

Измерение масс-зарядового состава основных компонент плазмы наносекундного поверхностного пробоя диэлектриков

© Р.В. Емлин, П.А. Морозов, Е.Н. Щербаков

Институт электрофизики УрО РАН,
620016 Екатеринбург, Россия
e-mail: pav99369565@yandex.ru

Поступило в Редакцию 2 августа 2023 г.

В окончательной редакции 5 февраля 2024 г.

Принято к публикации 12 февраля 2024 г.

Проведены измерения скоростей и масс-зарядового состава основных фракций плазмы высоковольтного вакуумного перекрытия серы, хлорида калия и полиэтилена при воздействии импульсами 60 кВ с амплитудой тока разряда 3–6 кА длительностью 0.1 мкс. При использовании масс-анализатора с импульсным магнитным полем до 0.3 Т получено, что при плотности тока по сечению канала разряда вплоть до $6 \cdot 10^5$ А/см² доля одноатомных ионов в пучке не превышает 10%, а основную часть ионного заряда переносят однократно ионизованные молекулы (S₂, KCl и комплексы из 2–4 мономеров у полиэтилена). Методика разработана для характеристики состава и спектра скоростей компонент плазменных пучков, генерируемых в макетах электрореактивных абляционных двигателей малой тяги с различными рабочими веществами.

Ключевые слова: поверхностный разряд, плазменные пучки, масс-анализаторы, макроионы.

DOI: 10.61011/JTF.2024.04.57529.194-23

Введение

В работах [1–4] сообщалось о проведенных испытаниях макетов частотных электрореактивных двигателей (ЭРД) малой тяги абляционного типа с энергозапасом в конденсаторе порядка 0.1–0.5 Дж и частотой следования разрядов 30–100 Гц. В этих двигателях в условиях вакуума при подаче высокого напряжения (3–20 кВ) между электродами по диэлектрику развивается поверхностный пробой. Это явление иногда называют перекрытием по поверхности диэлектрика электрической искрой или дугой. В этих исследованиях ЭРД малой тяги длительность импульсов тока составляла порядка 0.1 мкс, а амплитуда — в диапазоне 1–5 кА. При использовании различных рабочих тел нами были проведены измерения импульса отдачи для рабочих тел различного состава, получены спектры скоростей заряженной компоненты плазменных пучков, а также характеристики диаграммы направленности вылетающего потока. При этом наблюдалось большое различие в достигаемом уровне тяги для различных рабочих тел, связанное с различием вкладов механизмов абляции и ионизации вылетающих из поверхности компонент и их особенностям для веществ разных химических классов.

Кроме того, при измерениях ионного тока и полного заряда, переносимых этими плазменными пучками, получено, что степень ионизации вещества пучка мала, она составляет менее 10% [2]. Эти малые значения могут быть отнесены за счет наличия в этих плазменных потоках большого числа нейтральных атомов и молекул, либо присутствия относительно больших однократно ионизованных молекулярных комплексов.

Одним из возможных путей решения этой проблемы является измерение масс-зарядового состава заряженных компонент, составляющих плазменный пучок, по крайней мере их основных фракций, и установление его связи с особенностями механизмов формирования этих пучков при субмикросекундных длительностях импульсов разрядного тока. Особенно серьезно проявляется эта проблема при масштабировании ЭРД для различных задач, как, например, при проектировании двигателей для наноспутников, где ограничена масса конденсаторов и необходимо оптимизировать ряд рабочих параметров, таких как разрядный промежуток, вкладываемую энергию, напряжение и ток разряда. При этих относительно небольших величинах энерговывода процессы выброса вещества с поверхности диэлектрика имеют свои особенности, и состав компонент плазмы может отличаться от получаемых в однократных разрядах с частотой 1–2 Гц и энергозапасе в конденсаторах 10–50 Дж [6,7].

При выборе оптимального рабочего вещества для использования в двигателях с конкретным определенным уровнем тяги возникает необходимость выяснить молекулярные массы и спектр скоростей основных компонент пучков, генерируемых при различной плотности мощности энерговыклада в разрядах по рабочим веществам с различными типами химических связей, в том числе различным полимерам. В применениях, где для создания нужного эффекта используются вся генерируемая в разряде плазма (плазменные размыкатели [5], ЭРД [6,7], процессы напыления пленок), необходимо иметь информацию о составе и спектрах скоростей ее компонент, как минимум об основных. В случае ЭРД это особенно актуально, поскольку в процессе их работы

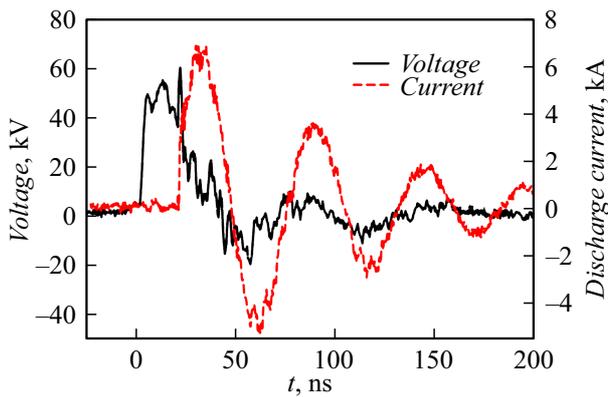


Рис. 1. Оциллограммы напряжения и тока разряда в режиме перекрытия с анода.

заметная часть вылетевшего вещества осаждается на поверхностях космического аппарата, снижая тяговую эффективность, загрязняя рабочие поверхности солнечных батарей и оптических приборов [8]. Полагают, что причина осаждения части потока плазмы — разлет частиц и температурная диффузия, которые особенно заметны на периферии пучка (при углах от оси более 60°), и явление поздней абляции [9]. В работе [8] приведены данные измерений осажденных на поверхности оптических зеркал слоев, состоящих из компонент вещества рабочего тела, толщина которых за $1.4 \cdot 10^6$ разрядов ЭРД достигает единиц микрон, снижая пропускание почти в полтора раза. Однако анализ атомного состава этих слоев не дает информации о молекулярном составе компонент в самом пучке. В работе [10] в качестве рабочего тела микрореактивных двигателей авторы использовали смеси на основе нитрата гидроксила аммония и поливинилового спирта и указывали, что при вычислении концентрации ионов в плазменном пучке по измерениям с ленгмюровскими зондами необходимо знать молекулярную массу ионов. Поэтому актуальной является задача получить достоверную информацию о молекулярных массах и соотношении концентраций ионизированных компонент в этих пучках. Для ее решения разработан магнитный масс-анализатор ионов, и описана методика и результаты проведенных измерений масс-зарядового состава преобладающих компонент пучка, испускаемого при вакуумном поверхностном перекрытии и последующем дуговым разрядом субмикросекундной длительности для нескольких диэлектрических материалов различных химических классов в режиме испытаний и калибровки.

1. Методика проведения эксперимента

Для измерений изготовлен магнитный масс-анализатор на основе колец Гельмгольца, помещаемый в вакуумную камеру на пути плазменного пучка, и использованы вещества с большим диапазоном

молекулярных масс для испытания работы установки: сера, KCl, полиэтилен. Основная особенность этой методики — возможность определить параметры пучка, не искаженного ослабляющими устройствами, с целью получить наиболее надежные количественные данные о реальном соотношении основных зарядовых и массовых фракций. Плазменный пучок создается в разряде при поверхностном перекрытии образцов нескольких классов диэлектрических материалов: серы, ионных кристаллов (KCl) и полиэтилена высокой плотности в диапазоне токов 3–6 кА. Он моделирует параметры разряда, происходящего в исследованных макетах ЭРД. Использовался генератор, выдающий импульсы напряжения амплитудой до 60 кВ и колебательный затухающий ток амплитудой до 6 кА с общей длительностью 120 нс (рис. 1). В разрядной ячейке (рис. 2, а) катод имел овальную форму, а кромка анода представляет собой заостренный линейный отрезок длиной 2–4 мм. Такая конфигурация соответствует старту развития проводящего канала пробоя с анода. Наблюдаемая задержка начала мощного тока разряда относительно переднего фронта подаваемого напряжения соответствует времени продвижения фронта проводящего канала поверхностного пробоя с большой скоростью (порядка $2 \cdot 10^6$ м/с) от анода до замыкания с катодом.

Измерения ионного тока и масс-зарядовых характеристик ионизированных фракций плазменного пучка проводились на разработанном малогабаритном масс-анализаторе с импульсным магнитным полем до 0.3 Т. Поле создается двумя катушками Гельмгольца внутренним диаметром 16 см, намотанными на каркас из нержавеющей стали. Пучок, направляемый в анализатор, формируется двумя щелевыми диафрагмами. Первая — шириной 4 мм располагается на расстоянии 40 мм от разряда (рис. 2, б, внизу). Вторая диафрагма шириной 3 мм располагается на входе в магнитное поле. Поскольку влияние поля противоположного направления на траектории пучка снаружи соленоида может заметно уменьшить эффективное поле, т. е. увеличивает величину рассчитанного ларморовского радиуса относительно его реального значения и может дать завышенную атомную массу частиц, вокруг соленоидов размещается экран из листовой стали. Все элементы масс-анализатора, включая соленоиды, расположены в вакуумной камере объемом 2.5 м^3 . Высоковакуумная ступень откачки — масляный диффузионный насос (рабочая жидкость — масло VM-5C) создает вакуум $1.2 \cdot 10^{-4}$ Торр, измеряемый ионизационным манометром. В процессе генерации плазменных пучков давление поднималось не выше $1.8 \cdot 10^{-4}$ Торр. Длительность импульса магнитного поля 24 мс, а импульсы разрядного напряжения подаются на образец в момент начала поля (опорный сигнал) и в момент максимума $B(t)$, т. е. через 10 мс (рис. 3).

Ионные токи регистрируются тремя приемниками-цилиндрами Фарадея с площадью коллекторов 5 см^2 , размещенными на расстоянии 0.47 м от образца в

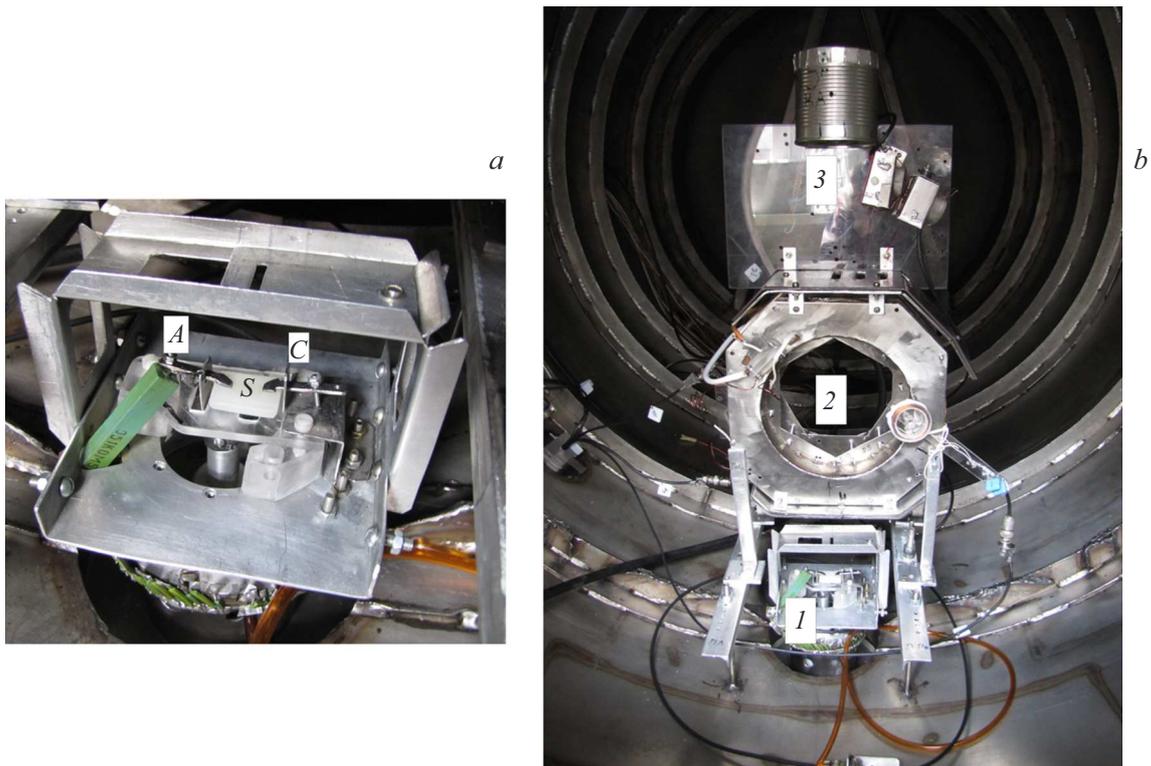


Рис. 2. Экспериментальная установка: *a* — разрядный промежуток: А — анод, С — катод, О — диэлектрик; *b* — общий вид: 1 — разрядный промежуток, 2 — каркас с катушками Гельмгольца, 3 — датчики ионного тока (цилиндры Фарадея).

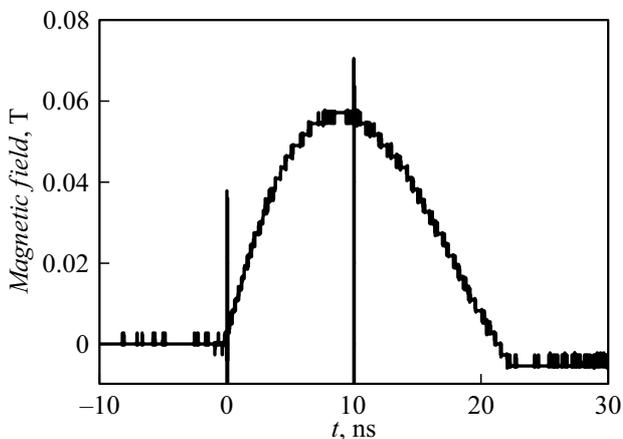


Рис. 3. Осциллограмма магнитного поля анализатора с отметками импульса запуска высоковольтного генератора.

направлениях, соответствующих нескольким ларморовским орбитам с фиксированными радиусами (0.7 и 0.5 m). Нагрузочный резистор 1 kΩ в цепи коллектора цилиндра Фарадея позволяет обеспечить постоянную времени входной цепи около 0.2 μs для хорошего разрешения наблюдаемых пиков. На рис. 4–6 приведены осциллограммы зависимости от времени пролета величины ионного тока, попадающего в датчики, полученные пересчетом из напряжения на нагрузочных резисторах

цилиндров Фарадея. Поскольку все использовавшиеся датчики ионного тока были идентичны, то измеренные токи дают достаточно определенную количественную информацию о соотношении плотности различных ионизованных компонент на разных ларморовских орбитах, а интегрирование по времени дает отношение их суммарных зарядов. Благодаря малой длительности процесса испускания плазмы (0.12 μs) по сравнению с временем пролета ее до датчиков (3–10 μs) скорости ионов могут быть непосредственно вычислены, зная расстояние до ловушек и определяя по осциллограммам время движения данной группы ионов.

Варьируя величину отклоняющего магнитного поля, определяем его значения, при которых сигнал в датчиках, расположенных на этих ларморовских орбитах, имеет максимумы, и масса частиц в атомных единицах массы (a.m.u.) определяется по формуле $M = 0.95 \cdot 10^8 \cdot L \cdot B / V$, где L — ларморовский радиус [m], B — магнитная индукция [T], V — скорость [m/s]. Из-за наблюдаемого большого разброса (порядка 20%) амплитуды сигнала на осциллограммах ионного тока для достижения устойчивого результата мы проводим усреднение по 4–6 разрядам. В большой мере этот разброс связан также с тем, что на каждый из датчиков собирается плазменный поток только от очень небольшого телесного угла диаграммы направленности, и с недостаточной воспроизводимостью пути разряда по образцу.

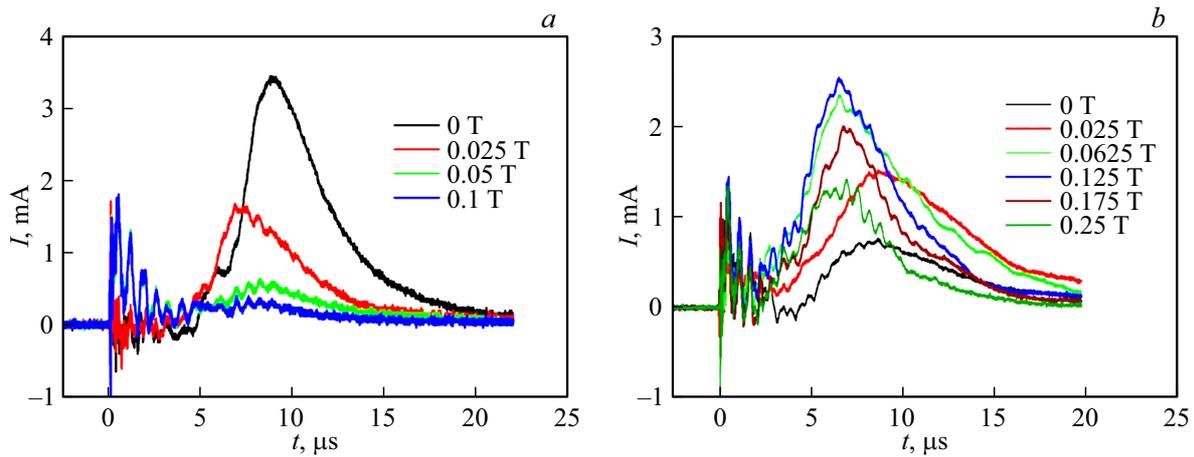


Рис. 4. Осциллограммы тока ионов. Разряд по поверхности серы. Сигнал с центрального датчика (а) и с датчика, расположенного на ларморовском радиусе 0.7 м (b).

2. Результаты измерений

2.1. Сера

Как простое вещество с относительно слабым меж-атомным взаимодействием сера была использована для тестирования установки по регистрации одноатомных одно- и двухзарядных ионов и количественной оценки погрешности измерений. На рис. 4 показаны осциллограммы тока ионной компоненты пучка с двух датчиков по-сле прохождения через магнитное поле. Первый вспомогательный датчик регистрирует остающийся ток неотклоненной части пучка ($\alpha = 0$), а второй — ток пучка на ларморовской орбите с радиусом $L = 0.7$ м. Поскольку длительность тока разряда менее $0.1 \mu\text{s}$ и сигнал электромагнитной наводки от этого мощного разряда соответствует моменту времени вылета ионов, то с небольшой погрешностью можно определить скорости этих ионов по известной времяпролетной базе $s = 0.47$ м.

Из осциллограмм рис. 4, а видно, что в поле 0.025 Т из центрального приемника ($\alpha = 0$) ушло из-за отклонения пучка в магнитном поле больше половины полного ионного тока — эти фракции легче чем 60 а.е.м. Оставшаяся часть — это более тяжелые ионы. В поле 0.04 Т от этого приемника отклоняются почти все ионы. На осциллограммах рис. 4, b (датчик на $L = 0.7$ м) наблюдается максимум ионного тока при магнитном поле 0.037 Т. Погрешность определения положения максимумов у всех наблюдающихся на осциллограммах пиков составляет не менее 10–15%, что связано как с разбросом амплитуды сигналов, так и с процедурой усреднения их по нескольким разрядам. В результате погрешность получаемых значений массовых чисел с учетом погрешностей измерения магнитного поля и скоростей частиц составляет не менее 15–20%. Расчет m/q для момента прихода самой интенсивной фракции пучка, имеющей скорость $V = 67$ км/с в предположе-

нии однократного ионного заряда дает $M = 36$ а.е.м., в пределах погрешности, соответствующей иону S^+ . При поле 0.075 Т наблюдается слабо выраженный максимум, соответствующий молекуле S_2^+ . Третий максимум наблюдается при 0.13 Т, что приводит к $M = 140$ а.е.м., это соответствует S_4^+ .

2.2. Монокристалл КСl

При исследовании физических механизмов развития высоковольтного импульсного поверхностного пробоя диэлектрических материалов в качестве образцовых (референтных) рабочих тел часто используются монокристаллы щелочно-галогидных соединений, в частности КСl, поскольку они имеют кристаллическую решетку с четко выделенными направлениями канала разряда, большой набор точно известных термодинамических параметров. Это позволяет использовать полученные результаты для моделирования процессов плазмообразования и оценки параметров генерируемого плазменного пучка.

На рис. 5 приведены осциллограммы ионного тока пучка, генерируемого каналом разряда по образцу этого монокристалла. В датчике, расположенном на направлении неотклоненного пучка, регистрируется сигнал тока (рис. 5, a), создаваемого ионами, пришедшими через $3\text{--}20 \mu\text{s}$ после разряда. Максимум тока находится при $6 \mu\text{s}$, что по известному пути до приемника $s = 0.54$ м дает скорость этих ионов 90 км/с, а вся группа имеет скорости в диапазоне 30–150 км/с. С увеличением магнитного поля форма этого сигнала меняется, амплитуда уменьшается. Это свидетельствует о том, что часть ионизованных частиц пучка после прохождения области магнитного поля отклоняется под действием силы Лоренца и уходит из ловушки, перемещаясь в соседняя, расположенные под углами 15 и 25°.

На осциллограммах с датчика, расположенного на траектории с ларморовским радиусом 0.7 м (рис. 5, b),

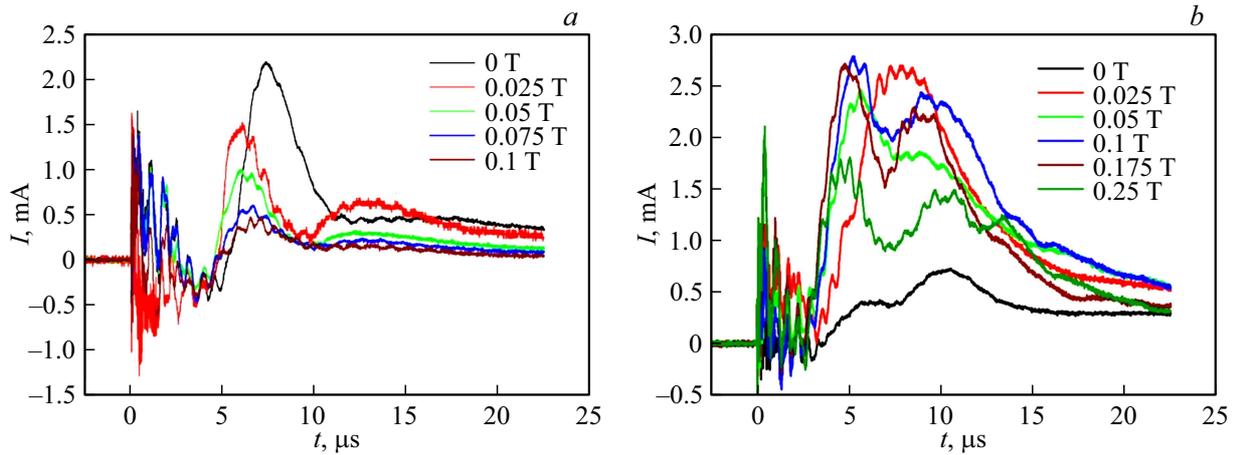


Рис. 5. Осциллограммы ионного тока. Разряд по поверхности KCl. Сигнал с центрального датчика (а) и с датчика, расположенного на ларморовском радиусе 0.7 м (b).

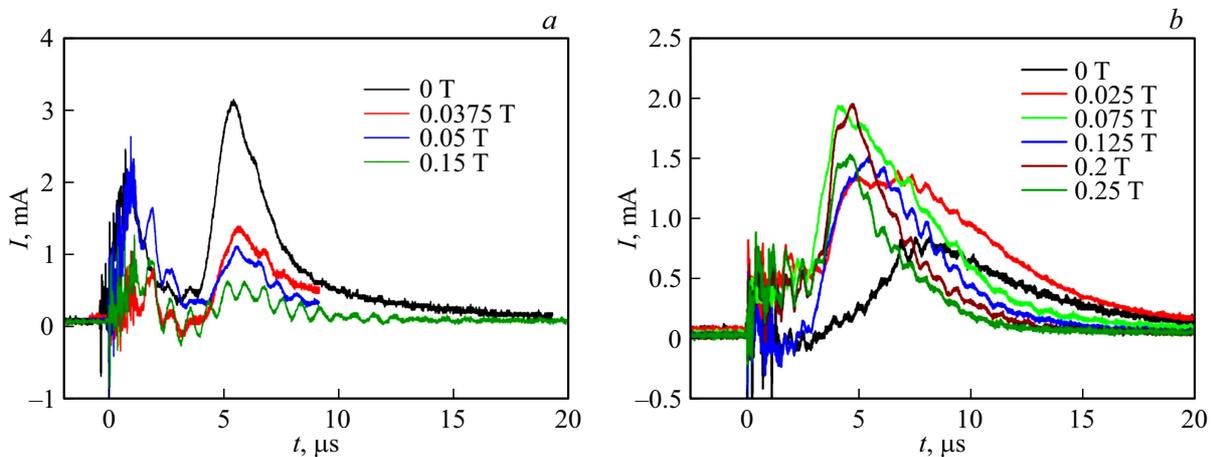


Рис. 6. Разряд по поверхности полиэтилена. Сигнал с центрального датчика (а) и датчика, расположенного на ларморовском радиусе 0.7 м (b).

имеется максимум при $B = 0.10$ Т для группы ионов со скоростями вблизи $V = 87$ км/с. Расчет для этой группы дает массу ионов $M = 76$ а.е.м. Учитывая оценку экспериментальной погрешности порядка 15–20% при определении массовых чисел, указанную ранее (разд. 2.1) для измерений серы, можно сделать вывод, что основная самая интенсивная фракция заряженных частиц плазменного пучка находится в диапазоне значений масс KCl^+ , т.е. представляет собой однократно ионизованные молекулы хлористого калия. Второй пик ионного тока, наблюдаемый для фракции со скоростями, близкими 87 км/с при 0.15 Т, соответствует частицам с $M = 113$ а.е.м., что близко совпадает с массой K_2Cl^+ . Третий максимум максимального тока ионов наблюдается в поле 0.2 Т. Ему соответствует $M = 140$ а.е.м., это однократно ионизованные молекулы хлористого калия. Что касается наличия однократно ионизованных атомов калия либо хлора, то, судя по распределению интенсивности этих пиков на осциллограммах, их содержание почти

на порядок меньше, чем основных фракций. Далее, поскольку наибольшую долю ионизованных частиц в пучке составляют вылетающие с поверхности образца одиночные и двойные молекулы KCl, которые ионизируются в токовом канале разряда, то можно предположить, что и основная фракция нейтральных частиц имеет тот же состав.

2.3. Полиэтилен

Для исследований в качестве типичного образца полимерного углеродсодержащего материала был выбран полиэтилен. Осциллограммы ионного тока в двух ловушках (для исходного пучка и на ларморовском радиусе $L = 0.7$ м) в магнитных полях до 0.25 Т показаны на рис. 6.

Несмотря на присутствие большого шума, на осциллограммах четко прослеживается зависимость амплитуды тока от поля. На рис. 7 приведен график зависимости амплитуды ионного тока на ларморовской орбите с

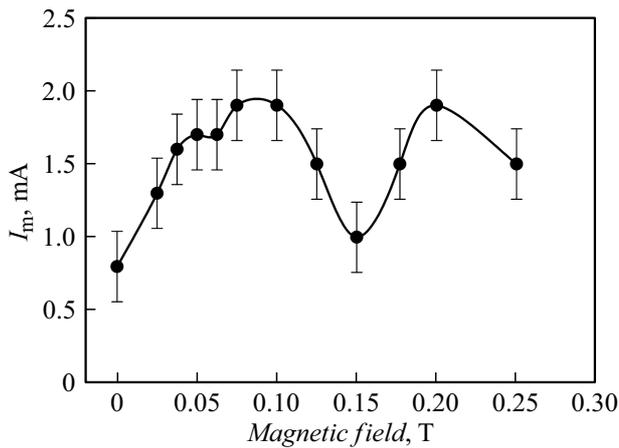


Рис. 7. Зависимость амплитуды ионного тока датчика, расположенного на ларморовском радиусе 0.7 м, от величины магнитного поля для компоненты со скоростью 90 км/с. Разряд по поверхности полиэтилена.

$L = 0.7$ м от величины магнитной индукции для группы ионов с временем прилета вблизи $5 \mu\text{s}$. С увеличением магнитного поля наблюдаются три максимума тока: при магнитном поле 0.10 и 0.20 Т (соответствующие им скорости 95 км/с) и слабый пик при 0.05 Т для ионов со скоростью 104 км/с. В предположении однократно заряженных ионов расчет для этих пиков дает соответствующие массовые числа 30, 60 и 120 а.м.у. Учитывая ранее полученную оценку величины экспериментальной погрешности (не менее 15%) это дает значения массовых чисел для этих пиков в диапазоне (30 ± 4) , (60 ± 8) , (120 ± 20) . Эти величины достаточно близко соотносятся со значениями масс однократно ионизированных комплексов из нескольких (от одного до четырех) мономеров $(\text{C}_2\text{H}_4)^+$, которые и вносят преобладающий вклад в плазменный пучок.

3. Обсуждение

Известны наблюдения качественного характера в работах [11,12], что плазма поверхностного перекрытия конденсированных материалов содержит высокую плотность частиц в молекулярном состоянии. Полученные в настоящей работе экспериментальные данные по фракционному составу плазменных пучков импульсного высоковольтного перекрытия образцов диэлектрических материалах нескольких различных химических классов при плотности мощности энерговыклада в разряд порядка 108 W/cm^2 свидетельствуют о том, что преобладающий вклад в них дают однозарядные молекулярные ионы, содержащие в зависимости от вещества от 1 до 4 и более молекул, а ионизованные атомы составляют в сумме не более 10% от всей заряженной компоненты.

Ранее качественно похожая картина масс-спектров получена и в процессах генерации плазмы при воздей-

ствии длинноволнового лазерного излучения на образцы графита, в частности, в работе С.А. Кондрашева [13], где при плотности энерговыклада излучения CO_2 -лазера ($10^7 - 10^8$) W/cm^2 на поверхности графитовой мишени генерируется ионный пучок из однократно заряженных кластеров с максимумом распределения, соответствующим однозарядным кластерам, состоящим из трех атомов угле-рода, которые в электрическом поле диода при напряжении до 40 кВ дополнительно приобретают энергию 5 – 40 кеВ.

Полученный нами ранее [2] для полиэтилена в измерениях с цилиндром Фарадея большой площади (100 cm^2) в близких условиях максимум ионного тока на расстоянии от образца 0.6 м составляет 1.2 А. При интегрировании ионного тока по времени и в пределах полного телесного угла диаграммы направленности получен заряд $58 \mu\text{C}$, что в пересчете на число однозарядных ионов мономеров C_2H_4^+ дает $3.6 \cdot 10^{14}$ молекул. Их полная масса без учета наличия ионизованных молекул, состоящих из двух-четырех мономеров, $17 \cdot 10^{-9}$ г или $017 \mu\text{g}$, что составляет порядка 6.5% от измеренного полного расхода материала образца $0.27 \mu\text{g/разряд}$. Это процентное содержание равно значению обычно рассчитываемой степени ионизации в плазменном пучке. Результаты настоящей работы указывают на необходимость учитывать значительный вклад в массу ионизованной части пучка от однозарядных комплексов $[\text{C}_2\text{H}_4]_{1-4}^+$, что заметно увеличивает ее расчетное значение. Его можно оценить из полученных соотношений концентраций одно- двух- и четырехмономерных макроионов. Проведенный расчет дает величину массы положительно заряженных частиц в пучке $0.045 \mu\text{g}$, что составляет уже более 16% от полной массы частиц в этом плазменном сгустке. Таким образом, учет их вклада для измерений полиэтилена [2] дает гораздо большую массу заряженной компоненты пучка, что согласуется с заметно большей эффективностью ускорения плазменного пучка в процессе разряда.

Можно также оценить с использованием результатов измерений [2] импульса тяги величину средней скорости нейтральной компоненты, если вычесть из общего измеренного импульса отдачи $1.8 \mu\text{N}\cdot\text{s/discharge}$ расчетный импульс, создаваемый заряженной фракцией $0.9 \mu\text{N}\cdot\text{s}$ (с учетом телесного угла измерителя тяги), полученный умножением массы многомономерных компонент на их скорости. Расчет дает среднюю скорость разлета нейтралов около 8 км/с.

Таким образом, при уровне поверхностной плотности мощности энерговыклада порядка 10^8 W/cm^2 ионизованная фракция пучка, составляющая порядка 16% его массы, имеет распределение скоростей в диапазоне 30–200 км/с. Рассчитанная по измерениям импульса отдачи средняя скорость нейтральной компоненты, составляющей более 80% массы пучка, равна 6 – 8 км/с.

Заключение

С использованием импульсного магнитного массанализатора получено распределение скоростей и молекулярного состава основных, самых интенсивных фракций плазменных пучков вакуумного поверхностного перекрытия серы, хлорида калия и полиэтилена при напряжении перекрытия 60 кВ. Показано также, что в диапазоне токов разряда 3 – 6 кА с плотностью тока по сечению канала разряда вплоть до $6 \cdot 10^5$ А/см² и длительностью порядка 0.1 мкс наибольшую долю интегрального ионного заряда плазменного пучка переносят однократно ионизованные молекулы (S₂, KCl и комплексы из 2 – 4 однократно заряженных мономеров у полиэтилена). При этом интегральная по переносимому заряду доля одиночных ионизованных атомов не превышает 10% содержания ионизованной фракции. Таким образом, доля материала, переносимого плазменным пучком в виде ионов, гораздо больше, чем получается при обычно вычисляемой степени ионизации в расчете на полное число индивидуальных молекул данного вещества. В нашем случае для полиэтилена это приводит к различию более чем в два раза. Развитая методика предназначена для определения молекулярных масс и соотношения концентраций ионизованных фракций плазменных пучков, генерируемых на поверхности диэлектриков при вакуумном поверхностном пробое диэлектриков, что также может быть полезным при обсуждении механизмов ионизации вещества в этом процессе.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] П.А. Морозов, И.Ф. Пуанов, Р.В. Емлин, В.В. Лисенков. Изв. вузов. Физика. Радиационная физика и сильноточная электроника, **61** (9/2), 13 (2018).
- [2] R.V. Emlin, P.A. Morozov, I.F. Puanov, V.V. Lisenkov, Ye.N. Shcherbakov. IEEE Trans. Plasma Sci., **47** (6), 2838 (2019). DOI: 10.1109/TPS.2019.2914335
- [3] S.A. Buldashev, R.V. Emlin, P.A. Morozov, I.F. Puanov, E.N. Shcherbakov, L.Yu. Yashnov. J. Phys.: Conf. Series, **2064**, 012114 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2064/1/012114
- [4] В.А. Ермилов, Ф.А. Казанкин, Л.А. Потабачный, Р.В. Емлин, П.А. Морозов. Космическая техника и технологии, **3** (22), 2018.
- [5] T. Renk. J. Appl. Phys., **65** (7), 2244 (1989). DOI: 10.1063/1.342748
- [6] R.L. Burton, P.J. Turchi. J. Propulsion Power, **14** (5), 716 (1998). DOI: 10.2514/2.5334
- [7] Н.Н. Антропов, Г.А. Дьяконов, А.И. Покрышкин, Г.А. Попов, М.Н. Казеев, В.П. Ходненко. Прикладная физика, **1**, 37 (2002).
- [8] L.A. Arrington, C.M. Marrese, J.J. Blandino. 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. July 17–19, Huntsville, AL, (2000). DOI: 10.2514/6.2000-3262
- [9] G.G. Spanjers, J.S. Lotspeich, K.A. McFall, R.A. Spores. J. Propulsion Power, **14** (4), 554, (1998). DOI: 10.2514/2.5313
- [10] M.S. Glascock, J.L. Rovey, S. Williams, J. Thrasher. J. Propulsion Power, **33** (4), 870 (2017). DOI: 10.2514/1.B36271
- [11] K. Horioka, H. Yoneda, K. Kaurya. IEEE Trans. Plasma Sci., **17** (5), 793 (1989). DOI: 10.1109/27.41206
- [12] V.A. Papadichev, S.A. Pikus, T.A. Shelkovenko. Proc. 7th Conf. High Power Particle Beams, Karlsruhe, **715** (1988).
- [13] S.A. Kondrashev. Rev. Sci. Instrum., **65**, 1402 (1994). DOI: 10.1063/1.1144975