

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИОДА С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ НА ОСНОВЕ УПОРЯДОЧЕННОГО МАССИВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Д. В. Поздняков, А. В. Борздов, В. М. Борздов

Белорусский государственный университет, pozdnyakov@bsu.by

ВВЕДЕНИЕ

Последние несколько лет металлические одностенные углеродные нанотрубки (МОУНТ) считаются наиболее перспективным материалом для изготовления функционирующих на эффекте автоэлектронной эмиссии микро- и наноприборов с холодными катодами [1]. Это обуславливает важность как экспериментального, так и теоретического изучения электрических характеристик приборов на основе МОУНТ, вызванную, в первую очередь, острой необходимостью оптимизации конструктивно-топологических параметров этих приборов. Целью же настоящей работы стала оптимизация такой базовой приборной структуры вакуумной микроэлектроники как триод с плоско-параллельными электродами, в которой катод представляет собой массив вертикально ориентированных МОУНТ, выстроенных в заданном порядке на металлической подложке, а сетка — это такие же нанотрубки, натянутые между несущими металлическими электродами сетки вдоль двух перпендикулярных друг другу направлений, лежащих в плоскости параллельной плоскостям металлических электродов катода и анода.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

При оптимизации триодов рассмотрим предельные значения их топологических параметров, которые не выходят за рамки более-менее разумных с конструктивно-технологической точки зрения величин. То есть по аналогии с работой [2] рассмотрим одностенные (9,9) нанотрубки с открытым концом высотой $L = 100$ нм и диаметром $d = 1.2$ нм. Так же как и в этой работе положим, что расстояние между концами нанотрубок и анодом $H = 100$ нм. В свое время в работах [2, 3] при оптимизации диодов с холодными катодами на основе упорядоченного массива МОУНТ с открытыми концами было проведено детальное обоснование выбора именно таких значений параметров L и H .

Необходимость минимизации суммарной емкости сетка–катод и сетка–анод, с одной стороны, и минимизации компоненты сеточного тока, представляющего собой ток утечки из концов нанотрубок на управляющую сетку в радиальном направлении, с другой стороны, обуславливает необходимость размещения управляющей сетки в одной плоскости с концами МОУНТ. С практической точки зрения случай комнатных температур ($T = 300$ К) является наиболее интересным при проведении оптимизации конструктивно-топологических параметров рассматриваемых триодов.

Требование совместимости оптимизируемых триодов по напряжению питания с другими элементами электроники наряду с требованием минимизации рассеиваемой мощности анодом и требованием участия максимального числа электронных подзон в токопереносе обуславливает наложение ограничения на потенциалы как сетки φ_C , так и анода φ_A по величине равной 12 В при нулевом потенциале катода φ_C .

В результате, единственным варьируемым параметром остается расстояние между нанотрубками S . Значение данного параметра должно быть таким, что плотность туннельного тока j достигает условного максимума. Ограничивающим условием в данном случае является рассеиваемая анодом мощность, которая при максимальных потенциалах управляющей сетки и анода не должна превышать 1 МВт/м^2 [3].

Для наглядности на рис. 1 схематически изображена часть поперечного сечения триода вдоль одной из его поперечных осей симметрии.

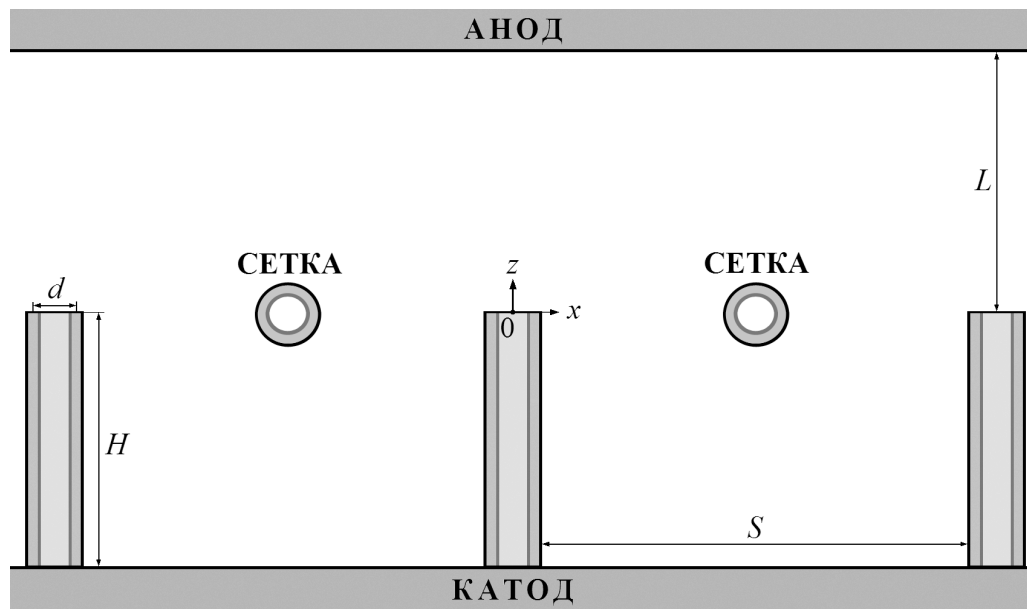


Рис.1. Поперечное сечение триода с холодным катодом на основе массива МОУНТ

Как и в работе [3] для нахождения потенциала φ вне стенок МОУНТ численно решалось уравнение Лапласа

$$\Delta\varphi = 0. \quad (1)$$

Для областей в стенках МОУНТ, занятых электронами π -орбиталей атомов углерода, численно решалось уравнение Пуассона

$$\nabla(\epsilon\epsilon_0 \nabla\varphi) = \rho, \quad (2)$$

в котором избыточная плотность заряда электронов в МОУНТ ρ определялась в приближении локальной плотности исходя из условия, что расстояние между уровнем Ферми и уровнем вакуума является величиной постоянной внутри МОУНТ (условие термодинамического равновесия).

По аналогии с работами [2, 3] для нахождения коэффициента прохождения электронами области между нанотрубкой и анодом численно решались квантовые волновые уравнения, описывающие перенос электронов как в стенках нанотрубок, так и вне этих стенок.

Проведенные расчеты показали, что оптимальная величина расстояния между нанотрубками равна 82 нм.

На рис. 2 представлена рассчитанная зависимость плотности электрического тока анода j в рассматриваемом триоде с оптимальным расстоянием между нанотрубками $S = S_{\text{opt}} = 82$ нм от потенциала управляющей сетки ϕ_G при условии, что значения топологических параметров и температуры равны приведенным выше значениям, а величина ϕ_A составляет 12 В.

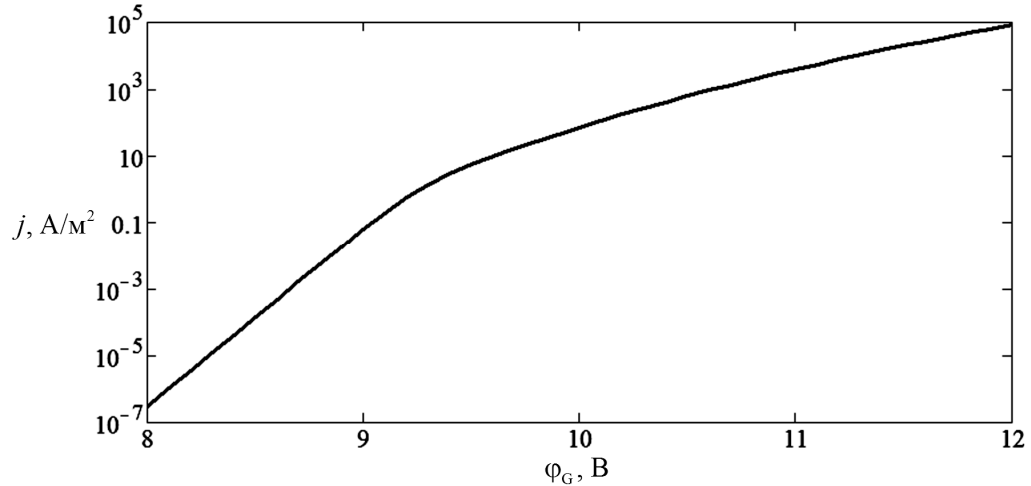


Рис.2. Зависимость $j(\phi_G)$

Из рис. 2 следует, что в отличие от биполярных и полевых транзисторов, а также в отличие от обычных вакуумных триодов, у которых проходные вольтамперные характеристики имеют степенной характер, для рассматриваемого триода с холодным катодом на основе упорядоченного массива МОУНТ характерны показательные проходные вольтамперные характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, оптимизированы топологические параметры триода с холодным катодом на основе упорядоченного массива МОУНТ с открытыми концами и плоско-параллельными электродами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Елецкий, А. В.* Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // УФН. 2002. Т. 172. №4. С. 401.
2. *Pozdnyakov, D.* Optimization of topological parameters of cold cathode based on ordered array of (9,9) carbon nanotubes with open ends: materials of XIII International conference "Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems" / D. Pozdnyakov, A. Borzdov, V. Borzdov. May 16–21, 2011. Ivano-Frankovsk. 2011. Vol. 2. P. 45.
3. *Поздняков, Д.В.* Оптимизация характеристик диода с холодным катодом на основе массива металлических углеродных нанотрубок: сб. научных трудов IV Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники» / Д. В. Поздняков, А. В. Борздов, В. М. Борздов, В. А. Лабунев. 23–24 сентября 2010. Минск. 2010. С. 212.