

DOI: 10.5862/JPM.213.10

УДК 537.533.2, 533.5, 53.084

А.В. Архипов, П.Г. Габдуллин, М.В. Мишин

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

ВАКУУММЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ОРБИТРОННОГО ТИПА С НАНОУГЛЕРОДНЫМ АВТОКАТОДОМ

Предложена электронно-оптическая схема ионизационного вакуумного датчика для использования в составе аппаратуры космического базирования. Схема рассчитана на использование полевых катодов на основе наноуглеродных материалов, что позволяет создать устройство, характеризующееся малым весом и габаритами, низким энергопотреблением, малым временем выхода на рабочий режим. Для увеличения эффективности и чувствительности устройства для ионизации газа в нем используется электростатическая электронная ловушка. Отказ от использования в эти целях магнитного поля обусловлен соображениями экономии веса, а также совместимости с прочим спутниковым оборудованием. Основным содержанием предлагаемой работы явилось решение задачи согласования противоречивых требований к разрабатываемой электронно-оптической системе ловушки – инфинитности электронных траекторий при высокой напряженности электрического поля на катоде, диктуемой использованием полевого катода. Тестирование созданных экспериментальных макетов двух вариантов разрабатываемого датчика продемонстрировало работоспособность предложенной схемы.

ИЗМЕРЕНИЕ ВАКУУМА, ИОНИЗАЦИОННЫЙ ДАТЧИК, НАНОУГЛЕРОДНЫЙ АВТОКАТОД, АППАРАТУРА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ, ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА.

Введение

Уменьшение габаритов и массы аппаратуры, устанавливаемой на спутниках, выдвигают новые требования к параметрам систем в их составе, в том числе измерителей давления. Перспективный для применения вакуумметрический датчик должен характеризоваться пониженным весом и габаритами, низким энергопотреблением (в пределах 1 Вт), высокой надежностью и устойчивостью к механическим перегрузкам; стабильностью характеристик, позволяющей использовать простые алгоритмы управления и упростить конструкцию электронного блока вакуумметра.

Разработка такого датчика и была целью представляемой работы.

Общая схема устройства

Одним из возможных решений поставленной задачи может быть использование обычной схемы ионизационного преобразователя, принцип действия которого состоит в оценке концентрации молекул

остаточного газа по величине тока ионов, образующихся при ионизации этого газа электронным потоком с известными характеристиками. Обычно используемый при этом термоэмиссионный источник электронов можно заменить «холодным» полевым эмиттером на основе наноуглеродной пленки [1 – 4]. Отказ от использования накаливаемого катода позволяет повысить надежность устройства, кардинально уменьшить энергопотребление и снизить практически до нуля время готовности к измерениям после включения питания. Появившиеся в последние годы наноуглеродные пленочные катоды [5, 6] позволяют получать электронный ток величиной до 100 мкА при приложении напряжения порядка нескольких киловольт на миллиметр ширины эмиссионного зазора. Такая эмиссионная эффективность может быть достаточной для построения ионизационного датчика при условии обеспечения эффективного удержания эмитированных электронов в его электронно-оптической систе-

ме. Распределенная структура пленочного эмиттера с большим количеством активных центров обеспечивает его устойчивость к случайным пробоям высоковольтных промежутков и повышенную долговечность.

Электронно-оптическая система датчика

Для эффективного использования создаваемого электронного потока необходимо обеспечить его многократное прохождение через область ионизации остаточного газа. Известно несколько типов электронно-оптических систем (ЭОС), традиционно используемых для решения этой задачи [7]. Наиболее эффективные из них (с наилучшим удержанием электронов в создаваемой ловушке) основаны на совместном действии скрещенных электрического и магнитного полей. В рассматриваемом случае использование магнитного поля нежелательно как из-за возможности его влияния на функционирование других располагающихся поблизости устройств космического аппарата, так и из-за значительного веса магнитных систем. Известны и чисто электростатические ЭОС, способные эффективно удерживать электроны, например системы орбитронного типа. Однако общей чертой таких систем, традиционно оптимизированных для работы с термоэмиттерами электронов, является низкое значение напряженности электрического поля на катоде, недостаточное для использования полевого катода. В работе [8] предложена конструкция орбитронного микронасоса (аналогичного вакуумметрическому датчику по принципу действия) с кольцевой симметрией, где проблема согласования орбитронной ловушки с холодным эмиттером решается путем формирования электронного потока в отдельном объеме с последующей его инжекцией в область ионизации газа. В разработанной нами ЭОС [9] электронный поток формируется непосредственно в ионизационном объеме, что позволяет упростить конструкцию и эффективно использовать распределенный эмиттер большой площади.

Схема одного из вариантов предлагаемой системы приведена на рис. 1. Катод здесь представляет собой П-образный короб, покрытый изнутри эмиттирующей углеродной

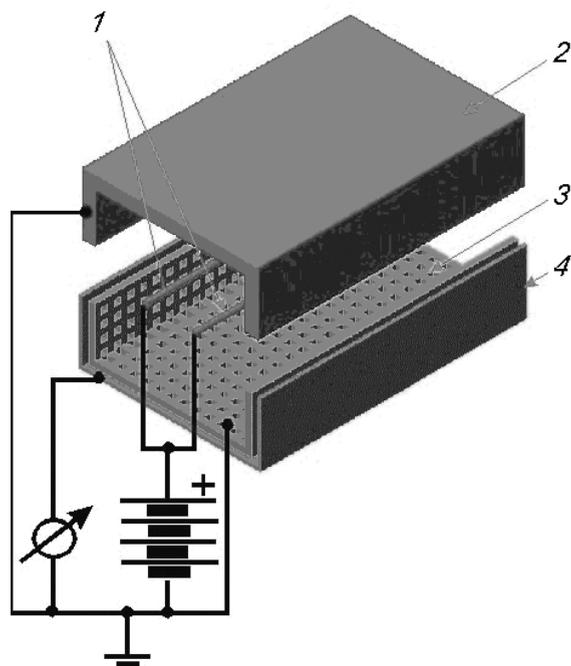


Рис. 1. Схема расположения электродов в первом варианте предлагаемой орбитронной электронно-оптической системы (ЭОС): 1 – анод, 2 – катод, 3 – сетка, 4 – коллектор ионов

пленкой. Внутри короба расположен анод в виде пары тонких вольфрамовых нитей. Продольная длина системы может значительно превышать размер ее поперечного сечения (6×6 мм), что дает возможность увеличивать эмитирующую поверхность без расширения зазора катод-анод. Прямолинейная форма анодов позволяет точно зафиксировать их местоположение даже при большом отношении длины к диаметру при условии обеспечения их достаточного продольного натяжения.

Представленная электронно-оптическая конфигурация была оптимизирована путем компьютерного моделирования электронных траекторий с использованием прикладного пакета Simion 3D 6.0. Результаты расчетов для оптимальной геометрии устройства представлены на рис. 2. Как видно из представленных рисунков, при данном соотношении геометрических размеров электродов электроны со значительной частью площади эмиттера (около 20 – 25 %) попадают на инфинитные (замкнутые) тра-

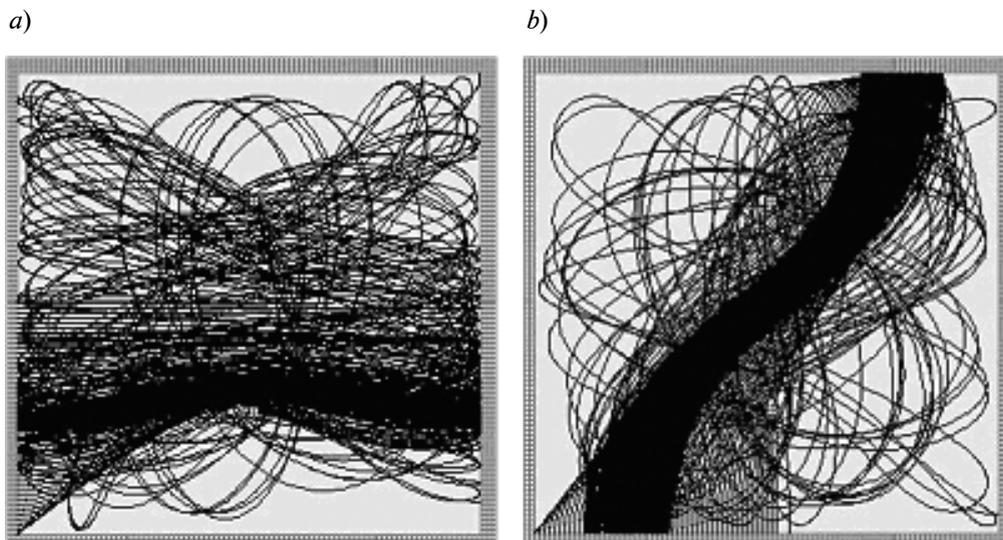


Рис. 2. Траектории электронов, эмитированных с различных частей катода в ЭОС (см. рис. 1).
Области сгущения траекторий соответствуют ловушкам ЭОС, покинуть которые частицы могут лишь за счет движения вдоль продольной оси системы

ектории, что означает чрезвычайно высокую вероятность их столкновения с присутствующими в объеме атомами и высокую эффективность ионизации газа в объеме датчика электронным током.

На рис. 3 представлен второй вариант разработанной электронно-оптической системы. Здесь наноуглеродная пленка, эмитирующая электроны, наносится непосредственно на сетку, отделяющую ионизационный объем от коллектора ионов. Это позволяет улучшить (приблизительно вдвое) сбор рождающихся в рабочем объеме ионов на коллекторе, поскольку выполненный в виде сетки катод перехватывает лишь небольшую часть их потока. Еще одним преимуществом катода, выполненного на основе металлической сетки, является дополнительное, приблизительно двукратное, усиление электрического поля на его поверхности, позволяющее понизить рабочее напряжение устройства. Изменение формы эмитирующей поверхности, согласно проведенным расчетам (рис. 4), позволило дополнительно улучшить качество электростатической ловушки. Площадь той части катода, для которой траектории эмитированных электронов инфинитны, увеличена до 50 %

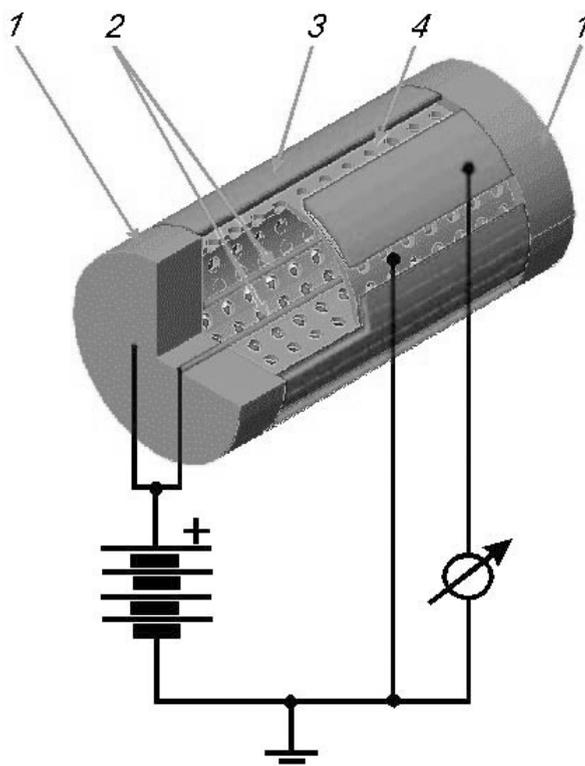


Рис. 3. Расположение электродов во втором варианте орбитронной ЭОС вакуумного датчика:
1 – торцевые изоляторы, 2 – анод, 3 – коллектор ионов, 4 – сетчатый катод, покрытый изнутри наноуглеродной пленкой

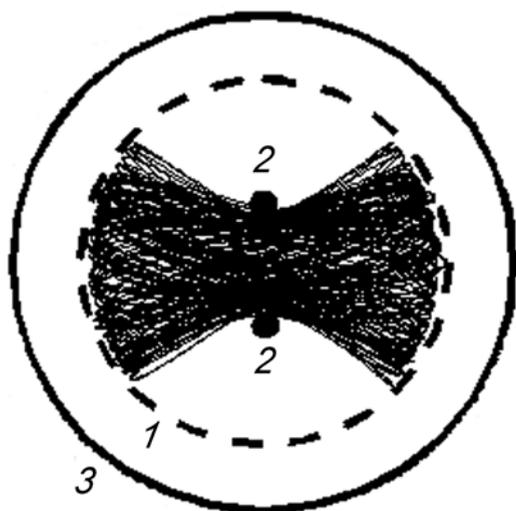


Рис. 4. Результаты моделирования электронных траекторий для второго варианта ЭОС:
1 – катод, 2 – анод, 3 – коллектор ионов

от его общей площади. Благодаря односвязности и большому размеру ловушки, вероятность ухода из нее электронов в результате столкновений с атомами и молекулами невелика.

Таким образом, в результате изменения

формы электродов удалось существенно повысить расчетную оценку качества удержания электронов и связанные с ней величины эффективности ионизации газа и чувствительности датчика.

Результаты экспериментального тестирования макетов датчика

Для проведения экспериментального тестирования конструкций орбитронных датчиков давления, описанных выше, были изготовлены их макеты.

Размер области ионизации для обоих макетов составлял приблизительно $6 \times 6 \times 50$ мм. В качестве активного покрытия катодов использовался порошок нанотрубок, наносимый с помощью кислотного биндера. Тестирование макетов продемонстрировало хорошее соответствие их характеристик ожидаемым. Последние были получены на основании результатов моделирования и теоретических оценок.

Вид вольт-амперных характеристик для создаваемых электронных потоков (рис. 5) свидетельствует о полевом механизме эмиссии электронов с нанотрубочных покрытий. Сопоставление характеристик для двух

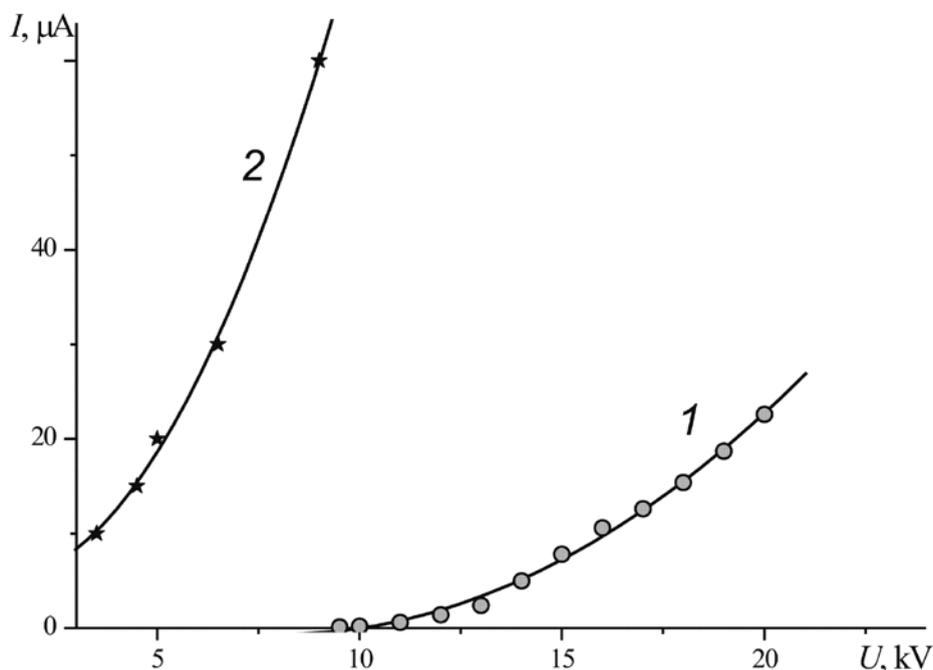


Рис. 5. Типичные вольт-амперные характеристики эмиссии для первого (1) и второго (2) вариантов датчика

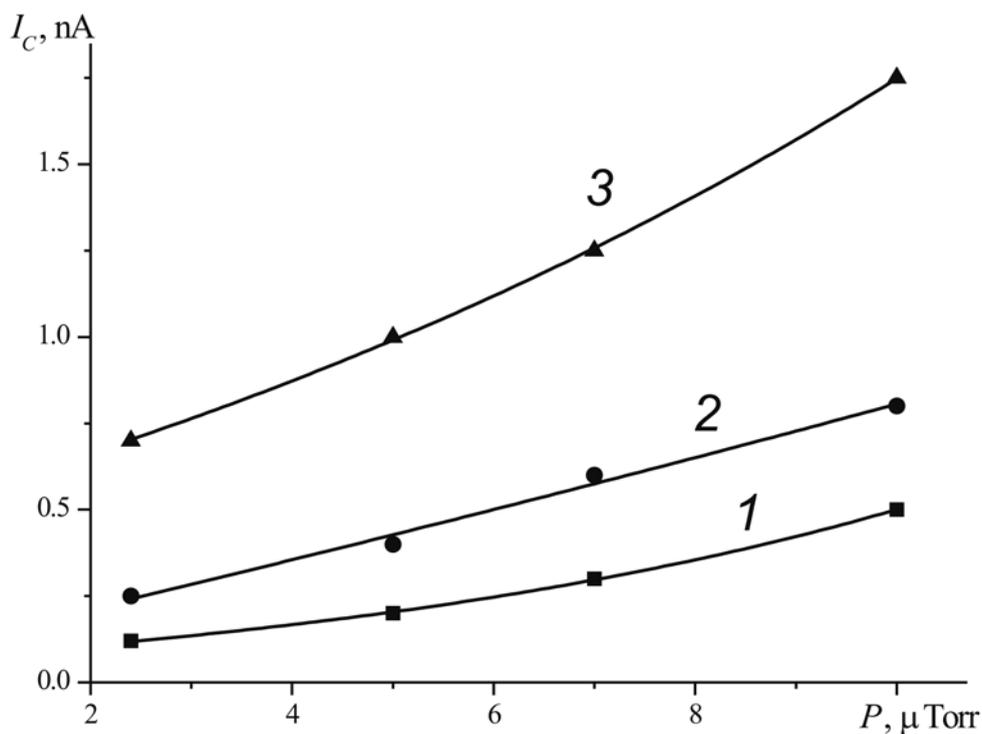


Рис. 6. Рабочие характеристики макета датчика (первый вариант) для трех величин тока эмиссии электронов I_e , мкА: 5 (1), 10 (2), 20 (3)

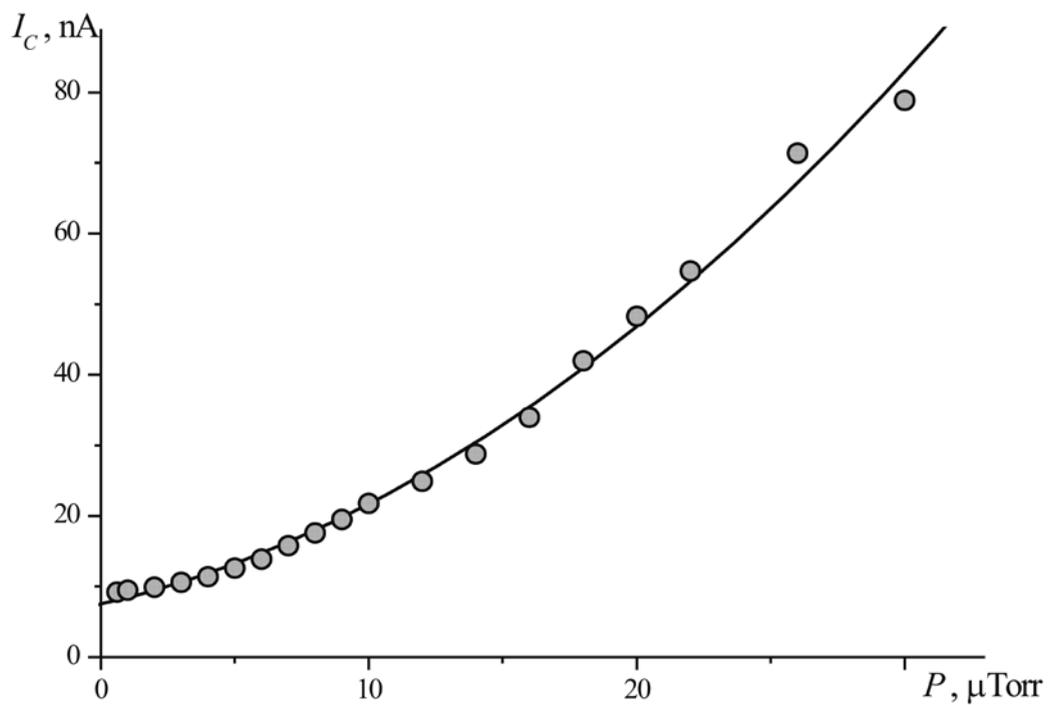


Рис. 7. Пример рабочей характеристики макета датчика (второй вариант)



вариантов устройства подтверждает более высокую эффективность эмиссии для макета, выполненного в соответствии со вторым вариантом ЭОС.

На рис. 6 и 7 представлены рабочие характеристики обоих макетов, т. е. зависимости величины собираемого ионного тока от давления остаточного газа при фиксированных значениях тока электронов с катода. В обоих случаях рабочие характеристики монотонны, что позволяет использовать созданные устройства для измерения давления. Величины ионных токов достаточны

для их уверенной регистрации в диапазоне давлений $10^{-6} - 10^{-5}$ Торр.

Вместе с тем, результаты испытаний выявили и ряд недостатков созданных датчиков. К их числу можно отнести, в частности, значительную временную нестабильность эмиссионного тока и быструю деградацию эмиссионных характеристик катода в плохих вакуумных условиях. Это может быть обусловлено неоптимальным выбором вида эмиссионного покрытия и технологии его закрепления на поверхности катода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kleps I., Angelescu A., Samfirescu N., et al. Study of porous silicon, silicon carbide and DLC coated field emitters for pressure sensor application // Sol. St. Electron. 2001. Vol. 45. Pp. 997–1001.
- [2] Kim S.J. Измерители вакуума, использующие эмиттеры из углеродных нанотрубок // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 14. С. 34–39.
- [3] Choi I.M., Woo S.Y., Song H.W. Improved metrological characteristics of a carbon-nanotube-based ionization gauge // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90. 023107.
- [4] Choi I.M., Woo S.Y., Song H.W. A low-vacuum ionization gauge with HfC-modified carbon nanotube field emitters // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92. 153105.
- [5] Xu N.S., Huq S.E. Novel cold cathode materials and applications // Materials Science and Engineering R: Reports. 2005. Vol. 48. Iss. 2–5. Pp. 47–189.
- [6] Елецкий А.В. Холодные полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок // УФН. 2010. Т. 180. № 9. С. 897–930.
- [7] Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 1990. 320 с.
- [8] Wilcox J.Z., George T., Feldman J. Miniature ring-orbitron getter ion vacuum pumps // NASA's Jet Propulsion Laboratory Report NPO, 20436. 1999.
- [9] Alexandrov S.Ye., Arkhipov A.V., Mishin M.V., Sominski G.G. Carbon-film field-emission cathodes in a compact orbitron-type ionization vacuum sensor // Surface and Interface Analysis. 2007. Vol. 39. Pp. 146–148.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АРХИПОВ Александр Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
arkhipov@rphf.spbstu.ru

ГАБДУЛЛИН Павел Гарифович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
pavel-gabdullin@yandex.ru

МИШИН Максим Валерьевич – кандидат физико-математических наук, докторант кафедры «Физико-химия и технологии микросистемной техники» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
maximvmishin@gmail.com

Arkhipov A.V., Gabdullin P.G., Mishin M.V. ORBITRON-TYPE VACUUM GAUGE WITH NANOCARBON FIELD CATHODE.

A novel electron-optical scheme (EOS) of ionization-type vacuum gauge is proposed that allows the use

of field-emission nanocarbon cathodes. The developed gauge satisfies the requirements imposed by possible utilization in on-board satellite equipment: low mass, size and energy consumption, low turn-on time, etc. High efficiency and sensitivity of the sensor are achieved by the use of an electrostatic trap for accumulation of electrons ionizing the gas molecules. Magnetic field was not used for mass economy reason and to avoid possible influence onto other on-board equipment. The main problem solved in the work originated from the intrinsic contradiction between the aims of achieving long-term confinement of electrons in the trap and focusing of the applied electric field at the cathode, the latter being necessary to utilize the phenomenon of field-induced emission. Experimental tests were performed with two prototype devices realizing different versions the EOS design, viability of both developed schemes has been confirmed.

VACUUM MEASUREMENTS, IONIZATION GAUGE, NANOCARBON COLD CATHODE, SATELLITE EQUIPMENT, ELECTRON-OPTICAL SYSTEM.

REFERENCES

- [1] **I. Kleps, A. Angelescu, N. Samfirescu, A. Gil, A. Correia**, Study of porous silicon, silicon carbide and DLC coated field emitters for pressure sensor application, *Sol. St. Electron.* 45 (2001) 997–1001.
- [2] **S.J. Kim**, Vacuum gauges with emitters based on carbon nanotubes, *Technical Physics Letters.* 31 (14) (2005) 34–39.
- [3] **I.M. Choi, S.Y. Woo, H.W. Song**, Improved metrological characteristics of a carbon-nanotube-based ionization gauge, *Appl. Phys. Lett.* 90 (2007) 023107.
- [4] **I.M. Choi, S.Y. Woo, H.W. Song**, A low-vacuum ionization gauge with HfC-modified carbon nanotube field emitters, *Appl. Phys. Lett.* 92 (2008) 153105.
- [5] **N.S. Xu, S.E. Huq**, Novel cold cathode materials and applications // *Materials Science and Engineering R: Reports.* 2005. Vol. 48. Iss. 2–5. Pp. 47–189.
- [6] **A.V. Eletsky**, Carbon nanotube-based electron field emitters, *Physics-Uspekhi.* 180 (9) (2010) 897–930.
- [7] **L.N. Rozanov**, *Vakuumnaya tekhnika [Vacuum technology]*, Vysshaya shkola, Moscow, 1990.
- [8] **J.Z. Wilcox, T. George, J. Feldman**, Miniature ring-orbitron getter ion vacuum pumps, NASA's Jet Propulsion Laboratory Report NPO, 20436, 1999.
- [9] **S.Ye. Alexandrov, A.V. Arkhipov, M.V. Mishin, G.G. Sominski**, Carbon-film field-emission cathods in a compact orbitron-type ionization vacuum sensor, *Surface and Interface Analysis.* 39 (2007) 146–148.

THE AUTHORS

ARKHIPOV Alexander V.

St. Petersburg Polytechnic University

29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
arkhipov@rphf.spbstu.ru

GABDULLIN Pavel G.

St. Petersburg Polytechnic University

29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
pavel-gabdullin@yandex.ru

MISHIN Maxim V.

St. Petersburg Polytechnic University

29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
maximvmishin@gmail.com