

03;05;12

## Влияние газовых потоков на процесс образования фуллеренов

© Д.В. Афанасьев, Г.А. Дюжев, А.А. Кругликов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

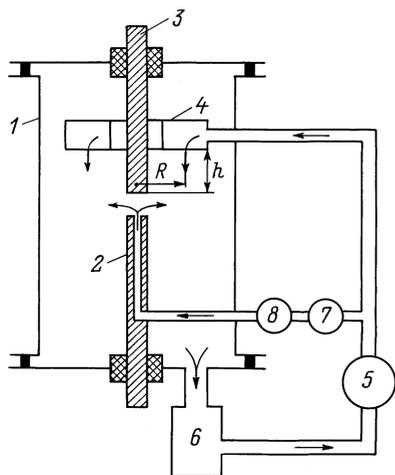
(Поступило в Редакцию 20 ноября 2000 г.)

Исследовано влияние потоков гелия на процесс образования фуллеренов. Показано, что если кольцевой поток гелия, направленный вдоль оси разряда, попадает в зону образования фуллеренов, то содержание фуллеренов в саже уменьшается. Показано, что если скорость дополнительного потока гелия, прокачиваемого через отверстие в катоде, становится сравнимой с собственной скоростью дуговой газоплазменной струи, то фуллерены практически не образуются.

Для понимания механизма образования фуллеренов в дуговой разряде необходимо получение новой экспериментальной информации. В этой связи может оказаться полезным изучение влияния разнообразных газовых потоков на эффективность образования фуллеренов.

**1.** Дуга горела между двумя вертикально расположенными графитовыми электродами диаметром 6 мм в вакуумной камере диаметром 180 мм и длиной 300 мм. После вакуумирования камера заполнялась гелием при определенном давлении, а потоки гелия создавались с помощью замкнутого гелиевого контура на базе стандартной воздуходувки ГР-А5-5.

Схема экспериментов изображена на рис. 1. Гелий из воздуходувки 5 поступал в газораспределитель 4, который представлял собой полую тороидальную камеру. На торцевой крышке камеры, обращенной в сторону дуги, имелась кольцевая щель шириной 1 мм. Были проведены эксперименты, в которых диаметр кольцевой щели  $2R$  был 4, 9.2 и 14 см, а расстояние от крышки газораспределителя до середины межэлектродного зазора  $h$  — 1.5, 2 и 2.5 см. На нижнем фланце вакуумной камеры крепился фильтр 6, в котором в качестве



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — вакуумная камера, 2 — катод, 3 — анод, 4 — газораспределитель, 5 — воздуходувка, 6 — фильтр, 7 — дроссель, 8 — ротаметр.

фильтрующего материала использовались один или два слоя обычной бязевой ткани. После фильтра гелий возвращался в воздуходувку. Во всех этих экспериментах расход гелия был постоянным и приблизительно равным  $5 \cdot 10^4 \text{ cm}^3/\text{s}$ .

В другой серии экспериментов поток гелия направлялся непосредственно в зону разряда вдоль оси. Для этой цели в катоде 2 было сделано отверстие диаметром 2.6 мм, через которое гелий и поступал в дугу. В этой серии экспериментов поток гелия регулировался дросселем 7, а его расход определялся с помощью ротаметра 8.

**2.** Идея экспериментов с кольцевым потоком состояла в следующем. Известно, что трансформация углеродного пара в фуллерен происходит в веерной газоплазменной струе, вытекающей из межэлектродного зазора [1,2]. Было интересно выяснить, как на процесс образования фуллеренов влияет то обстоятельство, что на некотором расстоянии от оси разряда продукты трансформации углерода будут "сдуваться" струей холодного гелия.

Полученные результаты представлены на рис. 2, где приведена зависимость содержания фуллеренов в саже  $\alpha$ , высадившейся на стенки вакуумной камеры (кривая 1) и на фильтр (кривая 2), от радиуса кольцевой щели  $R$  ( $\alpha_0$  — содержание фуллеренов в саже в отсутствие прокачки гелия). Величина  $\alpha$  определялась стандартным методом поглощения толуолового раствора [3].

Видно, что при  $R = 2$  и 4.6 см величина  $\alpha/\alpha_0$  заметно меньше 1. На первый взгляд эти результаты количественно противоречат экспериментальной работе [4] и расчетам [2], где показано, что область образования фуллеренов расположена  $1 < R < 3.5$  см. Однако если считать, что угол раскрытия струи из кольцевой щели равен  $90^\circ$ , то при  $R = 2, 4.6$  и 7 см "граница" струи будет отстоять от оси разряда на расстоянии соответственно 0.5, 2.7 и 4.5 см. Эти значения уже хорошо коррелируют с результатами работ [2,4].

Таким образом, если в "середине пути" трансформации углерода в фуллерен углеродные кластеры попадают в струю холодного газа, то эффективность образования фуллеренов резко снижается. Отметим, что если промежуточные продукты трансформации пребывают в

$P_{\text{He}}$ , Torr	$I$ , A	$U_0$ , V	$\alpha_0$ , %	$g$ , $10^3 \cdot \text{cm}^3/\text{s}$	$\Delta U$ , V	$\Delta T$ , K	$v$ , $10^4 \cdot \text{cm/s}$	$v_0$ , $10^4 \cdot \text{cm/s}$
100	100	27	7.5	1.4	3	1780	1.1	2.7
100	200	38	6.8	1.9	2	1750	1.5	5.4
600	100	34	11.1	0.9	9	1380	0.55	1.1

струе достаточно долго, то эффективность образования фуллеренов возрастает (на рис. 2 кривая 2 идет выше кривой 1).

Эксперименты показали, что кольцевая газовая струя эффективно "сдувает" углеродную сажу. Количество сажи, высадившейся на стенках камеры, существенно меньше, чем на фильтре.

3. Идея экспериментов с прокачкой гелия через катод состояла в следующем. Скорость дуговой газоплазменной струи задается тепловыми и магнитными процессами и зависит от тока дуги  $I$ , давления гелия  $P$ , радиуса дугового канала  $r_0$  и температуры газа  $T$  [5]

$$v_0 = 1.5 \cdot 10^3 \frac{I[\text{A}]}{r_0[\text{cm}]} \left( \frac{T[\text{eV}]}{P[\text{Torr}]} \right)^{1/2} [\text{cm/s}]. \quad (1)$$

Увеличить эту скорость при заданных внешних параметрах дуги можно за счет дополнительной прокачки газа через дугу.

На рис. 3 приведена зависимость величины  $\alpha/\alpha_0$  от расхода гелия через катод  $g$ . Видно, что в различных режимах дуги при малых расходах величина  $\alpha/\alpha_0$  меняется незначительно. Далее следует довольно резкий спад  $\alpha/\alpha_0$  и при больших расходах фуллерены в саже практически отсутствуют. Давление гелия в камере и ток дуги при разных расходах поддерживались постоянными, а напряжение дуги росло с увеличением расхода.

В таблице приведены некоторые характеристики исследованных режимов: давление гелия  $P_{\text{He}}$ , тока дуги  $I$ , напряжение на дуге в отсутствие расхода  $U_0$ , величина расхода, при котором  $\alpha/\alpha_0 = 0.5$ , увеличение напряжения на дуге, соответствующее данному расходу  $\Delta U$ . Если считать, что вся дополнительная мощность, вкладываемая в дугу, идет на нагрев холодного гелия, поступающего через катод,

$$I \cdot \Delta U = \rho v C_p \cdot \Delta T, \quad (2)$$

то можно вычислить увеличение температуры газа  $\Delta T$  и определить его скорость  $v$ . С последней колонке таблицы приведено значение скорости  $v_0$ , вычисленное по формуле (1).

Из таблицы видно, что величины  $v$  и  $v_0$  хорошо коррелируют по функциональным зависимостям от  $I$  и  $P_{\text{He}}$ , однако расхождение в численных значениях довольно велико. Возможно, что такое расхождение связано с тем, что формула (1) получена для осевой плазменной струи. Как уменьшится скорость струи при трансформации осевых катодной и анодной струй в радиальную всерную

неизвестно. Поэтому большее доверие, на наш взгляд, вызывает величина  $v$ , чем  $v_0$ .

Физическое объяснение наблюдаемой на рис. 3 зависимости величины  $\alpha/\alpha_0$  от  $g$  состоит в следующем. Как только скорость газа, прокачиваемого через катод, становится сравнимой с собственной скоростью газоплазменной струи, время пребывания углеродных кластеров (предшественников фуллерена) в зоне, оптимальной для образования фуллеренов, начинает уменьшаться и процесс образования фуллеренов срывается. Если ширина зоны образования  $\sim 2.5$  см и скорость струи  $\sim 1 \cdot 10^4$  см/с, то время пребывания в оптимальной зоне  $\sim 2.5 \cdot 10^{-4}$  с. Эта величина согласуется с характерным временем трансформации двухкольцевых кластеров в фуллерен, рассчитанным в [6], для числа атомов в исходном кластере  $N > 44$ .

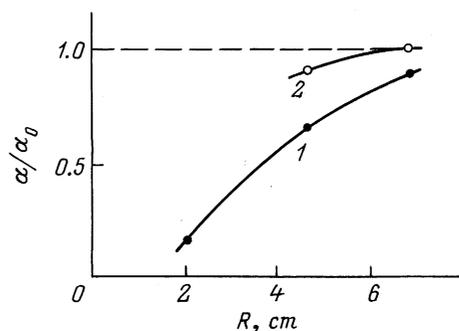


Рис. 2. Зависимость содержания фуллеренов в саже, высадившейся на стенках камеры (1) и на фильтре (2) от радиуса кольцевого газового потока.  $P_{\text{He}} = 100$  Torr,  $I = 70$  A,  $d = 3$  mm.

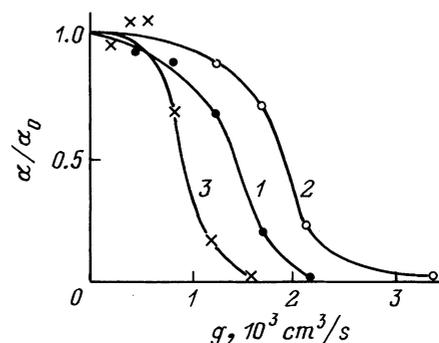


Рис. 3. Зависимость содержания фуллеренов в саже, высадившейся на стенках камеры, от величины расхода гелия через катод.  $P_{\text{He}} = 100$  (1, 2); 600 Torr (3);  $I = 100$  (1, 3); 200 A (2);  $d = 4$  mm.

Работа выполнена в рамках программы "Фуллерены и атомные кластеры" (комплексный проект № 3) при финансовой поддержке РФФИ (грант № 00-02-16928).

## Список литературы

- [1] *Нерушев О.А., Сухинин Г.И.* // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 2. С. 41–49.
- [2] *Алексеев Н.И., Chibante F., Дюжнев Г.А.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 6. С. 122–126.
- [3] *Афанасьев Д.В., Блинов И.О., Богданов А.А.* и др. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 10. С. 76.
- [4] *Дюжнев Г.А., Каратаев В.И.* // ФТТ. 1994. Т. 36. Вып. 9. С. 2795–2798.
- [5] *Ramakrishnan S., Stokes A., Lowke J.* // J. Phys. D. 1978. Vol. 11. P. 2267–2280.
- [6] *Алексеев Н.И., Дюжнев Г.А.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 5. С. 67.