

## ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОВОДИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

© 2011 А. М. Телегин, М. П. Калаев, Н. Д. Сёмкин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Приведен обзор исследований проводимости диэлектриков и полупроводников при высоких давлениях. Перечислены методы исследования. Представлены экспериментальные данные и теоретические модели.

*Проводимость, высокое давление, высокоскоростное соударение, ускоритель.*

### Введение

В твердых телах под высоким давлением, создаваемым высокоскоростным ударом, имеет место множество самых разнообразных явлений: вспышки, ионизации при высокоскоростном соударении, химические превращения в твердых телах, изменение проводимости и запрещенной зоны ударносжатых полупроводников и диэлектриков [1, 2].

По изменению проводимости можно, в частности, судить о физико-химических процессах, протекающих в сжатых материалах. Знание зависимости изменения проводимости от давления для различных материалов позволяет создавать датчики давления, контролировать процесс обработки материалов в экстремальных условиях.

Параметры состояния конденсированного вещества за фронтом ударной волны могут быть рассчитаны при совместном решении уравнений сохранения массы, количества движения и энергии. Поскольку ударная адиабата вещества, как правило, известна или может быть построена с достаточной точностью, достоверность рассчитанных параметров состояния определяется правильностью выбора уравнения состояния конденсированного вещества при высоких давлениях и температурах [3].

При этом нужно отметить, что процессы, происходящие при высоких давлениях в органических и неорганических диэлектриках, различаются. Это происходит благодаря разнообразию форм химической связи и активности электронов в органических материалах. При этом оказываются возможными

такие изменения проводимости, которые являются недостижимыми для неорганических диэлектриков [4].

Для создания и измерения высокого давления используются различные методы, представленные в работах [5-13].

Условно можно разделить эти методы на экспериментальные и численные. Экспериментальные методы, в свою очередь, проводят на специальном дорогостоящем оборудовании: ускорителях частиц, мощных лазерах, в космическом пространстве. Численные методы основываются на экспериментальных данных.

Наиболее адекватным, по нашему мнению, для моделирования высокоскоростного соударения твердых тел является использование ускорителей частиц, так как они позволяют создать высокие динамические давления.

В настоящее время наиболее эффективным средством решения прикладных задач взаимодействия деформируемых тел и сред являются специальные методы вычислительной математики — численные методы механики сплошных сред. В сочетании с методами программирования и огромными вычислительными возможностями современных компьютеров численные методы механики сплошных сред позволяют создавать расчётные методики (компьютерные коды), являющиеся мощным инструментом в руках инженера-исследователя. Широко распространена программа для расчёта поведения конденсированных тел при ударном нагружении LSDYNA [14]. Также существует оп-

line программа по изучению теплофизических свойств веществ при высоких плотностях энергии <http://teos.ficp.ac.ru/rusbank/> [15].

Но для каждой узкоспециализированной задачи необходимо разрабатывать свою программу либо комбинировать несколько программ. Примером могут служить задачи по изучению ионизации, вспышке, химического состава веществ при высокоскоростном соударении твердых тел, изменения электропроводности материалов [13, 16, 17].

### Модель проводимости

Проведенные исследования [18] показали, что электропроводность органического стекла и парафина в ударной волне изменяется на 15...20 порядков, что свидетельствует о "металлизации" этих диэлектриков при сжатии до давления порядка миллионов атмосфер.

Это явление нельзя объяснить термической ионизацией. Оно связано с изменением структуры электронных зон твердого тела при сжатии. При сжатии зоны сближаются, расстояние между ними уменьшается и, тем самым облегчаются электронные переходы, приводящие к появлению свободных электронов и металлической проводимости в веществе, ранее бывшем диэлектриком.

Опыты с хлористым натрием, который при нормальных условиях обладает небольшой ионной проводимостью, позволяют считать, что основную роль в повышении электропроводности при увеличении амплитуды ударных волн играет температура:

$$\sigma(T) \sim e^{-E/kT},$$

где  $E = 1,2$  эВ – энергия активации [18].

Более общая формула для проводимости, основанная на ионизации вещества и сжатии при давлении, приведена в работе для металлизации водорода [19]:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-\Delta(\rho)/2kT),$$

где  $\Delta(\rho) = 1,22 - 62,6 \cdot (\rho - 0,30)$ ,  $\Delta$  - выражается в эВ,  $\rho$  - в моль·см<sup>-3</sup>, а проводимость  $\sigma_0 = 90$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-3</sup> считается постоянной. Металлизация водорода ( $\Delta = 0$ ) происходит при давлении  $p = 140$  ГПа и температуре  $T=2600$ К. При больших давлениях проводи-

мость практически перестает зависеть от давления.

Другой причиной изменения электропроводности являются фазовые превращения, которые приводят к необратимому изменению электропроводности.

Анализ совокупности экспериментальных данных свидетельствует, что с увеличением давления во фронте ударной волны полиметилметакрилат (PMMA) претерпевает ряд физико-химических превращений, в результате которых свойства более плотных состояний заметно отличаются от наблюдаемых при нормальных условиях. На ударной адиабате превращение начинается в области давления  $P = 214$  кбар и сопровождается резким ростом ударно-индуцированной поляризации нагружаемого образца и потерей оптической прозрачности пластика [20].

Также отмечается, что в ударных волнах может происходить деструкция углеводородов. Деструкция углеводородов за фронтом ударных волн наблюдается при достижении в исходном соединении некоторой температуры  $T^*$ , величина которой определяется кратностью связи между атомами углеводорода в молекуле [21, 22].

Практическим примером применения исследований в области динамического изменения проводимости диэлектриков и полупроводников является построение датчиков космического мусора.

Для определения параметров микрометеороидов и частиц космического мусора необходимы датчики, преобразующие ударные воздействия в электрические сигналы. В качестве детектора в таких датчиках можно использовать пленочные структуры металл – диэлектрик – металл (МДМ) [13, 17, 23, 24].

Моделирование высокоскоростного соударения твердых частиц с чувствительной поверхностью датчика проводится с целью отработки конструктивных элементов датчика, проверки электрических схем регистрации, создания методик обработки результатов, проверки правильности предложенных моделей высокоскоростного взаимодействия пылевой частицы с тонкопленочными структурами.

При толщине верхней обкладки МДМ-структуры больше размера частицы кратер при ударе механически не разрушает материал диэлектрика, но ударная волна за счет сжатия и последующего нагрева приводит к кратковременному увеличению его проводимости. При этом предварительно заряженный конденсатор частично разряжается через канал проводимости. Измеряя остаточное напряжение на конденсаторе, можно оценить интенсивность ударной волны и, следовательно, параметры частицы.

Для оценки изменения проводимости МДМ – структуры необходимо знать характер распространения ударных волн, распространяющихся в конденсаторной структуре после удара. Для этого используют приближенные аналитические зависимости [25], либо численными методами решается система гидродинамических уравнений [18].

Закон изменения электропроводности ударносжатой МДМ-структуры берётся в виде [25]:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-\Delta E / 2 \cdot kT(t)),$$

где  $\sigma_0$  - удельная проводимость диэлектрика при нормальных условиях (температура 20°C,

давление 1 бар), а  $\Delta E$  - текущая ширина запрещенной зоны для полиметилметакрилата.

На основе решения системы гидродинамики и электродинамики с учётом уравнений состояния вещества верхней обкладки и диэлектрика МДМ – структуры приведем зависимости сопротивления ударно – сжатого диэлектрика от времени при различных энергиях частицы (рис.1).

Сопротивление диэлектрика в переходном состоянии под динамическим давлением можно вычислить по формуле [17]:

$$R_{\text{уд}}(t) = 0,186 \frac{\rho_y \cdot b \cdot \rho_{01}^{0,4} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{\lambda_{10} \cdot \rho_{02}}{\lambda_0 \cdot \rho_{01}}}\right)^{0,8}}{E^{0,4} \cdot t^{0,8} \cdot \left(\frac{1 - \lambda^2}{\lambda^2}\right)},$$

где  $\rho_y$  – удельное сопротивление материала нижней обкладки,  $b$  – толщина диэлектрика,

$\lambda = 1 - \frac{\rho_{02}}{\rho_2}$ ,  $\lambda_1 = 1 - \frac{\rho_{01}}{\rho_1}$ , при давлении  $p_0$

величины  $\lambda$  и  $\lambda_1$  принимают значения  $\lambda_0$  и  $\lambda_{01}$ ;  $\rho_{02}$ ,  $\rho_{01}$  – собственно исходная плотность среды и ударника.

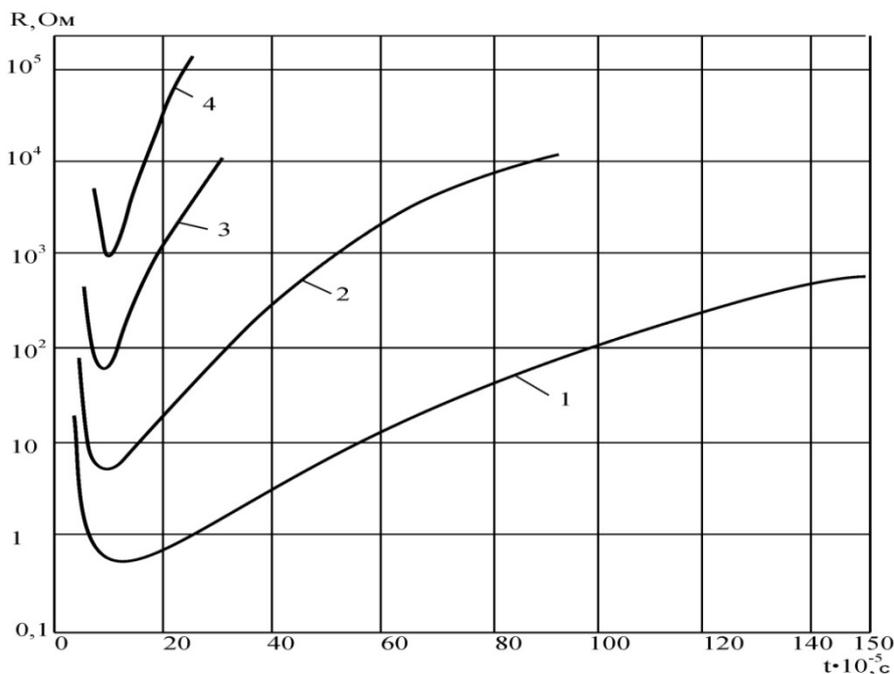


Рис. 1. Зависимость сопротивления ударно-сжатого диэлектрика от времени при различных энергиях удара: 1 -  $E = 1,25 \cdot 10^{-3}$  Дж; 2 -  $E = 10^{-4}$  Дж; 3 -  $E = 10^{-5}$  Дж; 4 -  $E = 10^{-6}$  Дж

### Экспериментальные данные о проводимости ударносжатых материалов

В работе [26] проводилось измерение электропроводности серы при сверхвысоких динамических давлениях электроконтактным методом по четырехточечной схеме. Ударные волны получали с помощью ударника, разогнанного на ускорителе взрывного типа.

Согласно экспериментам авторами было найдено, что сера переходит в металлическое состояние при 200...240 кбар (рис. 2).

Нельзя не отметить также работу [27] по ударному сжатию полупроводника селена (рис.3).

С целью исследования фазовых переходов в селене поставлены разрешенные во времени измерения электропроводности при ударном сжатии до 320 кбар. Найдена зависимость электропроводности от давления, которая включает два участка: резкий рост ( $P < 210$  кбар) и „плато“ ( $P > 210$  кбар). Полученные экспериментальные данные вместе с оценками температуры показывают, что при  $P < 210$  кбар селен находится в полупроводниковом состоянии. В полупроводниковом селене ширина энергетической щели существенно уменьшается при сжатии. При давлении  $P > 210$  кбар электропроводность демонстрирует насыщение на уровне  $\sim 10^4 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ . Столь высокая электропроводность свидетельствует об эффективной металлизации

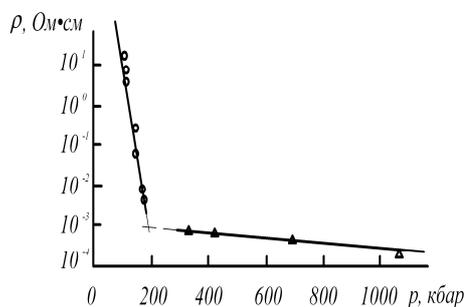


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления серы от давления

ударно-сжатого селена. Эксперименты с образцами различной начальной плотности выявляют влияние температуры на фазовый переход.

Технология измерений при переходе системы диэлектрик (полупроводник)–металл в ударных волнах зависит от величины электропроводности исследуемого вещества [28, 29]. Для относительно невысокой электропроводности ( $\sigma < 10^3 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ ) применимо электротехническое приближение. В этом случае средняя электропроводность вещества  $\sigma$  может быть найдена по формуле [30]:

$$\sigma = \frac{\delta_s}{\rho_s(D-u)t} \left( \frac{V_0}{V} - 1 \right),$$

где  $\delta_s$  — толщина фольги,  $\rho_s$  — удельное сопротивление фольги,  $V_0$  — начальное напряжение,  $D$  — волновая скорость,  $u$  — массовая скорость.

Погрешность измерения электропроводности существенно зависит от величины последней и достигает в настоящей работе до 20%.

При малых ударных давлениях электропроводность селена невелика. В этом случае использовалась модифицированная измерительная ячейка. В образце параллельно направлению распространения ударного фронта располагались плоские контакты из медной фольги (толщина 50 мкм, ширина 10 мм, расстояние 20...30 мм).

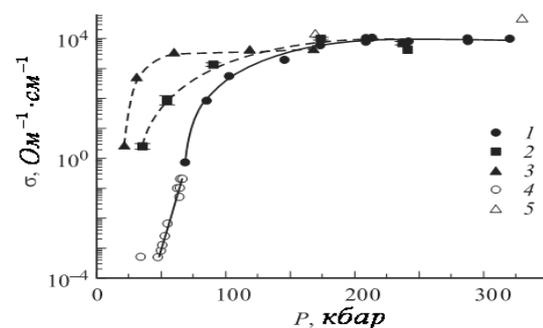


Рис. 3. Зависимость электропроводности селена от давления ударной волны: 1 — сплошной селен; 2 — порошковый селен (плотность 3,1 г/см<sup>3</sup>); 3 — порошковый селен (плотность 1,7 г/см<sup>3</sup>); 4 — данные ударно-волновых экспериментов [31]; 5 — результаты опытов при статическом сжатии [32]

Шунтом служило сопротивление 1...20 Ом, которое располагалось вне зоны действия ударной волны.

Авторы отмечают, что металлический переход происходит за время, которое на девять порядков меньше, чем при статическом сжатии (найденное из осциллограмм время „включения“ проводимости составляет  $< 10$  нс). При этом полный рост электропроводности образца во время сжатия составляет более двенадцати порядков величины.

При разгрузке электросопротивление селена изменяется относительно слабо, что указывает на временное сохранение металлической фазы и задержку обратного перехода. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о гистерезисе проводимости ударно-сжатого селена и существенной асимметрии прямого и обратного переходов.

Полученные данные говорят о протекании в селене фазового перехода, сопровождающегося металлизацией. При давлении  $P < 210$  кбар сплошной селен является полупроводником, при  $P > 210$  кбар — металлом. Давление металлического перехода при ударном сжатии отличается от условий статического сжатия. Металлизация сплошного селена при ударном сжатии обусловлена плавлением или твердофазным переходом. Более ранняя металлизация порошка обусловлена тепловым механизмом.

Представленные в настоящей работе результаты экспериментального исследования селена имеют очевидную качественную общность с поведением другого элементарного полупроводника — кремния [30], что позволяет рассматривать полученные данные как типичные для ударной металлизации полупроводников.

В работе [32] исследовалось электрическое сопротивление политетрафторэтилена (PTFE) при ударном сжатии.

Сопротивление после ударного сжатия политетрафторэтилена определяется в диапазоне давлений от 350 до 630 кбар. Измерения проводились с использованием ячейки толщиной 0,2 мм с равномерным распределением сопротивления по толщине. При давлении выше 350 кбар сопротивление монотонно уменьшается, достигая равновесного значе-

ния за характерное время около 0,5 мкс на расстоянии нескольких миллиметров от плоскости распада разрыва. Результаты показывают на разрушение полимера в диапазоне давлений от 35 до 63 ГПа. Во всем диапазоне давлений среднее значение эмпирической энергии диссоциации составляет  $3,3 \pm 0,7$  эВ, что совпадает в пределах ошибки с энергией связи С-С, равной 3,6 эВ.

Полученные результаты указывают на ионный механизм проводимости при ударном давлении выше 350 кбар. В рассматриваемом диапазоне давлений средняя эмпирическая энергия диссоциации  $E_{duc} = 3,3 \pm 0,7$  эВ, что совпадает в пределах ошибки с энергией одной связи С-С:  $E = 3,6$  эВ.

В работе [33] была измерена удельная электропроводность  $\sigma$  кристаллов фуллере-на  $C_{60}$  в условиях квазиизэнтропического нагружения размытой ударной волной до давления 200 кбар при начальных температурах  $T = 293$  К и 77К. В результате зарегистрировано резкое увеличение  $\sigma$  на 7...8 порядков с  $10^{-6} \dots 10^{-7}$  Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$  при нормальных условиях до 5 Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$  в диапазоне давлений 100...200 кбар. Электропроводность образцов под давлением падает с понижением температуры, что характерно для полупроводников. При снятии давления значение  $\sigma$  возвращается к исходной величине.

На рис.4 представлена зависимость давления (кривая 1) и электропроводности (кривая 2) образца  $C_{60}$  от времени при сжатии размытой ударной волной.

Полученные результаты позволяют говорить о резком уменьшении запрещенной зоны кристаллов  $C_{60}$  при приложении давления. Однако наблюдающаяся зависимость электропроводности под нагрузкой от температуры свидетельствует о том, что ширина запрещенной зоны уменьшается не до нуля и образец при 200 кбар остается полупроводниковым. Это качественно согласуется с данными по воздействию статического давления на кристаллический  $C_{60}$ .

По мнению авторов, в условиях динамических нагрузок характерные пространственный и временной масштабы приводят к практическому отсутствию диффузионного и

химического взаимодействий исследуемых образцов и среды, что исключает возможность объяснения полученных результатов такого вида эффектами.

Анализ многочисленных данных по изменению спектров оптического поглощения кристаллов  $C_{60}$  при приложении гидростатического давления показывает, что ширина запрещенной зоны падает с увеличением давления с коэффициентом  $\beta = dE_G/dP$  порядка 7...10 мэВ/кбар. Полагая, что в используемых чистых кристаллах уровень Ферми находится примерно в середине запрещенной зоны, можно оценить зависимость электропроводности  $\sigma$  от давления при постоянной температуре  $T$ :

$$\sigma / \sigma_0 = \exp(-\beta \cdot t \cdot k^{-1} \cdot T^{-1}),$$

где  $\sigma_0$  - электропроводность при нулевом давлении.

Видно, что при  $P < 11$  ГПа экспериментальные данные хорошо описываются формулой (1), причем величина  $\beta$  порядка 8,4 мэВ/кбар. При большем давлении величина  $\beta$ , формально вычисленная как  $\beta = -2kTd(\log(\sigma / \sigma_0)) / dP$  из наклона зависимости, показанной на рис.5, заметно падает, что до некоторой степени может быть следствием уменьшения сжимаемости (увели-

чения модуля Юнга) кристалла в силу сильной непараболичности потенциала взаимодействия между молекулами  $C_{60}$ .

Экспериментальные исследования взаимодействия ускоренных пылевых частиц с активной МДМ-структурой проводились на основе электродинамического ускорителя [11].

Моделирование проводилось с использованием круглых конденсаторных датчиков (диаметр с  $D_\delta=80$  мм,  $C_\delta=88$  нФ, с толщиной диэлектрика  $h=2$  мкм, напыленными  $Al$  обкладками толщиной 0,035 мкм).

После экспериментов поверхность пленки подвергалась визуальному контролю с помощью микроскопа типа МИИ-4. В результате анализа в пределах возможного увеличения ( $\approx 500$ ) обнаружено наличие двух типов сквозных отверстий в конденсаторных датчиках. Отверстия первого типа представляют собой достаточно ровные сферические отверстия с оплавленными краями диаметром  $d \approx 3...8$  мкм, без видимого повреждения обкладок в окрестности отверстия (рис.6).

Отверстия второго типа являются часто не сферическими, с частично оплавленными краями, диаметром  $d \approx 10...20$  мкм, с характерным рваным отслоением обкладок в окрестности отверстий (рис.7).

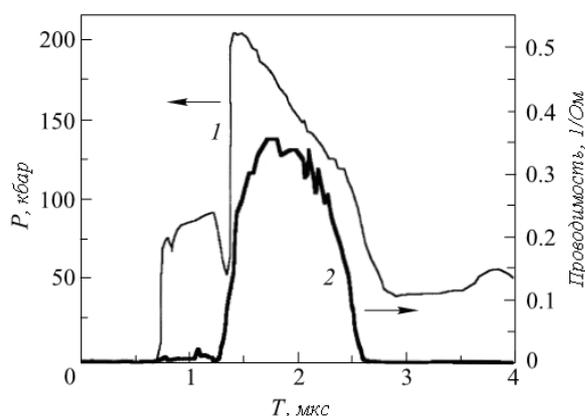


Рис. 4. Зависимость давления (кривая 1) и электропроводности (кривая 2) образца  $C_{60}$  от времени при сжатии размытой ударной волной

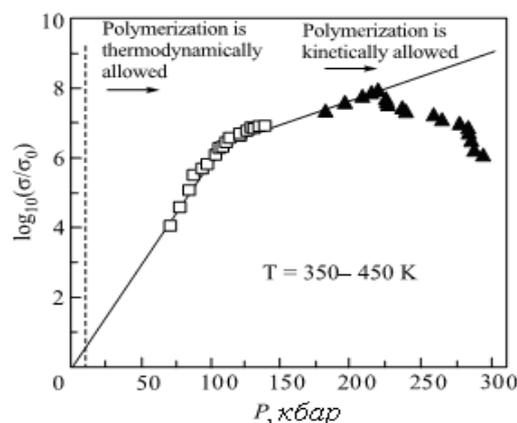


Рис. 5. Зависимость проводимости  $\sigma$  от давления  $P$  для кристаллов  $C_{60}$  при импульсном нагружении. Светлые квадраты - данные из работы [34], темные треугольники - данные работы [35]

Достаточно часто в центре отверстия второго типа наблюдается застрявшая частица размером  $\approx 10$  мкм. Непробиваемых кратеров обнаружить не удалось вследствие низкого усиления микроскопа.

По результатам анализа можно предположить наличие двух механизмов закорачивания обкладок конденсаторного датчика:

- за счёт создания проводимости, стимулирующей электрический пробой конденсатора при соударении высокоскоростной частицы небольшой массы (отверстия первого типа);

- за счёт механического закорачивания обкладок конденсаторного датчика проводящей частицей с размерами  $r_x > h$  или в результате увеличения проводимости (плотности

тока) больше критического значения, соответствующего началу электрического пробоя, при взаимодействии с конденсаторным датчиком низкоскоростной частицы большой массы (отверстия второго типа).

В результате обработки экспериментальных данных получено максимальное значение проводимости конденсаторного датчика при электрическом пробое от скорости и массы пылевой частицы. Они представлены на рис.7

Как можно видеть из рис.8, увеличение электрического поля, прикладываемого к МДМ-структуре, приводит к более сильному изменению проводимости диэлектрика, а следовательно, повышается чувствительность датчиковой аппаратуры.

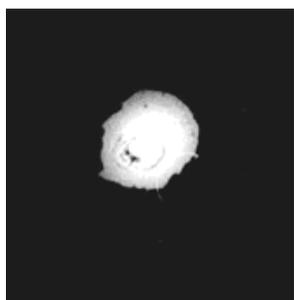


Рис. 6. Фотография отверстия в конденсаторном датчике, случай высокоскоростного соударения

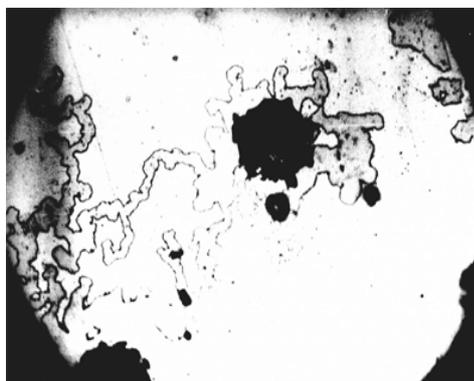


Рис. 7. Фотография отверстия в конденсаторном датчике, случай низкоскоростного соударения (в центре застрявшая частица)

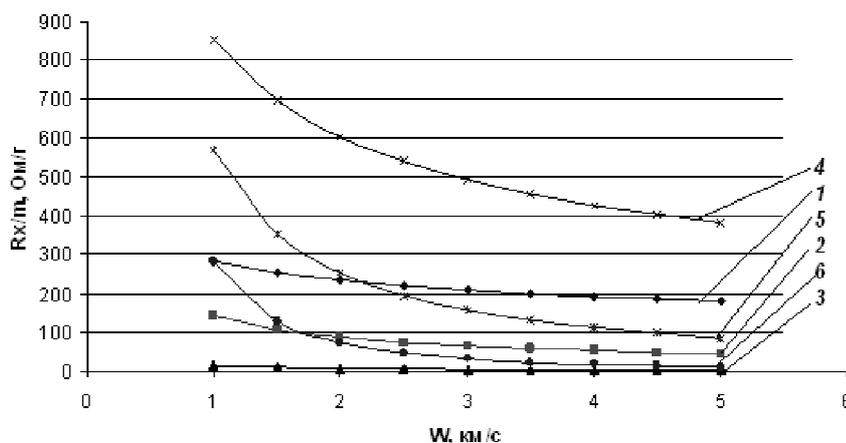


Рис. 8. Зависимость сопротивления диэлектрика, отнесённого к массе частицы, с конденсаторного датчика от скорости пылевой частицы: непробиваемый случай: 1 -  $U_0 = 75$  В, 2 -  $U_0 = 100$  В, 3 -  $U_0 = 125$  В;

пробиваемый случай: 4 -  $U_0 = 75$  В, 5 -  $U_0 = 100$  В, 6 -  $U_0 = 125$  В

### Заключение

Увеличение напряжения на конденсаторном датчике приводит к увеличению напряжённости поля внутри диэлектрика и расширяет диапазон регистрируемых частиц как по массе, так и по скорости.

Следует отметить, что механизмы, протекающие в диэлектриках при высоком динамическом давлении, еще недостаточно детально исследованы и требуют дальнейшего теоретического изучения и экспериментального исследования.

Процессы, протекающие в диэлектриках и полупроводниках в экстремальном состоянии, зависят от типа материала, величины и характера давления, внешних факторов (электрических и магнитных полей).

### Библиографический список

1. Бриджмен, Пол В., Варшауэр Д. [ред.]. Твердые тела под высоким давлением [Текст]: пер. с англ., М.: Мир. - 1966. - 524с.
2. Дремин, А. Н. Химическая физика высоких динамических давлений [Текст] / А. Н. Дремин // Хим. физика. - 2009. - Т.28. - № 4. – С. 55- 62.
3. Воскобойников, И. М. Описание состояния вещества за фронтом ударной волны [Текст] / И. М. Воскобойников, М. Ф. Гогуля // ФГВ.- 1978.-Т. 14. – С. 105-110.
4. Лачинов, А. Н. Электроника тонких слоев широкозонных полимеров [Текст] / А. Н. Лачинов, Н. В. Воробьева// УФН. – 2006. - Т.176. - №12. – С. 1249-1266.
5. Кобылкин, И. Ф. Ударные и детонационные волны. Методы исследования [Текст] / И. Ф. Кобылкин, В. В. Селиванов, В. С. Соловьев, Н. Н. Сысоев // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 376 с.
6. Каннель, Г. И. Ударные волны в физике конденсированного состояния [Текст] / Г. И. Каннель, В. Е. Фортов, С. В. Разоренов // УФН. – 2007. - Т.177. - №8. – С. 809-830.
7. Трунин, Р. Ф. Сжатие конденсированных веществ высокими давлениями ударных волн (лабораторные исследования) [Текст] / Р. Ф. Трунин // УФН.- 2001. - Т.171. - №4. – С. 387-414.
8. Альтшулер, Л. В. Развитие в России динамических методов исследований высоких давлений [Текст] / Л. В. Альтшулер, Р. Ф. Трунин, В. Д. Урлин, В. Е. Фортов, А. И. Фунтиков // УФН. -1999. - Т.169. - №3. – С. 323-343.
9. Фортов, В. Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества [Текст] / В. Е. Фортов // УФН. - 2007. - Т.177. - №4. – С. 347-368.
10. Каннель, Г. И. Ударно - волновые явления в конденсированных средах [Текст] / Г. И. Каннель, С. В. Разоренов, А. В. Уткин, В. Е. Фортов. – М.: Янус-К, 1996.- 408 с.
11. Сёмкин, Н. Д. Линейный ускоритель для моделирования микрометеоритов [Текст] / Н. Д. Сёмкин, А. В. Пияков, К. Е. Воронов, Н. Л. Богоявленский, Д. В. Горюнов // ПТЭ. -2007. - №1. – С. 1-8.
12. Novikov, J. S., Voronov, K. E., Semkin, N. D. and others. Attempt of measurement of space debris microparticles flux in Geosynchronous Orbit // Proc. Second European Conference on Space Debris, ESOC, Darmstadt, Germany 17–19 March 1997, 135–138p.
13. Сёмкин, Н. Д. Математическая модель проводимости ударносжатых пленочных МДМ – структур в условиях воздействия высокоскоростных пылевых частиц [Текст] / Н. Д. Сёмкин, А. М. Телегин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2010. - Том 13. - №4. – С. 75-79.
14. Experimental observations and computer simulations for metallic projectile fragmentation and impact crater development in thick metal targets // V. S. Hernandez et al. / International Journal of Impact Engineering 32 (2006) 1981–1999.
15. Шмачков, А. В. Одномерное газодинамическое моделирование типичных постановок ударно-волновых экспериментов через интернет [Текст] // А. В. Шмачков, П. Р. Левашов, М. Е. Поварницын, К. В. Хищенко / Тезисы XXIII международной конференции “Уравнения состояния вещества”: Эльбрус-2008. – 102 с.
16. Анучина, Н. Н. Расчетно – теоретические исследования масс – спектрометрических измерений состава пылевых частиц кометы Галлея в экспериментах “ВЕГА” [Текст] / Н. Н. Анучина, В. И. Волков, Е. Н. Евланов, В. П. Елсуков, Н. С. Еськов, О. М.

- Козырев, В. Ю. Политов, А. В. Петровцев, О. Ф. Прилуцкий, А. Т. Сапожников, М. К. Шишкарёв, А. Н. Шушлебин // *Физика горения и взрыва*. – 2004. - Т. 40. - №3. - С. 77-86.
17. Сёмкин, Н. Д. Взаимодействие высокоскоростных пылевых частиц с пленочной МДМ - структурой [Текст] / Н. Д. Сёмкин, К. Е. Воронов, Н. Л. Богоявленский, А. М. Телегин, М. В. Изюмов // *Метрология*. - 2009. - № 1. – С. 28-47.
18. Зельдович, Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений [Текст] // Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер / - М.: Наука, 1966. - 605 с.
19. Фортов, В. Е. Физика неидеальной плазмы [Текст] // В. Е. Фортов, А. Г. Храпак, И. Т. Якубов: Учеб. пособие. - М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2004. - 528 с.
20. Хищенко, К. В. Термодинамические свойства полиметилметакрилата при высоких температурах и давлениях в волнах ударного сжатия и разгрузки [Текст] / К. В. Хищенко, И. В. Ломоносов // *Хим. физика*. - 1998. - Т. 17. - № 7. – С. 74-79.
21. Воскобойников, И. М. Превращения некоторых органических соединений при ударно-волновом сжатии [Текст] / И. М. Воскобойников, О. И. Воскобойникова // *Хим. физ.* - 2001. - Т. 20. - № 10. – С. 70-74.
22. Зельдович, Я. Б. Температура и теплоемкость плексиглаза, сжатого ударной волной [Текст] / Я. Б. Зельдович, С. Б. Кормер, М. В. Синицын, А. И. Куряпин // *Докл. АН СССР*. - 1958. - Т. 122. - Вып. 1. – С. 48-50.
23. Сёмкин, Н. Д. Регистрация пылевых и газовых частиц в лабораторных и космических условиях [Текст] / Н. Д. Сёмкин, К. Е. Воронов, Л. С. Новиков – Самара: СГАУ, 2005. – 470с.
24. Сёмкин, Н. Д. Проводимость и ионообразование в ударносжатых пленочных структурах в условиях воздействия высокоскоростных пылевых частиц [Текст] / Н. Д. Сёмкин, А. М. Телегин, Р. А. Помельников // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. – 2009. - Т. 12. - №4. – С. 92-95.
25. Сёмкин, Н. Д. Проводимость ударносжатых МДМ-структур на основе полиметилметакрилата [Текст] / Н. Д. Сёмкин, К. Е. Воронов // *ЖТФ*. - 1998. - Т. 68. - Вып. 8. – С. 63-66.
26. Набатов, С. С. Измерение электропроводности серы при сверхвысоких динамических давлениях [Текст] / С. С. Набатов, А. Н. Дремин, В. И. Постнов, В. В. Якушев // *ЖЭТФ*. – 1979. - Т. 29. - Вып. 7. – С. 407-410.
27. Гилев, С. Д. Металлизация селена при ударном сжатии [Текст] / С. Д. Гилев // *ЖТФ*. - 2006. - Т. 76. - Вып. 7. – С. 41-47.
28. Gilev, S. D., Mihailova, T. Yu. // *J. de Physique IV 1997. Vol. 5. Colloque C3, Supplement au Journal de Physique III. N 7. 5<sup>th</sup> International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading (EURODYMAT 97), 1997, Toledo, Spain. Les Editions de Physique. P. C3-211-216.*
29. Gilev, S. D. Metallurgical and Materials Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena. Proc. of the Int. Conf / Ed. by L. E. Murr, K. P. Staudhammer, M. A. Meyers. Amsterdam: Elsevier, 1995. 785-792p.
30. Гилев, С. Д. Измерение высокой электропроводности кремния в ударных волнах // С. Д. Гилев, А. М. Трубочев / *ПМТФ*. - 1988. - № 6. – С. 61-67.
31. Kani, K., Yamada T., Abe M. [Текст] // *Shock Waves in Condensed Matter / Ed. by Y. M. Gupta. 1986. 477 -482p.*
32. Bordzilovskii, S. A., Karakhanov S. M.. Electric resistance of polytetrafluoroethylene under Shock Compression // *Combustion, Explosion and Compression // Vol. 38, №6, 2002. - 722-727p.*
33. Осипьян, Ю. А. Электропроводность кристаллов фуллерена  $C_{60}$  при динамическом сжатии до 200 кбар [Текст] / Ю. А. Осипьян, В. Е. Фортов, К. Л. Каган, В. В. Кведер, В. И. Кулаков, А. Н. Курьянчик, Р. К. Николаев, В. И. Постнов, Н. С. Сидоров // *Письма в ЖЭТФ*. - 2002. - Т. 75. - Вып. 11. – С. 680-683.
34. Yakushev, V. V., Postnov V. I., V. E. Fortov, Yakysheva T. I., *JETP* 90, 617 (2000). V. E. Fortov, V. Ya. Ternovoi, M. V. Zhernokletov et al., *JETP* 97, 217 (2003).
35. Осипьян, Ю. А. Немонотонное изменение электропроводности кристаллов фуллерена  $C_{60}$  при динамическом сжатии до 300 кбар как свидетельство аномально сильного понижения энергетического барьера для

полимеризации  $C_{60}$  при высоких давлениях В. В. Кведер, В. Е. Фортов // Письма в [Текст] / Ю. А. Осипьян, Б. В. Авдонин, К. Л. ЖЭТФ. - 2005. - Т. 81. - Вып. 9. - С. 587-590.  
Каган, Р. К. Николаев, В. И. Постнов, Н. С. Сидоров, Д. В. Шахрай, А. Ф. Шестаков,

## REVIEW OF RESEARCH CONDUCTIVITY OF DIELECTRICS AND SEMICONDUCTORS UNDER HIGH PRESSURE

© 2011 A. M. Telegin, M. P. Kalaev, N. D. Semkin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev  
(National Research University)

The review of researches conductivity dielectrics and semiconductors at high pressures.  
Research methods are listed. Experimental data and theoretical models are presented.

*Conductivity, high pressure, high-speed collision, the accelerator.*

### Информация об авторах

**Сёмкин Николай Данилович**, профессор кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, доктор технических наук, Самарский государственный аэрокосмический университет имени С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [semkin@ssau.ru](mailto:semkin@ssau.ru). Область научных интересов: высокоскоростной удар, масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

**Телегин Алексей Михайлович**, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [talex85@mail.ru](mailto:talex85@mail.ru). Область научных интересов: высокоскоростной удар, космическое приборостроение.

**Калаев Михаил Павлович**, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sgau5@yandex.ru](mailto:sgau5@yandex.ru). Область научных интересов: высокоскоростной удар, космическое приборостроение.

**Semkin Nikolay Danilovich**, professor of department radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after S. P. Korolev (national research university). E-mail: [semkin@ssau.ru](mailto:semkin@ssau.ru). Area of research: high-speed impact, mass spectrometry, space instrumentation.

**Telegin Aleksey Mikhailovich**, post-graduate of department radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after S. P. Korolev (national research university). E-mail: [talex85@mail.ru](mailto:talex85@mail.ru). Area of research: high-speed impact, space instrumentation.

**Kalaev Mikhail Pavlovich**, post-graduate of department radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after S. P. Korolev (national research university). E-mail: [sgau5@yandex.ru](mailto:sgau5@yandex.ru). Area of research: high-speed impact, space instrumentation.