



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХОЛОДНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ФОРМОВКИ АВТОКАТОДА НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

А. Колодяжный, *kolodyazhnyj@gmail.com*,  
Е. Шешин, д.ф.-м.н., *sheshin@mail.mipt.ru*,  
Московский физико-технический институт  
(государственный университет), Москва

Катодолумinesцентные лампы перспективны в качестве источников искусственного освещения. В них люминофор, возбуждаемый потоком электронов с автоэмиссионного катода, испускает видимый свет. Соперничая по светоотдаче со светодиодными источниками, катодолумinesцентные лампы выгодно отличаются от них полным отсутствием токсичных материалов. На взгляд авторов, для серийного производства автокатодов наиболее перспективна технология использования углеродного волокна, заключенного в стеклянный капилляр, с последующей формовкой холодной плазмой аргона.

В светотехнической промышленности большие надежды возлагают на катодолумinesцентные источники света (КИС) на основе автоэмиссионного катода из углеродных волокон. Однако сложность выполнения требований к качеству катода сильно ограничивает крупносерийный выпуск этих приборов. Необходимо одновременно соблюдать стабильность и равномерность автоэмиссионного изображения, низкое напряжение включения, стабильность эмиссионного тока – все эти условия недостаточно технологичны для серийного производства. Из множества вариантов изготовления автоэмиссионных катодов на наш взгляд наиболее перспективной технологией является технология использования полиакрилонитрильного (ПАН) углеродного волокна (УВ), заключенного в стеклянный капилляр.

Эффективным методом улучшения эмиссионных свойств является тренировка (формовка) катода при многоступенчатом или линейчатом режиме токоотбора, а также различные способы формовки.

## USAGE OF COLD PHYSICAL PLASMA FOR THE FIELD RADIATING CATHODE FORMING ON THE BASIS OF CARBON FIBERS

A. Kolodyazhny, *kolodyazhnyj@gmail.com*,  
E. Sheshin, *sheshin@mail.mipt.ru*,  
Moscow Institute of Physics and Technology (State  
University), Moscow

Cathodoluminescent lamps are prospective sources of the artificial illumination. Competing with the light-emitting diode lamps on luminous efficiency they advantageously distinguish from them by the complete absence of toxic materials. Visible light emanates from them with the luminophore activated by the electron flow which was ejected from the field emission cathode.

Great expectations are laid on the cathodoluminescent light sources (CLS) on the basis of field radiating cathode of the carbon fibers. However, up to the present moment the output of these devices has been quite limited due to the specific requirements to the cathode properties such as stability and evenness of the field emission pattern, low turn-on voltage, emission current stability. Many variants of the field radiating cathodes manufacturing were offered but they were not technological enough for the batch production. At the moment the most prospective method is the usage of polyacrylonitrile (PAN) carbon fiber (CF) enclosed into the glass capillary.

Effective method of the emission properties enhancing is cathode training (forming) under the multistage or linear conditions of current take-off and various methods of the forming.

New method of forming of the field radiating cathodes – treatment of the field radiating cathode on the basis of CF placed into the glass capillary with the argon cold plasma – was suggested and tested in the paper for the first time. The ArCPC-1 cold-plasmic argon coagulator (CPAC) was used as generator of cold plasma in this paper. This method of forming allows enhancing the emission properties of the field radiating cathodes



В предлагаемой работе впервые предложен и опробован новый метод формовки автокатодов – обработка автокатодов на основе УВ, заключенного в стеклянный капилляр, холодной плазмой аргона. Для формовки катода в качестве генератора холодной плазмы применяли холодноплазменный аргоновый коагулятор (ХПАК) ArCPC-1. Этот способ позволяет значительно улучшить эмиссионные свойства автокатодов: пучки волокон, прошедшие обработку холодной плазмой аргона, при работе в вакууме дают стабильный эмиссионный ток, эмиссионные центры распределены равномерно по рабочей поверхности катода. Поверхность пучка волокон УВ, подвергнутых травлению в холодной плазме аргона, становится более равномерной.

Одним из ключевых моментов исследований является подбор оптимальных рабочих параметров процесса травления автоэмиссионных катодов. Проведены эксперименты по исследованию влияния различных режимов работы коагулятора на предварительную формовку автоэмиссионного катода на основе ПАН УВ.

Предполагается, что полученные результаты приобретут практическое значение при разработке приборов эмиссионной электроники, в частности катодолуминесцентных источников света. Технологические приемы и методы, предложенные и использованные в работе, могут послужить основой при разработке промышленной технологии производства.

Известно, что применение КИС ограничено кругом задач, где они используются в виде электронно-лучевых трубок в мониторах и телевизорах. Однако развитие автоэмиссионных технологий открывает новые области для реализации всех преимуществ катодолуминесцентных источников света. А таких положительных сторон много: высокая экологичность, устойчивость к механическим вибрациям, низкая инерционность, широкий диапазон рабочих температур и диапазон цветности, высокая яркость, долговечность, отсутствие греющихся частей.

В активных исследованиях автоэмиссионных свойств различных материалов особое место занимают углеродные материалы [1], в том числе углеродные волокна (УВ). Наиболее распространенными являются полиакрилонитрильные (ПАН) УВ [2]. В первую очередь это объясняется их доступностью и высокой повторяемостью свойств. ПАН УВ – продукты

значительно: fiber bundles treated with the argon cold plasma when operating in vacuum give stable emission current, emission centers are evenly distributed on the cathode operating surface. Surface of the CF bundle exposed to the etching in argon cold plasma becomes more even.

At this stage of experiments the influence of various conditions of coagulator operation on the previous forming of the field radiating cathode on the PAN CF basis was studied. At the moment one of the key aspects is selection of the optimal parameters for the etching of the field radiating cathodes.

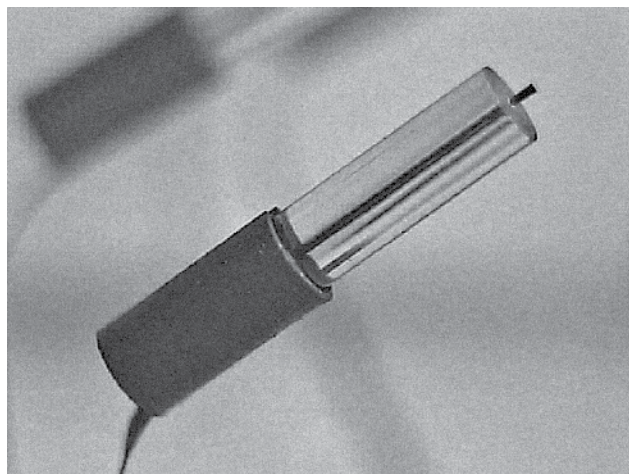
Practical significance of this paper consists in the applicability of obtained results when developing the emission electronic devices, particularly the cathodoluminescent light sources. Technological procedures and methods suggested and used in this paper can become the basis when developing the manufacturing technology.

At the moment CLS are widely applied only in the form of cathode-ray tubes in monitors and TV sets. With the development of the field emission technologies the new application areas are opening up where the cathodoluminescent light sources can implement all their advantages such as high ecological compatibility, resistance to the mechanical vibrations, low lag effect, wide range of the operating temperatures and chromaticity, high brightness, longevity, absence of hot parts.

At the present time research of the field emission properties of various materials are conducted with the purpose of their practical use. Carbon materials [1] including the carbon fibers (CF) take a special place in this research.

The most widespread carbon materials are the polyacrylonitrile (PAN) CFs [2]; their availability and high repeatability of properties explain it in the first place. PAN CFs are the products of pyrolysis of the polymeric fibers on the basis of polyacrylonitrile and their further high-temperature treatment. CFs have diameter of  $6\div 10\ \mu\text{m}$  and consist of carbon for 99.9%.

Unbeaten advantages of the field radiating cathodes on the CF basis are longevity, availability and cheapness of the material for manufacturing. However, up to the present moment off-shelf devices production with the field radiating cathodes on the CF basis has been very limited. Many variants of manufacturing of the CF field radiating cathodes were offered but none of them was technological enough for production. In paper [3] the following method of the field radiating



**Рис.1.** Автокатод на основе УВ, заключенный в стеклянный капилляр  
**Fig.1.** Field Radiating Cathode Manufactured of CF Which Was Enclosed into the Glass Capillary

cathode manufacturing was suggested – the CF bundle was being enclosed into the glass capillary according to the special technology. It allowed making the field radiating cathodes with the CF bundle centered and axially oriented along the electron-beam generator under the condition of absence of the mechanical loads on fibers. Cathode manufactured with the application of this method is shown in Fig. 1.

It is known that parameters of the microasperities on the cathode emitting surface generally determine its field emission properties. The qualitative results which show the significant influence of the inequality (value which is inverse to the average radius of the microasperity rounding) of the field radiating cathode surface on the value of emission current are given in papers [4] and [5]. Thus, in order to receive higher stability, evenness of the field emission pattern, low turn-on voltage, high stability of the emission current the emitting part of cathode has to be even without strongly marked asperities.

пиролиза полимерных волокон на основе полиакрилонитрила и их последующей высокотемпературной обработки. УВ имеют диаметр 6-10 мкм и состоят на 99,9% из углерода.

Непревзойденные достоинства автокатодов на основе УВ – долговечность, а также доступность и дешевизна материала для их производства. Однако пока выпуск серийных приборов с автоэмиссионными катодами на основе УВ весьма ограничен. Предлагалось множество вариантов изготовления автокатода из УВ, но ни один из них не являлся достаточно технологичным для производства. В работе [3] был предложен метод изготовления автокатода, когда пучок УВ по специальной технологии заключен в стеклянный капилляр. Такая конструкция автокатода обеспечивала центрированный и ориентированный вдоль оси электронного прожектора пучок УВ при отсутствии механических нагрузок на волокна (рис. 1).

Известно, что параметры микровыступов на эмитирующей поверхности катода в основном определяют его автоэмиссионные свойства. В работах [4] и [5] приведены качественные результаты, показывающие существенное влияние шероховатости поверхности автоэмиссионного катода на величину эмиссионного тока. Таким образом, для получения большей стабильности и равномерности автоэмиссионного изображения, низкого напряжения включения, высокой стабильности эмиссионного тока эмитирующая часть катода должна быть

One of the methods of the structure enhancing is the training of cathode under the multistage or linear conditions of current take-off which was applied for the first time in paper [6]. It was observed that after the training the microstructure of operating surface and thus stability of the emission current relaxes toward certain optimal value.

The forming of cathode is required before the training for the field emission characteristics enhancement. General ideas of the influence of carbon material surface on its emission properties were given in paper [7] and therein the following



**Рис.2.** Холодноплазменный аргоновый коагулятор ArCPC-1  
**Fig.2.** ArCPC-1 Cold-Plasmic Argon Coagulator

равномерной и не иметь ярко выраженных выступов.

Для улучшения структуры катода используют метод тренировки катода при многоступенчатом или линейчатом режиме токоотбора. После тренировки микроструктура рабочей поверхности, а следовательно, и стабильность эмиссионного тока релаксируют к некоторому оптимальному значению. Впервые метод был описан в работе [6]. Для улучшения автоэмиссионных характеристик катода перед тренировкой необходимо провести операцию формовки. Работа [7] дает общие представления о влиянии поверхности углеродного материала на его эмиссионные свойства, в ней описаны следующие методы обработки поверхности: электроэрозионная, механическая, электроэрозионная с последующим отжигом в среде фтора. Однако, к сожалению, для массового изготовления катодов эти методы не подходят из-за дороговизны и сложности автоматизации. В работе [8] предложен метод травления пучка УВ коронным разрядом на воздухе (ТКР). Но и он не лишен недостатков – результаты зависят от внешних условий (влажности воздуха, концентрации газов в атмосфере), по окончании формовки необходимо очищать УВ от сажи и осевшей пыли.

В этом отношении использование холодной физической плазмы очень перспективно. Суть метода состоит в бомбардировке УВ ионами инертного газа. По сравнению с описанными выше способами формовки преимущества данного метода заключены в его доступности, отсутствии зависимости от внешних условий, а также в простоте использования с технологической точки зрения.

В качестве генератора холодной плазмы в эксперименте мы использовали холодноплазменный аргоновый коагулятор (ХПАК) АгСРС-1 (рис. 2). Принцип действия АгСРС-1 состоит в ионизации струи инертного газа (аргона) с помощью униполярного высокочастотного электроискрового разряда. Струя аргона исключает образование сажи и оседание пыли на УВ, поэтому необходимость очистки УВ по окончании формовки отпадает.

Задача состояла в подборе оптимальных параметров для процесса формовки автокатодов: рабочего напряжения коагулятора, величины потока инертного газа (аргона), времени воздействия, расстояния от УВ до холодноплазменного разряда. Было проведено три



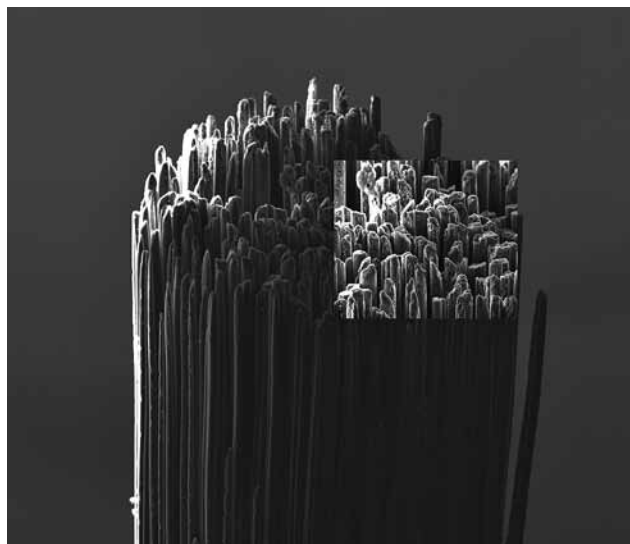
**Рис.3.** Схема установки для формовки: 1 – катод; 2 – эмиттирующая часть катода; 3 – холодноплазменный разряд; 4 – трубка коагулятора

**Fig.3.** Installation Diagram for the Forming: 1 – Cathode; 2 – Emitting Part of Cathode; 3 – Cold-Plasmic Discharge; 4 – Coagulator Tube

methods of surface treatment were described: electro-erosive, mechanical, electro-erosive with the further fluorine annealing. However, these methods are not applicable for the cathodes mass production because of high cost and complicity of the treatment automation. Method of the CF bundle annealing with the air corona discharge (ACD) was suggested in paper [8]. Disadvantages of this method are the dependence on environmental conditions (air humidity, gas concentration in air) and necessity of the CF cleaning of the soot and accumulated dust after finishing the forming.

One of the prospective methods consists in the usage of cold physical plasma. The main point of this method consists in the CF bombardment with the inert gas ions. In comparison with the aforementioned methods of forming, advantages of this method are availability, absence of the dependence on environmental conditions, and usability in terms of the technology. The ArCPC-1 cold-plasmic argon coagulator (CPAC) shown in Fig. 2 was used as the generator of cold plasma in this paper. Principle of the ArCPC-1 operation consists in the ionization of inert gas (argon) current using the unipolar high-frequency electric-spark discharge. Usage of the argon current allows avoiding the soot generation and dust deposition on the CF, therefore the necessity of the CF cleaning after forming stands no longer.

At the present time one of the key aspects is selection of the optimal parameters for the forming of the field radiating cathodes: coagulator operating voltage, inert gas (argon) current, exposure time, distance from the CF to the cold-plasmic discharge. At this stage three experiments were conducted; in the course of these experiments the influence of distance from the CF to the cold-plasmic discharge and time of exposure on the field radiating cathode forming on the basis of vitrified PAN CF was studied. The principal diagram of



**Рис.4.** РЭМ-изображение катода А4 (увеличение 1000× и 4000×)  
**Fig.4.** A4 Cathode (SEM-Picture under Enlarging by 1000× and 4000×)

installation which was used in these experiments is given in Fig. 3.

Upon completion of the forming the pictures of cathodes were taken in the FEI Quanta 200 MK2 scanning electronic microscope (SEM). Then the field emission cathodes were placed into the high-vacuum chamber on the basis of Agilent Technologies Turbo-V 301-AG turbo-molecular pump where under the pressure of  $\sim 10^{-6}$  torr they were submitted to the training under the multistage conditions of current take-off. Afterwards, the field emission tests of the cathodes under study which included the volt-ampere (VA) characterization and obtaining the field emission patterns were conducted. Cathodes were included in the diode mode.

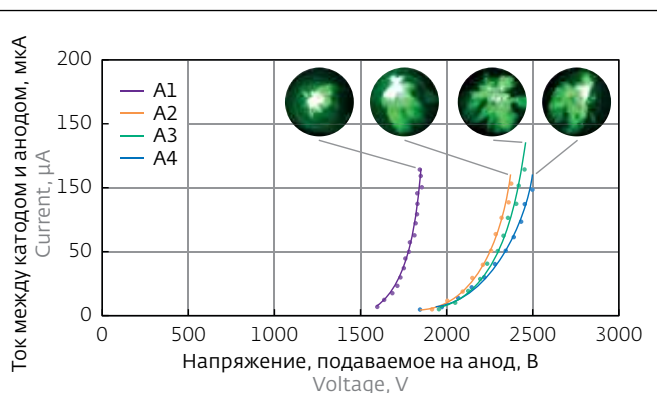
During the first experiment the influence of cold plasma on four cathodes: A1, A2, A3 and A4 was being studied. Distance from the cathode emitting part to the cold-plasmic discharge was being selected in such a way for the bursts between them to occur with the period of 0.5 seconds for the A1-A3 cathodes (the distance was 1 cm) and 0.25 seconds for the A4 cathode (0.5 cm). It was noted that after the expiration of 2-3 min of the forming period the amount of bursts per time unit was being noticeable. After analysis of the picture of the A4 cathode in SEM which is given in Fig. 4, the conclusion was made that it occurred due to the obtaining of more even surface of the cathode emitting part.

VA characteristics were taken from the A1-A4 cathodes and their field emission patterns under the maximum measured currents were obtained (refer to Fig. 5).

эксперимента, в ходе которых исследовали зависимость расстояния от УВ до холодноплазменного разряда и времени воздействия на формовку автокатода на основе остеклованных ПАН УВ. Принципиальная схема установки, использовавшаяся в данных экспериментах, представлена на рис.3. По окончании формовки поверхность катодов проанализирована в растровом электронном микроскопе (РЭМ) FEI Quanta 200 MK2.

Затем автоэмиссионные катоды были помещены в высоковакуумную камеру на основе турбомолекулярного насоса Agilent Technologies Turbo-V 301-AG, где при давлении  $\sim 10^{-6}$  Торр подверглись тренировке при многоступенчатом режиме токоотбора. Другая часть исследований была посвящена автоэмиссионным характеристикам катодов и включала анализ вольт-амперных (ВА) характеристик и получение автоэмиссионных изображений. Катоды были включены в диодном режиме.

В первом эксперименте по исследованию влияния холодной плазмы использованы четыре образца – катоды А1, А2, А3 и А4. Расстояние от эмитирующей части катода до холодноплазменного разряда подбиралось таким образом, чтобы пробои между ними происходили с периодом 0,5 с и 0,25 с. В опыте с  $T=0,5$  с использованы катоды А1, А2 и А3 (расстояние 1 см), в опыте с  $T=0,25$  с использован



**Рис.5.** ВА-характеристики и автоэмиссионные изображения катодов А1-А4

**Fig.5.** VA Characteristics and Field Emission Patterns of the A1-A4 Cathodes

катод А4 (расстояние 0,5 см). Обнаружено, что по достижении времени формовки порядка 2-3 мин количество пробоев в единицу времени заметно сокращается. На основании анализа РЭМ-изображения катода А4 (рис. 4), можно судить о том, что причина появления этого эффекта - в образовании более равномерной поверхности эмитирующей части катода. С катодов А1-А4 были сняты вольт-амперные характеристики (ВАХ) и получены их автоэмиссионные изображения при максимальных измеренных токах (рис. 5). При анализе ВАХ катодов А1-А3 замечено, что характеристики практически не меняются при вариациях времени формовки. Изменения ВАХ наблюдаются лишь у катода А4 (уменьшение напряжения включения, большая крутизна ВАХ). Автоэмиссионные изображения катодов А1-А3 выделялись не слишком высокой стабильностью, в отличие от изображения катода А4. Следовательно, данные условия не придают способу формовки автоэмиссионного катода эффективность.

Зато условия формовки катода А4 позволяют выбрать путь разработки более эффективного способа. Он был исследован во втором эксперименте, в котором использованы образцы катодов В1, В2 и В3. Холодноплазменный разряд непосредственно касался эмитирующей части катода. В этом случае частоту пробоев можно принять равной частоте рабочего напряжения аргонового коагулятора ХПАК. По окончании формовки анализ РЭМ-изображений катодов показал, что поверхность катодов стала более однородной (рис. 6). При этом, однако, заметно появление отверстий на боковых поверхностях на концах УВ, возникших из-за бомбардировки их ионами аргона. С одной стороны, это приводит к увеличению количества эмиссионных центров, благодаря чему увеличивается общая площадь эмитирующей поверхности. Однако такая эмиссия плохо контролируема, из-за чего автоэмиссионное изображение может быть нестабильным. Также появление отверстий на боковой поверхности приводит к уменьшению прочности УВ.

Были проанализированы ВАХ и автоэмиссионные изображения при максимальных значениях измеренных токов, снятые с катодов В1-В3 (рис. 7). Выявлена их явная зависимость от времени формовки катода. Когда время формовки не превышает 3-4 мин, наблюдается улучшение таких параметров ВАХ, как крутизна

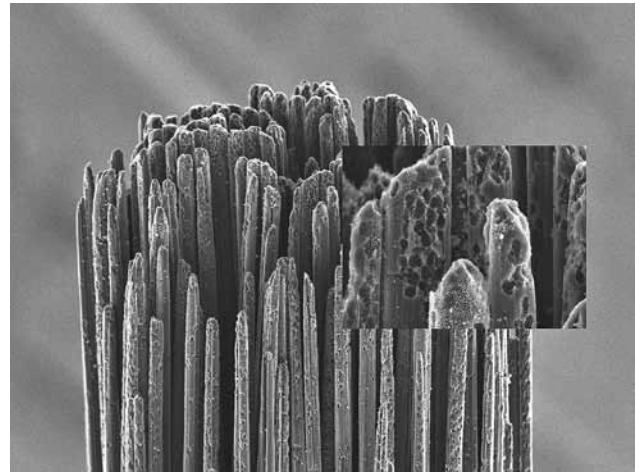


Рис.6. РЭМ-изображение катода В2 (увеличение 500× и 5000×)

Fig.6. Pictures of the B2 Cathode (SEM-Picture under Enlarging by 500 and 5000)

When analyzing the VA characteristics of the A1-A3 cathodes it was noted that they practically did not depend on the forming period. Changes were observed only on the A4 cathode (decrease of the turn-on voltage, large transadmittance). Field emission patterns of the A1-A3 cathodes distinguished in not very high stability in comparison with the A4 cathode pattern. Therefore, this method is not effective way of the field emission cathode forming. The forming method which was used for the A4 cathode is peculiar transition to the more effective method which is described below in the second experiment.

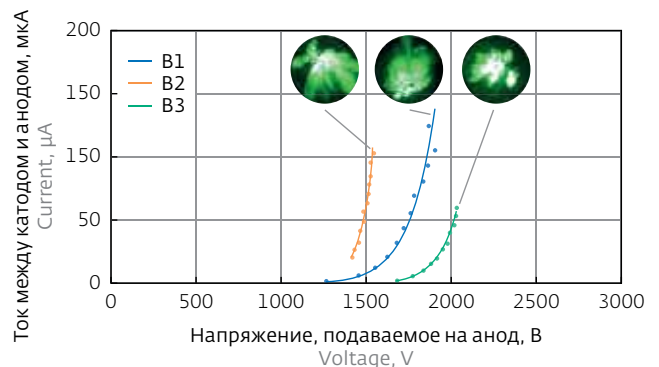
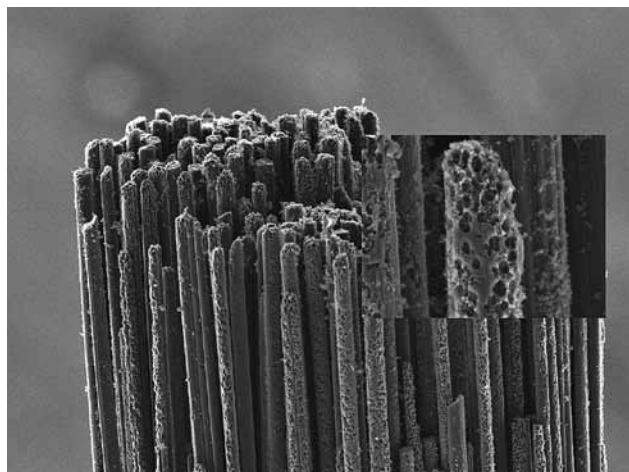


Рис.7. ВАХ и автоэмиссионные изображения катодов В1-В3

Fig.7. VA Characteristics and Field Emission Patterns of the B1-B3 Cathodes



**Рис.8.** РЭМ-изображение катода С1 (увеличение 500× и 5000×)  
**Fig.8.** C1 Cathode (SEM-Picture under Enlarging by 500 and 5000)

и напряжение включения. Это объясняется сравнением неоднородностей с поверхности катода и появлением новых эмиссионных центров из-за бомбардировки боковой поверхности УВ ионами аргона. Однако, когда время формовки превышало 5 мин, наблюдалось явное ухудшение характеристик из-за снижения прочности и обламывания УВ.

Эксперимент позволил утверждать, что данный метод является эффективным способом улучшения автоэмиссионных характеристик катода, однако для определения оптимальных условий формовки требуется продолжить исследования.

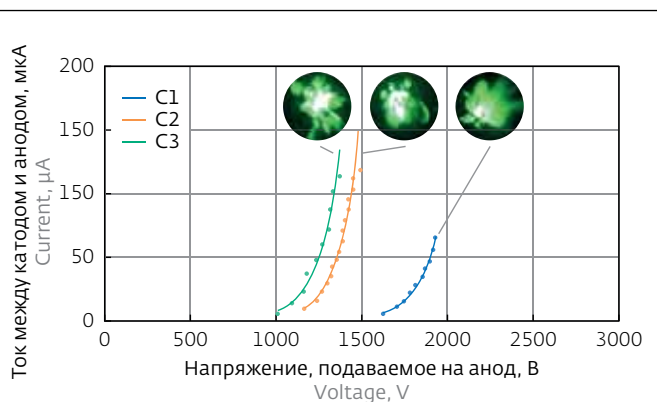
В третьем эксперименте эмитирующая часть катода была полностью помещена в холодноплазменный разряд. В опытах использованы образцы катодов С1, С2 и С3. Аналогично условиям второго эксперимента частота пробоев принята равной частоте рабочего напряжения ХПАК. Согласно РЭМ-изображению катода С1 (рис.8) поверхность катода стала однородной и приобрела округлую форму. Однако при увеличении 5000× обнаружено, что размеры отверстий, образовавшиеся на боковой поверхности УВ, стали намного больше тех, которые наблюдались во втором эксперименте, причем отверстия располагаются по всей длине УВ. Конечно, это ведет к значительному снижению прочности УВ, из-за чего появляется дрожание, которое в совокупности с эмиссией из этих отверстий приводит к нестабильности

In the second experiment the B1, B2 and B3 cathodes were being studied. Cold-plasmic discharge directly was touching the emitting part of cathode. In this case the frequency of bursts can be taken as frequency equal to the CPAC operating voltage frequency. Upon completion of the forming the picture of the B2 cathode was taken in SEM (refer to Fig. 6); on the basis of this picture it was concluded that the cathode surface became much more even.

Appearance of holes on the lateral surfaces of the CF edges which occurred as a result of the bombardment with argon ions should not go unnoticed. On one hand, it leads to the increasing of the emission centers amount; due to this fact the total area of emission surface increases. However, such emission is hardly controllable and thus the field emission pattern can be unstable. Also appearance of holes on the lateral surface causes the CF strength reduction.

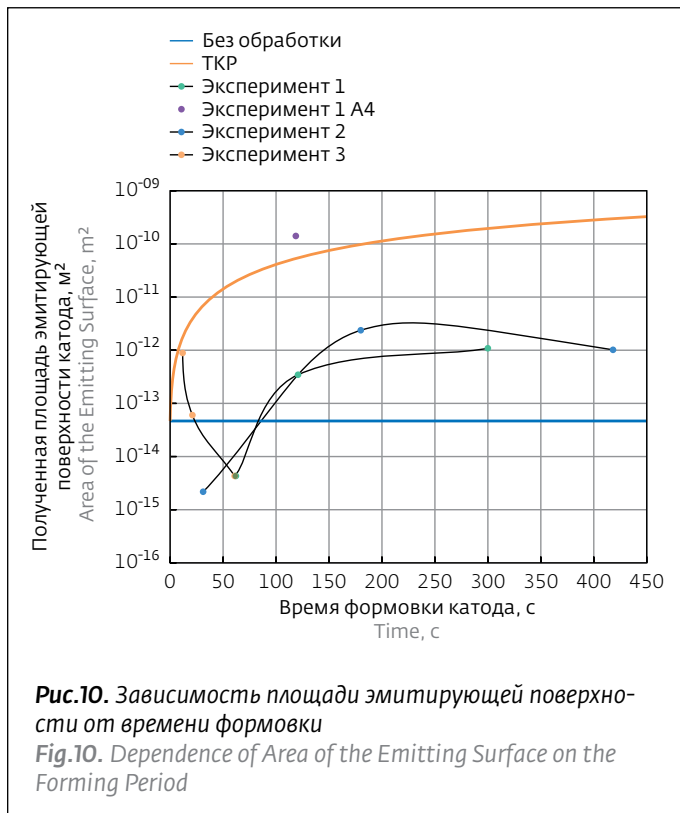
Also VA characteristics were taken from the B1-B3 cathodes and their field emission patterns under the maximum measured currents were obtained (refer to Fig. 7).

When analyzing these VA characteristics their evident dependence on the cathode forming period was revealed. When forming up to 3-4 min the enhancement of such parameters of VA characteristics as transadmittance and turn-on voltage were being observed; this could be due to the etch removal of irregularities from the cathode surface and occurrence of new emission centers because of the bombardment of the CF lateral surface with argon ions. After 5 minutes of forming the characteristics degradation was being observed



**Рис.9.** ВАХ и автоэмиссионные изображения катодов С1–С3

**Fig.9.** VA Characteristics and Field Emission Patterns of the C1-C3 Cathodes



автоэмиссионного изображения. ВАХ и автоэмиссионные изображения при максимальных измеренных токах для катодов С1-С3 представлены на рис. 9. Из результатов эксперимента видно, что для улучшения автоэмиссионных характеристик катода данный способ формовки не подходит, так как автоэмиссионное изображение не отличается стабильностью, несмотря на улучшение ВАХ.

Информация о площадях эмитирующей поверхности катодов и коэффициентах усиления поля, полученная с помощью ВАХ исследуемых образцов, позволяет прогнозировать автоэмиссионные свойства катодов при ином

as a result of the CF strength reduction and break off. This tendency is well observed in Fig. 10 and Fig. 11.

On the basis of this experiment it may be concluded that this method is effective way of enhancement of the cathode field emission characteristics, however further research is required for determination of the forming optimal conditions.

In the third experiment the C1, C2 and C3 cathodes were being studied. Cathode emitting part was being completely placed into the cold-plasmic discharge. Similarly to the second experiment the frequency of bursts can be taken as frequency equal to the CPAC operating voltage frequency. According to the picture of the C1 cathode in SEM (refer to Fig. 8) cathode surface became even and obtained round shape. However, when enlarging the picture by 5000x we could see that holes on the CF lateral surface were much larger than in the second experiment and situated along the CF full length. It leads to the considerable reduction of the CF strength and because of it the vibration takes place which together with the emission from these holes leads to the instability of the field emission pattern.

VA characteristics and field emission patterns under the maximum measured currents for the C1-C3 cathodes are given in Fig. 9.

Based upon the conducted experiment it can be concluded that this method is poorly applicable for the enhancement of the cathode field emission characteristics because in spite of the enhancement of VA characteristics the field emission pattern is not stable.

Information of areas of their emitting surface and field enhancement factors were obtained from the VA characteristics of the samples under study; this allows forecasting the field emission properties of cathodes

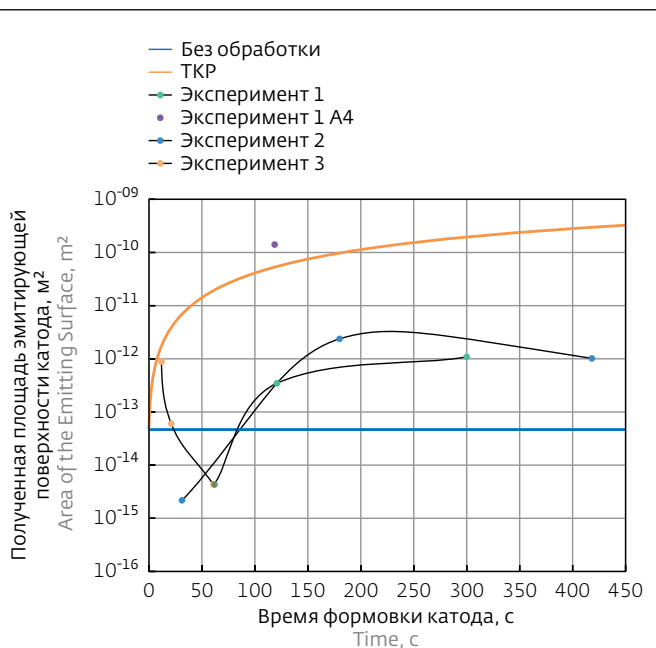


времени воздействия и судить о возможностях использования каждого из способов в условиях промышленного производства. Тенденции к ухудшению характеристик катодов из-за снижения прочности и обламывания УВ проявляются при увеличении времени формовки до 5 мин (рис. 10 и 11). Данные о катодах без обработки и обработанных ТКР были взяты из работы [8] для сравнения с полученными результатами.

На основании проведенных экспериментов можно видеть, что у автоэмиссионных катодов, сформированных в условиях, когда холодноплазменный разряд непосредственно касался эмитирующей части катода, заметно улучшается стабильность эмиссионного тока и увеличивается равномерность распределения эмиссионных центров по рабочей поверхности катода. В совокупности это позволяет получить стабильное и равномерное автоэмиссионное изображение при малых напряжениях включения и рабочем напряжении. Тогда автоэмиссионные катоды на основе остеклованных ПАН УВ можно будет использовать в КИС в качестве источников свободных электронов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kroto H.W., Heath J.R., O'Brien S.C., Curl R.F., Smalley R.E. C60: Buckminsterfullerene. - Nature, 1985, v. 318, p.162.
2. Watt W. Production and properties of high modulus carbon fibers. - Proceedings of the Royal Society, 1970, A319, №1536, p.5.
3. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. - Nature, 1991, v. 354, p.56.
4. Бондаренко Б.В., Макуха В.И., Рыбаков Ю.Л., Шаров В.Б., Шешин Е.П. Влияние шероховатости поверхности автокатодов на их эмиссионные характеристики. - Радиотехника и Электроника, 1987, т. 32, №12, с. 2606-2610.
5. Бондаренко Б.В., Макуха В.И., Шешин Е.П. Модель микрорельефа автокатаода с развитой рабочей поверхностью. - Физические явления в электронных приборах. - М.: МФТИ, 1986, с.18-21.
6. Бондаренко Б.В., Шешин Е.П. и др. Исследование эрозии углеродных автокатодов в камере РЭМ. - Электронная техника, 1986, № 4, с 8-12.
7. Шешин Е.П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. - М.: МФТИ, 2001.
8. Лешуков М.Ю. Эмиссионные свойства углеродных волокон и катодолуминесцентные источники света на их основе. - М.: МФТИ, 2004.



**Рис.11.** Зависимость коэффициента усиления поля от времени формовки

**Fig.11.** Dependence of the Field Enhancement Factor on the Forming Period

under the different exposure time and making conclusions on the applicability of each method for the industrial purposes. In Fig. 10 and Fig. 11 the diagrams are given. Information of cathodes without treatment and cathodes treated with ACD is taken from paper [8] for the comparison with obtained results.

Based on the conducted experiments it can be concluded that the CF bundles of the field emission cathodes which were treated according to the methods of the second experiment have enhanced stability of the emission current and increased evenness of distribution of the emission centers on the cathode operating surface. In aggregate it allows obtaining the stable and even field emission pattern when having low turn-on and operating voltage and due to this fact the usage of such cathodes in CLS is made possible.

Therefore, cathodes forming with the usage of cold plasma can considerably enhance the characteristics of devices which use the field emission cathodes on the basis of vitrified PAN CF as the sources of free electrons; however, further research is required to determine the optimal conditions of forming. Technological procedures and methods which were suggested and used in this paper can become the basis for development of manufacturing technology of light sources with the CF field emission cathode.