

Характеристики металлических одноэлектронных транзисторов на различных материалах

© И.И. Абрамов[†], Е.Г. Новик

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
220027 Минск, Белоруссия

(Получена 21 февраля 2000 г. Принята к печати 24 февраля 2000 г.)

Приведены результаты теоретического исследования предельных параметров (рабочей температуры, граничной частоты) и вольт-амперной характеристики одноэлектронных транзисторов на основе различных соединений металлов (Al/AlO_x/Al, Al/SiO₂/Al, Au/Al₂O₃/Au, Nb/Al₂O₃/Nb, Ti/TiO_x/Ti, Cr/Cr₂O₃/Cr, Nb/NbO_x/Nb). Сформулированы рекомендации по выбору материалов и размеров структуры, которые могут использоваться на практике. Расчеты характеристик проводились с использованием созданного комплекса программ моделирования структур на эффекте одноэлектронного туннелирования SET-NANODEV по разработанной методике оценки предельных характеристик и двумерной численной модели металлического одноэлектронного транзистора.

Введение

На современном этапе развития технологических методов в твердотельной электронике явилась возможность создавать структуры с наноразмерными областями. На электронный транспорт в таких структурах существенное влияние может оказывать эффект одноэлектронного туннелирования [1]. В настоящее время интенсивно проводятся экспериментальные исследования одноэлектронных структур и уже имеются сообщения о реально работающих приборах на основе эффекта одноэлектронного туннелирования [1–3], причем одним из наиболее перспективных является металлический одноэлектронный транзистор [4]. Наряду с экспериментальными исследованиями эффекта одноэлектронного туннелирования возникает необходимость в моделях, которые позволили бы адекватно описать физические процессы, протекающие в структурах, а также в анализе характеристик приборов в зависимости от конструктивно-технологических и электрофизических параметров. Такое исследование позволяет определить необходимые размеры, подобрать подходящие материалы на этапе разработки одноэлектронных приборов, спрогнозировать их выходные характеристики.

Цель данной статьи — теоретический анализ основных характеристик металлических одноэлектронных транзисторов (рабочей температуры, граничной частоты и вольт-амперной характеристики) на различных материалах и выявление наиболее предпочтительных из исследованных систем.

Модели

Для проведения теоретического исследования характеристик одноэлектронных транзисторов использовались разработанные методика оценки предельных характеристик и двумерная численная модель прибора. Так как они подробно описаны в [5–7], то здесь остановимся на них лишь кратко.

Методика позволяет рассчитать ряд характеристик одноэлектронного транзистора (рабочую температуру, граничную частоту, оптимальное рабочее напряжение прибора, емкость и площадь туннельных переходов, общую емкость структуры) в зависимости от параметров материалов и геометрии прибора. Применимость методики была подтверждена путем сравнения полученных результатов моделирования с экспериментальными данными в работе [5].

Разработанная двумерная численная модель металлического одноэлектронного транзистора предназначена для расчета вольт-амперных характеристик (ВАХ) прибора, принципиальная структурная схема которого характерна для большинства одноэлектронных транзисторов [4]. В отличие от известных моделей прибора (модели полуклассического приближения [1]; модели, основанной на методе Монте-Карло [8]) в предложенной модели в качестве исходных используются геометрические, электрофизические и внешние (напряжения на контактах, температура) параметры. Разработанная модель основана на численном решении двумерного уравнения Пуассона (влияние магнитного поля не учитывается)

$$\nabla \varepsilon \nabla \varphi(x, y) = -q_M, \quad (1)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость, φ — электростатический потенциал, q_M — объемная плотность зарядов. В модели также предполагается электронейтральность плазмы связанных зарядов на "островке", за исключением свободных носителей заряда. Заряды в диэлектрике не учитываются. Таким образом, q_M определяется только усредненной плотностью избыточных зарядов непосредственно на островке.

В модели осуществлялся переход от непрерывной формы уравнения Пуассона (1) к его дискретной аппроксимации для двумерного случая. В качестве краевых условий выбирались граничные условия Дирихле на контактах и условия Неймана на свободных границах. С использованием предложенной конечно-разностной аппроксимации уравнения Пуассона на основе интегро-

[†] E-mail: device@micro.rei.minsk.by

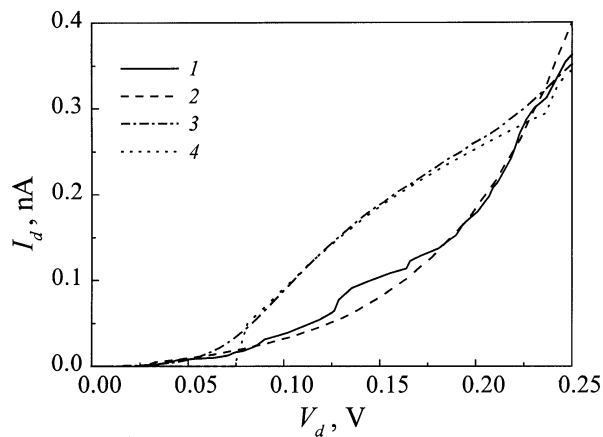


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики прибора на основе Nb/NbO_x/Nb: 1 — экспериментальные данные, 2 — результаты расчета по двумерной численной модели, 3 — расчет по программе MOSES, 4 — расчет по полуклассической модели.

интерполяционного подхода Тихонова–Самарского в сочетании с рядом физических предположений была получена система линейных уравнений. Решение этой системы уравнений осуществлялось с использованием метода матричной прогонки. В результате решения получается распределение потенциала в структуре в зависимости от геометрических, электрофизических и внешних параметров структуры, а также от количества избыточных зарядов на острове.

Для расчета ВАХ прибора использовалось основное уравнение (master equation) для одноэлектронных структур [1], но записанное не для скоростей туннелирования, а непосредственно для токов через туннельные барьеры. Для вычисления парциальных токов брались значения напряжений на туннельных переходах, найденные с учетом результатов расчета распределения электростатического потенциала, и значения сопротивлений, вычисленные согласно известным соотношениям [9].

Разработанная модель позволяет получить лучшее согласие с экспериментальными данными по сравнению с наиболее адекватными известными моделями [1,8] для реальных транзисторов, в частности на основе Ti/TiO_x/Ti и Nb/NbO_x/Nb [7]. В качестве примера на рис. 1 приведена вольт-амперная характеристика $I_d(V_d)$ прибора на основе Nb/NbO_x/Nb (кривая 1 соответствует экспериментальным данным [10], кривая 2 — расчетам по разработанной модели, кривая 3 — расчетам по известной программе MOSES [8], кривая 4 — расчетам по полуклассической модели [1]). Из рисунка видно, что полученная в результате расчетов по программе двумерного численного моделирования кривая [2] хорошо согласуется с экспериментальными данными [10]. Оцениваемая погрешность составляет около 10%. Следовательно, модель целесообразно использовать для прогнозирования электрических характеристик одноэлектронных транзисторов, так как она обеспечивает более

полную связь выходных параметров с параметрами конструкции и характеристиками материалов приборов по сравнению с известными моделями.

Разработанные методика и модель были реализованы в комплексе программ моделирования одноэлектронных структур SET-NANODEV [7,11].

Предельные характеристики одноэлектронных транзисторов

Было проведено исследование предельных характеристик (рабочей температуры T_{op} и граничной частоты F_t) одноэлектронных транзисторов с плоской конфигурацией на различных соединениях металлов (Al/AlO_x/Al, Al/SiO₂/Al, Au/Al₂O₃/Au, Nb/Al₂O₃/Nb, Ti/TiO_x/Ti, Cr/Cr₂O₃/Cr, Nb/NbO_x/Nb) в зависимости от электрофизических параметров структуры (диэлектрической проницаемости диэлектрика ϵ_d и высоты потенциального барьера для туннелирования ϕ). В результате было установлено следующее: для получения относительно высоких значений T_{op} и F_t следует выбирать структуру с малой диэлектрической проницаемостью диэлектрика и (или) с малой высотой потенциального барьера туннельных переходов, причем второй фактор оказывает на характеристики более сильное влияние по сравнению с первым при фиксированном значении ширины туннельных переходов истока (стока) d_s . Поэтому именно на последний следует ориентироваться, выбирая материалы при разработке прибора. По первому признаку из исследованных систем более предпочтительными будут следующие (в порядке ухудшения их характеристик): Al/SiO₂/Al ($\epsilon_d = 4$), Nb/Al₂O₃/Nb, Au/Al₂O₃/Au, Al/AlO_x/Al ($\epsilon_d = 8-10$), Cr/Cr₂O₃/Cr ($\epsilon_d = 12$), Ti/TiO_x/Ti ($\epsilon_d = 24$), Nb/NbO_x/Nb ($\epsilon_d = 64$); по второму признаку — Cr/Cr₂O₃/Cr ($\phi = 0.06$ эВ), Nb/NbO_x/Nb ($\phi = 0.133$ эВ), Ti/TiO_x/Ti ($\phi = 0.285$ эВ), Nb/Al₂O₃/Nb ($\phi = 0.74$ эВ), Al/AlO_x/Al ($\phi = 1.6$ эВ), Au/Al₂O₃/Au ($\phi = 1.65$ эВ), Al/SiO₂/Al ($\phi = 3.2$ эВ). По результатам расчета рабочей температуры и граничной частоты для приборов с плоской конфигурацией перечисленные выше системы можно расположить в следующем порядке по критерию уменьшения численных значений этих параметров: Cr/Cr₂O₃/Cr, Nb/NbO_x/Nb, Ti/TiO_x/Ti, Nb/Al₂O₃/Nb, Al/AlO_x/Al, Au/Al₂O₃/Au, Al/SiO₂/Al. Покажем отмеченные закономерности на конкретных примерах.

На рис. 2 представлены зависимости рабочей температуры T_{op} от ширины туннельных переходов истока (стока) d_s для одноэлектронных транзисторов с плоской конфигурацией на различных соединениях металлов (Al/SiO₂/Al, Au/Al₂O₃/Au, Nb/Al₂O₃/Nb, Ti/TiO_x/Ti). Наибольшие значения T_{op} имеет транзистор на основе структуры Ti/TiO_x/Ti, в которой значение относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика больше, а высота потенциального барьера переходов значительно меньше, чем в остальных из рассматриваемых четырех структур. Таким образом, значение высоты барьера ϕ в

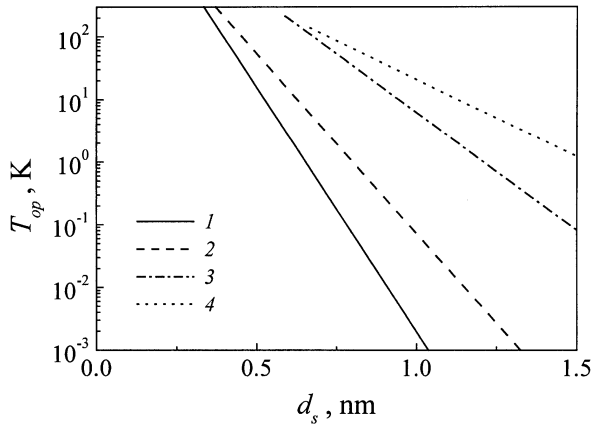


Рис. 2. Зависимость рабочей температуры от ширины туннельных переходов истока (стока) для транзисторов с плоской конфигурацией на основе различных металлов: 1 — Al/SiO₂/Al, 2 — Au/Al₂O₃/Au, 3 — Nb/Al₂O₃/Nb, 4 — Ti/TiO_x/Ti.

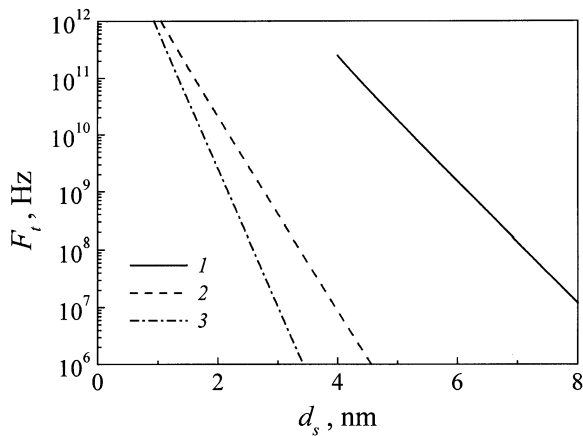


Рис. 3. Зависимость граничной частоты от ширины туннельных переходов истока (стока) для транзисторов с плоской конфигурацией на основе различных металлов: 1 — Cr/Cr₂O₃/Cr, 2 — Nb/NbO_x/Nb, 3 — Ti/TiO_x/Ti.

большой степени влияет на рабочую температуру прибора, чем диэлектрическая проницаемость. Изменение ϕ может приводить к большому изменению T_{op} при постоянной ширине переходов d_s . Например, при $d_s = 1$ нм различие в характеристике для транзисторов на основе Au/Al₂O₃/Au и Nb/Al₂O₃/Nb (с одинаковым значением ϵ_d) составляет ~ 85 раз, а для транзисторов на основе Al/SiO₂/Al и Ti/TiO_x/Ti $\sim 10^4$ раз. Таким образом, наиболее оптимальную рабочую температуру имеют приборы с меньшей высотой потенциального барьера туннельных переходов.

На рис. 3 приведены зависимости граничной частоты F_t от ширины туннельных переходов d_s для одноэлектронных транзисторов с плоской конфигурацией на основе туннельных переходов Cr/Cr₂O₃/Cr, Nb/NbO_x/Nb, Ti/TiO_x/Ti. Наибольшее значение граничной частоты при фиксированном d_s имеет прибор на основе Cr/Cr₂O₃/Cr

благодаря очень малому значению ϕ . Однако при выборе приборов с малым значением высоты потенциальных барьеров следует учитывать, что характеристики будут ограничены сверху минимально возможными размерами структуры, например шириной туннельных переходов, так как рабочее напряжение не должно превышать напряжение пробоя. Наиболее явно это ограничение проявляется для транзистора на основе Cr/Cr₂O₃/Cr, так как для него характерно самое малое значение высоты потенциального барьера из всех рассматриваемых структур (см. рис. 3).

Исследование влияния электрофизических параметров структуры было проведено также для транзистора со сферической конфигурацией (исток, сток и затвор окружают островок). В случае фиксированных значений ширины туннельных переходов истока (стока) будут справедливы те же закономерности влияния электрофизических параметров на исследуемые характеристики прибора, которые были установлены ранее для транзистора с плоской конфигурацией. Так, рабочая температура и граничная частота принимают большие значения при меньшей высоте потенциального барьера переходов и при меньшем значении диэлектрической проницаемости, если высота барьера фиксированная. Наибольшие значения рабочих параметров T_{op} и F_t имеют приборы на основе туннельных переходов Cr/Cr₂O₃/Cr, Nb/NbO_x/Nb, Ti/TiO_x/Ti и Nb/Al₂O₃/Nb благодаря достаточно малому значению высоты потенциального барьера. Указанные системы являются более предпочтительными по сравнению с Al/AlO_x/Al, Au/Al₂O₃/Au и Al/SiO₂/Al. Последняя система характеризуется наименьшими значениями T_{op} и F_t .

На примере расчета рабочей температуры в зависимости от радиуса проводящего островка r_0 для транзисторов со сферической конфигурацией на различных соединениях металлов было исследовано влияние электрофизических параметров при фиксированном значении

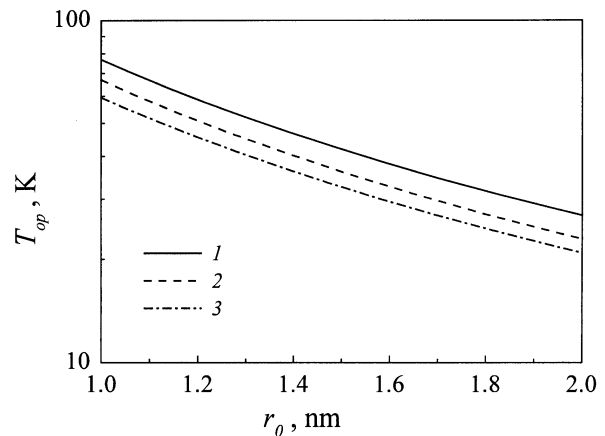


Рис. 4. Зависимость рабочей температуры от радиуса проводящего островка для транзистора со сферической конфигурацией на основе туннельных переходов Al/AlO_x/Al: 1 — $\phi = 1.6$ эВ, $\epsilon_d = 8$; 2 — $\phi = 2.5$ эВ, $\epsilon_d = 8$; 3 — $\phi = 1.6$ эВ, $\epsilon_d = 10$.

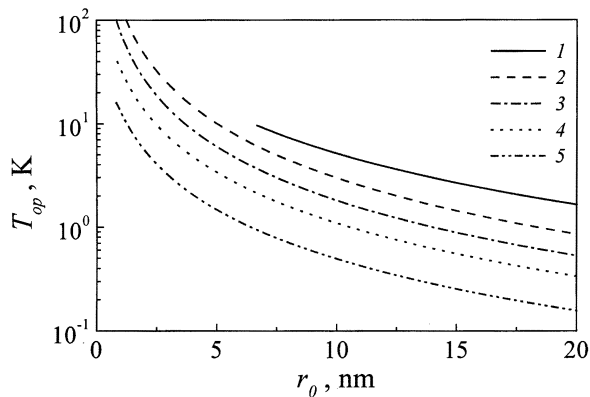


Рис. 5. Зависимость рабочей температуры от радиуса проводящего островка для транзисторов со сферической конфигурацией на основе различных металлов: 1 — Cr/Cr₂O₃/Cr, 2 — Al/SiO₂/Al, 3 — Au/Al₂O₃/Au, 4 — Ti/TiO_x/Ti, 5 — Nb/NbO_x/Nb.

радиуса r_0 . В качестве примера зависимость T_{op} от r_0 для транзистора на основе Al/AlO_x/Al приведена на рис. 4. При фиксированном значении r_0 изменение диэлектрической проницаемости оказывает большое влияние на рабочую температуру прибора. При $r_0 = 2$ нм и $\phi = 1.6$ эВ рабочая температура для случая $\epsilon_d = 8$ приблизительно в 1.3 раза больше, чем для $\epsilon_d = 10$. При $r_0 = 2$ нм и $\epsilon_d = 8$ значение T_{op} при $\phi = 1.6$ эВ в 1.2 раза больше, чем при $\phi = 2.5$ эВ. Таким образом, при фиксированном радиусе проводящего островка будет сказываться влияние обоих электрофизических параметров на рабочую температуру транзистора.

Зависимости $T_{op}(r_0)$ на рис. 5 являются примером влияния электрофизических параметров на характеристику прибора со сферической конфигурацией на основе различных соединений металлов при фиксированном значении радиуса проводящего островка. Самую высокую рабочую температуру имеет транзистор на основе Cr/Cr₂O₃/Cr с самым малым значением ϕ (0.06 эВ) и относительно малым значением ϵ_d (12), а самую низкую T_{op} — транзистор на основе Nb/NbO_x/Nb с относительно малым значением ϕ (0.133 эВ) и самым большим значением ϵ_d (64) из рассматриваемых систем. При $r_0 = 10$ нм рабочая температура для транзистора на основе Cr/Cr₂O₃/Cr примерно в 10 раз больше, чем для транзистора на основе Nb/NbO_x/Nb. Достаточно высокое значение T_{op} имеет транзистор на основе туннельных переходов Al/SiO₂/Al с самой малой ϵ_d . Сопоставление результатов расчетов, приведенных на рис. 5, позволяет сделать следующее заключение: при фиксированном значении радиуса проводящего островка на характеристики будут оказывать существенное влияние высота потенциальных барьеров и диэлектрическая проницаемость диэлектрика; при их уменьшении значения T_{op} и F_t увеличиваются. Исследуемые системы можно расположить в следующем порядке по критерию уменьшения значений рабочей температуры и граничной

частоты прибора: Cr/Cr₂O₃/Cr, Al/SiO₂/Al, Nb/Al₂O₃/Nb, Au/Al₂O₃/Au (Al/AlO_x/Al), Ti/TiO_x/Ti, Nb/NbO_x/Nb. Однако на характеристиках прибора на основе Cr/Cr₂O₃/Cr будет сказываться также ограничение сверху, связанное с минимально возможными размерами структуры, в данном случае с размерами проводящего островка, подобно случаю, приведенному на рис. 3.

Анализируемые характеристики одноэлектронных транзисторов с плоской и сферической конфигурацией могут существенным образом зависеть от конструктивно-технологических параметров структуры, в частности от ширины туннельных переходов истока (стока). Уменьшение d_s приводит к повышению рабочей температуры и граничной частоты прибора, причем по мере возрастания высоты барьера ϕ характеристики становятся более чувствительными к изменению d_s . Для более высокой технологичности процесса изготовления приборов следует выбирать системы с меньшей чувствительностью по отношению к варьированию параметров структуры. В связи с этим наиболее предпочтительными являются системы с меньшим значением высоты потенциального барьера: Cr/Cr₂O₃/Cr, Nb/NbO_x/Nb, Ti/TiO_x/Ti, Nb/Al₂O₃/Nb. Если же требуется большая чувствительность характеристик прибора к изменению ширины туннельных переходов, то лучше выбирать следующие системы: Al/SiO₂/Al, Au/Al₂O₃/Au, Al/AlO_x/Al.

Так, из рис. 2 можно видеть, что уменьшение d_s от 1 до 0.7 нм для транзистора на основе Al/SiO₂/Al (с высотой потенциального барьера туннельных переходов $\phi = 3.2$ эВ) приводит к увеличению рабочей температуры примерно в 220 раз, для транзистора на основе Au/Al₂O₃/Au ($\phi = 1.65$ эВ) — в ~ 52 раза, для транзистора на основе Ti/TiO_x/Ti ($\phi = 0.285$ эВ) — в ~ 6 раз.

Получить большие значения предельных характеристик (T_{op} и F_t) одноэлектронного транзистора со сферической конфигурацией также возможно в результате уменьшения радиуса проводящего островка. Например, уменьшение r_0 от 2 до 1 нм для транзистора на основе Al/AlO_x/Al приводит к увеличению T_{op} примерно в 3 раза (см. рис. 4).

Вольт-амперные характеристики одноэлектронных транзисторов

Было также проведено исследование ВАХ одноэлектронных транзисторов с плоской конфигурацией на основе туннельных переходов Nb/NbO_x/Nb и Ti/TiO_x/Ti. Такие приборы, как было установлено, имеют приемлемые значения предельных параметров (рабочей температуры и граничной частоты) по сравнению с рядом структур на других соединениях металлов с такой же конфигурацией. Расчеты выполнялись по предложенной двумерной численной модели. В результате проведенного исследования было установлено следующее. Различие в величине тока для приборов одинаковых размеров при фиксированных

смещениях и температурах для различных материалов может быть существенным, в частности, может составлять около 3 порядков для структур на основе Nb и Ti. Наличие в приборе бокового затвора, к которому прикладывается смещение, существенным образом изменяет область кулоновской блокады и мало влияет на силу тока стока. Уменьшение ширины туннельных переходов истока и стока, увеличение размеров проводящего островка, повышение температуры приводят к увеличению тока стока в структуре. Отличие в значениях ширины туннельных переходов для истока и стока, понижение температуры окружающей среды приводят к более ярко выраженной ступенчатой форме ВАХ, причем последнее зависит и от используемого материала. Так, для транзистора на основе Ti/TiO_x/Ti характерны большой период и более четкая форма ступенек, чем для прибора на основе Nb/NbO_x/Nb, при одинаковых конструктивно-технологических параметрах, смещениях и рабочей температуре. Установленные закономерности покажем на конкретных примерах.

Были проведены расчеты ВАХ для двух структур на основе туннельных переходов Nb/NbO_x/Nb одинаковых размеров, одна из которых не имеет, а вторая имеет боковой затвор, к которому прикладывается смещение 0.2 В. В результате были получены зависимости с различием в величине тока не более 10%. Кроме того, полученная ВАХ транзистора с боковым затвором, в отличие от характеристики прибора без затвора, не имеет области кулоновской блокады (участок на характеристике прибора в области малых напряжений на стоке с нулевым значением тока).

На ВАХ транзистора существенное влияние оказывают ширина туннельных переходов истока, стока и размеры проводящего островка. Увеличение ширины туннельных переходов истока и стока приводит к уменьшению тока в структуре, а увеличение размеров островка — к его возрастанию. При совместном изменении этих геометрических параметров может происходить взаимная компенсация их воздействия. Так, проведенные расчеты ВАХ прибора на основе Nb/NbO_x/Nb позволили получить следующие результаты. При напряжении на стоке 0.1 В величина тока в транзисторе при значениях ширины туннельных переходов истока и стока $d_s = d_d = 17.5$ нм приблизительно в 6 раз больше, чем при $d_s = d_d = 18$ нм; при размерах островка 50×50 нм² — приблизительно в 10 раз больше, чем при размерах 20×20 нм².

На рис. 6, а представлены ВАХ для одноэлектронных транзисторов на основе Ti/TiO_x/Ti для различных значений ширины туннельных переходов истока ($d_s = 17.5$ нм) и стока ($d_d = 18$ нм) и для равных значений этих параметров ($d_s = d_d = 18$ нм) (соответственно кривые 2 и 1). Расчеты проведены для рабочей температуры 103 К. Из рисунка видно, что кривая 2 имеет более выраженную ступенчатую форму по сравнению с кривой 1. Было проведено также исследование влияния асимметричности структуры (различия в ширине туннельных переходов для истока и

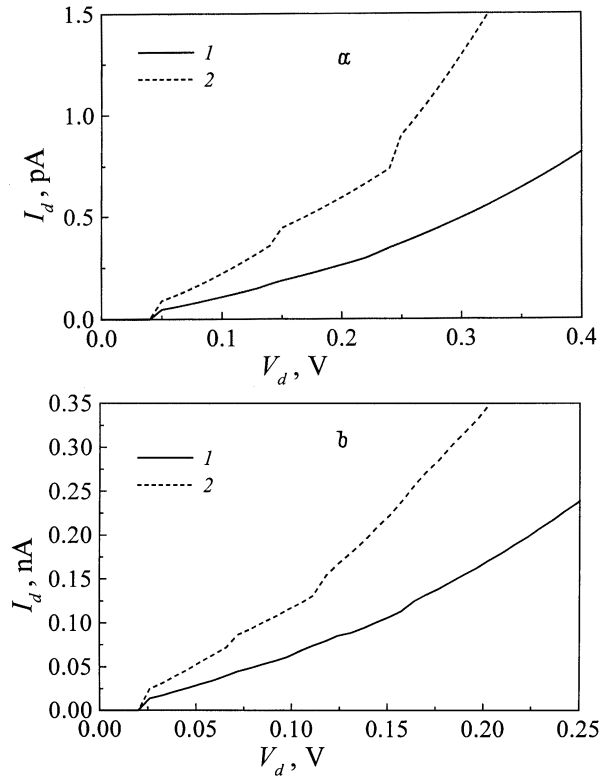


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики одноэлектронных транзисторов на основе туннельных переходов Ti/TiO_x/Ti (а) и Nb/NbO_x/Nb (б) для одинаковых (кривая 1) и различных (кривая 2) значений ширины туннельных переходов истока и стока.

стока) для прибора на основе Nb/NbO_x/Nb (рис. 6, б). Характеристики были получены при тех же исходных данных, что и в случае транзистора на основе Ti/TiO_x/Ti: кривая 1 соответствует значениям ширины переходов истока и стока $d_s = d_d = 18$ нм, а кривая 2 — $d_s = 17.5$ нм и $d_d = 18$ нм. Из полученных зависимостей (рис. 6) видно, что асимметричность структуры приводит к появлению на ВАХ ступенек, которые являются одним из признаков эффекта одноэлектронного туннелирования при малых температурах и (или) размерах структуры. Для различных систем (Nb/NbO_x/Nb и Ti/TiO_x/Ti) период и размер ступенек различны. Для асимметричного транзистора на основе Ti/TiO_x/Ti характерны больший период (~ 0.1 В) и более четкая форма ступенек, чем для прибора на основе Nb/NbO_x/Nb (период ~ 0.045 В). Таким образом, для получения ступенчатой зависимости тока от напряжения на стоке необходимо выбирать асимметричную структуру (с различными значениями ширины туннельных переходов истока и стока), что, как правило, и наблюдается на практике.

Расчеты ВАХ для двух структур на основе Nb/NbO_x/Nb и Ti/TiO_x/Ti одинаковых размеров при фиксированной рабочей температуре позволили получить зависимости с различием в силе тока на несколько порядков при одном и том же напряжении на стоке.

При этом в случае меньшего значения высоты потенциального барьера и большего значения диэлектрической проницаемости диэлектрика ток в структуре больше (для транзистора на основе Nb/NbO_x/Nb) (см. рис. 6).

Одним из факторов, влияющих на ВАХ одноэлектронного транзистора, является рабочая температура: при ее повышении ток в структуре возрастает. Так, например, для прибора на основе туннельных переходов Nb/NbO_x/Nb при ширине туннельных переходов истока и стока $d_s = d_d = 17.5$ нм, размерах островка 20×20 нм² и напряжении на стоке 0.15 В повышение рабочей температуры от 100 до 110 К приводит к изменению тока приблизительно на 30%. Для асимметричного транзистора на основе туннельных переходов Ti/TiO_x/Ti (ширина туннельных переходов истока $d_s = 17.5$ нм, стока $d_d = 18$ нм) при размерах проводящего островка 50×50 нм² и напряжении на стоке 0.3 В повышение рабочей температуры от 103 до 110 К приводит к изменению тока приблизительно на 20%. При повышении рабочей температуры до комнатной ступеньки на ВАХ исчезают. Это проявление подавления эффекта одноэлектронного туннелирования термическими флуктуациями в одноэлектронном транзисторе при повышении его рабочей температуры.

Заключение

Установлены закономерности влияния конструктивно-технологических и электрофизических параметров на основные характеристики (рабочую температуру, граничную частоту и ВАХ) одноэлектронных транзисторов на следующих соединениях металлов: Al/AlO_x/Al, Al/SiO₂/Al, Au/Al₂O₃/Au, Nb/Al₂O₃/Nb, Ti/TiO_x/Ti, Cr/Cr₂O₃/Cr, Nb/NbO_x/Nb. В результате были определены наиболее предпочтительные для одноэлектронных транзисторов среди исследованных в работе систем, а именно: для приборов с плоской и сферической конфигурацией (при фиксированном значении ширины туннельных переходов) — Cr/Cr₂O₃/Cr, Nb/NbO_x/Nb, Ti/TiO_x/Ti, Nb/Al₂O₃/Nb; для приборов со сферической конфигурацией (при фиксированном радиусе проводящего островка) — Cr/Cr₂O₃/Cr, Al/SiO₂/Al, Nb/Al₂O₃/Nb. При этом, если необходимым является меньшая чувствительность предельных характеристик к варьированию ширины туннельных переходов прибора, то лучше выбирать системы Cr/Cr₂O₃/Cr, Nb/NbO_x/Nb, Ti/TiO_x/Ti, Nb/Al₂O₃/Nb.

Проведенные расчеты характеристик одноэлектронных транзисторов с использованием разработанных методики, численной модели и комплекса программ SET-NANODEV позволяют подобрать подходящие материалы для создания приборов с требуемыми выходными параметрами: рабочей температурой, граничной частотой и ВАХ. Подобные исследования целесообразны на первоначальных этапах разработки одноэлектронных транзисторов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Республиканских научно-технических программ: "Информатика", "Низкоразмерные системы" и "Наноэлектроника".

Список литературы

- [1] *Single Charge Tunneling: Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures*, ed. by H. Grabert, M.H. Devoret. [NATO ASI Series B: Physica (N. Y., Plenum, 1992) v. 294].
- [2] Ж.И. Алфёров. ФТП, **32**, 3 (1998).
- [3] Intern. Int. J. Electron., **86**(5) (1999).
- [4] И.И. Абрамов, Е.Г. Новик. ФТП, **33**(11), 1388 (1999).
- [5] И.И. Абрамов, И.А. Гончаренко, Е.Г. Новик. Письма ЖТФ, **24**(8), 16 (1998).
- [6] И.И. Абрамов, И.А. Гончаренко, С.С. Ивашкевич, Е.Г. Новик. *Матер. 7-й между. крымской микроволновой конф., КрыМиКо'97* (Севастополь, 1997) с. 398.
- [7] И.И. Абрамов, Е.Г. Новик. *Численное моделирование металлических одноэлектронных транзисторов* (Минск, 2000).
- [8] R.H. Chen, K.K. Likharev. Appl. Phys. Lett., **72**(1), 61 (1998).
- [9] J.G. Simmons. J. Appl. Phys., **34**(6), 1793 (1963).
- [10] J. Shirakashi, K. Matsumoto, N. Miura, M. Konagai. Japan. J. Appl. Phys., **36**(9A/B), L1257 (1997).
- [11] И.И. Абрамов, Е.Г. Новик. *Матер. 9-й между. крымской микроволновой конф., КрыМиКо'99* (Севастополь, 1999) с. 292.

Редактор Л.В. Шаронова

Characteristics of metal single-electron transistors based on different materials

I.I. Abramov, E.G. Novik

Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics,
220027 Minsk, Belarus

Abstract The theoretical investigation results of the ultimate performance characteristics (temperature of operation, frequency limit) and current-voltage characteristics of the single-electron transistors based on different metal compounds (Al/AlO_x/Al, Al/SiO₂/Al, Au/Al₂O₃/Au, Nb/Al₂O₃/Nb, Ti/TiO_x/Ti, Cr/Cr₂O₃/Cr, Nb/NbO_x/Nb) are presented. Recommendations for the geometry and material choice of the structure of single-electron transistors have been formulated. A developed simulator for single-electron structures so-called SET-NANODEV as well as the estimation method of the single-electron transistor ultimate performance and the two-dimensional numerical model of the metal single-electron transistor were used for calculations of those characteristics.