

УДК 537.9

## МНОГОСЛОЙНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТЕНОК И НИТРИДА АЛЮМИНИЯ В АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДАХ

С. А. Багдасарян <sup>1</sup>, С. А. Налимов <sup>2</sup>, А. И. Юрин <sup>3</sup>, Е. Р. Павлюкова <sup>4</sup><sup>1</sup> Научно-производственное предприятие “Технологии радиочастотной идентификации и связи”, 127051, Москва, Сухаревская пл. 4, стр. 1<sup>2</sup> Центральный научно-исследовательский технологический институт “Техномаш”, 121108, Москва, ул. Ивана Франко, 4<sup>3</sup> Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, 123592, Москва, ул. Таллиннская, 34<sup>4</sup> Московский физико-технический институт (государственный университет), 141701, Долгопрудный, Институтский переулок, 9

Статья поступила в редакцию 22 октября 2019 г.

**Аннотация.** Рассмотрено влияние условий формирования на строение углеродных наностенок ( $C_N$ ) и пленок AlN, используемых в качестве эмитирующего слоя автоэмиссионных катодов. Слои  $C_N$  получали на кремниевых подложках и опаловых матрицах (упорядоченных упаковках шаровых частиц кремнезема) методом активированной тлеющим разрядом постоянного тока углеродсодержащей газовой смеси. Для снижения порога эмиссии на ростовой поверхности слоев  $C_N$  методом ВЧ-магнетронного реактивного распыления выращивали наноструктурированные пленки AlN (структуры  $C_N/AlN$ ). Электронной микроскопией, рентгеновской дифрактометрией и спектроскопией комбинационного рассеяния света показано, что пластины  $C_N$  состоят из слоев графена, а пленки AlN – из аморфной и аксиально текстурированной кристаллической фаз. Представлены результаты исследования связи строения слоев  $C_N$  и структур  $C_N/AlN$  с функциональными характеристиками автоэмиссионных катодов.

**Ключевые слова:** углеродные наностенки, пленки нитрида алюминия, слоистые структуры, автоэмиссионные катоды.

**Abstract.** The influence of formation conditions on the structure of carbon nanowalls ( $C_N$ ) and AlN films used as an emitting layer of field emission cathodes is

researched. CH layers were obtained on silicon substrates and opal matrices (ordered packings of silica spherical particles) by the method of a carbon-containing gas mixture activated by a direct current glow discharge. To decrease the emission threshold, nanostructured AlN films (CH / AlN structures) were grown on the growth surface of CH layers by the method of RF magnetron reactive sputtering. Electron microscopy, X-ray diffractometry and Raman spectroscopy results demonstrated that CH plates consist of graphene layers, and AlN films consist of amorphous and axially textured crystalline phases. The results of a study of the relationship between the structure of CH layers and CH / AlN structures with the functional characteristics of field emission cathodes are presented.

**Keywords:** carbon nanowalls, aluminum nitride films, layered structures, field emission cathodes.

## Введение

В промышленности все большее значение приобретают не массивные материалы, а пленки, позволяющие добиваться улучшения функциональных свойств материалов и эксплуатационных характеристик устройств на их основе за счет варьирования состава и строения слоистых структур. Для изготовления устройств электронной техники перспективны слоистые структуры на основе углеродных и алмазоподобных неуглеродных материалов, обладающих комплексом уникальных свойств. К алмазоподобным неуглеродным материалам относится AlN, близкий к алмазу по ряду физико-химических свойств. Алмаз и AlN являются широкозонными полупроводниковыми материалами, обладают высокой твердостью и теплопроводностью, а в виде слоистой структуры алмаз/AlN перспективны для создания устройств акустоэлектроники и полупроводниковых приборов [1–3]. AlN и углеродные материалы, такие как алмазоподобный углерод и углеродные наностенки ( $C_n$ ), обладают свойством автоэлектронной эмиссии и находят применение в автоэмиссионных катодах [4, 5]. Исследования последних лет показали перспективность слоев  $C_n$  при изготовлении автоэмиссионных катодов,

применяющихся при создании дисплеев и других устройств [6, 7]. Слои  $C_H$  представляют собой пористый углеродный материал, состоящий из изогнутых пластин, сформированных слоями графена [8]. Проблемы применения  $C_H$  в автоэмиссионных катодах связаны с нестабильностью эмиссионных параметров из-за изменения строения и состава  $C_H$  в процессе эксплуатации [8]. Для улучшения характеристик автоэмиссионных катодов на поверхности эмитирующих материалов выращивали пленку AlN [4, 9–11]. Широкое применение устройств, включающих в качестве функциональных сред пленки AlN, сдерживается сложностью синтеза пленок заданного строения.

Цель работы – исследование взаимосвязи условий синтеза слоев  $C_H$  и пленок AlN с их строением и свойствами при изготовлении автоэмиссионных катодов.

## 1. Методика эксперимента

**Получение  $C_H$ .** Слои  $C_H$  выращивали из газовой смеси  $H_2$  и  $CH_4$ , активированной тлеющим разрядом постоянного тока [9]. Перед наращиванием  $C_H$  на подложках из Si (структура Si/ $C_H$ ) создавались затравочные углеродные наночастицы. Параметры процесса создания затравочных углеродных наночастиц следующие: при температуре  $\sim 1020$  К поверхность подложки из Si бомбардировали ионами  $H^+$  и  $C_xH_y^+$  (ВЧ-разряд, частота 13,56 МГц, мощность разряда 40 Вт, время обработки 20 мин), образовавшимися в СВЧ-плазме  $H_2 + (8–10)\%$   $CH_4$  (по объему) при давлении  $\sim 10^4$  Па. Слои  $C_H$  выращивали при следующих параметрах тлеющего разряда постоянного тока: состав газа  $H_2 + (1.5–4)$  об.%  $CH_4$ ; давление газа  $> 10^4$  Па; мощность разряда 2000–5000 Вт; температура подложки 800–1300 К. Слои  $C_H$  толщиной  $> 4$  мкм формировали последовательным наращиванием двух слоев  $C_H$  (структура Si/ $C_H$ -2). Второй слой  $C_H$  также выращивали на первом, покрытом пленкой Ni (структура Si/ $C_H$ /Ni/ $C_H$ ). Максимальная толщина двухслойной структуры составляла  $\sim 9$  мкм.

Слои  $C_H$  выращивали также на подложках, представляющих слоистую структуру, изготовленную формированием слоя опаловой матрицы (ОМ) на

подложке из Si (структура Si/OM). OM представляют плотнейшую упаковку шаровых частиц диаметром  $\sim 250\text{--}260$  нм аморфного  $\text{SiO}_2$  [12]. Слой OM на поверхности подложек из Si осаждали из раствора  $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  и  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  [13]. Изготовленные автоэмиссионные катоды представляли подложку из Si с нанесенными на нее 8–10 слоев OM. Для подвода заряда к  $\text{C}_H$  на поверхность OM магнетронным распылением наносили пленку Ni (структура Si/OM/Ni/ $\text{C}_H$ ).

**Получение пленок AlN.** Пленки AlN выращивали методом ВЧ-магнетронного реактивного распыления Al при следующих условиях: состав газа – Ar + (40–60) об.%  $\text{N}_2$ ; давление газа в реакционной камере 0,7–0,9 Па; напряжение ВЧ-разряда (частота 13,56 МГц) 250–350 В; мощность ВЧ-разряда 0,5–2,5 кВт; расстояние между мишенью и подложкой 60 мм; температура подложки 400–750 К; напряжение электрического смещения на подложкодержателе +45 – –60 В. Легированные цинком ( $\text{AlN}_{\text{Zn}}$ ) или молибденом ( $\text{AlN}_{\text{Mo}}$ ) пленки получали распылением мозаичных мишеней, состоящих из Al с добавками Zn или Mo. Пленки AlN были выращены на слое  $\text{C}_H$  (структуры Si/ $\text{C}_H$ /AlN) и на многослойных структурах со слоем OM (Si/OM/Ni/ $\text{C}_H$ /AlN).

**Методы исследования строения слоистых материалов и характеристик автоэмиссионных катодов на основе слоев  $\text{C}_H$  и пленок AlN.** Строение и состав слоев  $\text{C}_H$  и пленок AlN анализировали с использованием растрового и просвечивающего электронных микроскопов (РЭМ и ПЭМ) Carl Zeiss Supra 40-30-87 и JEM 200C; лазерного спектрометра комбинационного рассеяния света (КРС) LabRAM HR 800 (линия 632,8 нм He-Ne лазера; мощность лазера < 300 мВт; площадь исследуемой поверхности образца  $\sim 4\text{--}6$  мкм<sup>2</sup>, анализируемая глубина образца от поверхности  $\sim 3$  мкм) и рентгеновского дифрактометра Rigaku D/MAX-2500/PC ( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение, графитовый монохроматор).

Характеристики автоэмиссионных катодов на основе слоистых структур измеряли в импульсном и постоянном режимах в вакуумной камере

измерительной установки при давления  $\sim 10^{-3}$  Па. Анодом являлась пластина из нержавеющей стали или Cu. Для оценки числа эмиссионных центров анод измерительной ячейки заменялся стеклом К-8 с нанесенной слоистой структурой  $\text{InSnO}_x/\text{люминофор}$ , где  $\text{InSnO}_x$  служил прозрачным проводником. Зазор ( $\Delta$ ) между катодом и анодом составлял 80–500 мкм. Вольт-амперные характеристики строились в координатах  $(E, J)$  и  $(U, I_C)$ , где  $E$  – напряженность электрического поля (В/мкм) ( $E = U/\Delta$ ),  $U$  – разность потенциалов,  $J$  – плотность тока ( $J = I_C/S$ , где  $I_C$  – ток катода,  $S$  – площадь катода).

## 2. Результаты и их обсуждение

**Строение слоев  $C_H$ .** Слои  $C_H$  представляют собой пористый материал и состоят из углерода в виде пластин толщиной десятка нм (рис. 1,а). Пластины слоев  $C_H$  сформированы из частично связанных между собой атомными связями слоев графена, упакованных в гексагональную решетку (двухслойная укладка атомов углерода) [6, 14]. Правильность упаковки слоев графена проявляется при осаждении магнетронным распылением на поверхность пластин  $C_H$  пленки Mo толщиной  $\sim 10$  нм. Пленка Mo выявила ступенчатый характер поверхности с расположением краев ступеней под углом  $120^\circ$ , что характерно для послойного роста графита.

В структуре Si/ $C_{H-2}$  в  $\sim 2$  раза большая концентрация пластин, по сравнению с Si/ $C_H$  (рис. 1,б). В слоях  $C_{H-2}$ , помимо пластин наблюдаются углеродные нанотрубки и наностержни (свернутые в трубки пластины, без образования замкнутых структур) (рис. 1,б). Дифракционные максимумы на рентгеновских дифрактограммах показали, что слои  $C_H$  представляют сочетание кристаллических фаз углерода: 3 модификации графита (гексагональная сингония: пространственные группы  $P6_3/mmc$ ,  $R3$  и  $P3$ ); карбин и др. Если принять пластины  $C_H$  за графит, то рассчитанная по рентгеновским дифрактограммам (уширение дифракционных максимумов 0002 графита) толщина пластин (размер кристаллитов – областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения) составляет  $\sim 10$  нм. С учетом межплоскостного расстояния решетки графита в кристаллографическом направлении  $\langle 0001 \rangle$

равного 0,3354 нм, можно предполагать содержание в пластинах  $C_H$  ~30 слоев графена.

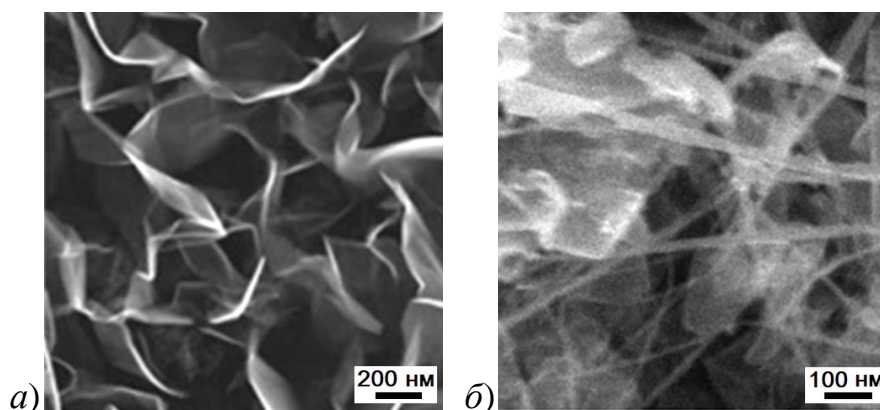


Рис. 1. РЭМ-изображение слоистых структур: а)  $Si/C_H$ ; б)  $Si/C_H-2$ .

В спектрах КРС (рис. 2), отражающих состав и строение  $C_H$  [15, 16], наблюдались интенсивные полосы  $D$ ,  $G$  и  $2D$ , расположенные при сдвиге КРС  $\Delta\nu$  1326–1343  $cm^{-1}$ , 1577–1591  $cm^{-1}$  и 2653–2673  $cm^{-1}$ , соответственно. Одновременно фиксируются слабые полосы при  $\Delta\nu$  1081–1167  $cm^{-1}$  (полоса  $x$ ); 1608–1627 (полоса  $D'$ ); 2449–2482 (полоса  $x+D$ ); 2909–2934 (полоса  $D+G$ ) и 3221–3248  $cm^{-1}$  (полоса  $2D'$ ). В представленной работе полосы в спектрах КРС слоев  $C_H$  обозначали символами  $D$ ,  $G$ ,  $x$ ,  $D'$ ,  $x+D$ ,  $2D$ ,  $D+G$  и  $2D'$  [16–19]. Соотношение интенсивностей полос от  $C_H$  на спектрах КРС, в зависимости от толщины слоев  $C_H$  и материала подложки, может меняться в значительных пределах по поверхности катода:  $I_D/I_G \approx 0,3-2,1$ ;  $I_D/I_{2D} \approx 1,0-1,3$ ;  $I_D/I_{D+G} \approx 14-18$ ;  $I_D/I_{2D'} \approx 13-16$ .

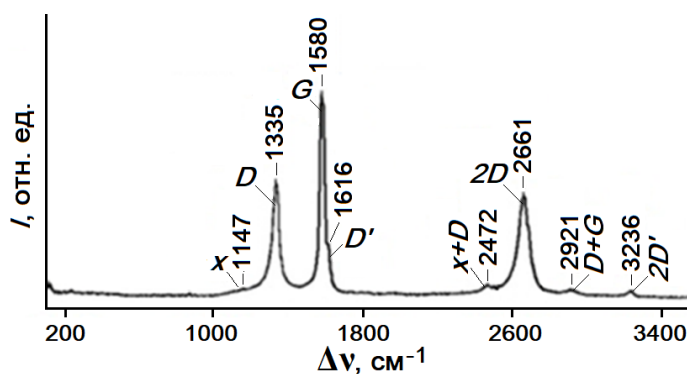


Рис. 2. Спектр КРС слоя  $C_H$ , выращенного на подложке из Si.

**Строение пленок AlN.** Пленки AlN состояли из кристаллической и аморфной фаз. До толщины  $\sim 20$  нм пленки рентгеноаморфны и образованы нанокристаллитами размером  $< 1$  нм (рис. 3,а). Пленки толщиной 20–30 нм образованы нанокристаллитами конической формы в виде пирамидок, основания которых имеют псевдогексагональную форму (рис. 3,б, где светлые полосы – аморфная фаза)). Для слоистых структур Si/C<sub>H</sub>/AlN наблюдалось утолщение пластин C<sub>H</sub> (рис. 3,в).

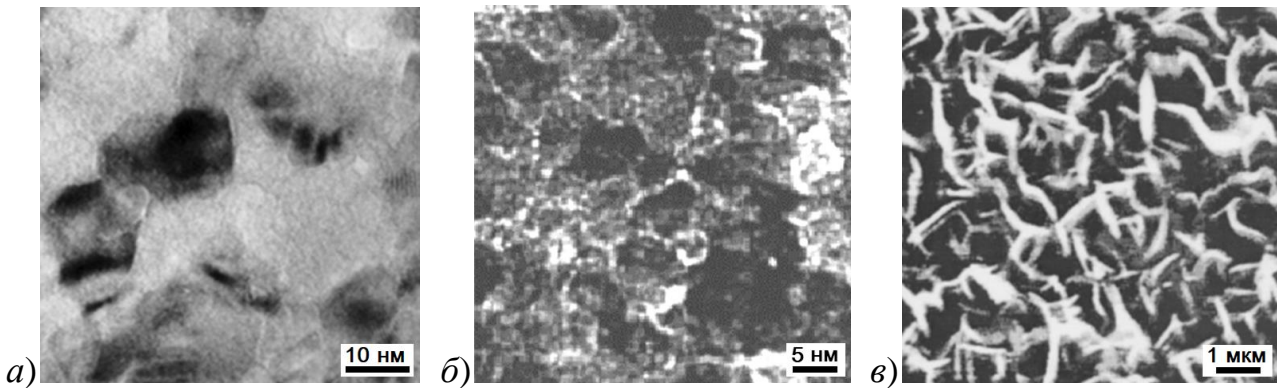


Рис. 3. ПЭМ-изображение выращенных на подложке из плавленного кварца пленок AlN толщиной: а) 7 нм; б) 30 нм; в) РЭМ-изображение слоистой структуры Si/C<sub>H</sub>/AlN.

Рентгеновские дифрактограммы пленок AlN толщиной  $> 0,2$  мкм показывают, что кристаллиты аксиально текстурированы по  $\langle 0001 \rangle$ . Текстурирование пленки AlN совершенствуется по мере увеличения толщины. Кристаллическая фаза пленок AlN имела строение от разупорядоченной до ограниченной текстуры с разориентацией кристаллитов относительно оси текстуры  $< 0,5^\circ$ . Легирующая примесь входила как в аморфную, так и в кристаллическую фазы пленок. Размер кристаллитов нелегированных пленок AlN составлял 30–60 нм, легированных – 20–50 нм.

На спектре КРС текстурированной пленки AlN толщиной  $\sim 2$  мкм наблюдали интенсивные полосы при  $\Delta\nu$  609 и 653  $\text{см}^{-1}$ . Рентгеноаморфное строение приводит к уширению и смещению полос, характерных для кристаллического строения, и появлению дополнительных полос. Положение,

форма и интенсивность полос на спектрах КРС отличаются для пленок AlN, сформированных различными методами [20, 21]. На спектрах КРС рентгеноаморфных пленок AlN толщиной  $\sim 0,05$  мкм наблюдали размытые полосы в области  $\Delta\nu$  240, 310 и  $550 \text{ см}^{-1}$ . Спектры КРС рентгеноаморфных пленок AlN толщиной 0,1–0,3 мкм характеризуются размытыми слабыми полосами при  $\Delta\nu$  636–639; 690–692; 785–796 и  $\sim 837 \text{ см}^{-1}$  (рис. 4, а, б), положение и интенсивность которых зависят от температуры подложки, определяющей концентрацию и размер кристаллитов. Для спектров КРС подложки из стекла характерны полосы средней интенсивности вблизи  $\Delta\nu$   $\sim 435$ –461;  $\sim 487$ –491 и  $\sim 602$ –605  $\text{см}^{-1}$  (рис. 4, а).

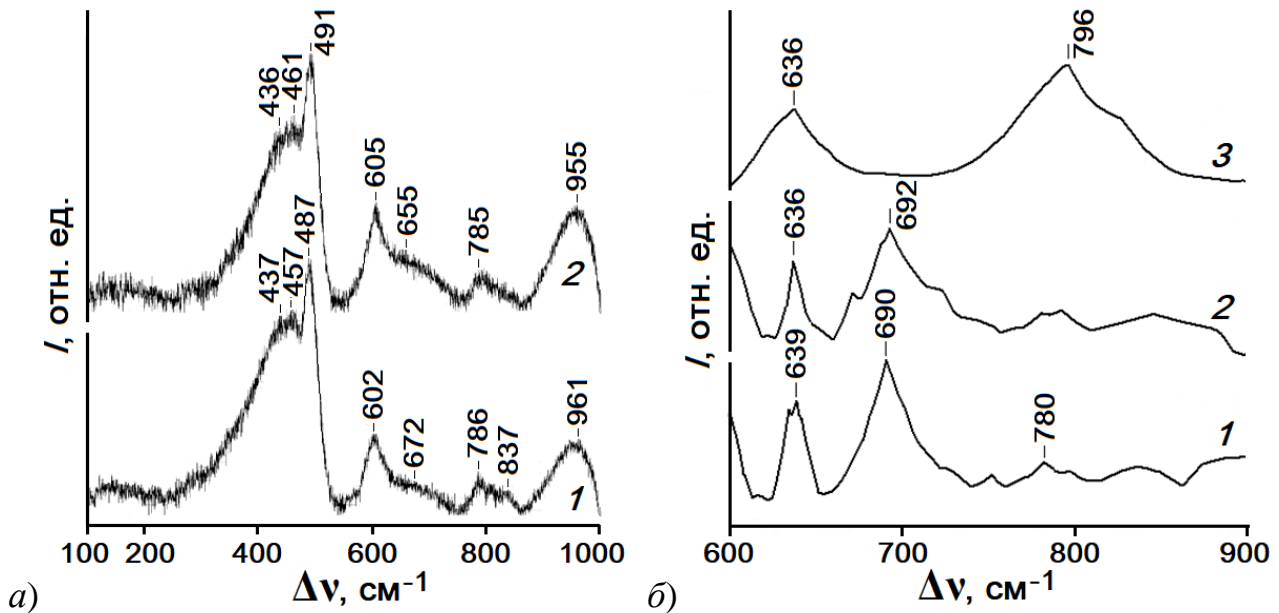


Рис. 4. Спектры КРС пленок AlN, выращенных при различных условиях на подложках из: а) стекла (концентрация  $\text{N}_2$  в газовой смеси: 60 % (1); 50 % (2); толщина пленок  $\sim 0,15$  мкм); б) Si (температура подложек: 570 К (1); 620 К (2); 720 К (3); толщина пленок  $\sim 0,3$  мкм).

**Характеристики автоэмиссионных катодов.** В качестве параметров автоэмиссионных катодов принимались плотность эмиссионных центров и порог автоэмиссии – наименьшее значение напряженности поля, при котором регистрируется эмиссионный ток. Автоэлектронная эмиссия слоев  $\text{C}_\text{H}$  зависела от взаимного расположения и размеров кристаллитов (пластин). В слоях  $\text{C}_\text{H}$



эмиссия электронов усиливалась электрическим полем на ориентированных преимущественно перпендикулярно подложке пластинах. Структуры Si/C<sub>H</sub> характеризуются высоким (> 5 В/мкм) порогом автоэлектронной эмиссии (рис. 5), малой плотностью эмиссионных центров и неоднородностью эмиссионных центров по поверхности катода. Использование структуры Si/C<sub>H</sub>-2 существенно уменьшает порог автоэлектронной эмиссии (рис. 5).

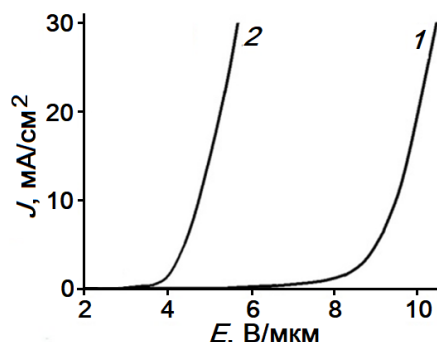


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики структур: 1 – Si/C<sub>H</sub>; 2 – Si/C<sub>H</sub>-2.

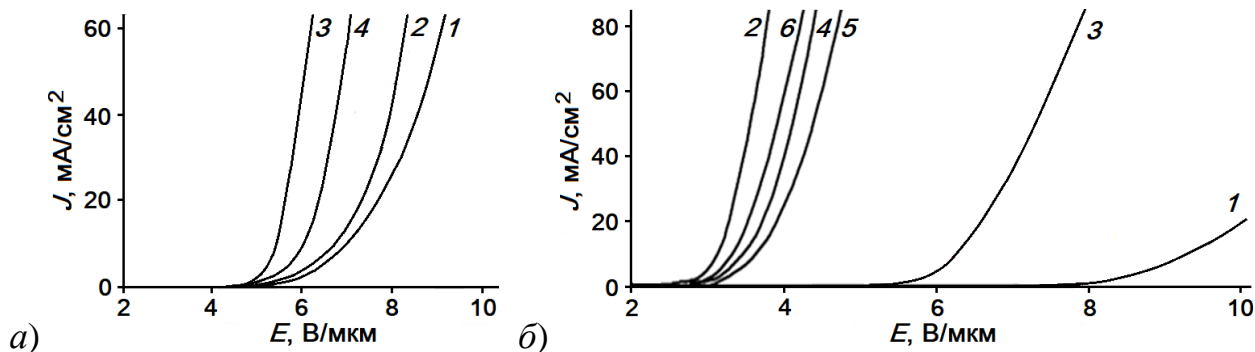


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики, полученные от слоистых структур: а) Si/C<sub>H</sub> (1, 2); Si/C<sub>H</sub>-2 (3, 4) (кривые 1–3 получены при измерениях в импульсном режиме, 4 – в постоянном режиме); б) Si/C<sub>H</sub> (1, 3); Si/C<sub>H</sub>-2 (4, 6); Si/C<sub>H</sub>/Ni/C<sub>H</sub> (2, 5) (кривые 1–4 получены при измерениях в импульсном режиме, 5, 6 – в постоянном режиме).

Вольт-амперные характеристики, представленные на рис. 6, указывают на улучшение эмиссионных свойств структуры Si/C<sub>H</sub>/Ni/C<sub>H</sub> (толщина пленки Ni ~10 нм) по сравнению со структурой Si/C<sub>H</sub>-2. Из исследованных автоэмиссионных катодов лучшей однородностью автоэмиссионного тока

обладают эмитирующие слои на основе структуры  $\text{Si}/\text{C}_\text{H}/\text{Ni}/\text{C}_\text{H}$ . Значения порога автоэлектронной эмиссии для структур  $\text{Si}/\text{C}_\text{H}$ -2 и  $\text{Si}/\text{C}_\text{H}/\text{Ni}/\text{C}_\text{H}$  отличались незначительно.

Были исследованы эмиссионные характеристики автоэмиссионных катодов, включающих слой OM. Структура  $\text{Si}/\text{OM}/\text{Ni}/\text{C}_\text{H}$  показала уменьшение эмиссионного порога (рис. 7). Было установлено, что на вольт-амперные характеристики автоэмиссионных катодов со слоем  $\text{C}_\text{H}$  толщиной до  $\sim 3$  мкм влияет рельеф и состав подложки (рис. 7,а), и не влияет толщина слоя  $\text{C}_\text{H}$  (рис. 7,б). Расстояние между соседними вершинами нанобугристости поверхности катода со слоем OM равно диаметру шаровых частиц  $\text{SiO}_2$ , равному 250–260 нм, при этом вершины шаровых частиц не совпадают с центрами эмиссии.

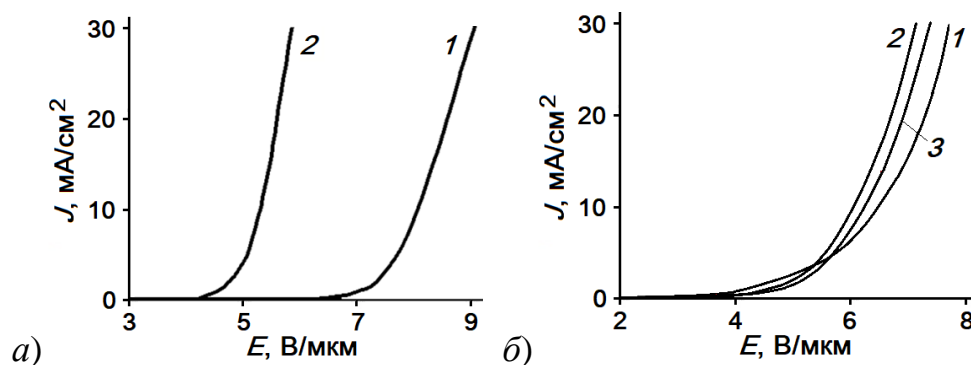


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики, полученные от слоистых структур: а) 1 –  $\text{Si}/\text{C}_\text{H}$ ; 2 –  $\text{Si}/\text{OM}/\text{Ni}/\text{C}_\text{H}$ ; б)  $\text{Si}/\text{OM}/\text{Ni}/\text{C}_\text{H}$  (толщина слоя  $\text{C}_\text{H}$ : 1 – 0,7 мкм; 2 – 1,4 мкм; 3 – 2,1 мкм).

В экспериментах со структурами  $\text{Si}/\text{C}_\text{H}/\text{AlN}$  использовали кристаллические наноструктурированные и аморфные пленки AlN, а также пленки AlN толщиной  $\sim 10$  нм, легированные Mo ( $\text{AlN}_{\text{Mo}}$ ) и Zn ( $\text{AlN}_{\text{Zn}}$ ). Улучшение эмиссионных свойств слоев  $\text{C}_\text{H}$  достигалось за счет осаждения на их поверхность наноструктурированных пленок AlN (слоистая структура  $\text{Si}/\text{C}_\text{H}/\text{AlN}$ ). Было обнаружено возрастание крутизны вольт-амперных характеристик структуры  $\text{Si}/\text{C}_\text{H}/\text{AlN}$  без уменьшения порога эмиссии, по сравнению с автоэмиссионным катодом со структурой  $\text{Si}/\text{C}_\text{H}$  (рис. 8,а). Было

установлено, что у текстурированных пленок AlN максимумы тока эмиссии соответствуют вершинам кристаллитов. Легирование пленок AlN не приводило к снижению порога эмиссии.

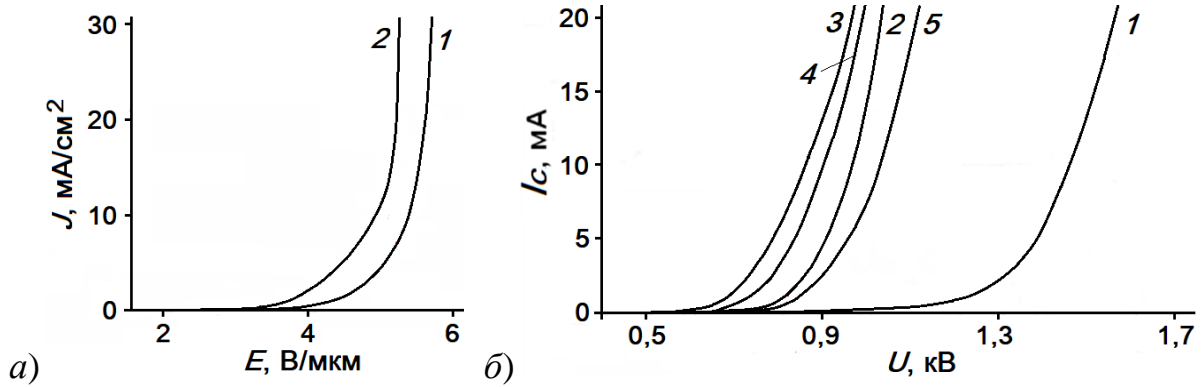


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики слоистых структур: а) 1 – Si/C<sub>H</sub>; 2 – Si/C<sub>H</sub>/AlN; б) 1 – Si/C<sub>H</sub>; 2 – Si/OM/Ni/C<sub>H</sub>; 3–5 – Si/OM/Ni/C<sub>H</sub>/AlN (толщина пленки AlN: 3 – 20 нм; 4 – 40 нм; 5 – 100 нм).

Вольт-амперные характеристики слоистых структур Si/OM/Ni/C<sub>H</sub> и Si/OM/Ni/C<sub>H</sub>/AlN показали лучшие эмиссионные свойства по сравнению со структурой Si/C<sub>H</sub> (рис. 8,б). Эмиссионные свойства автоэмиссионных катодов со структурой Si/OM/Ni/C<sub>H</sub>/AlN зависят от толщина пленки AlN.

### Заключение

Методом тлеющего разряда активированной углеродсодержащей газовой смеси были выращены слои C<sub>H</sub>, а методом реактивного ВЧ-магнетронного распыления пленки AlN. Строение слоев C<sub>H</sub> и пленок AlN изучено электронной микроскопией, рентгеновской дифрактометрией и спектрометрией КРС. Показано, что пластины C<sub>H</sub> состоят из слоев графена, а пленки AlN – из аморфной и аксиально текстурированной кристаллической фаз.

Представлены результаты исследования связи строения слоев C<sub>H</sub> и пленок AlN с характеристиками автоэмиссионных катодов, изготовленных на их основе. Были измерены вольт-амперные характеристики слоистых структур: Si/C<sub>H</sub>, Si/C<sub>H</sub>-2, Si/C<sub>H</sub>/Ni/C<sub>H</sub>, Si/C<sub>H</sub>/AlN, Si/OM/Ni/C<sub>H</sub>, Si/OM/Ni/C<sub>H</sub>/AlN. Для снижения порога эмиссии на ростовую поверхность слоев C<sub>H</sub> наносили

наноструктурированные пленки AlN. Были исследованы эмиссионные характеристики автоэмиссионных катодов, включающих слой OM – правильных упаковок шаровых наночастиц аморфного SiO<sub>2</sub>. Рассмотренные вольт-амперные характеристики позволяют прогнозировать структуру многослойного катода и строение эмитирующего слоя для улучшения эксплуатационных характеристик автоэмиссионных катодов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18-07-00282 А).

### Литература

1. Belyanin A.F., Nalimov S.A., Luchnikov A.P., Bagdasaryan A.S. Properties of planar structures based on polycluster films of diamond and AlN. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 6. "6th International Conference: Modern Technologies for Non-Destructive Testing". 2018. P.012041. DOI: [10.1088/1757-899X/289/1/012041](https://doi.org/10.1088/1757-899X/289/1/012041).
2. Collins J.L. Diamond-like carbon (DLC) – a review. *Industrial diamond review*. 1998. Vol.58. No.578. P.90–92.
3. Белянин А.Ф., Багдасарян А.С. Слоистая структура на основе пленок поликластерного алмаза и AlN для устройств на поверхностных акустических волнах // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2017. № 3. С. 30–38.
4. Spitsyn V.V., Blaut–Blachev A.N., Bouilov L.L., Zhirnov V.V., Bormatova L.V., Givargizov E.I., Belyanin A.F., Pashchenko P.V. Field emitters based on Si tips with AlN coating // *Diamond and Related Materials*. 1998. № 7. № 2–5. P. 692–694.
5. Busta H.H., Chen J.M., Shen Z., Jansen K., Rizkowski S., Matey J., Lanzillotto A. Characterization of electron emitters for miniature x-ray sources // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2003. Vol. 21. P. 344–349. DOI [10.1116/1.1529657](https://doi.org/10.1116/1.1529657)
6. Tzeng Y., Chen C-L., Chen Y-Y., Liu C-Y. Carbon nanowalls on graphite for cold

- cathode applications. *Diamond and Related Materials*. 2010. Vol.19 (2–3). P.201–204. DOI [10.1016/j.diamond.2009.08.005](https://doi.org/10.1016/j.diamond.2009.08.005)
7. Wang H-X., Jiang N., Zhang H., Hiraki A. Growth of a three dimensional complex carbon nanoneedle electron emitter for fabrication of field emission devices. *Carbon*. 2010. Vol.48. P.4483–4488. DOI [10.1016/j.carbon.2010.08.008](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.08.008)
8. Белянин А.Ф., Борисов В.В., Самойлович М.И., Багдасарян А.С. Влияние лазерного облучения и термической обработки на строение и автоэмиссионные свойства углеродных наностенок // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 3. С. 16–26. DOI: [10.7868/S0207352817030052](https://doi.org/10.7868/S0207352817030052)
9. Белянин А.Ф., Борисов В.В., Багдасарян А.С. Наноструктурированные углеродные материалы в эмиссионной электронике // Российский технологический журнал. 2017. Т. 5. № 3(17). С. 22–40.
10. Белянин А.Ф., Борисов В.В., Тимофеев М.А., Ламский А.Н. Ненакаливаемые катоды на основе углеродных наноструктурированных слоистых структур // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2013. № 4. С. 31–36.
11. Wang C.C., Chiu M.C., Shiao M.H., Shieue F.S. Characterization of AlN thin films prepared by unbalanced magnetron sputtering. *Journal of The Electrochemical Society*. 2004. Vol.151. No.10. P.252–256.
12. Самойлович М.И., Бовтун В., Ринкевич А.Б., Белянин А.Ф., Клещева С.М., Кемпа М., Нужный Д. Пространственно-неоднородные материалы на основе решетчатых упаковок наносфер SiO<sub>2</sub> // Инженерная физика. 2010. № 6. С. 29–38.
13. Rinkevich A.B., Burkhanov A.M., Samoilovich M.I., Belyanin A.F., Kleshcheva S.M., Kuznetsov E.A. Three-dimensional nanocomposite metal dielectric materials on the basis of opal matrices. *Russian Journal of General Chemistry*. 2013. Vol.83. No.11. P.2148–2158.
14. Tzeng Y, Chen W. L, Wu C., Lo J-Y., Li C-Y. The synthesis of graphene nanowalls on a diamond film on a silicon substrate by direct-current plasma

chemical vapor deposition. *Carbon*. 2013. V. 53. P. 120–129.

DOI [10.1016/j.carbon.2012.10.038](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.10.038)

15. Pimenta M.A., Dresselhaus G., Dresselhaus M.S., Cancado L.G., Jorio A., Saito R. Studying disorder in graphite-based systems by Raman spectroscopy. *Physical Chemistry Chemical physics*. 2007. Vol. 9. P. 1276–1291.

DOI [10.1039/b613962k](https://doi.org/10.1039/b613962k)

16. Ferrari A.C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nanodiabatic effects // *Solid state communications*. 2007. Vol.143. P.47–57.

DOI [10.1016/j.ssc.2007.03.052](https://doi.org/10.1016/j.ssc.2007.03.052)

17. Thornton J.Di-M. *Carbon Nanowalls: Processing, Structure and Electrochemical Properties*. A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University. 2011. P. 55.

18. Shang N.G., Staedler T., Jiang X. Radial textured carbon nano flake spherules. *Applied Physics Letters*. 2006. Vol.89. P.103-112.

DOI [10.1063/1.2346314](https://doi.org/10.1063/1.2346314)

19. Ferrari A.C., Meyer J.C., Scardaci V., Casiraghi C., Lazzeri M., Mauri F., Piscanec S., Jiang D., Novoselov K.S., Roth S., Geim A.K. Raman spectrum of graphene and graphene layers. *Physical Review Letters*. 2006. Vol. 97. 187401.

DOI [10.1103/PhysRevLett.97.187401](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.187401)

20. Oliveira C., Otani C., Maciel H.S. et al. Raman active E2 modes in aluminum nitride films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2001. Vol.12. P.259–262.

21. Liu L., Liu B., Edgara J.H., Rajasingam S., Kuball M. Raman characterization and stress analysis of AlN grown on SiC by sublimation. *Journal of Applied Physics*. 2002. Vol. 92. No.9. P.5183–5188.

**Для цитирования:**

С.А.Багдасарян, С.А.Налимов, А.И.Юрин, Е.Р.Павлюкова. Многослойные структуры на основе углеродных наностенок и нитрида алюминия в автоэмиссионных катодах. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct19/12/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.10.12