

04

© 1990 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ЭРОЗИОННЫМ РАЗРЯДОМ

*Р. Ф. Авраменко, Б. И. Бахтин, В. И. Николаева,
Л. П. Поскачьева, Н. Н. Широков*

Экспериментально исследованы плазменные образования, получаемые с помощью эрозионного разряда в цилиндрическом канале с диэлектрическими стенками. Установлено, что при определенных геометрии разрядника и условиях разряда формируется плазма с необычным сочетанием свойств, напоминающих свойства шаровой молнии. Показано, что исследованные плазменные образования могут автономно существовать в неподвижной атмосфере и газовом потоке, разгоняясь в нем до скоростей ~ 200 м/с.

Введение

Импульсный электрический разряд внутри канала с испаряющимися стенками (эрозионный разряд) исследовался достаточно подробно многими авторами с целью создания, например, высокотемпературных эталонных источников излучения [1], получения долгоживущих плазменных образований [2, 3], сверхзвуковых плазменных струй [4]. Однако особенности протекания процессов в этом разряде досконально не изучены.

В наших исследованиях с помощью эрозионного разряда удалось получить плазменные образования с необычным сочетанием свойств. Они отличаются высокой плотностью энергии при низкой газовой температуре и слабом оптическом излучении, сложной внутренней структурой, избирательным воздействием на материалы. Кроме того, полученные плазменные образования могут автономно существовать после окончания разряда до ~ 10 мс в неподвижной атмосфере и газовом потоке, разгоняясь в нем до скоростей ~ 200 м/с без изменения своей формы. Все эти свойства получены на установках, схема которых, на первый взгляд, традиционна. Однако отмеченные особенности плазменных образований очень критичны к небольшим изменениям геометрии разрядника и электрической схемы разрядного контура.

Отдельные из перечисленных свойств наблюдались и ранее у плазменных образований в лабораторных условиях [1-8], однако такое сочетание свойств из литературы неизвестно. Подобный набор свойств встречается при описании наблюдений за шаровыми молниями [5, 6, 9-12]. Поэтому исследованные в настоящей работе энергоемкие плазменные образования (ЭПО) можно, по-видимому, рассматривать в качестве лабораторного аналога шаровой молнии. Вместе с тем ЭПО представляют и самостоятельный научный интерес.

1. Генератор ЭПО

Для получения ЭПО использовался импульсный генератор плазмы (рис. 1). Электрический разряд создается внутри цилиндрического канала 1 с диэлектрическими стенками 2. С одной стороны разрядный канал закрыт плоским электродом (катодом) 3, с другой стороны на небольшом расстоянии от отверстия канала расположен анод 4. Электрическая энергия от 50 до 250 Дж запасается в конденсаторах C_1 (от 800 мкф до 3.2 мф, 400 В), которые разряжаются

при пропускании через канал поджигающего импульса от конденсатора C_2 (20 мф, 1000 В), через повышающий трансформатор Tr . В разрядную цепь введены индуктивности L_1 и L_2 для обеспечения требуемой формы и длительности

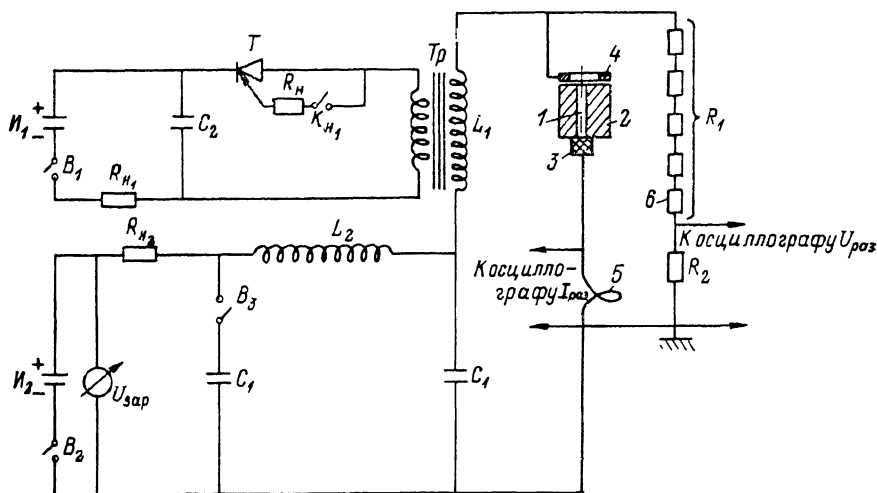


Рис. 1. Электрическая схема генератора ЭПО и схема разрядника.

1 — разрядный канал, 2 — диэлектрик полиметилметакрилат, 3 — торцевой электрод (катод), 4 — кольцевой электрод (анод); 5 — шунт, 6 — делитель разрядника.

разрядного импульса. Тиристор T в цепи поджига позволяет синхронизировать работу генератора и измерительной аппаратуры. Электрический импульс на открывание тиристора подается ключом $K_{н1}$ через сопротивление $R_{н1}$. Зарядка конденсаторов C_2 и C_1 осуществляется при замыкании ключей B_1 и B_2 соответ-

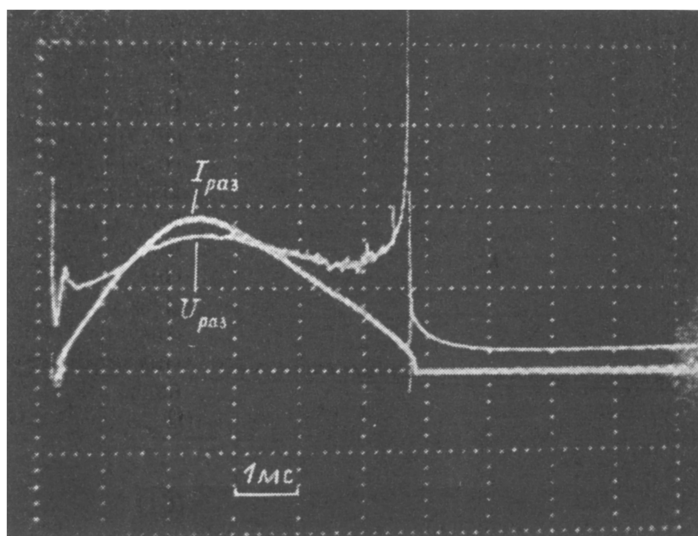


Рис. 2. Осциллограммы разрядного тока $I_{раз}$ и падения напряжения на разрядном промежутке $U_{раз}$.

ственно от источников питания I_1 и I_2 через нагрузочные сопротивления $R_{н1}$ и $R_{н2}$. Напряжение зарядки $V_{зар}$ конденсаторов C_1 контролируется вольтметром, разрядный ток регистрируется электронным осциллографом с помощью бифилярного шунта с сопротивлением $R_{ш}$, а разрядное напряжение $V_{раз}$ — с помощью делителя напряжения (R_1 , R_2). Принципиальная электрическая и конструктивная схемы генератора не содержат заметных отличий от традиционных

аналогичных импульсов генераторов эрозионного типа [13, 14]. Однако генерация неидеальной плазмы с необычными свойствами происходит только при выполнении определенных требований. Оптимальные условия формирования ЭПО достигались при отношении диаметра разрядного канала d к его длине l : $d/l = 0,2-0,3$ (величина d в экспериментах составляла 1 мм) при отношении внутреннего диаметра анода d_a к диаметру канала $d_a/d = 5-6$, средней плотности тока в канале $j = 5-10 \cdot 10^3$ А/см², напряженности электрического поля $E = 0,8-1,2 \cdot 10^3$ В/см. Характерные осциллограммы разрядного тока и падения напряжения на разрядном промежутке показаны на рис. 2. Максимальное значение тока в данных экспериментах достигало $I_{\text{раз}} \approx 130$ А, падение напряжения на разрядном промежутке $U_{\text{раз}} \approx 200$ В, напряжение зарядки конденсаторов $C_1 V_{\text{зар}} \approx 400$ В, время разряда до 12 мс. Длительность инициирующего импульса ~ 20 мкс, напряжение ~ 15 кв.

Особенность разрядного тока состоит в плавном нарастании кривой: скорость нарастания тока не превышает $5 \cdot 10^5$ А/с, а время нарастания составляет примерно половину времени разряда. Скорость нарастания тока выбирается такой, чтобы успевало установиться дозвуковое истечение продуктов разрушения при равномерном уносе материала стенок канала и осесимметричном распределении разрядного тока (в течение всего времени разряда) в канале.



Рис. 3. Энергоемкое плазменное образование (ЭПО) (внутри виден керн).

Стенки разрядного канала должны быть полированными и выполненными из легко сублимирующего материала с низкой эффективной энтальпией. В данных экспериментах в основном использовался полиметилметакрилат.

Вкладываемая мощность в единицу объема канала не должна превышать 5 МВт/см³ при среднем удельном расходе продуктов разрушения диэлектрической стенки 10—50 г/см²·с.

2. Свойства и особенности поведения ЭПО

2.1. Внешний вид, форма, цвет. При разряде генератора в атмосфере воздуха и газов (аргон, гелий) на выходе разрядного канала возникает светящееся цилиндрическое образование с заостренным кончиком и четко различимыми световыми границами (рис. 3). Диаметр светящейся зоны ЭПО составляет 6—10 мм, длина достигает ~ 400 мм. Можно отметить, что зависимость длины ЭПО от времени разряда коррелирует с временной зависимостью разрядного тока. В отличие от обычных газовых струй ЭПО не обнаруживает следов расходимости при распространении в газе. Скорость движения светящейся головной части ЭПО, судя по результатам скоростной кинесъемки процесса, лежит в пределах 50—80 м/с. Цвет плазменного образования зависит от внешней среды: в воздухе ЭПО имеет голубой оттенок, в гелии и аргоне — бирюзовый.

При генерации разряда в воздухе, содержащем мелкодисперсный водяной аэрозоль, наблюдается появление автономного (отделенного от генератора) плазменного образования, имеющего форму, близкую к сферической. Особенностью такого образования является движение в воздухе с сохранением формы и размеров (без расширения и расплывания). Автономное плазменное образование (АПО) существует некоторое время (~ 3 мс) после окончания разряда, аномально долгое для идеальной плазмы. Подобные АПО можно также получить, если вблизи от генератора перпендикулярно оси разрядного канала расположить нить, смоченную, например, раствором NaCl. Форма АПО в этом случае близка к цилиндрической, а время существования после окончания разряда возрастает до ~ 10 мс. АПО удавалось разгонять в спутном потоке газа до

скорости 130—200 м/с. На рис. 4 показаны кадры киносъемки ускорения АПО веретенообразной формы внутри кварцевой трубки, один конец которой был подсоединен к вакуумируемой емкости. Разрядная плазма направлялась внутрь трубки через второй, открытый конец, перед которым размещалась нить, смоченная NaCl. На кинокадрах видно, что АПО разгоняется в потоке воздуха, имеющем скорость ~ 300 м/с, не разрушаясь и не теряя своей формы.

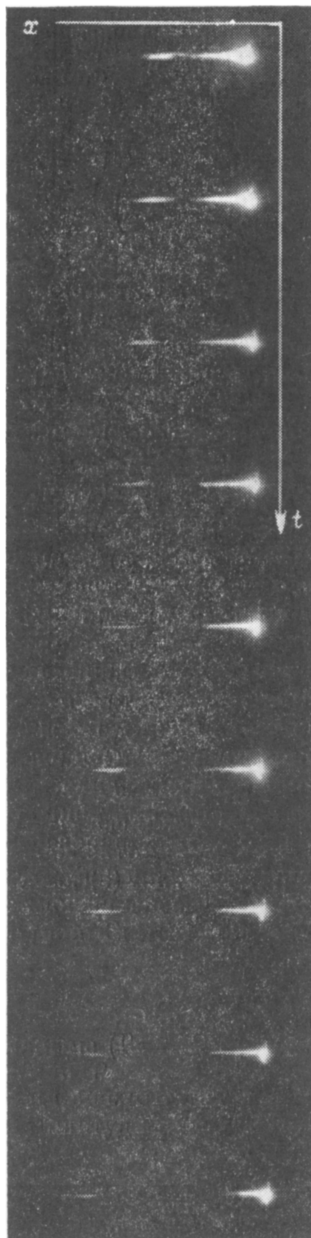


Рис. 4. Кинограмма процесса отрыва и ускорения АПО газовым потоком ($\tau_k \sim 0.3$ мс).

2.2. Структура и состав. Внутри светящейся зоны ЭПО поперечником 6—10 мм с четкими границами («оболочка») расположена (по оси ЭПО) еще более яркая цилиндрическая зона диаметром ~ 2 мм, названная «керна» (рис. 3). «Оболочку» можно частично или полностью удалить, пропуская, например, ЭПО через диафрагму, при этом «керна» выделяется более отчетливо. С помощью теневой съемки было установлено, что на участке среды диаметром 30—40 мм вокруг ЭПО видны турбулентные или ламинарные следы, скорость продольного перемещения в которых на порядок меньше скорости ЭПО («шуба»). При теневой съемке определялась также относительная плотность ЭПО по методу наклонной нити и фотометрическому методу. Интересно отметить, что средняя плотность ЭПО, согласно этим измерениям, близка к плотности окружающей среды.

В спектре излучения ЭПО при генерации его в воздухе в области длин волн 0.2—0.7 мкм видны атомные линии С, Cu, Na, Ca, а также молекулярные полосы C_2 , CN, причем в ближней к генератору области существуют также сильные атомные линии H и слабые атомные линии O, N.

При генерации ЭПО в гелии и аргоне молекулярные полосы CN отсутствуют. Характерной особенностью спектральных линий атомов водорода является их уширение с асимметричным контуром, что может свидетельствовать о высокой концентрации заряженных частиц в плазме и о неоднородностях этой концентрации. Согласно оценкам, сделанным на основании зафиксированного эффекта Штарка для H_β , концентрация заряженных частиц на расстоянии ~ 15 мм от генератора может достигать $\sim 10^{17}$ 1/см³, а на расстоянии ~ 35 мм убывает до величины $\sim 0.8 \cdot 10^{17}$ 1/см³.

Масс-спектрометрические исследования продуктов, образующихся в результате эрозионного разряда, показали наличие углеводородов типа C_2H_4 , C_3H_8 , CH_3OH . Съемка спектров излучения ЭПО в инфракрасной области ($\lambda = 2.8—7$ мкм) с помощью спектрометра ИКС-21 подтвердила наличие характерных для этих углеводородов пиков излучения на длинах волн ~ 3.2 и ~ 7.0 мкм.

Диагностика плазмы с помощью зондов в форме дисков, колец, игл и трубок не выявила значительного избытка частиц одного знака в каких-либо областях или зонах ЭПО. В целом плазменное образование близко к квазинейтральному. Фиксируемый в опытах избыточный отрицательный заряд в керне не превышает 0.1 % от величины заряда, пропускаемого через разрядный канал генератора. Максимальный плавающий потенциал плазмы составляет ~ 12 В. При пропускании ЭПО через соленоид или тороид заметной наведенной ЭДС в них не обнаружено.

2.3. Взаимодействие с материалами и предметами. Одна из необычных особенностей ЭПО заключается в избирательном воздействии на материалы. Тонкие (толщиной 0.05—0.2 мм) пластины из алюминия, ниобия, титана, тантала, вольфрама и других металлов, установленные на пути распространения ЭПО, подвергаются интенсивному разрушению (при запасаемой энергии ≥ 50 Дж), сопровождающемуся яркой вспышкой, с образованием круглых отверстий, измеримых с диаметром светящейся зоны ЭПО.

В тех же условиях эксперимента на листке обычной бумаги с такой же толщиной, как, например, у вольфрамовой пластины, заметных следов воздействия ЭПО не обнаруживается. На пленках толщиной 0.1—0.2 мм из полиэтилена, фторопласта и других диэлектриков с низкой эффективной энтальпией также не наблюдается проплавления отверстий, хотя результат нагрева материала проявляется в виде характерных следов коробления и деформаций пленок. Таким образом, ЭПО интенсивно воздействуют на электропроводные материалы и оказывают слабое тепловое воздействие на диэлектрические материалы, причем основной механизм нагрева и разрушения испытуемых металлических образцов, по-видимому, не связан с конвективной теплопередачей. Это утверждение принципиально расходится с выводами авторов работы [4], обнаруживших при экспериментах с аналогичным импульсным генератором плазмы эффект ее более заметного воздействия на металлы по сравнению с бумагой и объяснивших его особенностями теплообмена образцов в сверхзвуковом высокотемпературном потоке.

Избирательное воздействие ЭПО на электропроводные материалы приводит к предположению о возможности джоулевого нагрева проводников за счет, например, выносных токов или избыточного потенциала плазмы. Однако при экспериментальной проверке это предположение не подтвердилось, так как результаты экспериментов не зависели от того, была металлическая пластина заземлена при испытаниях или электрически изолирована. ЭПО может также последовательно прожигать отверстия в ряде поставленных друг за другом металлических заземленных либо изолированных пластинах.

Другая гипотеза — преимущественного электромагнитного нагрева электропроводных материалов — также не оправдывалась, так как эксперименты показали, что лист бумаги или другого диэлектрика перед пластиной защищает металл от нагрева и разрушения.

Было установлено также, что степень черноты металлических образцов не оказывает никакого влияния на характер взаимодействия с ЭПО.

Попытки экспериментально выявить закономерности воздействия ЭПО на материалы привели к выводам, требующим дальнейшего уточнения возможности влияния на интенсивность нагрева и разрушения образцов магнитных свойств или степени каталитичности материалов.

Еще больше вопросов вызывают следы, которые ЭПО оставляют на зеркальных металлических покрытиях. На рис. 5 показана увеличенная фотография зеркала с золотым покрытием (на подложке из кварца), которое было установлено при разряде генератора на расстоянии ~ 50 мм от него перпендикулярно оси разрядного канала.

Необычная и сложная картина следов разрушения, возникающая на зеркале с золотым покрытием (диамагнетик), не может быть объяснена результатом конвективного, лучистого или электромагнитного теплового воздействия. На фотографии можно заметить осесимметричные кольцевые зоны разрушения металлического покрытия, а также локальные участки повреждения в виде мелких точек неправильной формы и радиально расходящихся бороздок, на концах которых обнаруживаются капельки золота размерами порядка десятков или сотен микрон. На зеркальном покрытии из алюминия (парамагнетик) характер следов разрушения заметно отличается от предыдущей картины.

Интересная особенность поведения ЭПО проявляется, если на его пути разместить преграды в виде стержней, дисков, сфер или пластин с отверстиями. При встрече с преградами, размеры которых близки к диаметру зерна, ЭПО стремится их обогнуть или преодолеть, сохраняя свою целостность. Например, наталкиваясь на плоскую пластину с отверстиями (~ 2 мм), расположенными симметрично относительно оси разрядного канала (на расстоянии ~ 2 мм друг

от друга, ЭПО проходит через одно из них, не разделяясь на части. Можно предположить, что в плазменном образовании существуют силы, подобные силам поверхностного натяжения или взаимопритяжения частиц среды ЭПО. Как показали эксперименты по распространению ЭПО в вакуумируемой камере, ЭПО не распадается вплоть до давления ~ 25 мм Hg ($33.3 \cdot 10^2$ Н/м²).

Определенные аномалии поведения отмечены при пропускании ЭПО внутри трубок из различных материалов.

Обнаружена зависимость максимальной по времени длины ЭПО не только от диаметра, длины, но и от материала трубок. Для диэлектрических трубок длиной 150 мм (стекло, плексиглас) максимальная длина ЭПО уменьшается

в ~ 2 раза, если диаметр трубок (30 мм) меньше или равен диаметру несветящейся оболочки ЭПО («шубы»). С увеличением длины трубки диаметром ~ 20 мм до величины 300 мм максимальная длина ЭПО сокращается до 0.4 максимальной длины ЭПО в свободном пространстве.

Для трубок из электропроводящих материалов (медь, графит, дюраль, титан, железо) длиной 150 мм и диаметром ~ 20 мм отмечена корреляция максимальной длины ЭПО с их магнитными свойствами. Через ферромагнитные трубки (железо) ЭПО проходит без сокращения длины, в парамагнитной трубке (титан) длина ЭПО уменьшается на ~ 25 %, в диамагнитных трубках (медь, графит, дюраль) максимальная длина ЭПО сокращается вдвое по сравнению со свободным пространством.

При распространении ЭПО в поперечном магнитном (напряженность $H \approx 1.2 \cdot 10^6$ А/м) или

Рис. 5. Следы воздействия ЭПО на зеркальный слой золота на кварцевой подложке.

электрическом поле (напряженность $E \approx 10^6$ В/м) отклонения плазмы от оси разрядного канала не было обнаружено.

2.4. Энергетические характеристики. Для измерения энергии ЭПО и распределения ее вдоль оси и в радиальном направлении использовались калориметры в форме дисков и колец из ванадия, титана, меди. Максимальное значение энергии ЭПО (измеренное ванадиевыми и титановыми калориметрами, которые являются парамагнетиками с большим коэффициентом магнитной проницаемости) на расстоянии ~ 30 мм от генератора составляет ~ 60 % от энергии разряда. Вдоль оси энергия падает слабо примерно до его середины, а затем снижается более круто. В поперечном сечении (рис. 6) распределение энергии носит осесимметричный и явно выраженный неравномерный характер. Ордината на графике соответствует величине энергии, приходящейся на единицу площади приемной поверхности.

На основании этих данных определена максимальная плотность теплового потока (в зоне керна) при встрече ЭПО с электропроводными материалами, равная $\sim 5 \cdot 10^4$ Вт/см². Можно отметить, что такие высокие уровни тепловых потоков реализуются в струях идеальной плазмы с температурой $20-30 \cdot 10^3$ К [13, 14]. Величина объемной плотности энергии в зоне керна достигает ~ 10 Дж/см³.

При встрече ЭПО с диэлектриками тепловой поток оказывается существенно меньше.

Необычные результаты были получены при измерении лучистых потоков

ЭПО. Максимальная мощность излучения в диапазоне длин волн $\lambda = 0.2 - 10$ мкм, измеренная болометром типа ПБК-60, оказалась незначительной (~ 30 Вт). За время разряда ЭПО излучает не более 1 % содержащейся в нем энергии. Почти половина измеренной энергии обусловлена излучением ЭПО в инфракрасной области спектра, причем установлено, что ИК излучение ЭПО продолжается после окончания разряда еще в течение ~ 10 мс, в то время как видимое излучение наблюдается только во время разряда. Для измерения ИК излучения ЭПО в спектральном интервале $\lambda = 1 - 8$ мкм был взят фотоприемник на основе Ge : Au, охлаждаемый жидким азотом. В качестве источника ИК излучения для просвечивания ЭПО использовался глобар с температурой 1730 К. Измеренный в этой области длин волн коэффициент поглощения для ЭПО диаметром 0.8 см в среднем сечении по длине составил 0.075 см^{-1} . Основываясь на этих измерениях была оценена газовая температура ЭПО — $T_r = 1000$ К.

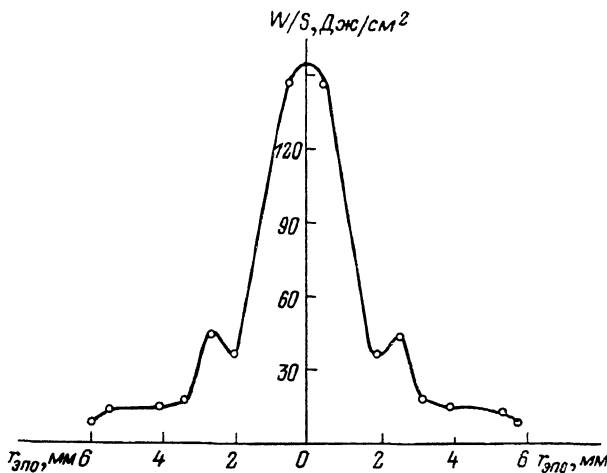


Рис. 6. Распределение энергии ЭПО по радиусу ЭПО на расстоянии 25 мм от разрядника.

Более точные измерения температуры ЭПО были проведены на длине волны $\lambda = 3.2$ мкм ($\Delta\lambda = 0.2$ мкм), где наблюдался пик излучения углеводородных молекул. Измеренный коэффициент поглощения составил 1 см^{-1} , а температура $T_r = 940$ К.

Измерение температуры заряженных частиц по методу относительной интенсивности атомных линий водорода H_β/H_γ (вблизи разрядника, где светит водород) дало величину $\sim 6.5 \cdot 10^3$ К на расстоянии 15 мм от разрядника, $\sim 5 \cdot 10^3$ К на расстоянии 35 мм от разрядника.

Заключение

Итак, исследуемое плазменное образование (ЭПО) имеет плотность, близкую к плотности окружающего воздуха, низкую температуру, низкую интенсивность излучения. При этом плазма отличается высокой концентрацией заряженных частиц, высокой плотностью энергии, сложной внутренней структурой, интенсивным воздействием на электропроводные материалы, наличием сил взаимного притяжения частиц плазмы, способностью к автономному существованию аномально долгое время по сравнению с идеальной плазмой (если допустить, что ЭПО представляет собой равновесную систему с температурой ~ 1000 К и плотностью заряженных частиц $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, то число частиц в сфере, определяемой радиусом Дебая, составит $N_D \approx 0.3$, а параметр неидеальности будет равен $\gamma \sim 0.6$).

Изложенный в работе фактический материал получен авторами в результате последовательного изучения обнаруженного явления с целью его понимания и управления им. Однако задача оказалась сложной, поставленная цель пока в полной мере не достигнута. Можно надеяться, что необычные свойства ЭПО

заинтересуют исследователей и задача будет решена, что позволит найти плазменным образованиям применение в технике, технологии, научных исследованиях.

Авторы приносят благодарность С. П. Шалаеву, принимавшему участие в работе, а также Л. А. Филькину за полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Огурцова И. Н., Подмошенский И. В., Шелепина В. М. // Опт. и спектр. 1964. Т. 16. Вып. 6. С. 949—957.
- [2] Андрианов А. М., Силицын В. И. // ЖТФ. 1977. Т. 47. Вып. 11. С. 2318—2327.
- [3] Александров А. Ф., Тимофеев И. Б., Черников В. А. и др. // ТВТ. 1988. Т. 26. Вып. 4. С. 639—643.
- [4] Султанов М. А., Киселевский Л. И. // ТВТ. 1966. Т. 4. Вып. 3. С. 375—379.
- [5] Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния. М.: Мир, 1983. 285 с.
- [6] Смирнов Б. М. Проблема шаровой молнии. М.: Наука, 1988. 208 с.
- [7] Powell J., Finkelstein D. // Amer. Scient. 1970. Vol. 58. P. 262—279.
- [8] Дорошков В. В., Копытин Ю. Д., Хан В. А. // Сб. статей. Томск, 1988. С. 145—154.
- [9] Леонов Р. А. Загадка шаровой молнии. М.: Наука, 1965. 218 с.
- [10] Имянитов И. М., Тихий Д. Я. За гранью законов науки. М.: Атомиздат, 1980. 190 с.
- [11] Дмитриев М. Т., Бахтин Б. И., Мартынов В. И. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 12. С. 2567—2572.
- [12] Дмитриев М. Т., Бахтин Б. И., Башкиров В. Л. // Геофизика. 1983. № 8. С. 28.
- [13] Андрианов А. М., Земсков А. И., Прут В. В. и др. // ЖТФ. 1969. Т. 39. Вып. 3. С. 433—437.
- [14] Глебов И. А., Рутберг Ф. Т. Мощные генераторы плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 153 с.

Поступило в Редакцию
20 декабря 1988 г.
В окончательной редакции
22 июня 1989 г.