

Физический факультет МГУ, кафедра физики низких температур и
сверхпроводимости, Институт физических проблем РАН.

**Исследование эмиссионных свойств
углеродных нанотрубок,
как перспективных источников электронов
для создания двумерных электронных систем
над поверхностями криодиэлектриков.**

Курсовая работа
студента четвертого курса 420 группы
Богомолова Сергея

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Завьялов В.В.

Москва, 2002



Введение.

В настоящее время множество ученых по всему миру работают над проблемой создания квантовых компьютеров. Этот вопрос становится все более насущным с приближением современных методов производства микроэлектронной техники к своим технологическим пределам. Создание процессоров и устройств памяти, имеющих размеры порядка атомных, может существенно изменить сложившиеся приоритетные направления развития вычислительной техники.

С начала 80-х годов математиками ведется активный поиск эффективных квантовых алгоритмов, но полная, законченная теория квантовых вычислений еще не разработана. Наглядно преимущества квантовых компьютеров над классическими можно продемонстрировать, если взять в качестве q-бита (quantum bit) спин частицы. Восемь бит (байт) в классическом компьютере может содержать определенное число от 0 до 255, тогда как спин, помимо значений «0» и «1», может находиться еще и в смешанном состоянии. Таким образом, один байт квантового компьютера одновременно представляет 256 чисел, что, возможно, позволит таким устройствам производить некоторые виды математических операций намного быстрее, чем это делают обычные компьютеры. Например, согласно теории, при поиске одной из N записей в базе данных квантовому компьютеру вместо N операций потребуется лишь \sqrt{N} . Более существенные выигрыши получаются при разложении чисел на простые множители.

Для физической реализации квантового компьютера необходимо выполнение нескольких принципиальных условий, главное из которых – требование изолированности q-битов друг от друга и от окружающей среды. Теоретиками уже предложены способы квантовой коррекции ошибок, определяющие, фактически, предельную величину допустимого воздействия внешних возмущений на систему спинов или иную квантовую систему. Если величина воздействия извне превысит установленный предел, то на каждом новом шаге ошибка будет накапливаться, и непрерывный процесс вычислений станет невозможным. Первым, и наиболее логичным шагом по уменьшению влияния внешней среды является использование низких и сверхнизких температур, устраняющих тепловые шумы.

При этом, однако, нужно иметь возможность избирательно воздействовать на выбранную пару q-битов, а также обеспечить определенную степень взаимодействия между двумя элементами. В частности, это необходимо для реализации простейших логических операций.

На сегодняшний день существует много различных подходов к проблеме создания квантового компьютера. В различных теориях в качестве квантового бита фигурируют отдельные атомы или ионы (используются их электронные уровни), спины ядер и отдельных электронов. Существуют также оптические методы, в которых вместо атомов или электронов используются пучки поляризованного света. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, для реализации некоторых подходов необходимо создание новых высокоточных технологий. В нашей лаборатории рассматривается возможность создания системы q-битов на основе электронной системы, локализованной над поверхностью криодиэлектрика с $(\epsilon-1)\ll 1$. Электроны в такой системе удерживаются в потенциальных ямах в перпендикулярном к поверхности электрическом поле.

Локализованные состояния электронов над поверхностью диэлектрика.

Электрон, находящийся вблизи поверхности диэлектрика, притягивается к ней силами электростатического изображения. Однако внутрь он проникнуть не может из-за потенциального барьера на границе диэлектрика, который составляет от нескольких десятых до нескольких единиц эВ для разных веществ.

Расчет, проведенный методом изображений, показывает, что заряд взаимодействует с поверхностью с силой

$$F(z) = -\frac{e^2}{4z^2\epsilon_1} \cdot \frac{\epsilon - \epsilon_1}{\epsilon + \epsilon_1},$$

а энергия взаимодействия

$$W(z) = \int_z^{\infty} F(h) dh = -\frac{e^2}{4z\epsilon_1} \cdot \frac{\epsilon - \epsilon_1}{\epsilon + \epsilon_1},$$

где ось Z направлена по нормали от поверхности, ϵ - диэлектрическая проницаемость диэлектрика, ϵ_1 - диэлектрическая проницаемость газа, окружающего электрон. В эксперименте [1], когда плотность молекул газа $n < 10^{20}$, ϵ_1 полагалась равной 1. Величина ϵ близка к единице (например, для жидкого ${}^4\text{He}$ $\epsilon = 1,0572$). При этих условиях

$$W(z) = -\frac{e^2}{4z} \cdot \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 1}.$$

Таким образом, потенциал сил изображения

$$\varphi(z) = -\frac{e}{4z} \cdot \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 1} = -\frac{Qe}{z}, \quad (1)$$

и электрон оказывается в потенциальной яме (рис.1), ограниченной с одной стороны барьером, который можно считать бесконечно большим, $\varphi(z) = +\infty$ при $z \leq 0$.

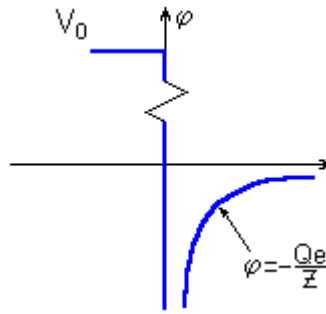


Рис.1

Спектр энергетических уровней электрона в такой потенциальной яме

$$E_n = -\frac{mQ^2 e^4}{2\hbar^2 n^2},$$

а среднее расстояние от электрона до поверхности диэлектрика на n -м энергетическом уровне

$$\langle z_n \rangle = \frac{3}{2} n^2 \frac{a_0}{Q},$$

где $a_0 = \hbar^2 / me^2 = 0,529 \text{ \AA}$ - боровский радиус. У многих распространенных диэлектриков величина $(\epsilon-1)$ отличается от 1 в большую сторону, имея тот же порядок (например, тефлон - 2,04, кварц - 3,2, алмаз - 5,5). В этом случае $\langle Z_1 \rangle \sim a_0$, и электроны оказываются привязанными к отдельным атомам или к дефектам поверхности; тем самым получается картина обычной электризации. Напротив, для таких диэлектриков, как конденсированные водород, гелий или неон, выполняется условие $(\epsilon-1) \ll 1$, что дает $\langle Z_1 \rangle \gg a_0$ и электрон локализуется далеко от поверхности ($\langle Z_1 \rangle \sim 30-150 \text{ \AA}$). Вследствие этого электрон имеет возможность свободно перемещаться вдоль поверхности.

На близких расстояниях от поверхности потенциал $\varphi(z)$ отклоняется от (1), но мы не будем этого учитывать, тем более что $\langle Z_1 \rangle \gg a_0$. Более аккуратный расчет приведен в [1].

Криодиэлектрики и квантовые компьютеры.

Электронные системы над поверхностями жидкого гелия и твердых водорода и неона наблюдались экспериментально, в том числе и в нашей лаборатории ([1],[3]). Если кинетическая скорость движения электронов вдоль поверхности $E_k \ll (E_2 - E_1)$, то

электроны почти все время находятся в основном состоянии с энергией E_1 , составляющей несколько мэВ. При помощи электродов, расположенных под поверхностью диэлектрика, можно создать периодический потенциал, в котором «левитирующие» электроны будут образовывать цепочку или матрицу. Изменяя форму этого потенциала, можно добиться взаимодействия между электронами.

	T ₃ , К	P ₃ , Торр
H ₂	14,0	54
D ₂	18,7	128,5
Ne	24,6	324

Таблица 1. Параметры тройной точки некоторых криодиэлектриков.

Таким образом может быть приготовлена система q-битов. Для того чтобы перевести электрон в возбужденное состояние, достаточно осветить его лазером, частота излучения которого является резонансной ($\hbar\omega = E_2 - E_1$). Это условие легко выполнить, изменяя величину прижимающего электрического поля \vec{K}_z . При этом поправки к уровням энергии будут равны

$$\Delta E_n = eK_z \langle z_n \rangle.$$

Создание такой управляемой системы – лишь первый шаг на пути к квантовым компьютерам. Для получения полноценной вычислительной системы или устройства хранения информации необходимо выполнение определенных специфических условий, рассмотрение которых выходит за рамки данной работы.

Одной из важнейших частей установки, создающей рассмотренные электронные системы, является эмиттер, напускающий электроны на поверхность диэлектрика. К нему предъявляются достаточно высокие требования. Энергия электронов, долетающих до диэлектрика, не должна превышать барьер на его поверхности, иначе электроны проникнут внутрь. Этого можно добиться, тормозя вылетающие из эмиттера электроны электрическим полем. Но для этого необходимо отсутствие разброса электронов по энергии. Нельзя также не учитывать влияния самого тормозящего поля на систему. Справиться с проблемой торможения электронов удавалось за счет плотных насыщенных паров газа, находящегося над диэлектриком – электроны термолизировались в результате столкновений с атомами.

Использовавшийся в установке термоэмиттер – вольфрамовая нить длиной 2 мм – разогревалась короткими мощными импульсами. Из-за сравнительно большой длины нити присутствует разброс электронов по энергии, а сам пучок получается достаточно широким. Другие широко распространенные эмиттеры также имеют свои недостатки,

например, полевые эмиттеры, для работы которых необходимо напряжение порядка 1 кэВ. Идеальным эмиттером в данной ситуации могла бы быть тончайшая иголка с небольшим пороговым напряжением начала эмиссии.

Ближайшей нашей задачей по улучшению эмиссионных характеристик системы является рассмотрение вариантов использования в качестве точечного эмиттера углеродных нанотрубок.

Углеродные нанотрубки.

Нанотрубки впервые обнаружил японский ученый Иджима в 1991 году. Он занимался изучением осадка, образовавшегося на катоде при распылении графита в электрической дуге, и обратил внимание на его необычную волокнистую структуру. Исследования, проведенные с помощью электронного микроскопа, показали, что длина трубочек составляет от одного до нескольких микрон, а диаметр нитей не превышает нескольких нанометров.

Простейшая модель нанотрубки (см. рис.2) – свернутый в виде цилиндра слой, состоящий из атомов углерода, упакованных по типу графита (двумерная гексагональная решетка). Из слоя вырезается лента LL' , которая затем «сворачивается» в цилиндр. От угла ϕ - так называемого «угла хиральности (chirality)» - зависит степень «скрученности» трубки, наглядно показанная на рисунке при помощи красной цепочки ячеек.

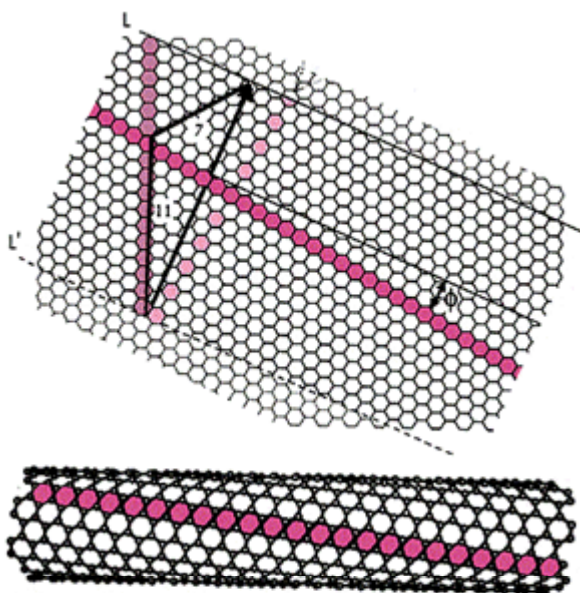


Рис.2.

Нанотрубки с различной хиральностью – это полимеры разного строения, поэтому они обладают разными электрическими свойствами. Большая часть нанотрубок обладает металлической проводимостью, однако некоторые нанотрубки – полупроводники с шириной запрещенной зоны 0,1 – 0,3 эВ.

По геометрическим параметрам нанотрубки делятся на два класса – однослойные (одностенные, Single-Walled NanoTube, SWNT) и многослойные (Multi-Walled NanoTubes, MWNT). Диаметр однослойных трубок $d_{sw} \sim 1$ нм, многослойных $d_{mw} \sim 10 - 30$ нм. Если наблюдаемая структура одностенных нанотрубок сходна с изображенной на рис.2, то многослойные трубки отличаются разнообразием форм и размеров. По мере увеличения количества слоев появляется все больше дефектов, таких, как семиугольные и пятиугольные ячейки, приводящих к искривлениям и переплетениям нанотрубок между собой. На рис.3 представлены изображения многослойных нанотрубок, полученные в [7] с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM).

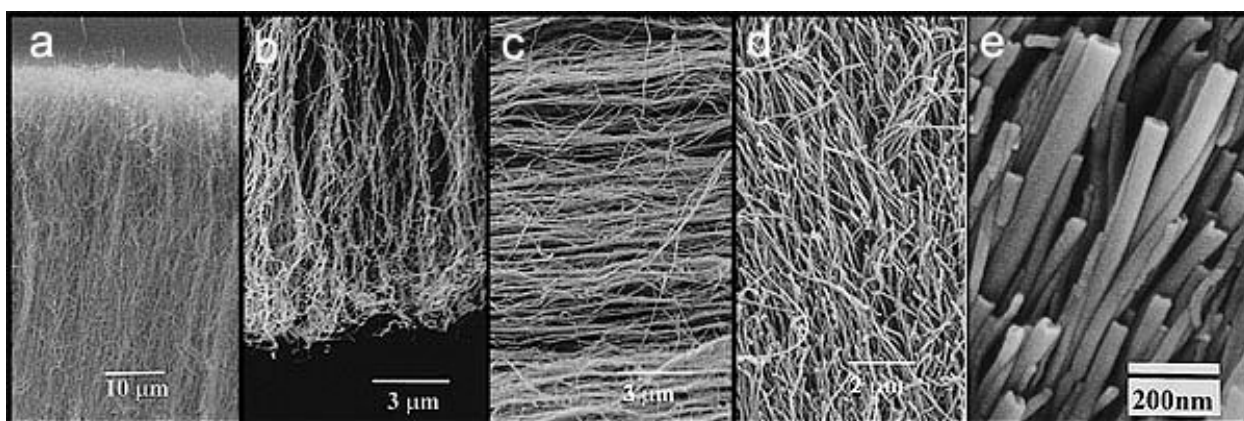


Рис. 3.
«Лес» многослойных нанотрубок. На рис. 3с изображены средние части MWNTs, на остальных – вершины в разном разрешении.

На рисунке 4, полученном в [7] с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ТЕМ), видно внутреннее строение MNWT – много концентрических слоев и внутренняя полость. Изображения однослойных нанотрубок получить несколько сложнее из-за их меньших размеров, к тому же при параллельном росте они часто слипаются в конусообразные пучки (рис.5).

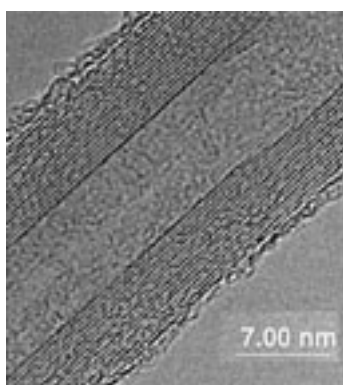


Рис.4. Строение MWNT.

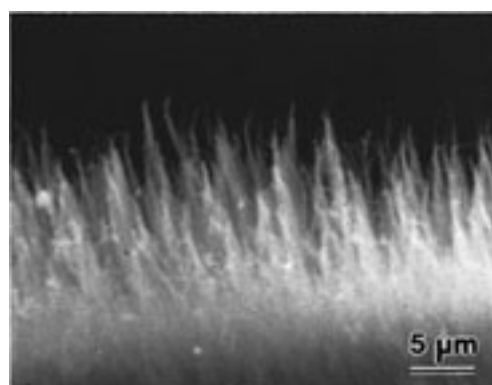


Рис.5. SWNTs, полученные в [8].

Сейчас разработано несколько достаточно надежных методов изготовления нанотрубок. Один из них, химический, заключается в нагревании ферроцена или похожих углеродистых соединений (должен присутствовать металл в качестве катализатора) в специальной печи и последующем осаждении на специальном электроде, покрытом мелкодисперсным *Ni* или *Co*. В других работах нанотрубки получались испарением углерода в электрической дуге. При этом они росли прямо на электродах или на стенках камеры. Образцы одностенных нанотрубок, находящиеся в нашем распоряжении [10], были получены при помощи испарения углерода электронной пушкой. Специальные методы используются для создания химически модифицированных или легированных трубок.

Обычно, помимо нанотрубок, в получившемся осадке много различных примесей, таких, как аморфный углерод или фуллерены C_{60}, C_{70}, C_{80} . Удалить примеси можно с помощью ультразвукового диспергирования в метаноле и последующего разделения на центрифуге.

Существует мнение, что нанотрубки были впервые получены достаточно давно, но поначалу их просто не заметили. Действительно, эти полимеры получают в большом количестве разных экспериментов при сильно различающихся условиях, с разными источниками углерода и субстратами для роста трубок. Например, в [9], при использовании метана CH_4 и азота N_2 , были получены нанотрубки (рис.6), состоящие их «нано-колокольчиков» (nanobells).

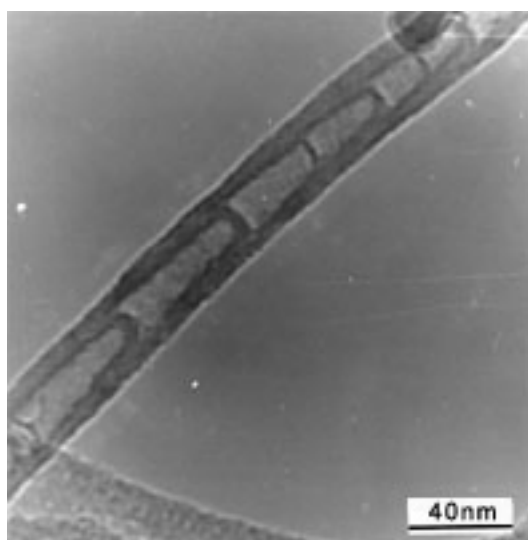


Рис. 6. “Nanobell” MWNT.

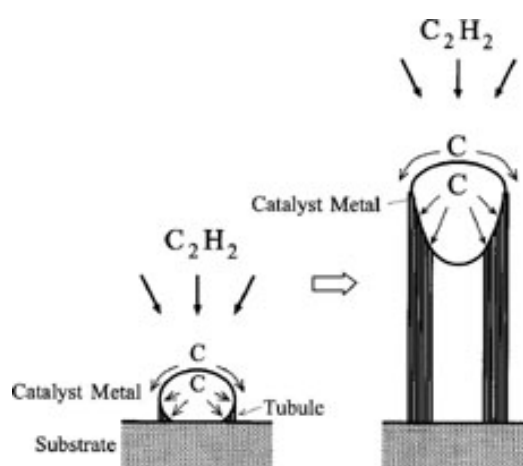


Рис. 7. Рост нанотрубок.

Также различаются параметры роста нанотрубок. На рисунке 7 показан один из наблюдавшихся [8] способов роста нанотрубок, при котором на вершине оказывалась наночастица (чаще металлическая) субстрата. Установить это можно с помощью картины

дифракции электронов на трубке. Также возможен рост поверх наночастицы или вообще без ее участия. Иногда в качестве субстрата для новой нанотрубки выступает старая.

Эмиссионные свойства нанотрубок.

Благодаря разнообразию форм, размеров и других характеристик эмиссионные свойства нанотрубок также заметно варьируются для разных образцов. Однако, в большинстве экспериментов обнаруживалась зависимость плотности тока с нанотрубок от электрического поля, хорошо согласующаяся с теорией Фаулера-Нордхейма (FN). Эта теория применяется для описания эмиссии из металлов и может быть описана формулой

$$I \propto \frac{E^2}{\Phi} \exp\left(\frac{B\Phi^{3/2}}{E}\right),$$

где $E = \beta E_0$ – локальное электрическое поле, E_0 – среднее поле между катодом и анодом, β – коэффициент усиления поля, зависящий от геометрии эмиттера, Φ – работа выхода, $B = 6,83 \times 10^9 V \cdot eV^{-3/2} \cdot m^{-1}$ – константа. При построении графиков для наглядности используется также так называемое «FN-построение» - зависимость $\ln(I/E_0^2)$ от $\frac{1}{E_0}$, которая, согласно формуле Фаулера-Нордхейма должна быть прямой линией.

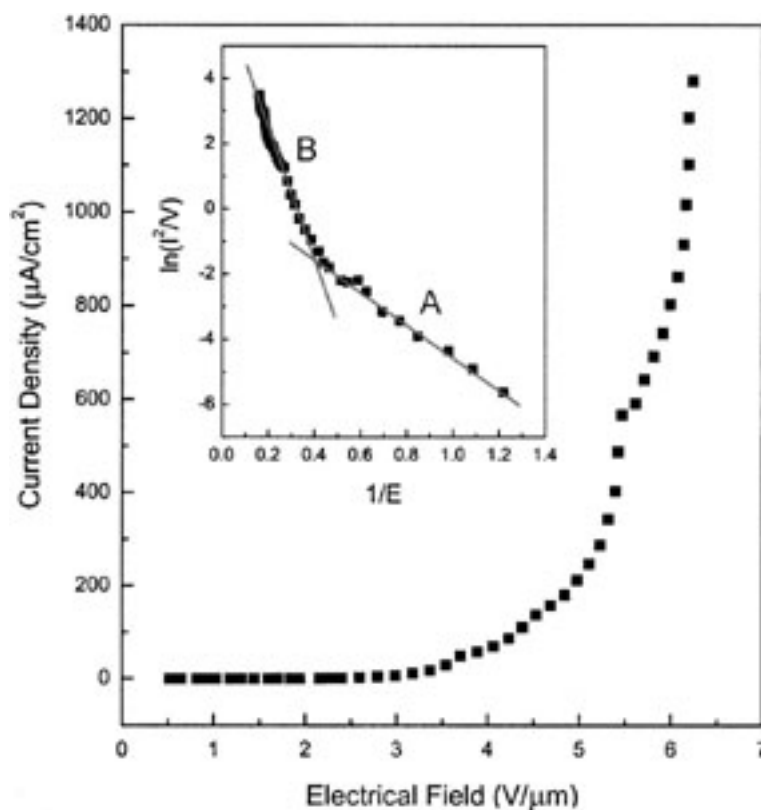


Рис. 8. Типичная ВАХ пленки с нанотрубками.

На рисунке 8, взятом из [9], показана типичная вольтамперная характеристика пленки с нанотрубками. Поля, при которых начинается эмиссия, обычно составляют несколько вольт на микрометр. Значения коэффициента β могут достигать нескольких тысяч и даже десятков тысяч благодаря тонким и достаточно острым вершинам нанотрубок. Природа излома на FN-построении еще до конца не понятна, но она, вероятнее всего, связана с изменением геометрических параметров части поверхности трубок, вовлеченной в процесс эмиссии. Например, после некоего порогового значения напряженности поля около трубки эмиссия электроны начинают также вылетать с ее боковой поверхности.

Благодаря тому, что нанотрубки, в том числе и одностенные, являются соединениями, очень устойчивыми к химическим и физическим воздействиям, улучшения их эмиссионных свойств можно добиться специальной обработкой. В ранних работах осадок, содержащий нанотрубки, смешивался с эпоксидной пастой, и полученный состав наносился на электрод для последующих измерений. В [11] производилась механическая обработка в ступке (mechanical grinding), после чего материал помещался в ультразвуковую ванну с этанолом. В результате на специальных лентах с клеем осаждались нанотрубки с улучшенными характеристиками (уменьшалась толщина и убирались лишние углеродные образования). Таким способом удавалось не только уменьшить пороговое значение напряженности поля, при котором начиналась эмиссия, с 3 до $1 \text{ V}/\mu\text{m}$, но и повысить стабильность эмиссии, в три раза снизив отношение $\Delta I/I$.

После проведенного анализа результатов, полученных в различных лабораториях, можно сделать несколько важных заключений. Во-первых, эмиссионные свойства нанотрубок изучались при высоких температурах (в основном, при комнатной). При азотных и гелиевых температурах, что особенно важно в нашем случае, нанотрубки практически не изучены. Во-вторых, результаты, полученные другими исследователями при низких температурах, могут коренным образом отличаться от тех, которые можем получить мы, в первую очередь из-за различной структуры образцов. Наконец, большинство известных экспериментов было проведено над пленками, покрытыми «лесом» нанотрубок. Это связано с тем, что исследования эмиссии с нанотрубок в большинстве случаев ведутся с целью создания плоских дисплеев (field emission display, FED), призванных составить конкуренцию существующим жидкокристаллическим экранам или даже полностью их заменить. В нашем случае идеальным эмиттером является тонкая металлическая игла с выращенной на ее конце одной нанотрубкой или направленным пучком (есть гипотеза, что плотно скрученный пучок нанотрубок может иметь лучшие характеристики, нежели одна трубка или целая поверхность). Эти факторы

дают исчерпывающее обоснование необходимости проведения собственного эксперимента по эмиссии нанотрубок при низких температурах (см. табл.1). Поскольку имеющийся образец с нанотрубками представляет собой круглую пластинку диаметром несколько миллиметров, мы рассматриваем возможность изготовления собственных образцов нужной геометрии. Исследования поверхности образца на металлографическом микроскопе МИМ-7 с максимальным увеличением в 1440 раз показали, что поверхность углерода изобилует различными выступами и впадинами, что может существенно сказаться на характере эмиссии.

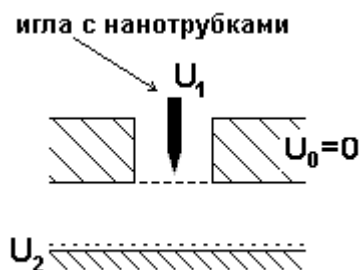


Рис. 9.

Рабочая часть проектируемой экспериментальной установки схематически показана на рис.9. Эта часть будет помещена в откачанную стеклянную колбу, возможно, с геттером.

Автоматизация измерений.

При подготовке к эксперименту особое внимание уделяется автоматизации процесса измерений. Использование компьютера позволяет собирать большее количество данных и обрабатывать их сразу во время проведения эксперимента. Во многих случаях это позволяет повысить точность измерений и выявить специфические особенности экспериментальных зависимостей, которые могут быть пропущены при ручной обработке поступающих результатов. Помимо быстроты и наглядности, а также удобного способа хранения информации, компьютер также предоставляет цифровые методы обработки данных, в частности, возможность аппроксимации или Фурье-анализа.

Подключение к компьютеру таких специализированных цифровых приборов, как, например, синхронный детектор (Lock-In Amplifier), позволяет соединить широкие возможности таких приборов с удобными средствами компьютерной обработки и хранения информации. Чувствительность Lock-In'a на переменном токе имеет порядок несколько нановольт. Для детектирования и измерения величины сигнала применяется метод фазочувствительного детектирования. При этом на исследуемый образец подается определенный эталонный сигнал, а полученный отклик перемножается с опорным

сигналом. В том случае, если частота этих сигналов совпадает, то после прохождения результата их перемножения через фильтр, отсекающий переменную компоненту, остается сигнал, пропорциональный амплитуде исходного отклика, полученного с экспериментальной установки. Характеристики синхронного детектора позволяют детектировать сигнал с частотой 10 kHz и шириной полосы 0.01 Hz. В прибор встроено два устройства ЦАП и несколько АЦП, что позволяет не только получать данные, но и управлять экспериментом.

В качестве операционной системы используется Linux с патчем Real Time Linux версии 3.0pre8. Применение патча RTlinux позволяет превратить Linux в систему реального времени. При этом над ядром операционной системы (kernel) появляется ядро реального времени с высшим приоритетом. Основной задачей систем реального времени является обработка сигналов с гарантированным временем реагирования, т.е. существует определенный класс сигналов, для которых система реального времени гарантирует, что их обработка для получения отклика даже в худшем случае начнется не позднее, чем через определенное время после его поступления. Для указанной версии RTlinux это время составляет 15 мкс. Таким образом, реализуется достаточно быстрый опрос синхронного детектора и прием данных в память компьютера. Система команд и внутренний язык Lock-In'a достаточно просты, а поток получаемых данных выводится в файл в удобном для дальнейшей обработки виде.

В качестве упражнения по освоению синхронного детектора, системы его конфигурирования и внутреннего командного языка, а также системы Linux и X-Windows, мной был проведен эксперимент по снятию вольтамперной характеристики миниатюрного триода БСЗБ. Принципиальная измерительная схема приведена на рис. 10.

Для упрощения задачи сетка лампы была соединена с анодом. Напряжение, подаваемое на вход ADC2, определяло ток, текущий через лампу. Величины сопротивлений выбирались, исходя из ограничения уровня сигнала на входе Lock In'a, равного 12 В. По той же причине автоматическое управление высоким напряжением на лампе было затруднительным, и напряжение изменялось вручную на высоковольтном источнике. Значение этого напряжения снималось с ADC1, на который оно подавалось с делителя.

Обработка полученных данных, выполненная при помощи программы GnuPlot, проводилась непосредственно после эксперимента, что давало возможность сразу оценить разумность результатов эксперимента, возможные источники погрешностей и, при необходимости, провести измерения снова. Это особенно важно для низкотемпературных измерений, а также для исследований рассматриваемых электронных систем, в которых

время жизни свободного заряда над поверхностью криодиэлектрика порой не превышает нескольких минут.

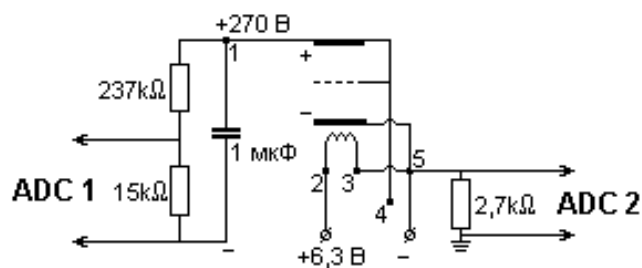


Рис. 10. Цифрами 1-5 обозначены номера ножек лампы в соответствии с ее принципиальной схемой. Указаны рабочее напряжение и напряжение питания.

При выполнении данного эксперимента с триодом вначале была получена ВАХ лампы в рабочем режиме, при напряжении питания 6,3 В (см. рис 11). Из-за ограничения

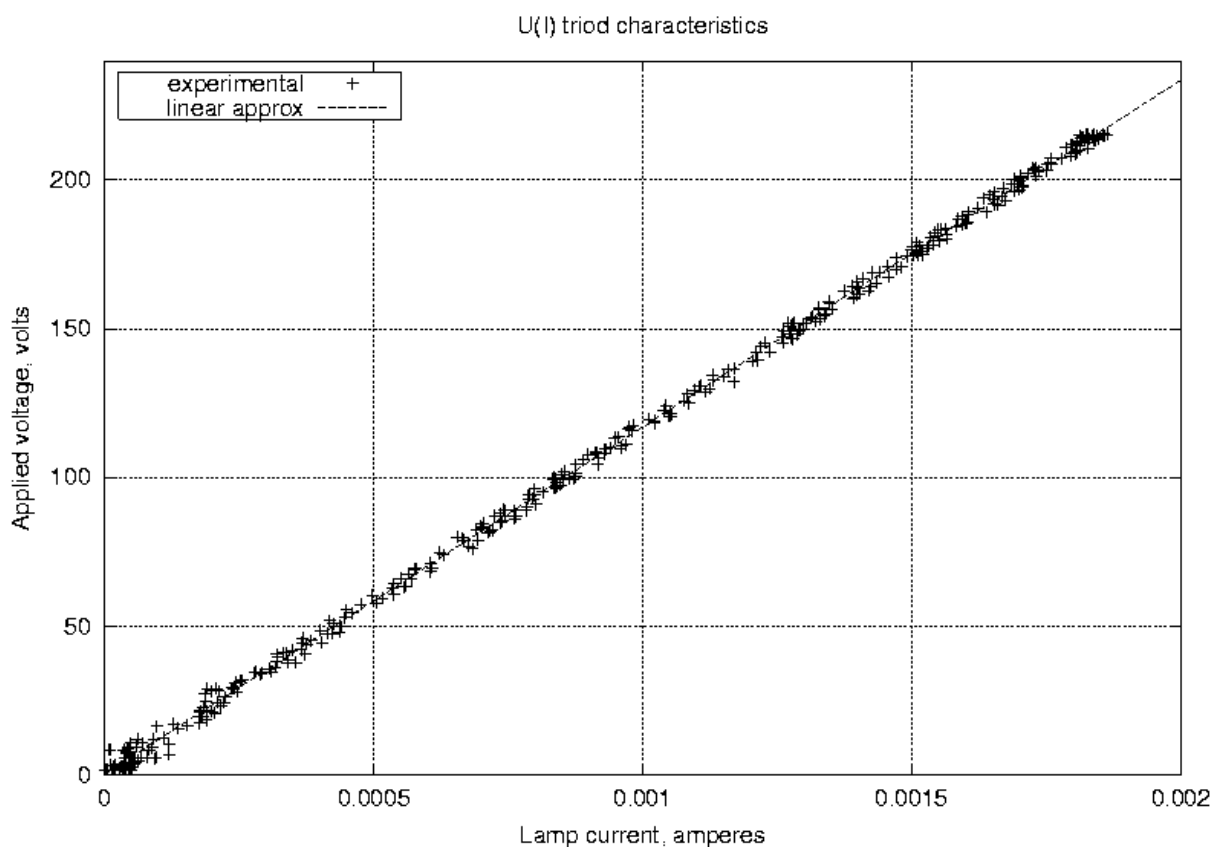


Рис. 11. ВАХ триода БСЗБ.

тока на источнике высокого напряжения не удалось снять вольтамперную характеристику дальше, чтобы увидеть выход кривой на насыщение. Благодаря автоматизации установки, появилась возможность сразу провести повторный эксперимент с пониженным до 2,6 В напряжением накала лампы, что и позволило выявить искомую особенность (рис. 12).

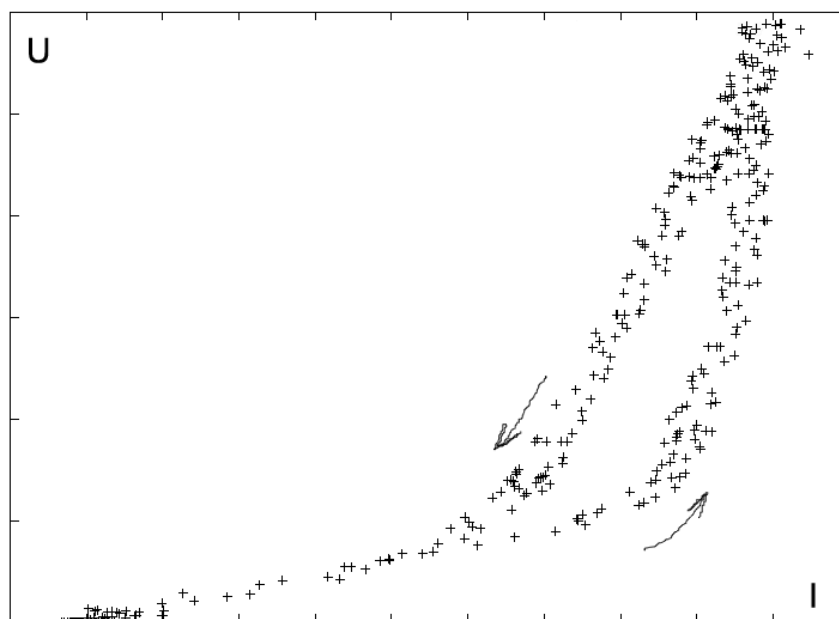


Рис. 12.

При проведении эксперимента по эмиссии нанотрубок автоматизация процесса измерений оправдывается также необходимостью измерять ток на уровне 10^{-8} A/cm^2 , выделяя его на фоне шумов.

Литература.

- [1] Завьялов В.В., Смольянинов И.И.
Эффект квантового преломления в газообразных H_2 , D_2 , Ne и He для электронов, локализованных над поверхностями кристаллических водорода, дейтерия и неона
// ЖЭТФ, 1988, Т.94, вып.1, с. 307-317.
- [2] Эдельман В.С.
Левитирующие электроны
// УФН, 1980, Т.130, вып.4, с. 675.
- [3] Завьялов В.В., Смольянинов И.И.
Экспериментальное наблюдение фоторезонанса электронов, локализованных над поверхностью твердого водорода
// ЖЭТФ, 1987, Т.92, вып.1, с. 339-349.
- [4] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.
Квантовая механика.
М.: Наука, 1989.
- [5] Зотова Е.А.
Спектроскопия двумерных электронных систем над поверхностями твердых криоэлектриков.
Дип. работа на соискание уч. ст. магистра, М.: ИФП РАН, 2001.

- [6] Дьячков П.Н.
Углеродные нанотрубки – материалы для компьютеров XXI века
// Природа, 2000, № 11.
- [7] Andrews R., Jacques D., Rao A.M. et al.
Continuous production of aligned carbon nanotubes: a step closer to commercial realization
// Chemical Physics Letters 303 (1999) p.467-474.
- [8] Tanemura M., Iwata K., Takahashi K. et al.
Growth of aligned carbon nanotubes by plasma-enhanced vapor deposition: Optimization of growth parameters
// Journal of Applied Physics 90 (2001) №3 p. 1529-1533.
- [9] Zhong D., Liu Sh., Zhang G. et al.
Large-scale well aligned carbon nitride nanotubes films: Low temperature growth and electron field emission
// Journal of Applied Physics 89 (2001) №11 p.5939-5943.
- [10] Sinitsyn N.I., Gulyaev Yu.V., Torgashov G.V. et al.
Thin film consisting of carbon nanotubes as a new material for emission electronics
// Applied Surface Science 111 (1997) p.145-150.
- [11] Ito F., Konuma K., Okamoto A.
Electron emission from single-walled carbon nanotubes with sharpened bundles
// Journal of Applied Physics 89 (2001) №12 p.8141-8145.
- [12] Kim J., No K., Lee Ch. J.
Growth and field emission of carbon nanotubes on electroplated Ni catalyst coated on glass substrates
// Journal of Applied Physics 90 (2001) №5 p. 2591-2594.
- [13] Alphenaar B.W., Tsukagoshi K., Wagner M.
Spin transport in nanotubes
// Journal of Applied Physics 89 (2001) №11 p. 6863-6867.
- [14] Davydov D.N., Li J., Shelimov K.B. et al.
Resistance and tunneling spectra of aligned multiwalled carbon nanotubes arrays
// Journal of Applied Physics 88 (2000) №12 p. 7205-7208.
- [15] Lee Yu.-H., Kim D.-H., Hoon-Kim et al.
Carrier transport and electron field-emission properties of a nonaligned carbon nanotube thick film mixed with conductive epoxy
// Journal of Applied Physics 88 (2000) №7 p. 4181-4185.
- [16] Binh V.T., Vincent P., Feschet F. et al.
Local analysis of morphological properties single-wall carbon nanotubes by Fresnel projection microscopy
// Journal of Applied Physics 88 (2000) №6 p. 3385-3391.
- [17] Gommans H.H., Alldredge J.W., Tashiro H. et al.
Fibers of aligned single-walled carbon nanotubes: Polarized Raman spectroscopy
// Journal of Applied Physics 88 (2000) №5 p. 2509-2514.

- [18] Yao N., Lordi V.
Young's modulus of single-walled carbon nanotubes.
// Journal of Applied Physics 84 (1998) №4 p. 1939-1943.