

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕГАТРОННЫХ СЕНСОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
НА ОСНОВЕ ТУННЕЛЬНЫХ МДМ-НАНОСТРУКТУР

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Сверхтонкая диэлектрическая пленка МДМ-наноструктуры (металл–диэлектрик–металл), подвергнутая сильным внешним воздействиям (большие электрические и магнитные поля, высокий уровень токовой инжекции, значительная интенсивность оптического возбуждения) обнаруживает существенно нелинейное поведение: наблюдаются значительные отклонения от линейного (омического) соотношения между током и напряжением. При определенных условиях возникают неустойчивости такого типа как скачки и колебания тока и/или напряжения, переключение и гистерезис в вольт-амперной характеристике. В сенсорных микро-наносистемах указанные неустойчивости могут быть специально получены и использованы для контроля параметров различных физических параметров. Одной из таких неустойчивостей в туннельных сенсорных МДМ-наноструктурах является генерация электрических колебаний в супервысокочастотном диапазоне (от десятков гигагерц до десятков терагерц). По изменению параметров возбуждаемых колебаний судят о характере и величине внешнего воздействия на сенсорную МДМ-наносистему.

Туннельная МДМ-наноструктура как чувствительный элемент негatronной сенсорной системы

Одно из замечательных свойств туннельных МДМ-наноструктур — возможность получения на вольт-амперной характеристике участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

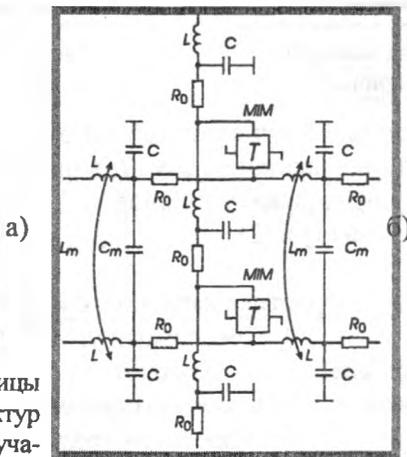
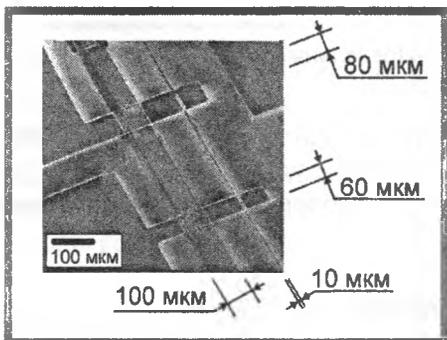


Рис. 1. Расположение проводников матрицы туннельных сенсорных МДМ-наноструктур (а) и упрощенная эквивалентная схема участка ее топологии (б).

Наличие такой характеристики позволяет создавать негatronные сенсорные системы с чувствительными элементами в виде туннельных МДМ-наноструктур. В данном случае сенсорные свойства негatronного элемента заключаются в том, что

МДМ-наноструктура включается в режим генерации электрических колебаний, частота которых изменяется под воздействием внешних факторов. Достоинством таких систем контроля является возможность использования их в составе сенсорных сетей с передачей данных по радиоканалу.

Вольт-амперная характеристика МДМ-наноструктуры, измеряемая в стационарных условиях, зависит как от микроскопических свойств туннельнотонкого диэлектрического слоя МДМ-наноструктуры, так и от параметров металлических проводников электрической схемы. Дело в том, что величина тока через МДМ-наноструктуру определяется параметрами всей электрической цепи, в которую включена МДМ-наноструктура. Электрическая цепь в данном случае рассматривается как сложное соединение активных и реактивных элементов, таких как сопротивления, индуктивности и емкости металлических проводников и контактов между ними.

В свою очередь, микроскопические свойства туннельнотонкого диэлектрика определяют зависимость плотности тока через МДМ-наноструктуру от величины приложенного к ней электрического поля. Если эта зависимость имеет область отрицательной дифференциальной проводимости, то есть если плотность тока уменьшается с ростом электрического поля или, наоборот, возрастает при уменьшении поля, то соответствующие стационарные состояния в общем случае неустойчивы. Данные соображения взяты за основу при определении подходов к вопросу аналитического моделирования негатронных сенсорных элементов, чувствительными элементами которых являются туннельные МДМ-наноструктуры с отрицательной дифференциальной проводимостью [1].

К созданию отрицательной дифференциальной проводимости приводят следующие техно-



Рис.2. Фазовая диаграмма и колебания в электронной системе, содержащей туннельную МДМ-наноструктуру ( $R_0/Z_0 = 3$ ).

логические приемы формирования МДМ-наноструктур и основные микроскопические механизмы, реализуемые в данных наноструктурах. Образование *N*-образной вольт-амперной характеристики происходит при ее электроформовке, а *S*-образная зависимость типична для случая электрического пробоя структуры с тепловой неустойчивостью. Эффект электрического переключения проводимости с памятью наблюдается также в МДМ-наноструктурах при использовании в качестве туннельнотонких диэлектриков соединений редкоземельных элементов, в частности, редкоземельных фторидов. Кроме того, переключение проводимости структуры возможно при фазовом переходе проводник-изолятор в оксидах переходных металлов в результате повышения температуры или давления.

Типичное для матрицы туннельных сенсорных МДМ-наноструктур расположение проводников представлено на рис. 1а [2, 3]. Каждый проводник внешней электрической цепи характеризуется распределенными значениями сопротивления, индуктивности и емкости. Взаимно перпендикулярные проводники в области пересечения образуют МДМ-наноструктуры, а между параллельными проводниками существуют емкостные и индуктивные связи. С учетом этого на рис. 1б показана упрощенная эквивалентная схема фрагмента топологии внешней электрической цепи туннельной МДМ-наноструктуры. Здесь  $R_0$ ,  $L$  — распределенные значения сопротивления и индуктивности проводника,  $C$  — распределенная емкость проводника относительно заземленных элементов конструкции;  $C_m$ ,  $L_m$  — распределенные значения емкости связи и взаимной индуктивности между проводниками.

Сопротивление проводников внешней цепи МДМ-наноструктуры зависит от сопротивления  $R_\Sigma$  и длины  $l_\Sigma$  каждого отдельного участка общей конфигурации проводников:

$$R_0 = \Sigma R / \Sigma l. \quad (1)$$

где  $R = R_S n$ ;  $R_S = \square / d$ ;  $n = l / b$ ;  $l$ ,  $b$ ,  $d$  — длина, ширина, толщина проводника соответственно;  $\square$  — удельное сопротивление материала проводника. Поскольку в области изгиба проводника плотность тока не остается постоянной, учитывается число квадратов, связанных с участками изгибов или других геометрических отклонений от прямолинейности, а также определяется их вклад в общую величину сопротивления. При этом сохраняется обычный расчет для прямолинейных участков и устанавливается сопротивление, вносимое квадратом на участке изгиба как часть сопротивления квадрата на прямолинейном участке.

Величина индуктивности проводников является функцией геометрии и магнитной проницаемости материала подложки и тонких пленок. При условии, что в конструкции МДМ-наноструктуры не применяются магнитные материалы, величина индуктивности проводников зависит только от их размеров. Предполагается также, что толщина пленочных проводников значительно меньше их ширины. В этом случае индуктивность одиночного прямолинейного тонкопленочного проводника на единицу длины определяется выражением:

$$L = \mu_0 / 2\pi \cdot [\ln(2l/b) + 1/2 + b/3l], \quad (2)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $l$ ,  $b$  — длина и ширина проводника соответственно;  $b \ll l$ .

При расчете распределенной емкости проводников предполагается, что подложка простирается достаточно далеко по обе стороны от них, а длина проводников достаточно велика по сравнению с шириной и расстоянием между ними. Толщина пленочных проводников пренебрежимо мала по сравнению со всеми остальными размерами. Емкость на единицу длины двух параллельных проводников определяется выражением:

$$C = \epsilon_0 \epsilon c / 2, \quad (3)$$

где  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $\epsilon \gg 1$  — диэлектрическая проницаемость материала подложки;  $c = K'/K$ ,  $K(k)$  — полный эллиптический интеграл I типа, являющийся табулированной функцией;  $k = \text{th}(\pi a/4d)/\text{th}[\pi(a+2b)/4d]$ ;  $k' = (1-k^2)^{1/2}$ ;  $l, b, a, d$  — длина и ширина проводников, расстояние между ними и толщина подложки, соответственно.

### Параметры колебаний негатронной сенсорной системы на основе туннельной МДМ-наноструктуры

Выражение для автоколебаний в электрической схеме, содержащей элемент с отрицательной дифференциальной проводимостью, например туннельную МДМ-наноструктуру, можно представить в виде:

$$U_0/R = d^2 I_C/dt^2 + \{1 - [U_C(I_C)/I_C R]\} I_C + (1/Z_0)[dU_C(I_C)/dI_C + Z_0/R](dI_C/dt) \quad (4)$$

где  $U_0$  — напряжение внешнего источника;  $R$  — сопротивление всей электрической цепи;  $I_C$  и  $U_C$  — ток через МДМ-наноструктуру и напряжение на ней;  $Z_0 = (L_0/C_0)^{1/2}$  [4].

Оценка распределенных значений  $R, L$  и  $C$  проводников проводилась для наиболее характерных размеров: длина проводников 1–10 мм; ширина 0,01–0,1 мм; толщина 0,2–1,0 мкм; толщина подложки 0,2–0,5 мм. Генерация колебаний возникает при отношении  $R_0/Z_0$ , лежащем в диапазоне 3–12; здесь  $R_0 = R$  при  $I_C = 0$ .

Выражение для автоколебаний (4) является уравнением Ван-дер-Поля, которое при определенных начальных параметрах дает замкнутую фазовую траекторию (рис. 2). При малых  $R_0/Z_0$  затухание вносит малое возмущение и решения типа предельного цикла для  $U_C(t)$  и  $I_C(t)$  почти синусоидальны, с ростом  $R_0/Z_0$  характеристики становятся более пилообразны, а решения, не входящие в рассматриваемый диапазон  $R_0/Z_0$  описывают затухающие колебания.

Результаты расчета показывают, что частота колебаний резко снижается с ростом значений  $R_0/Z_0$  (рис. 3). Так, увеличение  $R_0/Z_0$  с 3 до 12 приводит к снижению частоты колебаний с 20–30 ГГц до 1–3 ГГц. Таким образом, можно сделать вывод, что частота колебаний достаточно чувствительна к изменению параметров электрической цепи, содержащей туннельную МДМ-наноструктуру. Измеряя указанную частоту, можно судить о параметрах МДМ-наносистемы и, следовательно, выполнять контроль внешнего воздействия с использованием туннельных МДМ-наносенсоров.

Результаты расчета показывают, что частота колебаний резко снижается с ростом значений  $R_0/Z_0$  (рис. 3). Так, увеличение  $R_0/Z_0$  с 3 до 12 приводит к снижению частоты колебаний с 20–30 ГГц до 1–3 ГГц. Таким образом, можно сделать вывод, что частота колебаний достаточно чувствительна к изменению параметров электрической цепи, содержащей туннельную МДМ-наноструктуру. Измеряя указанную частоту, можно судить о параметрах МДМ-наносистемы и, следовательно, выполнять контроль внешнего воздействия с использованием туннельных МДМ-наносенсоров.

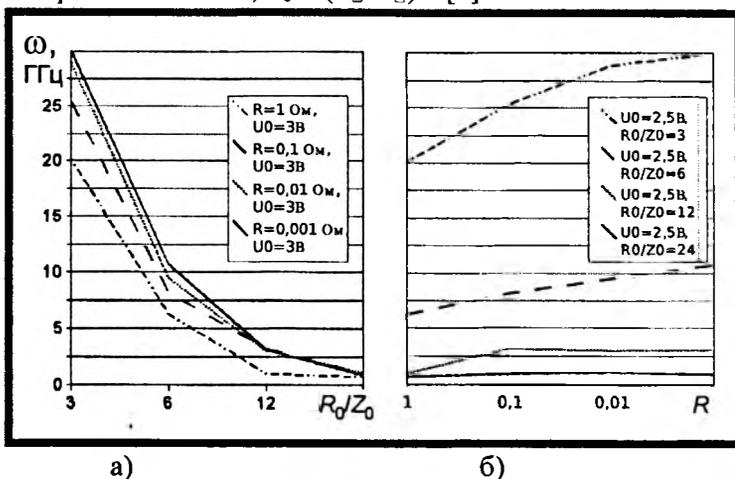


Рис. 3. Зависимость частоты колебаний от параметров электронной системы, содержащей туннельную МДМ-наноструктуру: а — от  $R_0/Z_0$ ; б — от  $R$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Туннельные МДМ-наносенсоры: стратегии и технологии моделирования // Нано- и микросистемная техника. — № 9. — 2007. — С. 46–52.
2. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Получение туннельных сенсорных МДМ-наноструктур на основе оксидов РЗЭ // Теоретическая и прикладная механика. — Вып. 22. — 2007. — С. 287–296.
3. Гулай В. А. Электрофизические свойства туннельных сенсорных МДМ-наноструктур на основе оксидов РЗЭ // Электроника-инфо. — № 9. — 2007. — С. 52–56.
4. Shaw M. P., Gastman I. J. Circuit Controlled Current Instabilities in “S-Shaped” Negative Differential Conductivity Elements // Appl. Phys. Lett. — 1971. — Vol. 19, N 7. — P. 243–245.