

УДК 004.31:004.22:534:621.382

К. т. н. А. Ю. ЛИПИНСКИЙ

Украина, Донецкий национальный университет

E-mail: o.lipinskii@donnu.edu.ua

## УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ МОДУЛЕМ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ С ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЕМОЙ АРХИТЕКТУРОЙ

*Представлено разработанное устройство управления лазерными модулями оптоэлектронной акустооптической вычислительной среды на основе микроконтроллера семейства Cortex M3, которое позволяет чередовать режимы записи (стирания) и чтения в соответствии с предварительно заданными алгоритмом и параметрами — временем экспонирования и интенсивностью излучения. Приведены электрическая принципиальная схема устройства, блок-схема алгоритма работы микроконтроллера, пример применения разработанного блока управления в составе макета экспериментальной установки.*

**Ключевые слова:** лазерный модуль, оптоэлектронная акустооптическая вычислительная среда, микроконтроллер.

Применение оптических информационных технологий при разработке современных вычислительных средств является в настоящее время одним из основных технических направлений, позволяющих реализовать устройства с большой вычислительной мощностью и объемом памяти. Важными компонентами современных оптических компьютерных систем являются источники когерентного излучения [1]. Требованиям микроминиатюризации и интегральности вполне соответствуют матрицы поверхностно-излучающих лазеров с вертикальным резонатором (VCSEL), используемые в коммерчески доступных устройствах [2]. В оптоэлектронной акустооптической вычислительной среде (ОАВС) [3], которая является оптическим аналогом программируемых логических интегральных схем (FPGA), запоминающее устройство реализовано на основе фоторефрактивной оптоэлектронной запоминающей среды (ФОЗС). Нелинейность ее физических характеристик определяет достаточно сложный, с точки зрения управления, алгоритм функционирования лазерного модуля, что делает актуальным решение задачи по созданию устройств управления лазерными модулями, входящими в состав ОАВС.

### Оптоэлектронная акустооптическая вычислительная среда

Высокая производительность современных оптических вычислительных систем, в основе которых лежит параллелизм выполнения математических операций, определяет потоковую обработку данных как приоритетное направление развития их архитектуры [4, 5].

Сходство процессов обработки потока данных оптоэлектронной акустооптической вычислительной средой [3] и электронными схемами

FPGA [6—8] делает возможным построение ОАВС с динамически изменяемой архитектурой при наличии запоминающего устройства в ее составе. Основными компонентами такой ОАВС (рис. 1) являются источник когерентного излучения (матрица VCSEL [10]), акустооптическое вычислительное устройство (АОВУ), выполняющее операции умножения и накопления,



Рис. 1. Структурная схема ОАВС [9]

и устройство памяти — ФОЗС (фоторефрактивный кристалл  $\text{LiNbO}_3$ ). В состав АОВУ входит два акустооптических модулятора, линзы, выполняющие прямое и обратное преобразования Фурье, и пространственный фильтр. В основе работы фоторефрактивной оптоэлектронной запоминающей среды лежит эффект локального изменения показателя преломления электрооптических кристаллов под воздействием светового потока [11]. В качестве устройства регистрации предлагается использовать ПЗС-матрицу [5].

### Устройство памяти ОАВС

Запоминающее устройство служит для хранения операндов, коэффициентов и т. п., необходимых для выполнения различных задач. Проводя аналогию с FPGA, перезапись информации в ФОЗС [12] можно рассматривать как динамическое изменение архитектуры ОАВС.

В качестве основы для создания ФОЗС предлагается использовать ниобат лития, один из наиболее изученных и перспективных материалов вычислительной оптики.

В большинстве работ, посвященных исследованию фоторефрактивного эффекта в  $\text{LiNbO}_3$ , рассматриваются кристаллы, легированные катионами Fe, Cu и др. [13]. Вместе с тем, в [14, 15] получены результаты, из которых следует, что кристаллы ниобата лития стехиометрического состава характеризуются существенно большим проявлением фоторефрактивного эффекта под воздействием светового потока с длиной волны 0,53 мкм, чем кристаллы конгруэнтного состава.

В [16] было проведено исследование фоторефрактивных свойств номинально чистого монокристалла ниобата лития стехиометрического состава в зависимости от времени экспозиции, мощности лазерного излучения и температуры образца.

Исследование динамики фоторефрактивного рассеяния света (ФРРС) при изменении угла раскрытия индикатрисы ФРРС, показало, что при мощности оптического излучения от 65 до 160 мВт наибольшее проявление фоторефрактивного эффекта наблюдается в те-

чение первой минуты облучения с последующим монотонным уменьшением, которое связано с разогревом кристалла световым потоком. Мощности излучения 35 мВт соответствует непрерывное увеличение индикатрисы рассеяния. Фоторефрактивное изменение показателя преломления в кристалле  $\text{LiNbO}_3$  сохраняется в полной темноте в течение длительного времени — порядка года [16]. Стирание записанной информации можно осуществлять засветкой оптическим излучением той же длины волны, УФ-источником [17] или нагревом кристалла до температуры 170–200°C.

Таким образом, в номинально чистом ниобате лития стехиометрического состава фоторефрактивный эффект выражен в степени, достаточной для создания на его основе оптических устройств записи и хранения информации.

### Устройство управления лазерными модулями ОАВС

Источники оптического излучения в ОАВС должны обеспечивать световой поток в соответствии с выбранным режимом работы (запись/чтение). Возможной альтернативой применению матрицы VCSEL (рис. 1) могут быть твердотельные лазеры с диодной накачкой при соот-

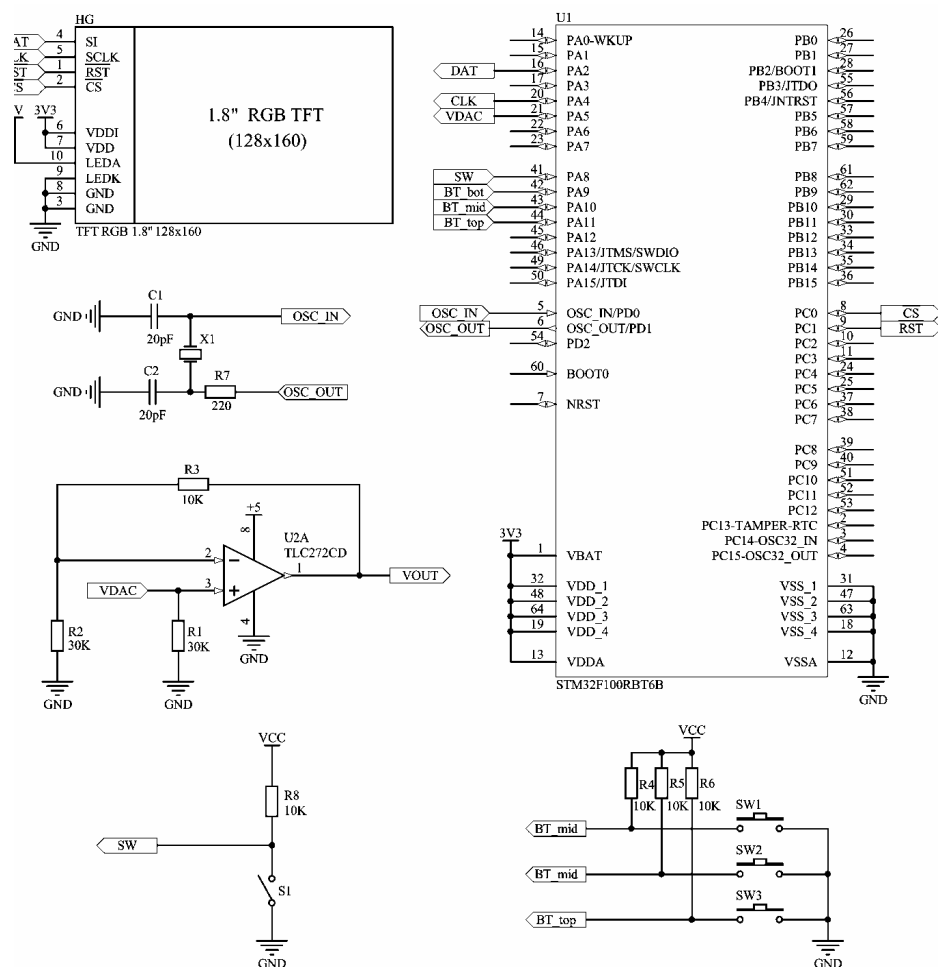


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема устройства управления лазерным модулем

ветствующем изменении оптической схемы устройства.

В режиме записи информации в ФОЗС необходимо генерировать оптическое излучение сравнительно большой интенсивности в заданном временном интервале с возможностью управления характеристиками включения-выключения, не допуская перегрева кристалла. Режим чтения предполагает формирование светового потока малой интенсивности с возможностью импульсной модуляции. Это существенно усложняет задачу управления лазером, входящим в состав модуля, поскольку чередование режимов записи и чтения обеспечивается работой лазера во всем диапазоне нелинейной характеристики «выходная мощность — мощность накачки».

Перечисленные особенности работы лазерного модуля были учтены при разработке микропроцессорного управляющего устройства, принципиальная электрическая схема которого приведена на **рис. 2**.

Блок управления построен на 32-разрядном микроконтроллере STM32F100RB с ядром Cortex M3, который содержит встроенный 12-разрядный модуль цифро-аналогового преобразования, последовательные интерфейсы USART, SPI, TWI, многоканальный контроллер прямого доступа к памяти, программируемые параллельные порты ввода-вывода [18].

В качестве устройства индикации выбран цветной жидкокристаллический дисплей TFT RGB с диагональю 1,8 дюйма, разрешением 128×160 точек, с контроллером SPFD54124B, который подключается к микроконтроллеру STM32F100RB в режиме 9-битного интерфейса SPI. Кроме линий DAT и CLK, по которым передаются данные и тактовый сигнал соответственно, для обеспечения корректной инициализации дисплея требуется подключение линий выбора кристалла CS и сброса RST.

Информация о режиме работы с ключа S1 и кнопок SW1 — SW3 поступает на выходы PA8 — PA11 порта A микроконтроллера.

Управляющее напряжение для лазерного модуля  $V_{OUT}$  формируется на выводе PA5 с использованием встроенного цифро-аналогового преобразователя микроконтроллера. Амплитуда напряжения определяет мощность излучения лазерного диода, а длительность удержания напряжения — экспозицию. Блок-схема алгоритма работы микроконтроллера приведена на **рис. 3**.

Разработанное устройство управления лазерным модулем (рис. 2) использовалось в составе макета экспериментальной установки (**рис. 4**) для записи и последующего считывания информации с фоторефрактивных транспарантов. Световой поток от лазера DHL-G200 (DHOM, Suzhou Daheng Optics and Fine Mechanics) освещает амплитудный транспарант, размещенный на поверхности образца (кристалла  $\text{LiNbO}_3$ ). Режиму записи соответствует интенсивность око-



Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы микроконтроллера STM32F100RB

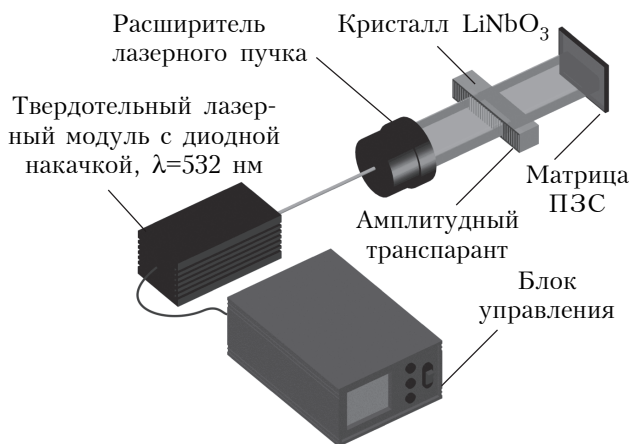


Рис. 4. Макет экспериментальной установки

ло 3 Вт/см<sup>2</sup> (время экспонирования — до 10 минут), режиму считывания — 75 мВт/см<sup>2</sup>.

Возможность чередования режимов записи (стирания) и чтения в соответствии с предварительно заданной последовательностью позволяет применять устройство управления при исследовании процессов записи/считывания в оптоэлектронной вычислительной среде с динамически изменяемой архитектурой. Разработанное устройство обеспечивает широкий диапазон изменения характеристики интенсивности излучения выходного светового потока, времени экспонирования и программное управление режимами работы, что позволяет решать задачи регистра-

ции и обработки информации нелинейными оптическими устройствами.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Белов П. А., Беспалов В. Г., Васильев В. Н. и др. Оптические процессоры: достижения и новые идеи // В сб.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики / Под ред. И. П. Гурова и С. А. Козлова. — СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. [Belov P. A., Bepalov V. G., Vasil'ev V. N. i dr. // V sb.: Problemy kogerentnoi i nelineinoi optiki / Pod red. I. P. Gurova i S. A. Kozlova. SPb: SPbGU ITMO, 2006]
2. Tamir D. E., Shaked N. T., Wilson P. J., Dolev S. High-speed and low-power electro-optical DSP coprocessor // Journal of the Optical Society of America A. — 2009. — Vol. 26, N 8. — P. A11–A20.
3. Липинский А. Ю. Оптоэлектронные интегральные вычислительные среды. — Донецк: Ноулидж, 2010. [Lipinskii A. Yu. Optoelektronnye integral'nye vychislitel'nye sredy. Donetsk: Noulidzh, 2010]
4. Васильев В. Н., Павлов А. В. Оптические технологии искусственного интеллекта. Т.1. — СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. [Vasil'ev V. N., Pavlov A. V. Opticheskie tekhnologii iskusstvennogo intellekta. Vol.1. — SPb: SPbGU ITMO, 2008]
5. Lipinskii A. Y., Rudiakova A. N. Acousto-optic computing environment for stream data processing // Applied Optics. — 2011. — Vol. 50. — P. 4917–4921.
6. Choi Y., You K., Choi J., Sung W. A real-time FPGA-based 20000-word speech recognizer with optimized DRAM access // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. — 2010. — Vol. 57, N 8. — P. 2119–2131.
7. Sudarsanam A., Barnes R., Carver J. et al. Dynamically reconfigurable systolic array accelerators: a case study with extended Kalman filter and discrete wavelet transform algorithms // IET Computers & Digital Techniques. — 2010. — Vol. 4, N 2. — P. 126–142.
8. Chun H. H., Yiu C. K. F. Hybrid reconfigurable architecture for low power digital signal processing system // Proc. of 2010 International Conference on Green Circuits and Systems. — 2010. — P. 370–374.
9. Липинский А. Ю., Рудякова А. Н. Оптоэлектронные вычислительные среды с динамически изменяемой архитектурой // Тр. XIII Междунар. науч.-практич. конф. «Современные информационные и электронные технологии». — Одесса. — 2012. — С. 316. [Lipinskii A. Yu., Rudyakova A. N. // Proceed. of the 13<sup>th</sup> Int. conf. "Modern information and electronic technologies". Odessa. 2012. P. 316]
10. Kasahara D., Morita D., Kosugi T. et al. Demonstration of blue and green GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers by current injection at room temperature // Applied Physics Express. — 2011. — N 4. — P. 072103-1–072103-3.
11. Липинский А. Ю., Рудякова А. Н., Данилов В. В. Моделирование процессов записи-чтения фоторефрактивных транспарантов методом распространяющегося пучка // Регистрация, хранение и обработка данных. — 2011. — Т. 13, № 2. — С. 16–26. [Lipinskii A. Yu., Rudyakova A. N., Danilov V. V. // Registratsiya, khranenie i obrabotka dannykh. 2011. Vol. 13, N 2. P. 16]
12. Липинский А. Ю. Синтез дифракционных решеток в кристалле LiNbO<sub>3</sub> // Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. «Радиотехника». — 2012. — № 169. — С. 343–348. [Lipinskii A. Yu. // Vseukr. mezhved. nauch.-tekhn. sb. «Radiotekhnika». 2012. N 169. P. 343]
13. Максименко В. А., Сюй А. В., Карпец Ю. М. Фотоиндуцированные процессы в кристаллах ниобата лития. — Москва: Физматлит, 2008. [Maksimenko V. A., Syui A. V., Karpets Yu. M. Fotoindutsirovannye protsessy v kristallakh niobata litiya. Moskva: Fizmatlit, 2008]
14. Сидоров Н. В., Волк Т. Р., Маврин Б. Н., Калинин В. Т. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны. — Москва: Наука, 2003. [Sidorov N. V., Volk T. R., Mavrin B. N., Kalinnikov V. T. Niobat litiya: defekty, fotorefraktsiya, kolebatel'nyi spektr, polyaritony. Moskva: Nauka. 2003]
15. Volk T., Wohlecke M. Lithium niobate. Defects, photorefraction and ferroelectric switching. — Berlin: Springer, 2008.
16. Антонычева Е. А., Сидоров Н. В., Сюй А. В. и др. Кинетика фоторефрактивного рассеяния света в кристаллах ниобата лития стехиометрического состава // Перспективные материалы. — 2010. — № 5. — С. 36–40. [Antonycheva E. A., Sidorov N. V., Syui A. V. i dr. // Perspektivnye materialy. 2010. N 5. P. 36]
17. Ушаков Н. М., Колосов В. В. Брэгговское отражение оптических и акустических волн от оптически наведенных периодических структур в ниобате лития с примесью железа // Письма в ЖТФ. — 2001. — Т. 27, вып. 24. — С. 40–45. [Ushakov N. M., Kolosov V. V. // Pis'ma v ZhTF. 2001. Vol 27, iss. 24. P. 40]
18. STM32F100RB Mainstream Value line, ARM Cortex-M3 MCU with 128 Kbytes Flash, 24 MHz CPU, motor control and CEC functions: <http://www.st.com/internet/mcu/product/216844.jsp>

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 07.02 2013 г.*

**Lipinskii A. Y. A control unit for a laser module of optoelectronic computing environment with dynamic architecture.**

*Key words: laser module, optoelectronic acousto-optic computing environment, microcontroller.*

The paper presents the developed control unit of laser modules of optoelectronic acousto-optic computing environment. The unit is based on ARM microcontroller of Cortex M3 family, and allows alternating between recording (erase) and reading modes in accordance with a predetermined algorithm and settings — exposure time and intensity. The principal electric circuit of the presented device, the block diagram of microcontroller algorithm, and the example application of the developed control unit in the layout of the experimental setup are provided.

Ukraine, Donetsk national university.

**Ліпінський О. Ю. Пристрій керування лазерним модулем оптоелектронного обчислювального середовища з динамічно змінюваною архітектурою.**

*Ключові слова: лазерний модуль, оптоелектронне акустооптичне обчислювальне середовище, мікроконтролер*

Представлено розроблений пристрій керування лазерними модулями оптоелектронного акустооптичного обчислювального середовища на основі мікроконтролера сімейства Cortex M3, який дозволяє чергувати режими записів (стирання) та читання, відповідно до попередньо заданих алгоритму і параметрів (часу експонування та інтенсивності випромінювання). Наведено електричну принципову схему пристрою, блок-схему алгоритму роботи мікроконтролера, приклад застосування розробленого блоку управління у складі макета експериментальної установки.

Україна, Донецький національний університет.



УДК 621.315.592

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, к. т. н. А. П. КУТРАКОВ, к. т. н. Н. С. ЛЯХ-КАГУЙ, А. М. ВУЙЦИК

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

## ДВУХФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ-ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

*Представлена конструкция датчика давления-температуры на основе нитевидных кристаллов кремния  $p$ -типа, легированных бором, с удельным сопротивлением  $0,005 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , который работоспособен в интервале температур от  $-100$  до  $+200^\circ\text{C}$  и в диапазоне давлений от  $0$  до  $20 \text{ МПа}$ . Датчик предназначен для широкой области применений.*

**Ключевые слова:** нитевидные кристаллы, кремний, датчик, температура, давление.

К современным датчикам физических величин предъявляется целый ряд требований: многофункциональность, миниатюрность, высокая точность преобразования, стабильность и др., которые могут быть достигнуты с помощью новых структурных и схемотехнических решений [1–3]. Анализ литературных источников показал, что в настоящее время интенсивно разрабатываются совмещенные датчики давления и температуры [4–6]. Потребность в таких датчиках значительна, т. к.  $60–70\%$  от общего объема измерений приходится на измерение давления и температуры. Известные многофункциональные датчики, которые позволяют одновременно получать информацию о нескольких измеряемых параметрах, таких как температура, деформация, давление, магнитное поле и др., создаются по сложным микроэлектронным технологиям, требующим специальных материалов и оборудования [7]. Поэтому существует потребность в создании более простой технологии изготовления многофункциональных датчиков, отвечающих всем современным требованиям к первичным преобразователям.

В основу разработанного двухфункционального датчика давления-температуры была положена зависимость сопротивления полупроводниковых кристаллов, в частности кристаллов кремния, не только от деформации, но и от температуры. С этой целью проводились исследования электрофизических и механических свойств нитевидных кристаллов (НК) кремния  $p$ -типа, легированных бором, с различным удельным сопротивлением  $\rho$  в широком интервале температур и деформаций [8, 9]. Анализ результатов исследований показал, что тензорезисторы на основе НК кремния с  $\rho=0,005 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  обладают оптимальными для создания на их основе двухфункциональных датчиков давления-температуры характеристиками: линейной зависимостью сопро-

тивления от температуры и минимальной зависимостью коэффициента тензочувствительности от температуры. На основании этого нами была предложена мембранная конструкция двухфункционального датчика давления-температуры. Основой конструкции является мембрана с двумя закрепленными на ней тензорезисторами на основе НК кремния  $p$ -типа с удельным сопротивлением  $0,005 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , включенными в измерительную схему. В режиме реального времени схема обеспечивает раздельное непрерывное преобразование избыточного давления и измеренной температуры в унифицированные токовые электрические выходные сигналы ( $4–20 \text{ мА}$  постоянного тока).

Конструкция разработанного датчика показана на **рис. 1**. Измеряемое давление воспринимается мембраной 1, на которой закреплены тензорезисторы 2 и 3. Под действием давления мембрана деформируется, и эта деформация передается тензорезисторам. Место закрепления тензорезисторов выбрано таким образом, что один из них испытывает деформацию растяжения, а другой — сжатия. Под воздействием давления

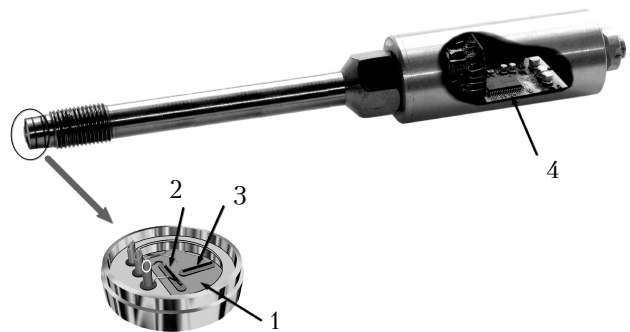


Рис. 1. Датчик давления-температуры: 1 — мембрана; 2, 3 — тензорезисторы; 4 — информационно-измерительная система

и температуры тензорезисторы изменяют свое сопротивление пропорционально деформации и температуре:

$$R1=R1_0+\Delta R1_{\varepsilon}+\Delta R1_t, \quad (1)$$

$$R2=R2_0-\Delta R2_{\varepsilon}+\Delta R2_t, \quad (2)$$

где  $R1_0$ ,  $R2_0$  — номинальное сопротивление тензорезисторов;

$\Delta R1_{\varepsilon,t}$ ,  $\Delta R2_{\varepsilon,t}$  — изменение сопротивления тензорезисторов от давления (индекс  $\varepsilon$ ) и от температуры (индекс  $t$ ) соответственно.

Изменения значений сопротивления тензорезисторов от температуры и давления преобразуются информационно-измерительной системой 4 по каналам измерения давления и температуры в унифицированные токовые электрические выходные сигналы. Расположение тензорезисторов непосредственно на мембране обеспечивает минимальную инерционность измерения температуры. Изменяя толщину мембраны, можно в широком диапазоне изменять верхний предел измерения давления.

На рис. 2 представлены графики температурной зависимости относительного изменения сопротивления свободного тензорезистора и закрепленного на мембране. Как видно из рисунка, температурный коэффициент сопротивления закрепленного тензорезистора больше, чем свободного, и равен  $+0,2\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ . Кроме того, закрепление тензорезистора приводит к уменьшению нелинейности зависимости его сопротивления от температуры. Такое различие температурных зависимостей обусловлено тем, что коэффициенты линейного расширения связующего материала, материалов мембраны и чувствительного элемента тензорезистора различны [10].

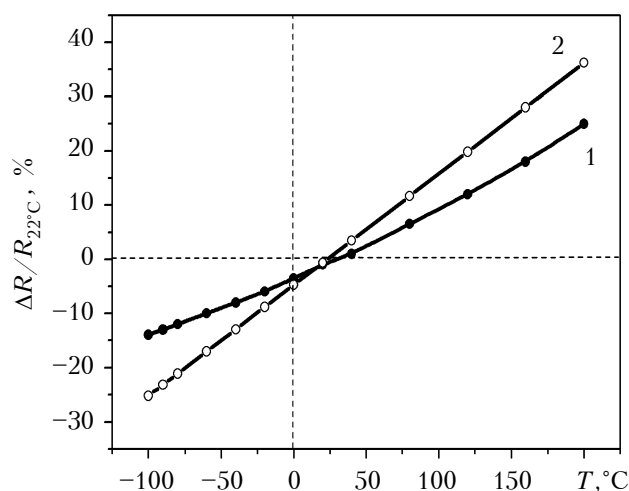


Рис. 2. Температурная зависимость относительного изменения сопротивления свободного тензорезистора (1) и закрепленного на мембране (2)

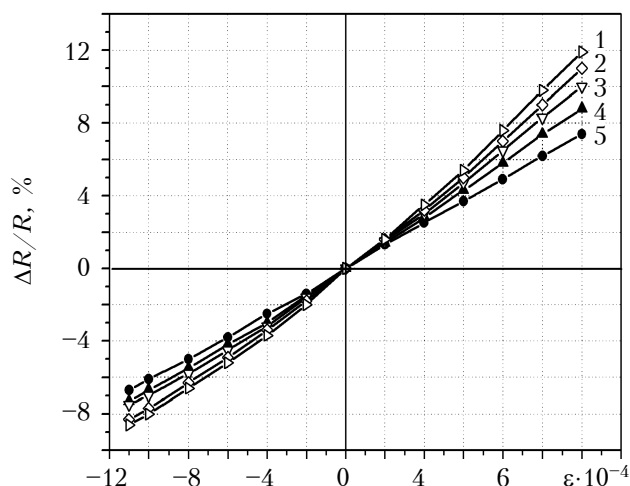


Рис. 3. Деформационные характеристики тензорезистора на основе НК Si с  $\rho=0,005$  Ом·см при температуре  $-100^\circ\text{C}$  (1);  $-50^\circ\text{C}$  (2);  $+20^\circ\text{C}$  (3);  $+100^\circ\text{C}$  (4);  $+200^\circ\text{C}$  (5)

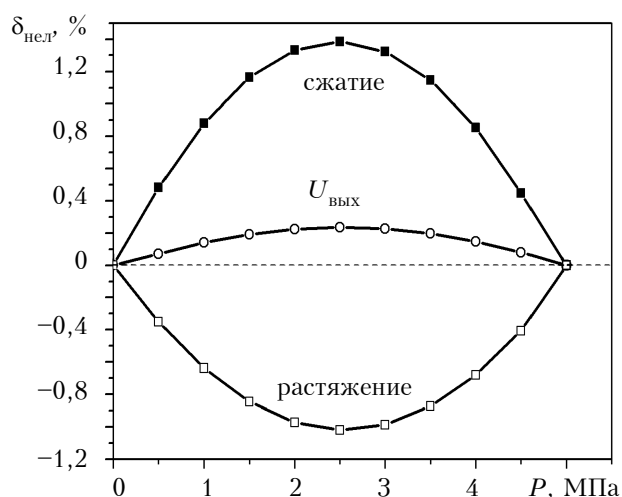


Рис. 4. Зависимость нелинейности характеристик датчика на основе НК Si и измерительной схемы от давления на мембрану

На рис. 3 представлены типичные градуировочные характеристики тензорезисторов на основе НК кремния, полученные при деформации сжатия и растяжения при разных температурах. Как следует из рисунка, деформационные характеристики практически линейны до уровня деформации порядка  $1 \cdot 10^{-3}$ . Различие в наклоне кривых, полученных при сжатии и при растяжении, обусловлено термической деформацией, возникающей при закреплении тензорезистора на упругом элементе.

При включении двух тензорезисторов ( $RT_1$  — для восприятия деформации растяжения,  $RT_2$  — деформации сжатия) в полумостовую измерительную схему, зависимость напряжения  $U_{\text{вых}}$ , снимаемого с измерительной диагонали, от при-

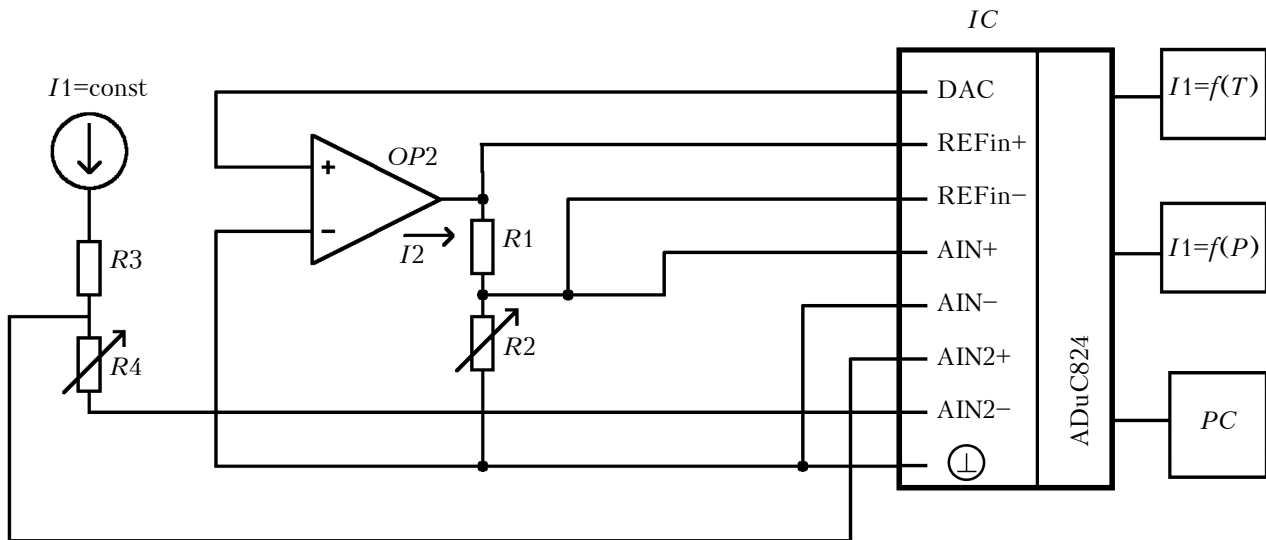


Рис. 5. Структурная схема информационно-измерительной системы

ращения их сопротивлений  $\Delta R$  имеет нелинейный характер:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{п}}}{2} \left( \frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right), \quad (3)$$

где  $U_{\text{п}}$  — напряжение питания мостовой схемы.

В качестве примера на **рис. 4** приведена зависимость относительной нелинейности  $\delta_{\text{нел}}$  характеристик одного из разработанных датчиков от давления. Как видно из рисунка, нелинейность этой зависимости относительно прямой линии, соединяющей крайние точки, достаточно велика: она составляет около 1,4...1,5% при деформации сжатия и -1,0...-1,1% при деформации растяжения.

При включении тензорезисторов  $RT_1$  и  $RT_2$  в неуравновешенную мостовую схему первого вида симметрии [11] обеспечивается относительно малая нелинейность выходной характеристики датчика давления (кривая  $U_{\text{вых}}$  на **рис. 4**) — порядка 0,24%, что вполне достаточно для большинства технологических измерений [12], но при решении целого ряда прикладных задач необходимы датчики с более высокими метрологическими характеристиками.

Для увеличения точности и коррекции погрешностей преобразования в разработанном датчике используется микроконвертор ADUC824 [13], который включает аналоговые и цифровые блоки, а также микропроцессор на базе ядра 8052, с помощью которого осуществляется вторичная обработка сигнала. В системе используется отдельный управляемый источник тока, построенный на базе цифро-аналогового преобразователя, который является частью микроконтроллера (**рис. 5**). Раздельное питание двух тензорезисторов позволяет устранить аддитивную погрешность смещения нуля, возникающую при отклонении от номинала сопротивлений тензо-

резисторов. Большое влияние на точность измерения давления оказывает температурная погрешность, вызванная изменением температурных коэффициентов тензочувствительности и сопротивления. Предложенная схема позволяет осуществить гибкую программно-аппаратную термокомпенсацию канала измерения давления путем контроля температуры и введения поправочных коэффициентов.

Технические характеристики разработанного датчика представлены в **таблице**. Его стабильность, чувствительность и диапазон измерения достаточно удовлетворительны. Благодаря своей конструктивной простоте и функциональной завершенности он выгодно отличается от аналогичных датчиков давления, изготовленных с применением сложных микроэлектронных технологий, а наличие в нем канала изме-

Основные технические характеристики датчика давления-температуры

Параметр	Значение параметра
Верхние пределы измерения, МПа	от 0,1 до 20
Пределы погрешности канала измерения давления, %	$\pm 0,1$ ; $\pm 0,25$ ; $\pm 0,5$
Температурный дрейф начального сигнала, $\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	$\pm 0,03$
Температура измеряемой среды, $^\circ\text{C}$	-100...+200
Пределы погрешности канала температуры, $^\circ\text{C}$	0,5...1,5
Постоянная времени канала температуры (зависит от диапазона измеряемого давления), с	12

рения температуры позволяет значительно повысить информативность процесса измерения. Разработанный двухфункциональный датчик давления-температуры может использоваться в различных областях — в моторостроении, авиационной, нефтедобывающей и других отраслях промышленности.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Войтович І. Д., Корсунський В. М. Інтелектуальні сенсори. — Київ: Інститут кібернетики НАН України, 2007. [Voitovich I. D., Korsun'skii V. M. Intel'ktual'ni sensori. Kyiv: Institut kibernetiki NAN Ukrayini, 2007]
2. Лепіх Я. І., Гордієнко Ю. О., Дзядевич С. В. та ін. Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем. — Одеса: Астропринт, 2010. [Lepikh Ya. I., Gordiyenko Yu. O., Dzyadevich S. V. ta in. Stvorenniya mikroelektronnikh datchikiv novogo pokolinnya dlya intelektual'nikh sistem. Odesa: Astroprint, 2010]
3. Вуйцик В., Голяка Р., Каліта В. та ін. Аналогова мікросхемотехніка вимірювальних та сенсорних пристроїв. — Львів: ДУ «Львівська політехніка», 1999. [Vuitsik V., Golyaka R., Kalita V. ta in. Analogova mikroskhemotekhnika vimiryuv'al'nikh ta sensornikh pristroyiv. — L'viv: DU «L'viv's'ka politekhnika», 1999]
4. Harrop P., Das R. // Active RFID and Sensor Networks 2007-2017 // [www.idtechex.com/products/en/view.asp?publicationid=ib6](http://www.idtechex.com/products/en/view.asp?publicationid=ib6).
5. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е., Васильев В. А. Повышение устойчивости датчиков к внешним воздействиям факторам // Современная техника и технологии. — Ноябрь, 2011 [Belozubov E. M., Belozubova N. E., Vasil'ev V. A. // Sovremennaya tekhnika i tekhnologii. Noyabr', 2011]
6. <http://www.mems-issys.com>
7. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Кутраков А. П., Павловский И. В. О возможности создания высокочувствительных пьезорезистивных сенсоров механических величин для криогенных температур // Датчики и системы. — 2005. — № 7. — С. 17—21. [Druzhinin A. A., Mar'yamova I. I., Kuttrakov A. P., Pavlovskii I. V. // Datchiki i sistemy. 2005. N 7. P. 17]
8. Дружинин А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П., Лях-Кагуй Н. С. Ниткоподібні кристали кремнію для сенсорної електроніки // Фізика і хімія твердого тіла. — 2011. — Т. 12, № 4. — С. 1078—1084. [Druzhinin A. O., Mar'yamova I. I., Kuttrakov O. P., Lyakh-Kagui N. S. // Fizika i khimiya tverdogo tila. 2011. Vol. 12, N 4. P. 1078]
9. Дружинин А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П., Лях-Кагуй Н. С. Тензорезистивні сенсори тиску на основі ниткоподібних кристалів кремнію // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. — 2012. — Т. 3, № 9 (3). — С. 16—24. [Druzhinin A. O., Mar'yamova I. I., Kuttrakov O. P., Lyakh-Kagui N. S. // Sensorna elektronika ta mikrosistemni tekhnologiyi. 2012. Vol. 3, N 9 (3). P. 16]
10. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Кутраков А. П. и др. Полупроводниковые сенсоры механических величин на основе микрокристаллов кремния для экстремальных условий // Микросистемная техника. — 2001. — № 9. — С. 3—8. [Druzhinin A. A., Mar'yamova I. I., Kuttrakov A. P. i dr. // Mikrosistemnaya tekhnika. 2001. N 9. P. 3]
11. Воробьев С. А. Электрические измерения неэлектрических величин. Вып. 2. Основы теории и расчета неуравновешенных мостовых схем с датчиками сопротивления. — Свердловск: УПИ им. С. М. Кирова, 1975. [Vorob'ev S. A. Elektricheskie izmereniya neelektricheskikh velichin. Vyp. 2. Osnovy teorii i rascheta neuravnoveshennykh mostovykh skhem s datchikami soprotivleniya. Sverdlovsk: UPI im. S. M. Kirova, 1975]
12. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. — Москва: Энергоатомиздат, 1983. [Vaganov V. I. Integral'nye tenzopreobrazovateli. Moskva: Energoatomizdat, 1983]
13. [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADUC824.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADUC824.pdf)

Дата поступления рукописи  
в редакцию 27.05 2013 г.

Druzhinin A. A., Kuttrakov A. P., Liakh-Kaguy N. S., Vuitsyk A. M. **Dual-function pressure-temperature sensor based on silicon whiskers.**

**Keywords:** whiskers, silicon, sensor, temperature, pressure.

The article presents the design of a pressure-temperature sensor based on p-type silicon whiskers, doped with boron, with a resistivity of 0,005 Ohm·cm. The sensor is operable in a temperature range from –100 to +200°C and at pressures from 0 to 20 MPa. The sensor is designed for a wide range of applications.

Ukraine, Lviv Polytechnic National University.

Дружинин А. О., Кутраков О. П., Лях-Кагуй Н. С., Вуйцик А. М. **Двофункціональний датчик тиску-температури на основі нитковидних кристалів кремнію.**

**Ключові слова:** ниткоподібні кристали, кремній, датчик, температура, тиск.

Представлено конструкцію датчика тиску-температури на основі ниткоподібних кристалів кремнію p-типу, легованих бором, з питомим опором 0,005 Ом·см, який є працездатним в інтервалі температури від –100 до +200°C і в діапазоні тиску від 0 до 20 МПа. Датчик призначений для широкої області застосувань.

Україна, Національний університет «Львівська політехніка».



УДК 629.782

Е. С. ЗАВАДСКАЯ, к. т. н. Б. М. РАССАМАКИН, к. т. н. В. А. РОГАЧЁВ,  
к. т. н. С. М. ХАЙРНАСОВ, к. т. н. В. И. ХОМИНИЧ

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: sergey.khairnasov@gmail.com

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ НАНОСПУТНИКА

*Разработана методика моделирования теплового режима и проведены термовакуумные испытания наноспутника (НС) PolyITAN-1. Результаты показали корректность моделирования орбиты НС и факторов космического пространства и подтвердили работоспособность узлов и элементов наноспутника в заданных условиях.*

*Ключевые слова:* космический аппарат, наноспутник, термовакуумные испытания.

В последнее десятилетие отмечается значительный рост числа запусков космических аппаратов, масса которых не превышает 10 кг, так называемых пико- и наноспутников. Значительную роль среди космических аппаратов такого типа играют наноспутники стандарта CubeSat — малые искусственные спутники Земли для исследования космоса и зондирования Земли, имеющие объем примерно 0,001 м<sup>3</sup> и массу не более 1,33 кг. Образование такого класса спутников повлекло за собой развитие совершенно нового направления в аэрокосмических технологиях — микротехнологии. Это стало возможным благодаря достижениям в микроминиатюризации элементной базы, использованию новых полимерных и композиционных материалов, интеграции бортового аппаратного комплекса на основе средств вычислительной техники, использованию негерметичных конструкций и др.

В НТУУ «КПИ» по университетской программе разрабатывается наноспутник (НС) PolyITAN-1 и на сегодняшний день изготовлена его инженерная модель (рис. 1). Это малый космический аппарат (искусственный спутник Земли), который имеет форму прямого параллелепипеда размерами 140×140×120 мм, весом око-

ло 1 кг. Запуск PolyITAN-1 со временем планируется на ракетоносителе «Днепр».

Одним из важных этапов при разработке космических аппаратов и их элементов являются термовакуумные испытания, в ходе которых моделируется влияние на аппарат факторов космического пространства: низкой температуры, вакуума, различных видов излучения, черноты пространства и др. [1–4]. Так, проходя по орбите вокруг Земли, НС непрерывно подвергается воздействиям солнечного и земного излучений, которые значительно влияют на тепловое состояние и температурный режим электронной аппаратуры НС и, соответственно, на ее надежность в полете. В различные промежутки времени влияние этих факторов будет неодинаковым: в зависимости от положения НС на орбите и условий функционирования его систем на поверхности корпуса НС будут попадать переменные тепловые потоки различной интенсивности, которые и будут определять тепловой режим всех узлов и элементов, в том числе и электронной аппаратуры НС.

Целью моделирования тепловых режимов наноспутника при термовакуумных испытаниях в лабораторных условиях было установление работоспособности узлов и систем НС при длительном комплексном воздействии факторов космического пространства, определение возможных нештатных ситуаций, которые могут возникнуть в реальном полете.

### Объект испытаний

НС состоит из подсистем обработки данных, ориентации и стабилизации, навигации, телеметрии, электроснабжения, приемопередающей подсистемы, межсистемной кабельной сети и элементов несущей конструкции. Все подсистемы компактно расположены на трех платах, закрепленных в направляющих фермы. На верхней плате расположены магнитометр, гиро-

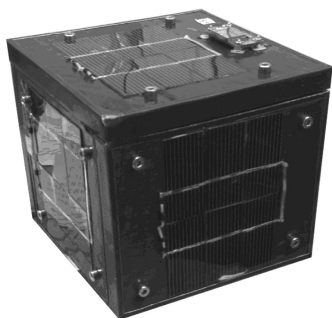


Рис. 1. Наноспутник PolyITAN-1

скоп, датчик температуры и датчик координат Солнца, которые представляют собой подсистему телеметрии, ориентации и стабилизации НС. Посередине размещается плата с GPS-модулем и центральным процессором, в котором содержится циклограмма полета НС и основная программа (подсистема обработки данных и навигации). Нижняя плата представляет собой подсистему электроснабжения. Конструкция НС обеспечивает механическое соединение бортовой аппаратуры и всех элементов спутника в единое целое, монтаж кабельной сети, зачековку и фиксацию концов на время его транспортировки, выведения на орбиту и приведения в рабочее состояние.

Сотопанельный каркас представляет собой трехслойную панель с облегченным алюминиевым сотовым заполнителем, двумя углепластиковыми обшивками и приклеенной диэлектрической полиимидной пленкой. В качестве заполнителя использовались «соты» высотой 10 мм из фольги толщиной 0,023 мм. Монослойные углепластиковые обшивки выполнялись из углеродистой конструкционной ленты. Удельный вес такого каркаса не превышает 0,82 кг/м<sup>2</sup>. На каждом сотопанельном каркасе крепится по шесть фотоэлектрических преобразователей.

#### Экспериментальное оборудование и методика испытаний

Для проведения термовакuumных испытаний НС и воспроизведения условий воздействия солнечного и земного излучений использовался лабораторный стенд ТВК-0,12 [5]. Общий вид и структурная схема моделирующего стенда представлены на **рис. 2**.

Термовакuumный стенд ТВК-0,12 включает в себя следующие основные системы: вакуумную камеру 1, криогенную систему 3, имитатор земного излучения (ИЗИ) (4), имитатор солнечного излучения (ИСИ) 5. Для измерения температуры поверхностей элементов НС и криоэкранов применялись 14 миниатюрных контактных датчиков (термопар и термометров сопротивления). Регистрация и обработка температурных данных осуществлялась автоматизированной многоканальной системой измерения температуры [5].

Имитатор солнечного излучения, разработанный и созданный в НТУУ «КПИ», расположен вне камеры и состоит из оптической системы, источника излучения в виде ксеноновой лампы ДКсШ-3000-3 и блока питания. Имитатор предназначен для создания в рабочей зоне камеры лучистого потока, который по своим спектральным характеристикам близок к заатмосферному солнечному излучению.

Имитатор излучения Земли представляет собой электронагреватель, выполненный в виде плиты, покрытой черной термоэмалью, размерами 185×140×30 мм, к которой нижней гранью (IV) через дистанцирующие прокладки крепится НС. С помощью блока термостабилизации регу-

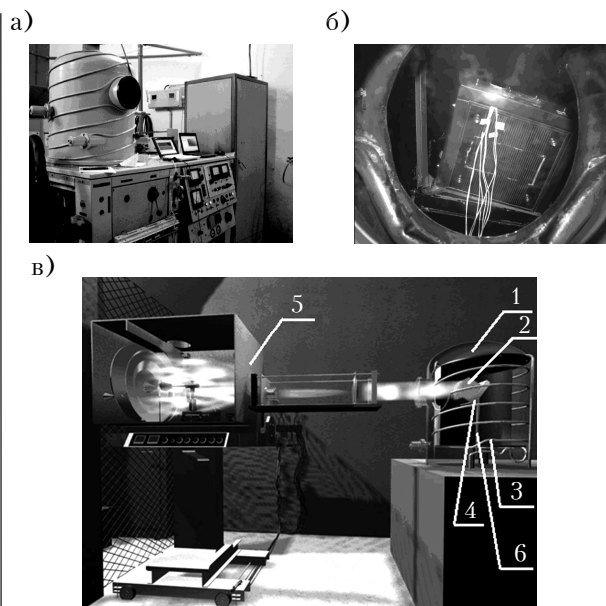


Рис. 2. Общий вид термовакuumного стенда ТВК-0,12 (а), положение НС в камере (б) и структурно-функциональная схема (в):

1 — вакуумная камера; 2 — НС; 3 — криогенная система; 4 — ИЗИ; 5 — ИСИ; 6 — опорно-поворотное устройство

лируется величина теплового потока, поступающего от имитатора на грань IV.

Для моделирования орбиты НС с периодом вращения 97 мин, что соответствует одному полному витку, использовалось опорно-поворотное устройство 6, позволяющее вращать НС вокруг собственной оси и изменять угол его наклона по отношению к падающему солнечному потоку.

Грань IV в полете ориентирована на Землю, поэтому при проведении испытаний она подвергалась воздействию только земного излучения. Тепловое состояние НС исследовалось в двух орбитальных режимах — «солнечном» и «тенивом». В ходе эксперимента основные факторы космического пространства воспроизводились в следующих пределах:

- вакуум до  $8 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. с приведенной погрешностью  $\pm 30\%$ ;
- солнечное излучение не меньше 1400 Вт/м<sup>2</sup> с неоднородностью  $\pm 7\%$ ;
- земное излучение от 190 до 750 Вт/м<sup>2</sup> с погрешностью  $\pm 5\%$ ;
- температура азотоэкранов до  $-193^\circ\text{C}$  с разбросом  $\pm 3^\circ\text{C}$ ;
- относительная степень черноты криоэкранов со стороны объекта  $\geq 0,93$ .

Эксперимент проходил в следующем порядке. НС крепился на опорно-поворотном механизме под углом к вертикальной оси камеры  $Z_k$  таким образом, чтобы на грань I солнечное излучение попадало под прямым углом в точке С на **рис. 3**. Начальное положение НС при моделировании — точка А — соответствует выходу НС из тени Земли. Вращением НС по часовой стрелке (скорость вращения НС вокруг оси каме-

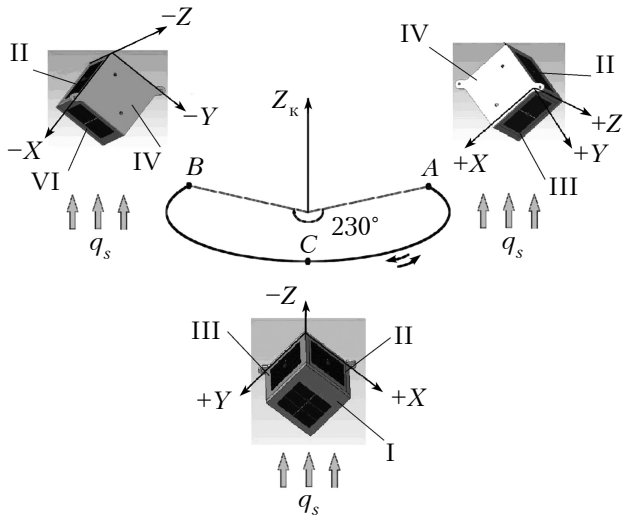


Рис. 3. Положение НС относительно оси камеры при испытаниях

ры составляла примерно  $3,3^\circ/\text{мин}$ ) начиналось моделирование «солнечного» орбитального режима, во время которого имитаторы солнечного и земного излучений были постоянно включены. Этот процесс длился 63 мин, после чего НС оказывался в точке *B*, соответствующей моменту, когда НС заходит в тень Земли. Точка *C* соответствует положению, в котором облучение НС максимальное (суммарный тепловой поток от Солнца  $q_s=1400 \text{ Вт/м}^2$  и от Земли  $q_z=750 \text{ Вт/м}^2$ ). Для моделирования «теневого» режима ИСИ выключали и против часовой стрелки НС возвращали в точку *A*. Этот процесс длился 34 мин. Таким образом, имитатор земного излучения работал в течение всего эксперимента непрерывно, а ИСИ включался периодически, что в целом соответствовало условиям прохождения НС по теневой и солнечной частям околоземной орбиты.

Для обеспечения надежного теплового контакта с контролирующей поверхностью термодатчики крепились к поверхности с помощью высокотеплопроводного клея (коэффициент теплопроводности не менее  $0,5 \text{ Вт/(м·К)}$ ). Погрешность измерения температуры составляла  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ . С помощью регулятора напряжения температура имитатора Земли циклически менялась в зависимости от угла поворота и времени движения НС по орбите.

Во время проведения эксперимента были смоделированы четыре витка прохождения НС по орбите и получены зависимости распределения температуры на двух сотовых панелях, на платах системы энергообеспечения, навигации и телеметрии.

Одной из основных задач экспериментальных исследований было определение температурных диапазонов функционирования элементов НС при перемещении его по орбите, в частности наиболее теплонагруженных элементов — микроконтроллеров платы обработки данных, телеметрии и системы энергообеспечения, а также аккумуляторных батарей. В соответствии с

требованиями к обеспечению тепловых режимов бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов, а также к характеристикам электронных компонентов, допустимым для функционирования микроконтроллеров является температурный интервал от  $-20$  до  $+50^\circ\text{C}$ , для блока аккумуляторов — от  $0$  до  $+40^\circ\text{C}$ .

### Результаты испытаний

Результаты измерения температурных полей в элементах НС для второго и третьего орбитальных витков приведены на рис. 4 и 5.

На рис. 4 показано изменение температуры поверхностей граней I и III, а также соответствующие точки расположения НС во время испытаний (*A*, *B*, *C*). Как и ожидалось, температура поверхностей была наименьшей сразу после окончания «теневого» режима (от  $-23$  до  $-32^\circ\text{C}$ ), а наибольшая ( $-5^\circ\text{C}$ ) — на грани I при нахождении НС в точке *C*.

На рис. 5 приведены графики изменения во времени температуры электронных элементов НС: микроконтроллеров платы обработки дан-

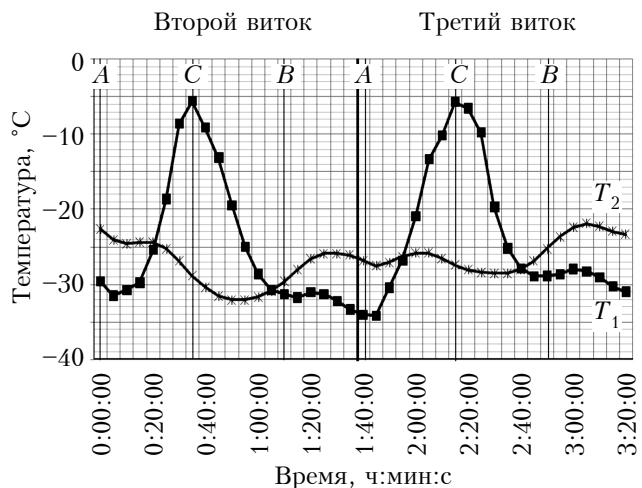


Рис. 4. Изменение во времени температуры поверхности граней I ( $T_1$ ) и III ( $T_2$ ) на втором и третьем витках

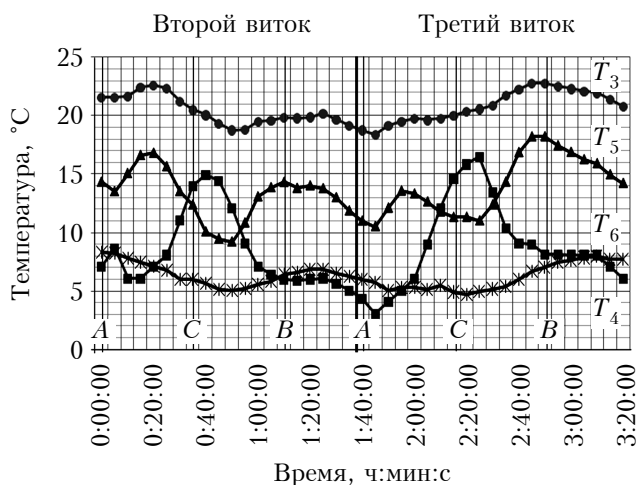


Рис. 5. Изменение во времени температуры электронных элементов НС на втором и третьем витках



ных ( $T_3$ ) и платы системы телеметрии ( $T_4$ ), а также системы энергообеспечения — аккумуляторных батарей ( $T_6$ ) и микроконтроллера платы энергообеспечения ( $T_5$ ).

Как видно из рисунка, самая высокая температура во время испытаний была у микроконтроллера подсистемы обработки данных ( $T_3$ ), что связано с ее непрерывной работой в течение полета: значение  $T_3$  изменялось от 18 до 23°C. Самую низкую температуру имели аккумуляторные батареи ( $T_6=5...9^\circ\text{C}$ ), поскольку они расположены ближе к источнику земного излучения.

Колебания температуры на микроконтроллере подсистемы телеметрии ( $T_4$ ) от 5 до 17°C связаны с периодичностью ее работы. Наибольшие значения  $T_4$  достигались при включении рабочей нагрузки на подсистему, когда НС находился в области правее точки максимального облучения НС. Смещение максимального значения  $T_4$ , так же как и значений температуры других элементов НС (см. рис. 5), относительно точки С связано с инерционностью процессов теплообмена внутри аппарата. Характер запаздываний и их временные характеристики зависят от места расположения элемента внутри аппарата, теплового влияния на него других компонентов, а также циклограммы его работы в течение эксперимента.

Температура микроконтроллера платы энергообеспечения ( $T_5$ ) изменяется в пределах от 9 до 17°C. При этом следует обратить внимание на характер этих изменений — он демонстрирует влияние на температурный режим микроконтроллера не только внешних тепловых потоков, но и циклограммы его работы (т. е. моменты его включения и выключения). Так, на графике видно, что всплески температуры  $T_5$  имеют не только при прохождении НС по солнечной части орбиты, но и по теневой, и соответствуют включению устройства. Также отметим процесс влияния температуры  $T_5$  на другие элементы: при включении микроконтроллера платы энергообеспечения наблюдается незначительное повышение температуры и микроконтроллера платы обработки данных ( $T_3$ ), и аккумуляторных батарей ( $T_6$ ). Что касается некоторого роста  $T_5$  на третьем витке по сравнению со значениями на втором, его можно объяснить квазистационарностью процессов в камере и в самом аппарате при проведении испытаний.

### Выводы

Таким образом, разработанная методика позволила провести термовакuumные испытания наноспутника PolyITAN-1. Полученные результаты показали корректность моделирования орбиты НС и факторов космического пространства и подтвердили работоспособность узлов и элементов аппарата в заданных условиях. Все приборы работали при положительных значениях температуры, лежащих в соответствующих допустимых диапазонах. При этом не было заме-

чено никаких отклонений в функционировании и работе электронной аппаратуры НС.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Козлов Л. В., Нусинов М. Д., Акишин А. И. и др. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды. — Москва: Машиностроение, 1971. [Kozlov L. V., Nusinov M. D., Akishin A. I. i dr. Modelirovanie teplovykh rezhimov kosmicheskogo apparata i okruzhayushchei ego sredy. Moscow: Mashinostroyeniye, 1971]
2. Нусинов М. Д. Воздействие и моделирование космического вакуума. — Москва: Машиностроение, 1982. [Nusinov M. D. Vozdeistvie i modelirovanie kosmicheskogo vakuuma. Moscow: Mashinostroyeniye, 1982]
3. Копяткевич Р. М., Альтов В. В., Мишин Г. С. Тепловые режимы радиоэлектронных приборов космических аппаратов // Тр. Второй российской нац. конф. по теплообмену. — 1998. — Т. 1. — С. 129—132. [Kopyatkevich R. M., Al'tov V. V., Mishin G. S. // Tr. Vtoroi rossiiskoi nats. konf. po teploobmenu. 1998. Vol. 1. P. 129]
4. Рассамкин Б. М., Рогачев В. А., Хайрнасов С. М. и др. Экспериментальное моделирование тепловых режимов эксплуатации оптико-электронного прибора для микроспутника // Космична наука і технологія. — 2003. — Т. 9, № 4. — С. 34—39. [Rassamakin B. M., Rogachov V. A., Khairnasov S. M. i dr. // Kosmichna nauka i tekhnologiya. 2003. Vol. 9, N 4. P. 34]
5. Рассамкин Б. М., Рогачев В. А., Хоминич В. И. и др. Экспериментальное моделирование тепловых режимов малогабаритных космических аппаратов и их внешних тепловых потоков. Ч. 1. Термовакuumная установка ТВК-2,5 // Космична наука і технологія. — 2002. — Т. 8, № 1. — С. 37—41. [Rassamakin B. M., Rogachov V. A., Khominich V. I. i dr. // Kosmichna nauka i tekhnologiya. 2002. Vol. 8, N 1. P. 37]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 14.06 2013 г.*

Zavadskaja E. S., Rassamakin B. M., Rogachov V. A., Khairnasov S. M., Khominich V. I. **Experimental simulation of nanosatellites heat modes.**

*Keywords: spacecraft, nano-satellite, thermal vacuum tests.*

The technology of thermal modes modelling for nanosatellite (NS) PolyITAN-1 has been developed and thermal vacuum tests have been carried out. The results have shown that the simulation of the NS orbit and space factors is correct and confirmed that NS nodes and elements are operable under the specified conditions.

Ukraine, NTUU «KPI».

Завадська Є. С., Рассамакін Б. М., Рогачов В. А., Хайрнасов С. М., Хомініч В. І. **Експериментальне моделювання теплових режимів наносупутника.**

*Ключові слова: космічний апарат, наносупутник, термовакuumні випробування.*

Розроблено методику моделювання теплового режиму та проведено термовакuumні випробування наносупутника (НС) PolyITAN-1. Результати показали коректність моделювання орбіти НС і факторів космічного простору і підтвердили працездатність вузлів та елементів НС в заданих умовах.

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут».



УДК 678.747:621.317

Д. т. н. А. Ф. БЕЛЯНИН<sup>1</sup>, В. В. БОРИСОВ<sup>2</sup>, к. ф.-м. н. М. А. ТИМОФЕЕВ<sup>2</sup>,  
А. Н. ЛАМСКИЙ<sup>1</sup>Россия, г. Москва, <sup>1</sup>ЦНИТИ «Техномаш», <sup>2</sup>НИИЯФ им. Д. В. Скобельцына МГУ  
E-mail: belyanin@technomash.ru

## НЕНАКАЛИВАЕМЫЕ КАТОДЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР

*Рассмотрены условия формирования и строение пленок алмазоподобных материалов, используемых при изготовлении слоистых ненакаливаемых катодов устройств эмиссионной электроники. Изучены строение и автоэмиссионные свойства слоистых структур с поликластерными пленками алмаза и с алмазоподобными углеродными пленками (АУП), сформированными различными методами. Установлено, что лучшими эмиссионными характеристиками обладают АУП, полученные катодным распылением, эмиссия с поверхности которых происходит по границам глобул.*

**Ключевые слова:** слоистые структуры, эмиссионная электроника.

Одной из задач эмиссионной электроники является снижение барьера эмиссии с поверхности катодов. Перспективы применения устройств эмиссионной электроники, обладающих улучшенными характеристиками, связаны с разработкой слоистых ненакаливаемых (автоэмиссионных) катодов на основе широкозонных полупроводниковых материалов — поликластерных пленок алмаза (**ППА**), алмазоподобных углеродных пленок (**АУП**), пленок AlN и др. Наличие автоэмиссии означает возможность существенного снижения напряженности электрического поля (до 1–10 В/мкм), требуемой для возникновения полевой эмиссии электронов.

Автокатоды на основе углеродных материалов находят применение при создании рентгеновских трубок (досмотровых, микрофокусных, для сканирующего томографа), СВЧ-приборов, электронных пушек для возбуждения лазеров, катодо-люминесцентных осветительных приборов, плоских экранов, электронных проекторов и дисплеев, нейтрализаторов заряда положительных ионных потоков [1, 2]. Наряду с уникальными характеристиками автоэмиссионных катодов, имеется ряд трудностей в их применении. Например, при работе автоэмиссионных катодов с АУП в объем вакуумного прибора в результате катодного распыления этих пленок выделяется атомарный углерод, что требует оснащения вакуумных приборов магниторазрядными насосами или применения геттерирования. Старение автоэмиссионных катодов вызывает необходимость использования технически сложных источников стабилизированного тока.

Цель настоящей работы — изучение строения и автоэмиссионных свойств слоистых ненакали-

ваемых катодов с поликластерными пленками алмаза и с алмазоподобными углеродными пленками, сформированными различными методами.

### Формирование и строение многослойных структур

Изучались эмиссионные свойства следующих слоистых структур: Si/ППА(АУП), W/WC, W/WC/ППА(АУП), плавленый кварц/AlN+Al/АУП.

Пленки для исследований формировали следующими методами (см. **таблицу**): AlN+Al — магнетронным распылением, ППА — дуговым (концентрация алмазной фазы С составляла 99% от объема и больше) и СВЧ-разрядом (C=20–60 об.%), АУП (C<5 об.%) — тлеющим разрядом (АУП<sub>тр</sub>) [3–5] и последующим катодным распылением полученного алмазоподобного углерода. Отметим, что в подложках, предназначенных для получения пленок СВЧ-разрядом, предварительно создавались необходимые для формирования ППА центры нуклеации [6]. Этот процесс проводили при температуре 1025 К бомбардировкой ионами H<sup>+</sup> и C<sub>x</sub>H<sub>y</sub><sup>+</sup> (ВЧ-разряд — 13,56 МГц, 40 Вт — в течение 20 мин), образующимися в СВЧ-плазме (H<sub>2</sub>+(8–10 об.%)CH<sub>4</sub>, давление около 6,6·10<sup>3</sup> Па). Для легирования пленок бором в вакуумную камеру вводили пары смеси этанола (CH<sub>3</sub>OH) с триметилборатом ((CH<sub>3</sub>O)<sub>3</sub>B). При использовании тлеющего разряда на подложку наносили затравочные наночастицы алмаза размером менее 5 нм. При получении пленок катодным распылением использовали диодную и триодную схемы (процесс проводили в импульсном режиме со скважностью 100), при этом в качестве катода-мишени

Метод	Рабочий газ*	Давление газа, кПа	Мощность разряда, Вт	Температура подложки, К	Скорость осаждения, мкм/ч	Состав пленки
Дуговой разряд	(1,5–4) об.% CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub>	>1	—	870–1470	до 40	ППА
СВЧ-разряд	0,5 об.% CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub>	5–10	1000–6000	1000–1125	≈2	ППА, АУП
Тлеющий разряд	(1,5–4) об.% CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub>	>1	—	800–1300	≈6	АУП <sub>ТР</sub>
Катодное распыление АУП <sub>ТР</sub>	—	6,7·10 <sup>-8</sup>	1,2	300	<0,01	АУП
Магнетронное распыление Al	Ar+ (20–60) об.% N <sub>2</sub>	0,8·10 <sup>-3</sup>	700 (ВЧ)	470–570	1,0–1,3	AlN, AlN+Al

применяли пластину из монокристаллического Si со слоем АУП<sub>ТР</sub>.

Концентрация алмазной и алмазоподобной углеродной фаз оценивалась спектроскопией комбинационного рассеяния (КР) с помощью микрорамановского спектрометра LabRam HR800 (HORIBA Jobin-Yvon). Основные максимумы на спектрах КР для ППА — узкие, хорошо выраженные пики при значениях волнового числа  $k \approx 1330 \text{ см}^{-1}$ , а для АУП — размытые пики при  $k$ , равном 1330 и  $1550 \text{ см}^{-1}$  [7]. Интенсивность пиков на спектрах КР ППА, сформированных как дуговым, так и СВЧ-разрядом, зависела от температуры подложки (рис. 1), а для АУП, сформированных тлеющим разрядом, — от кон-

струкции разрядного устройства и предварительной подготовки подложек (рис. 2). Пик при  $k \approx 1600 \text{ см}^{-1}$ , наблюдаемый у АУП, сформированных тлеющим разрядом, характерен для углеродных нанотрубок. На спектрах КР АУП, сформированных катодным распылением, можно выделить четыре перекрывающихся размытых пика с максимумами в области 1225–1232, 1328–1333, 1418–1423 и 1526–1547  $\text{см}^{-1}$  (рис. 2, в).

При использовании высокотемпературных методов (СВЧ- и дугового разрядов) в результате химического взаимодействия с углеродом на границе контакта подложки и углеродной пленки образуются поликристаллические и рентгеноаморфные фазы карбидов. На подложках из Si образуется пленка карбида кремния ( $\alpha$ -SiC, гексагональная сингония, пространственная группа  $P6_3mc$ ), толщина которой не превышает 0,1 мкм. С подложками из вольфрама активно взаимодействует углерод, при этом образуются слои карбидов вольфрама: WC (гексагональная сингония) и W<sub>2</sub>C (ромбическая сингония;  $Pbcn$ ) толщиной до 10 мкм (рис. 3, рентгеновский дифрактометр ДРОН-6,0, Cu  $K\alpha$ -излучение, графитовый монохроматор). На различных участках поверхности подложки, покрытой слоем WC и W<sub>2</sub>C, содержание W изменяется от 8,91 до 22,87 ат.%, содержание C — от 68,76 до 78,91 ат.%. Дисперсионный энергетический спектр одного из образцов показан на рис. 3, б (растровый электронный микроскоп CARL ZEISS LEO 1430 VP, оснащенный микроанализатором состава INKA X-act). Анализ состава пленок на Si, полученных катодным распылением, показал увеличение концентрации углерода от 18,16 до 59,37 ат.% в зависимости от толщины пленки, что указывает на ее островковый характер (рис. 3, в).

ППА, полученные как дуговым, так и СВЧ-разрядом, имели развитую поверхность (с шероховатостью  $R_z \approx 0,6 \text{ мкм}$  при толщине пленки около 2 мкм) с характерной для алмаза огранкой

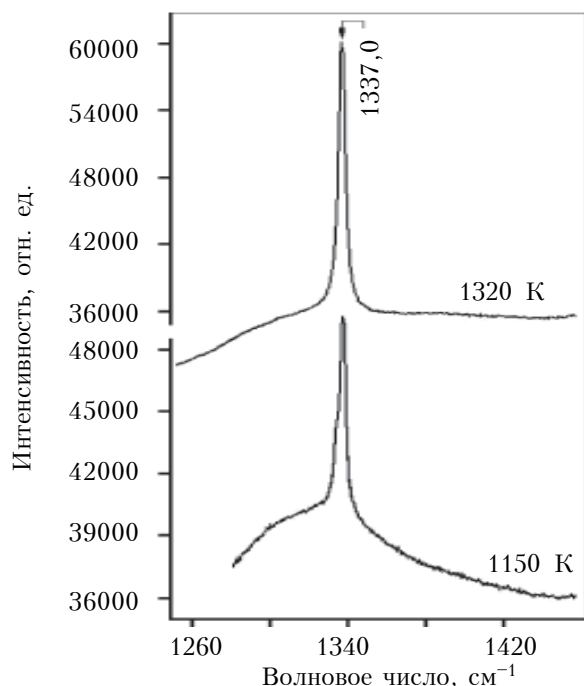


Рис. 1. Спектры КР света ППА, сформированными методом дугового разряда при различных температурах подложки из вольфрама

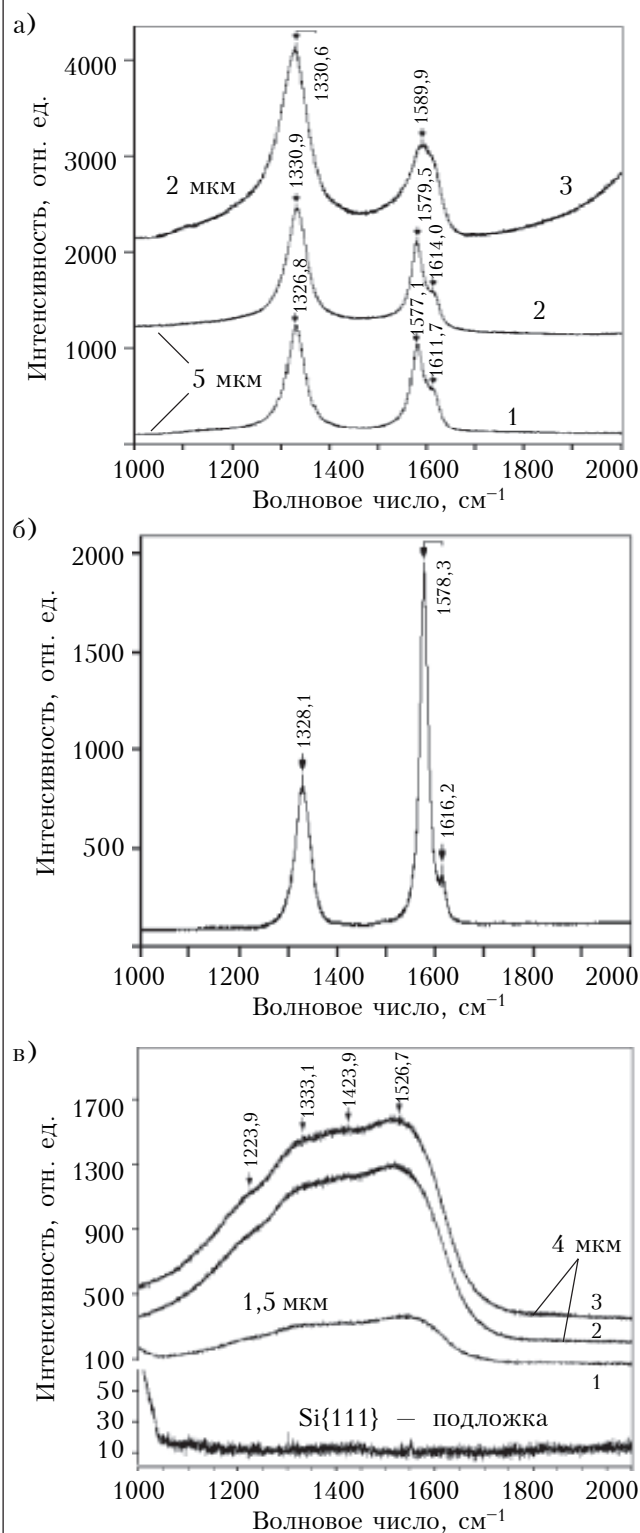


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния света АУП, сформированными на подложках из Si {111} тлеющим разрядом (а, б) и катодным распылением (в) при разных условиях:

а — без затравочных наночастиц (1) и с затравочными наночастицами алмаза (2, 3); б — после предварительной обработки подложки в плазме H<sub>2</sub>; в — при использовании диодного (1, 2) и триодного (3) разряда (толщина пленок указана на рисунках)

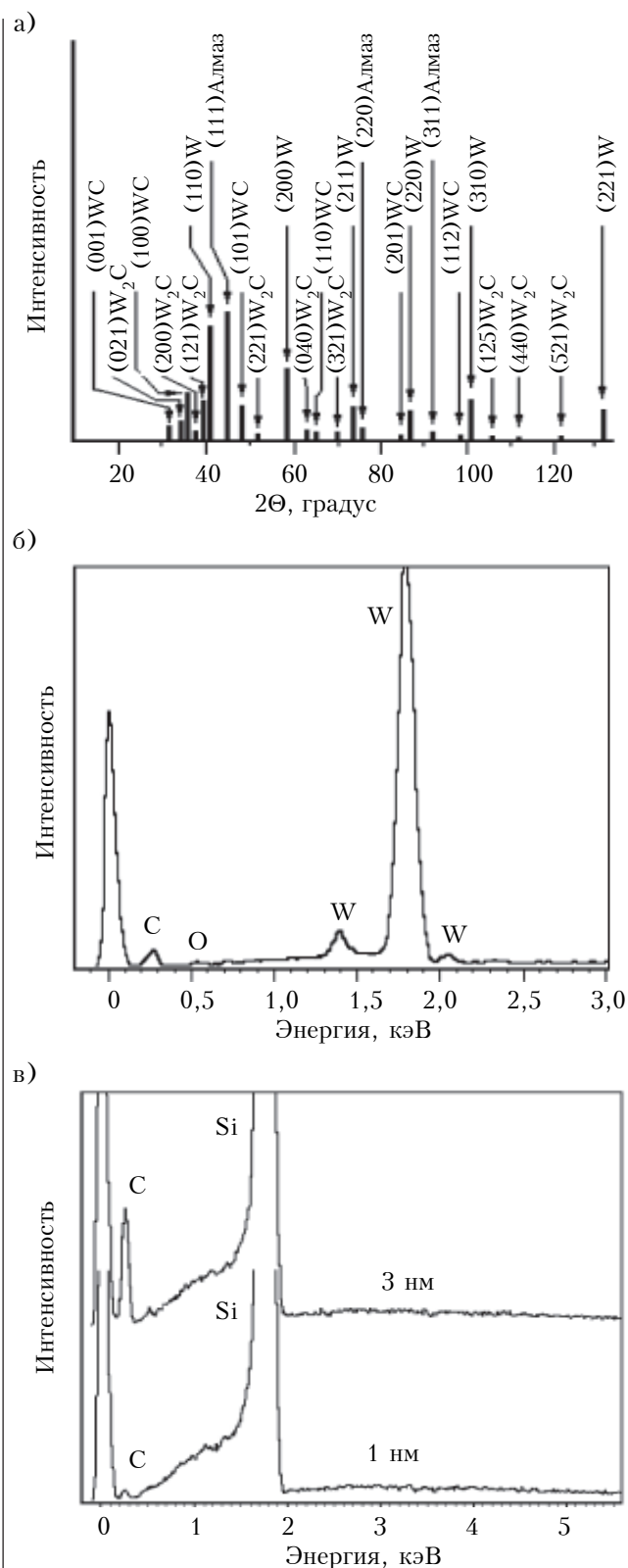


Рис. 3. Состав углеродных пленок, сформированных дуговым разрядом (а, б) и катодным распылением (в):

а — штрихрентгенограмма (Cu K $\alpha$ -излучение) ППА, сформированной на полочке из вольфрама; б, в — энергетические спектры, полученные от поверхности слоев, соответственно, W/WC и Si/AUP различной толщины

зерен по кристаллографическим направлениям  $\{100\}$  и  $\{111\}$  (рис. 4, а, в). Наблюдаемые на сколах ППА зёрна имеют пластинчатое строение. Рассчитанный по рентгенограммам размер кристаллитов (областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения,  $L_{\text{ОКР}}$ ) соответствовал толщине пластин, формирующих зерна (рис. 4, б). В количестве от 0,4 до 60 об.% в образцах ППА содержатся рентгеноаморфные кластеры, представляющие собой смесь алмазоподобного углерода и наноструктурированного алмаза с размером кристаллитов  $L_{\text{ОКР}} < 1$  нм. Электронограммы и рентгенограммы, снятые с ППА, показывают наличие текстуры, при этом тип формирующейся текстуры не зависит от материала и кристаллографической ориентации подложки, а

определяется условиями проведения процесса и толщиной ППА. После снятия слоя, большего толщины ростовой поверхности пленки, получается гладкая беспористая поверхность с шероховатостью  $R_z \approx 0,025$  мкм (рис. 4, б). АУП, сформированные катодным распылением, имеют гладкую поверхность (при толщине пленки до 6 нм перепад высоты рельефа слоя составляет 1,14 – 1,17 нм) и глобулярное строение (рис. 5, а) (измерения проведены с использованием, соответственно, спектрографического эллипсометра SENTECH SE800 и атомно-силового микроскопа NOVA-873). Пленки, полученные тлеющим разрядом, имеют чешуйчатое строение независимо от наличия или отсутствия затравочных наночастиц алмаза (рис. 5, б, в).

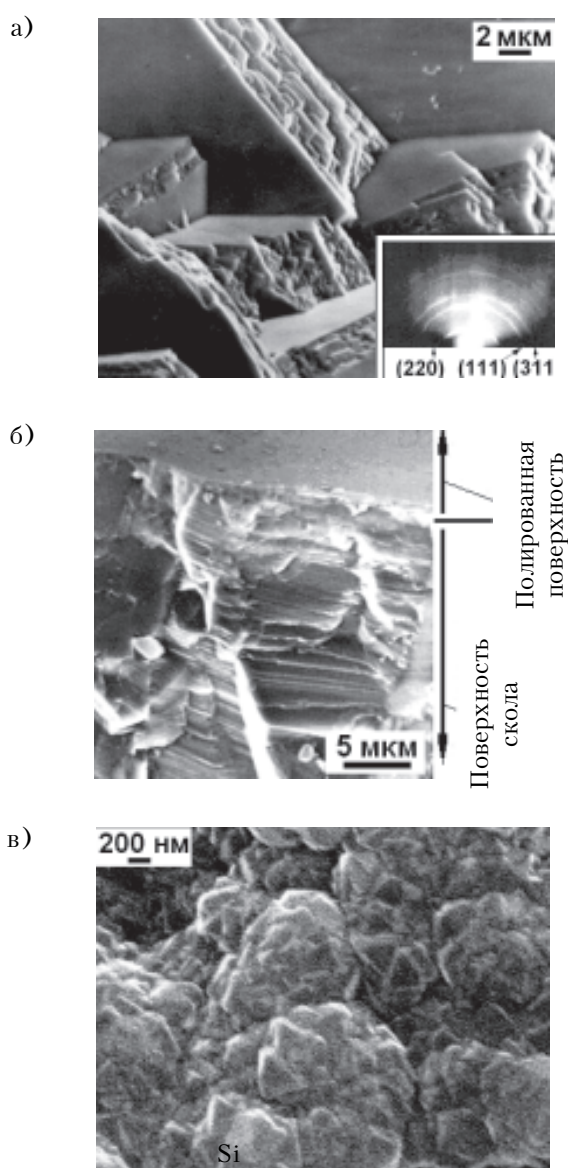


Рис. 4. Строение (РЭМ) поверхностей ППА, сформированных на подложках из Si дуговым разрядом (а, б) и СВЧ-разрядом (в) (вставка на а — электронограмма на отражение)

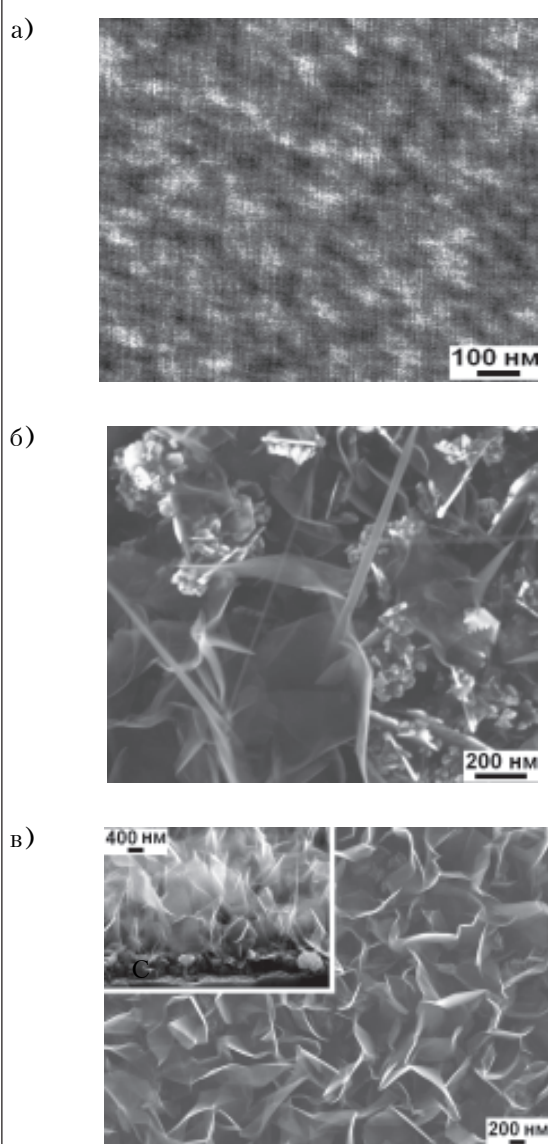


Рис. 5. Строение (а — АСМ, б, в — РЭМ) поверхностей АУП, сформированных на подложках из Si катодным распылением (а) и тлеющим разрядом без обработки (б) и с предварительной обработкой подложки в плазме  $H_2$  (в, на вставке — скол пленки)



### Автоэмиссионные характеристики ненакаливаемых катодов на слоистых структурах

Измерение эмиссионных характеристик планарных катодов проводилось при давлении  $10^{-3}$ – $10^{-5}$  Па в постоянном и импульсном режимах (частота  $f=50$  Гц, длительность  $\delta=20$ – $50$  мкс). Зазор  $\Delta$  между ненакаливаемым катодом и анодом — цилиндром из нержавеющей стали диаметром 4 мм или композицией «стекло/ $\text{InSnO}_x$ /люминофор» — составлял от 40 до 250 мкм. Если испытания в случае цилиндрического анода давали положительный результат при напряженности поля  $E \leq 20$  В/мкм, т. е. была обнаружена эмиссия электронов, то для выяснения однородности автоэмиссии образцы испытывали с люминофорным экраном (стекло/ $\text{InSnO}_x$ /люминофор) в качестве анода. Напряженность электрического поля в зазоре между анодом и катодом  $E=U/\Delta$  ( $U$  — разность потенциалов между электродами), а плотность тока  $J=I/S$  ( $I$  — ток,  $S$  — площадь катода). Автоэмиссионные испытания проводились на образцах, поверхность которых имела собственную проводимость.

От структур Si/ППА, в которых ППА синтезировали методом дугового или СВЧ-разряда, эмиссия электронов не обнаружена ни от поверхности формирования, ни от полированной по-

верхности. Эмиссия была получена (при полях с  $E > 30$  В/мкм) только со скола ППА от границ пластин, формирующих зерна (вольт-амперная характеристика представлена на рис. 6, а, строение ППА — на рис. 4). Эмиссия электронов от ППА наблюдалась после осаждения на их полированную поверхность слоя АУП методом катодного распыления, при этом эмиссионная интенсивность больше у того образца, ППА которого содержит больше рентгеноаморфной углеродной фазы (данные по строению образцов можно получить из спектров на рис. 1). Достигнутый порог автоэмиссии был равен 2,2 В/мкм, однако уже при  $E=3,8$  В/мкм происходил отрыв АУП от поверхности ППА. Исследования показали, что эмиссионные свойства углеродных пленок значительно улучшаются с увеличением их дефектности вплоть до формирования рентгеноаморфного материала, существенным признаком которого остается  $sp^3$ -гибридизация связей валентных электронов атомов углерода. Для таких эмиттеров пороговые значения напряженности электрического поля, при которых наблюдается полевая эмиссия электронов, находятся в пределах от 2 до 20 В/мкм (рис. 7).

Эмиссия электронов от поверхности формирования структур W/WC и W/WC/ППА обнаружена у одного из образцов W/WC (рис. 6, б, кривая 1, порог 37,5 В/мкм), в то время как у образца W/WC/ППА, в котором поверхность ППА отполирована, эмиссии не обнаружено (происходили пробой при  $E=42$  В/мкм на постоянном токе и  $E=50$  В/мкм в импульсном режиме при скважности 1000). Снижение порога эмиссии электронов достигалось за счет осаждения АУП (методом катодного распыления) на поверхность образца W/WC (рис. 6, б, кривая 2, порог 22 В/мкм).

Исследование слоистых структур плавный кварц/ $\text{AlN}+\text{Al}$  и Si/ППА (ППА сформирована СВЧ-разрядом) показало, что только осаждение (катодное распыление) на их поверхность АУП толщиной 0,8 нм активирует эмиссию элек-

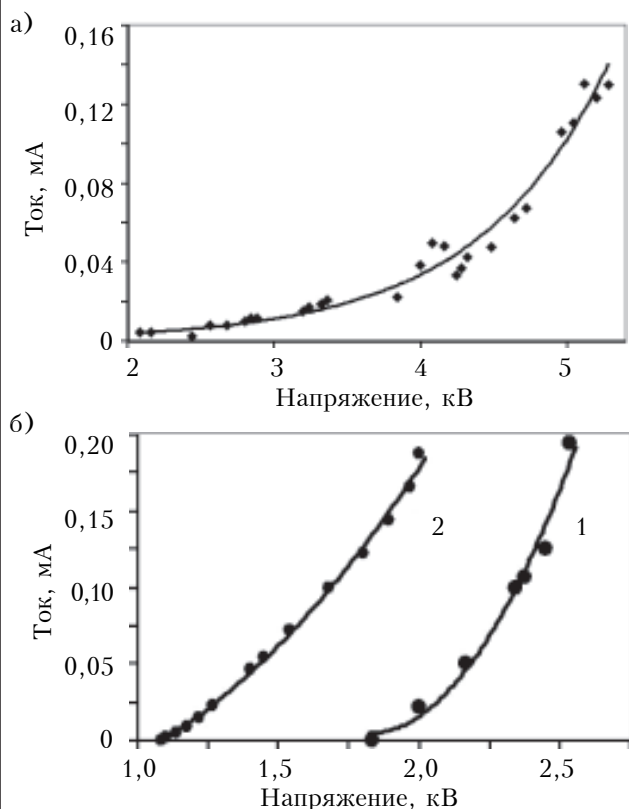


Рис. 6. ВАХ слоистых структур: а — Si/ППА (условия измерения:  $\delta=200$  мкм,  $f=50$  Гц,  $\tau=20$ – $25$  мкс); б — W/WC (1) и W/WC/АУП (2) (штыревой анод диаметром 1 мм,  $\Delta=50$  мкм,  $\tau=50$  мкс)

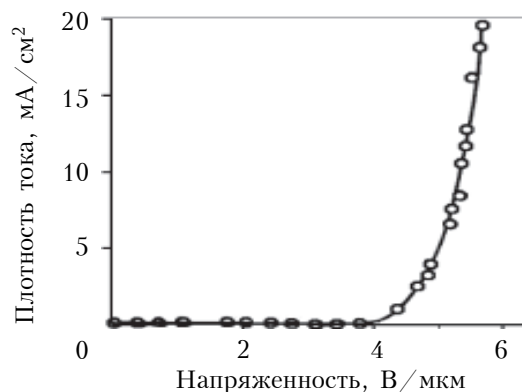


Рис. 7. ВАХ слоистой структуры Si/АУП (АУП получена методом тлеющего разряда,  $\Delta=250$  мкм,  $f=50$  Гц,  $\tau=20$ – $30$  мкс)

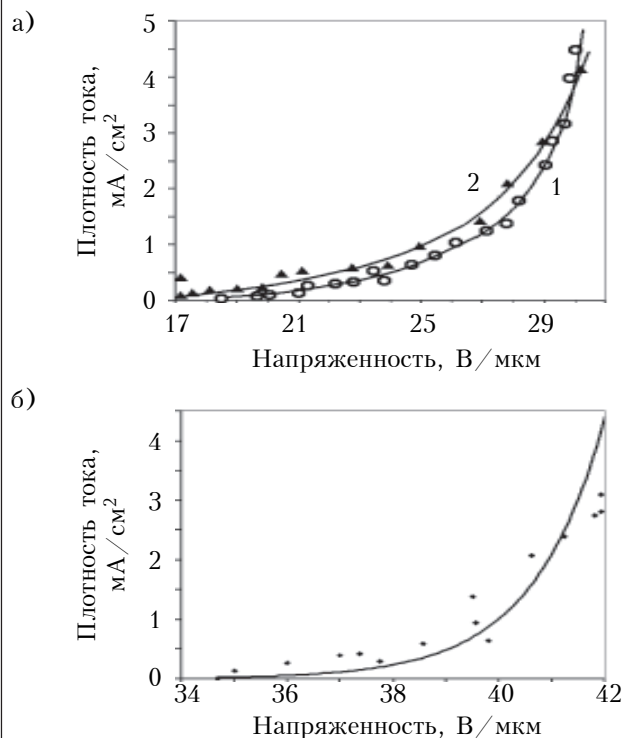


Рис. 8. ВАХ слоистых структур плавный кварц/AlN+Al/AUP (а: 1 — понижение, 2 — повышение напряжения) и Si/ППА/AUP (б) (штыревой анод диаметром 1 мм,  $\Delta=80$  мкм,  $\tau=50$  мкс)

тронов (рис. 8). Использование сильнолегированных бором ППА не приводит к возникновению эмиссии.

\*\*\*

В результате исследований состава и строения пленок, составляющих слоистые структуры, а также их автоэмиссионных характеристик было установлено, что улучшение эмиссионных характеристик слоистых структур проявляется при использовании алмазоподобных углеродных пленок, полученных катодным распылением, эмиссия с поверхности которых происходит по границам глобул. Эффект улучшения эмиссионных характеристик слоистых катодов может быть связан с некристаллографическим упорядочением различных фаз, включая АУП, сформированные катодным распылением.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Busta H. N., Chen J. M., Shen Z. et al. Characterization of electron emitters for miniature X-ray sources // J. Vac. Sci. Technol. B. — 2003. — Vol. 21. — P. 344.
2. Дзбановский Н. Н., Минаков П. В., Пилевский А. А. и др. Сильноточная электронная пушка на основе автоэмиссионного катода и алмазной сетки // ЖТФ. — 2005. — Т. 75, № 10. — С. 111–114. [Dzbanovskii N. N., Minakov P. V., Pilevskii A. A. i dr. // ZhTF. 2005. Vol. 75, N 10. P. 111]
3. Самойлович М. И., Белянин А. Ф. Формирование наноструктурированных пленок алмазоподобных материалов. Часть 1, 2 // Нано- и микросистемная техника. — 2006. — № 7, с. 21–34; № 8, с. 14–25. [Samoilovich M. I., Belyanin

A. F. // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2006. N 7, P. 21; N 8, P. 14]

4. Белянин А. Ф., Самойлович М. И., Пашенко П. В. и др. Слоистые ненакаляемые катоды // Нано- и микросистемная техника. — 2005. — № 8. — С. 39–47. [Belyanin A. F., Samoilovich M. I., Pashchenko P. V. i dr. // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2005. N 8. P. 39]

5. Белянин А. Ф., Пашенко П. В., Борисов В. В. и др. Техника формирования многослойных ненакаляемых катодов // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. — 2002. — № 1, 2. — С. 64–67. [Belyanin A. F., Pashchenko P. V., Borisov V. V. i dr. // Sistemy i sredstva svyazi, televideniya i radioveshchaniya. 2002. N 1, 2. P. 64]

6. Белянин А. Ф., Самойлович М. И., Дзбановский Н. Н. и др. Формирование наноструктурированных пленок и слоистых структур иридия и поликластерного алмаза // Нано- и микросистемная техника. — 2008. — № 2. — С. 16–30. [Belyanin A. F., Samoilovich M. I., Dzbanovskii N. N. i dr. // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2008. N 2. P. 16]

7. Collins J. L. Diamond-like carbon (DLC) — a review // Industrial diamond review. — 1998. — Vol. 58, N 578. — P. 90–92.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 28.12.2012 г.

Belyanin A. F., Borisov V. V., Timofeev M. A., Lamskiy A. N. **Cold cathodes based on carbonic nanostructured layered structures.**

*Keywords: layer structures, emission electronics.*

The paper describes formation conditions for and the structure of diamond-like materials films used in the manufacture of layered cold cathodes of emission electronics devices. The authors study the structure and field emission properties of layered structures with polycluster diamond and diamond-like carbon films (DCF) formed by various methods. It has been found that the best emission properties are characteristic of DCFs obtained by cathode sputtering. Emission from the surface of such films occurs on the boundaries of the globules.

Russia, Moscow, CSRTI "Tekhnomash", Skobel'syn Institute of Nuclear Physics of MSU.

Белянін О. Ф., Борисов В. В., Тимофєєв М. А., Ламський О. М. **Нерозжарювані катоди на основі вуглецевих наноструктурованих шаруватих структур.**

*Ключові слова: шаруваті структури, емісійна електроніка.*

Розглянуто умови формування та будову плівок алмазоподібних матеріалів, використовуваних при виготовленні шаруватих нерозжарюваних катодів пристроїв емісійної електроніки. Вивчено будову і автоемісійні властивості шаруватих структур з полікластерними плівками алмазу і з алмазоподібними вуглецевими плівками (АВП), сформованими різними методами. Встановлено, що кращі емісійні характеристики мають АВП, отримані катодним розпиленням, емісія з поверхні яких відбувається по межах глобул.

Росія, м. Москва, ЦНДТІ «Техномаш», НДІ ядерної фізики ім. Д. В. Скобельщина МДУ.