

*А. Н. Бродниченко, А. Н. Пономарев,
В. П. Пронин, И. А. Чистотин*

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ПРИ ОТБОРЕ АВТОЭМИССИОННОГО ТОКА

Проведено экспериментальное исследование силового взаимодействия между анодом и катодом в процессе отбора автоэмиссионного тока от катодов, сформированных на основе углеродных нанокластеров. Измерение силы линейно зависит от величины автоэмиссионного тока и значительно превосходит силы электростатического характера. Обнаруженный эффект объясняется в рамках модели, предполагающей формирование в катоде магнитных нанокластеров и эмиссии поляризованных электронов.

Углеродные нанотрубки — структуры, проявляющие широкий спектр неожиданных электрических и магнитных свойств. Одним из них является уникальная автоэмиссионная эффективность нанотрубок [1, 2], позволяющая получать плотности автоэмиссионного тока более 1 A/cm^2 при относительно низких напряженностях электрического поля $E \sim n \cdot kV/\text{мм}$, что дает возможность использо-

зователь их для создания приборов и устройств современной эмиссионной электроники.

Между тем механизмы автоэмиссии из нанотрубок остаются до конца не выясненными. Так, теория Фаулера—Нордгейма не обеспечивает удовлетворительного толкования экспериментальных результатов при высоких плотностях автоэмиссионных токов [3].

При изучении автоэмиссионных характеристик катодов, содержащих углеродные нанотрубки, нами впервые было обнаружено достаточно высокое силовое взаимодействие между катодом и анодом, значительно превосходящее электростатическое взаимодействие. Изучение обнаруженного эффекта явилось целью настоящей работы.

Техника и методика эксперимента

Исследование сил между анодом и катодом проводилось с помощью специально разработанного вакуумного динамометра. Схема экспериментальной установки (рис. 1) состоит из анодного и катодного узлов. Анод системы 1 был изготовлен в виде tantalовой шайбы диаметром $D=10$ мм, которая подвешивалась вертикально на пружине с коэффициентом упругости $k=5 \cdot 10^{-4}$ Н/мм. Верхний конец пружины укреплялся на сильфонном механизме, обеспечивающем вертикальную подвижку анода с точностью $\Delta h=0,01$ мм. Катодный узел 2 представлял собой tantalовый цилиндр диаметром $D=10$ мм, внутри которого размещалась спираль, обеспечивающая прогрев катода до $T \sim 1500$ К. В процессе измерения автоэмиссионного тока анод системы фиксировался с помощью ограничительного кольца 4 на определенном расстоянии d относительно катода. Для результатов, представленных в данной работе, $d=0,6$ мм. Сила, действующая на анод, определялась по растяжению пружины при отрыве анода от фиксированного положения. Погрешность измерения сил не превосходила 10%. Измерения проводились в сверхвысоковакуумной установке УСУ-4 при комнатной температуре в вакууме не хуже 10^{-6} Па после многочасовых обезгаживаний катода.

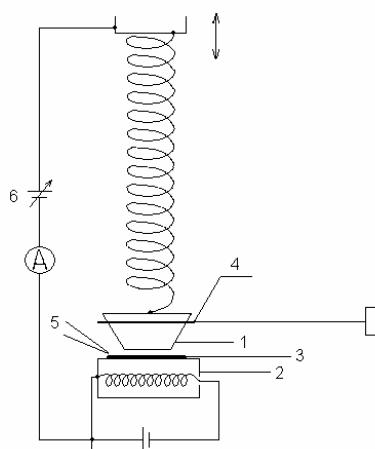


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 — анод, 2 — прогреваемый катодный узел,
- 3 — образец, содержащий нанотрубки, 4 — ограничительное кольцо,
- 5 — термопара, 6 — регулируемый источник высокого напряжения

На торцевой поверхности катода формировался эмитирующий слой из углеродных фуллероидных наномодификаторов (астралены и полидисперсные многослойные нанотрубки ТУ-2166-001-1380064-2003), получаемых методом дугового разряда в гелиевой атмосфере между графитовыми электродами [4]. Катодные депозиты, образующиеся при этом процессе, подвергались фракционированию с разделением центральной и внешней зон. Из этих фракций после механической диспергации и многостадийного регулируемого окисления выделяют устойчивые полиэдральные наночастицы неправильной формы сечением 150–800 Å, а также 15–30-слойные нанотрубки с внутренним диаметром 20–80 Å и длиной от 30–3000 нм. Электронно-микроскопическое изображение указанных углеродных кластеров представлено на рис. 2. При формировании катода углеродные кластеры с помощью аквадага закреплялись на tantalовой основе.

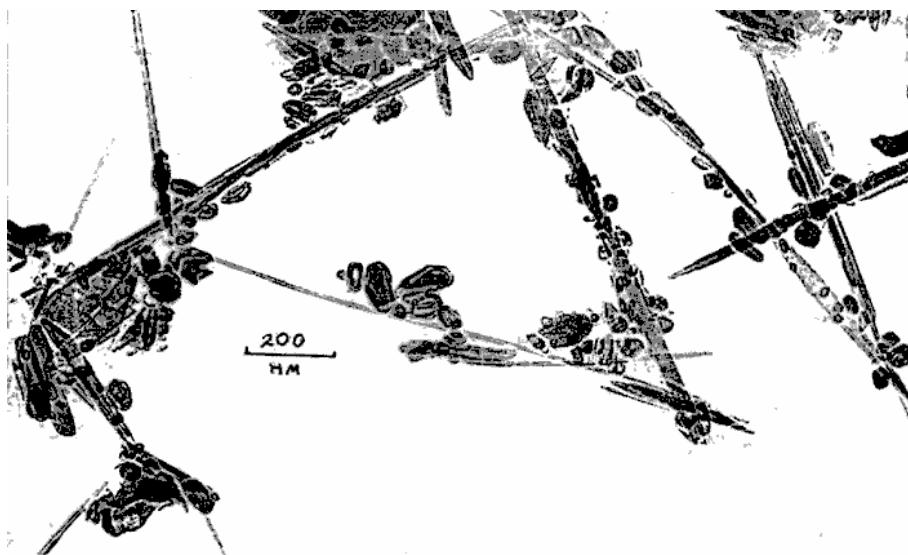


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение астраленов

Результаты измерения и их обсуждения

На рис. 3, *a* представлены характерные вольт-амперные зависимости автоэмиссии от сформированных катодов для различных циклов измерений, на рис. 3, *б* представлены зависимости автоэмиссии в координатах Фаулера—Нордгейма. Как видно, по мере увеличения номера цикла увеличивается напряжение, необходимое для получения определенных автоэмиссионных токов, что связано с деградацией катода — срывом нанотрубок с поверхности катода. При токах более 1,5 мА под действием электродинамических сил идет необратимое разрушение катода. Следует отметить, что динамика автоэмиссионного тока существенно отличается от классической динамики Фаулера—Нордгейма.

На рис. 4 представлены измеренные силы отрыва анода в зависимости от величины автоэмиссионного тока для циклов измерений, соответствующих кривым на рис. 3, *а*, а также значение электростатической силы, рассчитанной по формуле

$$F_{\mathcal{E}C} = \epsilon_0 \frac{E^2 s}{2}, \quad (1)$$

где E — напряженность поля в межэлектродном промежутке, s — площадь анода. Для малых E (малые значения автоэмиссионных токов) сила отрыва не отличается от электростатической, однако при больших E (I более 1 мА) наблюдается значительное отличие. При этом, как видно из рис. 4, силы отрыва линейно зависят от величины автоэмиссионного тока независимо от цикла измерений.

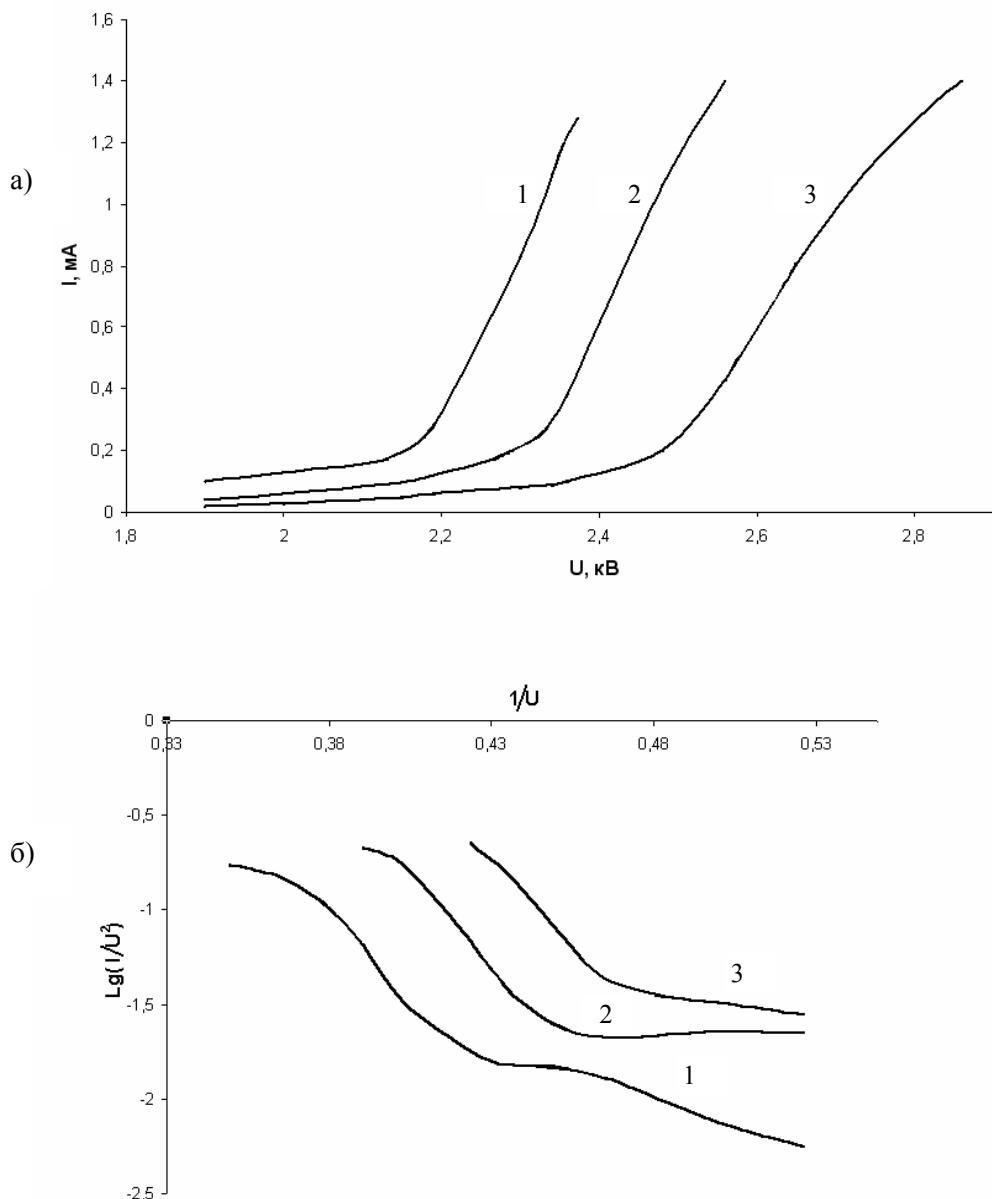


Рис. 3. Вольт-амперные зависимости автоэмиссионного тока:
а — в нормальных координатах;
б — в координатах Фаулера—Нордгейма для циклов измерений: 1 — 1, 2 — 10, 3 — 30

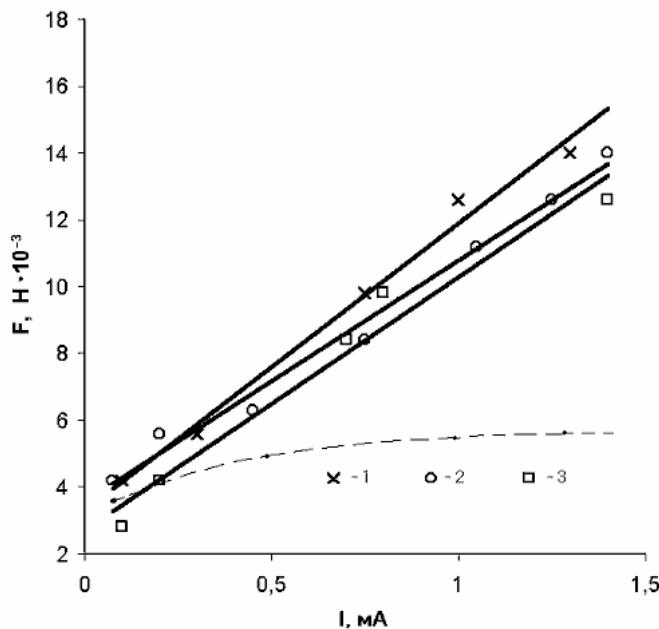


Рис. 4. Зависимости силы отрыва анода от величины автоэмиссионного тока

для цикла измерений: 1 — 1, 2 — 10, 3 — 30.

Пунктиром показана динамика электростатической силы,
соответствующей первому циклу измерений

Нам не удалось обнаружить в литературе сведений об эффектах, аналогичных данному. Для выявления причин эффекта были проведены измерения сил отрыва в аналогичных условиях при замене катода из углеродных нанокластеров на плоский оксидный катод диаметром $D=5$ мм. Была установлена температура катода, при которой термоэмиссионный ток составил $I_{\text{эм}}=10$ мА (напряжение насыщения при этом — 26 В). Сила отрыва анода была практически равна нулю. Увеличение напряжения в анод-катодном промежутке до 3 кВ приводило к появлению шотковской составляющей эмиссионного тока $I_m=5$ мА, однако сила отрыва в этом случае не превышала электростатическую составляющую.

Таким образом, с нашей точки зрения, природа обнаруженного эффекта связана с особенностями углеродных нанокластеров — углеродных нанотрубок. Для объяснения эффекта мы предлагаем модель, основанную на двух предположениях.

1. В нанотрубках, находящихся в сильном электрическом поле, формируется направленное движение спин-поляризованных электронов, приводящее к появлению в анод-катодном промежутке магнитного поля.

2. Спин-поляризованный автоэмиссионный поток электронов, попадая в немагнитный анод, формирует в нем приповерхностный магнитный кластер, определяющий электромагнитный характер взаимодействия анода с катодом.

Магнитная сила F может быть оценена по изменению энергии магнитного поля ΔW в диодном промежутке при перемещении анода Δx :

$$F = -\frac{\Delta W}{\Delta x} . \quad (2)$$

Поскольку плотность энергии магнитного поля

$$\rho_m = \frac{B^2}{2\mu_0} , \quad (3)$$

то

$$F = \frac{\rho_m \Delta V}{\Delta x} = \frac{B^2 S}{2\mu_0} , \quad (4)$$

где V — объем анод-катодного промежутка, а S -площадь анода. Из равенства (3) для силы $F=1,4 \cdot 10^{-3} H$ ($I=1,4$ мА) магнитная индукция в зазоре должна быть не менее $B=2,2 \cdot 10^{-2}$ Тл.

Представим нанотрубку в виде соленоида и оценим индукцию, которую может создать электрон, двигаясь по спирали от основания трубы закрепленного на катоде, к ее вершине:

$$B = \frac{\mu_0 I N}{l} , \quad (5)$$

где I — ток, N — число витков, L — длина трубы. Для $I=1,4$ мА, $L=1$ мкм, $N=10^3$ получим $B=1,7$ Тл.

Таким образом, можно предположить, что самосогласованное движение электронов и их спиновая поляризация превращает нанотрубку в магнитный домен, который и создает магнитное поле в зазоре.

Остается неясным, почему появляется и растет усилие, удерживающее анод с ростом тока. Для выяснения механизма последнего явления рассмотрим взаимодействие монокинетического потока спин-поляризованных электронов с анодом. Пробег киловольтовых электронов в твердых телах аппроксимируется формулой $l_p = kE_p^n$, где l_p измеряется в граммах на квадратный сантиметр, E_p — энергия электронов в килоэлектрон-вольтах, $n=1,3-1,5$, а $k=(1-1,8) \cdot 10^{-5}$ [5]. Для tantalа при $E_p=2,5$ кэВ пробег составляет ~ 200 атомных слоев. Для больших глубин поток электронов становится практически диффузным. При движении потока спин-поляризованных электронов в аноде формируется поверхностный магнитный домен, обеспечивающий силовое взаимодействие анода и катода.

Если учесть, что с уменьшением расстояния между анодом и катодом (т. е. увеличением напряженности электрического поля) сила отрыва анода остается пропорциональной автоэмиссионному току, можно предположить, что существенный вклад в поверхностный магнитный домен могут вносить плазмоны — как объемные так и поверхностные. Плазменные колебания будут поляризованными, так как возбуждены спин-поляризованным пучком электронов. Следовательно, поверхностный магнитный домен в tantalе образуется как поляризацией электронов вещества монокинетическим потоком электронов, двигающихся в веществе, так и возбуждением плазменных колебаний.

Таким образом, в рамках принятой модели установлена магнитная поляризация углеродной нанотрубки в режиме отбора автоэмиссионного тока и спиновая поляризация автоэмиссионных потоков электронов из нанотрубок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

Для прямого подтверждения предлагаемой модели предполагается исследование поляризации автоэмиссионного потока электронов с помощью детектора Мотта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Bonard J.-M., Kind H., Stockli T., Nilson, L. O. Field emission from carbon nanotubes: the first five years. Solid State Electronics. 2001. V. 45. P. 893–914.
2. Collins P. G., Zettl A. Unique characteristics of cold cathode carbonnanotubes-matrix field emitters // Phys. Rev. B. 1997. 55. P. 9391–9399.
3. Musatov A. L., Krestinin A. V., Kiselev N. A. ets. Field Electron Emission from Single-Walled Carbon Nanotube Layers. Fullerenes, nanotubes, and carbonnanostructures. V. 12. 2004. № 1, 2.
4. Ponomarev A. N., Barchenko V. T., Udovich M. E., Nikitin V. A., Belousov V. P. ets. Production of multywall carbon nanotubes-MWNT and astralenes – ASTR materials from carbon rods. Proceedings of 4-th Beinnal IWFAC. St. Petersburg, 1999. P. 116.
5. Бронштейн И. М., Бродниченко А. Н. Пробеги электронов с энергиями 0,5–4,0 кэВ в Mg, MgO, BeO, Al₂O₃ // ФТТ. 1969. Т. 11. С. 187.

*A. Brozdnichenko, A. Ponomariov,
V. Pronin, I. Chistotin*

MAGNETIC PROPERTIES OF NANOTUBES IN THE PROCESS OF AUTO EMISSION CURRENT REMOVAL

An experimental research of forces interaction between anode and cathode was made in the process of auto emission current removal from cathodes formed on the basis of carbon nanoclusters. The data show that the force is in linear dependence on the value of auto emission current and exceeds electrostatic forces. The effect found could be explained by a model assuming the magnetic nanoclusters formed in the cathode and polarized electrons emission.