

## О МЕХАНИЗМАХ НИЗКОПОЛЕВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

*А.А.Дадькин*

*Институт физики НАНУ*

*252022 Киев, Украина*

Поступила в редакцию 11 марта 1997 г.

После переработки 5 мая 1997 г.

Прямыми опытами установлено, что основная компонента тока стационарной полевой эмиссии при  $E < 10^5$  В/см является следствием пьезогеометрического усиления ( $> 10^3$  раз) электрического поля у торцов пьезоэлектрически активных пленок. Предлагается механизм эмиссии, определяемый туннельной поставкой электронов из валентной зоны пьезоэлектрика.

PACS: 41.20.Cv

1. При исследовании автоэмиссии из металлов и полупроводников обнаруживают стационарную холодную электронную эмиссию, заметную при средних электрических полях  $\sim 10^5$  В/см, на 2–3 порядка меньших, чем следует из теории. В литературе [1, 2] это явление известно как низкополевая электронная эмиссия (НПЭЭ). НПЭЭ отличается высокой стабильностью в относительно низком вакууме ( $p > 10^{-5}$  торр) и большой ( $> 10$  А/см<sup>2</sup>) плотностью тока, что делает заманчивым создание работающих на ее основе эффективных источников электронов нового поколения для различных электровакуумных устройств, в том числе для ярких плоских катодолюминесцентных экранов. Однако практическому использованию явления мешает отсутствие четких представлений о его природе и механизме. Так, появление НПЭЭ не удается объяснить простым геометрическим усилением электрического поля и снижением работы выхода, поскольку эмиссионные центры зачастую возникают и на гладкой боковой поверхности острий, и вне участков с пониженной, например локальной имплантацией натрия в полированные пластины, работой выхода. В [3, 4] НПЭЭ связывают, привлекая данные фотоэмиссионных исследований грани (III) алмаза [5] и предполагая различные механизмы поставки электронов [3], с наличием на эмиттирующей поверхности участков с естественным отрицательным электронным средством (ОЭС). Вместе с тем, по данным [6], для заметной НПЭЭ естественное ОЭС на поверхности эмиттера вовсе не обязательно: эффективная, и даже более стабильная, чем в случае алмаза, НПЭЭ получается из пленок диэлектриков типа ZnS с явно положительным электронным средством, и, таким образом, вопрос о ее механизме остается открытым. В [6] выявлено два, существенно различающихся инерционностью, плотностью тока и вольт-амперными характеристиками, вида эмиссии и обсуждается механизм инерционной ( $\tau > 10^{-3}$  с) НПЭЭ. Этот механизм определяется инжекцией электронов из металлической подложки путем их туннелирования через узкий, при наличии в пленке встроенного положительного заряда, потенциальный барьер. Предполагается, что на поверхности эмиттера, при проникновении в него внешнего поля, реализуются условия эффективного ОЭС.

В данной работе обнаружена связь стационарной безинерционной ( $\tau < 10^{-7}$  с) НПЭЭ с пьезоэффектом в образцах специальной формы и предлагается механизм эмиссии, определяемый эффектом Зенера. Нестационарную

[7] и экзoeлектронную [8] эмиссии из ферроэлектриков также связывают с пьезополяризацией.

2. Опыты проводились с использованием автоэлектронных проекторов и плоских диодных ячеек с различными ( $\sim 20 \text{ мк} \leq l \leq 1 \text{ см}$ ) расстояниями катод – анод. Для визуализации эмиссии анод покрывался люминофором типа ZnS. Пространственное распределение эмиссии и изменение в ходе опытов геометрического рельефа обоих электродов ячейки исследовались с помощью оптического и растрового электронного микроскопов. Вольт-амперные и шумовые характеристики эмиссии с отдельного ( $\sim 100 \text{ \AA}$ ) участка катода, а также ее инерционность изучались с применением корреляционной методики [9], позволяющей проводить измерения в режиме счета отдельных электронов. Средние электрические поля у поверхности эмиттеров оценивались из геометрии испытательных диодов. Изготовлены и испытаны эмиттеры в виде кремниевых и вольфрамовых острий, а также в виде пластин и пленок из кварца и других диэлектриков (типа ZnS).

3. Установлено, что НПЭЭ возникает в местах пленочных диэлектрических образований на катоде, имеющих довольно большое ( $\sim 100$ ) отношение продольных размеров  $l_2$  к толщине  $l_1$ . Эти образования являются остатками трудноудаляемых термическим нагревом окислов, образующихся при изготовлении образцов, либо пленками из продуктов распыления люминофора с анода-экрана.

Инерционная НПЭЭ с плотностью тока  $\sim 10^{-3} \text{ А/см}^2$  равномерно распределена по всей поверхности пленочного образования. Ее вольт-амперные характеристики [6] схожи с характеристиками диэлектрического диода, работающего в режиме токов, ограниченных пространственным зарядом ионизированных донорных ловушек. Время установления этого заряда и определяет инерционность эмиссии. Очевидно, этот вид эмиссии должен преобладать в случае образцов с большой плотностью дефектов, что и подтверждается контрольными опытами с пленками, приготовленными в различных технологических условиях.

Основной вклад в НПЭЭ вносит безинерционная компонента, которая с плотностью тока  $> 10 \text{ А/см}^2$  сосредоточена у торцов пленки в местах разрывов пленочных образований. Типичная характеристика Фаулера–Нордгейма (FN-характеристика) этого вида эмиссии, имеющая два различного наклона прямолинейных участка, отражает качественно другой ее механизм, отличный от механизма инерционной НПЭЭ.

Если наличие инерционной эмиссии связано с дефектностью материала эмиттера, то с каким его свойством связано появление безинерционной? Опыты показали, что во всех без исключений случаях безинерционная НПЭЭ возникает из торцов эмиттеров, материал которых обладает заметной пьезоэлектрической активностью, и можно предложить, что ее появление связано именно с этим его свойством.

4. Для проверки этого предположения наиболее подходящим объектом является кварц, пьезоэлектрические свойства которого хорошо изучены [10]. В данной работе в качестве моделей "центров НПЭЭ" использованы монокристаллические кварцевые косых У-срезов пьезорезонаторы промышленного производства в виде дисков диаметром  $l_2 \sim 12.5 \text{ мм}$  и толщиной  $l_1 \sim 0.1 \text{ мм}$ , так что  $l_2/l_1 \sim 100$ , как и у тонкопленочных НПЭЭ образований.

Электроды для подключения поляризующего напряжения  $\pm V_1$  термовакuumным напылением металлов наносились на боковые поверхности диска, который располагался внутри цилиндрического анода-экрана, находящегося под потен-

циалом  $+V_a$ . В отсутствие поляризующего напряжения эмиссии не обнаружено даже при средних электрических полях у поверхности эмиттеров, превышающих  $10^5$  В/см.

Мощная ( $j > 10$  А/см<sup>2</sup>) стационарная эмиссия с торца диска зарегистрирована уже при поляризующем поле  $E_1 = V_1/l_1 < 10^5$  В/см. Внешний вид эмиттера и распределение эмиссии по его поверхности представлены на рис.1а, а на рис.1б - типичная FN-характеристика эмиссии.

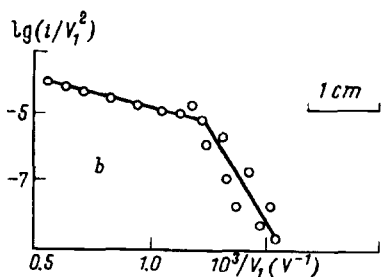
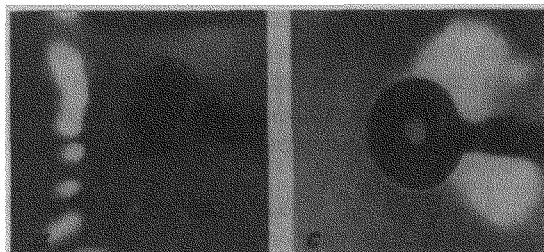


Рис.1. а) Распределение электронной эмиссии с кварцевого пьезорезонатора;  $V_1 = 4$  кВ,  $V_a = 4$  кВ. б) Типичная FN характеристика безинерционной НПЭЭ (диск с отверстием). в) Распределение эмиссии в случае диска с отверстием;  $V_1 = 1$  кВ,  $V_a = 4$  кВ

С переменной полярности  $V_1$  эмиссионное изображение образца переворачивается в соответствие с ориентацией пьезоэлектрически активных X-осей кварца, а с изменением его величины плавно поворачивается в плоскости диска, что, вероятно, обусловлено сдвиговой пьезополяризацией.

С увеличением  $l_2/l_1$  путем утоньшения диска в два раза эмиссионные напряжения уменьшаются в два раза.

В диске с отверстием (рис.1с) эмиссия сосредотачивается у внутреннего торца при  $E_1 \sim 10^4$  В/см, в соответствие с уменьшением площади эмиттирующей поверхности.

Результаты подтверждаются и в случаях тонкопленочных пьезоактивных текстур ZnO, ZnS, ZnSe, CdS, CdSe, AlN, SiO<sub>2</sub>, осажденных на массивных подложках. Текстуры изготовлены в виде матриц из пьезоэлементов ( $l_2 \sim 100$  мк,  $l_1 \sim 0.1$  мк), имитирующих описанные в разд.3 диэлектрические образования. Толщина пленки  $l_1$  задавалась достаточно большой для проявления в ней пьезоэлектрических свойств и реализации на ее поверхности условий эффективного ОЭС. НПЭЭ возникает из торцов пьезоэлементов при поляризующих полях  $E_1 < 10^5$  В/см. Эти поля оценивались, в экспериментально обоснованном предположении о малой плотности поверхности электронных состояний пленки, из геометрии диодной ячейки как  $E_1 = V_a/l \cdot \epsilon$ , где  $V_a$  - напряжение, приложенное к диоду,  $l$  - величина вакуумного зазора катод - анод и  $\epsilon$  -

диэлектрическая постоянная материала пленки. Следует отметить, что в матрицах из элементов с различными размерами  $l_2$  эмиссия возникает из торцов элементов с наибольшим отношением  $l_2/l_1$ .

В случае пленок из непьезоактивной  $Al_2O_3$  эмиссии не обнаружено и при  $E_1 > 10^6$  В/см.

Из приведенных результатов следует, что НПЭЭ возникает в результате пьезополяризации, а не в результате простого геометрического усиления электрического поля.

5. Расчеты эмиссионных характеристики пьезоэлементов при больших плотностях тока должны проводиться на основе совместного решения уравнений электродинамики и теории упругости, что является крайне сложной задачей, особенно в случае тонких пленок на массивных подложках. Однако в опытах установлено удивительно хорошее согласие экспериментальных эмиссионных характеристик с характеристиками, прогнозируемыми в приближении "нулевого тока", что позволило сделать простейшие оценки электрических полей у торцов эмиттеров.

Пьезоэлемент размерами  $l_2$  и  $l_1$  в электрическом поле  $E_1$ , параллельном электрической оси, деформируется так, что

$$\Delta l_2 / \Delta l_1 = \sigma \cdot l_2 / l_1, \quad (1)$$

где  $\Delta l_1$  и  $\Delta l_2$  – абсолютные деформации,  $\sigma$  – коэффициент Пуассона. При этом боковые поверхности и торцы пьезоэлемента оказываются под разными потенциалами, которые пропорциональны абсолютным деформациям. Наличие разности потенциалов между торцевыми и боковыми поверхностями приводит к появлению в приторцевой области контактных электрических полей, величину которых можно оценить так, как это делается в теории пятен Ленгмюра:

$$E \sim (V_2 - V_1) / l_1, \quad (2)$$

где  $V_2$  – потенциал торцевой поверхности,  $V_1$  – потенциал боковой поверхности. При  $l_2 \gg l_1$  с учетом коэффициента электромеханической связи  $k$ , зависящего от свойств материала и конструкции пьезоэлемента [11], возникающее поле может достигать значений

$$E = 4\pi\sigma k^2 \frac{l_2}{l_1} E_1 = \Pi E_1. \quad (3)$$

Обычно  $\sigma \sim 0.5$ ,  $k \sim 0.1 - 0.8$  и  $l_2/l_1 \sim 10 - 10^3$ , так что коэффициент  $\Pi$  при поляризующем поле  $E_1$  (его можно назвать фактором пьезогеометрического усиления электрического поля) может достигать значений  $10^3$  и выше, если учитывать геометрию эмиттера. Это означает, что при поляризующих полях порядка  $10^5$  В/см электрическое поле у торца пьезоэлемента может превышать  $10^7$  В/см.

При внешних электрических полях  $E > 10^7$  В/см в случае малой ( $< 10$ ) диэлектрической проницаемости материала эмиттера и невысокой ( $< 10^{11}$  см $^{-2}$ ) плотности поверхностных электронных состояний в приповерхностной области протяженностью  $\delta$  (рис.2а) электрическое поле достигает значений, достаточных для внутреннего электрического пробоя (эффект Зенера) диэлектрика. Такой пробой при реализации на поверхности с проникновением внешнего поля в эмиттер условий эффективного ОЭС и будет определять механизм НПЭЭ. Следует подчеркнуть, что такой механизм стационарной безинерционной полевой эмиссии возможен лишь в случае пьезоэлектриков с достаточно малой  $\epsilon$ . Энергетическая схема полевого эмиттера, соответствующая такому

механизму поставки электронов, представлена на рис.2а (для сравнения на рис.2б показана энергетическая схема инерционной НПЭЭ). В приведенной схеме безинерционность эмиссии и ее стабильность в низком вакууме представляются очевидными, так как "источник электронов" – валентная зона – оказывается скрытым от внешней среды.

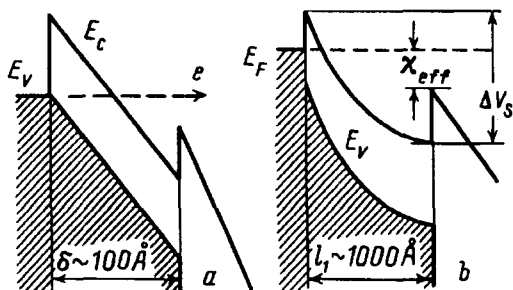


Рис.2. Энергетические схемы при  $\chi_{eff} = \chi - e\Delta V_s < 0$ : а) безинерционной пьезоэлектронной эмиссии при  $E > 10^7$  В/см; б) инерционной НПЭЭ при  $E < 10^5$  В/см;  $\Delta V_s$  – изменение поверхностного потенциала с проникновением электрического поля в образец,  $\chi$  – электронное сродство материала эмиттера,  $\delta = \Delta V_s / E\epsilon$  – область внутреннего пробоя пьезоэлектрика

Таким образом, стационарная НПЭЭ может быть представлена как результат наложения двух компонент тока с принципиально различающимися механизмами поставки электронов. В одном случае, при высокой концентрации донорных ловушек в пленке, источником электронов служит металлическая подложка, а в другом – валентная зона пьезоэлектрика. Этот второй, рассмотренный в данном сообщении, случай может быть реализован при использовании достаточно совершенных для развития эффекта Зенера материалов, обладающих заметной пьезоэлектрической активностью. В связи с этим, наиболее подходящим названием рассмотренного вида эмиссии может быть "пьезополевая электронная эмиссия".

Искренне признателен П.Г.Борзяку, обратившему мое внимание на проблему создания НПЭЭ эмиттеров; В.Ф.Косоротову, А.Г.Наумовцу, О.Г.Сарбею и Б.В.Стеценко, сделавшим ряд важных замечаний и конструктивных предложений при обсуждении результатов опыта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного комитета по науке и технологиям Украины (проекты 2.3/242 и 06.01.00/234Р-95).

1. В.Ф.Бибик, П.Г.Борзяк, А.Ф.Яценко, Укр. физ. ж. **13**, 868 (1968).
2. K.H.Bayliss and R.V.Latham. Proc. R. Soc. London, Ser. A **403**, 285 (1986).
3. N.S.Xu, Y.Tsong, and R.V.Latham, J. Phys. D. Appl. Phys. **26**, 1776 (1993).
4. D.Hong and M.Aslam, Le Vide, les Couches Minces, Suppl. an N 271, 92 (1994).
5. F.I.Himpfel, I.A.Knopf et al., Phys. Rev. B **20**, 624 (1979).
6. A.A.Dadykin, A.G.Naumovets, V.D.Andreev et al., Diamond and Rel. Mater. **5**, 771 (1996).
7. O.Auciello, M.A.Ray, D.Palmer et al., Appl. Phys. Lett. **66**, 2183 (1995).
8. Г.И.Розенман, В.И.Печорский, Письма в ЖТФ **6**, 1531 (1980).
9. A.A.Dadykin and A.G.Naumovets, Act Phys. Pol. A **81**, 131 (1992).
10. А.В.Шубников, Избранные труды по кристаллографии, М.: Наука, 1975.
11. У.Мэзон, Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультразвуке, М.: ИИЛ, 1952.