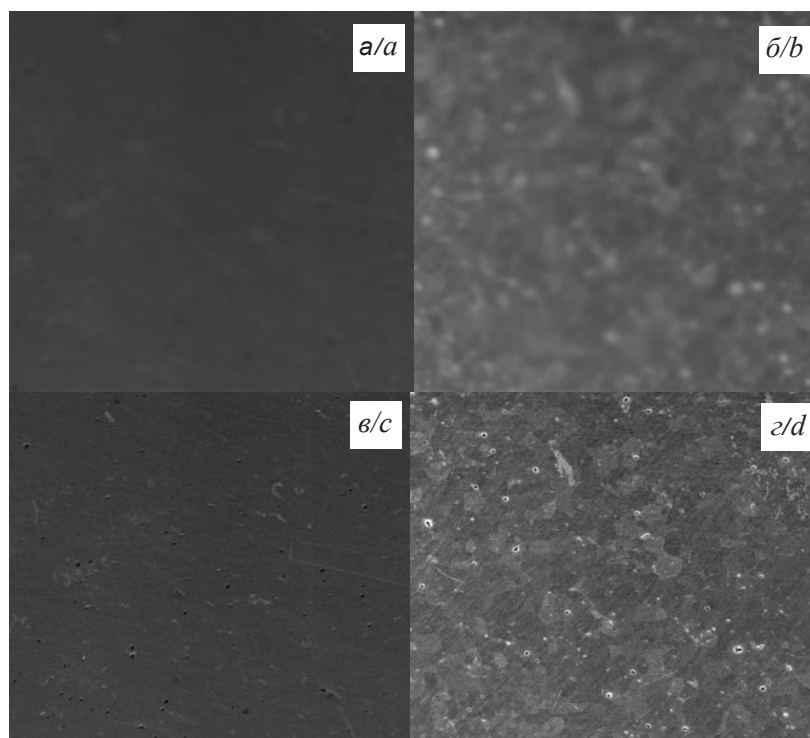


Рис. 1. Изображения участков пленочных покрытий до (в, г) и после (а, б) обработки в графическом редакторе Adobe Photoshop CC

Fig. 1. Images of film coating areas before (c, d) and after (a, b) processing in Adobe Photoshop CC graphics editor

Следующим этапом анализа снимков СЭМ являлось получение численных значений яркости. Это было осуществлено с использованием утилиты ColorMania с достаточно высокой точностью, которая обусловлена пиксельным анализом исходного изображения.

#### Результаты и их обсуждение

На рис. 2, 3 в качестве примеров приведены СЭМ-изображения четырех наноклеродных пленочных покрытий, полученных в различных режимах плазмохимического осаждения. Изображения получены при энергии первичного электронного пучка 10 кэВ и напряжениях на сетке

детектора вторичного электрона (ВЭ) + 300 и +75 В. СЭМ-изображения аналогичного типа получены при напряжениях на сетке +150 и 0 В. Ток первичного пучка во всех случаях составлял 352 пА при увеличении  $\times 500$ . Можно видеть, что яркость изображений зависит как от режима получения наноклеродных покрытий, так и режима получения изображения в СЭМ. В частности, просматривается зависимость яркости изображений от напряжения на сетке детектора ВЭ СЭМ. Аналогичного типа изменения яркостей изображений в зависимости от режима получения образцов и напряжений на сетке детектора СЭМ получены для энергий первичного пучка 5, 1 и 0.65 кэВ.



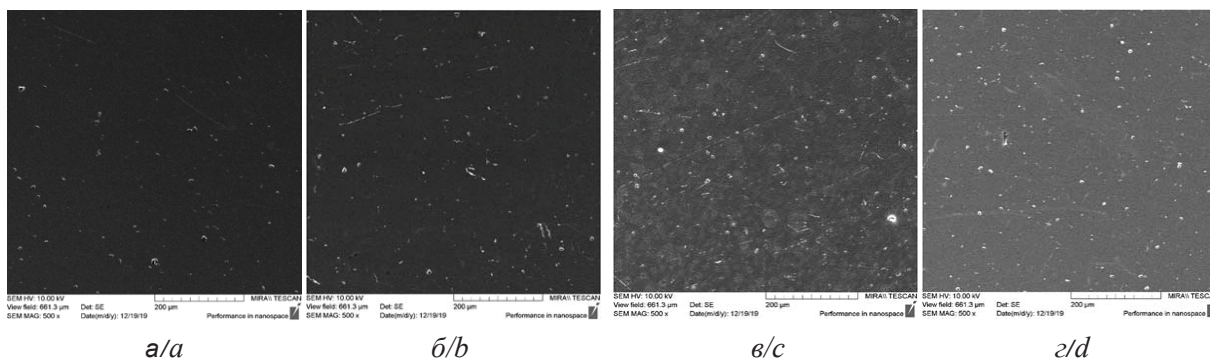


Рис. 2. СЭМ-изображения наноклеродных покрытий, полученных в различных режимах осаждения: *a, б* – -300 В (*a* – 55 кОм/кв, *б* – 37 кОм/кв); *в, z* – +300 В (*в* – 100 кОм/кв, *z* – 850 кОм/кв). Измерения проводились при контрасте 48%, яркости 83% и потенциале на сетке +300 В

Fig. 2. SEM images of nanocarbon coatings obtained in different deposition modes: *a, b* – -300 V (*a* – 55 kOm/sq, *b* – 37 kOm/sq); *c, d* – 300 V (*c* – 100 kOm/sq, *d* – 850 kOm/sq). Measurements were made at 48% contrast, 83% brightness and 300 V grid potential

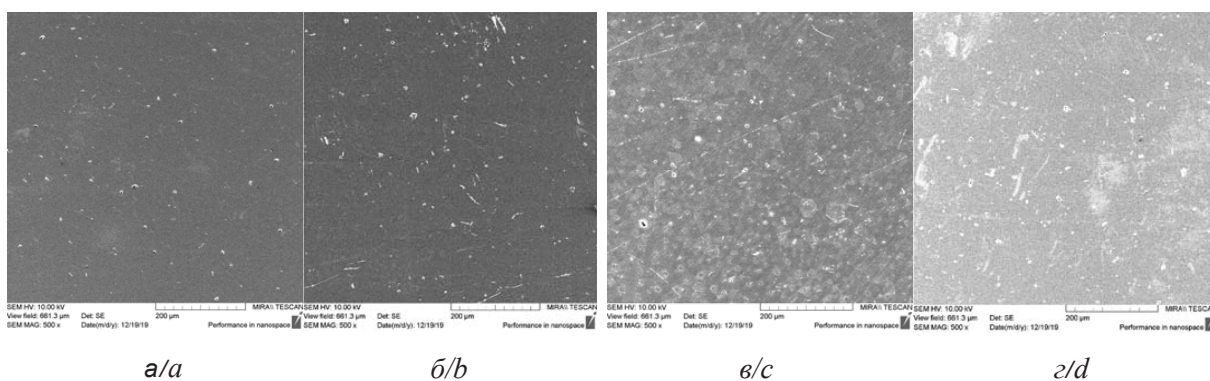


Рис. 3. СЭМ-изображения наноклеродных покрытий, полученных в различных режимах осаждения: *a, б* – -300 В (*a* – 55 кОм/кв, *б* – 37 кОм/кв); *в, z* – +300 В (*в* – 100 кОм/кв, *z* – 850 кОм/кв). Измерения проводились при контрасте 56%, яркости 65% и потенциале на сетке + 75 В

Fig. 3. SEM images of nanocarbon coatings obtained in different deposition modes: *a, b* – -300 V (*a* – 55 kOm/sq, *b* – 37 kOm/sq); *c, d* – 300 V (*c* – 100 kOm/sq, *d* – 850 kOm/sq). Measurements were made at 56% contrast, 65% brightness and 75 V grid potential

На рис. 4–7 приведены зависимости яркостей изображений от потенциалов на сетке детектора СЭМ при различных энергиях первичных электронов для наноклеродных покрытий, полученных в различных режимах плазмохимического осаждения.

Как известно, структуру энергетического спектра электронов, испускаемых с поверхности, облучаемой пучком электронов с энергией  $E_0$ , составляют упруго рассеянные электроны с энергией  $E_0$ , ВЭ с энергией от 0 до 50 эВ, а также неупруго обратнорассеянные электроны (ОРЭ) с энергией от 50 эВ до  $E_0$  [15]. Большое влияние на ВЭЭ имеет энергия электронов первичного пучка. С увеличением энергии коэффициент вторичной эмиссии сначала возрастает в связи с

ростом количества возбужденных электронов, а затем начинает убывать, поскольку существенная часть электронов рождается на большей глубине и число вторичных электронов, выходящих наружу, уменьшается.

На рис. 8 представлена схема детектора ВЭ. Коллектор *1* имеет положительный потенциал, величину которого можно изменять в диапазоне от 0 до +300 В, благодаря чему траектории вторичных электронов искривляются и они попадают в коллектор. На первичные и отраженные электроны, имеющие высокие значения энергии ( $E_0$ ), этот потенциал существенного влияния не оказывает.

Внутри коллектора электроны ускоряются. Для этого на сцинтиллятор *3* подается высо-

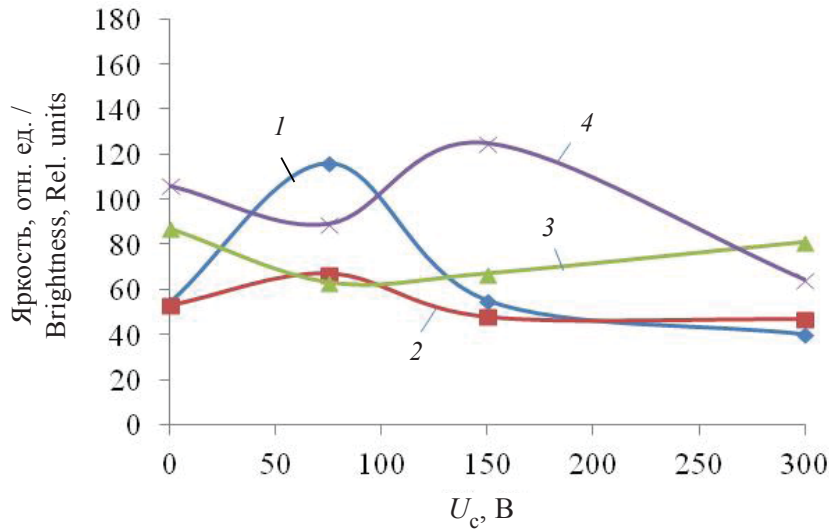


Рис. 4. Графическая интерпретация яркости изображения от напряжения СЭМ на сетке для образца с осажденным углеродным покрытием при -300 В на подложке и 55 кОм/кв при различных энергиях первичного электронного пучка, кэВ: 1 – 10, 2 – 5, 3 – 1, 4 – 0.65

Fig. 4. Graphical interpretation of image brightness versus the SEM voltage on the sample grid with deposited carbon coating at -300 V on the substrate and 55 kOm/sq. at different energies of the primary electron beam, keV: 1 – 10, 2 – 5, 3 – 1, 4 – 0.65

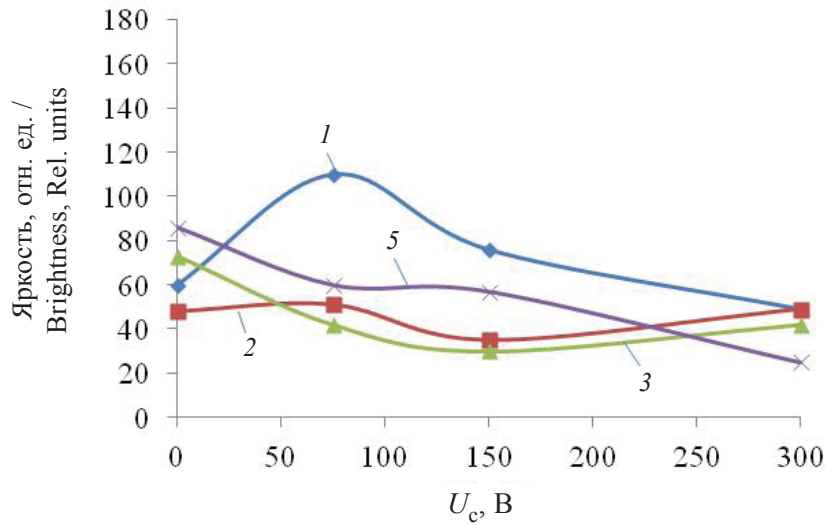


Рис. 5. Графическая интерпретация яркости изображения от напряжения СЭМ на сетке для образца с осажденным углеродным покрытием при -300 В на подложке и 37 кОм/кв при различных энергиях первичного электронного пучка, кэВ: 1 – 10, 2 – 5, 3 – 1, 4 – 0.65

Fig. 5. Graphical interpretation of image brightness versus the SEM voltage on the sample grid with deposited carbon coating at -300 V on the substrate and 37 kOm/sq. at different energies of the primary electron beam, keV: 1 – 10, 2 – 5, 3 – 1, 4 – 0.65

кое напряжение порядка 12 кВ. Его влияние на электронный зонд экранируется корпусом коллектора. Вследствие ускорения вторичные электроны получают достаточную энергию,

чтобы вызвать световое излучение материала сцинтиллятора, которое по световоду 2 попадает на фотоумножитель 4, где преобразуется в электрический сигнал. Мощность этого сигнала

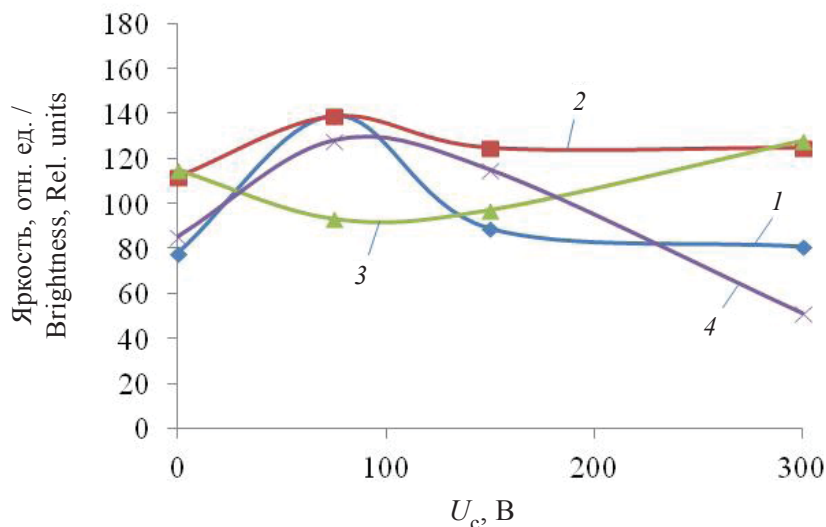


Рис. 6. Графическая интерпретация яркости изображения от напряжения СЭМ на сетке для образца с осажденным углеродным покрытием при +300 В на подложке и 100 кОм/кв. при различных энергиях первичного электронного пучка, кэВ: 1 – 10, 2 – 5, 3 – 1, 4 – 0,65

Fig. 6. Graphical interpretation of image brightness on the SEM voltage on the carbon plated sample grid at 300 V on substrate and 100 kOhm/sq. at different energies of the primary electron beam, keV: 1 – 10, 2 – 5, 3 – 1, 4 – 0.65

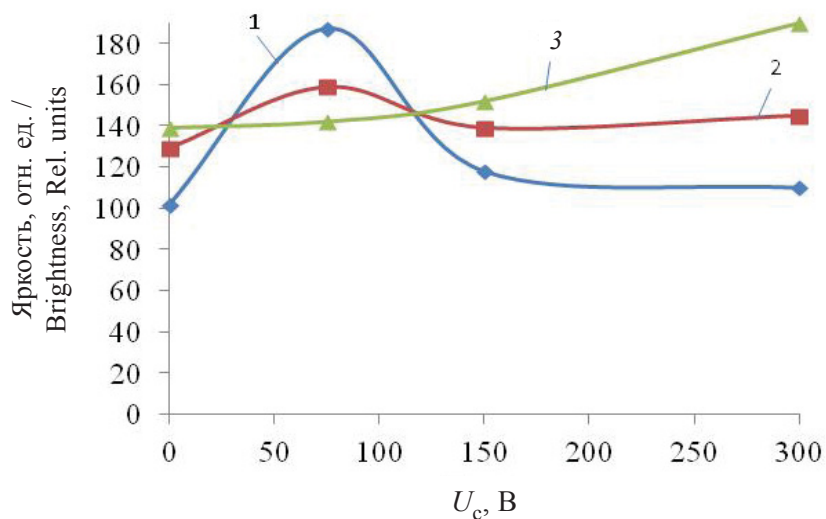


Рис. 7. Графическая интерпретация яркости изображения от напряжения СЭМ на сетке для образца с осажденным углеродным покрытием при +300 В на подложке и 650 кОм/кв. при различных энергиях первичного электронного пучка, кэВ: 1 – 10, 2 – 5, 3 – 1

Fig. 7. Graphical interpretation of image brightness on the SEM voltage on the carbon plated sample grid at 300 V on substrate and 650 kOhm/sq. at different energies of the primary electron beam, keV: 1 – 10, 2 – 5, 3 – 1

и, следовательно, яркость соответствующей точки на экране при использовании вторичных электронов определяется топографическим контрастом.

При положительных потенциалах на сетке детектора яркость изображения на видеоусилителе формируется за счет попадания в него всех электронов, имеющих энергию, близкую к той,

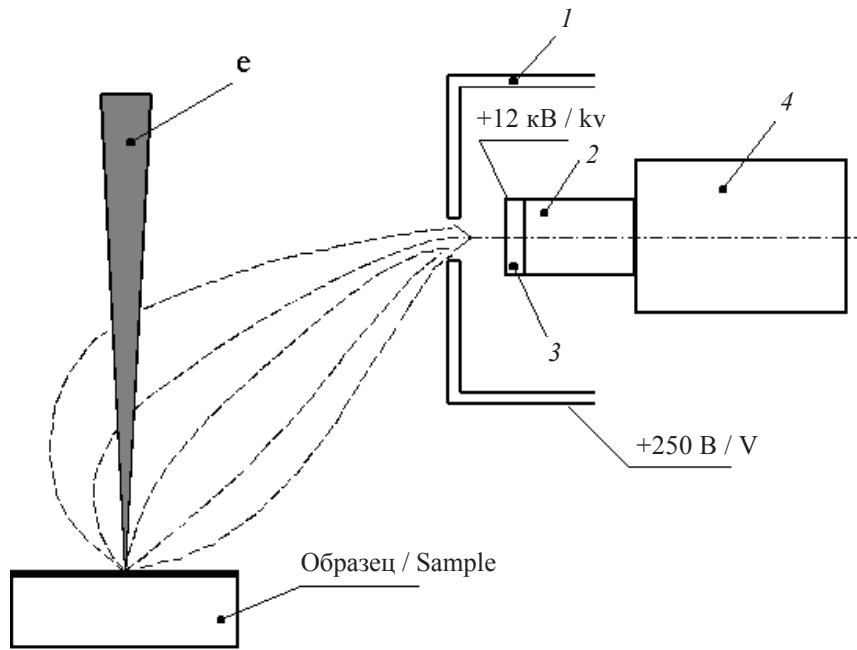


Рис. 8. Схема детектора эмитированных электронов Эверхарта – Торнли: 1 – коллектор, 2 – световод, 3 – сцинтиллятор, 4 – фотоумножитель

Fig. 8. Everhart – Thornley emitted electron detector circuit: 1 – collector, 2 – light guide, 3 – scintillator, 4 – photomultiplier

что определяет приложенный к сетке потенциал. При потенциалах на сетке +300 В это, главным образом, небольшая доля неупругоотраженных электронов. При уменьшении напряжения на сетке от +300 до +75 В яркости изображений в зависимости от свойств образцов и энергии первичных электронов постепенно увеличиваются (см. рис. 4–7). Для энергий электронов 5 и 10 кэВ наблюдаются при  $U_c = 75$  В максимумы яркости изображений. Это обусловлено увеличением количества «истинных» ВЭ, попавших в детектор.

Влияние энергии электронов первичного пучка на яркость изображений хорошо видно при  $U_c = 300$  В: с ее увеличением от 1 до 10 кэВ яркости изображений, как правило, уменьшаются. Это обусловлено тем, что с увеличением  $E_o$  увеличивается энергия отраженных электронов и уменьшается их доля попадающих в детектор, а также, как уже говорилось, большей глубиной проникновения первичных электронов в образец, при которой вероятность выхода вторичных электронов из образца уменьшается. Кроме того, различный характер зависимостей яркостей изображений от потенциала сетки для различных энергий первичного пучка электронов может быть обусловлен зависимостью коэффициента

отражения от их энергии. При низких  $E_o$  коэффициент отражения увеличивается. Вследствие этого уменьшается доля неупругоотраженных электронов, которые могут попасть в детектор и яркость изображений с уменьшением потенциалов на сетке уменьшается. Меньшая яркость изображений при энергии электронов 0.65 кэВ, по сравнению с энергией 1 кэВ, может быть обусловлена уменьшением концентрации неупругоотраженных и вторичных электронов в связи с низкой кинетической энергией электронов первичного пучка. Вследствие этого для электронов с энергиями 1 и 0.65 кэВ наблюдается с уменьшением сеточных напряжений монотонное уменьшение концентрации электронов, преодолевших потенциал сетки и яркость полученных изображений. Подъем кривых яркости при  $U_c = 0$  В обусловлен вкладом в ее формирование неупругоотраженных и вторичных электронов с очень низкой энергией.

В отсутствие напряжений на сетке ( $U_c = 0$  В) вторичные электроны не изменяют траекторию своего движения от образца и не попадают в детектор. В этом случае яркости изображений уменьшаются до минимальных значений, которые имеют примерно такие же значения, как при  $U_c = +300$  В.





## Заключение

Вторично-эмиссионные свойства исследованных нанюглеродных пленочных покрытий в первом приближении можно оценить как отношение яркостей изображений в их максимуме в зависимости от напряжения на сетке к яркости изображений при  $U_c = 0$  В. Для образца 1 с поверхностным сопротивлением 55 кОм/кв при энергиях первичных электронных пучков 10 кэВ и 5 кэВ это, соответственно, более чем 2.15 и 1.27. Большее отношение яркостей для энергии первичных электронов 10 кэВ означает, что, несмотря на большую глубину проникновения электронов в образец, которое должно приводить к снижению выхода вторичных электронов, увеличение их концентрации в результате взаимодействия первичного пучка и неупругорассеянных электронов с электронно-атомной структурой нанюглеродного материала приводит к увеличению ВЭЭ. Для образца 2, полученного при том же ускоряющем напряжении на подложкодержателе в процессе плазмохимического осаждения, но имеющем более низкое поверхностное сопротивление (37 кОм/кв), отношения соответствующих яркостей изображений составляют 1.83 и 1.06 соответственно. Снижение выхода ВЭ однозначно обусловлено меньшей дефектностью пленочной структуры образца 2 и, вследствие этого, большей глубиной проникновения электронов первичного пучка, что снизило вероятность выхода на поверхность ВЭ.

Яркости изображений образцов, полученных в микроволновой плазме при потенциале +300 В (образцы 3 и 4), при одинаковых энергиях первичных пучков электронов и напряжениях на сетках существенно выше, чем для образцов, полученных при отрицательных напряжениях. В соответствии с результатами работы [13] это может быть связано с большим содержанием в нанюглеродной матрице алмазных нанокристаллитов и меньшей работой выхода электронов. Вследствие этого увеличивается количество упругих соударений первичных электронов и процессов их рассеяния, что приводит к отклонению траекторий и способствует генерации ВЭ на меньшей глубине.

Для образца 3, имеющего поверхностное сопротивление около 100 кОм/кв, отношение яркостей для энергии первичного пучка 10 кэВ составляет 1.8, а для 5 кэВ – 1.2. Практически такие же значения получены для образца 4, у которого сопротивление почти на порядок выше. Однако во втором случае значения яркостей

существенно выше, что подтверждает усиление вклада неупругоотраженных электронов от дефектов структуры в генерацию ВЭ на меньшей глубине от поверхности пленочного покрытия.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10033).

## Список литературы

1. Schünemann K., Sosnytskiy S. V., Vavriv D. M. Self-consistent simulation of the spatial-harmonic magnetron with cold secondary emission cathode // IEEE Ttrans. Electron Devices. 2001. Vol. 48, № 5. P. 993–998. DOI: 10.1109/16.918248
2. Sosnytskiy S. V., Vavriv D. M. Theory of the spatial-harmonic magnetron: an equivalent network approach // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. Vol. 30, № 3. P. 984–991. DOI: 10.1109/TPS.2002.801616
3. Яфаров Р. К., Новиков П. Е., Еремин В. П., Кочнев Д. О. Исследование возможности создания автоэмиссионного катода для безнакального магнетрона на основе алмазографитового нанюкомпозита // Вопросы электротехнологии. 2018. № 2. С. 62–71.
4. Магнетрон с безнакальным катодом : пат. на изобретение 2380784 Рос. Федерация, МПК H01J 25/00 (2006.01) / Ли И. П., Дюбуа Б. Ч., Каширина Н. В., Комиссарчик С. В., Лифанов Н. Д., Зыбин М. Н. ; заявл. 24.10.08 ; опубл. 27.01.10.
5. Гурко А. А. Магнетроны миллиметрового диапазона длин волн. М. : [б. и.], 2015. 223 с.
6. Zybin M. N. Cold Cathode Magnetrons : Yesterday, Today and Tomorrow // Microwave Journal. URL: <http://www.microwavejournal.com> (дата обращения: 14.06.2012).
7. Yeryomka V. D., Kopot M. A., Kulagin O. P., Naumenko V. D. 3-D simulation of millimeter-wave cold secondary-emission cathode drift-orbital resonance magnetrons. // Proc. IVEC. 2006. P. 349–350. DOI: 10.1109/IVELEC.2006.1666327
8. Avtomonov N. I., Naumenko V. D., Vavriv D. M., Schünemann K., Suvorov A. N., Markov V. A. Toward terahertz magnetrons : 210-GHz spatial-harmonic magnetron with cold cathode // IEEE Trans. Electron Devices. 2012. Vol. 59, № 12. P. 3608–3611. DOI: 10.1109/TED.2012.2217974
9. Shengen Li, Tiechang Yan, Fengling Li, Jinsheng Yang, Wei Shi. Experimental study of millimeter magnetrons with cold cathodes // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. Vol. 44, № 8. P. 1386–1390. DOI: 10.1109/TPS.2016.2585644
10. Гуляев Ю. В., Абанышин Н. П., Горфинкель Б. И., Морев С. П., Резчиков А. Ф., Синицын Н. И., Якунин А. Н. Новые решения для создания перспективных приборов на основе низковольтной полевой эмиссии углеродных наноразмерных структур // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 11. С. 63–70. DOI: 10.1134/S1063785013060035





11. Яфаров Р. К. Получение наноалмазных композиционных материалов в плазме микроволнового газового разряда низкого давления // ЖТФ. 2006. Т. 76, вып. 1. С. 42–48.
12. Фурсей Г. Н., Поляков М. А., Кантонистов А. А., Яфясов А. М., Павлов Б. С., Божевольнов В. Б. Автоэлектронная и взрывная эмиссия из графеноподобных структур // ЖТФ. 2013. Т. 83, вып. 6. С. 71–77.
13. Яфаров Р. К., Шаныгин В. Я., Нефедов Д. В. Углеродный пленочный нанокompозит для сильноточных полевых источников электронов // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2019. Т. 19, вып. 1. С. 68–75. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-1-68-75>
14. Яфаров Р. К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. М. : Физматлит, 2009. 216 с.
15. Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А., Зотов А. В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. М. : Наука, 2006. 490 с.

#### Образец для цитирования:

Яфаров Р. К., Шабунин Н. О., Шаныгин В. Я., Захаревич А. М. Наноуглеродные композиты для безнакальных магнетронов СВЧ и субтерагерцового диапазонов // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 134–143. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-134-143>

#### Nanocarbon Composites for Non-Incandescent Microwave Magnetrons and Subterahertz Ranges

R. K. Yafarov, N. O. Shabunin,  
V. Ya. Shanygin, A. M. Zakharevich

Ravil K. Yafarov, <https://orcid.org/0000-0001-6678-511X>, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38 Zelenaya St., Saratov 410019, Russia, [pirpc@yandex.ru](mailto:pirpc@yandex.ru)

Nikita O. Shabunin, <https://orcid.org/0000-0002-5363-0132>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [n-shabunin@bk.ru](mailto:n-shabunin@bk.ru)

Vitaliy Ya. Shanygin, <https://orcid.org/0000-0001-8445-6491>, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38, Zelenaya St., Saratov 410019, Russia, [vitaireun@mail.ru](mailto:vitaireun@mail.ru)

Andrey M. Zakharevich, <https://orcid.org/0000-0002-3813-5870>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [lab-15@mail.ru](mailto:lab-15@mail.ru)

**Background and Objectives:** Development of techniques and investigation of secondary emission properties of film diamond graphite nanocomposites obtained in different modes of microwave plasma-chemical deposition were performed for sources of electromagnetic radiation of different output power of microwave and subterahertz frequency ranges. **Materials and Methods:** Production of film nano diamond graphite composites was carried out in a vacuum plant using a microwave ion-plasma source. Precipitation was carried out on polycore substrates using ethanol vapor as a working material at a pressure of 0.05–0.07 Pa. The bias voltages on the substrate holder in plasma chemical deposition processes were 300 V and -300 V. The substrates were heated to  $300 \pm 10^\circ\text{C}$  in experiments. The study of secondary electron emission (EE) in nanocarbon film structures was performed using the Mira TESCAN scanning electron microscope (SEM). Measurements of the brightness of the obtained images were made at different primary beam energies (10, 5, 1 and 0.65 keV) and different voltages (300, 150, 75, 0 B) on the secondary electron detector grid SEM. **Results:** A numerical technique has been developed for determining the secondary emission properties of film diamond

graphite nanocomposites by the brightness of their images depending on the value of the positive potential on the grid of the scanning electron microscope detector. Using the developed technique, the secondary emission properties of nanocarbon film structures obtained in different modes of microwave plasma-chemical deposition were evaluated. **Conclusion:** For sample 1: a larger ratio for primary electron energy of 10 keV means that despite the greater depth of electron penetration into the sample, which should lead to a decrease in the secondary electron output, an increase in their concentration as a result of the interaction of the primary beam and the nonelastic electrons with the electron-atomic structure of the nanocarbon material leads to an increase in EE. For sample 2: the decrease in RE yield is definitely due to the lower defect of the film structure and the greater penetration depth of the primary beam electrons, which reduced the probability of reaching the RE surface. For samples 3, 4: brightness values are significantly higher, which confirms the enhancement of the contribution of unelastic electrons from structure defects to the generation of RE at a lower depth from the surface of the film coating.

**Keywords:** secondary electron emission, numerical technique, image brightness, nanocarbon composite, microwave plasma.

Received: 06.02.2020 / Accepted: 26.03.2020 / Published: 01.06.2020  
This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 16-19-10033).

#### References

1. Schünemann K., Sosnytskiy S. V., Vavriv D. M. Self-consistent simulation of the spatial-harmonic magnetron with cold secondary emission cathode. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2001, vol. 48, no. 5, pp. 993–998. DOI: 10.1109/16.918248
2. Sosnytskiy S. V., Vavriv D. M. Theory of the spatial-harmonic magnetron: an equivalent network approach. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2002, vol. 30, no. 3, pp. 984–991. DOI: 10.1109/TPS.2002.801616
3. Yafarov R. K., Novikov P. E., Eremin V. P., Kochnev D. O. Investigation of the possibility of creating an field emission



- cathode for a non-incised magnetron based on a diamond graphite nanocomposite. *Voprosyi yelektrotekhnologii* [Questions of Electrotechnology], 2018, no. 2, pp. 62–71 (in Russian).
4. Li I. P., Dubuya B. Ch., Kashirina N. V., Komissar-chik S. V., Liphonov N. D., Zybin M. N. *Magnetron with non-nominal cathode*. Patent RF no. 2380784, 2008 (in Russian).
  5. Gurko A. A. *Magnetronyi millimetrovogo diyapozona dlinn voln* [Millimeter Wavelength Magnetrons]. Moscow, [b. i.], 2015. 223 p. (in Russian).
  6. Zybin M. N. Cold Cathode Magnetron: Yesterday, Today and Tomorrow. *Microwave Journal*. Available at: <http://www.microwavejournal.com> (accessed 14 June 2012).
  7. Yeryomka V. D., Kopot M. A., Kulagin O. P., Naumenko V. D. 3-D simulation of millimeter-wave cold secondary-emission cathode drift-orbital resonance magnetrons. *Proc. IVEC*, 2006, pp. 349–350. DOI: 10.1109/IVELEC.2006.1666327
  8. Avtomonov N. I., Naumenko V. D., Vavriv D. M., Schüemann K., Suvorov A. N., Markov V. A. Toward terahertz magnetrons: 210-GHz spatial-harmonic magnetron with cold cathode. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2012, vol. 59, no. 12, pp. 3608–3611. DOI: 10.1109/TED.2012.2217974
  9. Shengen Li, Tiechang Yan, Fengling Li, Jinsheng Yang, Wei Shi. Experimental study of millimeter magnetrons with cold cathodes. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2016, vol. 44, no. 8, pp. 1386–1390. DOI: 10.1109/TPS.2016.2585644
  10. Gulyaev Yu. V., Aban'shin N. P., Gorfinkel' B. I., Morev S. P., Rezchikov A. F., Sinityn N. I., Yakunin A. N. New solutions for designing promising devices based on low-voltage field emission from carbon nanostructures. *Technical Physics Letters*, 2013, vol. 39, iss. 11, pp. 63–70 (in Russian). DOI: 10.1134/S1063785013060035
  11. Yafarov R. K. Production of nanodiamond composites in low pressure microwave gas discharge plasma. *Technical Physics*, 2006. vol. 39, pp. 525–528.
  12. Fursey G. N., Polyakov M. A., Cantonistov A. A., Yafarov A. M., Pavlov B. S., Bozhevovnov V. B. Auto-electronic and explosive emission from graphene-like structures. *Technical Physics*, 2013, vol. 83, iss. 6, pp. 71–77 (in Russian).
  13. Yafarov R. K., Shanygin V. Y., Nefedov D. V. Carbon film nanocomposite for high-current field sources of electrons. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2019, vol. 19, iss. 1, pp. 68–75 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-1-68-75>
  14. Yafarov R. K. *Fizika SVCh vakuumno-plazmennyyh nanotekhnologiy* [Physics of Microwave Vacuum Plasma Nanotechnology]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 216 p. (in Russian).
  15. Oura K., Lifshitz V. G., Saranin A. A., Zotov A. V., Katayama M. *Vvedeniye v fiziku poverkhnosti*. [Introduction to Surface Physics]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 490 p. (in Russian).

**Cite this article as:**

Yafarov R. K., Shabunin N. O., Shanygin V. Ya., Zakharevich A. M. Nanocarbon Composites for Non-Incandescent Microwave Magnetrons and Subterahertz Ranges. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 134–143 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-134-143>