

11;12

## О некоторых особенностях полевой электронной эмиссии одиночной углеродной нити с наноструктурной эмиссионной поверхностью

© С.М. Лупехин, А.А. Ибрагимов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,  
191186 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: ibrart@mail.ru

(Поступило в Редакцию 5 апреля 2011 г.)

Экспериментально исследована полевая электронная эмиссия тонкой углеродной нити с наноструктурной эмиссионной поверхностью. Установлено, что нить способна эффективно работать в качестве полевого электронного эмиттера при напряжениях  $\sim 10^2 - 10^3$  В в условиях технического вакуума, при этом плотность эмиссионного тока может достигать величины  $\sim 10^2$  А/см<sup>2</sup>. Обнаружено, что в процессе электронной эмиссии при некотором пороговом рабочем напряжении нить начинает совершать изгибные механические колебания. Переход в режим механических колебаний сопровождается изменением режима полевой электронной эмиссии. В отсутствие механических колебаний наблюдается режим постоянного токоотбора. С началом механических колебаний полевая эмиссия переходит в режим периодических колебаний тока с постоянной составляющей.

### Введение

Внимание к изучению полевой электронной эмиссии углеродных нитей в постоянном электрическом поле связано прежде всего с высокой эффективностью использования углеродных волокон в качестве рабочего тела полевых катодов [1,2]. Высокая стабильность и воспроизводимость эмиссионных характеристик таких катодов выгодно отличает их от большинства известных к настоящему времени полевых электронных эмиттеров, созданных на базе других углеродных материалов [3,4].

Как известно [5], на эффективность эмиссионных характеристик полевого катода в существенной степени влияет фактор усиления электрического поля у его эмиссионной поверхности. Эффективное усиление поля может быть достигнуто, в частности, созданием оптимальной геометрии катода, при рассмотрении которой необходимо учитывать наногеометрию эмиссионной поверхности и макрогеометрию рабочего тела катода [6].

При создании углеродного волоконного катода, обладающего высокой эмиссионной способностью, в качестве рабочего тела, как правило, используют совокупность отдельных нитей [7]. Общая эмиссионная поверхность такого электронного эмиттера неоднородна, поскольку состоит из торцевых поверхностей отдельных нитей. Поэтому для понимания истинных закономерностей эмиссионных процессов и, следовательно, эффективного управления эмиссионными режимами необходимо изучение эмиссионных свойств отдельной нити, которая является составной частью многоэмиттерного катода. Одним из важнейших параметров, определяющих полевую электронную эмиссию углеродной нити, является коэффициент усиления напряженности электрического поля  $E$  ( $\beta$ -фактор). Коэффициент  $\beta$  зависит от величины отношения высоты рабочего тела катода  $h$  к его диаметру  $d$  (аспектное отношение  $\beta_1 = h/d$ ) в

сочетании с аспектным отношением для наноструктурных элементов (фибрилл) эмиссионной поверхности  $\beta_2 = h_f/d_f$ , где  $h_f$  и  $d_f$  — высота и диаметр фибрилл соответственно. Коэффициент усиления поля в данном случае может составлять величину  $\beta = \beta_1\beta_2 > 10^4$ .

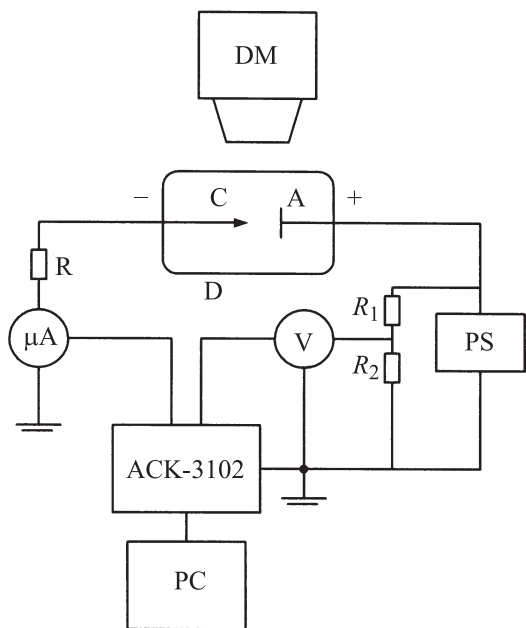
В настоящей работе проведены экспериментальные исследования эмиссионной способности отдельной углеродной нити с наноструктурной эмиссионной поверхностью при определенных геометрических параметрах рабочего тела катода: высоты  $h$ , диаметра  $d$  и наногеметрии эмиссионной поверхности.

### Методика эксперимента

Экспериментальные исследования эмиссионных свойств отдельной полиакрилонитрильной (ПАН) углеродной нити проведены на специально созданном полевым катоде. Одиночная круглая ПАН-углеродная нить помещалась в полую металлическую трубку и закреплялась вакуумным проводящим клеем. Часть нити, выходящей из трубки, использовалась в качестве рабочего тела полевого катода. Высота рабочего тела составляла  $h_1 = 4$  мм, диаметр нити  $d_1 = 7$  мкм определял диаметр эмиссионной поверхности катода. При этом структура эмиссионной поверхности представляла собой совокупность наноразмерных фибрилл высотой  $h_2 \approx 10^{-7}$  м и диаметром  $d_2 \approx 10^{-9}$  м. Катод устанавливался в диодную систему на металлический вакуумно-изолированный ввод.

Исследования эмиссионных процессов проводились в вакуумном диоде с плоским круглым анодом диаметром  $d_3 = 30$  мм. Катод устанавливался под углом  $\alpha \approx 5^\circ$  к оси диска анода.

Диод имел динамическую вакуумную безмасляную откачку и конструктивно выполнен в виде металлоглазной вакуумной камеры, которая позволяла оперативно



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки. D — вакуумный диод, C — катод, A — анод, R — ограничительное сопротивление,  $R = 1 \text{ Мом}$ ,  $\mu\text{A}$  — микроамперметр, V — вольтметр, PS — источник питания,  $R_1 = 100 \text{ МОм}$ ,  $R_2 = 100 \text{ кОм}$  — сопротивление делителя, АСК-3102 — цифровой самописец, PC — компьютер.

менять образцы катодов и устанавливать размер диодного промежутка в пределах  $D_{ac} = 0.1\text{--}15 \text{ мм}$ . Система вакуумной откачки поддерживала в рабочем объеме диода технический вакуум с остаточным давлением  $P \approx (10^{-6}\text{--}10^{-7}) \text{ Торр}$ .

Электронный ток с катода  $I$  и рабочее напряжение диода  $U_{ac}$  регистрировались двухканальным самописцем АСК-3102. Схема подключения регистрирующей системы к вакуумному диоду приведена на рис. 1.

С целью наблюдения и фоторегистрации рабочего тела катода (углеродной нити) в процессе полевой электронной эмиссии использовался цифровой оптический микроскоп МСП-2Ц. Цифровое оптическое изображение нити сохранялось в виде фото- и видеофайлов.

### Результаты эксперимента

В ходе экспериментальной работы зарегистрирована полевая электронная эмиссия одиночной углеродной нити в техническом вакууме  $P \approx (10^{-6}\text{--}10^{-7}) \text{ Торр}$  при невысоких рабочих напряжениях  $U_{ac} = 0.5\text{--}2.2 \text{ кВ}$ . Эмиссионные характеристики исследовались для катода высотой  $h_1 = 4 \text{ мм}$ , диаметром  $d_1 = 7 \mu\text{м}$  и диодных зазорах  $D_{ac} = 0.5, 1, 3, 4 \text{ мм}$ .

В процессе исследований обнаружена существенная особенность работы катода из углеродной нити заданной геометрии и при указанных величинах диодного зазора  $D_{ac}$ . При повышении рабочего напряжения  $U_{ac}$

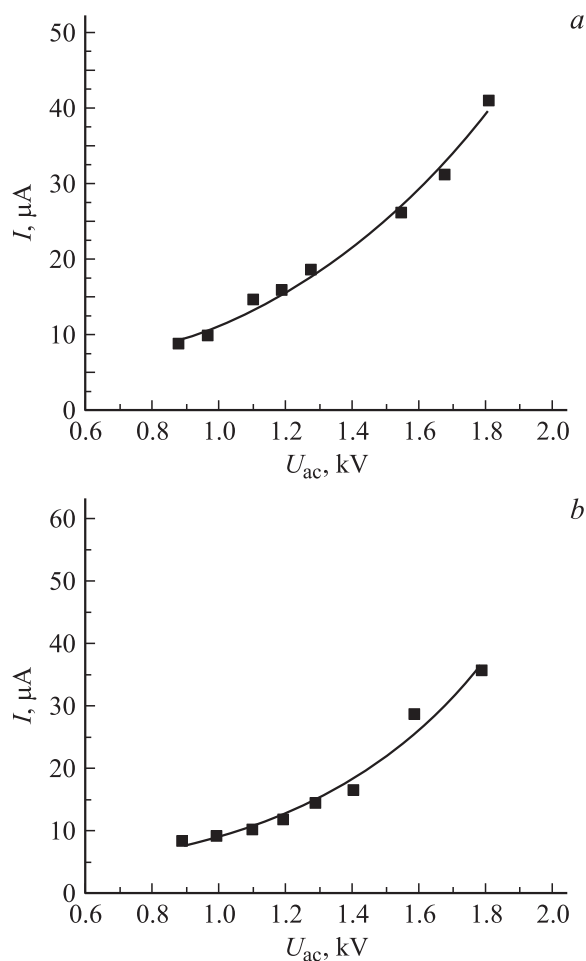
в процессе эмиссии и достижении  $U_{ac}$  некоторого критического значения происходит возбуждение изгибных механических колебаний рабочего тела катода.

Переход в режим механических колебаний сопровождается изменением режима полевой электронной эмиссии. В отсутствие механических колебаний наблюдается режим постоянного токоотбора. С началом механических колебаний полевая эмиссия переходит в режим периодических колебаний тока с постоянной составляющей.

Для изучения связи эмиссионного режима полевого катода с его механическими колебаниями проанализирована работа катода и диодной системы при указанных выше геометрических параметрах.

При  $D_{ac} = 4 \text{ мм}$  катод работает в режиме постоянного токоотбора. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) для данного диодного зазора приведена на рис. 2, а. Заметная эмиссия ( $I_c = 9 \mu\text{A}$ ) начинается при  $U_{ac} = 0.9 \text{ кВ}$ .

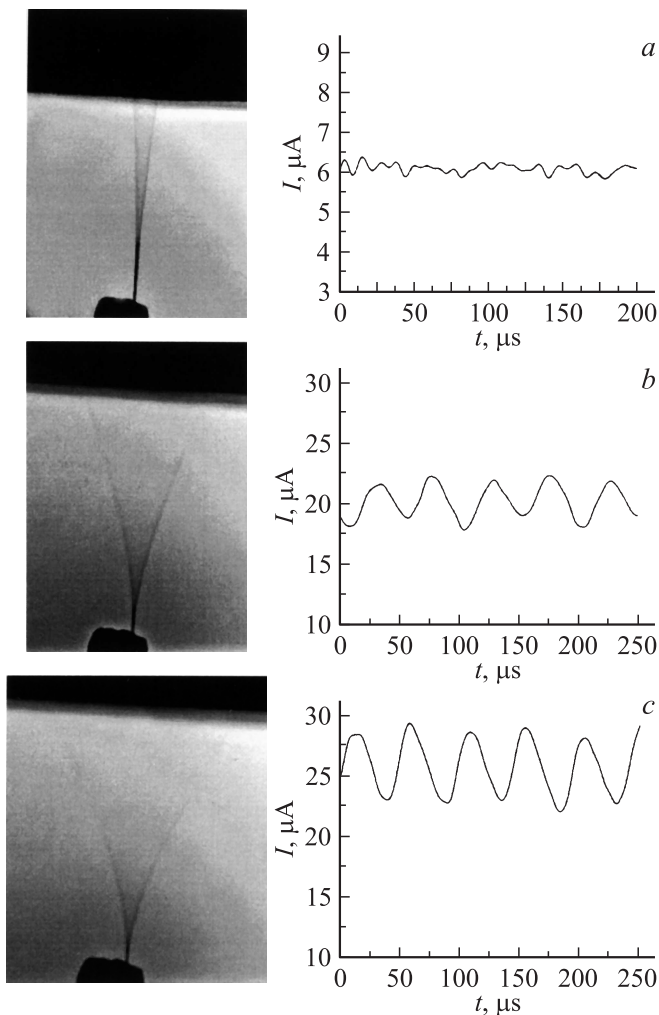
В случае  $D_{ac} = 3 \text{ мм}$  в интервале напряжений  $U_{ac} = 0.9\text{--}1.9 \text{ кВ}$  наблюдается постоянный токоотбор. Соответствующая ВАХ приведена на рис. 2, б. Далее при напряжении  $U_{ac} = 2.0 \text{ кВ}$  зарегистрированы колебания



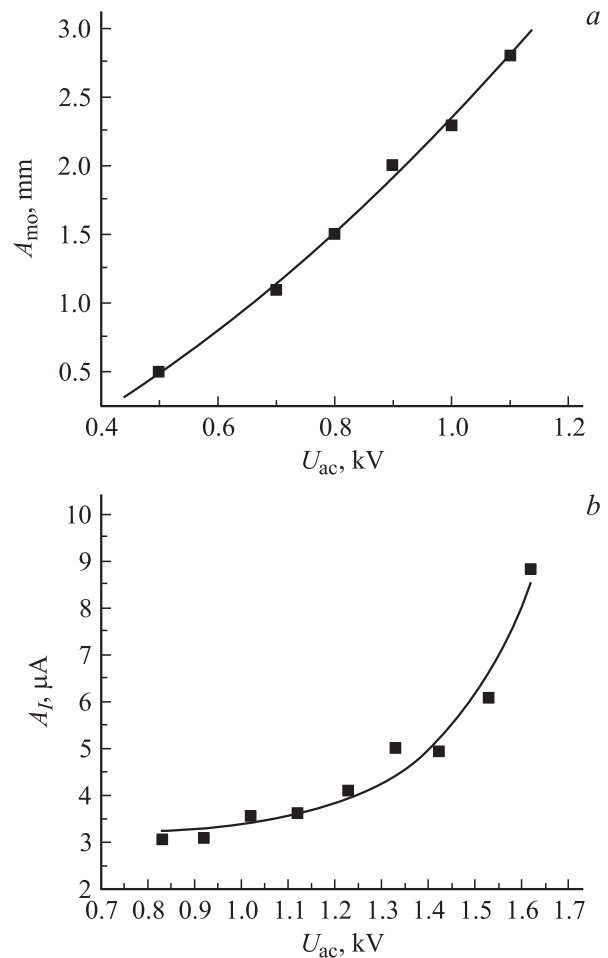
**Рис. 2.** Вольт-амперные характеристики при различных диодных зазорах  $D_{ac}$ , мм: а — 4, б — 3.

тока с одновременным возникновением изгибных механических колебаний катода. Процесс колебаний тока и механические колебания срываются, имеют неустойчивый характер.

При уменьшении диодного зазора до величины  $D_{ac} = 1 \text{ mm}$  заметный постоянный ток  $I_c \approx 10^{-6} \text{ A}$  появляется при  $U_{ac} = 0.5 \text{ kV}$ . При  $U_{ac} = 0.8 \text{ kV}$  появляются стабильные периодические колебания тока, которые сопровождаются устойчивыми механическими колебаниями. На рис. 3 приведены развертки тока  $I$  для различных значений  $U_{ac}$  и соответствующие каждому эмиссионному режиму фотоизображения рабочего тела катода. Результаты эксперимента указывают на то, что существует однозначная связь между эмиссионным процессом и изгибными колебаниями катода. При возбуждении механических колебаний катод из режима постоянного токоотбора переходит в режим периодических колебаний тока с постоянной составляющей. Рост амплитуды механических колебаний  $A_{mo}$  сопровождается ростом амплитуды



**Рис. 3.** Механические колебания катода и соответствующие осциллограммы полного тока  $I$  для  $D_{ac} = 1 \text{ mm}$  и напряжениях  $U_{ac}$ , kV: *a* — 0.5, *b* — 0.9, *c* — 1.1.



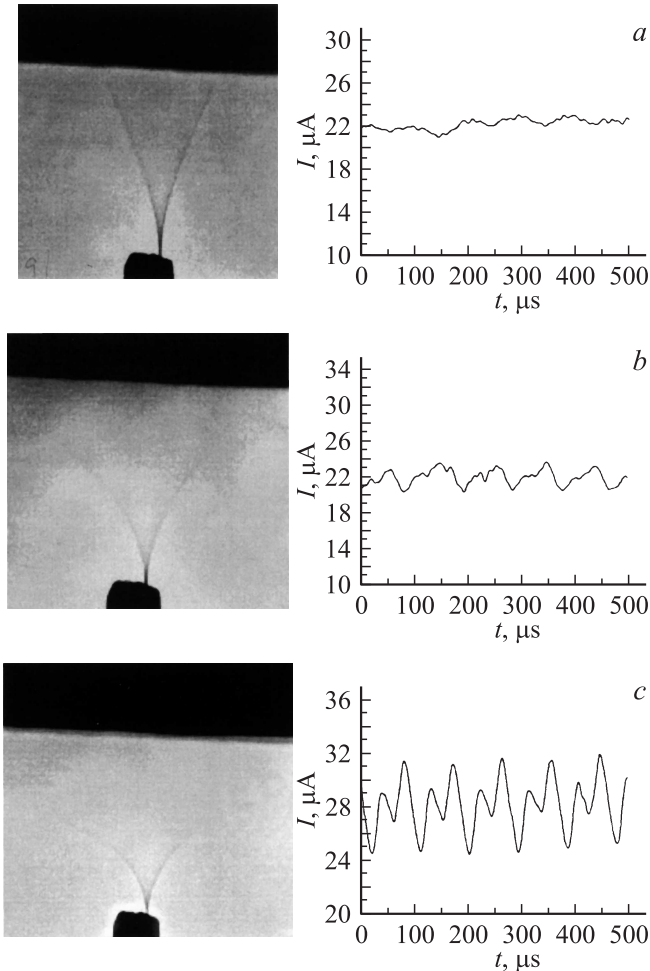
**Рис. 4.** Характерные зависимости амплитуды механических колебаний  $A_{mo}$  и амплитуды колебаний тока  $A_I$  от напряжения при  $D_{ac} = 1 \text{ mm}$ .

колебаний тока  $A_I$ . Зависимость  $A_I = f(U_{ac})$  совместно с зависимостью  $A_{mo} = f(U_{ac})$  приведены на рис. 4.

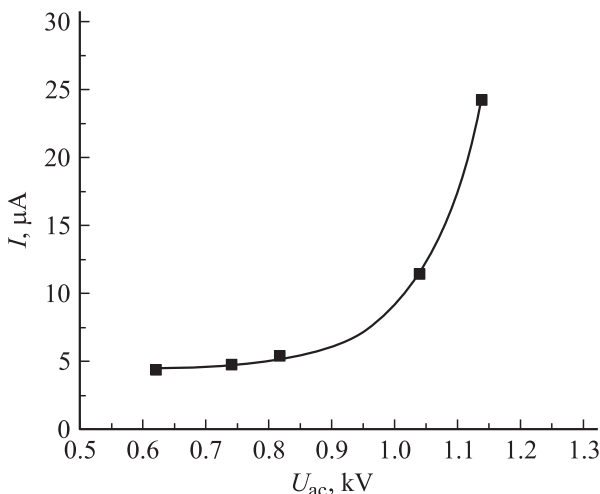
Для  $D_{ac} = 1 \text{ mm}$  начало возбуждения механических колебаний происходит при напряжения  $U_{ac1} = 0.5 \text{ kV}$ , несколько меньшем, чем напряжение, при котором начинаются заметные колебания тока  $U_{ac2} = 0.8 \text{ kV}$ . Амплитуда колебаний тока  $A_I$  может составлять 20% от величины полного тока  $I = A_I + I_c$ , достигая значения  $A_I = 9 \mu\text{A}$  при  $U_{ac} = 1.6 \text{ kV}$ .

Дальнейшее уменьшение диодного зазора до величины  $D_{ac} = 0.5 \text{ mm}$  приводит к увеличению значений рабочего напряжения  $U_{ac2} = 1.1 \text{ kV}$ , при которых начинаются колебания тока, при этом возбуждаемые механические колебания стабильны и возникают при рабочих напряжениях  $U_{ac1} = 0.6 \text{ kV}$ . Развертка во времени эмиссионного тока и соответствующие фотоизображения катода представлены на рис. 5. Максимальное значение  $A_I$  достигнуто при  $U_{ac} = 1.2 \text{ kV}$  и составляет 12% от величины полного тока  $I = A_I + I_c$ . На рис. 6 приведена ВАХ для режима постоянного токоотбора, который существует при напряжениях  $U_{ac} = 0.6\text{--}1.0 \text{ kV}$ .

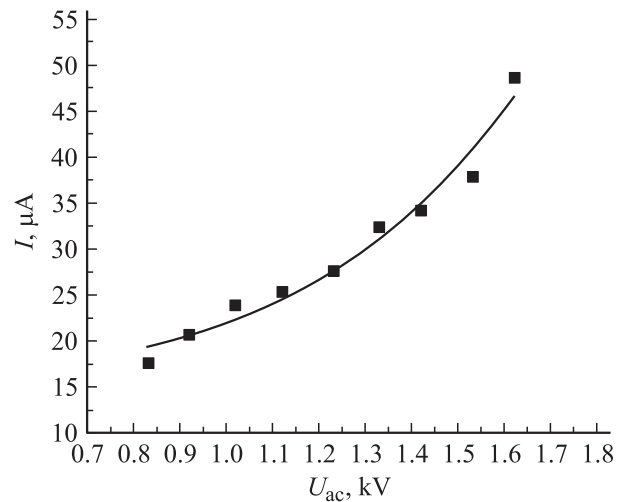
По данным эксперимента построены соответствующие ВАХ  $I = f(U_{ac})$  для  $D_{ac} = 1 \text{ mm}$ , приведенные на рис. 7. Значение полного тока  $I$  оценивалось как сумма



**Рис. 5.** Механические колебания катода и соответствующие осциллограммы полного тока  $I$  для  $D_{ac} = 0.5 \text{ mm}$  и напряжении  $U_{ac}$ , kV:  $a$  — 0.9,  $b$  — 1.1,  $c$  — 1.2.



**Рис. 6.** Вольт-амперная характеристика для  $D_{ac} = 0.5 \text{ mm}$ .



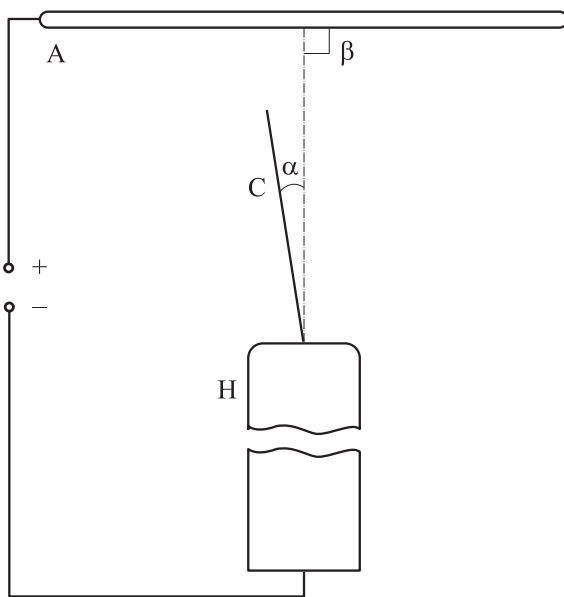
**Рис. 7.** Вольт-амперная характеристика для  $D_{ac} = 1 \text{ mm}$ .

постоянной составляющей  $I_c$  и амплитуды переменной составляющей тока  $A_f$ :  $I = A_f + I_c$ . Рассчитанная максимальная плотность тока  $I$  составляла  $j = 1.3 \cdot 10^2 \text{ A/sm}^2$  для  $D_{ac} = 1 \text{ mm}$  при  $U_{ac} = 1.6 \text{ kV}$ .

### Обсуждение результатов

Возбуждение механических колебаний углеродной нити в процессе полевой электронной эмиссии можно отнести к основному результату настоящих исследований. Полученные в работе экспериментальные закономерности позволяют на качественном уровне проанализировать эмиссионные характеристики углеродной нити в процессе ее механических колебаний в сильном электрическом поле. При этом возможно качественное рассмотрение влияния механических колебаний катода на полевую эмиссию. Выяснить точный механизм возбуждения и поддержания механических колебаний и влияние электронной эмиссии на этот процесс в настоящей работе не представляется возможным ввиду сложности задачи.

Возбуждение изгибных колебаний катода начинается в процессе протекания постоянного тока полевой электронной эмиссии  $I_c$  при определенных пороговых значениях  $U_{ac}$ . Колебания, очевидно, могут происходить лишь в результате воздействия на катод некоторой периодической силы  $F$ . На гибкий упругий катод в электрическом поле действует электростатическая сила  $F_q = qE$ , где  $E$  — напряженность электрического поля на эмиссионной поверхности эмиттера,  $q$  — индуцированный на эмиссионной поверхности заряд. В процессе механических колебаний действует сила упругости нити (рабочего тела катода)  $F_y = -m\omega_0^2 x$ , где  $m$  — масса нити,  $\omega_0$  — собственная частота осциллятора,  $x$  — координата осциллятора. В случае наблюдаемых механических колебаний периодическая сила может быть определена как  $F = F_y + F_q$ . В нашем случае катод от-



**Рис. 8.** Схема механических колебаний катода. А — анод, С — катод, Н — держатель катода.

клонен от оси анода на угол  $\alpha$ , следовательно, проекция  $F_q$  на направление, нормальное оси катода, не равна нулю и способна инициировать изгибные механические колебания нити.

Простая геометрия рабочего тела катода, представляющего собой одиночную цилиндрическую углеродную нить диаметром  $d = 7 \mu\text{m}$  и высотой  $h = 4 \text{mm}$ , позволяет свести задачу к рассмотрению механических колебаний гибкого упругого проводящего цилиндра с большим аспектным отношением. В исходном состоянии ось цилиндра отклонена относительно оси плоского анода на угол  $\alpha \approx 5^\circ$ . Цилиндр находится во внешнем электрическом поле и поверхность свободного торца цилиндра является эмиссионной поверхностью.

С точки зрения влияния механических колебаний на эмиссию наиболее интересно рассмотрение трех положений катода в процессе колебаний. На рис. 8 приведена схема колебаний такого цилиндрического катода в диодной системе с плоским круглым анодом. Первое положение — начальное, катод имеет нулевое отклонение ( $x = 0$ ). Второе положение — катод ориентирован вдоль оси анода ( $x \approx h\alpha$ ). Третье положение соответствует максимальному отклонению вершины катода до значения амплитуды механических колебаний ( $x = A_{\text{мо}}$ ). Каждое из положений определяет усиление напряженности  $E$  внешнего электростатического поля. Причем для второго положения  $E = E_{\text{max}}$ . В третьем положении при  $x = A_{\text{мо}}$  напряженность электрического поля  $E = E_{\text{min}}$ . В этом случае при колебаниях тока минимальное значение  $I$  должно соответствовать максимальному отклонению катода  $x = A_{\text{мо}}$ , максимальное — положению на оси анода.

Можно полагать, что зарегистрированные периодические колебания тока  $I$  возникают вследствие периодического изменения напряженности электрического поля  $E$  у эмиссионной поверхности в процессе механических колебаний катода. Закон изменения  $I$  должен соответствовать закону изменения  $E$ .

Очевидно, что оба процесса — протекание тока и механические колебания катода — взаимосвязаны. Протекание тока  $I$  может влиять на процессы инициирования и поддержания механических колебаний, поскольку электронная эмиссия влияет на величину индуцированного на эмиссионной поверхности заряда, который, в свою очередь, определяет значение  $F_q$ .

С другой стороны, экспериментально установлено, что увеличение амплитуды механических колебаний происходит одновременно с ростом амплитуды колебаний тока (рис. 4). Последний факт можно связать с тем, что рост амплитуды периодических колебаний  $E$  в процессе увеличения амплитуды механических колебаний приводит к соответствующему росту амплитуды переменного тока.

Расчет  $E$  для каждого положения катода в процессе механических колебаний представляет собой отдельную задачу, которую необходимо решать в рамках самостоятельной работы.

Из экспериментальных данных следует, что полевая электронная эмиссия и процесс механических колебаний существенно зависят от диодного зазора  $D_{\text{ac}}$  и, следовательно, от начального значения  $E$ . При уменьшении  $D_{\text{ac}}$  от 3 до 1 mm стабилизируются крайне нестабильный режим механических колебаний и колебания тока во всем диапазоне  $U_{\text{ac}}$ . Необходимо также отметить, что с увеличением  $U_{\text{ac}}$  происходит переход работы катода из режима постоянной эмиссии в колебательный эмиссионный режим с постоянным смещением по току и с одновременным увеличением амплитуды токовых колебаний. При этом значение амплитуды переменного тока  $A_I$  может составлять примерно 20% от величины общего тока.

## Выводы

Экспериментальные исследования полевой электронной эмиссии катода, изготовленного из одиночной углеродной нити, имеющей аспектное отношение  $h/d \approx 10^2$  и наноструктурную эмиссионную поверхность, показали, что углеродная нить эффективно работает при низких рабочих напряжениях  $U_{\text{ac}} = 0.5\text{--}2.2 \text{ kV}$  в условиях технического вакуума. В режиме постоянного токоотбора плотность постоянного тока составляет  $j \approx 10^2 \text{ A/sm}^2$  для диодного зазора  $D_{\text{ac}} = 3\text{--}4 \text{ mm}$  при рабочем напряжении  $U_{\text{ac}} = 1.6 \text{ kV}$ .

Принципиальной особенностью работы данного катода является тот факт, что в процессе полевой эмиссии, начиная с некоторого порогового напряжения, возникают изгибные механические колебания рабочего тела

катода — углеродной нити. С началом возбуждения механических колебаний полевая электронная эмиссия переходит из постоянного режима в режим периодических колебаний эмиссионного тока, имеющего постоянную составляющую  $I_c$ . В процессе увеличения рабочего напряжения возрастает амплитуда механических колебаний  $A_{\text{мо}}$  катода с одновременным ростом амплитуды  $A_I$  периодических колебаний тока. При этом растет доля амплитуды  $A_I$  в общем значении тока  $I = A_I + I_c$ .

## Список литературы

- [1] Бондаренко Б.В., Рыбаков Ю.Л., Шешин Е.П. // РЭ. 1982. Т. 27. Вып. 8. С. 1593–1597.
- [2] Baturin A.S., Chadaev N.N., Leshukov M.Yu., Sheshin E.P. // Appl. Surface Science. 2003. Vol. 215. № 1. P. 260–264.
- [3] Елецкий А.В. УФН. 2010. Т. 180. Вып. 9. С. 897–930.
- [4] Chen Z. et al. // Nanotechnology. 2007. Vol. 18. P. 265 702.
- [5] Елинсон М.И., Васильев Г.Ф. Автоэлектронная эмиссия. М.: ГИФМЛ, 1958. 272 с.
- [6] Лупехин С.М., Ибрагимов А.А. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 6. С. 109–112.
- [7] Шешин Е.П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. МФТИ. 2001. С. 287.