

ТУННЕЛЬНЫЕ СЕНСОРНЫЕ МДМ-СТРУКТУРЫ

Колешко В.М., Гулай А.В., Гулай В.А.

Белорусский национальный технический университет

Минск, пр. Ф.Скорины 65, 220013, Беларусь

В последнее время в сенсорной технике в качестве чувствительных элементов все шире применяются многослойные структуры типа металл-диэлектрик-металл (МДМ). Повышение чувствительности сенсорных МДМ-структур и их разрешающей способности возможно за счет использования туннельного эффекта при уменьшении толщины диэлектрического слоя. Туннельный эффект проявляется при толщинах диэлектрика менее 10 нм: электроны, покидающие один из металлических электродов, пересекают барьерный слой диэлектрика и коллектируются другим электродом.

Значительный интерес представляет изучение вопроса создания интегральных микросенсоров различных физических величин на основе туннельных МДМ-структур для включения их в состав интеллектуальных микроэлектромеханических систем. Туннельная МДМ-структура как сенсорный элемент интегрируется с микроконтроллером и микроактюатором в единую интеллектуальную микроэлектромеханическую систему. Для решения данной проблемы производится комплексное моделирование МДМ-структур, основанное на представлении их в виде физических объектов разного уровня рассмотрения, анализа и расчета. Это позволяет учитывать наиболее значимые параметры моделируемых систем и выбирать оптимальный уровень сложности рассматриваемых моделей, наиболее приемлемый на определенном этапе исследования и разработки сенсорных микросистем.

Аналитические уровни моделирования принимаются с учетом особенностей, ограничений и допущений, характерных для каждого из рассматриваемых на этих уровнях объектов (как элементов туннельной МДМ-структуры), а также с учетом некоторых общих свойств МДМ-структуры. Такой подход к стоящей проблеме дает возможность интеграции модельных схем, разрабатываемых на разных уровнях аналитики, и получения совокупности высокоинформативных обобщенных моделей конкретного объекта. При разработке моделей учитывается ряд особенностей МДМ-структур, проявляющихся при использовании в качестве материала туннельнотонкого барьерного слоя соединений переходных (в том числе редкоземельных) металлов.

При переходе к наномасштабным толщинам диэлектрического слоя на первый план в процессе моделирования МДМ-структуры выходят ее квантовые свойства. Квантовый уровень моделирования предполагает изучение туннельной МДМ-структуры как потенциального барьера для носителей заряда, образуемого диэлектрическим слоем. Параметры барьера оказывают значительное влияние на основные характеристики МДМ-структуры, так как токи в ней обусловлены преимущественно туннелированием носителей через барьер. При подобном рассмотрении МДМ-структуры учитывается зависимость параметров потенциального барьера от характеристик тонких пленок диэлектрика и металлов, прилагаемого электрического поля и различных внешних воздействий.

В случае двух близко расположенных (~ 10 нм) электродов МДМ-структуры туннелирующий электрон поляризует оба электрода, в результате чего они влияют на форму потенциального барьера. Поляризационный потенциал в данном случае получают с использованием метода зеркального изображения. Потенциал электронного изображения возникает из-за действия притягивающей силы, существующей между положительно поляризованной поверхностью металла и электроном. Выражение для поляризационного потенциала (представленного в виде ряда и при учете только первого слагаемого) имеет вид:

$$V_i = (-e2/8\pi K \epsilon_0)[1/2x + S/(S2 - x2) - 1/S], \quad (1)$$

где e – заряд электрона; K – относительная диэлектрическая проницаемость барьерного слоя; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; S – толщина диэлектрика; x – координата по толщине диэлектрика [1].

Эффект поляризационного потенциала проявляется в том, что он уменьшает площадь потенциального барьера между электродами из-за скругления углов и уменьшения высоты и ширины барьера. На рис. 1 представлены результаты расчета поляризационного потенциала при толщине барьерного слоя $S = 5$ нм и при разных значениях диэлектрической проницаемости. Чем больше значение K , тем меньше поляризационный потенциал в середине барьерного слоя и тем меньше скругление углов вблизи края данного слоя. Причем величина поляризационного потенциала существенно снижается при увеличении толщины диэлектрика.

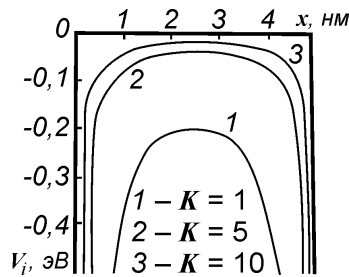


Рис. 1. Поляризационный потенциал туннельной МДМ-структуры.

В случае, когда электроды туннельной МДМ-структуры находятся под разным потенциалом, на потенциальный барьер накладывается внешнее электрическое поле V/S , где V – приложенное напряжение. При этом высота потенциального барьера определяется выражением [1]:

$$\varphi_l = \varphi_0 - [2,88S/Kx(S - x)] - (eVx/S), \quad (2)$$

где φ_0 – высота прямоугольного потенциального барьера между электродами. Результаты расчета потенциального барьера для $V = 1$ В, $\varphi_0 = 5$ эВ представлены на рис. 2 ($S = 5$ нм).

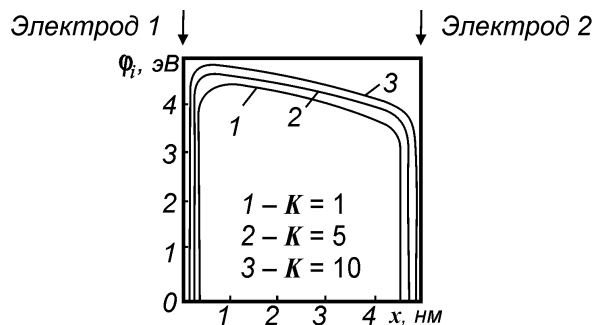


Рис. 2. Потенциальный барьер туннельной МДМ-структуры при наложении внешнего электрического поля.

Влияние приложенного электрического поля сказывается в том, что максимум потенциального барьера сдвигается ближе к первому – отрицательно заряженному

электроду. Наложение на барьер внешнего поля приводит к уменьшению его высоты, причем это снижение проявляется значительно больше при меньшей толщине барьерного слоя. Высота потенциального барьера уменьшается также при снижении диэлектрической проницаемости барьерного слоя, однако влияние K значительно меньше при большей толщине диэлектрика.

Когда электроды туннельной МДМ-структуры получены из разных металлов, при наложении поляризационных сил потенциал как функция расстояния между электродами определяется выражением [1]:

$$\varphi_l = \varphi_1 - [3,6/K(S - x)] + [(7/KS) + \Delta\psi](x/S), \quad (3)$$

где $\Delta\psi$ – разность работ выхода электрона из материалов электродов МДМ-структуры.

Учитывая, что работа выхода электрона из металла лежит в пределах 2–6 эВ, при расчете высоты потенциального барьера предполагалось, что $\Delta\psi = 1$ эВ. Приняв, что первый электрод имеет меньшее значение работы выхода $\varphi_1 = 2$ эВ, максимум высоты потенциального барьера получаем вблизи второго электрода. Вид потенциального барьера для данного случая при $S = 5$ нм приведен на рис. 3. Влияние K на высоту потенциального барьера заметнее при меньшей толщине диэлектрика. Наибольшие изменения высоты потенциального барьера при изменении диэлектрической проницаемости происходят вблизи его максимума, а в других областях диэлектрика зависимость φ_l от K значительно меньше.

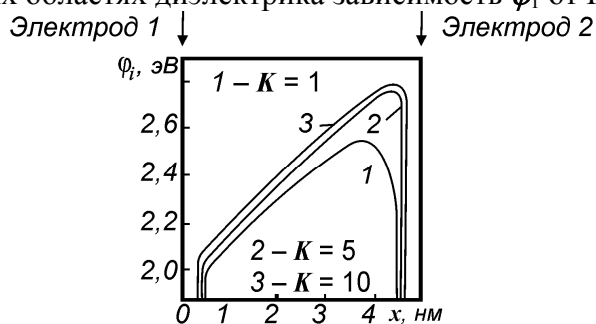


Рис. 3. Потенциальный барьер туннельной МДМ-структуры с электродами из разных металлов.

Примерами реализации возможностей сенсорных МДМ-структур могут служить датчики высоких температур, больших давлений, ионизирующего излучения, сосредоточенного удара, высокоскоростных частиц. В процессе применения туннельных МДМ-микросенсоров для контроля различных физических параметров происходит модификация потенциального барьера, что приводит к изменению электрических параметров МДМ-структуры. В случае включения МДМ-микросенсора в состав микроэлектромеханической системы информация об изменении электрических параметров МДМ-структуры обрабатывается микропроцессорной системой и используется для автоматического управления микроактюатором при воздействии на объекты внешней среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Simmons J.G. Potential Barriers and Emission-limited Current Flow Between Closely Spaced Parallel Metal Electrodes.- J. Appl. Phys., v. 35, No 8, pp. 2472 – 2481.