

## Влияние светозрозионной плазмы, находящейся в резонаторе перестраиваемого лазера, на характеристики его излучения

А.Н.Колеров

*Исследована возможность использования внутрирезонаторной лазерной спектроскопии для изучения процесса образования фуллереновых молекулярных кластеров на углеродной и металлуглеродной основе, синтезируемых в светозрозионной гетерогенной плазме. Индикатором образования фуллереновой массы в плазме служил эффект конденсации спектра излучения перестраиваемого лазера.*

**Ключевые слова:** внутрирезонаторная лазерная спектроскопия, конденсация спектра излучения, фуллереновые молекулярные кластеры.

В [1–5] при изучении спектров поглощения паров щелочных металлов и возбужденных нейтральных газов методом внутрирезонаторной лазерной спектроскопии регистрировалось возникновение эффекта так называемой конденсации спектра (КС), выразившейся в возникновении аномального спектрального усиления излучения перестраиваемого лазера в области локализации линий поглощения изучаемых объектов. В [6–9] приведены результаты изучения особенностей эффекта КС, обусловленного наличием в гетерогенной плазме возбужденных и ионизованных атомов редкоземельных металлов.

В [10] это явление впервые наблюдалось при наличии в факеле электрической дуги фуллерена  $C_{60}$ . В этой же работе была зарегистрирована идентичность характера возникновения линий конденсации при добавках в плазму примесей  $C_{60}$  и церия (или других редкоземельных металлов). Это позволило предположить, что образующиеся в плазме электродугового разряда фуллереновые или металлфуллереновые кластеры способствуют возникновению КС. Такая взаимосвязь допускает возможность использования эффекта КС в качестве экспресс-метода для качественного наблюдения за процессом образования фуллеренов, т. е. характерные особенности возникновения КС могут в той или иной мере отражать эффективность образования фуллереновой массы (фуллеренов и металлфуллереновых нанотрубочек) в гетерогенной плазме.

К основным способам получения фуллеренов относятся их синтез в гетерогенной плазме сильноточного электрического разряда или в светозрозионном факеле, возникающем при облучении мишеней лазерным излучением. Параметры светозрозионной плазмы (концентрация электронов, ионов, их температура и др.) меняются в широких пределах, что позволяет за время существования плазменного факела в динамике проследить основные этапы и особенности возникновения эффекта КС.

ГП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Россия, 141570 Менделеево, Московская обл.

Поступила в редакцию 17 декабря 2001 г., после доработки – 10 апреля 2002 г.

Последнее являлось основной целью проведенных исследований.

В настоящей работе приведены результаты изучения возникновения, развития и воспроизведения КС в перестраиваемом лазере, в резонаторе которого находится светозрозионный факел. Гетерогенная плазма возникала при облучении мишеней из чистого углерода или углерода с добавками церия излучением неодимового лазера, работающего в частотно-периодическом, квазинепрерывном и свободном режимах генерации.

Факел светозрозионной плазмы от мишени распространялся перпендикулярно оптической оси резонатора перестраиваемого ГСГГ:Cr<sup>3+</sup>-лазера, представляющего собой спектроанализатор с чувствительностью по коэффициенту поглощения  $\chi \leq 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ . Бесселективный резонатор спектроанализатора длиной до 50 см был образован двумя широкополосными зеркалами со скошенными задними гранями и спектральными коэффициентами отражения  $\sim 99\%$  в полосе лазерной генерации. Кристалл ГСГГ:Cr<sup>3+</sup> ( $\varnothing 6 \times 65 \text{ мм}$ ) возбуждался в плотном посеребренном осветителе светом ксеноновой лампы с энергией электрической накачки  $W \leq 500 \text{ Дж}$  и генерировал «гладкий» импульс с энергией  $E \leq 50 \text{ мДж}$  и длительностью  $\tau \leq 150 \text{ мкс}$ .

Характеристики излучения использованного неодимового лазера были следующими:  $E \leq 30 \text{ Дж}$ ,  $\tau \leq 1 \text{ мс}$  для квазинепрерывного и свободного режимов и  $E \leq 14 \text{ Дж}$ ,  $\tau \leq 0.8 \text{ мс}$  (энергия и длительность определялись усреднением по 10 измерениям) для частотно-периодического режима, осуществляемого за счет размещения в резонаторе неодимового лазера модуляторов из кристаллического LiF:F<sub>2</sub><sup>-</sup>. В последнем случае длительность отдельного импульса менялась от 60 до 100 нс, а скважность между ними (за счет использования модуляторов с разной оптической плотностью) – от 10 до 50 мкс. Мощность излучения на мишени увеличивалась в 50–240 раз за счет фокусировки лазерного потока. Схема экспериментальной установки приведена на рис.1, а импульсы генерации неодимового лазера для разных режимов – на рис.2.

Для получения полной картины характера развития КС в экспериментах использовался метод «временных срезов» [8], позволяющий регистрировать динамику из-

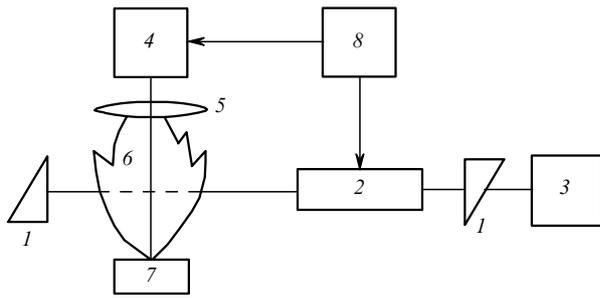


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – зеркала резонатора; 2 – излучатель ГСГГ:Cr<sup>3+</sup>-лазера; 3 – полихроматор; 4 – неодимовый лазер; 5 – линза; 6 – светозероизионный факел; 7 – мишень; 8 – генератор парных импульсов.

менения спектра генерации ГСГГ:Cr<sup>3+</sup>-лазера при его взаимодействии со светозероизионным факелом в фиксированные моменты времени. Регистрировались временные и энергетические характеристики импульса, а также спектр излучения перестраиваемого лазера.

Возникновение КС всегда сопровождалось значительным изменением формы и длительности импульса лазерной генерации перестраиваемого лазера. Это уже наблюдалось в [6–9] и выражалось в виде генерации ГСГГ:Cr<sup>3+</sup>-лазером регулярных пичков (или отдельного пичка) малой длительности (единицы-десятки наносекунд). При этом энергия генерации уменьшалась незначительно – не более чем на порядок. Следовательно, пиковая мощность генерации перестраиваемого лазера при возникновении КС увеличивалась на несколько порядков.

Спектр генерации перестраиваемого лазера изменялся при наличии (или образовании) в гетерогенной плазме

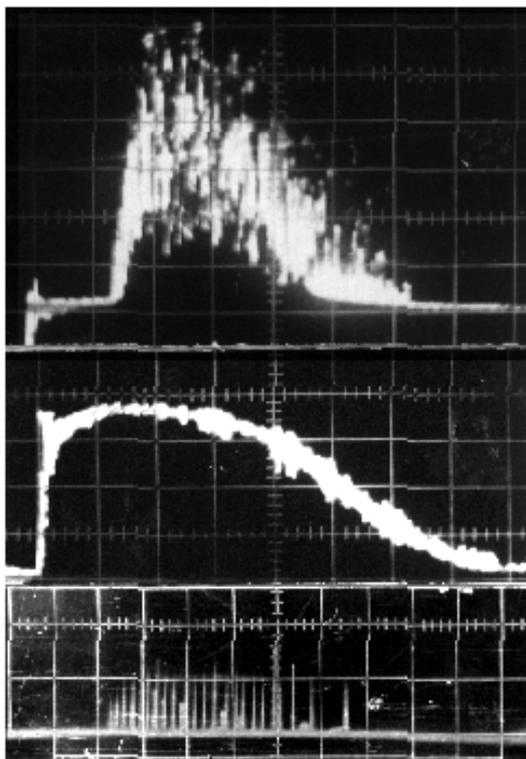


Рис.2. Импульс генерации неодимового лазера, работающего в свободном (200 мкс/дел) (а), квазинепрерывном (100 мкс/дел) (б) и частотно-периодическом (50 мкс/дел) (в) режимах.

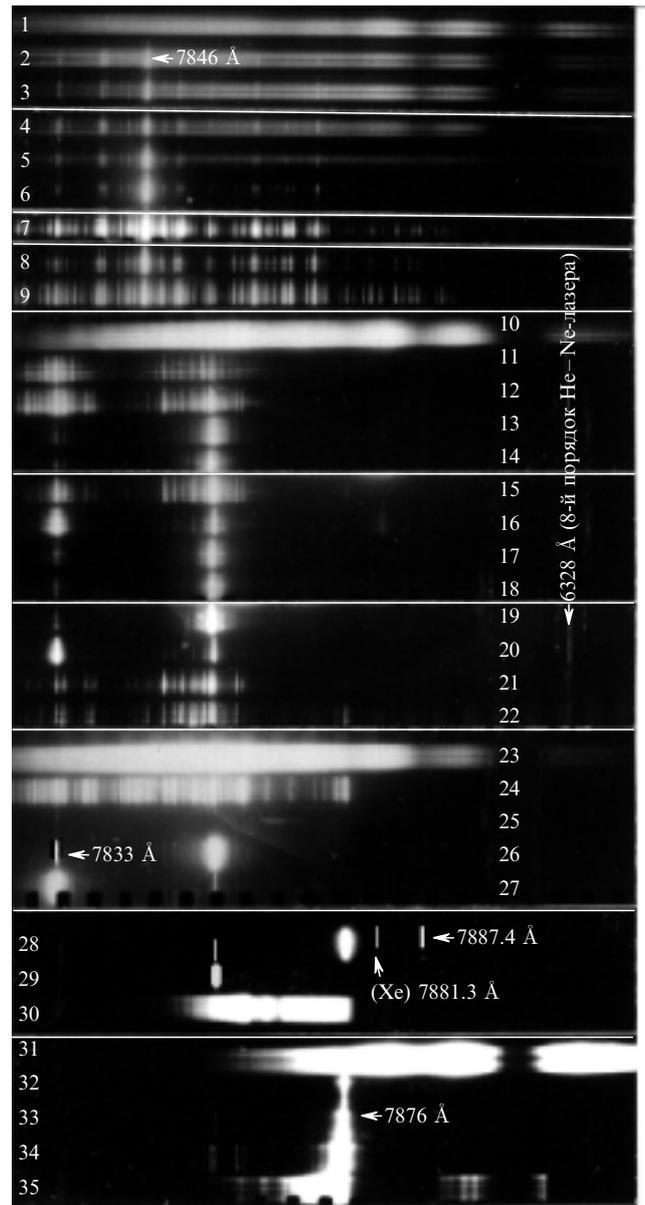


Рис.3. Спектры генерации ГСГГ:Cr<sup>3+</sup>-лазера при наличии в его резонаторе светозероизионного факела, возникающего после облучения мишени из углерода (строки 2–9) или углерода с церием (11–22, 24–30, 32–35) импульсами неодимового лазера, работающего в частотно-периодическом режиме со скважностью между импульсами 10 (27), 20 (26), 35 (29) и 50 мкс (28), в квазинепрерывном режиме (32–35) и в режиме свободной генерации (2–9, 11–22). Регистрация «временных срезов» изменения спектров генерации ГСГГ:Cr<sup>3+</sup>-лазера осуществлялась через 25 (2–9, 32–35) и 10 мкс (11–22) (строки 1, 10, 23, 31 – спектр генерации ГСГГ:Cr<sup>3+</sup>-лазера в отсутствие плазмы в резонаторе).

фуллереновой массы (фуллерены и металлфуллерены). В этом случае широкополосный (сотни ангстрем) спектр лазерного излучения трансформировался в высокоинтенсивные группы линий («канты» – линии, сопровождаемые сателлитами, рис.3) или в одиночные линии с полушириной  $\delta\lambda \sim 10^{-1} - 10^{-3}$  нм. При достижении режима полной конденсации [7–9] спектр генерации формировался только в районе отдельных линий, спектральная мощность излучения в которых увеличивалась на несколько порядков. Таким образом, гетерогенная плазма при синтезе в ней фуллереновых молекулярных кластеров приобретала дисперсионные и фототропные свойства.

тва. Наиболее ярко это проявлялось при наличии в плазме редкоземельных металлов.

На рис.3 оказаны характерные изменения спектра излучения ГСГГ:Cr<sup>3+</sup>-лазера при его взаимодействии со светозрозионным факелом от разных мишеней для трех режимов работы неодимового лазера. Установлено, что влияние динамики изменения импульса и мощности излучения неодимового лазера, поступающей в светозрозионный факел, на характер возникновения линий конденсации (рис.3, строки 24–30) зависит от скважности коротких импульсов излучения неодимового лазера (рис. 2,в). Увеличение временного интервала между импульсами, сопровождаемое ростом мощности излучения неодимового лазера в отдельном пиксе генерации, вызывало смещение линий конденсации в длинноволновую область спектра (рис.3, строки 26–29).

При облучении мишеней излучением неодимового лазера, работающего в квазинепрерывном режиме, характеристики плазменного факела (концентрация электронов, ионов, их температура и др.) оставались неизменными и в спектре генерации перестраиваемого лазера регистрировалась только одна линия конденсации (рис.3, строки 32–35). При этом интенсивность и ширина спектра линии конденсации менялись во времени («временные срезы» изменения спектра генерации перестраиваемого лазера фиксировались через ~ 25 мкс). Это позволило определить временные границы плазменного слоя (~ 70–100 мкс), вызывающего возникновение эффекта КС и оказывающего значительное влияние на характер образования линий конденсации (предполагается, что в этой зоне плазменного факела происходит наиболее эффективное образование фуллереновой массы). Здесь же с помощью интерферометра были определены концентрации электронов, меняющиеся в интервале  $3 \times 10^{12} - 2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Выявлена зависимость возникновения и характера линий конденсации от химического состава использованных мишеней – углерода (рис.3, строки 2–9) и углерода с примесями церия (строки 11–22). Эффект КС регистрировался при взаимодействии излучения ГСГГ:Cr<sup>3+</sup>-лазера со светозрозионным факелом от углеродной мишени с примесями церия при любых режимах работы неодимового лазера, а для чисто углеродной мишени – только для случая свободной генерации. При этом линии конденсации, вызванные факелом от углеродной мишени и мишени с примесями церия, регистрировались в разных спектральных областях. Факел от углеродной мишени с примесями церия всегда приводил к возникновению мощных линий конденсации (церий стимулирует увеличение фуллереновой массы в гетерогенной плазме за счет синтеза металлфуллереновых нанотрубочек [11–14]), в

то время как при использовании чисто углеродной мишени регистрировались слабые линии в сопровождении линий-сателлитов (рис.3, строки 2–9). Видимо, в последнем случае в факеле присутствуют только фуллерены, синтезируемые из испаряемого чистого углерода [11–13].

Таким образом, в настоящей работе определены основные факторы, характеризующие влияние гетерогенной светозрозионной плазмы на возникновение и особенности КС. Методом «временных срезов» [8] исследована динамика этого явления и выявлены основные условия его воспроизведения, зарегистрированы линии конденсации, спектральная интенсивность излучения в которых увеличивается на несколько порядков. Показано, что примеси редкоземельных металлов в светозрозионном факеле вызывают возникновение высокоинтенсивных линий конденсации, а изменение приведенной мощности излучения неодимового лазера на мишени – их сдвиг в длинноволновую область спектра. Присутствие в светозрозионном факеле примесей редкоземельных металлов (как и самих фуллеренов) приводит к синтезу металлфуллереновых нанотрубочек и, как следствие этого, к появлению линий конденсации. Последнее позволяет допустить, что эффект КС может быть использован для изучения процесса синтеза молекулярных кластеров, образующихся в гетерогенной плазме.

В дальнейших исследованиях будет предпринята попытка получить дополнительные сведения о возможности использования эффекта КС для изучения технологии синтеза фуллеренов или металлфуллеренов на стадии их образования в плазменных объектах. Это позволит расширить представления о механизме образования кластерных систем в гетерогенной плазме.

1. Данилейко М.В., Негрийко А.М., Удовницкая Е.Г., Яценко К.Р. *Квантовая электроника*, **12**, 810 (1985).
2. Баев В.М., Гамалий В.Ф., Свириденков Э.А. и др. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, № 8, 6 (1986).
3. Васильев В.В., Егоров В.С., Чехонин И.А. *Оптика и спектроскопия*, **58**, 944 (1985).
4. Баев В.М., Беликова Т.П., Варнавский О.П. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **12**, 416 (1985).
5. Зейлокович И.С., Комар В.Н. *Квантовая электроника*, **15**, 1534 (1985).
6. Жариков Е.В., Колеров А.Н. и др. *ДАН СССР*, **285**, 92 (1985).
7. Колеров А.Н. *Письма в ЖТФ*, **12**, 477 (1986).
8. Колеров А.Н. *Квантовая электроника*, **13**, 1645 (1986).
9. Колеров А.Н. *Квантовая электроника*, **15**, 512 (1988).
10. Колеров А.Н. *Квантовая электроника*, **30**, 268 (2000).
11. Лозовик Ю.Е., Попов А.М. *УФН*, **167**, 751 (1997).
12. Елецкий А.В. *УФН*, **164**, 1007 (1994).
13. Елецкий А.В. *УФН*, **167**, 945 (1997).
14. Бражкин В.В., Ляпин А.Г. *УФН*, **166**, 893 (1996).