

### РАЗРАБОТКА В СПБГПУ ПОЛЕВЫХ ЭМИТТЕРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ, РАБОТАЮЩИХ В ТЕХНИЧЕСКОМ ВАКУУМЕ\*

*Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, И.А. Светлов, Т.А. Тумарева, Е.П. Тарадаев*

Описаны разработанные в СПбГПУ способы повышения долговечности полевых эмиттеров при работе их в техническом вакууме. Рассмотрены две возможности обеспечения долговечной работы эмиттеров: при использовании специальных защитных фуллереновых покрытий, а также при построении эмиттеров нового типа, в которых для получения автоэмиссии используются поля пятен на контакте материалов с разной работой выхода.

*Ключевые слова:* Полевые эмиттеры, защитные фуллереновые покрытия, острийные катоды, композитные катоды, слоистые катоды из материалов с разной работой выхода, исследования в широком интервале давлений, эксперимент, расчет.

#### Введение

Использование полевых эмиттеров привлекательно при построении широкого класса электронных устройств. Однако эмиттеры такого сорта до сих пор с успехом применяются лишь в условиях, когда можно свести к минимуму вредное влияние на их работу ионной бомбардировки [1]. В статье описаны разрабатываемые в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (СПбГПУ) способы повышения долговечности полевых эмиттеров при работе их в техническом вакууме [1–4]. Рассмотрены две возможности обеспечения долговечной работы эмиттеров: с помощью специальных защитных фуллереновых покрытий, а также при построении эмиттеров нового типа, в которых для получения автоэмиссии используются поля пятен на контакте материалов с разной работой выхода. В разделе 1 описаны результаты исследования эмиттеров с фуллереновыми покрытиями. Раздел 2 посвящен изучению слоистых эмиттеров, изготовленных из материалов с разной работой выхода.

\*Статья написана по материалам доклада на XV Зимней школе по электронике сверхвысоких частот и радиофизике, Саратов, Россия, 6-11 февраля 2012.

## 1. Эмиттеры с фуллереновыми покрытиями

### 1.1. Методика исследования эмиттеров с фуллереновыми покрытиями.

Исследовались острийные катоды из вольфрама, а также острийные вольфрамовые катоды со слоем карбида вольфрама на поверхности. Радиус вершины катодов варьировался в пределах 0.3...0.7 мкм.

Исследования проводились с использованием вакуумной установки с полевым эмиссионным микроскопом-проектором [1]. Для контроля процессов на поверхности эмиттера регистрировались его эмиссионные изображения на экране проектора. Установка оснащена системой напыления фуллереновых покрытий, а также источником ионов калия  $K^+$ , который использовался для активирования покрытий. Источник обеспечивал потоки ионов на катод до  $10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>. Энергии ионов  $W_i$  варьировались в пределах 40...5000 эВ.

Вакуумная установка подвергалась непрерывной откачке. Использование системы напуска газов позволяло исследовать работу катодов в широком интервале давлений остаточного газа приблизительно от  $10^{-9}$  до  $10^{-6}$  Торр, а также при напуске в вакуумную систему азота.

Фуллереновые покрытия обладают большой работой выхода (около 5 эВ). Для получения интенсивной полевой эмиссии при умеренных рабочих напряжениях на поверхности покрытий в результате их полевой и температурной обработки формировались распределенные структуры усиливающих электрическое поле выступов. Типичные структуры показаны на рис. 1.

Дополнительное снижение рабочих напряжений достигалось в результате активирования фуллереновых покрытий потоком ионов калия [2]. Обработка покрытия медленными ионами калия с энергиями порядка 40...100 эВ приводит к снижению его работы выхода из-за образования в покрытии металлофуллеренов типа эндоэдралов ( $C_{60}@K$ ) и/или экзоэдралов ( $K@C_{60}$ ).

**1.2. Работа эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями в высоком вакууме (порядка  $10^{-9}$  Торр).** Если эмиттер не подвергнут специальной тренировке, ток полевой эмиссии с него меняется во времени. При малых токах, даже в сверхвысоком вакууме, изменение тока очевидно связано с оседанием газов и с воздействием ионной бомбардировки. Для предварительно очищенного

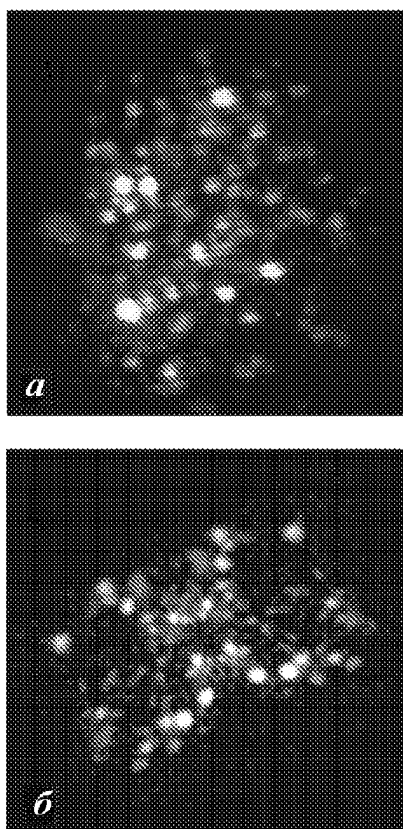


Рис. 1. Распределенные структуры выступов на эмиттерах с фуллереновыми покрытиями: *a* – на вольфрамовом острие, *б* – на острие со слоем карбида вольфрама на поверхности

эмиттера при малом начальном токе  $I_0 = 0.05$  мкА падение тока (рис. 2, *a*) связано с адсорбцией остаточного газа. Меньшее изменение тока при начальном токе  $I_0 = 0.1$  мкА (рис. 2, *б*) обусловлено десорбцией газа под действием ионной бомбардировки, интенсивность которой увеличивается с ростом величины  $I_0$ . При еще большем начальном токе  $I_0 = 0.5$  мкА процессы адсорбции и десорбции газов, видимо, уравниваются друг друга, и увеличение тока (рис. 2, *в*) связано, в основном, с перестройкой покрытия под действием неоднородных электрических полей.

Перестройку покрытия при отборе токов  $0.5 \leq I \leq 3.1$  мкА иллюстрирует рис. 3. Показаны эмиссионные изображения катода на разных участках характеристики  $I(t)$  (см. рис. 2, *в*). При отборе тока формируются центры повышенной эмиссии. Рост тока с выделенных центров эмиссии связан с увеличением высоты этих центров в результате «втягивания» на их вершину под действием неоднородных полей расположенных поблизости и слабо связанных с поверхностью поляризованных молекул фуллерена и/или металлофуллеренов.

Тренировка при токах порядка 5...40 мкА (рис. 4, *a*) стабилизирует работу катодов при последующем отборе с их поверхности токов ориентировочно до 10 мкА (рис. 4, *б*). Способствует стабилизации работы катодов также прогрев сформированных покрытий в отсутствие электрического поля при температуре порядка 900 К.

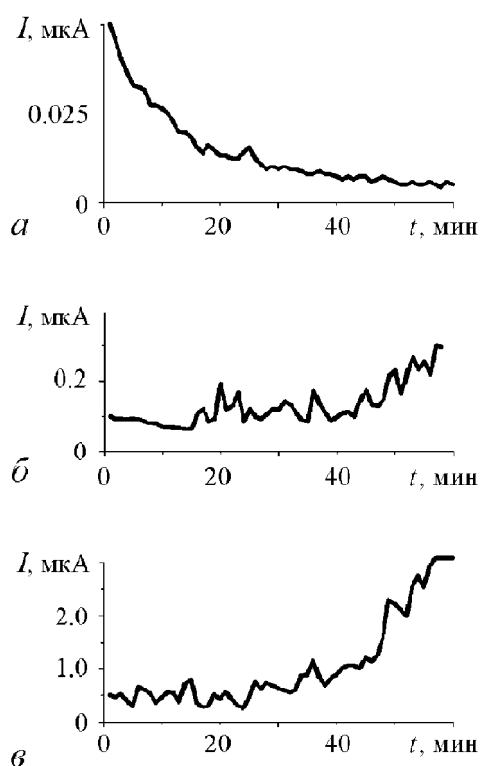


Рис. 2. Изменения тока эмиссии при разных начальных его значениях и постоянном напряжении,  $I_0$ (мкА) = 0.05 (*a*); 0.1 (*б*); 0.5 (*в*)

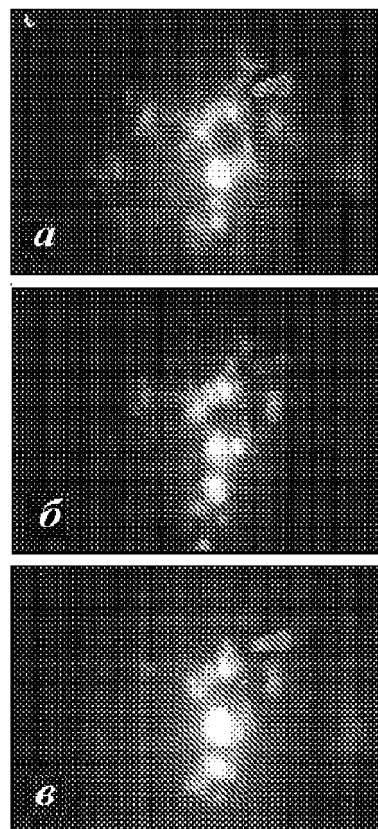


Рис. 3. Эмиссионные изображения катода, зафиксированные при разных значениях тока эмиссии  $I$ (мкА) = 0.5 (*a*); 0.9 (*б*); 3.1 (*в*) в процессе измерения характеристики рис. 2, *в*

В процессе измерения характеристики  $I(t)$  (рис. 4, *a*) неоднородности эмиссии увеличиваются, так как на вершину выделенных центров эмиссии вытягивается все большее количество поляризованных молекул. На рис. 5, *a, б* показаны эмиссионные изображения, полученные при разных токах в процессе измерения характеристики рис. 4, *a*. Прогрев катода после измерения характеристики  $I(t)$  (см. рис. 4, *a*) ведет к «освобождению» покрытия (в том числе и окрестностей сформировавшегося при отборе больших токов выделенного эмиссионного центра) от слабо связанных с поверхностью частиц (рис. 5, *в*). Молекулы металлофуллеренов имеют больший дипольный момент, чем молекулы  $C_{60}$  [6], быстрее вытягиваются в этот центр и сильнее связаны с ним. Можно предположить поэтому, что тренировка эмиттера в сильных полях и его прогрев ведут к удалению с поверхности более слабо связанных с поверхностью молекул  $C_{60}$  и атомов калия, появившихся в покрытии при его активировании потоком ионов. Освобождение окрестностей сформировавшегося центра повышенной эмиссии от этих частиц препятствует дальнейшему его росту при умеренных токах до 10 мкА.

При начальных токах более 15...20 мкА тренировка и прогрев катода не позволяют исключить самопроизвольного нарастания эмиссии при постоянном напряжении. Когда ток с катода с активированным фуллереновым покрытием приближается к предельному значению  $\sim 50$  мкА, происходит разрушение покрытия или эмиттера. При токах, близких к предельному, количество выделенных эмиссионных центров на поверхности катода уменьшается до 1...3. Одновременно увеличиваются плотность тока с этих выступов и поле у их поверхности, что, видимо, и ведет к разрушению эмиттера под действием пондеромоторных сил и/или из-за перегрева.

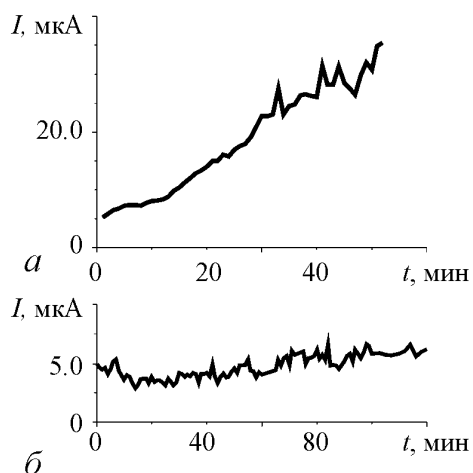


Рис. 4. *a* – тренировка катода в процессе спонтанного нарастания тока эмиссии от начального значения  $I_0 = 5$  мкА; *б* – иллюстрация стабильной работы катода при  $I_0 = 5$  мкА после окончания тренировки в процессе измерения характеристики рис. 4, *a*

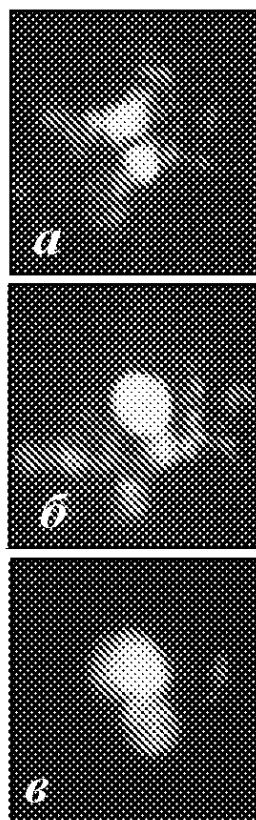


Рис. 5. Эмиссионные изображения, полученные в процессе измерения характеристики рис. 4, *a* при токах 15 мкА (*a*) и 35 мкА (*б*). Изображение (*в*) получено при отборе тока 15 мкА после завершения тренировки и последующего прогрева катода

**1.3. Работа эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями в техническом вакууме.** Естественно было бы ожидать, что предельные токи с эмиттера с фуллереновым покрытием могут быть увеличены, если удастся воспроизвести распределенную эмиссионную структуру на поверхности покрытия и обеспечить ее существование при больших токах. Длительная (порядка 2 часов) обработка покрытия потоком ионов калия с энергией  $W_i = 1500...5000$  эВ и с плотностью тока  $5 \cdot 10^{-7}$  А/см<sup>2</sup> позволяет разрушить сформировавшиеся при отборе больших токов выделенные эмиссионные центры и повысить однородность структуры выступов на поверхности покрытия. Однако после прекращения ионной обработки в процессе работы при токах, близких к предельному, структура выступов вновь становится существенно неоднородной.

Была исследована возможность функционирования эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями в техническом вакууме, в условиях, когда обеспечивается непрерывная интенсивная его бомбардировка ионами остаточного газа. Покрытия создавались стандартным образом при давлении порядка  $10^9$  Торр, а затем исследовалась работа катодов с такими покрытиями при повышенном давлении остаточного газа или азота в экспериментальном приборе.

На рис. 6, *a* приведено изображение эмиттера сразу после его активирования потоком ионов калия. Затем давление остаточного газа повышалось до  $5 \cdot 10^{-7}$  Торр и проводилась тренировка эмиттера с отбором токов до 10 мкА. Как и ожидалось, в условиях интенсивной ионной бомбардировки практически не возникали выделенные центры эмиссии и эмиссия была достаточно однородна (рис. 6, *б-г*) при отбираемых токах свыше 130 мкА.

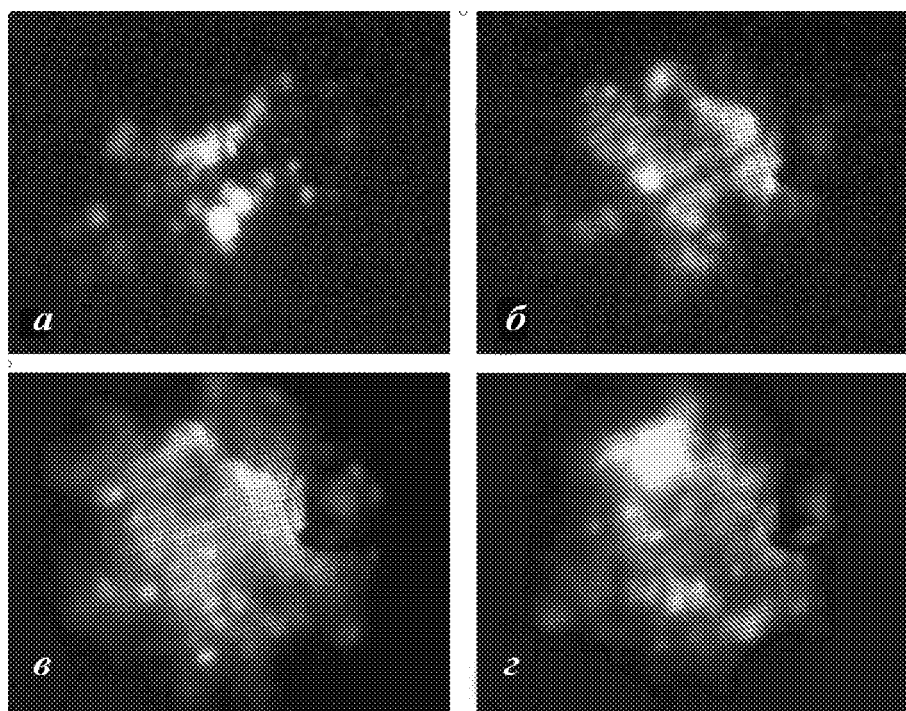


Рис. 6. Эмиссионные изображения катода: *a, б* – измерения при давлении  $\sim 10^{-9}$  Торр и  $I = 0.01$  мкА (*a* – сразу после активировки; *б* – после тренировки при повышенном давлении  $5 \cdot 10^{-7}$  Торр); *в* и *г* – измерения при  $5 \cdot 10^{-7}$  Торр ( $I = 65$  мкА (*в*), 130 мкА (*г*))

Таким образом, проведенные исследования показали, что эмиттеры с активированными фуллереновыми покрытиями в условиях технического вакуума обеспечивают отбор токов полевой эмиссии, существенно превышающих по величине предельно достижимые токи с их поверхности в условиях высокого вакуума.

Во время работы эмиттера при повышенном давлении на поверхности покрытия существовало большое число (порядка 100) приблизительно одинаковых по размерам эмиссионных центров. Отдельные центры появлялись и исчезали, однако их общее количество оставалось во время работы катода практически неизменным. Автоэмиссионная картина имела «мерцающий» характер.

Как нам представляется, с учетом свойств молекул фуллерена и металлофуллеренов можно предложить следующее объяснение причин устойчивой работы созданных катодов с активированными фуллереновыми покрытиями в условиях интенсивной ионной бомбардировки.

Известно, что молекулы фуллерена и металлофуллерены характеризуются достаточно прочными связями атомов углерода в них (см., [7–9]). Например, энергия связи атомов углерода в молекуле  $C_{60}$  равна 6.99 эВ. С другой стороны, связи этих молекул между собой и с твердотельной подложкой значительно слабее [9,10]. Например, энергия связи термически нанесенной фуллереновой пленки с графитовой подложкой всего 1.69 эВ. По этой причине под действием ионной бомбардировки в исследованных фуллереновых покрытиях скорее разрушаются связи между молекулами фуллеренов (металлофуллеренов), нежели связи между атомами в молекулах. Как следует из полученных данных, ионная бомбардировка практически не приводит к разложению фуллереновых молекул и образованию аморфного углерода на поверхности. Об этом говорят как эксперименты, связанные с обработкой фуллереновых покрытий потоками ионов калия, так и эксперименты при повышенном давлении остаточного газа. Быстрые ионы, падающие на катод, видимо, выделяют большую часть своей энергии в подложке, хотя и разрушают по пути к подложке часть существующих на фуллереновом покрытии эмиссионных центров. Однако «освободившиеся» из разрушенных выступов поляризованные молекулы фуллеренов или металлофуллеренов, перемещаясь под действием неоднородных электрических полей, захватываются соседними центрами (выступами) или создают новые центры повышенной эмиссии. Вероятно, именно эти процессы являются причиной «мерцающего» характера автоэмиссионных изображений катода с фуллереновым покрытием. Такой процесс воспроизведения центров повышенной эмиссии позволяет фуллереновым покрытиям быть устойчивыми к ионной бомбардировке и сохранять созданную на их поверхности распределенную структуру выступов.

Выявленный эффект самовоспроизведения распределенной структуры активированного фуллеренового покрытия в условиях интенсивной ионной бомбардировки может значительно повысить долговечность работы эмиттера в условиях технического вакуума и выгодно отличает фуллереновые покрытия от защитных покрытий другого типа, которые разрушаются под действием ионной бомбардировки.

Самовоспроизведение структуры покрытия имеет место в широком интервале отбираемых токов эмиссии (от 3 до 130 мкА).

**1.4. Основные результаты исследования работы острийных эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями.** Подводя итоги исследования работы острийных полевых эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями, укажем важнейшие полученные результаты.

- Выявлены механизмы изменения токов эмиссии в процессе работы эмиттеров, связанные с адсорбцией газов, с ионной бомбардировкой катода, а также с изменением структуры покрытия в результате перемещения поляризованных молекул фуллерена и металлофуллеренов под действием неоднородных полей. Определены условия максимально стабильной работы эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями.
- Определены закономерности и причины разрушения покрытий.
- Продемонстрирована возможность использования обработки потоком ионов для повышения однородности распределенных структур выступов на поверхности фуллереновых покрытий.
- Выявлено явление самовоспроизведения активированных фуллереновых покрытий в условиях интенсивной ионной бомбардировки и показана возможность их использования в качестве защитных для обеспечения долговечной работы полевых эмиттеров в техническом вакууме.
- Обнаружена возможность повышения предельных отбираемых токов полевой эмиссии с острийных катодов с активированными фуллереновыми покрытиями в условиях интенсивной бомбардировки ионами остаточного газа.

## **2. Использование контактных полей пятен для получения полевой эмиссии**

**2.1. Исследование композитных катодов гексаборид лантана – пирографит и химически однородных катодов из гексаборида лантана.** Как уже говорилось в разделе 1, для получения полевой эмиссии при умеренных рабочих напряжениях на поверхности эмиттеров формируют структуры усиливающих электрическое поле выступов. Разрушение этих выступов под действием ионной бомбардировки, зачастую, является основной причиной выхода из строя полевых эмиттеров. Мы решили рассмотреть другой способ создания необходимых для полевой эмиссии сильных полей, не требующий формирования усиливающих поле структур.

Известно, что поля более  $10^7$  В/см могут возникать при тесном контакте материалов с разной работой выхода  $e\phi$ . Контактные поля пятен хорошо известны [5], но до сих пор не анализировалась возможность их использования для получения автоэмиссии. Впервые данные о возможности использования контактных полей для автоэмиссии мы получили, сравнив работу композитных катодов из контрастных по работе выхода материалов с работой химически однородных катодов. Была изучена полевая эмиссия композитного катода из гранул  $\text{LaB}_6$  ( $e\phi \approx 2.5...3.8$  эВ) в матрице из пирографита ( $e\phi \approx 4.7$  эВ), а также химически однородного катода из гра-

нул  $\text{LaB}_6$ . Композитные катоды и химически однородные катоды имели одинаковую форму в виде дисков диаметром 20 мм и толщиной 1 мм.

Для получения информации о поверхности катодов (рис. 7, 8) использовался растровый электронный микроскоп JEOL FESEM с рентгеновским анализатором.

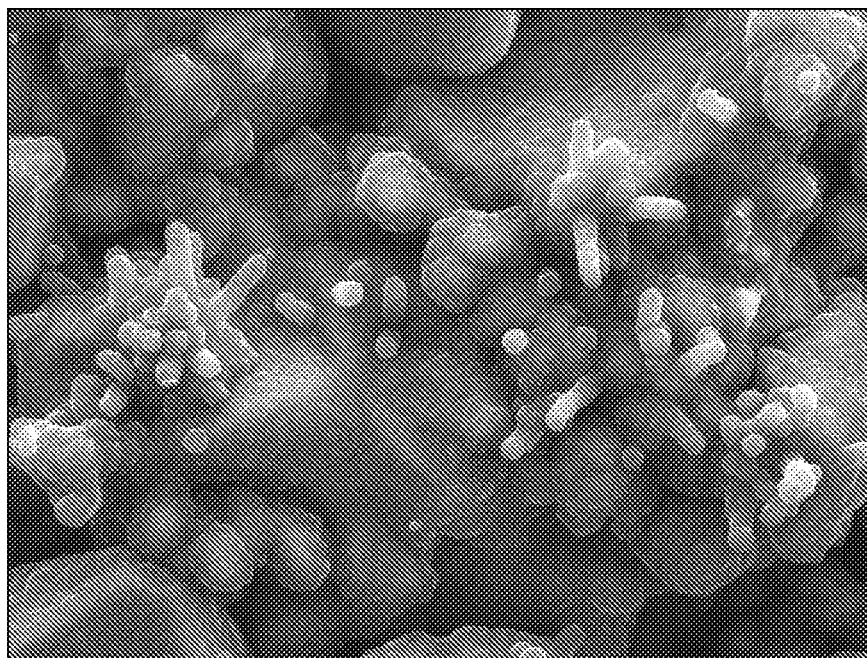


Рис. 7. Изображение композитного катода, полученное с помощью растрового электронного микроскопа

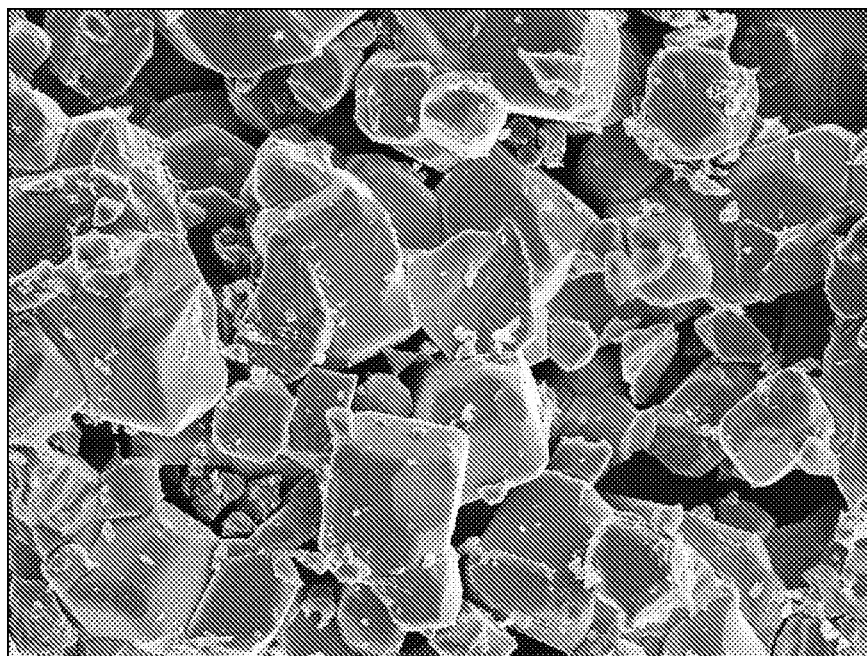


Рис. 8. Изображение химически однородного гексаборид-лантанового катода, полученное с помощью растрового электронного микроскопа



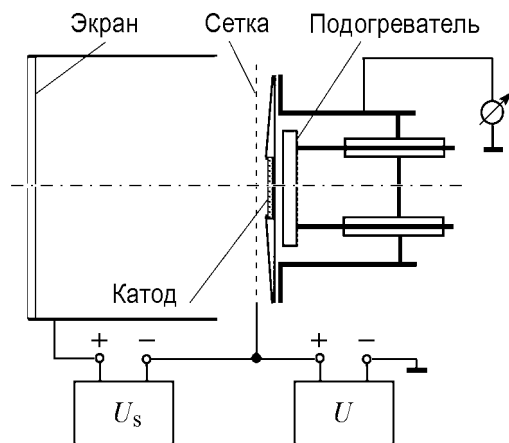


Рис. 9. Схематическое изображение измерительной системы, использованной для исследования композитного и химически однородного катодов

вторичную эмиссию с экрана, на него подавалось положительное относительно сетки напряжение 50...100 В. Исследования композитных и химически однородных катодов проводились в техническом вакууме порядка  $(1...4) \cdot 10^{-7}$  Торр.

В термоэмиссионных измерениях было определено, что работа выхода поверхности химически однородного гексаборид-лантанового катода  $e\phi \approx 3.7$  эВ. Большая часть поверхности композитного катода покрыта пирографитом. Поэтому средняя по его поверхности работа выхода существенно больше и близка к работе выхода пирографита (4.7 эВ).

Усиление поля на неоднородностях поверхности исследованных катодов не превышало примерно 30...50 и уменьшалось в процессе их тренировки с отбором тока (в процессе формовки).

Полевая эмиссия композитного катода была мала и нестабильна в начале эксплуатации. В процессе длительной (десять часов) тренировки с отбором тока его эмиссия увеличивалась и стабилизировалась, несмотря на то, что в процессе тренировки практически разрушались состоящие из углерода вис커сы на его поверхности и уменьшалось усиление поля на них. Однако, судя по данным, полученным с помощью рентгеновского анализатора, в процессе этой тренировки освобождались от покрытия пирографитом некоторые участки расположенных на поверхности катода гранул гексаборида лантана. Поэтому рост тока композитного катода можно связать с «выходом» на поверхность контактов  $\text{LaB}_6$  – пирографит.

После завершения формовки полевая эмиссия композитного катода достигала 50...80 мкА при аномально малых средних по поверхности катода полях  $E = U/d \sim (3...4) \cdot 10^4$  В/см. Автоэмиссия химически однородного катода из гексаборида лантана слабо менялась во время формовки и при таких же значениях среднего поля не превышала  $\sim (1...5) \cdot 10^{-1}$  мкА.

Разница в токах автоэмиссии композитного и химически однородного катодов может быть объяснена, с нашей точки зрения, влиянием полей пятен у границ  $\text{LaB}_6$  и пирографита, которые появляются в процессе формовки на поверхности катодов первого типа и отсутствуют у химически однородных катодов.

Еще одно свидетельство влияния контактных полей пятен получено при исследовании влияния на полевую эмиссию нагрева и охлаждения катодов. Ток полевой эмиссии композитного катода меняется с изменением его температуры  $T$ .

В триодной системе, схематически изображенной на рис. 9, измерялись эмиссионные характеристики катодов. Токи эмиссии измерялись с помощью прибора, включенного в цепь катода. Поле у поверхности катода создавалось при подаче напряжения  $U$  на сетку с высокой прозрачностью (около 75%) относительно заземленного через измерительный прибор катода. Поток электронов с катода, прошедших через сетку, бомбардировал поверхность флюоресцирующего экрана. Наблюдение эмиссионных изображений на экране позволяло определить распределение потока электронов. Чтобы свести к минимуму

Рис. 10 иллюстрирует изменения тока полевой эмиссии композитного катода, происходящие при постоянном напряжении  $U = 9.3$  кВ. Стрелками на рисунке обозначены моменты включения и выключения накала катода. При включении накала температура катода увеличивается от комнатной приблизительно до 600 К. Такой сравнительно слабый нагрев вызывает резкое уменьшение тока полевой эмиссии. Выключение накала ведет к увеличению тока эмиссии, которая, хоть и более инерционно, возвращается приблизительно к исходному значению.

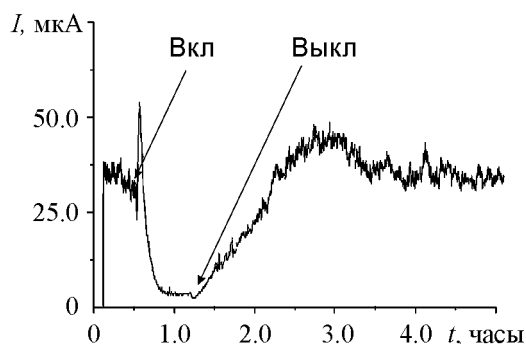


Рис. 10. Иллюстрация влияния нагрева и охлаждения на полевую эмиссию композитного катода. На зависимости тока от времени отмечены моменты включения и выключения накала

Коренным образом отличается ситуация при исследовании влияния нагрева на работу химически однородного катода. Нагрев практически не меняет эмиссию такого катода вплоть до температур порядка 1000...1100 К. При больших температурах ток увеличивается из-за появления термоэмиссии.

Влияние нагрева на эмиссию композитного катода можно связать с изменением расстояния между границами материалов с разной работой выхода ( $\text{LaB}_6$  и пиррографита), имеющих разные коэффициенты расширения, и к изменению полей пятен, ответственных за полевую эмиссию.

**2.2. Расчет полевой эмиссии под действием полей пятен на границе приведенных в контакт материалов с разной работой выхода.** Чтобы лучше разобраться в возможностях автоэмиссии под действием полей пятен приведенных в контакт материалов с разной работой выхода, необходимо определить распределение полей в контактных областях и плотности токов эмиссии, а также закономерности переноса электронов из области контактных полей на анод. Для контакта  $\text{LaB}_6$  – пиррографит эти задачи были решены в численных расчетах с использованием программы Comsol.

Анализировались закономерности процессов в достаточно простой модели контакта гранул гексаборида лантана с пиррографитом на поверхности композитного катода. Избранную модель и движение электронов поясняет рис. 11. Принято:  $\Delta l = 0.3$  нм,  $\Delta e\phi = 1$  эВ, радиус закругления приведенных в контакт материалов  $R = 0.3$  нм. На рис. 12 изображены полученные в расчетах распределения внешнего электрического поля  $E_o$ , поля контактной разности потенциалов  $E_c$  и суммарного поля  $E_s$  у поверхности пиррографита. Здесь же показано распределение плотности тока эмиссии  $J$ .

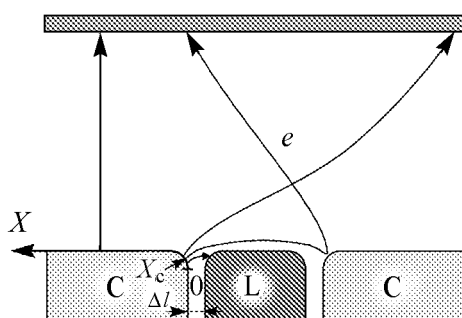


Рис. 11. Контакт слоя  $\text{LaB}_6$  (L) с пиррографитом (C).  $\Delta l$  – расстояние между границами материалов.  $X_c$  – критическое значение координаты  $X$ , разграничивающей участки пиррографита, с которых электроны достигают анода и возвращаются на катод

Наибольший вклад в эмиссию дает участок пиррографита вблизи критического значения координаты  $X = X_c$ . Плотность тока с этого участка увели-

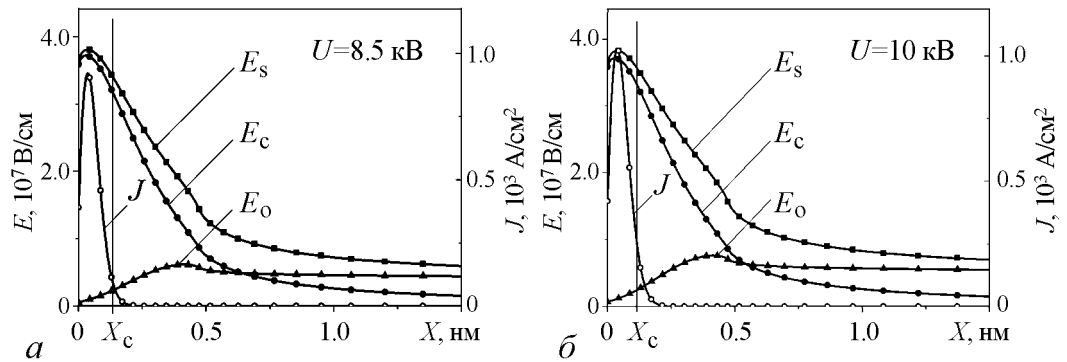


Рис. 12. Рассчитанные распределения внешнего электрического поля  $E_o$ , поля контактной разности потенциалов  $E_c$  и суммарного поля  $E_s$  у поверхности пирографита, а также плотности тока эмиссии  $J$  с его поверхности

чивается с напряжением и достигает значений более  $10^2$  А/см<sup>2</sup>. Электроны перемещаются на анод при значениях внешнего поля  $E_o < E_c$ .

Таким образом, сравнительное исследование работы композитного и химически однородного катодов, а также проведенные расчеты свидетельствуют о возможности получения интенсивной полевой эмиссии под действием полей пятен приведенных в контакт материалов с разной работой выхода. В связи с этим была сделана попытка создания слоистого полевого эмиттера из приведенных в контакт материалов с разной работой выхода. В следующем параграфе описаны созданные слоистые эмиттеры и первые результаты экспериментального их исследования.

**2.3. Создание и экспериментальное исследование слоистых катодных систем.** Для дополнительной проверки возможности полевой эмиссии под действием полей пятен были созданы катоды из расположенных в тесном контакте слоев материалов с разной работой выхода и измерена эмиссия с таких катодов. В катоде С1 (рис. 13) на подложку F из тонкой фольги с работой выхода  $e\phi_0$  нанесены слои 1 материалов с работами выхода  $e\phi_2$  и  $e\phi_1$ . В катоде С2 поверх слоев 1 нанесены слои 2. Наконец, третий катод С3 содержал слои 1, 2 и 3. Соотношение работ выхода использованных материалов определяется неравенствами  $e\phi_0 > e\phi_1$ ,  $e\phi_2 > e\phi_1$ .

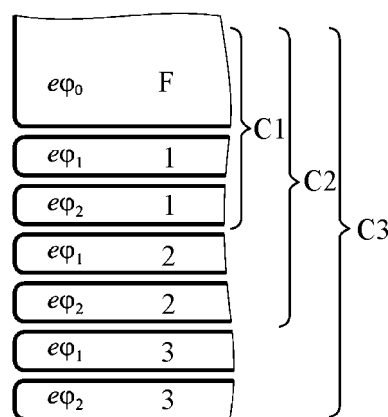


Рис. 13. Исследованные слоистые катодные системы С1, С2, С3. F – фольга-подложка

В измерительной системе, изображенной на рис. 14, были измерены токи полевой эмиссии с торцевой (левой на рис. 13) поверхности проводящей подложки, а также с торцевой поверхности слоистых катодов. На рис. 15 показаны вольт-амперные характеристики подложки (F), катодов С1, С2 и С3.

Значения внешнего электрического поля, создаваемого напряжением  $U$  у поверхности подложки и у поверхности всех слоистых катодных систем, не превышали  $10^7$  В/см. Ток с катода С1 значительно превосходил ток с подложки и увеличивался с ростом количества нанесенных на подложку слоев (С2, С3). Электрические поля у торцевой поверх-

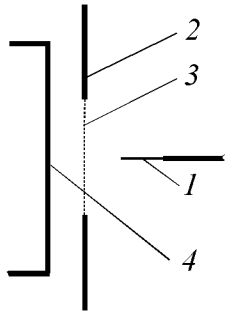


Рис. 14. Схематическое изображение измерительной системы, использованной для исследования слоистых катодов. 1 – катод, 2 – управляющий электрод с сеткой, 3 – сетка, 4 – коллектор

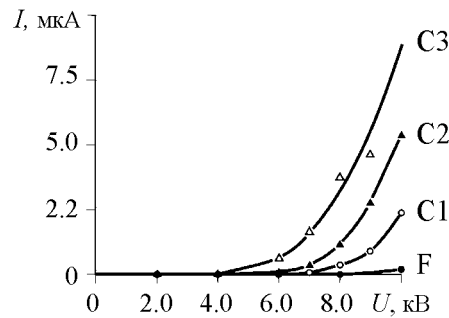


Рис. 15. Вольт-амперные характеристики подложки (F) и слоистых катодов C1, C2, C3

ности катодов, связанные с подключением анодного напряжения, не могут обеспечить получение измеряемых токов с катодов C1, C2 и C3. Но такого масштаба токи могут быть обусловлены эмиссией электронов из областей контакта материалов с разной работой выхода, где, как показывают расчеты, поля достигают значений порядка  $(3...4) \cdot 10^7$  В/см. Созданные слоистые структуры стабильно работали в условиях технического вакуума  $(1...4) \cdot 10^{-7}$  Торр в процессе всех испытаний.

Таким образом, проведенные эксперименты и расчеты подтверждают возможность получения полевой эмиссии с помощью катодных систем, созданных из контрастных по работе выхода материалов. Такие системы могут быть долговечными при эксплуатации в условиях технического вакуума не только в низковольтных, но и в высоковольтных электронных приборах.

Описанное в работе действие контактных полей пятен является одной из возможных причин существования низких порогов полевой эмиссии не только у изученных композитных и слоистых катодов, но также и у другого типа неоднородных по химическому и/или фазовому составу эмиттеров.

Авторы благодарны сотрудникам ЦНИИМ (Санкт-Петербург) С.К. Гордееву и С.Б. Корчагиной за предоставленные образцы композитного и химически однородного катодов, а также сотруднику ФТИ им. А.Ф. Иоффе Д.А. Саксееву за выполненную работу по контролю поверхности исследованных катодов с помощью растрового электронного микроскопа JEOL FESEM.

*Данная работа выполнена при поддержке грантом Правительства по договору № 11.G34.31.0041 с Министерством образования и науки Российской Федерации, а также грантом РФФИ № 11-02-00425.*

### Библиографический список

1. Тумарева Т.А., Соминский Г.Г. Разработка и совершенствование полевых эмиттеров на основе содержащих углерод материалов // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, № 3. С. 17.
2. Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Светлов И.А., Морозов А.Н. Активированные потоком ионов калия полевые эмиттеры с фуллереновыми покрытиями в сильных электрических полях // ЖТФ. 2008. Т. 78, № 11. С. 119.
3. Соминский Г.Г., Сезонов В.Е., Тумарева Т.А. Полевая эмиссия электронов под действием полей пятен при наноразмерном контакте материалов с разной работой выхода // Труды международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ-10)», 22–24 сентября 2010, Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010. С. 622.

4. *Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Светлов И.А., Пантелеев И.С.* Использование ионной обработки для повышения качества полевых эмиттеров с фуллереновыми покрытиями // *ЖТФ*. 2012. Т. 82, № 1. С. 114.
5. *Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В.* Эмиссионная электроника. М.: «Наука». 1966. 564 с.
6. *Елецкий А.В.* Эндоэдральные структуры // *Успехи физических наук*. 2000. Т. 170, № 2. С. 113.
7. *Kadish M.K., Ruoff R.S.* Fullerenes. Canada: Published by John Wiley & Sons. 2000. P. 549.
8. *Соколов В.И., Станкевич И.В.* Фуллерены – новые аллотропные формы углерода: структура, электронное строение и химические свойства // *Успехи химии*. 1993. Т. 62, № 5. С. 455.
9. *Макарова Т.Л., Захарова И.Б.* Электронная структура фуллеренов и фуллеритов. Санкт-Петербург: «Наука», 2001. 70 с.
10. *Ходорковский М.А., Мурашов С.В., Артамонова Т.О., Шахмин А.Л., Беляева А.А.* Исследование энергии связи между молекулами фуллерена в тонких пленках // *Письма в ЖТФ*. 2004. Т. 30, № 4. С. 1.

*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*      Поступила в редакцию      17.04.2012

## DEVELOPMENT IN SPbSPU OF FIELD EMITTERS FOR ELECTRON DEVICES OPERATING AT TECHNICAL VACUUM CONDITIONS

*G.G. Sominski, V.E. Sezonov, I.A. Svetlov, T.A. Tumareva, E.P. Taradaev*

The methods of field emitter durability growth while operating in technical vacuum conditions are developed in SPbSPU and are describing in this paper. Two possibilities to secure durable emitter operation are considered: using the special protective fullerene coatings and arrangement of new type of emitter where the fields of spots on the contacts of the materials with greatly different work function provide the field emission.

*Keywords:* Field emitters, protective fullerene coatings, tip cathodes, composite cathodes, layered cathodes prepared from materials with different work function value, wide range of gas pressure, experiment, numerical computation.



*Соминский Геннадий Гиршевич* – родился в Ленинграде (1935). Окончил (1960) Ленинградский политехнический институт (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет – СПбГПУ). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1967) и доктора физико-математических наук (1984). Докторская диссертация была посвящена исследованию мощных СВЧ-устройств со скрещенными полями. С 1960 года по настоящее время работает на кафедре физической электроники СПбГПУ, с 1991 – профессором. В 1968 году организовал на кафедре лабораторию сильноточной и СВЧ-электроники и руководит ею по настоящее время. Области основных научных интересов: процессы в пространственном заряде и их влияние на работу сильноточных электронных устройств, разработка и совершенствование полевых эмиттеров для формирования интенсивных электронных потоков. Автор 240 печатных работ и 18 изобретений.

195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29  
 Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
 E-mail: sominski@rphf.spbstu.ru



*Сезонов Вячеслав Евгеньевич* – родился в Санкт-Петербурге (1988). Окончил СПбГПУ (2011). Аспирант кафедры физической электроники СПбГПУ, лаборант исследовательской лаборатории СПбГПУ. Исследует возможности использования контактов материалов с разной работой выхода для получения полевой эмиссии. Выполняет моделирование и численные расчеты характеристик полевых эмиттеров. Автор 6 печатных работ и одного изобретения.

195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
E-mail: sezonovve@mail.ru



*Светлов Илья Александрович* – родился в Санкт-Петербурге (1983). Окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (2006). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (2010), посвященную созданию и исследованию полевых эмиттеров с фуллереновыми покрытиями. В настоящее время – международный патентный поверенный, по совместительству – м.н.с. исследовательской лаборатории СПбГПУ. Автор 13 печатных работ.

195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
E-mail: ilyasvetlov@mail.ru



*Тумарева Татьяна Алексеевна* – родилась в Ленинграде (1937). Окончила (1960) Ленинградский политехнический институт – ЛПИ (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет – СПбГПУ). После окончания работала в Государственном оптическом институте, а с 1964 года – в ЛПИ. Защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (ЛПИ, 1972) посвященную созданию и исследованию полевых эмиттеров с разнообразными активирующими покрытиями. В настоящее время – старший научный сотрудник кафедры физической электроники СПбГПУ. Научные интересы связаны с разработкой и исследованием долговечных и эффективных полевых эмиттеров. Разработала оригинальные методы диагностики полевых эмиттеров и формируемых ими электронных потоков. Разработала перспективные полевые эмиттеры с фуллереновыми покрытиями. Автор более 100 печатных работ и 4 изобретений.

195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
E-mail: tumareva@rphf.spbstu.ru



*Тарадаев Евгений Петрович* – родился в Санкт-Петербурге (1990). Студент 5-го курса кафедры физической электроники СПбГПУ, лаборант исследовательской лаборатории СПбГПУ. Участвует в экспериментальном исследовании полевых эмиттеров, выполняет численные расчеты их характеристик. Автор 2-х печатных работ и одного изобретения.

195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
E-mail: Evgenytar@hotmail.com