

МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО НАНОСЕНСОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ МИКРОЧАСТИЦ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В настоящее время интенсифицируется развитие новых научно-технических направлений, связанных с созданием эффективных технологий получения и использования спутниковой информации. Космические аппараты для реализации таких технологий рассчитаны на долговременную работу на околоземных орбитах, поэтому первостепенное значение приобретают вопросы их взаимодействия с различными факторами космической среды. Одним из факторов, оказывающих существенное влияние на стабильность функционирования орбитальных комплексов, является интенсивный поток метеороидных и техногенных микрочастиц. Дело в том, что на околоземных орбитах образовались облака частиц микрометровых размеров, интенсивность потоков которых на 3–4 порядка выше, чем в межпланетном пространстве. В связи с этим проблемам контроля характеристик потоков высокоскоростных космических микрочастиц уделяется пристальное внимание. В частности, разрабатываются специальные сенсорные приборы, позволяющие оценивать концентрацию орбитальных микрочастиц и их основные параметры (скорость, массу, размеры).

Конструктивно-технологические решения квантового баллистического наносенсора для контроля микрочастиц

Для контроля микрочастиц, имеющих массу более 10^{-8} кг и скорость выше 10^4 м/с используются, в частности, многослойные структуры металл–диэлектрик–металл (МДМ) на основе полимерных пленок толщиной 10–20 мкм [1]. В основу функционирования таких структур положен механизм объемной ионизации диэлектрика (например, полиметилметакрилата) и инерциального разлета ударной плазмы при высокоскоростном механическом воздействии. Измерению подвергаются параметры МДМ-структуры, определяемые генерацией носителей заряда в диэлектрике и возрастанием проводимости подвергающегося удару участка диэлектрика. Например, регистрируется импульс тока через МДМ-структуру при сквозном проникании космических микрочастиц. Для контроля микрочастиц с более низкой скоростью и меньшей массой необходимо, в частности, уменьшение толщины полимерной пленки, что трудно реализуемо в объеме известного конструктивно-технологического решения.

В связи с изложенным представляется целесообразным создать для контроля космических микрочастиц сенсорную наноструктуру с отдельным выполнением комплекса функций по преобразованию энергии удара микрочастицы в электрический сигнал на выходе сенсора. Так, один из элементов сенсорной наноструктуры предназначается для улавливания микрочастицы и преобразования энергии механического удара в тепловую. Другой элемент выполняет функцию преобразования механических и термических параметров в электрический сигнал (рис. 1). В такой сенсорной микросистеме активным сенсорным наноэлементом, воспринимающим механическое и термическое воздействие, служит туннельная МДМ-наноструктура, диэлектрическая пленка которой имеет толщину порядка 2–10 нм [2, 3]. В качестве материалов сверхтонкой диэлектрической пленки в данном случае применяются окислы металлов, в том числе редкоземельные оксиды, имеющие ряд существенных достоинств [4, 5]. Сверху МДМ-наноструктуры наносится тонкий полимерный слой, в котором при ударе высокоскоростной космической микрочастицы образуется тепловой канал от точки удара до МДМ-наноструктуры.

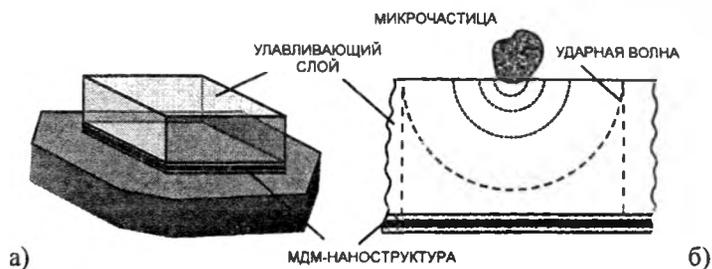


Рис. 1. Конструктивное решение баллистического наносенсора (а) и модель воздействия космической микрочастицы (б)

Предложенная конструкция позволяет повысить чувствительность сенсорной системы к удару микрочастицы, то есть сместить диапазон контролируемых параметров частиц в сторону малых скоростей и масс. Повышение чувствительности туннельной сенсорной МДМ-наноструктуры происходит за счет того, что при ее использовании измеряется возрастание тока в момент удара по сравнению с величиной туннельного тока при отсутствии механического воздействия. Минимальный уровень регистрируемого тока (то есть чувствительность МДМ-наноструктуры) в данном случае определяется параметрами системы обработки информации и может быть достаточно малым. Напротив, в известной сенсорной структуре «металл–полимер–металл» до удара ток не протекает, при этом появление импульса тока определяется процессом пробоя полимерного слоя микрочастицей. Зависимость тока от параметров полимера (в частности, от толщины) является пороговой функцией, что снижает возможность контроля космических микрочастиц, имеющих низкую скорость и малую массу (то есть снижает чувствительность сенсорной системы).

Физические эффекты в квантовой МДМ-наноструктуре при воздействии высокоскоростных космических микрочастиц

При создании модели баллистического квантового наносенсора предполагается, что воздействие микрочастицы на туннельную МДМ-наноструктуру сопровождается следующими физическими явлениями. Попадание высокоскоростной микрочастицы в улавливающий полимерный слой возбуждает ударную волну, которая при достижении тыльной стороны данного слоя вызывает повышение электропроводности диэлектрика МДМ-наноструктуры. Повышение электропроводности ударно сжатого диэлектрика связывают с изменением его свойств за счет ионизации, происходящей при высоких давлениях, возникающих на фронте ударной волны. Прохождение ударной волны через полимерный слой приводит к повышению его температуры, что в свою очередь влияет на токоперенос через туннельнотонкий диэлектрик МДМ-наноструктуры. Изменение плотности туннельного тока при повышении температуры характерно для температурно-зависимых механизмов проводимости тонких диэлектрических пленок. Таким образом, для анализа работы квантового баллистического наносенсора возможно использование аналитических моделей, описывающих ударное воздействие на диэлектрик, а также эффекты токопереноса в тонких диэлектрических пленках.

При моделировании параметров баллистических туннельных МДМ-наносенсоров делается ряд допущений, качественно не изменяющих характер процессов при воздействии микрочастицы. Считается, в частности, что из точки контакта микрочастицы с сенсорной структурой (мишенью) распространяется сферическая волна, амплитуда которой вычислена в соответствии с ударной адиабатой вещества преграды (мишени). Распределение параметров ударной волны и материала мишени от точки контакта с ней микрочастицы до фронта волны предполагается однородным. В материале ловушки для микрочастиц и диэлектрике МДМ-наноструктуры не происходят фазовые переходы в энергетических режимах, достигаемых при ударе. Затухание ударной волны в материалах моделируемой сенсорной структуры определяется законом сохранения энергии. Кроме того, при рассмотрении процесса распространения ударной волны в сенсорной системе учитывается только материал ловушки микрочастиц – полимерного слоя, при этом пренебрегаем параметрами МДМ-наноструктуры. Такое упрощение вполне допустимо,

поскольку толщина улавливающего слоя много больше толщин тонких пленок металла и диэлектрика МДМ-наноструктуры: толщина полимерного слоя — 2–20 мкм, диэлектрика МДМ-наноструктуры — 2–10 нм, металлических электродов — ~ 100 нм.

Проводимость G ударно сжатой МДМ-наноструктуры, зависящая от удельной электропроводности сверхтонкой диэлектрической пленки, определяется выражением:

$$G = G_0 \Phi(E_M) \Rightarrow G_0 \Phi[\exp(-\Delta E/k_B T)], \quad (1)$$

где G_0 — проводимость наноструктуры без непосредственного, прямого учета механического воздействия удара микрочастицы; $\Phi(E_M)$ — функция от механической энергии E_M микрочастицы в момент удара; ΔE — энергия активации токопереноса в МДМ-наноструктуре за счет механического воздействия при ударе микрочастицы; k_B — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура, зависящая от энергии удара микрочастицы E_M . Величина проводимости G_0 обусловлена механизмами токопереноса в сверхтонком диэлектрике, которые могут быть как термически активируемыми, так и независимыми от температуры. Термически активируемый перенос заряда возрастает при увеличении температуры диэлектрика вследствие удара микрочастицы. Рост проводимости наноструктуры за счет увеличения токопереноса при повышении температуры в момент удара можно выразить следующей формулой:

$$G_0 \Rightarrow J_0(T) = J_0^0 + \Delta J_0(T) \Rightarrow G_0^0 + \Delta G(T). \quad (2)$$

Влияние моделируемых физических явлений, наблюдающихся в МДМ-наноструктуре в момент воздействия высокоскоростной микрочастицы, на электрические параметры наноструктуры, поясняется с помощью ее эквивалентной электрической схемы, отражающей зависимости (1) и (2) и представленной на рис. 2.

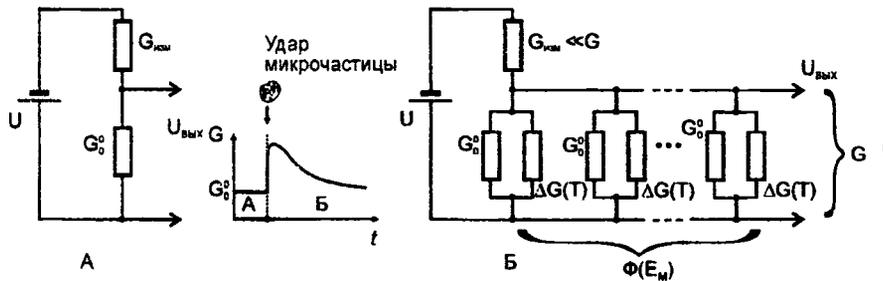


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема квантовой МДМ-наноструктуры до удара (А) и при воздействии (Б) микрочастицы.

Влияние механических параметров удара микрочастицы на проводимость квантовой МДМ-наноструктуры

Влияние механических параметров космической микрочастицы на сенсорную МДМ-наноструктуру в момент удара определяется по следующему алгоритму [6]. Давление на фронте ударной волны, вызванной воздействием микрочастицы, рассчитывается в соответствии с теорией ударных волн и равно:

$$P = \rho_r W_0^2 / (1 - \alpha_m)(1 + a)^2, \quad (3)$$

где $a = (\rho_r / \rho_m)^{1/2}$, ρ_r , ρ_m — плотности частицы и мишени; W_0 — скорость соударения; $\alpha \approx 0,5$. На основании закона сохранения энергии внутренняя энергия, запасенная в объеме канала распространения ударной волны за время действия частицы на сенсорную систему, равна:

$$E = \rho_m \epsilon V(t), \quad (4)$$

где ε — внутренняя удельная энергия; $V(t)$ — объем канала распространения ударной волны; t — время.

Температура T во фронте ударной волны определяется на основе ее связи с внутренней удельной энергией:

$$T = k\varepsilon \quad (5)$$

где k — коэффициент пропорциональности. На основе определения закона движения фронта ударной волны и ее скорости, а также промежутка времени от момента удара до прихода ее к тыльной поверхности улавливающего слоя, рассчитан закон охлаждения полимерного слоя:

$$T = T_0 + 1,5W_0k/\pi\rho_m\{W_0t[(1 - \alpha_m)(1 + a)^{-1} + L + d]^3\}, \quad (6)$$

где L — расстояние от источника ударной волны до диэлектрика МДМ-наноструктуры; d — толщина диэлектрической пленки МДМ-наноструктуры. Здесь учтено условие $L \ll d$; значение k принято равным $k = 4,6 \cdot 10^{-4}$ К·кг/Дж (уточнение значения k для конкретного диэлектрика МДМ-наноструктуры приводит к пропорциональному изменению T , при этом ход зависимости T не изменяется).

Следует учесть, что проводимость МДМ-наноструктуры в момент воздействия микрочастицы складывается из проводимостей образовавшегося теплового канала и остальной части МДМ-контакта. При этом имеется в виду, что зависимость проводимости наноструктуры от удельной электропроводности, если она является функцией только времени, имеет следующий вид:

$$G = v(t)/d^2 \cdot \sigma(t) = v(t)/d^2 \cdot \sigma_0 \exp(-\Delta E/k_B T). \quad (7)$$

Полная проводимость МДМ-контакта за счет удара микрочастицы равна:

$$G_g = G_0 \{1 + [\sigma(t)/\sigma_0 - 1] S_k(t)/S_g\}, \quad (8)$$

где S_g — площадь всей поверхности МДМ-контакта; $S_k(t)$ — площадь канала ударного воздействия микрочастицы. С учетом (6) временная зависимость проводимости сенсорной МДМ-наноструктуры как функция параметров улавливающего слоя и контролируемой микрочастицы имеет следующий вид:

$$G_g = G_0 \left[1 + \left\{ \frac{\exp[-\Delta E/k_B(T_0 + EN^{-1})]}{\exp(-\Delta E/k_B T)} - 1 \right\} \frac{\pi D t (Dt + 2L)}{S_g} \right], \quad (9)$$

где D — скорость ударной волны; N — параметр, определяемый температурой во фронте ударной волны.

Выполнен расчет параметров процесса воздействия высокоскоростной микрочастицы на квантовую сенсорную наноструктуру при следующих исходных данных: толщина тонкой диэлектрической пленки МДМ-наноструктуры равна 10 нм, диаметр космической микрочастицы составляет 1 мкм, ее скорость лежит в пределах $(1-10) \cdot 10^3$ м/с (рис. 3). Площадь канала распространения ударной волны после воздействия микрочастицы плавно возрастает и за $4 \cdot 10^{-9}$ с увеличивается от 0 до $2 \cdot 10^{-9}$ м². Наблюдается также плавный спад температуры со временем, причем изменение температуры происходит наиболее резко в первые $0,2 \cdot 10^{-9}$ с после удара микрочастицы.

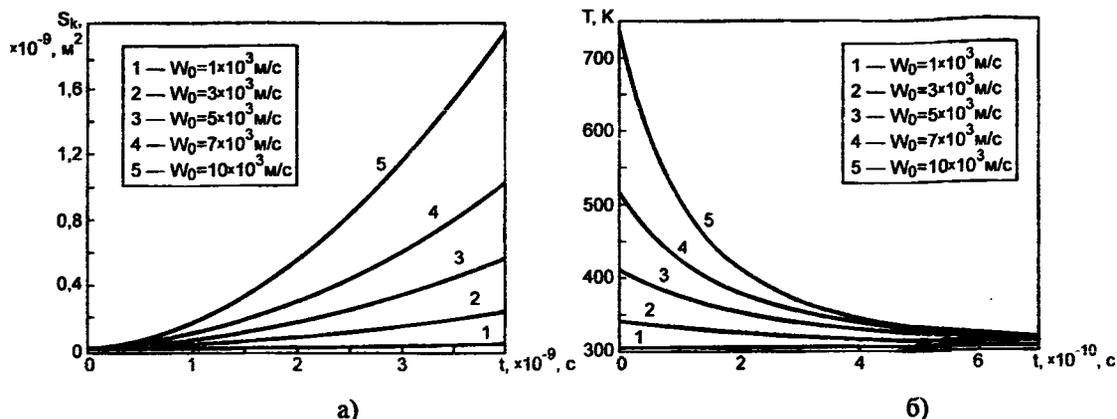


Рис. 3. Изменение площади (а) и температуры (б) нагрева МДМ-наноструктуры после удара микрочастицы.

Влияние температуры в канале ударной волны на параметры квантовой МДМ-наноструктуры

Проводимость G_0 ударно сжатой МДМ-наноструктуры, определяемая протекающим через наноструктуру током, обусловлена механизмами токопереноса в туннельно тонком диэлектрике. В соответствии со схемой измерения параметров сенсорной МДМ-наноструктуры (рис. 2) взаимосвязь между проводимостью G_0 и током I_0 имеет следующий вид:

$$G_0 = J_0 G_{изм} / (U G_{изм} - J_0), \quad (10)$$

где U — напряжение питания; $G_{изм}$ — проводимость измерительной цепи. Механизмы токопереноса в сверхтонкой диэлектрической пленке МДМ-наноструктуры могут быть как термически активируемыми, так и независимыми от температуры. Термическая активация участвует при эмиссии Шоттки–Ричардсона, эффекте Пула–Френкеля, прыжковой проводимости, не обладает температурной зависимостью ток через диэлектрик при туннелировании по механизму Симмонса или Фаулера–Нордгейма, а также ток, ограниченный пространственным зарядом. Наибольший интерес для нашего рассмотрения представляет эффект термически активируемого токопереноса, вносящий вклад в общую проводимость сенсорной МДМ-наноструктуры в момент воздействия микрочастицы за счет увеличения температуры в канале распространения ударной волны.

Значение тока через туннельно тонкий диэлектрик в случае эмиссии Шоттки–Ричардсона определяется выражением:

$$J_0 = R T \exp(-\varphi_0 / k_B T) \exp(\beta_S \sqrt{E} / k_B T), \quad (11)$$

где φ_0 — высота барьера металл–диэлектрик; E — напряженность электрического поля в диэлектрике. Коэффициент Шоттки β_S равен:

$$\beta_S = (q^3 / 4 \pi \epsilon_0 \epsilon_i)^{1/2}, \quad (12)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная; ϵ_i — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика. Постоянная Ричардсона R имеет вид:

$$R = 4 \pi m^* q k_B^2 / h^3, \quad (13)$$

где m^* , q — соответственно эффективная масса и заряд электрона; h — постоянная Планка. Высота энергетического барьера φ_0 определяется выражением:

$$\varphi_0 = \varphi_m - \varphi_i, \quad (14)$$

где φ_m , φ_i — соответственно работа выхода металла и диэлектрика.

Если наблюдается эффект Пула–Френкеля, значение тока через МДМ-наноструктуру равно:

$$J_0 = qN_C\mu(T)\exp(-\varphi_0/k_B T)\exp(\beta_{PF}\sqrt{E}/k_B T), \quad (15)$$

где N_C — эффективная плотность состояний в зоне проводимости диэлектрика; $\mu(T)$ — подвижность носителей. Коэффициент Пула–Френкеля β_{PF} равен:

$$\beta_{PF} = 2\beta_S. \quad (16)$$

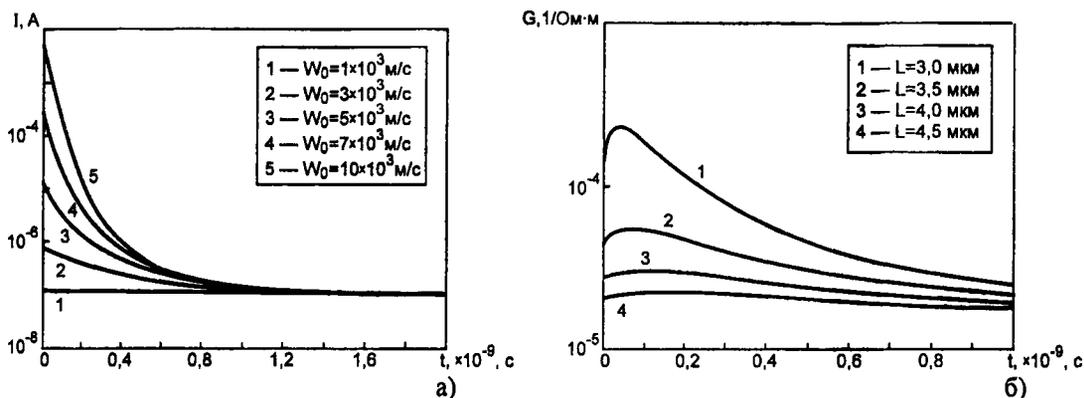


Рис. 4. Изменение тока через МДМ-наноструктуру (а) и ее проводимости (б) после удара микрочастицы.

Определение параметров баллистического наносенсора с учетом влияния удара микрочастицы на протекание тока через МДМ-наноструктуру позволило выявить следующие зависимости (рис. 4). В случае проявления в сверхтонкой диэлектрической пленке эффекта Шоттки-Ричардсона изменение тока после удара повторяет ход зависимости температуры МДМ-наноструктуры от времени. Проводимость данной наноструктуры в первоначальный момент после ударного воздействия резко возрастает, а затем происходит медленное снижение ее значения. Рост проводимости после удара микрочастицы обусловлен, по-видимому, превалирующим влиянием ударного воздействия на МДМ-наноструктуру в сравнении со снижением проводимости из-за спада температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ротов С. В., Семкин Н. Д., Воронов К. Е. Ионобразование и проводимость активной пленочной МДМ структуры при сквозном проникании космических пылинок // Журнал технической физики. — 2001. — Т. 71. — Вып. 1 — С. 112–116.
2. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Баллистические наносенсоры на туннельном эффекте // Наноструктурные материалы — 2008: Беларусь–Россия–Украина (НАНО–2008). Материалы Первой международной научной конференции. Минск, 22–25 апреля 2008 г. — С. 601–602.
3. Колешко В. М., Гулай А. В., Гулай В. А. Наносенсоры на основе сверхтонких пленок редкоземельных соединений // Нанотехника. — № 1. — 2009. — С. 45–48.
4. 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.
5. Гулай В. А. Электрофизические свойства туннельных сенсорных МДМ-наноструктур на основе оксидов РЗЭ // Электроника-инфо. — № 9. — 2007. — С. 52–56.
6. Семкин Н. Д., Воронов К. Е. Проводимость ударно сжатых МДМ структур на основе полиметилметакрилата // Журнал технической физики. — 1998. — Т. 68. — № 8 — С. 63–66.