

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАСШТАБИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НОРМ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНАРНОГО АВТОЭМИССИОННОГО ТРИОДА С ЛЕЗВИЙНЫМ ПОЛЕВЫМ ЭМИТТЕРОМ

Н.А. Дюжев, М.А. Махиборода, Т.А. Грязнева, Е.А. Агарков,
Г.Д. Демин

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

gddemin@gmail.com

Поступила 19.08.2016

В настоящее время наблюдается стремительное возрождение вакуумной электроники, что связано с прогрессом в разработке триодных полупроводниковых устройств с наноразмерным вакуумным каналом, сочетающих в себе высокое быстродействие, радиационную стойкость, устойчивость к агрессивной среде и экстремальной температуре, а также малое энергопотребление [1, 2]. В связи с этим важной задачей становится подбор оптимальных рабочих характеристик вакуумного триода, обеспечивающих устойчивую полевою эмиссию с учётом вариации геометрии конструкции при переходе в субмикронную область проектирования. В работе представлена модель расчёта полевой эмиссии электронов лезвийного катода с наноразмерной кромкой в планарной автоэмиссионной триодной структуре. На основе исследований данной модели выбраны значения радиуса закругления кромки катода, расстояния «катод-анод» и «катод-сетка», позволяющие достичь максимального усиления электрического поля на поверхности катода. Для выбранной конфигурации также проведено сравнение электрических и частотных характеристик триода, определяющих тенденцию изменения параметров эмиссии в процессе масштабирования латеральных размеров исследуемой структуры. В качестве параметров масштабирования были использованы характерные для современной микроэлектронной промышленности топологические проектные нормы в интервале от 90 до 22 нм (90 нм, 65 нм, 45 нм, 32 нм и 22 нм). Полученные результаты могут быть полезны для технологической реализации вакуумных устройств следующего поколения, применимых в космической отрасли, сверхбыстрой радиоэлектронике и телекоммуникационных системах.

УДК 537.533.2

Введение

В процессе перехода к субмикронным технологиям КМОП изготовления полупроводниковых устройств с топологическими нормами проектирования 90 нм и ниже одной из ключевых задач становится сохранение высокого быстродействия и достаточно малого энергопотребления в условиях технологической адаптации устройства к дальнейшему масштабированию. Однако рассеяние носителей заряда на решетке в полупроводниково-

вом материале, присутствие дефектов и дополнительные утечки тока в МОП транзисторах, возникающие при уменьшении технологических размеров, приводят к быстрой деградации рабочих характеристик. Напротив, баллистический транспорт в вакууме обеспечивает стремительный пролет электронов от катода к аноду (максимальная скорость порядка 10^{10} см/с) при полном отсутствии столкновений, что, в свою очередь, является залогом долгого времени жизни носителей и высокого отношения частоты к выходной мощности. Последующие разработки вакуумных трубок и полевых автокатодов нашли широкое применение в сфере телевизионных и компьютерных технологий, в создании микродисплеев, высокочастотной радиоэлектроники и микрофокусных рентгеновских источников. Однако вакуумная микроэлектроника все еще нуждалась в герметичной упаковке, что останавливало процесс схемотехнической интеграции, а также долгое время серьезно проигрывала кремниевым технологиям по параметрам мощности, функциональности и масштабирования. Последние результаты экспериментальной разработки полупроводникового триода с наноразмерным вакуумным каналом в 2012 г., полученные независимо в пионерских работах Кима и Хана [2, 3], открывают путь к новому шагу в развитии вакуумной электроники в наномасштабе, что позволит совместить преимущества малобюджетной, надежной полупроводниковой компонентной базы со значительной скоростью переноса электронов в вакуумной среде, также устойчивой к агрессивным воздействиям и высокой температуре. Более того, подбор материалов с низкой работой выхода и эффективной полевой эмиссией может перевести пороговые напряжения управляющего затвора для включения канала и напряжение питания на стоке в низковольтную область (менее 1 В), что делает параметры такой триодной системы сравнимыми с современными структурами полупроводниковых МОП транзисторов. Поскольку длина свободного пробега электронов в воздухе находится в диапазоне 10-100 нм, для продемонстрированных 150 нм и 20 нм длин канала триода вероятность соударения с молекулами газа пренебрежимо мала, поэтому воздушный зазор также может выполнять роль вакуума в новой концепции автоэмиссионных устройств [4]. Кроме того такой подход предотвращает деградацию эмиссионного катода в процессе постоянного его использования, что повышает долговечность триодов с вакуумным каналом в различных отраслях применений, от астронавтики до ядерной индустрии и телекоммуникаций.

Важной задачей проектирования становится выбор оптимальной конструкции и материалов триодной структуры, что позволит достигнуть значительных эмиссионных свойств, снизить токи утечки в процессе масштабирования и обеспечить хорошую воспроизводимость параметров при размещении устройств на схеме. Несмотря на распространенную конструкцию вакуумного триода с вертикальным полевым эмиттером и круговой апертурой сеточного электрода (так называемая автоэмиссионная структура Спиндта [5]), в матрице вертикальных автоэмиссионных структур технологически трудно добиться воспроизведения идентичных геометрических параметров триодов, что усложняет интеграцию вакуумной электроники в КМОП процесс изготовления полупроводниковых интегральных микросхем. К тому же работа устройства в сверхвысоком диапазоне частот требует обеспечения низкой емкости между катодом и управляющими электродами, что становится возможным в случае использования триодов с плоскостным полевым эмиттером [6], где размер конструкции точно контролируется литографическими нормами проектирования. Приближение проектных норм к нанометровому уровню открывает ряд новых технологически реализуемых перспектив применения горизонтальных вакуумных триодов в космической отрасли, сверхбыстрой электронике и беспроводных телекоммуникациях, что требует дополнительного рассмотрения полевых и частотных характеристик триодных структур с плоским эмиттером, варьируемых в процессе их миниатюризации.

Таким образом, в работе освещаются вопросы влияния масштабирования и вариации геометрических параметров на рабочие характеристики горизонтальной триодной структуры для проектных норм в диапазоне от 90 до 22 нм. В разделе 1 приводится подробное описание выбранной конструкции горизонтального автоэмиссионного триода, где указаны геометрические параметры системы, варьируемые в процессе моделирования. В разделе 2 представлено сравнение форм-факторов усиления поля на поверхности катода в зависимости от геометрических параметров горизонтальной конструкции автоэмиссионного триода. Раздел 3 посвящен сравнению вольт-амперных и частотных характеристик триода в зависимости от технологических норм проектирования, что позволяет определить тенденцию изменения параметров эмиссии и быстродействия триода в процессе масштабирования. В заключение, приводятся предложения по дальнейшей оптимизации выбранной конструкции триода с плоскостным полевым эмиттером.

1. Выбранная конструкция автоэмиссионного триода с плоскостным эмиттером, параметры масштабирования и методика моделирования

В качестве конструкции планарного триода с эмиттером лезвийного типа была выбрана конфигурация, представленная на рис. 1, где показан катод острейного типа с радиусом закругления r , размещенный между двумя сеточными электродами противо-

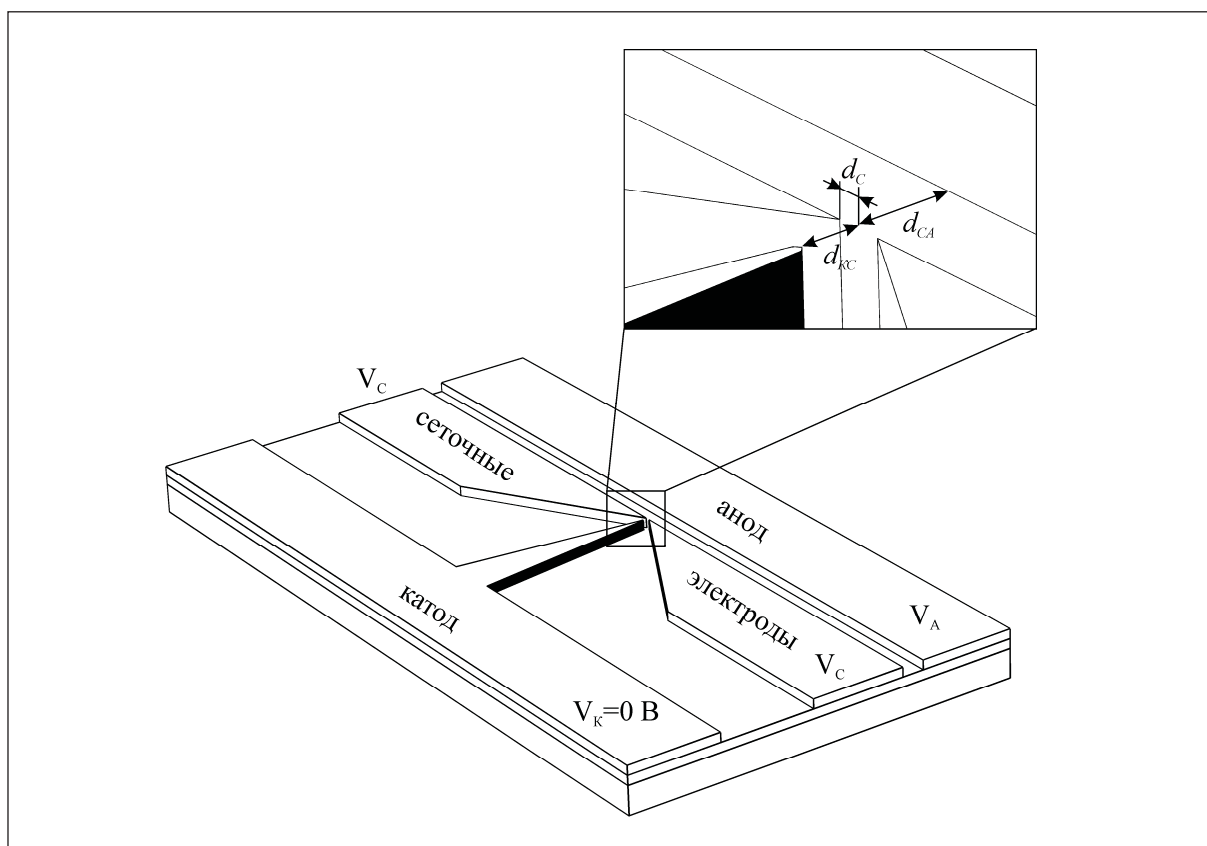


Рис. 1. Конструкция автоэмиссионного триода с плоскостным полевым эмиттером, где d_c – заданная технологическая норма проектирования или горизонтальное расстояние между острием катода и управляющим сеточным электродом, d_{kc} – расстояние между катодом и управляющими сеточными электродами, d_{ca} – расстояние между управляющими сеточными электродами и анодом, $d_{ka} = d_{kc} + d_{ca}$ – расстояние между катодом и анодом, r – радиус острия катода. В обозначениях: V_k – потенциал на катоде, V_a – потенциал на аноде, V_c – потенциал на сеточных электродах.

ложно аноду. Материалом сеточных электродов является Al, в то время как катод и анод триода сформированы из Si на кремниевой подложке с тонким окислом SiO₂. В общем случае полагается, что напряжение на аноде V_A , напряжение на сеточных электродах V_C , а потенциал V_K , прикладываемый к катоду, равен нулю.

Для получения зависимостей полевых и частотных характеристик триода от параметров масштабирования варьируются следующие параметры: d_{KC} - расстояние между катодом и управляющими сеточными электродами (расстояние «катод-сетка»), d_C - горизонтальное расстояние между острием катода и управляющим сеточным электродом, $d_{KA} = d_{KC} + d_{CA}$ - расстояние между катодом и анодом (расстояние «катод-анод»), где d_{CA} - расстояние между управляющими сеточными электродами и анодом (расстояние «сетка-анод»).

Поскольку известно, что с уменьшением радиуса острия эмиттера возрастает электрическое поле на поверхности катода, далее в моделировании взят минимальный радиус r , равный 5 нм. Под технологической нормой проектирования в данной автоэмиссионной системе подразумевается минимальный литографический размер, который устанавливается значением d_C , что определяет горизонтальное расстояние между острием катода и управляющим сеточным электродом. Расстояние d_C соответствует следующим топологическим проектным нормам: 90 нм, 65 нм, 45 нм, 32 нм и 22 нм. Размер расчётной области равен 4.25 мкм на 8 мкм. По умолчанию расстояние d_{KA} полагается равным 500 нм, при этом сеточные электроды расположены на уровне центра кривизны поверхности катода, то есть расстояние d_{KC} равняется - 5 нм. В ходе моделирования каждый из параметров d_{KA} и d_{KC} варьируется в заданном диапазоне.

В качестве программного пакета моделирования выбран Comsol MultiPhysics [7], объединяющий решения из различных областей физики в единую модель, что важно при дальнейшем расчёте вольт-амперных и частотных характеристик триода. Далее в соответствии с выбранной моделью в разделах 2 и 3 представим результаты моделирования форм-факторов усиления поля на поверхности катода, а также основные полевые характеристики триода с плоскостным полевым эмиттером.

2. Сравнение форм-факторов усиления поля на поверхности катода в зависимости от параметров конструкции автоэмиссионного триода

Одной из основных характеристик, определяющих эффективность токовой эмиссии в конструкции вакуумного триода, является показатель усиления электрического поля на поверхности катода или форм-фактор катода. Данный форм-фактор может быть представлен в виде двух составляющих, определяющих связь между локальным электрическим полем $E_{лок}$ вблизи поверхности острия катода и разностью потенциалов «катод-сетка» $\varphi_{KC} = V_K - V_C$ и «катод-анод» $\varphi_{KA} = V_K - V_A$, что в случае $V_K = 0B$ записывается в следующем виде:

$$\beta_C = -\frac{dE_{лок}}{d\varphi_{KC}} = \frac{dE_{лок}}{dV_C}, \quad \beta_A = -\frac{dE_{лок}}{d\varphi_{KA}} = \frac{dE_{лок}}{dV_A}, \quad (1)$$

где β_C - форм-фактор усиления поля от сеточных электродов, β_A - форм-фактор усиления поля от анода. Поскольку $\vec{E}_{лок} = \vec{E}_C + \vec{E}_A$, где $E_C = E_{лок}(V_A = 0B) = \beta_C V_C$, $E_A = E_{лок}(V_C = 0B) = \beta_A V_A$ - индивидуальный вклад в напряженность электрического поля от сеточных электродов и анода соответственно, то форм-факторы β_C и β_A в линейном приближении электрических полей от потенциалов можно представить как:

$$\beta_C = \frac{E_{лок}(V_A = 0)}{V_C}, \quad \beta_A = \frac{E_{лок}(V_C = 0)}{V_A} \quad (2)$$

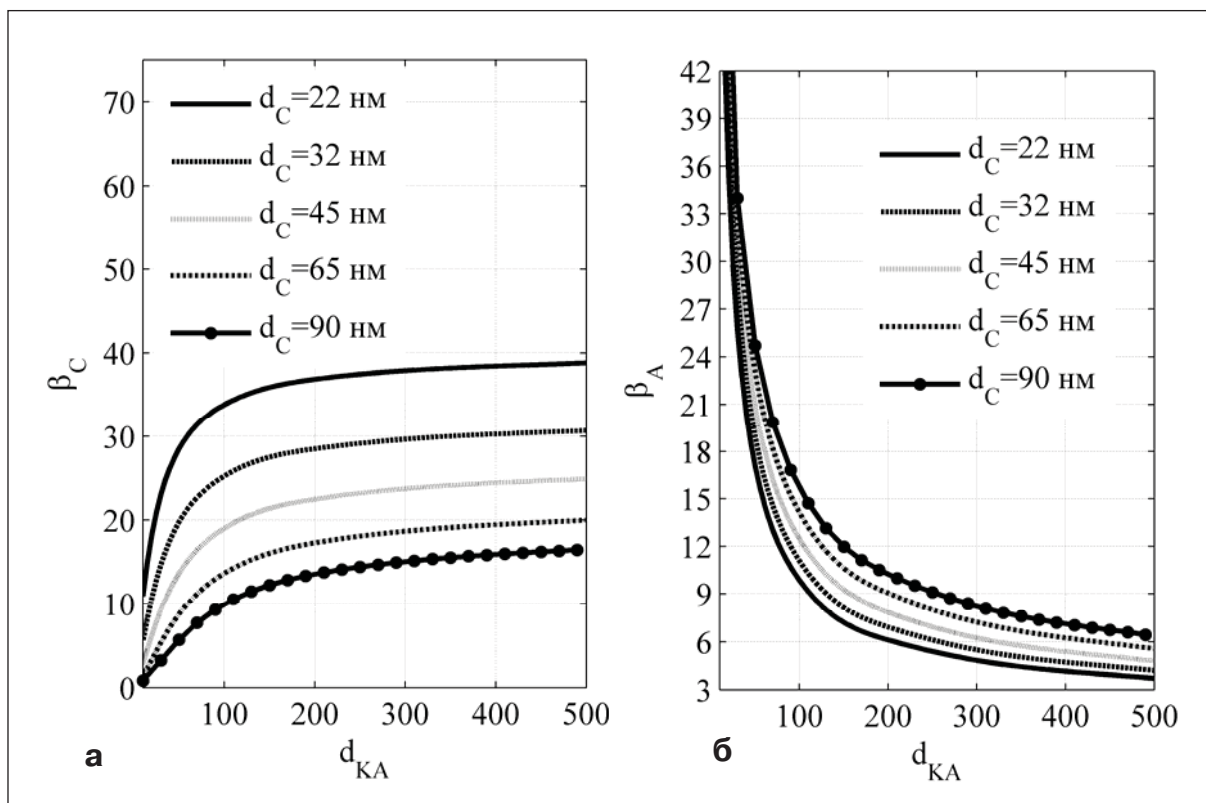


Рис. 2. Зависимость форм-факторов усиления электрического поля на поверхности катода, индуцированных влиянием (а) сеточных электродов и (б) анода от расстояния $d_{КА}$ «катод-анод» для различных топологических норм проектирования.

На рис. 2 представлены монотонные зависимости форм-факторов усиления поля от расстояния «катод-анод» для различных норм масштабирования, которые указывают на ослабление влияния анода и усиление влияния сетки при увеличении значения $d_{КА}$. При этом заметно, что в диапазоне длин $d_{КА} > 90$ нм форм-фактор β_C стремится к насыщению, в то время как форм-фактор β_A значительно уменьшается с возрастанием $d_{КА}$.

В свою очередь, зависимость форм-факторов от расстояния «катод-сетка» представляется немонотонной и обладает экстремумом, что характеризует смену предпочтительного влияния каждого из электродов на формирование электрического поля при сдвиге сетки относительно поверхности катода. При этом максимальное значение β_C соответствует значению $d_{КС} = 5$ нм для 22 нм проектных норм, когда сеточные электроды расположены на уровне острия катода, а минимальное значение β_A для той же нормы проектирования наблюдается при значении $d_{КС} = 30$ нм, что показано на рис. 3. Также стоит учесть, что в этом случае β_C в несколько раз выше β_A для заданной величины $d_{КА} = 500$ нм, что легко понять из рис. 2.

Таким образом, на основе проведенного моделирования форм-факторов усиления электрического поля можно выбрать оптимальные параметры рассматриваемой триодной структуры, позволяющие добиться максимального электрического поля при том же напряжении на электродах. Поскольку управление электрическим полем $E_{лок}$ предполагается осуществлять преимущественно посредством сеточных электродов, далее будем полагать, что наиболее предпочтительным в конструкции триода является

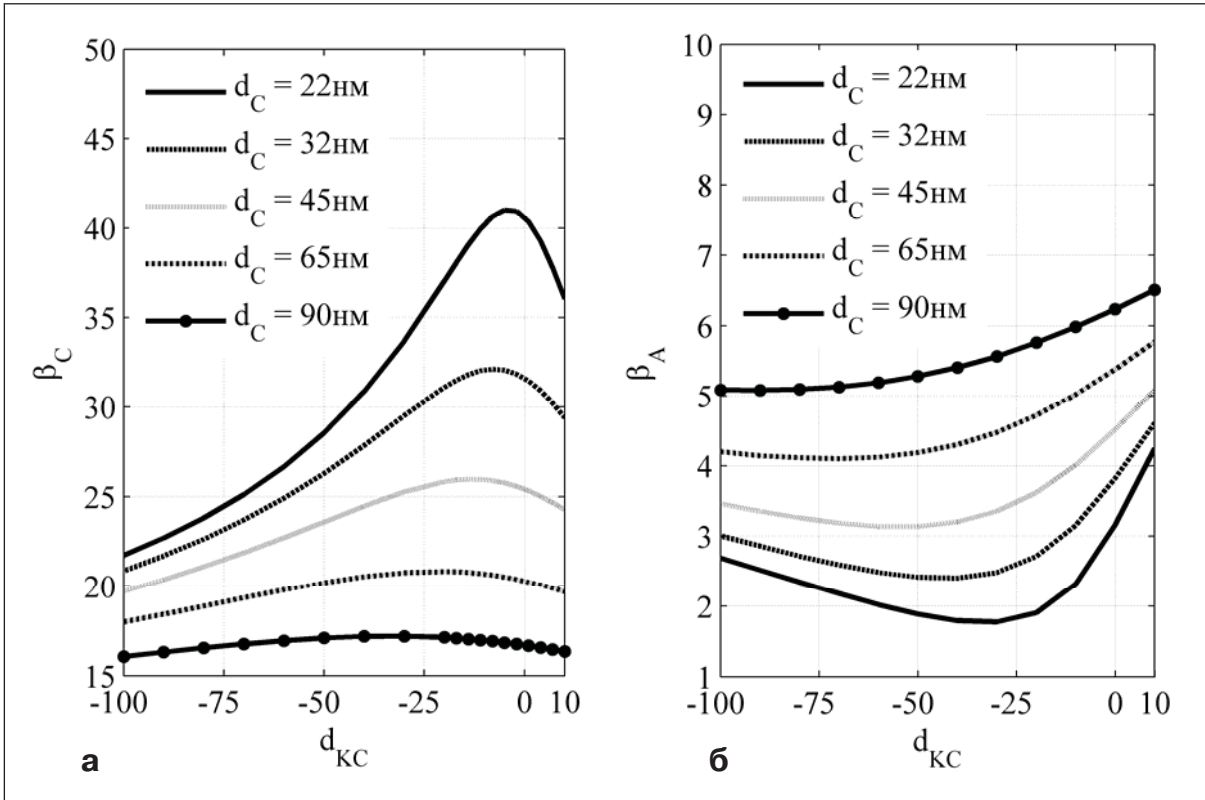


Рис. 3. Зависимость форм-факторов усиления электрического поля на поверхности катода, индуцированных влиянием (а) сеточных электродов и (б) анода от расстояния d_{KC} «катод-сетка» для различных топологических норм проектирования.

расстояние $d_C = 22\text{ нм}$, где в обоих случаях достигается максимальный форм-фактор β_C . В то же время расстояние d_{KA} следует взять равным 500 нм, где форм-фактор β_C приходит к постоянному значению, а форм-фактор β_A значительно ослабевает. Для заданного значения d_{KA} наиболее выгодным является расстояние d_{KC} , равное 5 нм, где на рис. 3 присутствует экстремум зависимости β_C от расстояния «катод-сетка».

Далее проведем соответствующий анализ вольт-амперных и частотных характеристик планарной автоэмиссионной структуры с лезвийным эмиттером для выбранных геометрических размеров конструкции триода при вариации остальных параметров масштабирования.

3. Расчёт вольт-амперных и частотных характеристик автоэмиссионного триода в зависимости от параметров масштабирования

В общем виде согласно обобщенной формуле Фаулера-Нордгейма [8] плотность тока полевой эмиссии $J_{\mathcal{O}}$ в триодной структуре может быть выражена как:

$$J_{\mathcal{O}} = \frac{e^3}{16\pi^2\hbar} \frac{E_{\text{лок}}^2}{\varphi} \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m_e}}{3e\hbar} \frac{\varphi^{3/2}}{E_{\text{лок}}}\right), \quad (3)$$

где e - заряд электрона, m_e - масса электрона, \hbar - редуцированная постоянная Планка, φ - работа выхода в материале катода, причем $E_{\text{лок}} = E_{\text{лок}}(V_A, V_C)$. Поскольку в каждой точке поверхности катода при фиксированном потенциале на аноде и сетке значение напряженности электрического поле является различным, для получения автоэмисси-

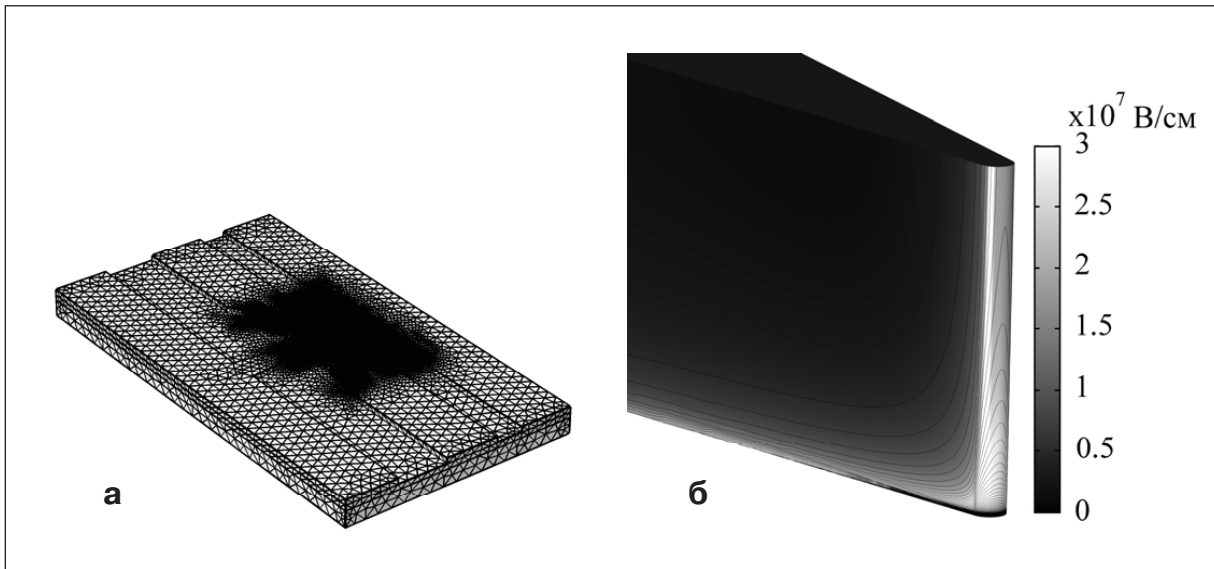


Рис. 4. (а) Расчётная сетка и (б) типичное распределение электрического поля на поверхности катода острейного типа при заданной геометрии автоэмиссионной структуры.

онного тока $I_{\text{э}}$ уравнение (3) следует проинтегрировать по эмитирующей поверхности острья катода $S_{\text{эл}}$, что описывается уравнением:

$$I_{\text{э}}(V_A, V_C) = \int_{S_{\text{эл}}} J_{\text{э}}(V_A, V_C) dS_{\text{эл}} \quad (4)$$

Для получения детального распределения поля $E_{\text{лок}}$ по поверхности катода при построении модели была выбрана более густая сетка в области, прилежащей к вакуумному зазору. Выбранная сетка обеспечивает достаточно гладкие контуры на поверхности полевого эмиттера с постоянным значением электрического поля (рис. 4), что позволяет по формуле (4) наиболее точно рассчитать токи полевой эмиссии. При этом величина электрического поля изменяется в области значений от 0.5 до $3 \cdot 10^7$ В/см, при которых возникает токовая эмиссия преимущественно с острья катода.

Для различных проектных норм d_c были построены зависимости тока эмиссии $I = I_{\text{э}}$ и крутизны триода $g_m = dI / dV_C$ в зависимости от напряжения V_C при фиксированном напряжении на аноде $V_A = 50$ В, что представлено на рис. 5.

Из представленной на рис. 5а вольт-амперной характеристики видно, что заметные автоэмиссионные токи, порядка 0.25 мкА наблюдаются уже при напряжениях на сетке 35 В при расстоянии d_c , равном 22 нм, и при 45 В для проектных норм 45 нм соответственно. Далее ток эмиссии определяется в основном напряжением на сетке и практически не зависит от анодного напряжения при увеличении последнего от 0 до 50 В. Крутизна триода g_m варьируется в диапазоне от 0.023 до 0.2 мкСм соответственно в диапазоне выбранных литографических размеров, что по порядку совпадает с результатами, представленными в работе [2].

Далее важным параметром работы автоэмиссионной структуры, определяющим величину ее быстродействия в процессе масштабирования, является время τ_c , затрачиваемое на зарядку емкости «катод-сетка» в соответствии со следующей формулой:

$$\tau_c = \frac{1}{2\pi f_c}, \quad (5)$$

где $f_c = g_m / 2\pi C_{KC}$, C_{KC} - емкость «катод-сетка», для упрощения рассчитываемая как емкость между обкладками плоского конденсатора.

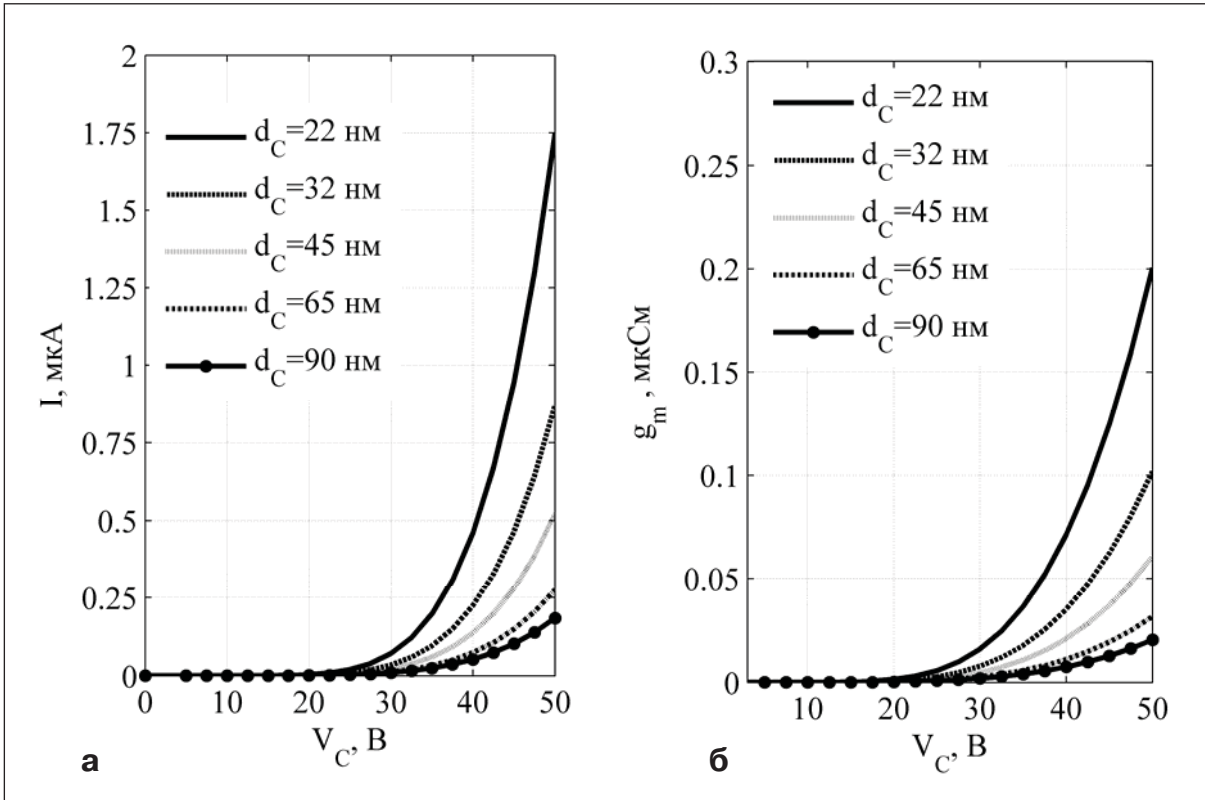


Рис. 5. Зависимость (а) тока эмиссии и (б) крутизны автоэмиссионного триода с плоскостным полевым эмиттером в зависимости от напряжения на сетке V_C при оптимальных геометрических размерах конструкции структуры для различных топологических норм проектирования и значении $V_A = 50B$.

На рис. 6 представлены зависимость емкости C_{KC} от расстояния «катод-сетка», а также рассчитанные по формуле (5) значения времени зарядки междуэлектродной емкости τ_C в зависимости от напряжения сетки V_C при фиксированном напряжении на аноде, равном 50 В. Проведенный расчёт показывает, что с уменьшением проектных норм от 90 до 22 нм убывает емкость C_{KC} , что приводит к спаду времени зарядки τ_C и способствует увеличению быстродействия в несколько раз.

Для оценки быстродействия, или частотного диапазона автоэмиссионной структуры также следует учитывать время пролета электронов от катода к аноду. Аналогичный расчет [9], показал, что структуру электрического поля в междуэлектродном пространстве «катод-анод» можно разделить на две характерные области. Первая – это область промежутка между катодом и сеткой, которая отличается высокой напряженностью и относительной неоднородностью электрического поля. Вторая – область промежутка между сеткой и анодом, которая характеризуется значительно меньшей напряженностью, но высокой однородностью электрического поля.

В связи с этим время пролета электронов от катода к аноду τ_{KA} следует определять как: $\tau_{KA} = \tau_{KC} + \tau_{CA}$, где τ_{KC} и τ_{CA} – время пролета электронами, соответственно, промежутков «катод – сетка» и «сетка – анод». В соответствии с вышесказанным, время пролета электронами междуэлектродного пространства «катод – сетка» можно определить по формуле:

$$\tau_{KC} = \sqrt{\frac{2m_e}{eV_c}} * d_{KC}, \quad (6)$$

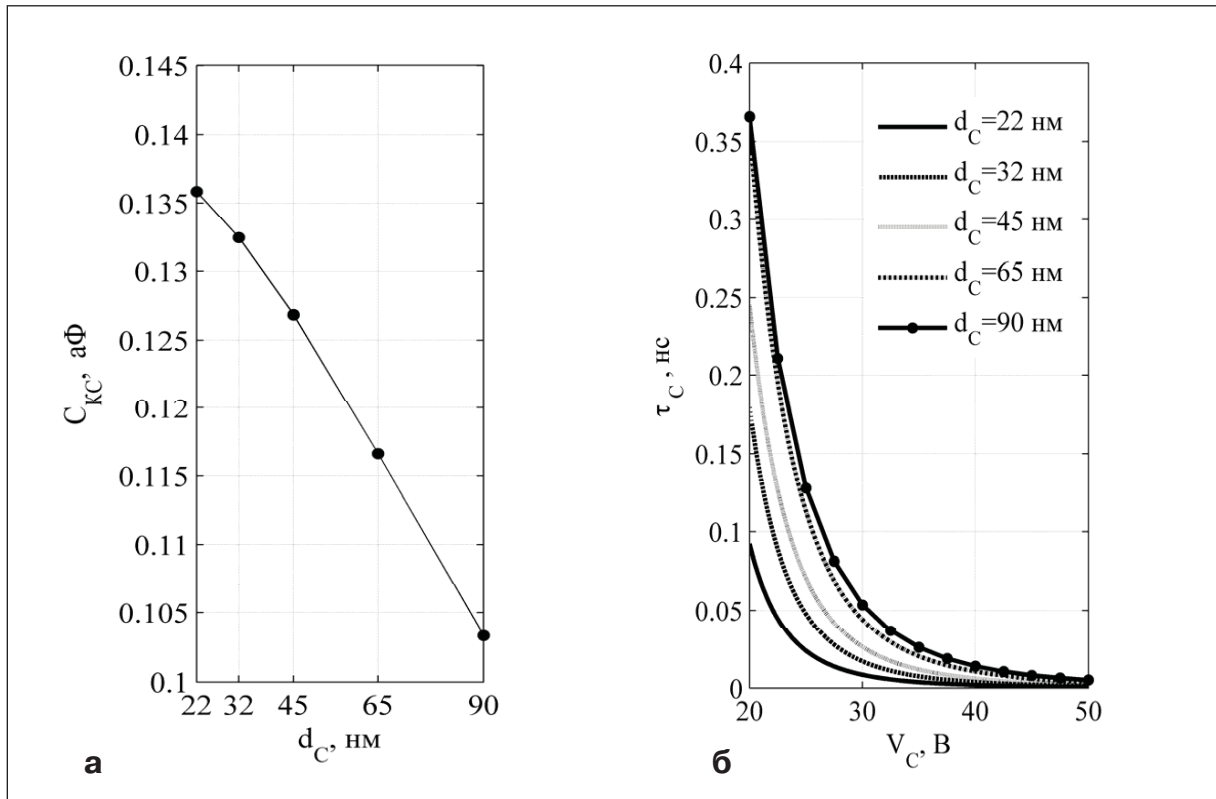


Рис. 6. Зависимость (а) емкости «катод-сетка» от выбранной топологической нормы проектирования и (б) времени зарядки емкости «катод-сетка» от напряжения на сеточных электродах при вариации проектных норм и значениях $V_A = 50B$..

где d_{KC} – промежуток между катодом и сеткой, V_C – напряжение на управляющей сетке, e – заряд электрона, m_e – масса электрона. При расчете времени пролета электронами расстояния «сетка – анод» необходимо принимать во внимание то, что электроны, попадающие в промежуток «сетка – анод», уже получили определенное ускорение под действием потенциала сетки V_C . С учетом данного факта, искомую величину τ_{CA} можно вычислить по формуле:

$$\tau_{CA} = \sqrt{\frac{2m_e}{e}} \frac{d_{CA}}{\sqrt{V_C} + \sqrt{V_A}}, \quad (7)$$

где d_{CA} – расстояние между сеткой и анодом, V_A – напряжение на аноде.

Как видно из рис. 7а, рассчитанная по формулам (6)-(7) величина τ_{KA} составляет десятые доли пс, что во много раз меньше значения τ_C , поэтому при расчёте быстрогодействия и общего времени полевой эмиссии $\tau = \tau_C + \tau_{KA}$ временем пролета «катод-анод» следует пренебречь. Поэтому будем полагать, что $\tau \approx \tau_C$.

В соответствии с [10] рабочую частоту триода f можно определить из условия, что время τ_C должно составлять не более четверти полупериода высокочастотного колебания, что может быть представлено следующим уравнением:

$$f = \frac{1}{8\tau_C} \quad (8)$$

Численная оценка времени τ_C при выбранных геометрических параметрах и рабочих напряжениях триода дает значения f в диапазоне 0.02 – 0.16 ТГц на рис. 7б, что соответствует прямому расчёту вольт-амперных характеристик автоэмиссионной

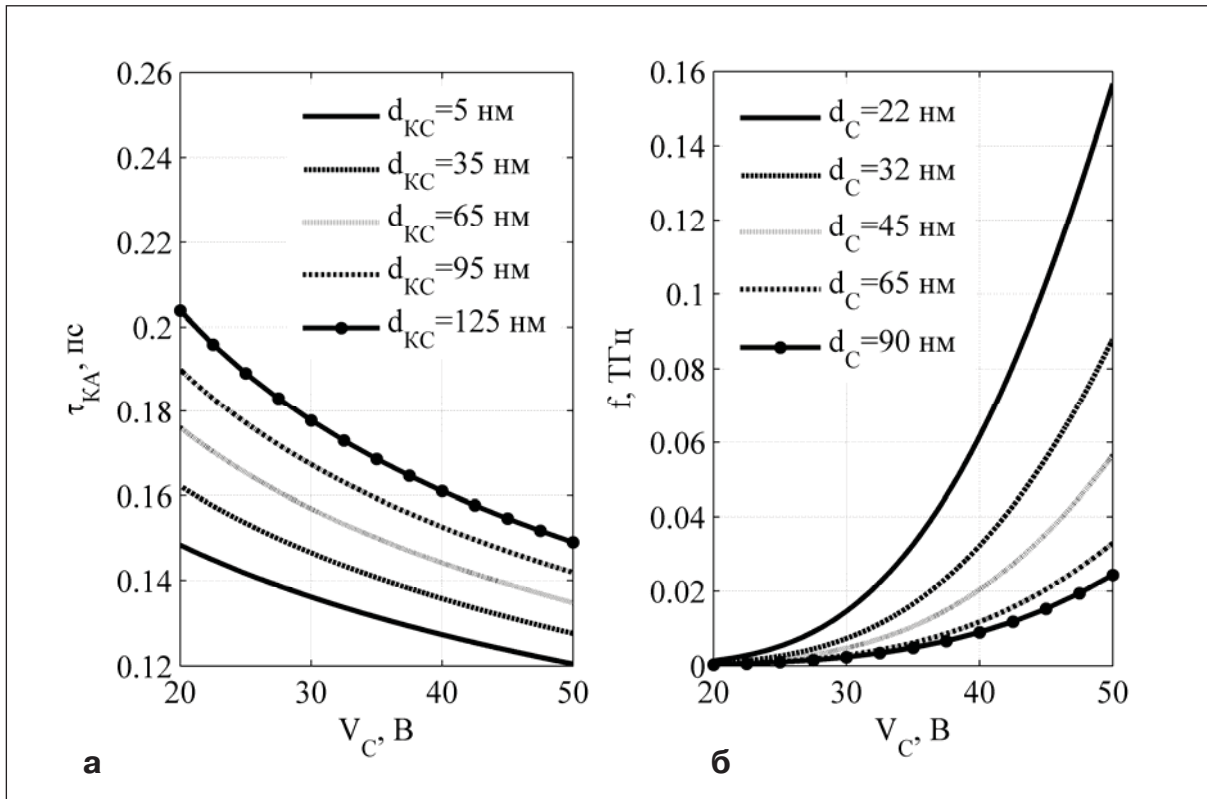


Рис. 7. Зависимость (а) времени пролета «катод-анод» $\tau_{КА}$ при различных расстояниях «катод-сетка» и (б) частоты автоэмиссионного триода f от напряжения на сеточных электродах V_C при фиксированном напряжении на аноде $V_A = 50 В$ для оптимальных геометрических размеров структуры при заданных нормах проектирования.

структуры в пренебрежении временем пролета электронов от катода к аноду с учётом зарядки междуэлектродных емкостей.

В общем случае, междуэлектродные емкости рассчитываются в зависимости от концентрации заряда, что подробно описывается в [11]. Подобный расчёт также приводится в [12], однако приведенная по формулам (5)-(8) оценка быстродействия является более простой и не противоречит результатам экспериментальных исследований [13]. На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что для уменьшения времени τ_C и соответственно для увеличения рабочей частоты f триода следует повышать его анодный и сеточный потенциалы. При этом одним из важнейших изменений геометрических параметров является уменьшение проектных норм планарной структуры, которые определяются разрешением литографических методов.

Выводы

Таким образом, проведенное в работе моделирование полевой эмиссии в конструкции планарного триода с лезвийным полевым эмиттером позволило установить оптимальные параметры геометрии, при которых наблюдается максимальное усиление электрического поля вблизи эмиттирующей поверхности катода под действием управляющего потенциала сеточных электродов. Показано, что масштабирование латеральных размеров исследуемой структуры в соответствии с принятыми в современной технологии топологическими проектными нормами от 90 нм до 22 нм приводит к заметному росту форм-фактора сетки. Одновременно с увеличением расстояния «катод-анод»

до 500 нм и выше значение данного форм-фактора достигает предельной величины. Зависимость форм-факторов с изменением расстояния «катод-сетка» характеризуется наличием экстремумов, отражающих степень влияния анода и сеточных электродов на формирование электрического поля на поверхности эмиттера, причём максимум форм-фактора сетки соответствует смещению сеточных электродов на 5 нм перпендикулярно к поверхности катода. Для расстояния «катод-анод», равного 500 нм, с вариацией расстояния «катод-сетка» при заданных проектных нормах форм-фактор сетки заметно превышает форм-фактор анода, что дает возможность осуществлять управление электрическим полем преимущественно посредством сеточных электродов. Для выбранных оптимальных параметров геометрии автоэмиссионной структуры получены вольт-амперные характеристики триода. Максимальные токи эмиссии при напряжении на сетке от 0 до 50 В варьируются в пределах от 0.23 до 1.75 мкА. Качественная оценка быстродействия и частотных характеристик исследуемой структуры демонстрирует уменьшение времени пролета «катод-анод» с ростом сеточного потенциала при диапазоне рабочих частот от 0.02 до 0.16 ТГц, что соответствует экспериментальным характеристикам автоэмиссионных структур. Полученные результаты могут быть использованы при разработке широкого спектра изделий нано- и микро-системной техники, а также специальной электронной компонентной базы нового поколения. Конкретные разработки, использующие в своей основе исследуемые принципы найдут применение к космической отрасли, медицине, в сфере высокочастотных беспроводных телекоммуникаций.

Литература

1. *Han J.-W., Oh J.S., Meyyappan M.* Nanoscale vacuum channel transistor. // IEEE 14th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO), August 18-21, 2014, ISBN: 978-1-4799-5622-7.
2. *Han J.-W., Oh J.S., Meyyappan M.* Vacuum nanoelectronics: Back to the future? – Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor. // Applied Physics Letters, 2012, 100, 213505, 5 pp.
3. *Srisonphan S., Jung Y.S., Kim H.K.* Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor with a vacuum channel. // Nature Nanotechnology, 2012, 7, 504 - 508.
4. *Stoner B.R., Glass J.T.* Nanoelectronics: Nothing is like a vacuum. // Nature Nanotechnology, 2012, 7, 485–487.
5. *Spindt C.A., Holland C.E., Rosengreen A., Brodie I.* Field-emitter arrays for vacuum microelectronics. // IEEE Transactions on Electron Devices, 1991, 38(10), 2355 – 2363.
6. *Park S.S., Park D.-I., Hahn S.-H., Lee J.-H., Choi H.-C., Lee J.-H.* Fabrication of a lateral field emission triode with a high current density and high transconductance using the local oxidation of the polysilicon layer. // IEEE Transactions on Electron Devices, 1999, 46(6), 1283 – 1289.
7. Сайт производителя программного пакета для мультифизического моделирования Comsol MultiPhysics. URL: <http://www.comsol.ru>.
8. *Forbes R.G., Deane J.H.B.* Reformulation of the standard theory of Fowler-Nordheim tunnelling and cold field electron emission. // Proceedings of the Royal Society A, 2007, 463, 2907 – 2927.
9. *Татаренко Н.И.* Степень интеграции и быстродействие наноструктурных автоэлектронных микро-триодов. // Успехи современной радиотехники. 2005, 9, 3 – 10.
10. *Tatarenko N.I., Vorobyev A.Y.* A Study of a Nanostructural Field Emission Triode. // 15th International Vacuum Microelectronics Conference, Lyon, France, 2002, p. pm02.
11. *Грязнева Т.А., Гусев Е.Э., Дюжнев Н.А.* Программа расчета величины плотности заряда в диэлектрической пленке методом вольт-фарадных характеристик. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616011 от 03.06.2016.
12. *Татаренко Н.И., Кравченко В.Ф.* Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе. // М.: ФИЗМАТЛИТ, Москва, 2006, 192 стр.
13. *Gaertner G.* Historical development and future trends of vacuum electronics. // Journal of Vacuum Science & Technology B, 2012, 30, 060801, 14 pp.

THE SIMULATION OF SCALING TOPOLOGICAL DESIGN RULES IMPACT ON ELECTRICAL AND FREQUENCY CHARACTERISTICS OF PLANAR FIELD-EMISSION TRIODE WITH THE EDGE FIELD EMITTER

N.A. Diuzhev, M.A. Makhiboroda, T.A. Gryazneva,
E.A. Agarkov¹, G.D. Demin

National Research University of Electronic Technology, Moscow

gddemin@gmail.com

Received 19.08.2016

Nowadays there is a rapid revival of vacuum electronics, because of recent progress in the development of the triode semiconductor devices with nanoscale vacuum channel that combines high performance, resistance to aggressive environments and extreme temperature and low power consumption [1, 2]. In this regard, the important problem becomes the selection of optimal characteristics of the vacuum triode, providing a stable field emission, taking into account the variation in geometry of the structure during the transition to the submicron design area. The paper presents the calculation model of field-electron emission from the nanoscale tip of edge field emitter in a planar field-emission triode structure. Based on this model, the values of the cathode radius, distance cathode-anode and distance "cathode-grid" are chosen, allowing achieving a maximal amplification of the electric field on the cathode surface. For the selected configuration, the comparison of the electrical and frequency characteristics of the triode is also performed that determines the tendency of variation of field-emission parameters in the process of scaling of planar geometry of considered structure. As the scale parameter, the corresponding values of technological node for the modern microelectronic industry were used in the range from 90 nm to 22 nm (90 nm, 65 nm, 45 nm, 32 nm, and 22 nm). The obtained results can be useful for the technological implementation of the next generation of vacuum devices applicable in the space, ultrafast electronics and telecommunication systems.