

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Л. В. КИРЕНСКОГО

Препринт № 810Ф

К ВОПРОСУ О ПЕРЕХОДЕ УГЛЕРОДНОЙ ПЛАЗМЫ В
ФУЛЛЕРЕНОВОЕ СОСТОЯНИЕ УГЛЕРОДА

Г.Н. Чурилов

Красноярск 2000

УДК 537.525.1; 542.91

Чурилов Г.Н.

К вопросу о переходе углеродной плазмы в фуллереновое состояние углерода: Препринт № 810Ф. – Красноярск: Институт физики СО РАН, 2000. – 18 с.

В работе проанализированы экспериментальные результаты по плазменному синтезу фуллеренов. Высказано предположение о том, что основным параметром, влияющим на синтез фуллеренов, является электронная плотность и, в соответствии с этим, большую роль в синтезе играет ионизационная неустойчивость. Описывается эксперимент по обнаружению вынужденных ионизационных волн в потоке аргоновой плазмы при атмосферном давлении. Намечены направления экспериментальных и теоретических работ в рамках создания будущей модели синтеза фуллеренов.

The experimental results on plasma synthesis of fullerenes are analyzed in the paper. The supposition is expressed that basic parameter influencing to synthesis of fullerenes is the electronic density and, according to it, the major role in synthesis is played by ionization instability. The experiment on a detection of the forced ionization waves in argon plasma flow at atmospheric pressure is featured. The directions of experimental and theoretical operations are marked within the framework of making the future model of fullerene synthesis.

Рецензент
доктор физико-математических наук, профессор
С.Г. Овчинников

© Институт физики
им. Л. В. Киренского СО РАН

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время число публикаций в год, имеющих в своем названии слово «фуллерен», составляет величину близкую к 300000. Большое число работ посвящено ответу на вопрос: «Как образуются молекулы фуллеренов в углеродной плазме?». Для ответа на этот вопрос разработано ряд моделей образования молекулы фуллерена, которые имеют экзотические названия: «фуллереновый путь», «улитка», «правило пятиугольника» и т.д. [1, 2].

Прошло уже десять лет, с тех пор, когда В. Кретчмер с соавторами опубликовали оптимальные условия получения препаративных количеств новой аллотропной модификации углерода - фуллеренов [3]. Также прошло двадцать семь лет с момента выхода работы, в которой Д.А. Бочвар и Е.Г. Гальперн показали, что молекулярная структура под названием "S –икосаэдр", состоящая из атомов углерода, известная сейчас как молекула фуллерена C_{60} (рис.1), настолько не напряжена, что просто не может не существовать [4]. Многие исследователи не видят разницы между следующими двумя вопросами: «Каким может быть механизм образования молекулы фуллерена?» и «Как подобрать оптимальные экспериментальные условия для его получения?» [2].



Рис.1. Молекула C_{60} .

Полагаю, что эти вопросы существенно различаются. Термодинамика разрешает существование молекулы фуллерена, что подтверждают, например, расчеты которые приведены в работе [4]. Кинетика реализована в методе получения фуллеренов В. Кретчмера, как в наиболее оптимальном методе синтеза фуллеренов. В соответствии с этим, с точки зрения технологии и будущей модели образования фуллеренов, более точно вопрос можно поставить так: «Каким основным параметром определяется переход углеродной плазмы в конденсированное состояние углерода в виде фуллеренов?». На этот вопрос, при анализе уже имеющегося большого количества экспериментальных результатов, можно попытаться найти ответ.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наиболее распространенным методом получения фуллеренов до сегодняшнего дня остается метод В.Кретчмера [1, 3, 5]. Сущность этого метода в том, что дуга в гелиевой атмосфере при давлении 100 - 200 Тор осуществляется между графитовыми электродами. Из угольного конденсата, полученного таким путем можно выделить фуллереновую смесь, количество которой, в процентном отношении, составляет величину близкую к 10 %. Многими исследователями были предприняты попытки оптимизации процесса синтеза и нахождения условий позволяющих увеличить выход фуллеренов. Давление – это основной параметр, который варьировался в этих экспериментах. Тем не - менее синтез в разреженной атмосфере гелия оказался оптимальным. Сейчас хорошо известно, что попадание в зону синтеза таких химически активных газов как водород, кислород, азот, а также недостаточное охлаждение срывают процесс образования фуллеренов. Если исключить эти факторы, то остается вопрос: «Почему необходимо использовать гелий или аргон и при давлении не выше 200 Тор?». Для специалистов, занимающихся газовыми разрядами хорошо известно, что плазма благородных газов при этих давлениях особенно активно проявляет ионизационную неустойчивость [6, 7]. В соответствии с этим, уместно предположить, что для образования фуллеренов необходимо возникновение колебаний электронной плотности в плазме.

В работе [8], в результате проведенных экспериментов по получению фуллеренов путем прямого испарения графита и при осуществлении разряда в парах графита было установлено, что в плазме синтез фуллеренов идет более эффективно, чем в не ионизованном углеродном паре. Был сделан вывод, что при рассмотрении образования фуллеренов в плазме необходимо учитывать наличие заряженных частиц.

Анализ этих экспериментов и тех, которые были проведены нами ранее [9], позволяет высказать гипотезу о том, что электронная

плотность – основной параметр влияющий на фазовый переход «углеродная плазма – фуллереновое состояние углерода».

На первый взгляд не все экспериментальные результаты подтверждают эту гипотезу. Например, эффективный метод получения фуллеренов в потоке углеродно-гелиевой плазмы, разработанный нами и применяемый для синтеза в научных целях, происходит при атмосферном давлении, а колебания электронной плотности обычно наблюдаются при давлениях ниже атмосферного [5].

Для выяснения, противоречит ли этот результат высказанной нами гипотезе, обратимся к работам [10, 11]. В этих работах, методами поуровневой кинетики, были проведены численные расчеты для некоторых благородных газов. Было показано, что

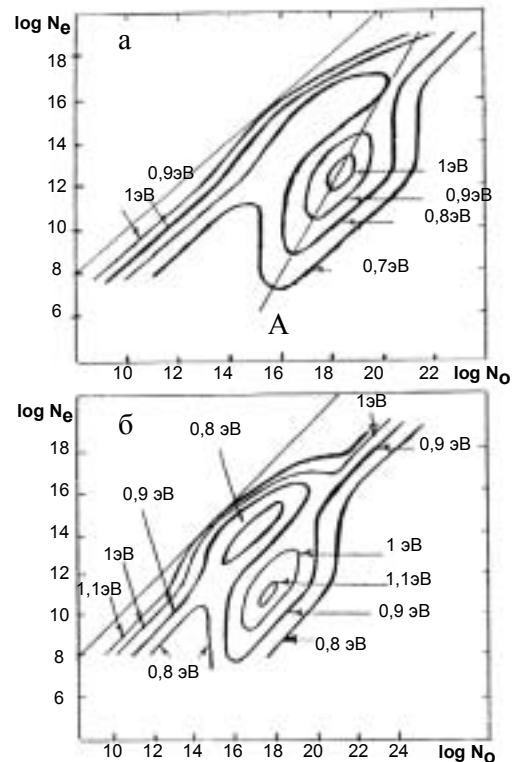


Рис. 2. Диаграммы равновесных состояний оптически тонких плазм ксенона (а) и аргона (б).

предельные циклы для электронных концентраций обладают бифуркационными точками рис.2. Анализируя эти предельные циклы можно сделать вывод, что ионизационная неустойчивость в благородных газах может развиваться и при давлениях, вплоть до атмосферного. Конечно, очевидно, что чем ближе плазма к равновесному состоянию, т.е. чем выше плотность плазмы, тем сложнее нарушить в ней ионизационное равновесие. Поэтому, ионизационные волны, при атмосферном давлении не наблюдались (по крайней мере, автору такие работы не известны).

Таким образом, в рамках выдвинутой гипотезы, необходимо предположить, что в потоке благородных газов при атмосферном давлении, при возбуждении разряда в диапазоне частот, в котором ведется синтез фуллеренов, возникают вынужденные ионизационные волны, т.е. должна наблюдаться стратификация разряда.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДА В ПОТОКЕ АРГОНА МЕТОДАМИ СКОРОСТНОЙ ФОТОРЕГИСТРАЦИИ

Оптическими методами и методами скоростной фоторегистрации был исследован разряд в потоке аргона при атмосферном давлении при питании разряда переменным током частотой 44 кГц [12, 13]. Фотография разряда приведена на рис. 3.



Рис. 3. Фотография разряда килогерцевого диапазона частот.

Получение разрядов переменного тока между водоохлаждаемыми металлическими электродами всегда было трудной задачей [14]. С другой стороны, если следовать частотной характеристике разрядов, приведенной, например, Ю.П. Райзером в [15], то мы увидим отсутствие даже упоминания о дуговых разрядах диапазона 10 ÷ 440 кГц. Это связано в первую очередь с тем, что до недавнего времени подходящих источников тока этого диапазона частот просто не существовало. Генераторы или усилители должны обладать малым внутренним сопротивлением, что позволило бы осуществить их оптимальное согласование с дуговыми разрядами [9]. Второй причиной непопулярности этого диапазона у исследователей плазменных генераторов, как мне кажется, остается ошибочное заблуждение в том, что все свойства разрядов здесь такие же, как и в

диапазоне до 1 кГц. В настоящее время появились мощные транзисторы и генераторы способные работать на низкоомную нагрузку с высоким КПД. Это можно считать субъективной предпосылкой для начала проведения интенсивных исследований. Объективная предпосылка была всегда, это совпадение характерных времен в дуговых разрядах с периодом тока дуги этого диапазона 10^{-4} – 10^{-5} с [15].

1. Методики и оборудование

Разряд, осуществлялся между водоохлаждаемым металлическим электродом и водоохлаждаемым медным электродом с осевым отверстием, через которое подавался поток аргона. Конструктивное решение и схема питания нами описывались ранее [5, 9,18].

Для получения радиационных динамических характеристик разряда была разработана методика, основанная на принципе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Для получения изображения и спектра разряда на фотопленке использовалась сверхскоростная фоторегистрирующая установка (СФР), которая позволяла зафиксировать динамику разряда в течение периода. Использовать какие-либо затворы было бесполезно, так как чувствительность фотоматериалов недостаточна для регистрации процесса в течение одного периода вращения зеркала. Для такого рода задач мы разработали методику регистрации процесса на фотопленку, которая позволяет получать достаточно полную информацию о процессе. Суть нашей методики заключается в том, что частота и фаза вращения зеркала камеры СФР берутся в качестве параметров опорного сигнала. Блок ФАПЧ вырабатывает сигнал с фазой, соответствующей фазе опорного сигнала с частотой в 40 раз большей. Этот сигнал подается на усилитель, питающий разряд.

На рис.4 представлена электрическая схема разработанного устройства. Функциональными узлами устройства являются: генератор, управляемый напряжением (ГУН), фазовый компаратор (ФК) (логическое ИЛИ), усилитель-формирователь входного сигнала (УФ) на базе микросхемы КР1561ГГ1 (DD3); формирователь сигнала сравнения для фазового компаратора, представляющий собой делитель частоты выходного сигнала с кратностью 80, выполненный на базе счетчиков КР561ИЕ10 и КР561ИЕ19 (DD1.1 и DD2); делитель частоты входного сигнала с кратностью 2 для получения формы входного сигнала в виде меандра (DD1.2); оптоин (DA1) для обеспечения гальванической развязки входа устройства и электрических цепей скоростной камеры.

Принцип работы устройства ФАПЧ можно представить следующим образом. Сигнал частотой 1.1 кГц от датчика частоты вращения зеркала скоростной камеры после усиления в пульте управления поступает на светодиод оптопары DA1. Повторенный

фототранзистором сигнал через инверторы DD4.1-DD4.3, которые играют роль усилителя мощности, подается на вход усилителя-формирователя и далее на фазовый компаратор ФК, который

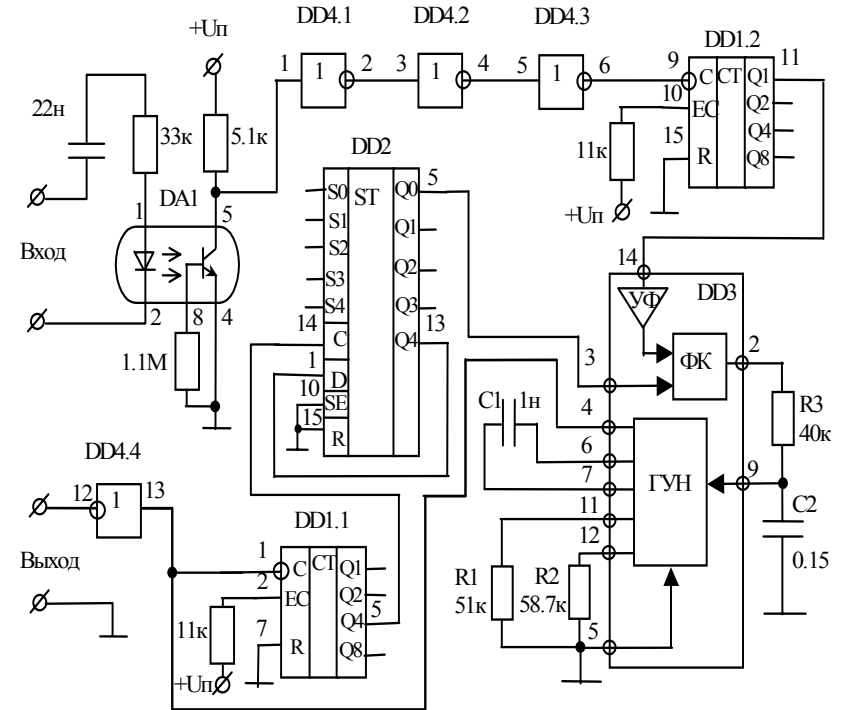


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема устройства фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

сравнивает этот сигнал с выходным, поступающим с делителя частоты с кратностью 80, и формирует управляющее напряжение для ГУН. Это напряжение сглаживается фильтром низкой частоты (RC-цепочка на основе элементов R3 и C2), постоянная времени RC-цепочки соответствует необходимому времени перестройки фазы выходного сигнала 10^{-3} с (время одного оборота зеркала). При поступлении управляющего напряжения на вход 9 ГУН формирует выходной сигнал частотой 44 кГц в форме меандра. Генерация осуществляется при

поступлении на вход 5 микросхемы DD3 напряжения низкого уровня. Элементами С1 и R1 задается основная частота генерации ГУН, а элементом R2 полоса слежения частоты. ГУН генерирует сигнал на основной частоте при управляющем напряжении, равном половине напряжения питания. При отставании фазы выходного сигнала от фазы опорного сигнала управляющее напряжение возрастает, тем самым, увеличивая частоту генерации ГУН. По мере выравнивания фаз опорного и выходного сигналов управляющее напряжение уменьшается и принимает значение, обеспечивающее равенство фаз обоих сигналов. При опережении фазы выходного сигнала фазы опорного управляющее напряжение уменьшается.

Напряжение питания устройства ФАПЧ -10 В.

Методика исследования спектральных характеристик разряда была использована обычная, для случая получения и обработки эмиссионных спектров [16]. Применялся спектрограф PGS-2 с трехлинзовой и однолинзовой системами фокусировки разряда.

Для того, чтобы спектр был обогащен линиями элементов было разработано и применено устройство непрерывной подачи порошкообразных проб в плазму разряда. Подача пробы была совмещена с потоком аргона (рис. 5).

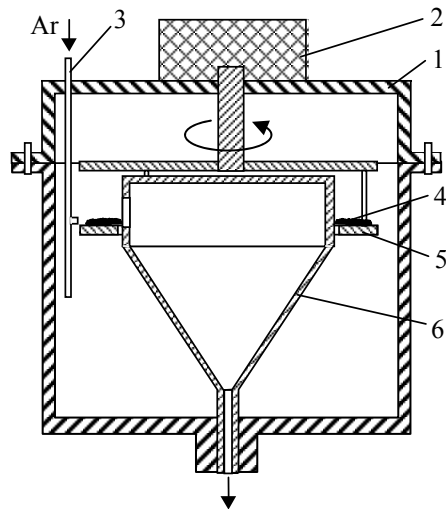


Рис. 5. Конструкция устройства подачи порошкообразных проб в разрядный промежуток. 1 – разборная камера, 2 – электродвигатель, 3 – трубка для подачи транспортного газа, 4 – анализируемая проба, 5 – кольцо, 6 – воронка.

В устройстве анализируемая проба 4 ровным слоем насыпалась на кольцо 5. От источника избыточного давления в рабочую камеру через трубку 3 подавался транспортный плазмообразующий газ (аргон). Одновременно электродвигатель 2 приводил во вращение кольцо 5. В процессе вращения кольца струей транспортного газа из трубки 3 осуществлялось сбрасывание анализируемой пробы 4 с кольца 5 в воронку 6. Из воронки 6 анализируемая проба поступала в центр разрядного промежутка.

Температура разряда и электронная концентрация определялись методом относительных интенсивностей спектральных линий Cu I 510.5 нм, Cu I 521.8 нм и Mg II 279.6 нм, Mg I 278.0 нм соответственно. Также, электронная концентрация определялась по ширине линии водорода H_{β} , который специально для этого вводился в незначительных количествах в поток аргона.

2. Экспериментальная часть

2.1. Спектральные характеристики разряда

Для определения средних значений температуры и электронной концентрации были получены спектры излучения плазмы разряда в области длин волн 420-570 нм. Ток разряда составлял 10 А, расход аргона 3 л/мин.

На рис. 6 и рис. 7 представлены распределения температуры и концентрации электронов разряда по длине межэлектродного промежутка. Температура определялась методом относительных интенсивностей линий Cu I 510.5 нм и Cu I 521.8 нм. Концентрация электронов – по Штарковскому уширению линии водорода H_{β} .

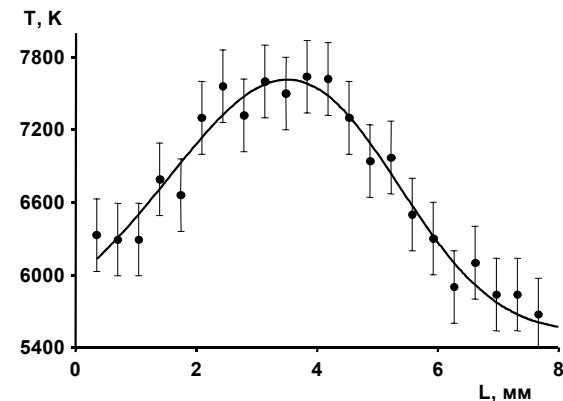


Рис. 6. Усредненное по времени распределение температуры плазмы разряда с полым медным электродом по длине межэлектродного промежутка.

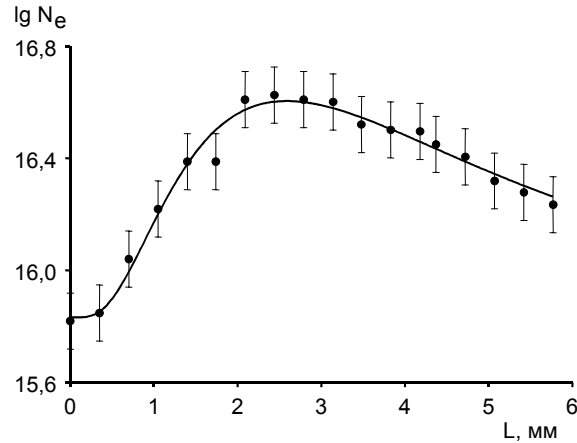


Рис. 7. Усредненное по времени распределение концентрации электронов плазмы разряда с полым медным электродом по длине межэлектродного промежутка.

По виду графиков (рис. 6, 7) можно сделать вывод, что как температура, так и концентрация электронов плазмы разряда по длине межэлектродного промежутка непостоянны. Сначала, по мере удаления от центрального электрода наблюдается рост этих параметров, на расстоянии ~ 3 мм от центрального электрода они достигают максимального значения ($T = 7700$ К, $N_e = 3.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$). При дальнейшем удалении от центрального электрода T и N_e убывают.

Электронная концентрация, определенная методом относительных интенсивностей спектральных линий, хотя и не больше чем на порядок отличается от электронной концентрацией, определенной по Штарковскому уширению линии водорода (рис. 7), тем не менее, это не позволяет сделать вывод, что состояние плазмы соответствует локальному термодинамическому равновесию для случая, когда плазмообразующий газ – аргон.

Для количественной оценки стабильности излучения плазмы разряда, использовался коэффициент вариации v , являющийся стандартным в математической статистике. Данный параметр был применен для оценки стабильности излучения плазмы исследуемого разряда по линии меди 249.2 нм. Были обработаны 10 спектров излучения, полученные в течение одного эксперимента при идентичных условиях без введения пробы в плазму разряда. Коэффициент вариации имел значение – 2.48 %.

Аналогично был рассчитан коэффициент вариации интенсивности линии углерода 247.8 нм. Для этого были получены 16 спектров графита марки С-3. В плазму разряда графитовый порошок

вводился при помощи изготовленного устройства подачи проб (рис.5). Коэффициент вариации составил величину – 3.8 %.

2.2. Динамика разряда.

С помощью разработанной методики скоростной фоторегистрации были получены фотографии развертки излучения плазмы исследуемого разряда во времени (рис. 8, 9). Фотографии позволили выявить картину распределения светимости разряда вдоль его длины, а также характер пульсации светимости разряда в течение периода.

На рис. 8 приведена фотография развертки разряда. Диаметр отверстия центрального электрода, через которое подавался аргон составлял ~ 4.0 мм. Развертка сделана при токе дуги разряда 10 А и скорости потока аргона 32 м/с. По фотографии видно, что интенсивность



Рис. 8. Фоторазвертка стоячих волн интенсивности излучения плазмы разряда. Отверстие центрального электрода ~ 4.0 мм. Сила тока 10 А. Скорость потока аргона 32 м/с.

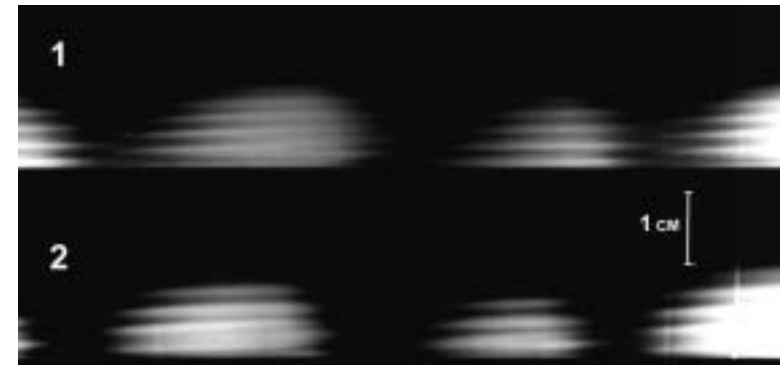


Рис. 9. Фоторазвертки движущихся волн интенсивности излучения плазмы разряда при разных скоростях потока аргона: 1 – 42 м/с, 2 – 54 м/с. Ток дуги разряда 7 А. Отверстие центрального электрода ~ 2.3 мм.

ность излучения плазмы разряда пульсирует в соответствии с изменениями тока, питающего разряд. Пульсации имеют различную амплитуду для различных периодов тока в зависимости от полярности электродов. На фотографии на разном расстоянии от центрального электрода наблюдаются два максимума интенсивности излучения

плазмы: возле среза центрального электрода, величиной ~ 1 мм и на расстоянии 4 – 5 мм от среза центрального электрода. Таким образом, разряд по длине стратифицирован. Наблюдаются две светящиеся области, которые не меняют своего положения. Это явление обычно наблюдалось в тлеющих разрядах при низком давлении, но практически не встречалось в дуговых разрядах, тем более при атмосферном давлении и без какой либо трубки ограничивающей разрядную область. В рамках современных представлений стратификацию объясняют возникновением волн ионизации [6, 7]. В данном случае мы наблюдаем стоячие ионизационные волны.

Для определения в какой полупериод тока интенсивность излучения больше, а в какой меньше, использовался двухлучевой осциллограф С1-69. К одному входу был подключен фотодиод ФД-3, а ко второму входу через резисторный делитель подавалось напряжение, приложенное к электродам. Излучение плазмы попадало на р-п-переход фотодиода, вызывая появление в нем фототока и наводя на его выводах фото-ЭДС. Пульсации фото-ЭДС находились в фазе с пульсациями излучения плазмы. По осциллограмме было установлено, что интенсивность излучения выше в те полупериоды тока, когда к центральному электроду приложено отрицательное относительно электрода-индуктора напряжение, то есть когда он является катодом.

На рис. 9 приведены фотографии разверток, представляющие характерные картины движущихся стратов, которые при горении разряда двигались от центрального электрода, через который подавался аргон, к внешнему, также водоохлаждаемому электроду. Движущиеся страты были зафиксированы при использовании центрального электрода с диаметром отверстия ~ 2.3 мм, т.е. примерно в два раза меньшим, чем при неподвижных стратах.

Исследование фотографий показало, что кроме величины отверстия характер волнового процесса зависит от величины тока, питающего разряд, и скорости потока аргона через центральное отверстие электрода. По фотографиям, которые были получены при различных токах и расходах были определены длины волн интенсивности излучения по расстояниям между пиками интенсивности и скорости волн по углу их наклона на развертках.

На рис. 9 (1) представлена фотография развертки, при токе 7 А и скорости потока аргона 42 м/с. Скорость движения волн интенсивности излучения для полупериода, когда центральный электрод – катод составила 112 ± 6 м/с, для полупериода, когда центральный электрод – анод скорость движения волны составила 41 ± 4 м/с. Длина волны – 1.9 ± 0.2 мм в обоих случаях.

На рис. 9 (2) представлена фотография развертки, при токе 7 А и скорости потока аргона 54 м/с. Скорость движения волн интенсивности излучения для полупериода, когда центральный электрод – катод составила 100 ± 8 м/с, для полупериода, когда

центральный электрод – анод скорость движения волны составила 50 ± 6 м/с. Длина волны – 2.7 ± 0.2 мм в обоих случаях.

Были определены параметры движущихся страт для величины тока 8.5 А.

Для скорости потока аргона 42 м/с скорости движения волн, составили 80 ± 6 м/с и 33 ± 4 м/с, когда центральный электрод катод и когда – анод, соответственно. Длина волны – 1.7 ± 0.2 мм.

Для скорости потока аргона 54 м/с скорости движения волн составили 128 ± 6 м/с и 30 ± 6 м/с, соответственно. Длина волны – 2.0 ± 0.2 мм.

Полученные значения скоростей волн позволяют сделать вывод о том, что волны ионизации меняют направление движения в зависимости от полярности электродов, а длина волны равна диаметру отверстия центрального электрода.

Экспериментальные исследования показали, что аргонная плазма, при питании разряда на частоте 44 кГц обладает ионизационной неустойчивостью, что подтверждает теоретические расчеты [11] и, что в свою очередь подтверждает выдвинутую гипотезу об электронной плотности плазмы – как основного параметра влияющего на формирование фуллереновой молекулы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проясняются причины того, что синтез фуллеренов при атмосферном давлении на постоянном токе или токе промышленной частоты не эффективен. С моей точки зрения это связано с трудностью возникновения в плазме высокого давления самопроизвольных колебаний электронной плотности. В диапазоне частот 20 – 360 кГц, где эффективно работает разработанный нами плазмо-химический реактор [5, 9] возникают вынужденные ионизационные волны и синтез вновь становится эффективным.

В недавних наших экспериментах по получению эндоэдральных фуллереновых комплексов мы вводили порошки тугоплавких металлов и их карбидов в поток фуллереновой плазмы. Введение порошков резко увеличило стабильный выход фуллеренов, с 4 – 6% до 6 – 12%. Этот факт хорошо объясняется с точки зрения того, что электронная концентрация – основной параметр влияющий на процесс образования фуллеренов. Действительно, введение мелких частиц в плазму приводит к появлению потоков заряженных частиц к ним. В силу того, что электроны более подвижны, они опережают ионы и заряжают частицу в соответствии с величиной ее размера. Число электронов на одной частице может достигать $10^3 - 10^5$ [17]. Этот механизм изменения локальной электронной концентрации, приводящий к существенной оптимизации процесса синтеза фуллеренов, также доказывает существенную роль электронной плотности. Все приведенные выше экспериментальные результаты однозначно свидетельствуют в пользу того факта, что основным

параметром, влияющим на фазовый переход «углеродная плазма – фуллереновое состояние углерода», является электронная плотность.

Представленный анализ проблемы, с точки зрения накопленного экспериментального материала, позволяет наметить ключевые направления работы для ее решения. Что касается экспериментальной деятельности, то это детальное исследование процесса синтеза с введением порошков с частицами различного размера. Изучение процессов синтеза в динамике с одновременной локальной регистрацией концентрации электронов в плазме. Что же касается теории, то необходимо произвести квантово-механические расчеты энергии формирования молекулы фуллерена в плазме с различной электронной плотностью. В качестве первого приближения мы собираемся оценить энергии связей, когда молекула формируется из нейтральных атомов, из ионов и анионов.

В проведении экспериментов по изучению стратификации разряда переменного тока в потоке аргона принимали участие: П.В. Новиков, В.А. Лопатин, Н.Г. Внукова. За помощь в реализации идеи фазовой автоподстройки частоты я благодарен Л.Е. Быковой, а за консультации по возможному воплощению идеи ФАПЧ – А.А. Симонову и В.И. Трофимову.

Работа выполнена при поддержке государственной научно-технической программы «Актуальные направления в физике конденсированных сред» (грант 5-3-00), фонда CRDF (грант RE1-2231) и ФЦП «Интеграция» (грант А0019). За любые мнения, результаты и заключения или рекомендации, выраженные в этом материале автором, фонды не несут ответственности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Фуллерены и структура углерода // УФН. 1995. – Т.165, №9. – С.977-1009.
2. Лозовик Ю.Е., Попов А.М. Образование и рост углеродных наноструктур // УФН. – 1997. – Т.167, № 7. – С. 751-774.
3. Kratschmer W., Lamb L.D., Fostiropoulos K., Huffman D.R. Solid C₆₀: a new form of carbon. // Nature (London). – 1990. – V.347. – P. 354.
4. Бочвар Д.А., Гальперн Е.Г. О гипотетических системах: карбододекаэдре, s-икосаэдре и карбо-s-икосаэдре // ДАН СССР. Серия химическая. – 1973. – Т. 209. – С. 610.
5. Чурилов Г.Н. Плазменный синтез фуллеренов // Приборы и техника эксперимента. – 2000. – №1. – С. 5-15.
6. Недоспасов А.В. Страты // УФН. – 1968. – Т. 94, Вып. 3. – С. 439-463.
7. Пекарек Л. Ионизация волны (страты) в разрядной плазме // УФН. – 1968. – Т. 94, Вып. 3. – С. 463-501.

8. Афанасьев Д.В., Дюжев Г.А., Каратаев В.И. Влияние заряженных частиц на процесс образования фуллеренов // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, Вып. 5. – С. 35-40.
9. Churilov G.N. Two new discharges for production of fullerenes and nanotubes // International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials «Progress in fullerene research». – Kirchberg, Tyrol, Austria. – 1994. – P. 36.
10. Гаврилова А.Ю., Киселев А.Г., Скороход Е.П. и др. Метаравновесие и эрозийная плазменная струя сильноточного разряда в капилляре // Математическое моделирование. – 1999. – Т. 11, № 6. – С. 31-37.
11. Гаврилова А.Ю., Киселев А.Г., Скороход Е.П., Станишевская М.Е. Столкновительно-излучательное равновесие в плазме благородных газов // Математическое моделирование. – 1996. – Т. 8, № 6. – С.103-108.
12. Churilov G.N., Lopatin V.A., Novikov P.V., Vnukova N.G. The arc discharge of kilohertz range with hollow water-cool copper electrode // “12th Symposium on high current electronics”. – Tomsk, – 2000. – P. 223-225.
13. Churilov G.N., Lopatin V.A., Novikov P.V., Vnukova N.G. The arc discharge of kilohertz frequency range (DKFR) in sinphase cross magnetic field // III International Conference “Plasma physics and plasma technology”. – Minsk, Belarus, – 2000, – P.106-109.
14. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. – М.: Иностранной литературы, – 1961. – 370 с.
15. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, – 1987. – 590 с.
16. Спектральный анализ чистых веществ. – Л.: Химия, – 1971, – 416 с.
17. Фортон В.Е., Нефедов А.П., Торчинский В.М., Молотков В.И., Храпак А.Г., Петоров О.Ф., Вольхин К.Ф. Кристаллизация пылевой плазмы в положительном столбе тлеющего разряда // Письма в ЖЭТФ. – 1996. – Т. 64, Вып. 2. – С. 86-91.
18. Суковатый А.Г., Чурилов Г.Н., Мальцева С.С. Установка с генератором высокой частоты для эмиссионного спектрального анализа и плавки драгоценных металлов // ПТЭ, 1998, №5, С. 137-140

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ	4
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДА В ПОТОКЕ АРГОНА МЕТОДАМИ СКОРОСТНОЙ ФОТОРЕГИСТРАЦИИ	6
1. Методики и оборудование	6
2. Экспериментальная часть	10
2.1. Спектральные характеристики разряда	10
2.2. Динамика разряда	12
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	14
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	16