

ИНДЕКС УДК 533.6.01.72

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В СВЕРХЗВУКОВОМ И ДОЗВУКОВОМ ПОТОКАХ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ И ПРОВОДЯЩИМИ ЭКРАНАМИ

¹Быков А.А., ¹Валиев Х.Х., ¹Великодный В.Ю., ¹Крыченко О.В., ¹Самуолис И.А.,
¹Погорелова Л.В. ¹Яновский Ю.Г. ,

I – Институт прикладной механики РАН, Москва

[E-mail: Vvelikodny@mail.ru](mailto:Vvelikodny@mail.ru)

Аннотация

Данная работа проведена совместно лабораторией физико-химической гидроаэродинамики и Отделом механики структурированной гетерогенной среды Института прикладной механики РАН. Были получены интересные фундаментальные результаты в области исследований эрозионного разряда в дозвуковых и сверхзвуковых потоках, долгоживущих плазменных образований, их взаимодействия диэлектрическими подложками, магнитным полем, а также детально и всесторонне была исследована структура кристаллических образований на различных типах микроскопов. На основе экспериментальных данных были разработаны физические модели процессов. На основе микроскопического анализа с привлечением микроскопической аппаратуры широкого спектра возможностей и увеличения были обнаружены кристаллы «аномальной» формы, существенно отличающиеся от стандартной формы кристаллов галитов, образующихся в равновесных условиях.

RESEARCH OF INTERACTION OF THE CHARGED PLASMA FORMATIONS IN SUPERSONIC AND SUBSONIC STREAMS WITH THE MAGNETIC FIELD, DIELECTRIC AND METAL SCREENS

This work is carried out by physical and chemical gas dynamic laboratory and Department of mechanics of the structured heterogeneous environment of Institute of applied mechanics of the Russian Academy of Sciences. Some interesting results were obtained in field of erosive discharge in supersonic and subsonic stream of medium of air and salt water drops. They are occurrence of long-living plasma formations, it's moving in magnetic field. Salt crystals arise on dielectric planes and have abnormal pyramidal and hexagon forms. They have been researched with optical, interference and atomic and force microscopes. Authors created physical model based on experimental work.

1. Введение

Еще в ранних экспериментальных работах Н. Тесла[1] было отмечено, что плазма, содержащая продукты эрозии электродов или продукты конденсации от специально испаряемой восковой подложки, обладает рядом уникальных свойств. В частности, отмечалось значительное время жизни (0,1..1сек) этих плазменных образований (см. [2]), возможность иметь большой нескомпенсированный заряд и накапливать большую энергию. Впоследствии эти результаты были неоднократно повторены в большом количестве экспериментальных (см. [3-5]) и теоретических (см. [6-8]) работ, где наряду с долгими временами жизни, отмечались и другие интересные особенности, например: расщепление фронта ударной волны, реализация больших потенциалов во фронте, значительное разделение зарядов при взаимодействии этих плазменных образований с ударными волнами и т.д.

Для получения плазменных образований нами была использована идея эрозионного разряда, впервые реализованная в работах Н. Тесла (см. [1]). В качестве эрозионного материала использовался биологический полимер-воск. Для этого один из электродов – анод

частично смазывался воском. Воск так же служил защитой электрода (его металлической части) от интенсивной эрозии металла.

В отличие от предшественников [3-5], в качестве рабочей среды использовался поток воздуха и мелкодисперсных (подробнее см. [8,9]) капель электролита с высокой концентрацией поваренной соли (40 г NaCl на литр H₂O). Значительным результатом было получение пробоя типа «четочной» молнии (названного нами так, из-за того, что пробой имеет чередующиеся по траектории цвета – «четки») во внеэлектродной зоне на расстояниях ~1м при малых напряжениях в электродной зоне 600..800В и получение с высокой вероятностью долгоживущих плазменных образований. В сухом воздухе пробой в таком промежутке соответствует разности потенциалов в $0,5 \times 10^6$.. 10^6 В.

Важным шагом продвижения вперед в исследовании взаимодействия плазменных образований с диэлектрическим экраном было привлечение широкого спектра специалистов и наиболее современной измерительной микроскопической аппаратуры, имеющейся в Отделе механики структурированной гетерогенной среды с целью детального анализа образующихся кристаллических структур. Это позволило решить ряд комплексных, сложных задач, стоящих на стыке разных наук, что в свою очередь дало возможность обнаружить новые явления и закономерности в росте и форме кристаллов галита в сильно неравновесных, экстремальных условиях, которые реализуются при взаимодействии плазменных образований с диэлектрической подложкой расположенной на проводящем, заземленном экране. Полученные предварительные результаты в области ращения кристаллов в сильно неравновесных условиях дают осторожный оптимизм в области разработки технологий управляемого роста кристаллов заданной формы и влияния на их кристаллическую структуру.

2. Описание установки и принцип ее работы

Установка для представленного эксперимента состоит из нескольких частей (рис.1). В балластную емкость объемом 480 литров (рис.1.3) под давлением в 8..10 атмосфер накачивается газ (в данной работе – воздух). Часть потока электролита подается (рис.1.5) в критическую часть сопла Лавалья (рис.1.4), где смешивается со сверхзвуковым потоком воздуха. Вторая часть потока электролита насыщается пузырьками воздуха в барботере (рис.1.14) (образуется пористый электролит), и подается в разрядный промежуток. Для этого один из электродов – катод (рис.1.6) выполнен из медной трубки с отверстиями (рис.1.7) направленными в сторону второго электрода – анода (рис.1.10). На поверхность анода перед каждым экспериментом наносится тонкий (~0.1мм) слой воска (внешний размер камеры с электродами 120x50x35мм, толщина стенок 10мм). Пористый электролит (подробнее см. [10,11]) готовится в барботажной секции (рис.1.14). Барботажная секция – это камера, в которую подается воздух (рис.1.16) через мембрану с микроскопическими отверстиями ($d \sim 100$ мкм) и смешивается с электролитом (рис.1.15), образуя пористый электролит (пузырьковая смесь с высоким объемным газосодержанием $\varphi \sim 0,3 \div 0,92$ см. рис. 1.14). Отметим, что обычно при течении пузырьковой смеси в каналах при $\varphi > 0,3$ происходит переход из пузырькового режима течения в поршневой (см. [10]). Реализация пузырькового режима течения при $\varphi > 0,3$ - является непростой инженерной задачей, которая была решена нами (см. [11]).

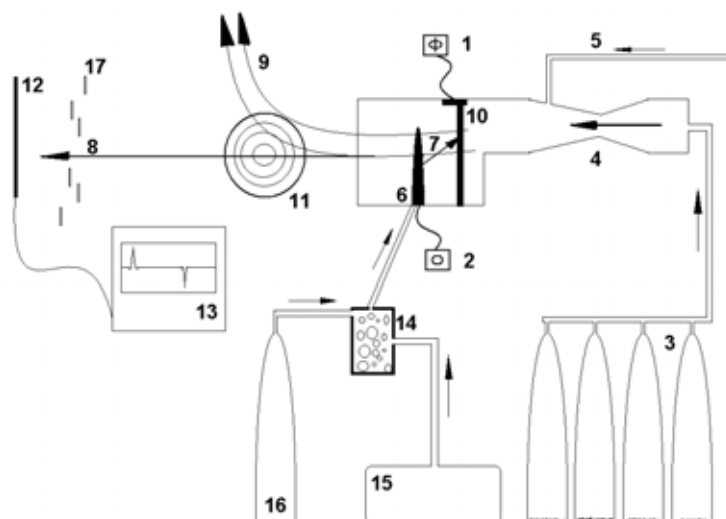


Рис.1 Принципиальная схема установки: 1 – подача напряжения на анод; 2 – подача напряжения на катод; 3 – балластная система подачи сжатого газа в рабочую часть канала; 4 – сопло Лавалья; 5 – подача электролита в закритическую область сопла Лавалья; 6 – электрод катод (выполнен из медной трубочки с отверстиями направленными в сторону другого электрода для замыкания пористым электролитом разрядного промежутка); 7 – поток пористого электролита замыкает разрядный промежуток, создаются необходимые условия для рождения объемно-диффузионного разряда; 8 – направление движения светящихся шаровых плазменных образований в отсутствии магнитного поля; 9 – отклонение от прямолинейного движения шаровых плазменных образований в присутствии сильного магнитного поля; 10 – электрод анод с напылением из воска; 11 – постоянные магниты образуют магнитное поле, отклоняющее заряженные образования; 12 – проводящий экран; 13 – осциллограф; 14 – барботажная система для создания пористого электролита; 15 – электролит; 16 – сжатый газ; 17 – предметные стекла.

Во время эксперимента открываются клапаны подачи воздуха и пористого электролита, а затем на электроды подается напряжение (расстояние между электродами ~ 1 см). После этого происходит собственно эксперимент. Производится кино-фото съемка, в непрерывном режиме снимаются осциллограммы с проводящего экрана, помещенного на значительном расстоянии от разрядного промежутка (~ 1 м).

3. Теоретическая модель процесса и эксперимент

В результате испарения воска с анода и последующей его конденсации в газокпельном потоке, образуются ватообразные «клубки» из биологического полимера (воска). Пористый электролит, истекающий из барботера, замыкает цепь анод и катод. При замыкании цепи в межэлектродной зоне реализуется пробой дугового разряда (см. рис.2.а). На рис.2.б показано поведение заряженных образований и линий тока в присутствии сильного магнитного поля. На рис.2.в видно, что от основной части разряда отделился шаровой светящийся объект и начал двигаться к заземленному корпусу установки. На рис.2.г тот же светящийся

объект через 80 мс. Скорость потока вне электродной зоны в данном случае относительно небольшая $\sim 5-8$ м/сек. При исчезновении плазмоида образуется выброс визуально похожий на запятую, направленный в сторону массивного заземленного корпуса установки (см. рис. 2 г). Аналогичное явление при исчезновении долгоживущих плазменных образований наблюдалось и другими исследователями [3-5]. В одном из вариантов получались долгоживущие плазменные образования в виде шариков. В другом - пробой типа «четочных» молний (пробой с чередованием сегментов разного цвета). Режим типа «четочной» молнии реализовывался как при наличии линейного разряда так и при его затухании. Такой пробой реализуется гораздо чаще, чем режим образования шаровых долгоживущих плазменных образований. Следует также отметить, что образование шаровых молний в природе также достаточно редкое явление, хотя в данном случае мы не претендуем на получение собственно шаровой молнии. В нашем случае примерно на 20-30 пробоев типа «четочной» молнии имеется примерно один случай получения шарового светящегося образования. На рис.2.д показано, как шаровой светящийся объект находится на значительном (~ 1 м) расстоянии от разрядного промежутка. На рис.2.е представлена типичная фотография разряда типа «четочной» молнии.

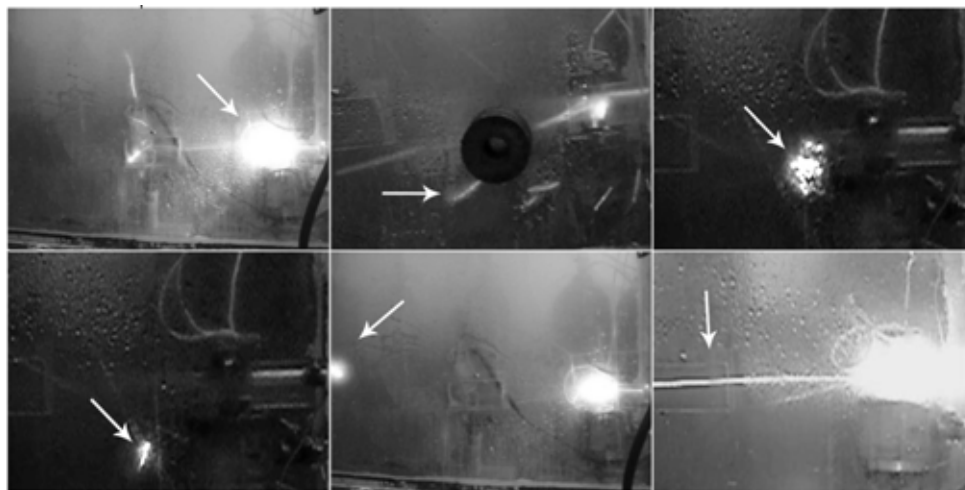


Рис.2 Различные режимы работы установки (Съемка проводилась с расстояния 1м от объекта исследования. Характерная ширина кадров ~ 1 м). А.) Пробой разрядного промежутка. Б.) Отклонение заряженных образований от прямолинейного движения в присутствии магнитного поля. В.) Жизнь шарового плазменного образования. Г.) Гибель шарового плазменного образования, появление выброса в виде запятой. Д.) Долгоживущее плазменное образование на значительном расстоянии от разрядного промежутка (порядка 1-го метра). Е.) Пробой внеэлектродного пространства

Экспериментально исследовалось взаимодействие плазменных образований в виде шаровых светящихся объектов типа «четочных» молний с проводящим экраном, установленном в потоке газо-капельной смеси на расстоянии 0,5..1м. Сигнал с проводящего экрана (рис.1.12) поступал на осциллограф (рис.1.13). Типичная осциллограмма представлена на рис.3.

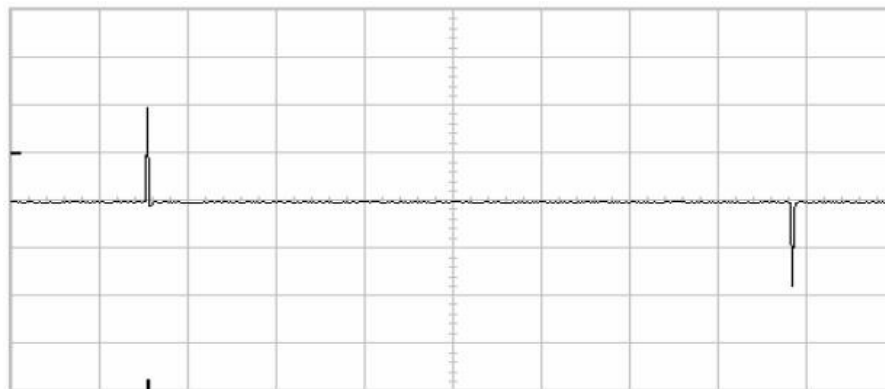


Рис.3 Типичная осциллограмма с проводящего экрана, помещенного в поток.

Первый сигнал имеет положительную полярность – это соответствует попаданию на проводящий экран положительных ионов. Второй – отрицательную - это соответствует попаданию на экран ватообразных образований или пробоем типа «четочной» молнии. Позже нами были проведены экспериментальные исследования воздействия магнитного поля на светящиеся образования. В отсутствие поля траектории плазменных объектов (при большой скорости потока) были практически прямолинейными (рис.2.а,д,е), при наличии же поля траектории резко искривлялись (рис.2.б). При этом магнитное поле как бы выталкивало плазменные объекты и сильно изменяло их траектории. Это было вторым подтверждением наличия значительного нескомпенсированного заряда у макроскопических плазменных образований наряду с результатами [5]. Также нами были взяты соскобы со стенок установки и предметных стекол, помещенных в поток (рис.1.17) и проведен их микроскопический анализ на оптических микроскопах разного увеличения - 150, 250, 4000. Толщина волосинок воска осевших на стекла была микронного и субмикронного размера (см. рис.4.а).

На основании вышесказанного была предложена физическая модель процесса. Вследствие большей подвижности электроны прилипают к «тяжелым» макроскопическим восковым образованиям. Положительные же ионы уносятся потоком. Получается макроскопическое пространственное разделение заряда. В обычной плазме такое просто невозможно при приемлемых энергетических затратах, так как плазма квазинейтральна на расстояниях больше дебаевского радиуса. Аналогичные процессы разделения компонентов смеси и заряда (но в меньших пространственных масштабах) реализуются и в ударных волнах [4-9].

Свечение шаровых плазменных образований можно объяснить наличием значительного нескомпенсированного заряда, находящегося на волосинках полимера и малостью радиуса кривизны волосинок. Возникает некое подобие коронного разряда на каждой волосинке. Однако из-за большого количества волосинок в ватообразном объекте создается впечатление как бы единого светящегося объекта. Физическая модель процесса иллюстрируется на рис. 4.б.

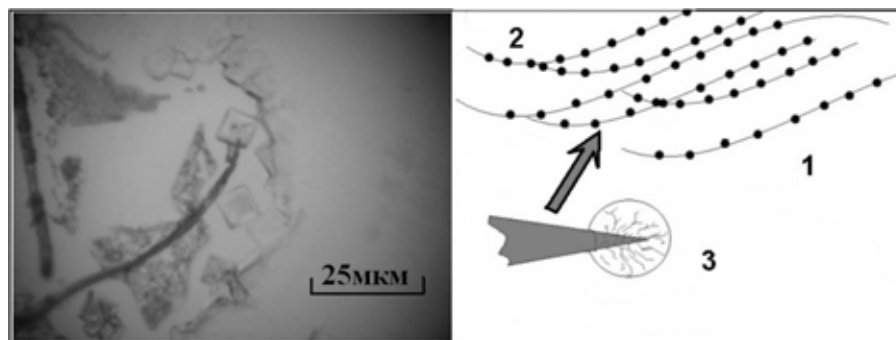


Рис.4 А.) Полимерные нити воска осевшие на предметные стекла, помещенные в поток. Б.) Физическая модель, объясняющая процесс свечения шаровых заряженных образований.

4. Анализ структуры образований на диэлектрических поверхностях

Позднее совместно с сотрудниками Отдела механики структурированной гетерогенной среды Института был проведен более тщательный микроскопический анализ поверхности предметных стекол, помещенных в поток воздушно-капельной смеси. И были обнаружены интересные особенности. Некоторые кристаллы электролита (NaCl) поменяли свою форму, а именно, из квадратной формы получались, например, шестигранные структуры см. рис.5.

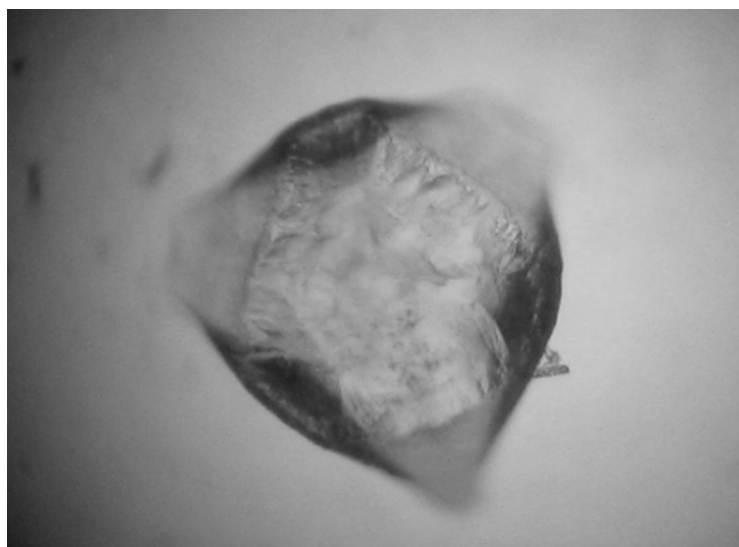


Рис.5 Типичный кристалл гексагональной геометрии на предметном стекле в результате бомбардировки плазмоидами в оптическом микроскопе (увеличение 250).

Исследования структуры и химического состава кристаллов производились на аналитическом электронном микроскопе с энергодисперсионной приставкой в вакууме от $5.70 \text{ E-}6$ до $6.37 \text{ E-}6$ Торр при напряжении на катоде 20 кВ и силе тока 2.53А. Методами аналитической растровой электронной микроскопии с применением спектроскопии вторично-эмиссионного рентгеновского излучения было показано, что обнаруженные пирамидальные структуры представляют собой монокристаллы галита (рис.6).

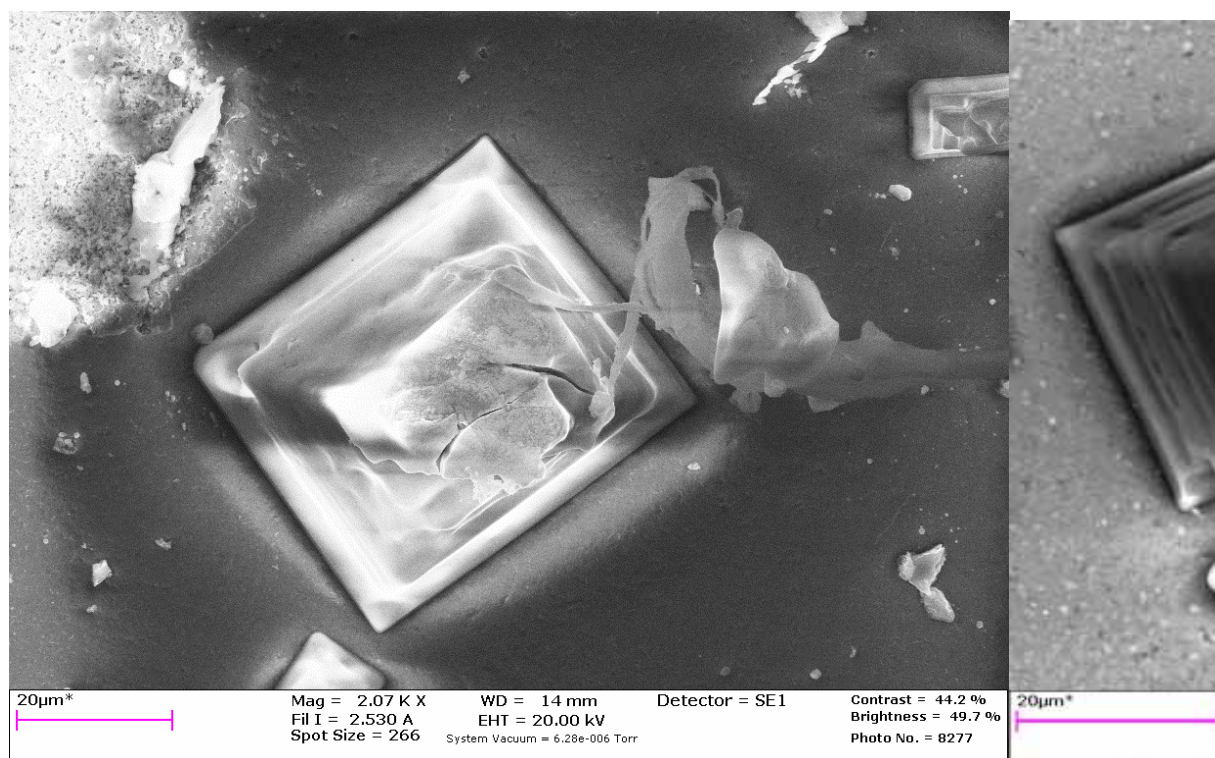


Рис.6. Фотографии пирамидальных кристаллов, полученные на электронном микроскопе.

5. Результаты исследования образца монокристаллического политипа после бомбардировки плазмоидами.

Было проведено исследование воздействия плазмоидов на монокристаллический политип 6-H SiC, нелегированный (S.i.) (ориентация поверхности 001), поверхность со стороны маркировки «С», с противоположной стороны – «Si» поверхность. Полировка под эпитаксию.

На обработанной поверхности наблюдались кристаллические образования разных форм и размеров: куб, многоугольник и на краях обработанной поверхности встречались прямоугольные формы. На общем фоне при низком увеличении они выглядят вогнутыми, возможно из-за наслоения основы в процессе обработки или же из-за специфики отражающих свойств материала кристаллов. Рис. 7, на краях наблюдается скопление мелких кристаллов Рис.8.

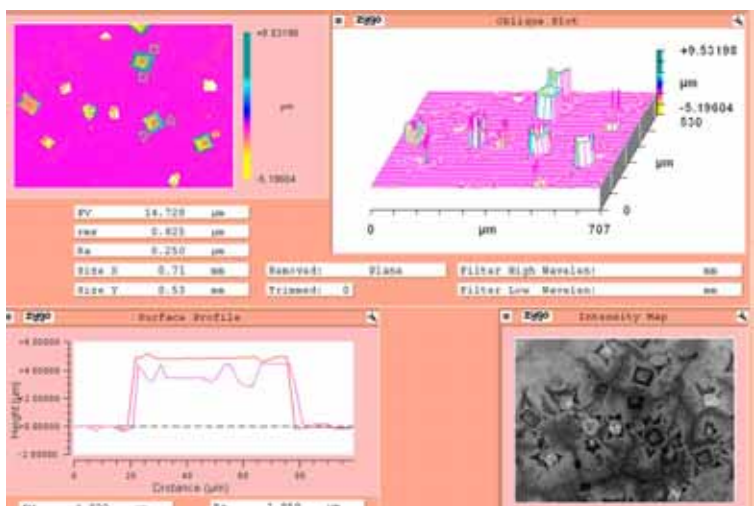


Рис.7 монокристаллический политип после бомбардировки. Общий вид. Увеличение 10x1.

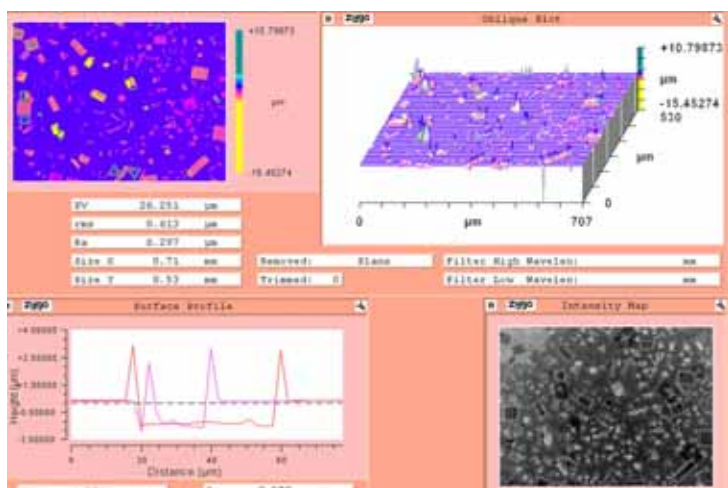


Рис.8. монокристаллический политип после бомбардировки. Общий вид, край образца. Увеличение 10x1.

В процессе эксперимента было замечено интересное явление - образование многоугольных форм преимущественно трех- и шестиугольников.

Кристаллы по размерам можно поделить на крупные (50-60 мкм), средние (20-45 мкм) и мелкие, образовавшиеся на краях образца (4-15 мкм) Рис.8. Многоугольники условно считаем равносторонними. Рис.9 и Рис.10.

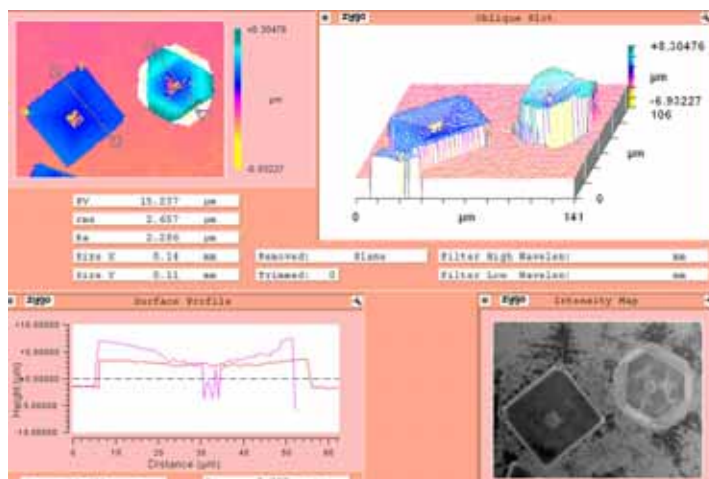


Рис. 9. Монокристаллический политип после бомбардировки. На рисунке показаны крупные кристаллы. Увеличение 50x1.3.

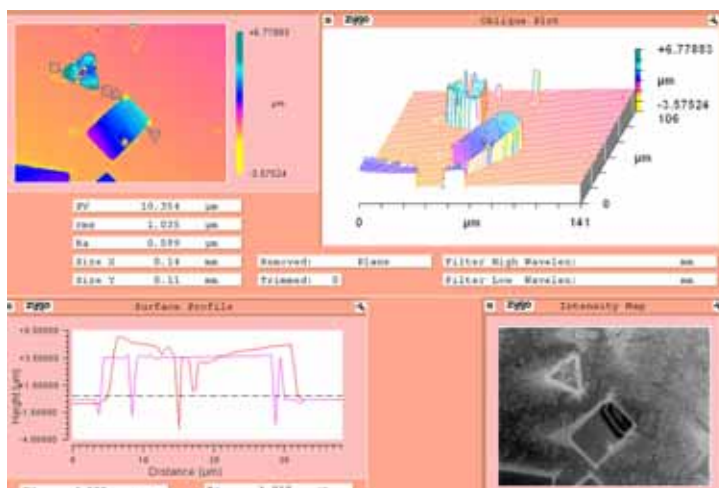


Рис. 10. Монокристаллический политип после бомбардировки. На рисунке показаны средние кристаллы. Увеличение 50x1.3.

Практически у всех кристаллов наблюдается углубление к центру в большей или меньшей степени Рис.11, причем у кристаллов с кубической формой углубления представляются виде квадратов Рис.12, а у многоугольников углубление виде треугольника Рис.13, также интересно, что в отличии от прошлого исследования у некоторых кристаллов кубической формы преимущественно на краях образца центр углубления смещен Рис.14.

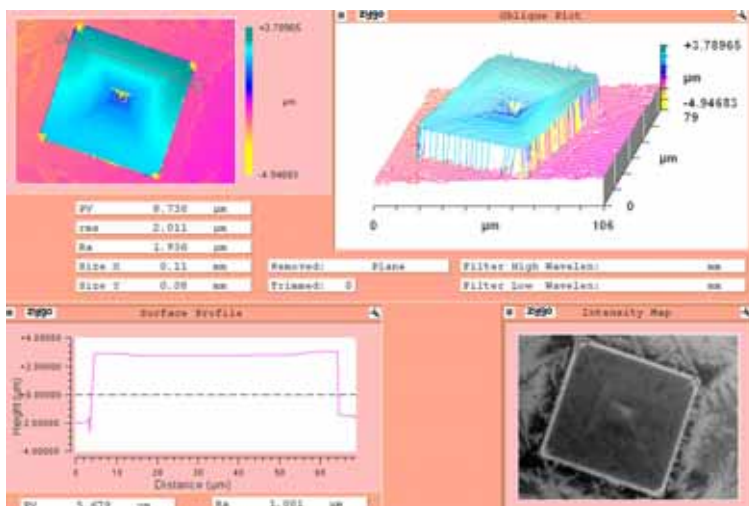


Рис. 11. Монокристаллический политип после бомбардировки. На рисунке видно углубление к центру. Увеличение 50x1.3.

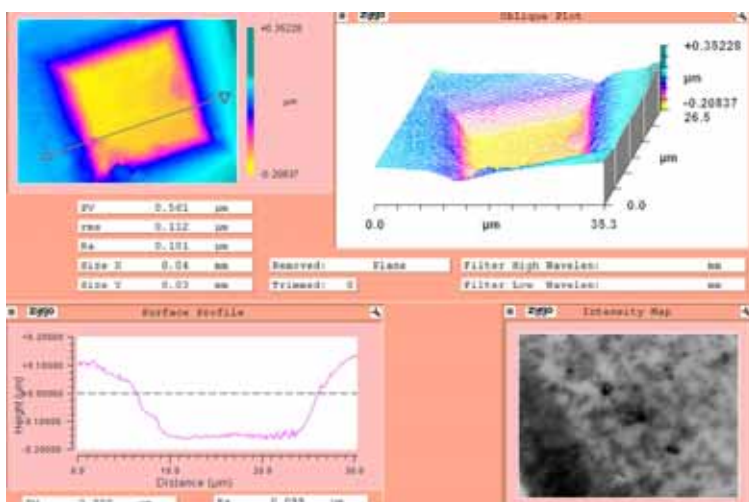


Рис.12 Монокристаллический политип после бомбардировки. На рисунке видно, что углубление имеет квадратную форму. Увеличение 100x2.

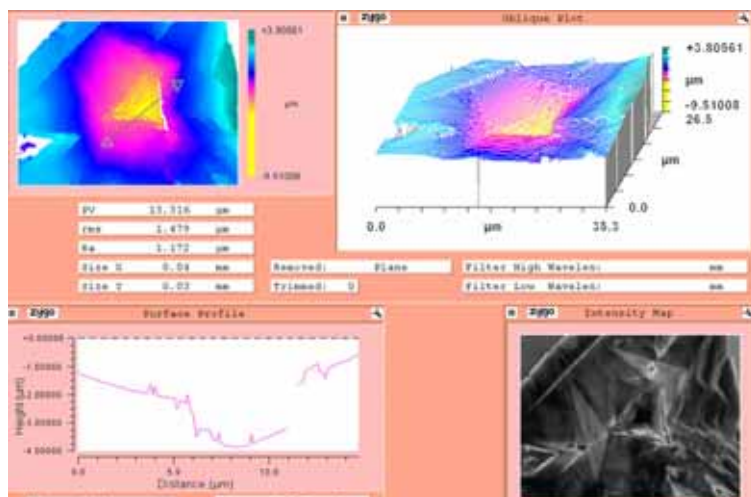


Рис.13. Монокристаллический политип после бомбардировки. На рисунке видно, что углубление имеет треугольную форму у кристаллов с многоугольной поверхностью. Увеличение 100x2.

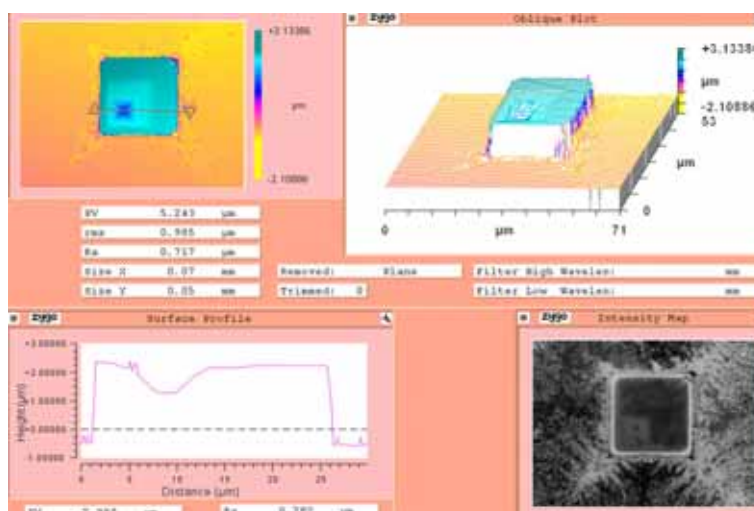


Рис.14. Монокристаллический политип после бомбардировки. На рисунке видно, что углубление смещено относительно центра. Увеличение 100x1.

Для исследования кристаллов с размерами менее микрона использовался атомно-силовой микроскоп. Атомно-силовая микроскопия проводилась в при обычных условиях в контактной моде с нагрузкой на кантилевер 2,5 наноНьютона, коэффициент жесткости кантилевера 0,2 Ньютон/м, параметр обратной связи 11, разрешение 128x128 пикселей. Изображения сконденсированных кристаллов показаны на Рис. 15 Рис. 17. На Рис. 16 и Рис. 18 показаны отдельные кристаллы.

Измерения показывают, что размеры образцов в латеральной плоскости ХУ варьируются от 300нм до 2 микрон. Высота сконденсированных образований над монокристаллом Si изменяется от 70 нанометров до 1 микрона. Средняя плотность напыления составила $5E+7 \text{ см}^{-2}$.

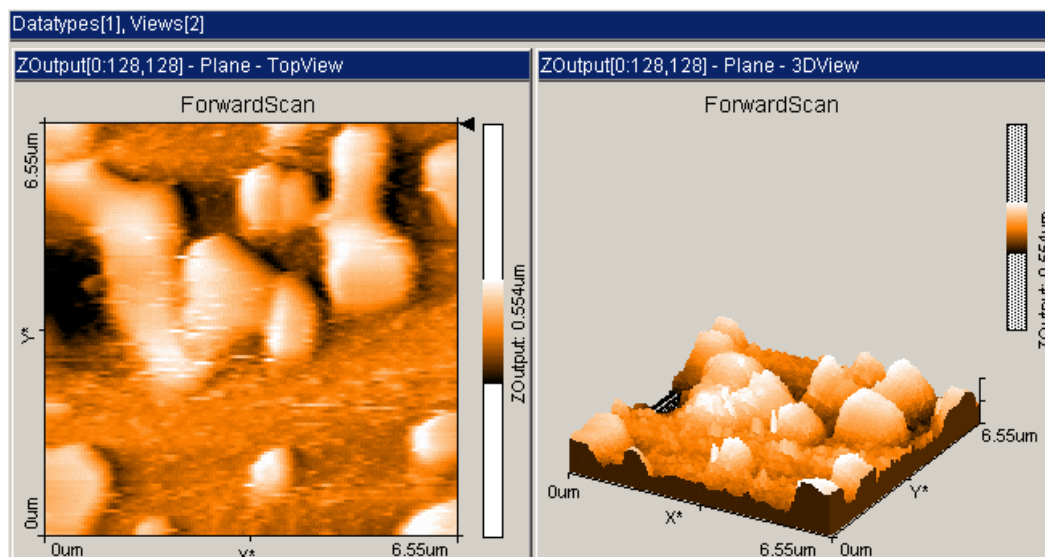


Рис.15. АСМ изображения образцов напыления на поверхность монокристалла SiC (со стороны Si). Скан 6.55x6.55 мкм. Слева вид сверху Top View, справа объемное изображение 3D-View.

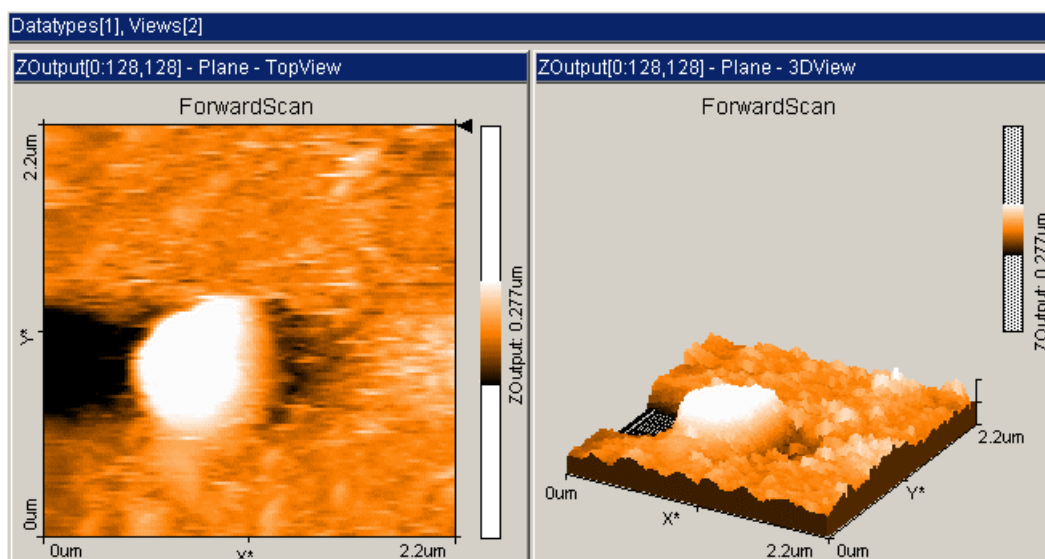


Рис.16. АСМ Изображение образца напыления на поверхность монокристалла SiC (со стороны Si). Скан 2,2x2,2 мкм.

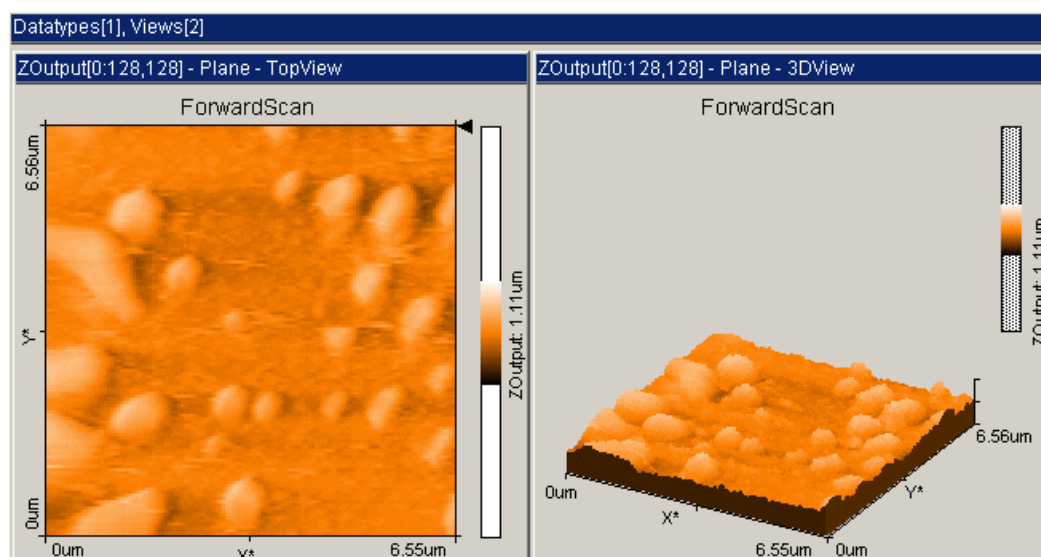


Рис.17. АСМ Изображение образца напыления на поверхность монокристалла SiC (со стороны Si). Скан 6.55x6.55 мкм.

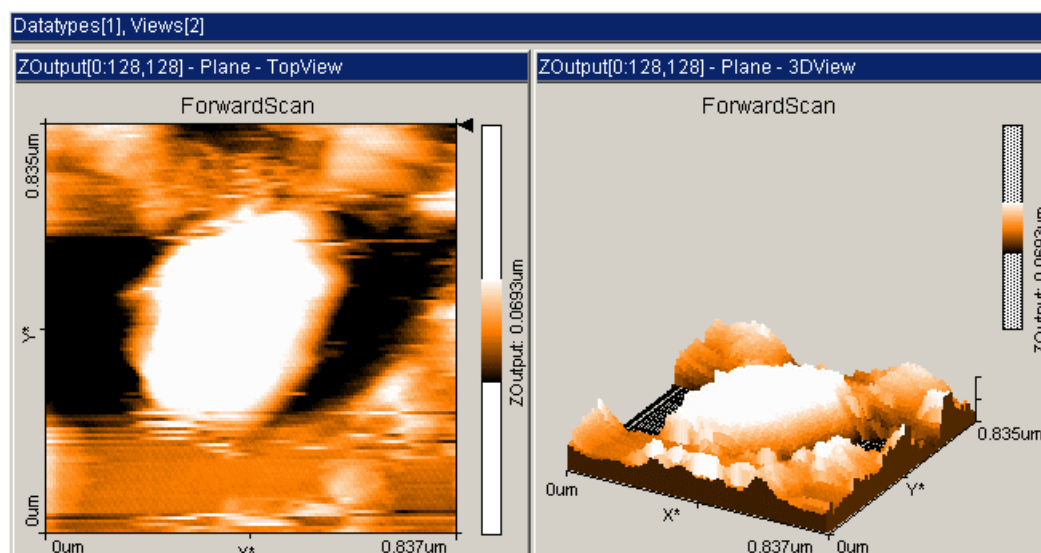


Рис.18. АСМ Изображение образца напыления на поверхность монокристалла SiC (со стороны Si). Скан 0,837x0,837 мкм.

Из данных измерений видно, что осаждения размерами менее микрона получены при высыхании соленой воды. Из этого можно сделать вывод, что крупные кристаллы соли образованы под влиянием разряда в разрядной камере.

Заключение.

1. Создана установка на базе эрозионного разряда в микрокапельной среде электролита и воздуха для исследования электрических пробоев больших промежутков и долгоживущих плазменных образований.

2. Получены долгоживущие плазменные образования. Реализованы два режима течения с линейным пробоем типа «четочных» молний и появлением шаровых светящихся долгоживущих плазменных образований.
3. Исследовано взаимодействие данных светящихся образований с проводящим экраном, электромагнитным полем, диэлектрическими поверхностями и монокристаллическим политипом.
4. Экспериментально получены режимы течений с реализацией пробоя в большом разрядном промежутке ~ 1 м при малых напряжениях 600 – 800 вольт.
5. Качественно подтверждено наличие нескомпенсированного заряда в плазменных образованиях.
6. Предложена качественная физическая модель процесса.
7. Были обнаружены интересные аномальные изменения в кристаллах электролита, обусловленные неравновесными процессами в электрическом разряде. Это открывает путь для создания технологии управляемого воздействия на форму и структуру (решетку) кристаллов. Результаты анализируются, проводятся дальнейшие исследования как фундаментальном, так и прикладном аспектах.
8. Показано, что крупные кристаллы образованы именно под влиянием электрического разряда.

Литература

1. Tesla N. Colorado-Springs Notes: 1899-1900/Ed.A.Marincic-Belgrade:Nolit.1978
2. File Ball in a Laboratory// Collection of Papers .:M. Chemistry. Ed. By Avramenko R. and Rlimov A. 1994. 256p.
3. Климов А.И. Изучение физических свойств плазмоидов в воздухе и воздушном потоке// Химическая физика, 2006, Том 25, № 3, с. 104-109.
4. Klimov A., Bityurin V., Charitonov A., Fokeev V., Sakharov A., Vystavkin N., Kuznetsov A. Shock Wave Propagation through Non-Equilibrium Cluster Plasma// Paper AIAA. 2002.-0639. 40 th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit? 14-17 January. 2002. Reno. 8 P.
5. Bityurin V.A., Velikodnyi V.Yu., Samuolis I.A., Kolesnikov E.B., Popov V.V. Researches of interection of long-living plasma formations with supersonic stream.// The 7th International International Workshop on Magneto- Plasma Aerodynamics. Moscow, 17 -19, April 2007, P . 207-214.
6. Velikodny V.Yu., Bityurin V.A. Shock wave structure in long-lived plasma formations // In: Prospective on 2nd Workshop on Magneto- and Plasma- Aerodynamics for Aerospace Application, IV-TAN, Moscow, April 5 – 7, 2000, p.301-306.
7. Великодный В.Ю., Битюрин В.А. Распространение и структура фронта ударной волны в ионной плазме при наличии отрицательно заряженных наночастиц (кластеров, пылинок)// Прикладная физика. 2002. №5. С. 90-98.
8. Lineberry J.T., Velikodny V.Yu., Bityurin V.A. Influence of Charged Nano-Particles on Shock Wave Structure. Chain Reaction Initiation in Shock Wave Front in Cluster Ionic Plasma // AIAA 2001-0638, 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 8-11 January 2001, Reno, Nevada, бр.
9. Башлыков А.М., Великодный В.Ю. Неравновесные процессы в профиле ударной волны// Письма в ЖТФ . 1989. Том. 15. № 5. С. 24-28.
10. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука. 1978. 336с.
11. Бушманов Е.А., Великодный В.Ю., Воротилин В.П., Яновский Ю.Г., Тимофеев И.Б., Д.Ван Ви. О возможности улучшения характеристик активированного пористого топлива при использовании ионизации в диэлектрическом кавитаторе // Прикладная физика. 2003. № 5, с.49-55.

Статья поступила в редакцию 26 января 2009 г.