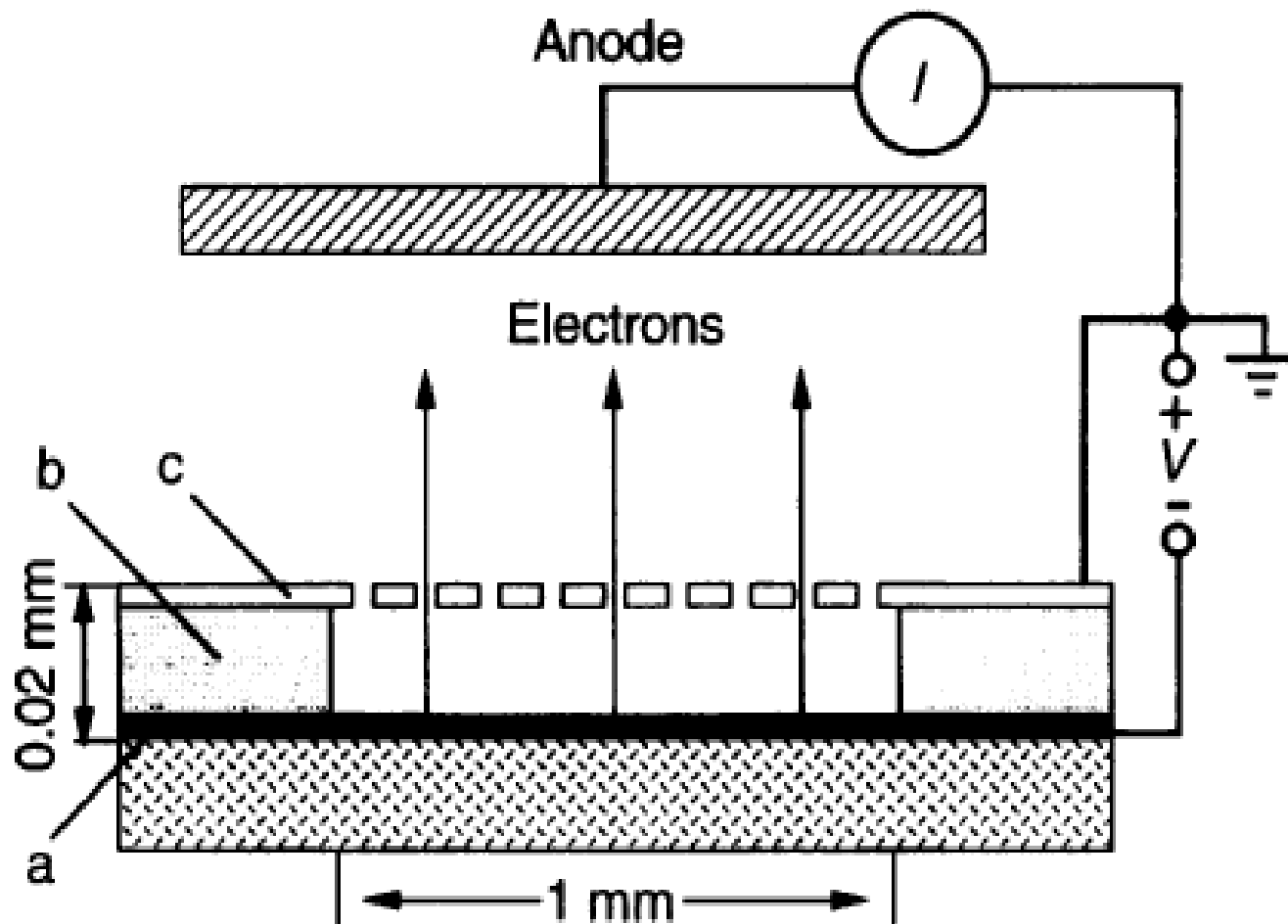


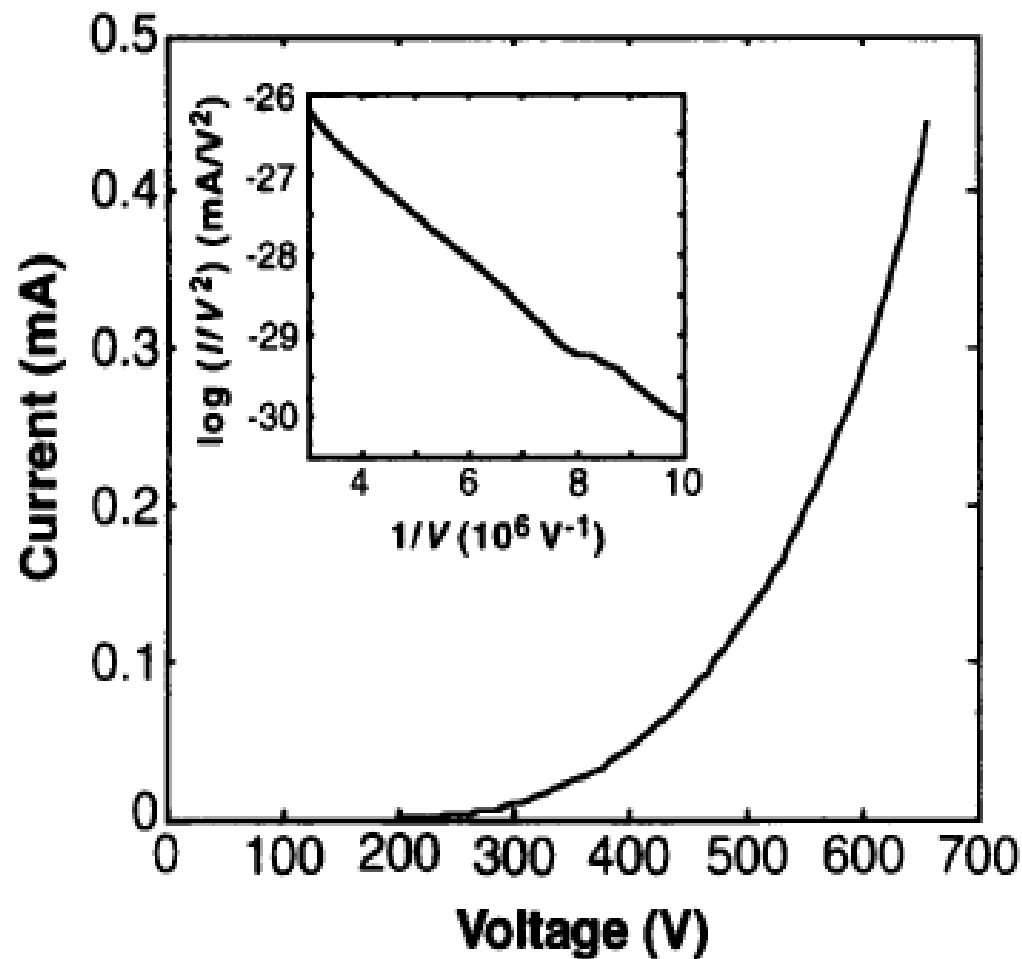
УНТ как наноэмиттеры

Схема источника электронов. Эмиттирующая поверхность – пленка на основе УНТ. Нанотрубки в пленке ориентированы перпендикулярно политетрафторэтиленовой подложке.



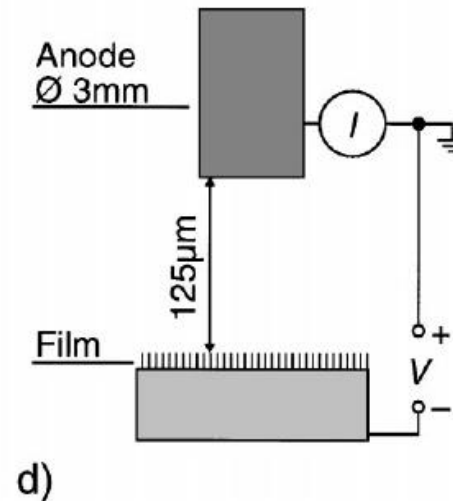
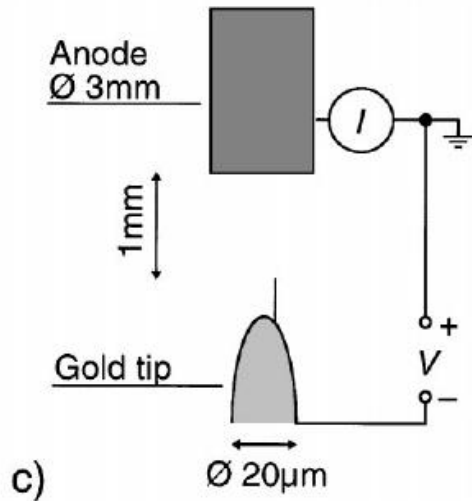
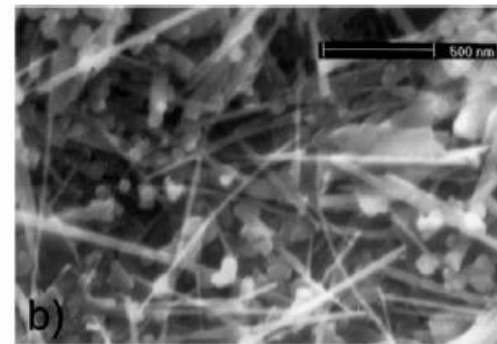
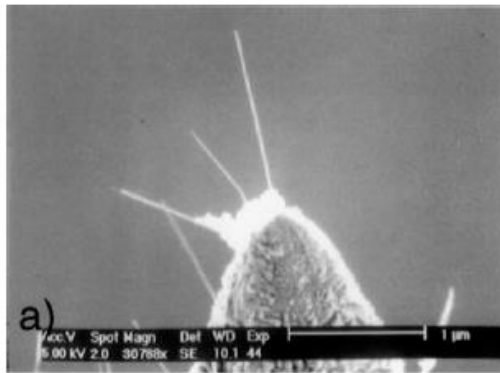
W. A. de Heer, A. Chatelain, and D. Ugarte *Science* 270, 1179-80 (1995).

**ВАХ эмиссионного источника - плёнок на УНТ  
(площадь поверхности эмитирующей области 1 мм<sup>2</sup>)**

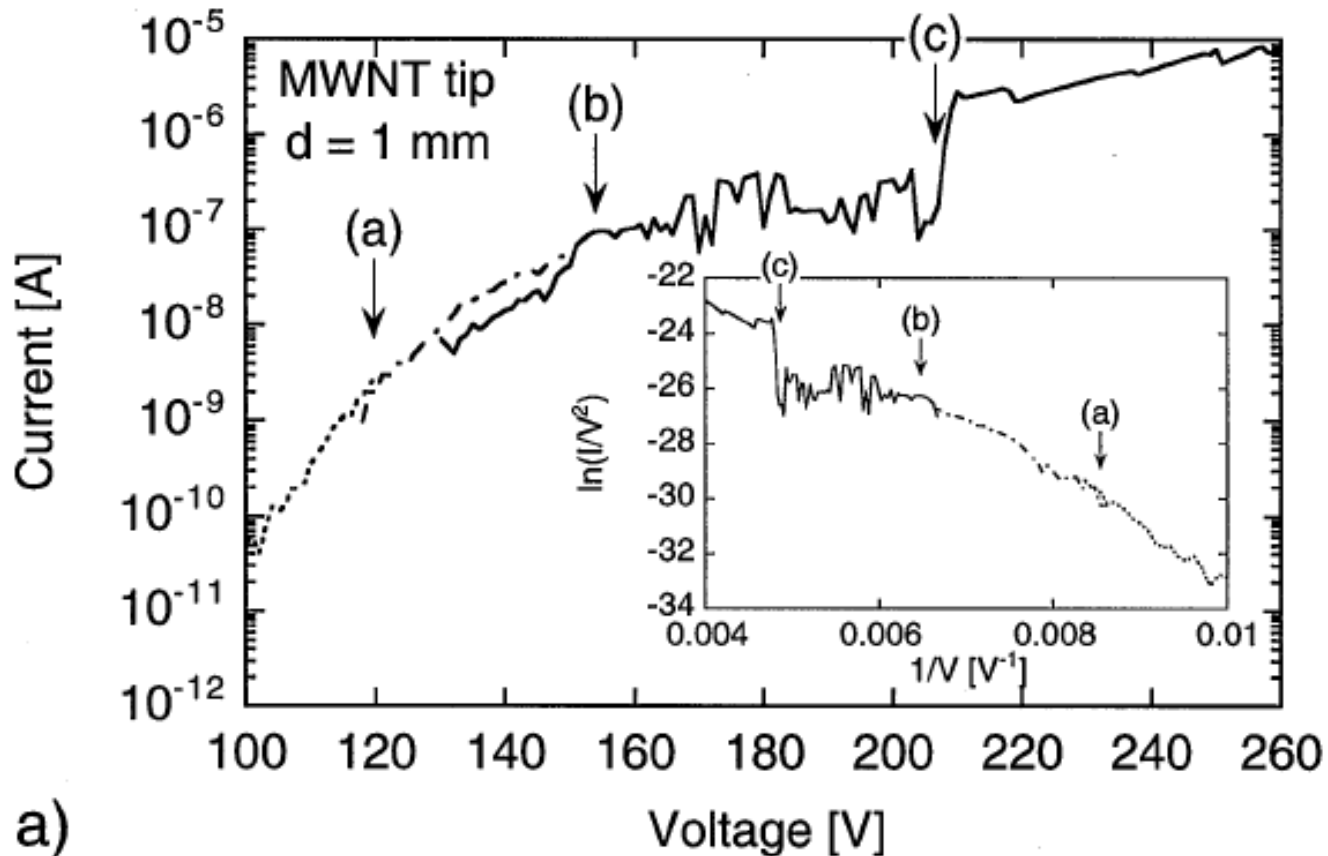


W. A. de Heer, A. Chatelain, and D. Ugarte *Science* 270, 1179-80 (1995).

Фотографии эмиттирующих поверхностей а) одиночная заостренная многослойная нанотрубка; б) нанопленки из многослойных нанотрубок. Экспериментальные установки для измерения ВАХ: в) для одиночной заостренной многослойной нанотрубки; г) для нанопленки из многослойных нанотрубок. Время работы эмиттеров на основе пленок из многослойных УНТ продолжительнее, чем у эмиттеров на основе одиночной многослойной УНТ

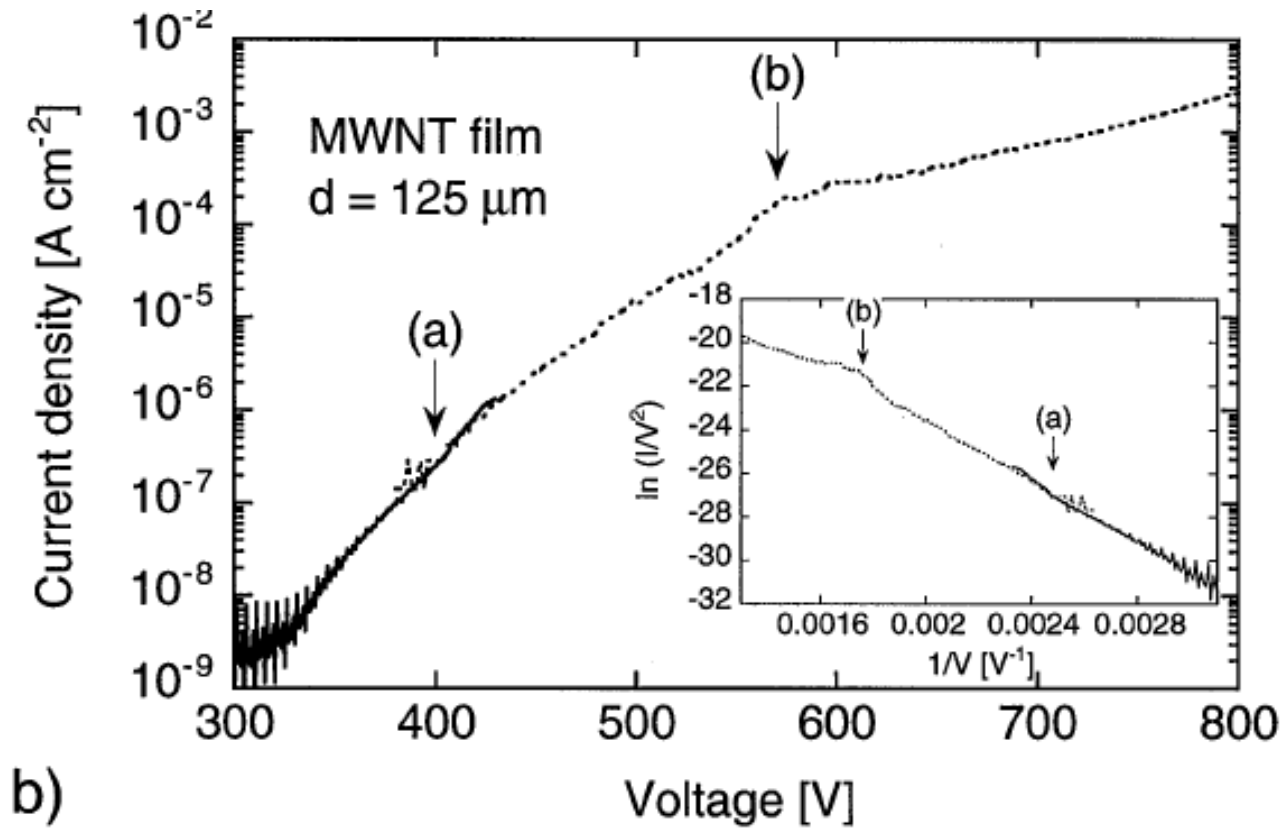


# ВАХ одиночной заостренной многослойной УНТ



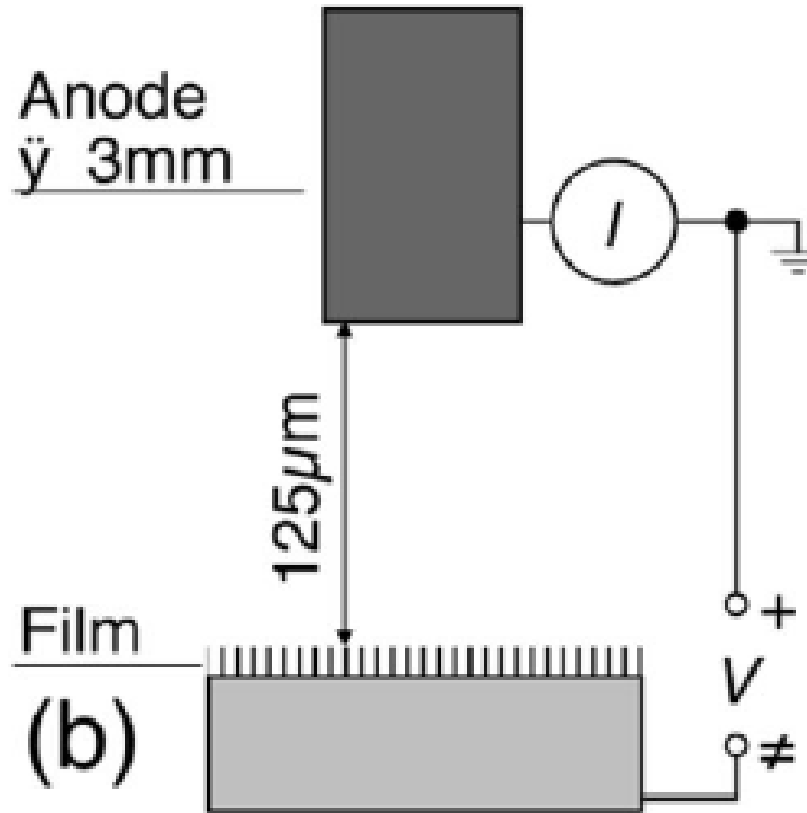
J.-M. Bonard et. al. Ultramicroscopy. 73, p. 7-15  
(1998)

# ВАХ пленки из многослойных УНТ



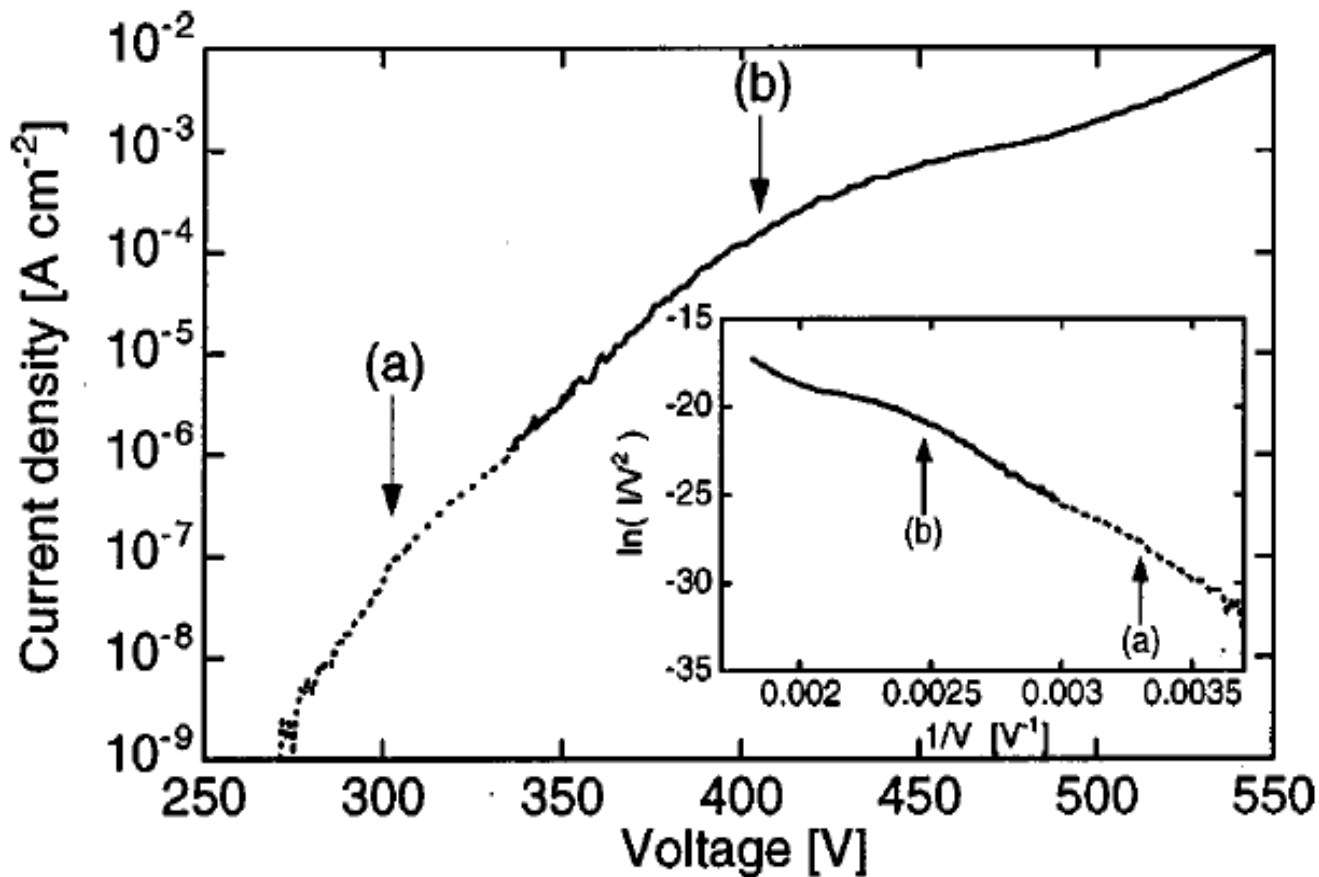
J.-M. Bonard et. al. Ultramicroscopy. 73, p. 7-15 (1998)

Экспериментальная установка для измерения эмиссионных характеристик. Контр-электрод располагается в 125 мкм выше пленки из одностенных углеродных нанотрубок.



J. M. Bonard, F. Maier, T. Stockli, A. Chatelain, W. A. de Heer, J. P. Salvetat, and L. Forro, *Ultramicroscopy* 73, 7-15 (1998)

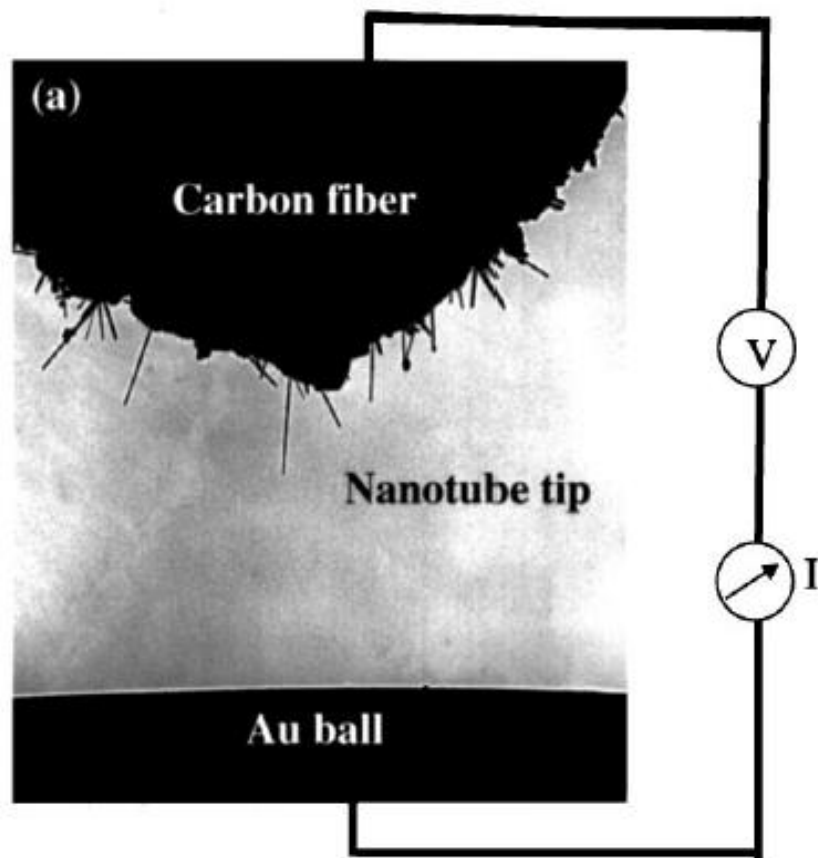
**ВАХ стандартной пленки из одностенных углеродных нанотрубок. Сплошными и пунктирными линиями показаны различные диапазоны измерительной аппаратуры. Во вкладке приведена зависимость Фаулера-Нордгейма для такой пленки.**



J. M. Bonard, F. Maier, T. Stockli, A. Chatelain, W. A. de Heer, J. P. Salvetat, and L. Forro, *Ultramicroscopy* **73**, 7-15 (1998)



**Изображение сканирующей электронной микроскопии углеродных нанотрубок контр-электрод, используемый для исследования ЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ.**

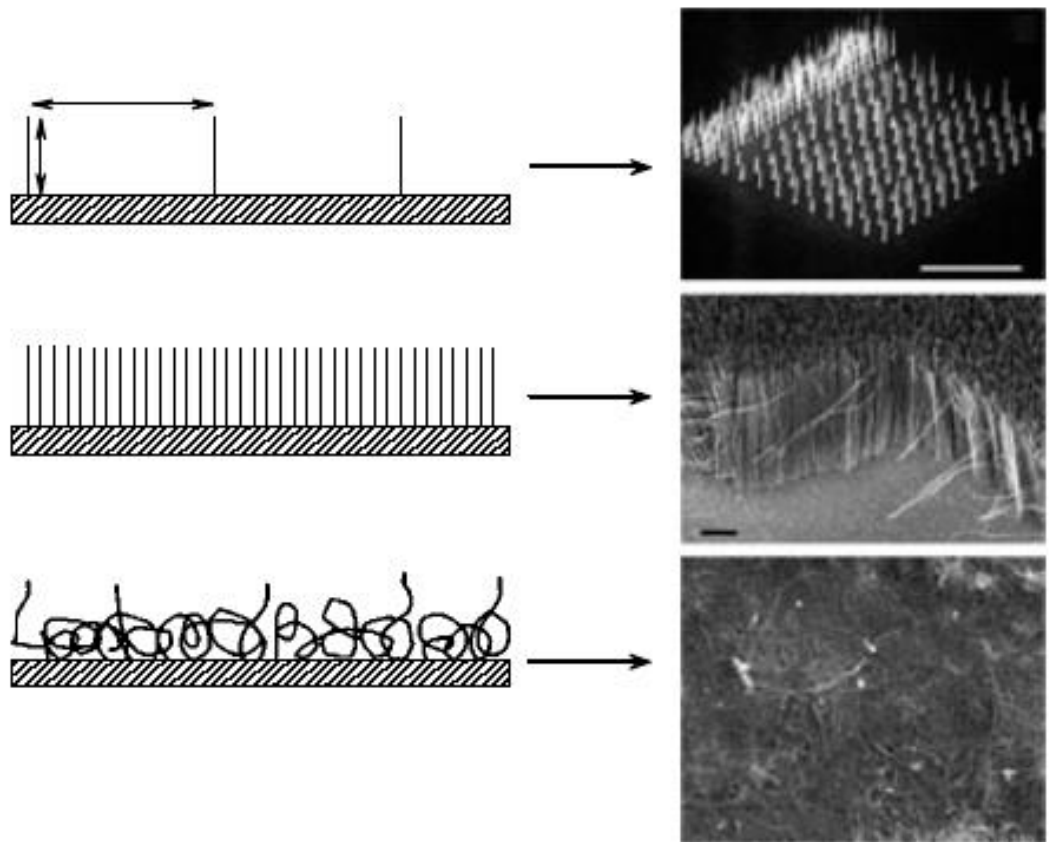


Z.L. Wang, R.P. Gao, W.A. de Heer, P. Poncharal, Applied Physics Letters 80, no.5, 856-8 (2002).

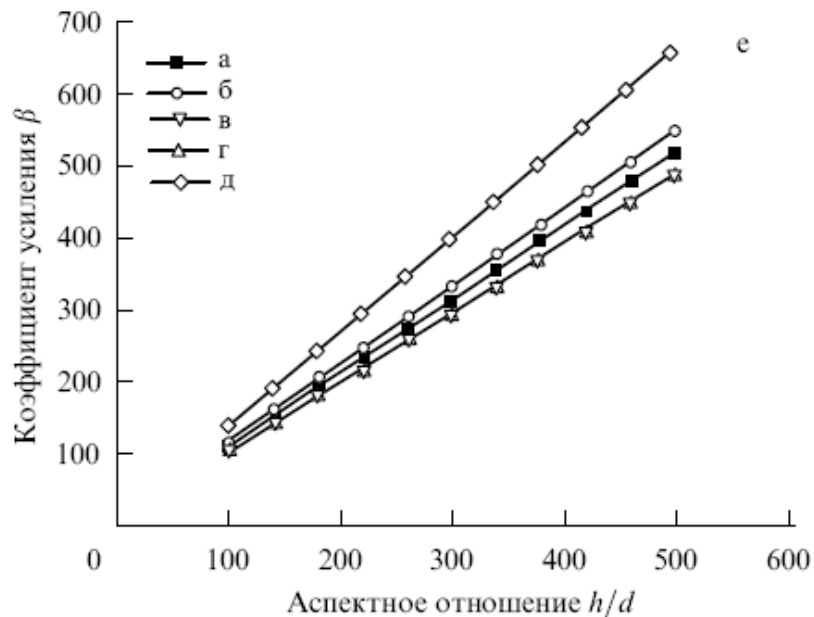
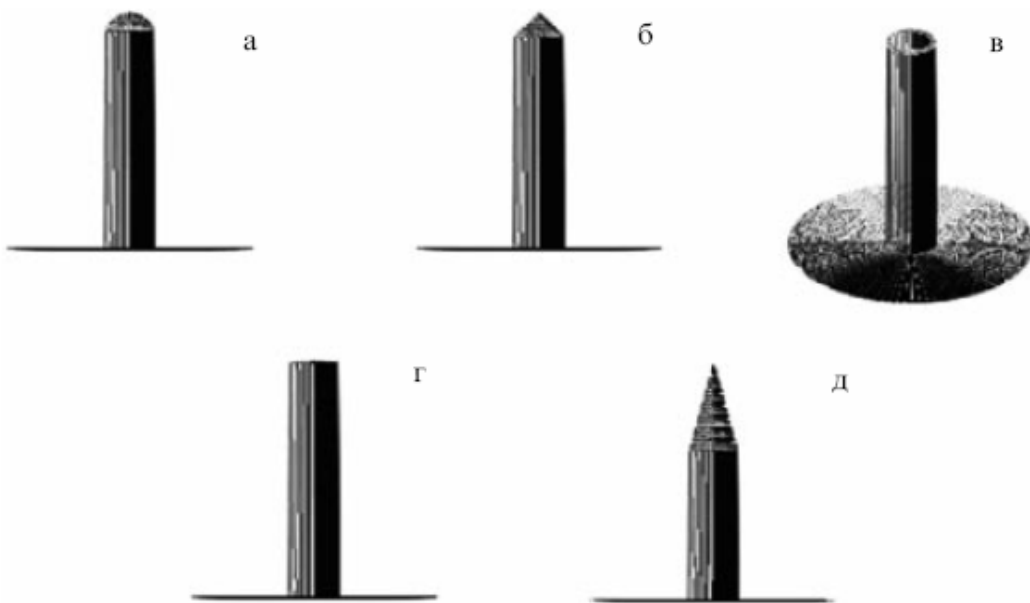
## Различные типы взаимного расположения УНТ в полых эмиссионных катодах

- верхний рисунок – массив низкой плотности УНТ;
- центральный рисунок – плотный массив вертикально ориентированных УНТ, для которого плотность тока эмиссии немонотонно зависит от плотности массива;
- нижний рисунок – пленка хаотично расположенных УНТ, для которой плотность тока эмиссии определяется количеством УНТ, атомная структура которых искажена в наибольшей степени

Shakir M.I. et al.  
Nanotechnology 17(6)  
R41 (2006)



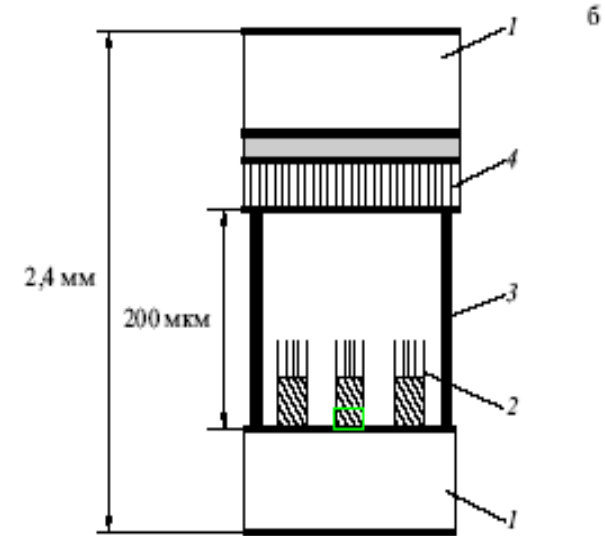
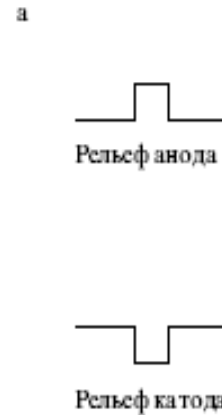
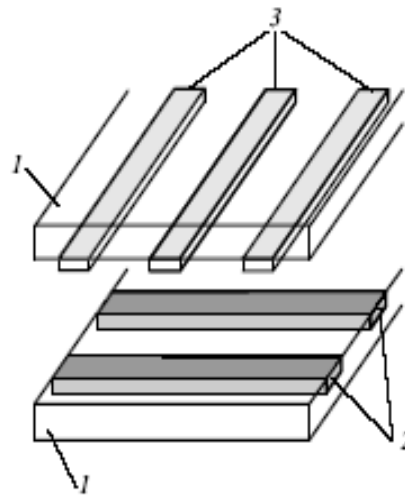
Разновидности структуры наконечника УНТ: а) полусфера; б) конус с углом раствора  $90^{\circ}$ ; в) открытый полый цилиндр с толщиной стенки 1 нм; г) плоская крышка; д) конус с углом раствора  $30^{\circ}$ . Результаты расчетов коэффициента полевого усиления, выполненных для УНТ переменной длины и диаметром 10 нм. Межкатодное расстояние равно 200 мкм, приложенное напряжение 1000 В.



# Диодная структура, содержащая ориентированные нанотрубки, изготовленная методом электрофореза

Wang Q.H. et al. Appl. Lett. 72, 2912 (1998)

Choi W.B. et al. Jpn J. Appl. Phys. Pt. I. 39, 2560 (2000)



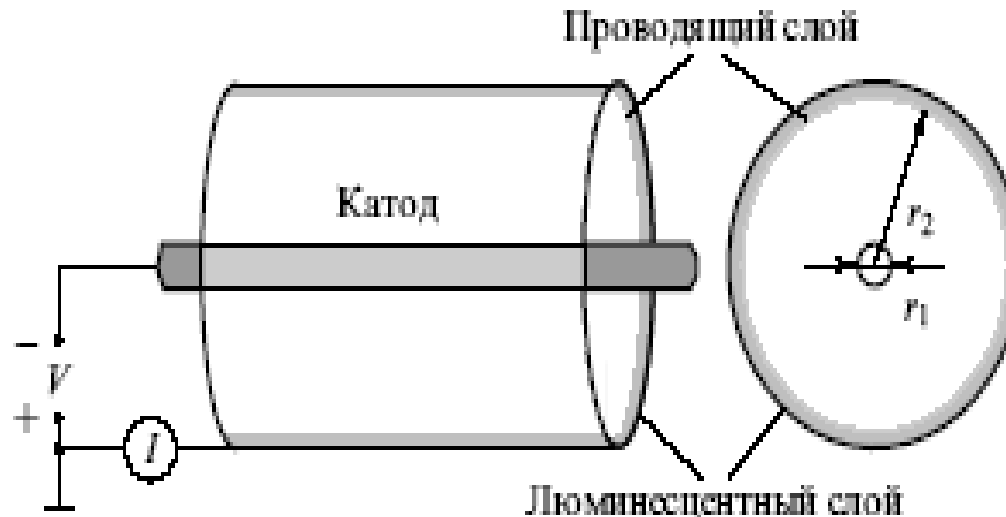
Конструктивные схемы полностью отпаянных дисплеев с холодным катодом на основе одностенных нанотрубок:

а) прототипный макет: 1- стеклянные подложки, 2- полоски эпоксидной смолы, содержащей нанотрубки, 3- полоски люминофора;

б) цветной дисплей с размерами 132x113x2,4мм: 1- стеклянные пластины толщиной 1,1мм, 2- матрица нанотрубок с металлической подложкой, 3- разделяющие пластины, 4- матрица люминофора. Номинальное значение плотности тока эмиссии, обеспечивающее заданный режим работы ( $76 \text{ мкА/мм}^2$ ) достигается при напряжении 230 В.

## Схема цилиндрической катодолюминисцентной лампы с катодом на основе УНТ.

Длина цилиндра 5 см, радиус 2,1 см. Катод в отличие от традиционно развиваемых на основе УНТ плоских источников имеет цилиндрическую структуру. Как показывают измерения, плотность тока эмиссии  $1\text{mA cm}^{-2}$  достигается при напряжении 1кВ и является рекордной для межэлектродного расстояния около 2 см.



Триодная конфигурация, содержащая балластное сопротивление, которое последовательно соединено с эмиттером. Вследствие эффектов усиления электрического поля эмиссия с торцевой поверхности жгута характеризуется сильной неоднородностью. Периферийная область этой поверхности эмитирует значительно более высокую плотность тока по сравнению с центральной областью. Для преодоления этой проблемы между анодом и катодом вводился управляющий электрод, создавая триодную конфигурацию.

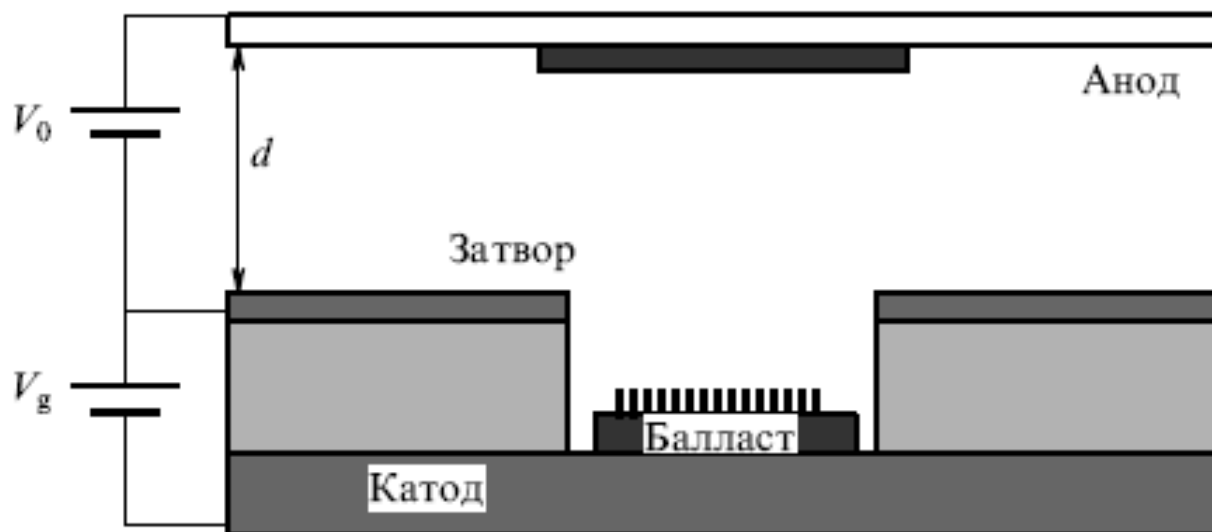
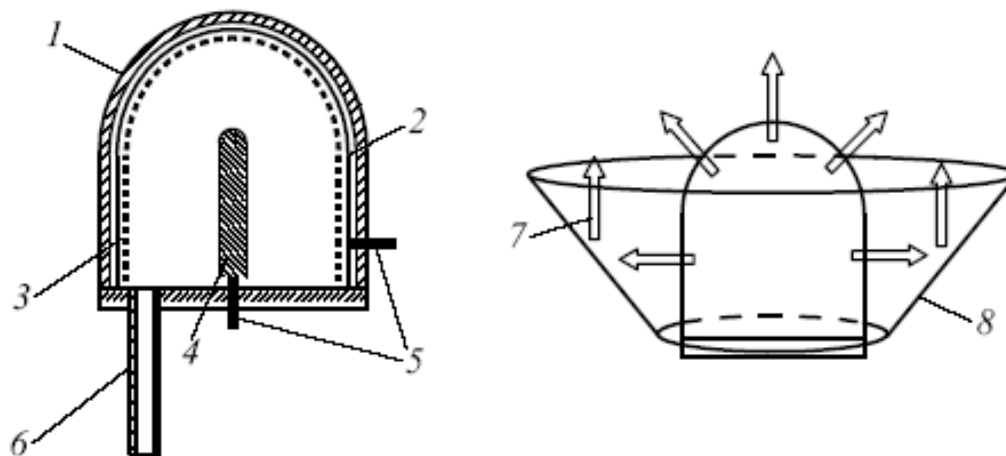
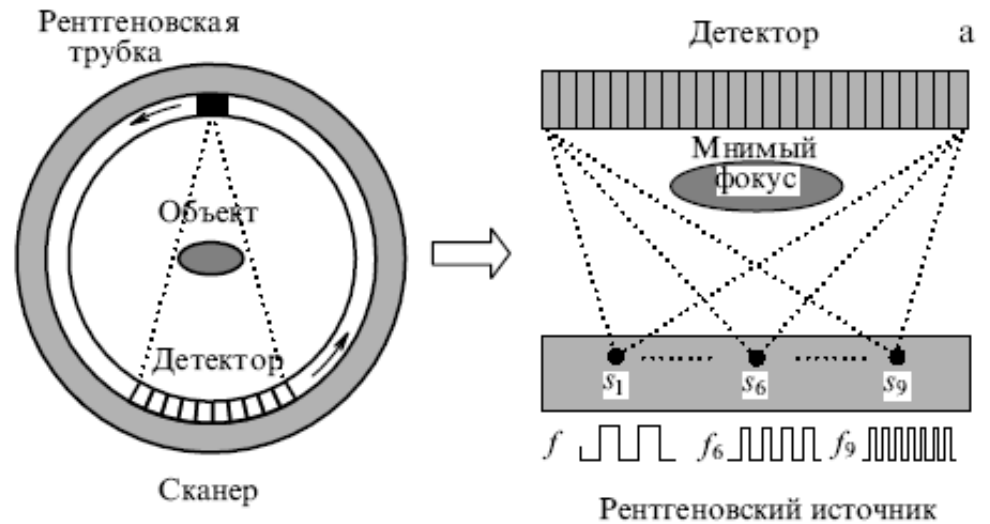


Схема катодлюминисцентной лампы: 1- стеклянная колба; 2- анод; 3- люминисцентный слой; 4 – наноуглеродный катод; 5 – электроды; 6 – стеклянная трубка для откачки лампы; 7 – направление света, излученного люминисцентным слоем; 8 – зеркальный отражатель. В отличие от традиционных систем подобного типа источником излучения служила не торцовая, а цилиндрическая поверхность стеклянной трубки. Плотность тока эмиссии  $1 \text{ мА см}^{-2}$  достигается при величине приложенного напряжения  $1,1 \text{ кВ}$ .



Bonard J-M et. al. Appl. Phys. Lett. 78, 2775 (2001)

а) Схема, иллюстрирующая работу обычного рентгеновского сканера (слева) и многопиксельного источника рентгеновского излучения с катодом на основе УНТ (справа)



б) Устройство индивидуального пикселя многопиксельного источника рентгеновского излучения, содержащего катод на основе УНТ, диэлектрические разделительные пластины толщиной 150 мкм, дополнительный электрод (сетку) и фокусирующий электрод.

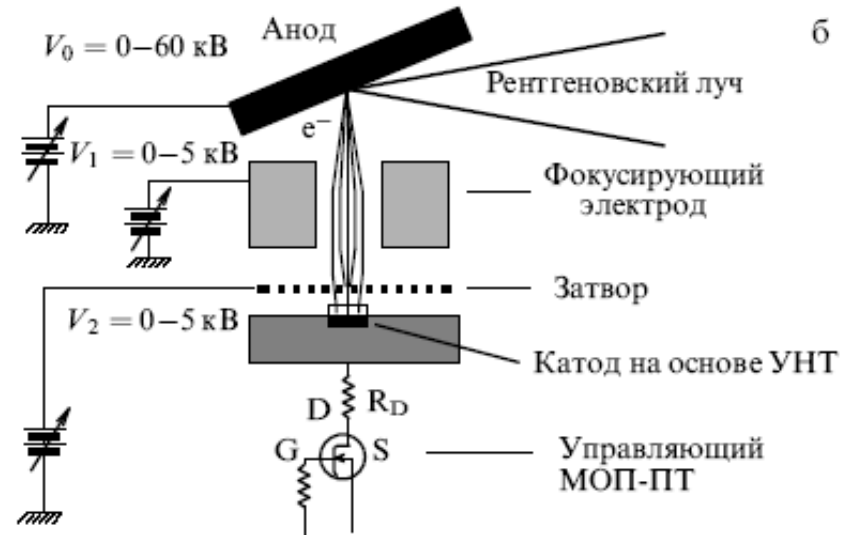
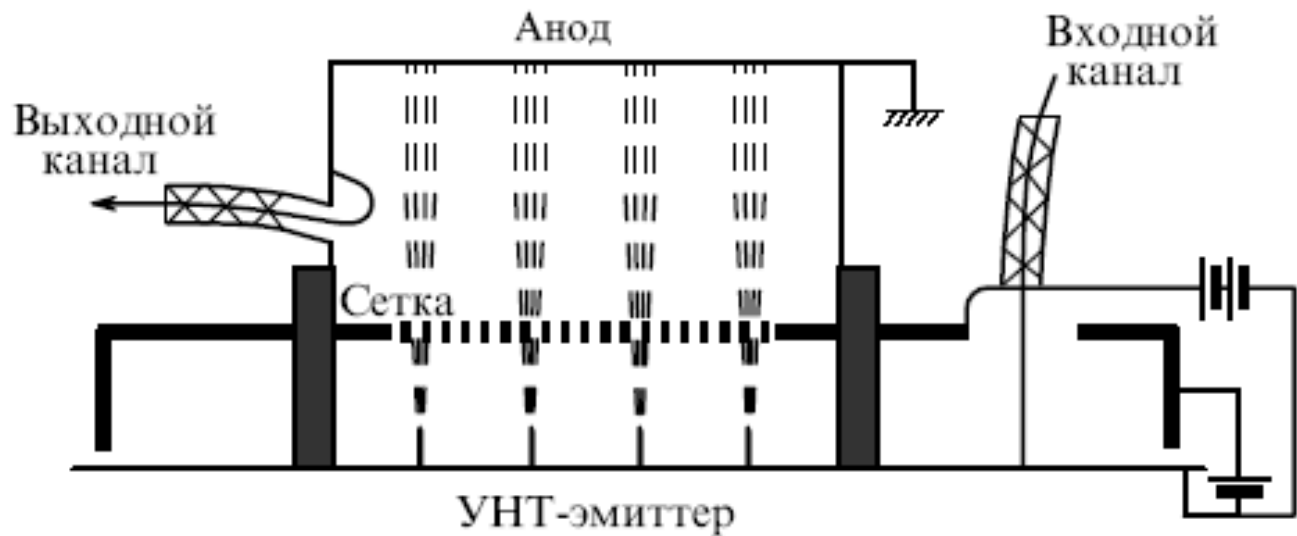




Схема вакуумного усилителя СВЧ-излучения триодного типа с катодом на основе УНТ. Длина УНТ составляет порядка 1мкм, а ток эмиссии с индивидуальной УНТ может достигать 10мкА, следовательно, максимальное значение плотности тока, эмитируемого однородным массивом вертикально ориентированных УНТ, может достигать  $10 \text{ A cm}^{-2}$



Minoux E. et. al. Nano Lett. 5, 2135 (2005)

# Первый в мире цветной матричный электрофоретический дисплей созданный на базе углеродных нанотрубок разработан фирмой Samsung Electronic

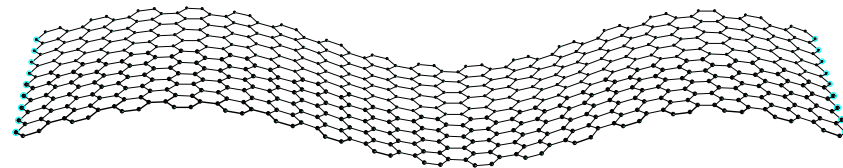
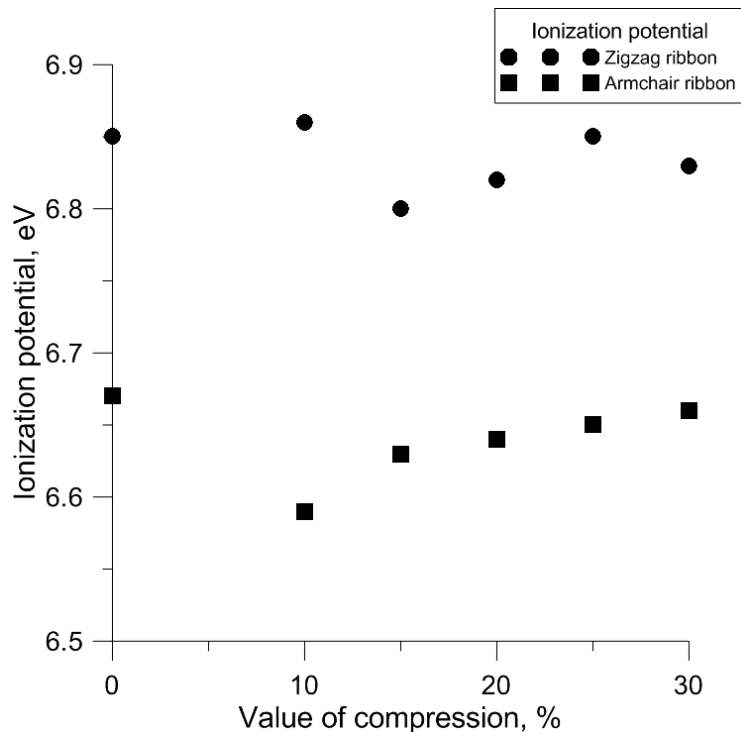
К достоинствам электрофоретических дисплеев по сравнению с традиционными плоскпанельными экранами относят малое энергопотребление, а также хорошую видимость изображений даже при ярком внешнем освещении. Разработчики считают, что ЭФ-дисплеи смогут найти применение в мобильных устройствах.



В обиходе электроферические дисплеи получили название "электронной бумаги", так как на их базе создаются специальные ридеры для комфортного чтения. Электронная бумага была разработана для преодоления недостатков компьютерных мониторов. Например, от подсветки мониторов человеческий глаз сильно устает, в то время как электронная бумага отражает свет, как обычный печатный лист. Угол обзора у нее больше, чем у жидкокристаллических плоских дисплеев.



# Прогнозирование изменения эмиссионных свойств при деформации

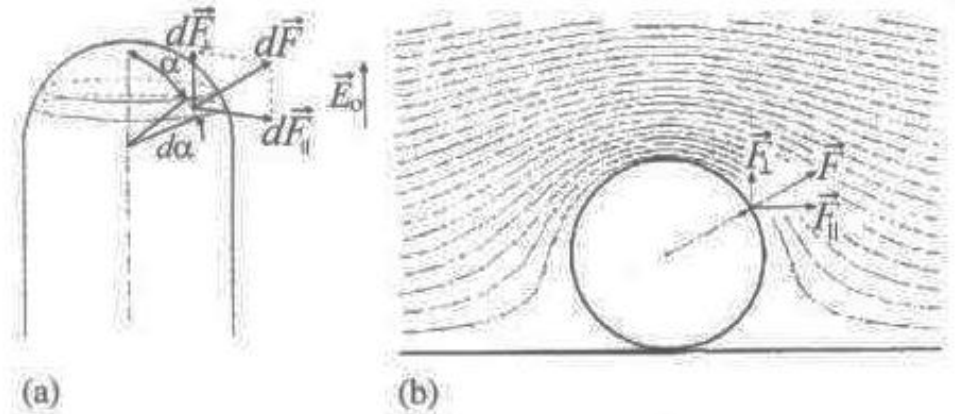


Сжатие, %	Энергетическая щель спектра, эВ
0	0.074
2	0.036
10	0.007
15	0.032
20	0.031
25	0.068
30	0.038

Теоретические исследования прогнозируют существенное влияние кривизны на эмиссионные свойства углеродных наноструктур. Например показано, что при сжатии графеновой наноленты на 10% работа выхода электронов снижается на 0,1 эВ, а электронная проводимость повышается на 10%.

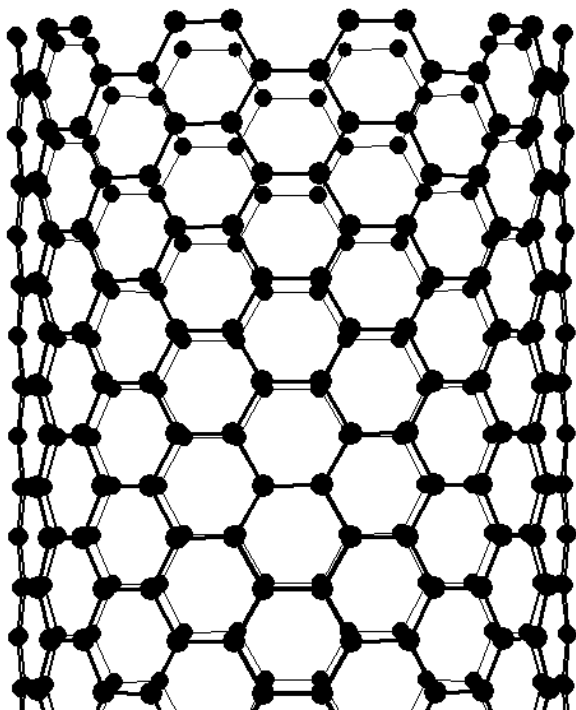
# Прогнозирование удлинения УНТ в сильных электрических полях

- В сильных электрических полях пондеромоторная сила может достигать 5-10 нН, что приводит к удлинению УНТ на 10-12% с одновременным уменьшением в диаметре на несколько процентов.
- В результате коэффициент усиления поля на вершине УНТ увеличивается на 6-12 %.



Ponderomotive forces acting on (a) vertically and (b) horizontally oriented nanotube.

# Влияние киральности на эмиссионные свойства УНТ



Атомное строение УНТ определяет их эмиссионные свойства.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что работа выхода УНТ типа armchair наименьшей работой выхода электронов обладают нанотрубки типа armchair (см. рисунок).

Адиабатическая работа выхода графена на 0,3 эВ.