

02;07;12

Получение фуллеренов при испарении графита стационарным CO₂-лазером

© Д.В. Афанасьев, Г.А. Баранов, А.А. Беляев,
Г.А. Дюжев, А.К. Зинченко

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Лазерный центр НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 22 декабря 2000 г.

Впервые при испарении графита с помощью мощного непрерывного лазера получены фуллерены. Проведено сопоставление лазерного и дугового способа получения фуллеренов.

Первые фуллерены были получены именно при лазерном испарении графита [1]. Использовался сфокусированный импульс второй гармоники ($\lambda = 532 \text{ nm}$) лазера Nd:YAG с модулированной добротностью. Энергия в импульсе была $\sim 30 \text{ mJ}$, длительность импульса 5 ns . Углерод испарялся в потоке гелия высокой плотности. При таком способе процессы испарения графита и образования фуллеренов четко разнесены во времени.

Возможность получения фуллеренов при непрерывном испарении графита с помощью лазерного луча совсем не очевидна. Пары углерода и образующиеся фрактальные сажевые частицы, в состав которых входят фуллерены [2], будут поглощать лазерное излучение. Это, с одной стороны, приведет к тому, что только часть мощности лазерного луча дойдет до поверхности, а с другой стороны, поглощенная мощность приведет к разогреву сажевых частиц и возможной деструкции фуллеренов.

Эксперименты проводились с использованием лазера "Славянка" [3] — непрерывный электроразрядный проточный CO₂-лазер (длина волны излучения $10.6 \text{ }\mu\text{m}$, мощность $1 \div 15 \text{ kW}$, диаметр пучка 50 mm , расходимость $2 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$). Луч лазера с помощью зеркального объектива с фокусным расстоянием 435 mm через окно из KCl вводился в вакуумную камеру диаметром 180 mm и длиной 300 mm . Окно крепилось на верхнем фланце камеры, а на нижнем на водоохлаждаемом вводе крепились цилиндры из графита различного диаметра и длины,

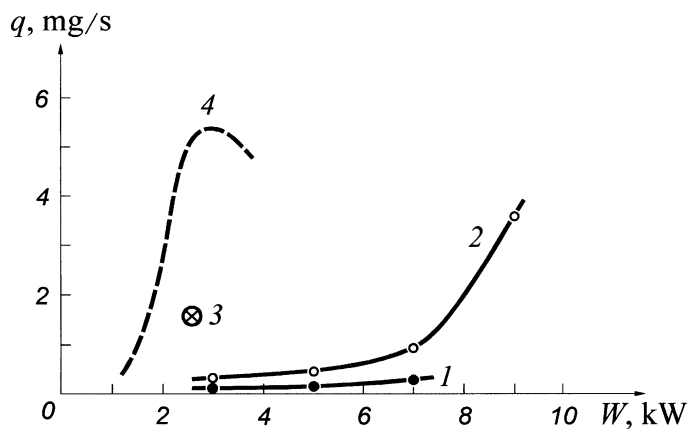


Рис. 1. Зависимость скорости получения фуллереносодержащей сажи q от вкладываемой мощности. $P_{\text{He}} = 100 \text{ Торг}$. 1 — лазерное испарение при большом диаметре графитового образца; 2 — лазерное испарение при малом диаметре графитового образца; 3 — лазерное испарение при скорости перемещения луча 24 см/с ; 4 — дуговой разряд [4].

на которые фокусировалось лазерное излучение. Перед экспериментом камера откачивалась до давления 10^{-1} Торг и заполнялась гелием. Для защиты окна от попадания углеродной сажи был организован небольшой проток гелия. После окончания эксперимента сажа собиралась со стенок вакуумной камеры и взвешивалась. Содержание фуллеренов в саже α определялось с помощью стандартной методики поглощения толуолового раствора [4].

На рис. 1 приведена зависимость скорости получения углеродной сажи q от мощности лазерного излучения. Кривая 1 относится к случаю, когда диаметр графитового цилиндра существенно превышал диаметр луча и лазер в процессе эксперимента выжигал в графите довольно глубокую дырку (до 1 см). Кривая 2 — диаметр цилиндра совпадал с диаметром луча и цилиндр выжигался полностью. Видно, что во втором случае q значительно больше, что связано как с различным теплоотводом для двух этих образцов, так и с трудностями вылета углеродного пара из прожженной лазером дырки. Это подтверждают и эксперименты, в которых лазерный луч с различной скоростью

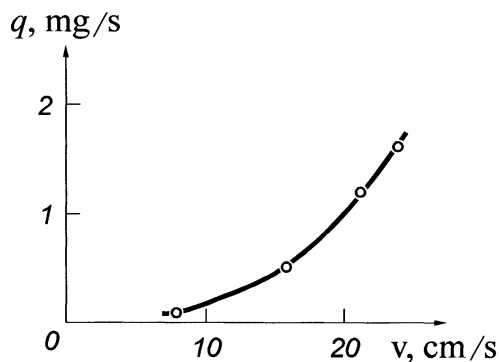


Рис. 2. Зависимость скорости получения сажи от скорости перемещения лазерного луча по поверхности графита. $P_{\text{He}} = 100 \text{ Torr}$, $W = 2.6 \text{ kW}$.

перемещался по поверхности графита. Из рис. 2 видно, что с увеличением скорости перемещения луча величина q растет. Но даже при максимальной скорости, когда испарение графита происходит почти с плоской поверхности (точка 3 на рис. 1), "энергетическая цена" сажи при лазерном испарении выше, чем в дуговом разряде (кривая 4 на рис. 1 — результаты, взятые из работы [4]).

Одной из причин высокой энергетической цены "лазерного" фуллерена в данных экспериментах является экранировка падающего лазерного излучения факелом в зоне испарения графита. Об этом говорят не только сильная зависимость q от скорости перемещения лазерного луча, но и результаты модельного эксперимента: вакуумная камера, в которой горела фуллереновая дуга, просвечивалась лучом аргонового лазера, при этом в зависимости от режима разряда и расстояния от центра дуги коэффициент ослабления лазерного луча менялся от 0.5 вплоть до 1.0. По-видимому, при эффективном удалении углеродной сажи из зоны лазерного пятна на поверхности энергетические цены "лазерных" и "дуговых" фуллеренов будут совпадать.

Процессы образования фуллеренов при дуговом и лазерном испарении графита могут существенно различаться. В дуге температура углеродного пара высока, а образование фуллеренов происходит в

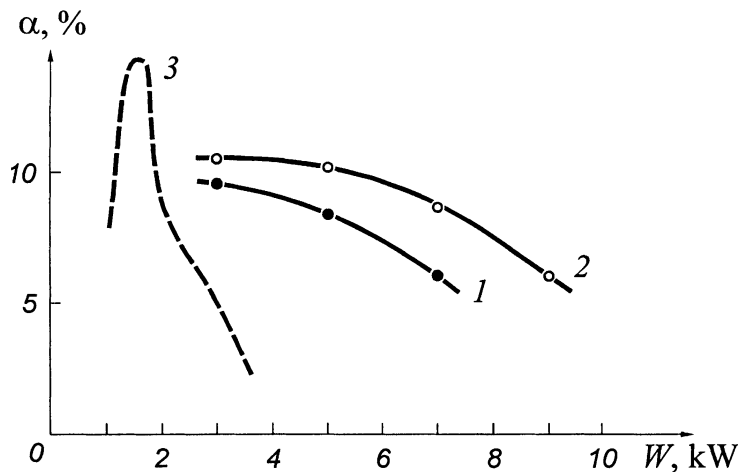


Рис. 3. Зависимость содержания фуллеренов в саже α от вкладываемой мощности. $P_{\text{He}} = 100 \text{ Torr}$. 1 — лазерное испарение при большом диаметре графитового образца; 2 — лазерное испарение при малом диаметре графитового образца; 3 — дуговой разряд [4].

верной газоплазменной струе, вытекающей из межэлектродного зазора. При лазерном испарении температура пара ниже, скорость разлета пара, по-видимому, существенно меньше и, кроме того, из-за поглощения лазерного луча образующимися углеродными частицами может происходить их разогрев. Тем не менее содержание фуллеренов в саже α при лазерном испарении почти такое же, как и в дуговом в оптимальных режимах (рис. 3). Более того, с увеличением вкладываемой мощности, когда в дуге величина α значительно падает, при лазерном испарении уменьшение α не столь существенно.

На различную кинетику образования фуллеренов при дуговом и лазерном испарении указывают и результаты, приведенные на рис. 4. если для дуги зависимость α от давления гелия P_{He} носит сложный немонотонный характер, то при лазерном испарении эта зависимость более плавная. Максимум α сдвинут в сторону больших давлений, а при низком давлении (20 Torr), когда в дуге фуллерены вообще не образуются, α отлично от нуля.

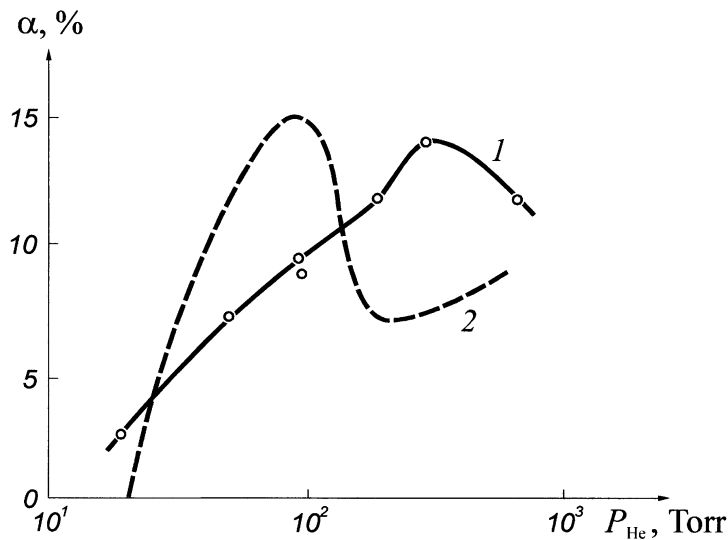


Рис. 4. Зависимость содержания фуллеренов в саже α от давления гелия. $W \sim 3 \text{ kW}$. 1 — лазерное испарение при малом диаметре графитового образца; 2 — дуговой разряд [4].

Проведенные эксперименты вселяют надежду, что при соответствующей оптимизации лазерная технология может стать эффективным методом получения фуллеренов. В настоящее время можно предположить два пути оптимизации: "сдувание" сажи из зоны лазерного пятна и реализации "гибридной схемы" (лазер + газовый разряд) для создания в зоне образования фуллеренов заряженных частиц. Как было показано в работе [5], создание заряженных частиц при термическом испарении графита значительно интенсифицирует процесс образования фуллеренов. Кроме того, лазерная технология обладает значительным преимуществом по сравнению с дуговой — в ней могут быть использованы неэлектропроводящие углеродные материалы.

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

Список литературы

- [1] *Kroto H.W., Heath J.R., Brien S.C. et al. // Nature. 1985. V. 318. P. 162.*
- [2] *Горелик О.П., Дюжнев Г.А., Новиков Д.В. и др. // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 11. С. 118–125.*
- [3] *Астахов А.В., Баранов Г.А., Буданов А.Б. и др. // Тез. докл. III Всесоюзной конференции "Применение лазеров в народном хозяйстве". Шатура, 1989. С. 54–55.*
- [4] *Афанасьев Д.В., Блинов И.О., Богданов А.А. и др. // ЖТФ. 1994. Т. 64. В. 10. С. 76–85.*
- [5] *Афанасьев Д.В., Дюжнев Г.А., Каратаев В.И. // Письма ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 5. С. 35–38.*