

УДК 53.043

## УСТОЙЧИВОСТЬ ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМО- И ХОЛОДНО-ПОЛЕВЫХ КАТОДОВ К ВАКУУМНЫМ УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© 2021 г. Р. К. Яфаров<sup>a, b, \*</sup>, А. В. Сторублев<sup>b, c, \*\*</sup>

<sup>a</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН,  
Зеленая, 38, Саратов, 410019 Россия

<sup>b</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,  
Астраханская, 83, Саратов, 410012 Россия

<sup>c</sup>АО “НПП “Алмаз”, ул. им. И.В. Панфилова, 1, Саратов, 410033 Россия

\*E-mail: pirpc@yandex.ru

\*\*E-mail: StorablevAV@almaz-rpe.ru

Поступила в редакцию 07.09.2020 г.

После доработки 07.09.2020 г.

Принята к публикации 30.09.2020 г.

Рассмотрены особенности использования источников электронов на основе термо- и полевой эмиссии в приборах электровакуумного производства, включая сохранение эмиссионной способности при ухудшении вакуумных условий эксплуатации. Показано, что преимуществом металлопористых термокатодов является высокая восстановительная способность эмиссии после повторной откачки прибора до исходного давления. Достоинством сильноточных полевых катодов, изготовленных на основе композитных алмазграфитовых пленочных структур, является устойчивость автоэмиссионных характеристик в более широком интервале изменений давления в приборе. Это улучшает эксплуатационные характеристики ЭВП в отсутствие встроенных средств откачки.

DOI: 10.31857/S0544126921020101

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, современные электровакуумные приборы (ЭВП), основной принцип работы которых связан с баллистическим транспортом электронов, весьма чувствительны к вакуумным условиям эксплуатации. Их ухудшение в значительной степени может влиять на работоспособность приборов и сокращать срок службы. Причинами ухудшения вакуума могут быть как повреждение целостности оболочки прибора, которое приводит к появлению течи и попаданию газовых сред из внешнего окружения, так и недостаточная внутренняя обезгаженность прибора на этапе производства. Последнее возможно, например, из-за наличия полостей (“карманов”) с газом в сварных швах или структуре материала, которая впоследствии приводит к повышению давления до определенной величины, после чего уровень вакуума может стабилизироваться и оставаться неизменным [1]. Величина вакуума, при которой наступает стабилизация, зависит от источника газодделения, объема прибора, количества включений прибора, наличия газопоглотителей и т.д. В зависимости от величины давления, которое устанавливается в приборе с течением времени,

он может оставаться работоспособным или прекратит обеспечивать нужные электрические характеристики. Зачастую эта проблема решается комплектацией прибора встроенным миниатюрным насосом, который поддерживает в ЭВП приемлемый уровень вакуума. К недостаткам такого решения проблемы можно отнести повышение массогабаритных характеристик, как за счет наличия насоса, так и за счет источников питания, обеспечивающих работу насоса. Кроме того, увеличение единиц оборудования неизбежно ведет к уменьшению надежности всего комплекса, в составе которого используется ЭВП.

Таким образом, задача разработки технологии производства ЭВП с гарантированным поддержанием уровня высокого вакуума в течение длительного времени на сегодняшний день является актуальной. А одной из задач катодного производства является разработка источников электронов, способных сохранять работоспособность при возникновении неблагоприятных вакуумных условий.

В настоящее время в производстве ЭВП рассматривается возможность использования источников электронов двух типов, основанных на явлениях термо- и автоэмиссии. Очевидно, что с

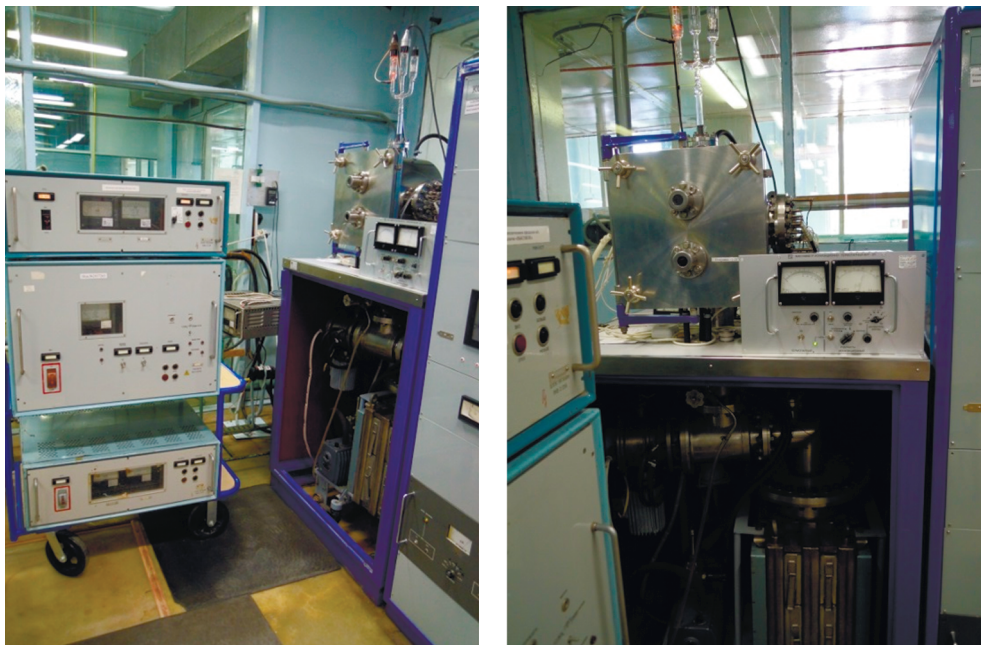


Рис. 1. Вид экспериментальной установки.

точки зрения баллистического транспорта электронов в вакууме оба типа источников являются практически равноценными. Однако механизмы испускания потоков электронов этими типами катодов существенно различаются. При термоэмиссии испускание электронов осуществляется в результате протекания высокотемпературных диффузионных процессов в объеме и на поверхности материала катода, при которых небольшие изменения вакуумных условий эксплуатации не могут кардинальным образом повлиять на этот процесс [2]. С другой стороны, термоэмиссия, как известно, характеризуется большим разбросом эмитированных электронов, как по скоростям, так и по направлениям их движения [3]. Это является одним из недостатков данного механизма эмиссии электронов, который усиливается при изменении вакуумных условий за счет дополнительного рассеяния электронов на атомах и молекулах остаточных газов в объеме ЭВП.

В свою очередь, известно, что работа автоэмиссионных катодов (АЭК) сопровождается ионной бомбардировкой их поверхностей, адсорбцией и десорбцией ионов и молекул остаточных газов, поверхностной миграцией атомов и др. Стабильность и долговечность работы чрезвычайно чувствительна к изменению геометрии эмиссионных центров и к состоянию их поверхности [4]. В зависимости от конкретной конструкции и режима эксплуатации АЭК, перечисленные процессы, порознь или в некоторой совокупности, приводят к ряду эффектов, изменяющих режим его работы. К ним относятся: катодное распыление материала

эмиттера, изменение количества и расположения эмиссионных микровыступов, изменение работы выхода электронов, разогрев катода и электромеханические напряжения [5]. Особенно важными эти изменения являются в случае сильноточных АЭК, которые, как правило, работают в условиях технического вакуума и высоких напряженностей электрических полей. Другим важным отличием полевых источников электронов от термоэмиссионных является существенно более низкий разброс эмитированных электронов по направлениям и скоростям [6].

Цель работы – исследование влияния одинаковых вакуумных условий эксплуатации на рабочие характеристики термо- и автоэмиссионных катодов.

## МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования проводилась на экспериментальной установке, включающей высоковольтный источник питания постоянного тока и вакуумную камеру с системой откачки на основе электроразрядного насоса (рис. 1). Камера оснащена смотровым окном и выводами, позволяющими подводить напряжение к электродам исследуемых образцов. К вакуумной камере через фланцевое соединение присоединен натекатель, к которому подведен сетевой азот. Давление в камере контролировалось вакуумметром, подключенным к манометрическому датчику.

Исследования влияния давления азота на эмиссионные характеристики автокатодов проводились

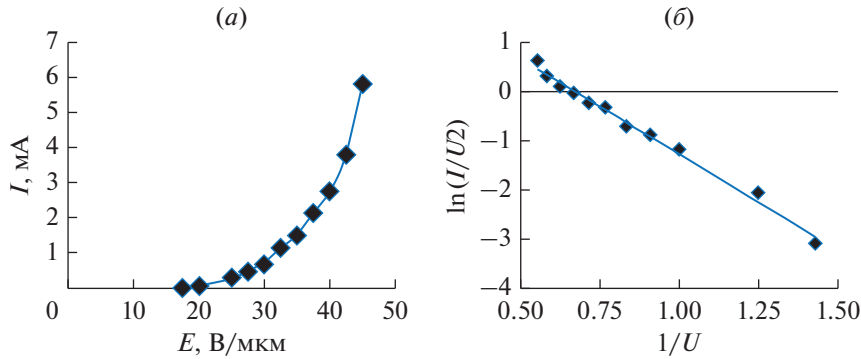


Рис. 2. ВАХ лезвийного алмазграфитового автоэмиссионного катода: *a* – в линейных координатах; *б* – в координатах Фаулера–Нордгейма.

в макете, в котором полевая эмиссия осуществлялась с торца алмазграфитовой пленки толщиной 80–100 нм. Пленка получена осаждением в СВЧ плазме газового разряда низкого давления паров этанола на поликоревой подложке [7–9]. Перспективность применения алмазграфитовых пленочных покрытий в качестве полевых источников электронов обусловлена их высокой устойчивостью к катодному распылению в сильных электрических и тепловых полях, а также уникальностью электронно-эмиссионных свойств нанокристаллических алмазных включений в графитовой матрице, обусловленных их отрицательным электронным сродством. По этой причине у катодов с алмазным типом гибридизации связей валентных электронов атомов углерода наблюдается такое же снижение работы выхода электронов, как и для “открытых” углеродных нанотрубок с графитовым типом структуры [10, 11]. Важное значение имеет проявление в наноалмазных автоэмиссионных эмиттерах, кроме традиционных свойств алмаза, присущих массивному кристаллическому состоянию, таких как высокие дрейфовая скорость электронов, теплопроводность и др., также квантовых эффектов, характерных для низкоразмерных систем [12]. В работах [8, 9] показано, что выбором режимов неравновесной конденсации в микроволновой плазме паров этанола низкого давления алмазграфитовых нанокомпозитов может быть получено снижение порога полевой эмиссии электронов с 15–17 до 4–6 В/мкм и увеличение плотности автоэмиссионного тока в импульсе микросекундной длительности свыше 100 А/см<sup>2</sup>.

На рис. 2 приведена ВАХ сильноточного автоэмиссионного наноалмазграфитового катода, полученная на начальном этапе проведения испытаний. Измерения проводились в вакуумной камере при остаточном давлении  $\sim 3 \times 10^{-7}$  мм рт. ст. В экспериментах использовался источник питания постоянного тока с пошаговым подъемом напряжения и выдержкой на каждом напряжении по 5–10 мин в случаях, когда величина тока

была нестабильной. Этого времени, как правило, хватало для протекания процессов формовки катода. При напряженности поля  $E = 45$  В/мкм достигнуто значение тока, превышающее 5 мА. Эта величина тока соответствует плотности токоотбора около 900 А/см<sup>2</sup>. Площадь торца рассчитывалась как произведение толщины пленки (100 нм) на длину эмиттирующей части. За ее длину принималась протяженность анода равная 5.5 мм, расположенного на расстоянии 40 мкм напротив катода.

В процессе измерений ВАХ было обнаружено, что при превышении напряженности электрического поля в зазоре между катодом и анодом 35 В/мкм наблюдалось появление свечения белого цвета вдоль всего торца алмазграфитовой пленки. В стационарном поле свечение поддерживается длительное время. При увеличении напряжения и тока интенсивность свечения продолжала возрастать. На рис. 3 приведено изображение свечения при токе эмиссии 4.5 мА и напряженности поля около 43 В/мкм. При увеличении напряженности поля и достижения величины автоэмиссионного тока 5.8 мА наблюдался самопроизвольный его рост при неизменном напряжении источника питания. В начальный момент ток возрастал медленно, со временем скорость роста увеличивалась. За 5–7 мин ток достигал около 10 мА. Одновременно с произвольным ростом тока отмечалось и повышение остаточного давления в измерительном вакуумном устройстве. При росте тока от 5.8 до 10 мА давление увеличилось с  $3 \times 10^{-7}$  до  $7 \times 10^{-7}$  мм рт. ст.

Во избежание возникновения в измерительном устройстве дугового вакуумно-плазменного разряда и возможного разрушения автокатода, путем поэтапного снижения напряжения была вновь замерена его ВАХ, как оказалось, она полностью совпала с первоначальной ВАХ. Воспроизведение линейного характера ВАХ в координатах Фаулера и Нордгейма позволяет заключить, что в исследованном диапазоне напряженностей

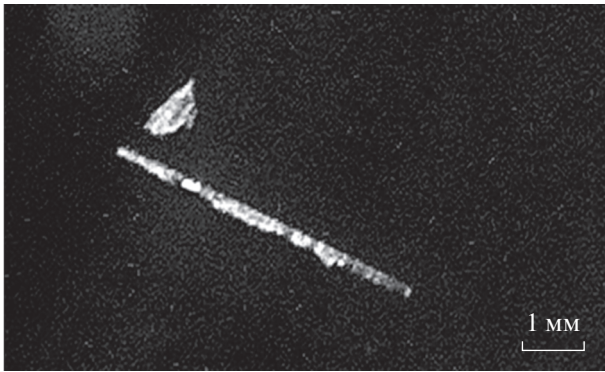


Рис. 3. Катодное свечение при автоэмиссионном токоотборе  $900 \text{ A/cm}^2$ .

электрических полей и давлений остаточной атмосферы в приборе ток между катодом и анодом остается автоэмиссионным [13].

На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости автоэмиссионных токов от давления в вакуумной камере остаточного газа при напуске (верхняя кривая) и откачке сетевого азота. Напуск газа проводился при непрерывной откачке камеры высоковакуумным насосом. Вакуумные условия при каждом значении давления поддерживались в течение 5–10 с – времени, необходимым для фиксации значений давлений остаточного газа и величин автоэмиссионного тока. После фиксации тока при  $P = 1 \times 10^{-4}$  мм рт. ст. подача газа в вакуумную камеру была прекращена. В дальнейшем зависимость тока от давления в камере снималась в процессе откачки без напуска азота.

Из рис. 4 можно видеть, что напуск азота от начального давления в рабочей камере равно  $P = 2.6 \times 10^{-7}$  мм рт. ст. до давления около  $P = 8 \times 10^{-6}$  мм рт. ст., по крайней мере краткосрочно, не является критичным для автоэмиссионного тока при заданном анодном напряжении. При дальнейшем повышении давления до  $P = 1 \times 10^{-4}$  мм рт. ст. наблюдается практически линей-

ное уменьшение автоэмиссионного тока. После прекращения напуска азота и откачки вакуумной камеры происходит частичное восстановление эмиссионной способности. Однако, установившийся после откачки камеры автоэмиссионный ток был примерно в 2 раза меньше, чем ток, который фиксировался до напуска азота.

На рис. 5 приведены ВАХ алмазграфитового автокатода, полученные перед началом эксперимента с определением влияния уровня вакуума на автоэмиссионный ток и после его окончания. Можно видеть, что после проведения эксперимента с напуском и откачкой азота порог начала автоэмиссии увеличился, а величина автоэмиссионного тока при том же анодном напряжении уменьшилась. Однако в обоих случаях, как свидетельствует построение ВАХ в координатах Фаулера–Нордгейма, ток является автоэмиссионным. Подобная трансформация автоэмиссионной ВАХ согласно анализу – следствие увеличения поверхностного сопротивления эмиссионной структуры. Последнее может быть связано с бомбардировкой поверхности алмазграфитового автокатода высокоэнергетичными ионами азота с образованием на ней различных нитридов углерода.

На рис. 6 приведены зависимости относительных изменений эмиссионных токов от давления для полевых алмазграфитовых и термоэмиссионных металлопористых катодов с диодным токоотбором, полученных по аналогичной методике [14, 15]. Значение тока термоэмиссии в обоих исследованных металлопористых катодах было на уровне 31 мА, а напряжение несколько десятков вольт. Видно, что для термоэмиссии критичным является давление выше  $2 \times 10^{-6}$  мм рт. ст., тогда как для автоэмиссии этой границей является в 4 раза более высокое давление. При давлении  $\sim 4 \times 10^{-5}$  мм рт. ст. термоэмиссионный катод перестает эмитировать полностью, тогда как для автоэмиссионного катода наблюдается падение тока примерно на 50%, а отсутствие эмиссии не отмечалось даже при  $1 \times 10^{-4}$  мм рт. ст.

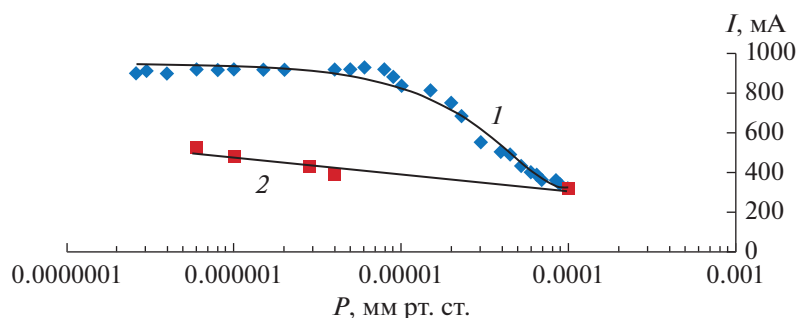


Рис. 4. Экспериментальная зависимость  $I(P)$  для алмазграфитового автоэмиссионного катода: 1 – при напуске азота; 2 – при откачке после завершения подачи азота.

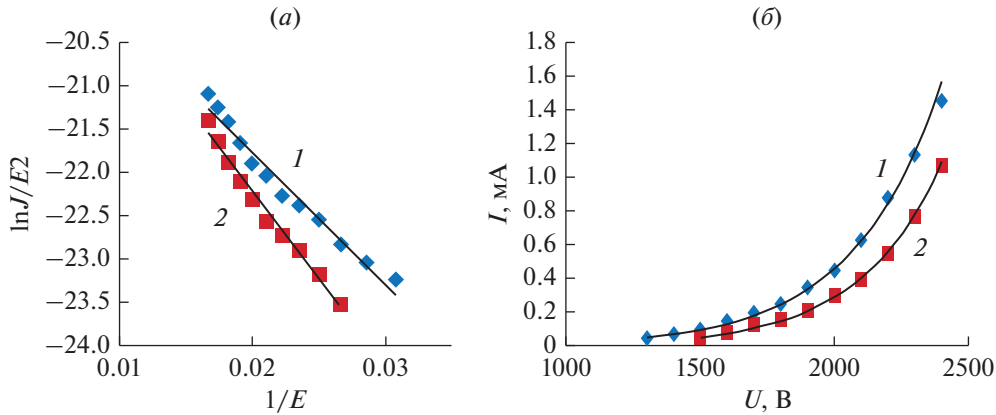


Рис. 5. ВАХ образца: *a* – в координатах Фаулера–Нордгейма, где  $E$  измеряется в В/мкм,  $J$  – в А/мкм<sup>2</sup>; *б* – в линейных координатах: 1 – до напуска азота; 2 – после напуска азота.

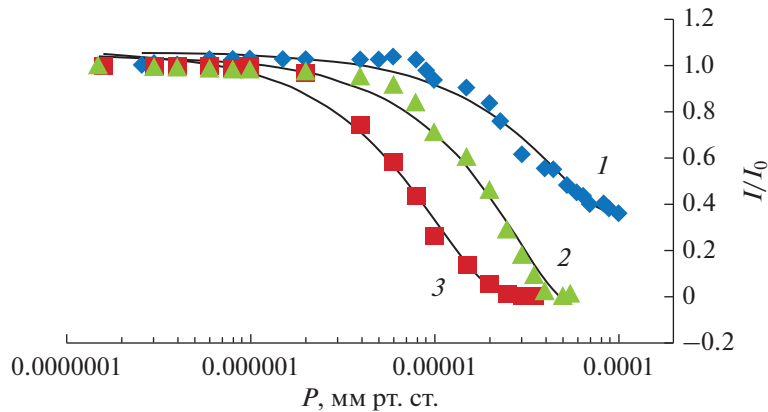


Рис. 6. Изменение относительной эмиссионной способности автоэмиссионного (1) и катодов с термоэмиссией (2, 3) в зависимости от остаточного давления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значимым преимуществом металлопористых катодов перед автоэмиссионными является восстановительная способность. После устранения вакуумной течи и откачки до исходного давления ток термокатодов восстанавливался до первоначального уровня за время не более 3 мин. Однако, при работе катодных узлов в некоторых видах специальной аппаратуры устойчивость эмиссии к неблагоприятным вакуумным условиям может являться более ценным свойством, чем способность восстанавливать эмиссию. Это справедливо для приборов, у которых нет встроенных средств откачки. В этих случаях автоэмиссионные катоды являются более предпочтительными.

Отметим актуальность исследования работоспособности автоэмиссионных катодов при неблагоприятных вакуумных условиях в течение длительного времени, в том числе, при натекании других газовых сред. Однако и полученные результаты представляют немалую ценность с точки

зрения применения АЭК в устройствах, где длительность их работы составляет всего несколько секунд.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10033) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-38-90216).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луконин С.Г., Филиппенкова Л.С., Курляндский И.А. Выделение аргона из сварных швов, выполненных дуговой сваркой в аргоне и гелии и лазерной сваркой в азоте // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1981. № 8(332) С. 49–51.
2. Кудинцева Г.А., Мельникова А.И., Морозов А.В., Никонов Б. Термоэлектронные катоды // Энергия. 1966. С. 218–259.
3. Гилмор А.С.-мл. Лампы с бегущей волной // Техносфера. 2013. С. 414–446.
4. Ye Hua, Hong Wan, Xingyu Chen, Bin Chen, Ping Wu, Shuxin Bai. Influence of Surface Microstructures on

- Explosive Electron Emission Properties for Graphite Cathodes // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. V. 45. Iss. 6. P. 959–968.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2703139>
5. *Filip V., Filip L.D., Hei Wong.* Review on peculiar issues of field emission in vacuum nanoelectronic devices // Solid-State Electronics. 2017. V. 138. P. 3–15.  
<https://doi.org/10.1016/j.sse.2017.09.010>
  6. *Усанов Д.А., Яфаров Р.К.* Методы получения и исследования самоорганизующихся наноструктур на основе кремния и углерода // Изд-во Сарат. ун-та. 2011. 124 с.
  7. *Яфаров Р.К., Новиков П.Е., Еремин В.П., Кочнев Д.О.* Исследование возможности создания автоэмиссионного катода для безнакального магнетрона на основе алмазографитового нанокompозита // Вопросы электротехнологии. 2018. № 2. С. 62–71.
  8. *Яфаров Р.К., Шаныгин В.Я., Нефедов Д.В.* Алмазографитовый нанокompозит для сильноточной полевой эмиссии электронов // Докл. VI Всерос. микроволновой конф. Москва. 28–30 нояб. 2018. М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 2018. С. 142
  9. *Яфаров Р.К.* Микроструктурные модификации алмазографитовых нанокompозитов для сильноточных полевых источников электронов // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. № 12. С. 1238–1243.
  10. *Образцов А.Н., Павловский И.Ю., Волков А.П.* Автоэлектронная эмиссия в графитоподобных пленках // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 11. С. 89–95.
  11. *Gruen Dieter M.* The Intern. Topical Meeting on Field Electron Emission from Carbon Materials (ITM – FEESM 2001). Moscow, 2001. P. 14.
  12. *Пчеляков О.П., Болховитянов Ю.Б., Двуреченский А.В. и др.* // ФТП. 2000. Т. 34. Вып. 11. С. 1281–1299.
  13. *Fowler R.H., Nordheim L.W.* Electronemission in intense electric fields // Proc. R. Soc. London. A. 1928. V. 119. P. 173–181.
  14. *Крачковская Т.М.* Исследование характеристик металлопористого катода, модифицированного нанолуглеродом / Т.М. Крачковская, А.В. Сторублев, Г.В. Сахаджи, А.С. Емельянов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 4. С. 57–63.
  15. *Крачковская Т.М., Мельников Л.А.* Перспективы применения различных форм нанолуглерода в катодных системах // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2019. Вып. 3(542). С. 6–14.