

05;06;10;12

Проводимость ударносжатого канала пленочной МДМ-структуры в режиме стационарного свечения

© Н.Д. Семкин, К.Е. Воронов, Н.Л. Богоявленский

Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королева,
443086 Самара, Россия
e-mail: semkin@ssau.ru

(Поступило в Редакцию 23 января 2006 г.)

Приведены результаты экспериментов по воздействию частиц на пленочные МДМ-структуры (металл–диэлектрик–металл) с помощью электростатического ускорителя. Проведено дальнейшее исследование эффекта стационарного свечения ударносжатого проводящего канала. Рассчитана температура ударносжатого канала, получены ионные спектры масс материалов и сквозная проводимость МДМ-структуры. Показаны перспективы использования результатов в различных областях техники.

PACS: 81.05.-t

Исследуемые структуры металл–диэлектрик–металл (МДМ) находят широкое применение в фундаментальных областях астрофизики, космохимии и ряде прикладных задач [1–3].

В [4,5] были приведены некоторые соотношения для пленочной МДМ-структуры, находящейся в ударносжатом состоянии, а также результаты ударных экспериментов с помощью импульсного лазера. Изучение электропроводности ударносжатых МДМ-структур проводилось авторами [6] путем совместного решения систем уравнений гидродинамики и электродинамики. При проведении ударных экспериментов с помощью электростатического ускорителя авторами [7] был обнаружен эффект стационарного свечения канала проводимости ударносжатого диэлектрика МДМ-структуры. Эффект свечения ударносжатого канала возникает при напряженности электрического поля, приложенного к МДМ-структуре, выше $2 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ и воздействии на нее частицы из алюминия массой $(1-5) \cdot 10^{-14} \text{ g}$ со скоростью $2-10 \text{ km/s}^{-1}$. Было отмечено, что интенсивность свечения канала проводимости определенным образом связана с подаваемым на конденсатор напряжением, сопротивление канала проводимости составляет $10^4-10^6 \Omega$, а ток через канал — $10^{-4}-10^{-3} \text{ A}$.

С помощью известных теорий электропроводности твердых диэлектриков указанный эффект авторам [4] объяснить не удалось. В данной работе экспериментально рассмотрено влияние электрического поля, приложенного к исследуемой МДМ-структуре, на процессы возникновения вспышки и вторично-заряженных частиц (ионов, электронов), изменения электропроводности органических и неорганических диэлектриков при высокоскоростном соударении, а также приведен расчет температуры светящегося канала проводимости в стационарном режиме.

Эксперименты выполнялись с помощью экспериментальной установки, представленной на рис. 1 и содержащей электростатический ускоритель 1, цилиндр Фарадея 2, усилители 3, люминесцентно-конденсаторные

датчики 4–8, фотоэлектронные умножители (ФЭУ) 9 и 11, вторичноэлектронный умножитель (ВЭУ) 10, запоминающие осциллографы 12, пылеударный масс-спектрометр 13. Люминесцентно-конденсаторный датчик состоит из стеклянной подложки 4, люминофора 5, медной обкладки 6, диэлектрической пленки 7, верхней обкладки конденсатора 8.

Вспышка, возникающая в момент высокоскоростного взаимодействия в материале люминофора, регистрируется с помощью ФЭУ (9, рис. 1). Импульсные сигналы U_s (с МДМ-структуры) и U_{pmt} (с ФЭУ) поступают на осциллограф 12. Информация с люминесцентного датчика и системы регистрации 2, 3, 12 необходима для

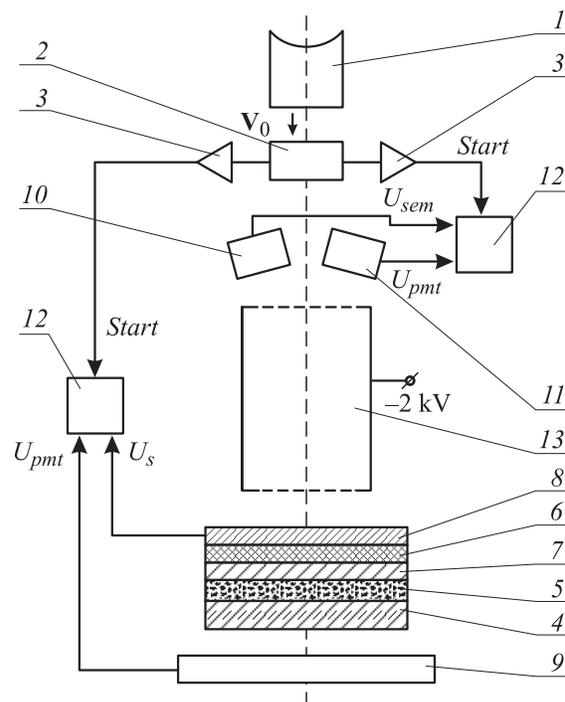


Рис. 1. Блок-схема экспериментального стенда.

определения характеристик (скорость, масса) взаимодействующей с МДМ-структурой частицы. Изготовленные образцы МДМ-структур используют в качестве диэлектрика пленки полиметилметакрилата, полученные методом полимеризации в ВЧ-разряде в вакууме, МДМ-структуры нанесены на защитную пленку 6 люминофора 5. В целом, такая многослойная мишень является полубесконечной преградой с точки зрения высокоскоростного удара. В режиме стационарного свечения регистрируются сквозной ток через МДМ-структуру и свет фотоэлектронным умножителем 11.

На рис. 2 показана экспериментальная зависимость сквозного тока I_s через МДМ-структуру и напряжения фотоэлектронного умножителя U_{pmt} , от подаваемого на нее напряжения U_s . Характеристики снимались в диапазоне напряжений 0–400 В в прямом и обратном направлениях.

Характеристики обладают достаточно высокой линейностью и повторяемостью. При напряжении более 400 В происходит электрический пробой МДМ-структуры. При этом резко повышается (более чем на порядок) количество ионов, регистрируемых ВЭУ, и интенсивность света (вспышки). На рис. 3 представлены зависимости зарядов различных элементов, присутствующих в проводящем канале МДМ-структуры, от напряжения на конденсаторе. Из экспериментов [2] известно, что материал ударяющей частицы остается в кратере мишени (в рассматриваемом случае в канале проводимости МДМ-структуры в диапазоне скоростей частиц 0.5–15 км/с⁻¹).

На рис. 3 видно, что количество эмитируемых с нагретой поверхности ионов Н, О, К, С, Al, Na, He увеличивается с повышением напряжения. Также наблюдаются ионы алюминия, принадлежащие как частице, так и верхней обкладке МДМ-структуры (Al).

При соударении частицы хрома (Cr) с поверхности МДМ-структуры с помощью времяпролетного масс-спектрометра 13 (рис. 1) наблюдались ионы Cr и также ионы О, К, Na, Н, С.

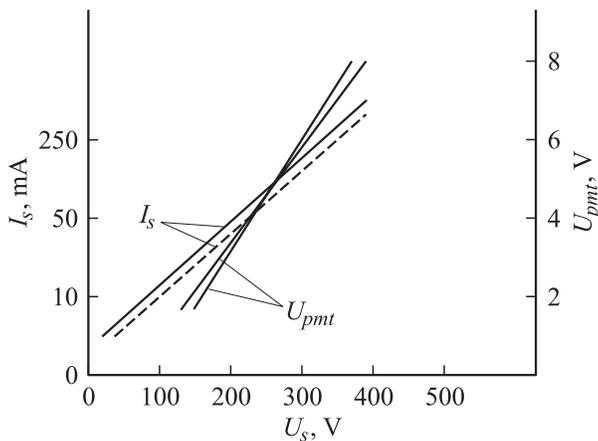


Рис. 2. Зависимость сквозного тока ударножаты МДМ-структуры от напряжения.

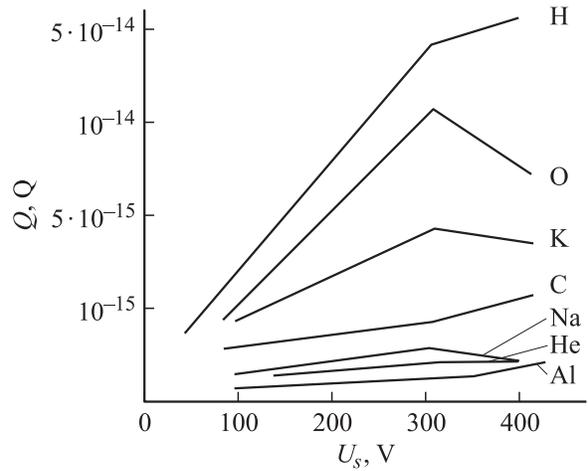


Рис. 3. Зависимость зарядов элементов ударножаты канала проводимости от напряжения на МДМ-структуре.

Таким образом, путем выбора материалов диэлектрика, частицы и верхней обкладки структуры можно получать каналы проводимости с различными свойствами. Температура ударножаты канала проводимости в режиме стационарного свечения зависит от геометрии, материалов частицы и МДМ-структуры. Знание температуры ударножаты канала проводимости позволяет понять некоторые его свойства.

При ударном воздействии частицы температура в зоне контакта нагревает верхнюю обкладку и диэлектрик конденсатора (МДМ-структуры). При этом увеличивается количество свободных носителей (электроны, ионы) в области ударножаты канала проводимости диэлектрика, а приложенная энергия электрического поля к МДМ-структуре превращает кратковременный процесс взаимодействия в стационарный режим свечения, при котором в канале проводимости выделяется энергия порядка $10^{-2} \dots 0.5$ Вт, что является достаточным, учитывая низкую теплопроводность диэлектрика и малые геометрические размеры канала, для того чтобы нагреть ударножаты участок диэлектрика до температуры порядка 500–1000°С.

Для нахождения температуры ударножаты канала проводимости рассмотрим случай стационарного теплообмена в МДМ-структуре, изображенной на рис. 4. Она состоит из верхней алюминиевой обкладки 1, диэлектрика 2 (полиметилметакрилата), нижней медной обкладки 3, регистратора 4. При соударении частицы с обкладкой 1 образуется кратер, а в диэлектрике распространяется ударная волна, энергия которой совместно с энергией электрического поля, приложенного к конденсатору, переводит диэлектрик в полупроводящее состояние.

Исследование стационарного теплообмена в ударножаты МДМ-структуре, как и любой метод исследования теплофизических свойств различных классов материалов, основано на решении дифференциального урав-

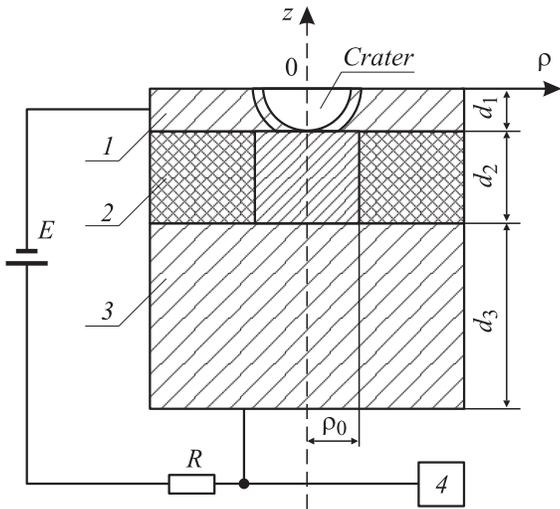


Рис. 4. Общий вид МДМ-структуры.

нения теплопроводности при определенных начальных и граничных условиях. Так как исследуемый процесс является стационарным, то уравнение устанавливает связь между пространственными изменениями температуры T .

Уравнение теплопроводности запишем в виде

$$\nabla^2 T = -\frac{\sigma(\rho, t)E^2}{\lambda}, \quad (1)$$

где $\nabla^2 T$ — температурный поток, E — напряженность электрического поля, λ — коэффициент теплопроводности материала, $\sigma(\rho, t)$ — проводимость материала:

$$\sigma(\rho, t) = \begin{cases} \sigma_0 e^{-U/kT}, & \rho \leq \rho_0, \\ \sigma_0, & \rho > \rho_0 \end{cases}, \quad (2)$$

где σ_0 — проводимость материала без внешнего воздействия, U — энергия активации (eV), k — коэффициент Больцмана, ρ — координата (рис. 4).

Краевые условия имеют вид

$$\lambda \frac{dT}{dZ} \Big|_{Z=0} = \varepsilon \sigma_{SB} (T_{(Z=0)}^4 - T_0^4), \quad (3)$$

$$\lambda \frac{dT}{dZ} \Big|_{Z=d} = \alpha (T_S - T), \quad (4)$$

где ε — коэффициент черноты, σ_{SB} — постоянная Стефана–Больцмана, σ — коэффициент теплоотдачи, T_S — температура подложки, T_0 — температура окружающей среды, d — толщина диэлектрика МДМ-структуры, Z — координата.

Перейдем к другой системе координат

$$\xi = \frac{\rho}{d}, \quad \rho = \xi d. \quad (5)$$

Для определенности положим

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_0}, \quad T = T_0(1 + \theta),$$

тогда

$$\lambda \frac{dT}{dZ} \Big|_{Z=0} = \varepsilon \sigma_{SB} (T_{(Z=0)} - T_0) (T_{(Z=0)} + T_0) (T_{(Z=0)}^2 + T_0^2), \quad (6)$$

$$\lambda \frac{T_0 d\theta}{d\xi} \Big|_{\xi=0} = \varepsilon \sigma_{SB} T_0 \theta (T_0(2 + \theta)T_0^2((1 + \theta)^2 + 1)). \quad (7)$$

Отсюда следует, что

$$\frac{d\theta}{d\xi} \Big|_{\xi=0} = \theta H \Big|_{\xi=0},$$

где

$$H \Big|_{\xi=0} = \frac{\varepsilon \sigma_{SB} d T_0^3}{\lambda} ((2 + \theta)((1 + \theta)^2 + 1)). \quad (8)$$

На подложке (3, рис. 4)

$$\frac{d\theta}{d\xi} \Big|_{\xi=1} = -\gamma \theta,$$

где $\gamma = \alpha d / \lambda$.

Окончательно уравнение теплопроводности запишем в виде

$$\frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left(\rho \frac{d\theta}{d\rho} \right) + \frac{d\theta}{d\xi} = -\frac{\sigma(\rho, t)E^2 d^2}{\lambda T_0} \quad (9)$$

с граничными условиями

$$\frac{d\theta}{d\xi} \Big|_{\xi=0} = \theta H, \quad \frac{d\theta}{d\xi} \Big|_{\xi=1} = -\gamma \theta. \quad (10)$$

После ряда преобразований получим выражение для температуры в виде

$$\theta(\rho, z) = C_1^2 \cos(\mu_1 z + \alpha_1) \frac{E^2 d^2}{\lambda T_0} ABC. \quad (11)$$

Здесь $\cos(\mu_1 z + \alpha_1)$ — базисная функция,

$$\alpha = -\operatorname{arctg} \frac{H}{\mu},$$

где α — фаза базисной функции, μ — собственное значение базисной функции, C — нормировочный коэффициент,

$$A = \sin[(\mu_1 + \alpha_1) - \sin \alpha_1],$$

$$B = K_0(\mu_1, \rho) \int_0^\rho d\rho' \rho' I_0(\mu_1, \rho') \sigma(\rho'),$$

$$C = I_0(\mu_1, \rho) \int_0^\infty d\rho' \rho' K_0(\mu_1, \rho') \sigma(\rho'), \quad (12)$$

где индекс „1“ относится к первому члену ряда.

Выражение (11) использовалось для следующей модели МДМ-структуры: толщина верхней обкладки (алюминий) $d_1 = 1$, толщина диэлектрического слоя (полиметилметакрилат) $d_2 = 1$, толщина нижней обкладки

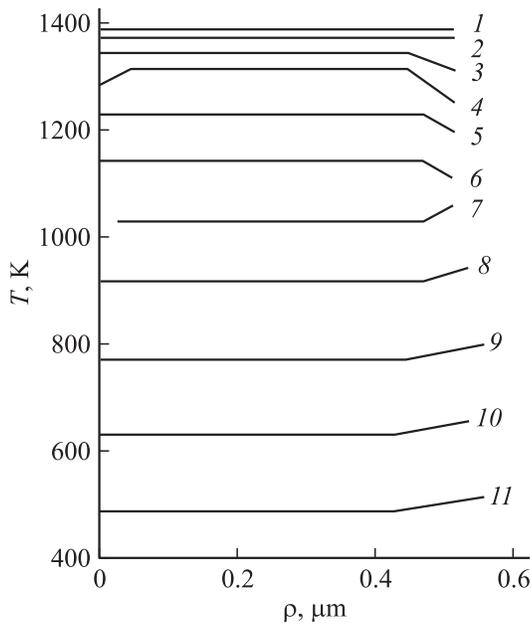


Рис. 5. Зависимость температуры светящегося канала от радиуса и координат z (напряжение 100 В). 1 — $z = 0$, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 3, 5 — 4, 6 — 5, 7 — 6, 8 — 7, 9 — 8, 10 — 9, 11 — $10 \mu\text{m}$. Радиус канала $5 \mu\text{m}$.

(медь) в одном случае $d_3 = 50$, в другом — $2 \mu\text{m}$. Компьютерное моделирование показало, что температура светящегося канала сильно зависит от его размеров. Чем больше радиус светового пятна, тем ниже температура канала (рис. 5), причем внутри канала наблюдается резкое падение температуры в направлении к медной подложке (рис. 6) в связи с хорошим отводом тепла.

Если же толщину нижней обкладки уменьшить ($d_3 = 2$), то температура по вертикали будет в 2–3 раза выше, чем в первом случае ($d_3 = 50 \mu\text{m}$). Установлено,

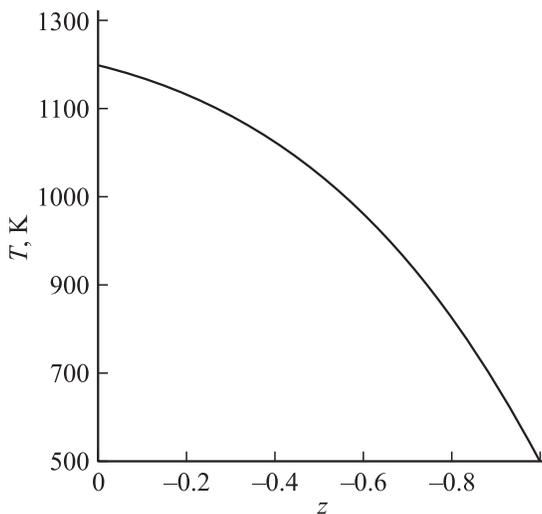


Рис. 6. Зависимость температуры светящегося канала от координаты z (напряжение 100 В).

что характер зависимости не зависит от напряжения, меняется только абсолютный уровень температуры. По горизонтальной оси температура в соответствии с расчетом находится в пределах $400\text{--}1500^\circ\text{C}$ в зависимости от приложенной энергии к МДМ-структуре от источника постоянного тока и сопротивления канала, обусловленного процессами диффузии атомов нагретой зоны, верхней обкладки и частицы в зону ударносжатого диэлектрика, а также процессом его деструкции.

Очевидно, что при таких температурах происходят химические изменения внутри диэлектрика с образованием высокотемпературного соединения. Известно [6], что диэлектрическая пленка полиметилметакрилата выдерживает температуры порядка $250\text{--}300^\circ\text{C}$, а далее происходит разрушение полимерной структуры и начинают рваться связи O—O, C—C, C—H, O—H. Совместно с процессом диффузии атомов происходит образование нового металлоорганического соединения. При разрывах межатомных связей возможно образование новых химических соединений: Al_4C_3 , Al_2O_3 , $\text{Al}(\text{OH})_3$. Молекулы H_2 , C_2 , O, могут испаряться с поверхности нагретого кратера. При взаимодействии частиц из других материалов могут образоваться другие соединения. Другими словами, при определенных условиях (материалы частицы и МДМ-структуры, напряжения на ней, скорость частицы) высокоскоростного взаимодействия частицы с МДМ-структурой может произойти синтез какого-либо химического соединения, причем его размеры составляют доли и единицы микрон. Из возможных вариантов соединений алюминия (с учетом полученных удельных сопротивлений канала проводимости) расчетные температуры может выдерживать соединение Al_4C_3 — карбид алюминия. На основании проведенных исследований в дальнейшем представляется возможным получение металлоорганических соединений с заранее заданными свойствами на малых площадях (менее $1 \mu\text{m}^2$), что может, например, найти применение в микроэлектронике. Условия получения ударносжатого канала проводимости зависят от ряда факторов, основными из которых являются соотношение энергии частицы и электрического поля конденсатора, их геометрии. Результаты использованы при создании датчиков для регистрации и измерения физико-химических свойств мелкодисперсных частиц и микрометеороидов [8].

Полученные ударносжатые каналы проводимости могут использоваться как ячейки памяти, поскольку они в течение длительного времени не меняют свои свойства, а также как преобразователи „напряжение—свет“ (рис. 2). Дальнейшее продолжение исследований ударносжатых МДМ- и МДП-структур (металл—диэлектрик—полупроводник) [7] предполагает более детальное изучение процессов химической кинетики в ударносжатых диэлектриках в момент их перехода в новое состояние. Для этого необходимо совместное решение уравнений гидродинамики, электродинамики и химической кинетики. Проводимые исследования ударносжатых структур имеют перспективы для различных

областей науки и техники, например, при создании пленочных датчиков [8,9] и космического аппарата [10] для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора, получения металлоорганических полупроводниковых соединений с заданными свойствами.

Список литературы

- [1] Твердые тела под высоким давлением / Под ред. Л.П. Виноградова. М.: Мир, 1966.
- [2] Rauser P. // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. N 11.
- [3] Апати И., Васюкова З.В., Коцеев Б.Л. „Интеркосмос-14“ и сопутствующие наземные наблюдения метеоров // Космические исследования. 1981. Вып. 5.
- [4] Семкин Н.Д. // Изв. вузов. Приборостроение. 1986. № 8.
- [5] Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Кондрашов В.Н. Исследование характеристик ионизационно-конденсаторного преобразователя пылевых частиц, полученных с помощью импульсного лазера. Препринт ТРИНИТИ 0040-А. ЦНИИАТОМЙНФОРМ, 1998.
- [6] Семкин Н.Д., Воронов К.Е. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 8. С. 63–66.
- [7] Семкин Н.Д., Семенчук С.М., Юсупов Г.С. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 6.
- [8] Semkin N.D., Novikov J.S., Voronov K.E. et al. // Proc. of Symp. on Environment Modeling for Space-based Application. ESTEC Nordwik. 18–20 Nov. 1996. ESA. SP-392.
- [9] Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Новиков Л.С., Богоявленский Н.Л. // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 2. С. 123–129.
- [10] Bdlakin V.L., Shakmistov V.M., Semkin N.D. et al. // Proc. of the Second Europ. Conf. on Space Debris. ESOC. Darmstadt. Germany. 17–19 March. 1997. ESASP-393.