

ЛАЗЕРНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ

ПЛАЗМЫ, ГАЗОВ И КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД. ЧАСТЬ 1

В обзоре рассмотрены методы термометрии, использующие внешнее лазерное зондирование исследуемого объекта. Лазерная термометрия (ЛТ) любых объектов – твердых тел, жидкостей, газов и плазмы – основана на температурной зависимости оптических параметров, которые определяют методами поглощения, отражения, рефракции и рассеяния света, фотолюминесценции, нелинейной оптики и спектроскопии. Обсуждаются принципы и особенности методов ЛТ, а также области их применения.

Лазерная термометрия включает активные (с внешним зондированием) бесконтактные методы измерения температуры. Исследуемый объект играет роль термочувствительного элемента, показания которого стимулируются и/или считываются зондирующим оптическим (обычно лазерным) пучком. В каждом из методов измеряется один из температурно-зависимых оптических параметров исследуемого объекта, затем по известной температурной зависимости измеренного параметра определяется искомая температура.

Создание ЛТ обусловлено ограниченной применимостью традиционных методов, контактных и бесконтактных. Контактные методы неприменимы при высоких или быстро меняющихся температурах, сильных электромагнитных помехах, в химически активных средах, при невозможности обеспечить надежный тепловой контакт с объектом. Бесконтактные методы (по тепловому излучению объекта) неэффективны при интенсивном постороннем излучении, малой оптической толщине объекта, неизвестной излучательной способности.

Лазерный пучок имеет ряд характерных признаков (длина волны, поляризация, направление распространения, модуляция интенсивности), позволяющих достоверно различать его на фоне оптических помех. В лазерных методах

отсутствует проблема ненадежности теплового контакта чувствительного элемента с исследуемым образцом: наличие контакта зондирующего светового пучка с объектом в буквальном смысле очевидно.

К настоящему времени разработаны десятки лазерных методов для термометрии различных сред и объектов в широком диапазоне температур, достигнуты высокие характеристики (чувствительность, точность, пространственное и временное разрешение, производительность измерений). Некоторые методы ЛТ за 30–40 лет прошли путь от единичного до массового применения.

ЛАЗЕРНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ ПЛАЗМЫ И ГАЗА

В 60-е годы, практически одновременно с созданием лазеров, возникла лазерная термометрия плазмы, газов и пламен. Сейчас это развитая область измерительной техники [1], в которой накоплены тысячи статей и сотни обзоров. Разнообразие методов и многочисленность работ по термометрии обусловлены трудностями при измерениях и интерпретации результатов.

Причины, по которым первые методы ЛТ появились в исследованиях горячей плазмы, очевидны: при температурах, превышающих десятки или сотни тысяч градусов, кон-

тактные методы неприменимы; тепловое излучение горячей плазмы лежит в дальнем УФ- и рентгеновском диапазонах и поглощается любыми окнами; оптический спектр излучения прозрачной плазмы существенно отличается от планковского; в спектре излучения плазмы пониженного и низкого давления доминирует неравновесная составляющая (атомарные линии и молекулярные полосы).

МЕТОДЫ

Томсоновское рассеяние света

Широко применяется метод измерения температуры электронов плазмы по доплеровскому уширению линии упруго рассеянного лазерного излучения (рассеяние происходит на флуктуациях электронной плотности) [2]. Первые эксперименты относятся к середине 60-х годов. Вначале метод использовался только для термометрии горячей плазмы (с температурой электронов порядка 1 кэВ), для которой уширение линии велико (достигает десятков нанометров). В частности, в токамаке Т-3 Курчатовского института в 1969 году измерения электронной температуры методом томсоновского рассеяния были проведены физиками лаборатории Culham (Великобритания) [3], при этом показано,

что при токах разряда 40–130 кА электронная температура лежит в диапазоне 0,5–2 кэВ. Это означало, что первые токамаки нагревали плазму существенно эффективнее, чем первые стеллараторы. В эксперименте применялся рубиновый лазер с длительностью импульса 25 нс и энергией 5 Дж.

В последующие годы метод стал обязательной частью диагностического комплекса любой установки для удержания высокотемпературной плазмы. Диапазон измеряемых температур – от десятков электронвольт в пристеночной области до 10–20 кэВ на оси плазменного шнура. В токамаке или стеллараторе пространственное разрешение метода вдоль светового пучка составляет 5–20 мм, диаметр пучка равен примерно 1 мм, регистрируются сигналы из 50–200 точек вдоль траектории пучка, распространяющегося по диаметру плазменного шнура. На стеллараторе TJ-II (Испания) пространственное разрешение составляет 2,5 мм. На рис.1–3 показаны схема эксперимента, спектры рассеянного света и радиальные профили электронной температуры плазмы.

Для спектральных измерений применяются дифракционные решетки или полихроматоры на основе интерференционных фильтров. Количество точек в спектре рассеянно-

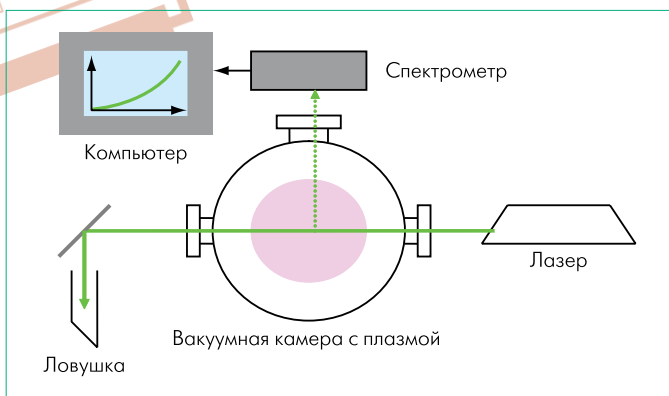


Рис. 1 Схема установки томсоновского рассеяния для измерения температуры электронов в плазме

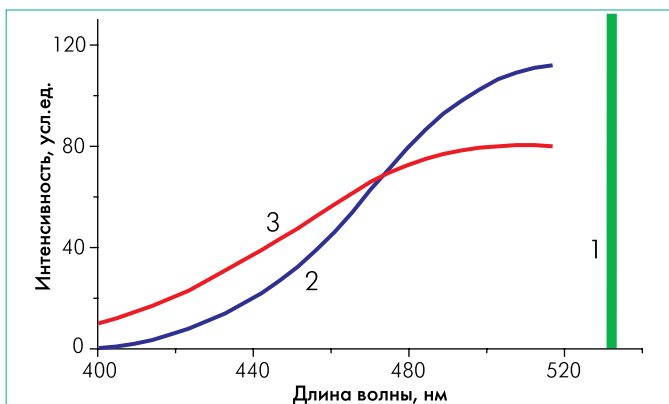


Рис. 2 Спектры томсоновского рассеяния (показана коротковолновая часть) при температуре электронов 1 кэВ (2) и 2 кэВ (3). Линия YAG:Nd лазера (1)

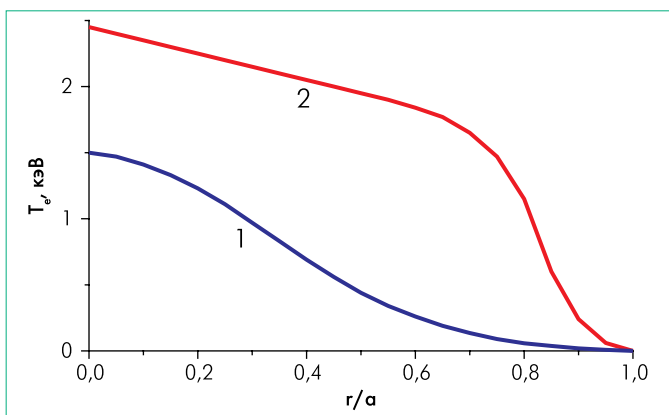


Рис. 3 Профили электронной температуры по радиусу плазменного шнура в тороидальной магнитной ловушке. Режимы удержания плазмы: L-мода — без транспортного барьера (1) и H-мода — с транспортным барьером (2)

го излучения — от 5 (если применяются фильтры и фотодиоды или ФЭУ) до нескольких сот (если применяются решетки и ПЗС-линейки). Например, ПЗС-линейка ILX511 (Sony) имеет 2048 пикселей размером 14×200 мкм, в линейке TCD1304AP (Toshiba) — 3648 пикселей 8×200 мкм. Рассеянное излучение собирают под углом к лазерному пучку (если позволяет геометрия установки, то выбирают угол 90°). Вероятность томсоновского рассеяния кванта очень мала, и для получения заметной интенсивности сигнала необходимо использовать

достаточно мощный лазер (и даже в этом случае приходится работать в режиме счета фотонов).

Используются чаще всего импульсные (наносекундного диапазона) лазеры на алюмо-иттриевом гранате с неодимом (YAG:Nd), зондирование проводится на второй гармонике (длина волны $\lambda = 532$ нм), иногда применяются импульсные лазеры на рубине $\lambda = 694$ нм). Таким образом, за 10–20 нс проводится измерение электронной температуры примерно в ста точках пространства. В настоящее время измерение температуры электронов проводится не один раз в течение разряда, а 10–20 раз, при этом удается изучить динамику температуры [4]. Погрешность измерений электронной температуры в большом токамаке JET (Joint European Torus, Великобритания) не превышает 10% в диапазоне температур 0,3–20 кэВ ($3,5 \cdot 10^6 - 2,5 \cdot 10^8$ К) [5].

Если в ранних экспериментах с горячей плазмой применялись мощные лазеры с энергией в импульсе, достигающей 10 Дж, то теперь для этой цели можно использовать маломощные лазеры (энергия в импульсе 0,1 Дж) и режим накопления сигнала при работе в импульсно-периодическом режиме (с частотой следования импульсов 0,01–1 кГц). Для измерения температуры в разрядах атмосферного давления применяют непрерывные газовые лазеры на Ar^+ ($\lambda = 514,5$ нм), при этом ширина линии рассеянного света на полувысоте составляет примерно 2 нм при температуре электронов ≈ 15500 К [6].

Сейчас метод усовершенствован настолько, что измерять можно и температуру холодной плазмы с температурой электронов 1–5 эВ и малым (порядка нанометра) уширением линии, при этом погрешность составляет примерно 15% [7]. Недавно нижняя граница измеряемых температур сместилась до 0,1 эВ, достигнуто пространственное разрешение 0,6 мм, ошибка измерений не превышает 6% [8]. Стали возможными рутинные измерения температурных профилей в технологических установках плазмохимического осаждения пленок и травления структур при давлениях 1–1000 Па. В некоторых случаях возможно также измерение температуры ионов.

Лазерная интерферометрия пламен и плазмы

Метод применяется с 60-х годов. Основан на связи температуры и плотности (и, тем самым, показателя преломления) газа. Экспериментально регистрируется смещение интерференционных полос в области возмущения плотности газа относительно несмещенных полос (в невозмущенной области), после этого вычисляется пространственное распределение показателя преломления, а затем температуры [9,10]. При автоматизированной обработке интерферограмм удается регистрировать сдвиг на 1/1000 полосы.

Разновидностью интерферометрии является голографический метод восстановления профилей плотности и температуры газа, где интерферируют световые волны, рас-

пространяющиеся по одному и тому же пути, но в разные моменты времени. В микротехнологии с помощью голографической интерферометрии исследуют газовые потоки в реакторе при газофазной эпитаксии кремния для оптимизации условий при выращивании пленок [11]. В настоящее время проводится восстановление трехмерных распределений температуры плазмы или пламени по нескольким двумерным картинам (томография).

Лазерно-индуцированная флуоресценция (ЛИФ)

Метод ЛИФ разработан в 70-е годы, состоит в лазерном возбуждении электронных уровней молекул и регистрации спектра спонтанного излучения при переходах вниз с этих уровней, при этом по бальмовскому распределению интенсивности во вращательной структуре полос излучения определяется температура молекул. Эта температура носит название "вращательной", и при не слишком низких давлениях она близка к температуре, характеризующей поступательные степени свободы молекул. Много работ выполнено по определению температуры пламен путем лазерного возбуждения флуоресценции молекул и радикалов O_2 , N_2 , C_2 , NO , NH , OH , SiO , CN , CF , SiF . Область применимости метода ЛИФ – от 200 до 3000 К, погрешность определения температуры газа вблизи 2000 К не превышает 5% [12]. Температуры пламени, измеренные по спектрам ЛИФ разных молекул (OH , CH и NO), также различаются не более чем на 5% [13]. Для возбуждения флуоресценции используют обычно импульсные эксимерные лазеры ArF ($\lambda = 193$ нм) или KrF ($\lambda = 248$ нм), третью и четвертую гармоники лазера $YAG:Nd$ ($\lambda = 355$ и 266 нм), азотный лазер ($\lambda = 337$ нм), а также перестраиваемые лазеры на красителях. Для получения флуоресценции атомов и молекул с высокими потенциалами возбуждения применяется нелинейно-оптический процесс двухфотонного поглощения света.

При лазерном возбуждении электронных уровней атомов также наблюдается флуоресценция, при этом можно определить температуру атомарного газа и атомарных радикалов (Ag , Kr , Al , Cu , Fe , F , Cl и др.) по доплеровскому уширению линии излучения. Частицей, излучение которой возбуждается с помощью лазерного диода, может быть даже ион, например, ион $Ag II$, при этом удается измерить ионную температуру плазмы в интервале 0,2–0,3 эВ [14]. Для этого иона удается измерить уширение спектральной линии 668,6 нм в диапазоне от 0,9 до 5,5 ГГц, что соответствует температуре ионов от 0,025 до 1 эВ (от 300 до 11000 К). Иногда для измерения температуры в пламя специально вводят атомы, флуоресценцию которых легко возбудить маломощными лазерными диодами (например, атомы In – в пламя бунзеновской горелки при горении смеси метана с воздухом) [15].

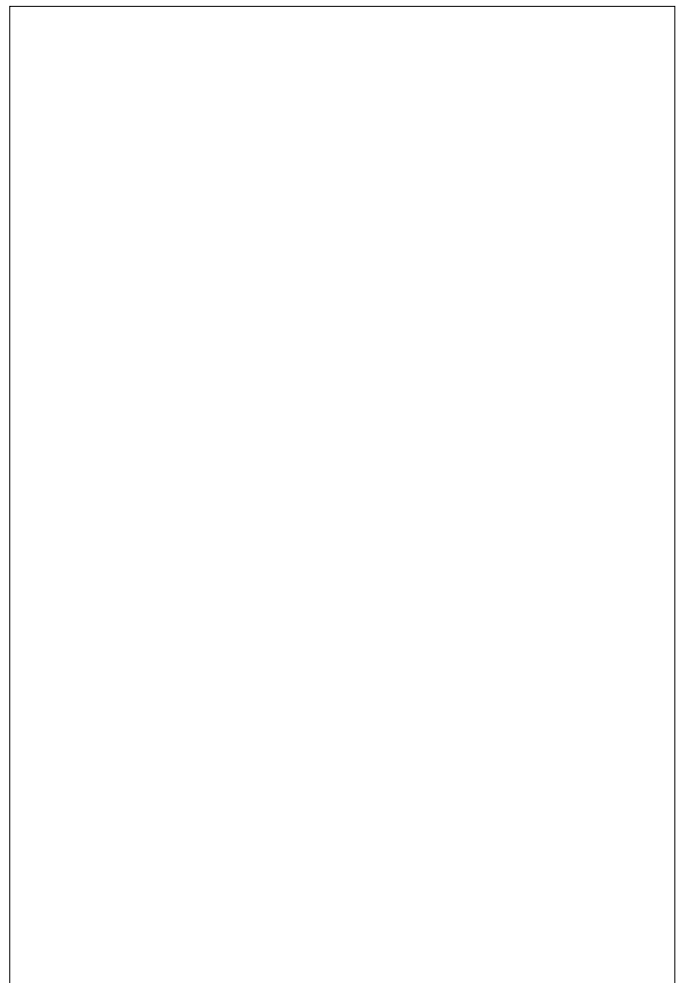
Проводится построение двумерных распределений температуры, для этого используется возбуждающий лазер-

ный пучок в виде тонкого (доли миллиметра) и широкого (несколько сантиметров) слоя, а флуоресцентное изображение регистрируют с помощью спектрометров с матрицами фотоприемников.

Метод ЛИФ достаточно широко применяется для термометрии как ламинарных, так и турбулентных пламен, а также низкотемпературной газоразрядной плазмы, применяемой в микротехнологии и плазмохимии. В отличие от методов оптической эмиссионной спектроскопии, методом ЛИФ можно измерять и температуру несветящихся газов.

Метод когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС)

Первые измерения температуры газа с помощью КАРС проведены в середине 70-х годов. КАРС относится к методам нелинейной оптической спектроскопии газов, в основе лежит явление вынужденного комбинационного рассеяния света. Среда облучается двумя интенсивными лазерными пучками (один из лазеров – перестраиваемый по частоте), при этом образуется рассеянное излучение на антистоксовой частоте. Подробное описание КАРС-спектрометра приведено в [16]. По сравнению со спонтанным комбинационным рассеянием сигнал в КАРС интенсивнее примерно на 10 порядков.



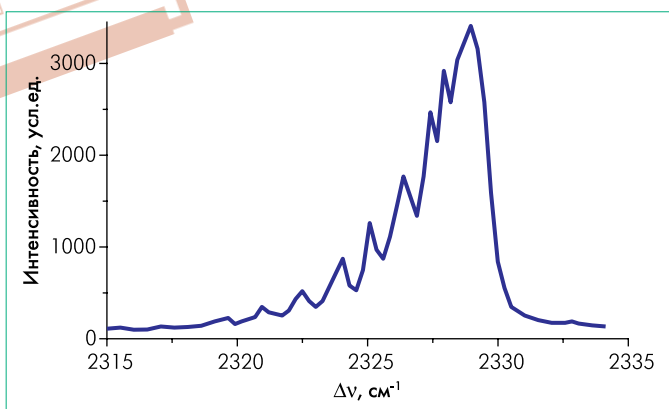


Рис. 4 Спектр КАРС молекул N_2 в газовом пламени. По распределению интенсивности в полосе определена температура газа $T_g \approx 610$ К

Метод позволяет в одном импульсе длительностью 1–10 нс исследовать вид распределения молекул по колебательно-вращательным уровням и определить температуру газа как параметр больцмановского распределения. Значительное количество работ по термометрии выполнено с применением пикосекундных и фемтосекундных лазеров [17].

Объем области, в которой формируется сигнал о температуре, определяется диаметром и протяженностью фокальной области и составляет приблизительно $0,1 \times 0,1 \times 5$ мм³. При острой фокусировке пучков достигается пространственное разрешение $20 \times 20 \times 500$ мкм [16].

Большое количество измерений температуры выполнено методом КАРС в ламинарных и турбулентных пламенах, в тлеющих и контрагированных разрядах, в сверхзвуковых газовых струях и плазменных факелах, в дуговых разрядах. При горении газовых смесей, включающих воздух, и в разрядах в воздухе для термометрии обычно используется молекула азота, при этом можно определить как вращательную, так и колебательную температуру. Если азот является одним из продуктов сгорания твердого топлива, температуру горения также определяют по азоту [18]. При горении углеводо-

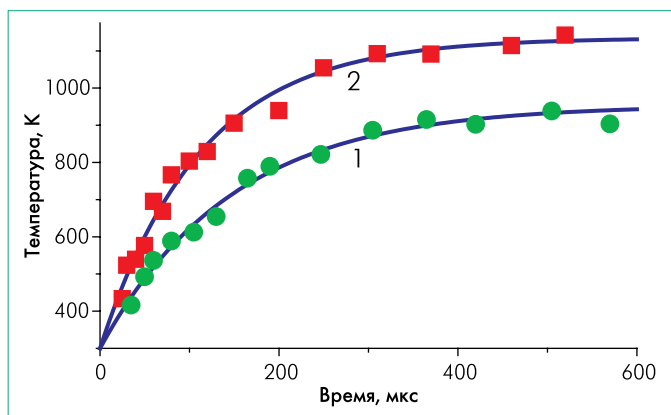


Рис. 5 Температура газа в микроволновом разряде при давлении 1,8 Торр, измеренная по доплеровскому уширению линии H_{α} ($\lambda = 656,3$ нм). Мощность, вкладываемая в разряд (Вт): 370 (1) и 500 (2)

родов для КАРС-термометрии используется молекула H_2 . Диапазон измеряемых температур газа 300–2300 К, погрешность примерно 5% [12]. На рис.4 показан спектр КАРС молекулярного азота в пламени. Широкому распространению КАРС препятствует сложность оптической схемы.

Доплеровское уширение спектральных линий поглощения

Метод основан на регистрации профилей и измерении ширины спектральных линий поглощения света тяжелыми частицами плазмы (атомами, ионами) [19]. Ширина линии пропорциональна корню квадратному из температуры газа: $\Delta\lambda \sim \lambda (T/M)^{1/2}$. Наибольшее уширение при фиксированной температуре наблюдается для линий элементов с малой атомной массой M . Типичная неопределенность температуры, измеренной по доплеровскому уширению линий поглощения, составляет $\pm 5\%$.

С помощью перестраиваемого лазерного диода с длиной волны $\lambda = 2,5$ мкм измерена температура пламени при горении этилена C_2H_4 в воздухе, свет поглощался молекулами воды [20]. Поглощение молекулами воды излучения перестраиваемого лазерного диода в ближней ИК-области спектра используется также для измерения температуры газа в цилиндре двигателя внутреннего сгорания [21]. С помощью перестраиваемого лазерного диода 2010 М (EOSI-Newport) видимого диапазона ($\lambda \approx 656$ нм) изучена динамика температуры газа в плазме импульсного СВЧ-разряда на частоте 2,45 ГГц в кварцевой трубке диаметром 16 мм [22]. Длительность СВЧ-импульса 2,7 мс. Измеряли ширину линии поглощения атомарного водорода (H_{α} , $\lambda = 656,3$ нм). При давлении в реакторе 1 Торр и вкладываемой в разряд мощности 400 Вт изменение температуры газа аппроксимируется выражением $T(t) = 350 + 820 [1 - \exp(-t/\tau)]$, где постоянная времени нагрева $\tau \approx 80$ мкс. При повышении давления до 3–6 Торр и вкладываемой мощности до 1100–1600 Вт температура газа растет до 1700 К за время 200 мкс. На рис.5 показана эволюция температуры газа во времени. Оптическая схема метода достаточно проста, он перспективен для температурной диагностики в плазменных и плазмохимических технологиях.

Другие методы

Для измерения температуры газов и пламен применяются также методы спонтанного рассеяния (релеевского и комбинационного) [23, 24], внутрирезонаторной спектроскопии [25]. С помощью релеевского рассеяния измеряют температуру атмосферного воздуха на длинных трассах и больших высотах (до 30 км) [26].

ЛИТЕРАТУРА

1. Muraoka K., Maeda M. Laser aided diagnostics of plasmas and gases. – Bristol: IOP, 2000.

2. **Пятницкий Л.Н.** Лазерная диагностика плазмы. – М.: Атомиздат, 1976.
3. **Peacock N.J., Robinson D.C., Forrest M.J., et al.** – Nature, 1969, v.224, №.5218.
4. **Толстяков С.Ю., Гусев В.К., Кочергин М.М. и др.** – ЖТФ, 2006, т.76, №7.
5. **Pasqualotto R., Nielsen P., Gowers C. et al.** – Rev. Sci. Instrum, 2004, v.75, №.10.
6. **Helbig V.** – Pure&Appl. Chem., 1988, v.60, .5.
7. **Maurmann S., Kadetov V.A., Khalil A.A.I. et al.** – J.Phys.D: Appl. Phys., 2004, v.37.
8. **Van der Meiden H.J., Al R.S., Barth C.J. et al.** – Rev. Sci. Instrum., 2008. v.79, No.1. 013505.
9. **Абруков В.С., Ильин С.В.** Интерферометрия процессов горения, газодинамики и теплообмена. – Чебоксары: Изд-во ЧГУ, 1996.
10. **Shakher S., Nirala A.K.** – Opt. Lasers Eng., 1999, v.31.
11. **Райнова Ю.П., Турилин С.М., Антоненко К.И., Сорокин И.Н.** – Неорганические материалы, 1995, т.31, №2.
12. **Childs P.R.N., Greenwood J.R., Long C.A.** – Rev. Sci. Instrum., 2000, v.71, No.8.
13. **Tamura M., Luque J., Harrington J.E. et al.** – Appl. Phys. B, 1998, v.66.
14. **Severn G.D., Edrich D.A., McWilliams R.** – Rev. Sci. Instrum., 1998, v.69, No.1.
15. **Burns I.S., Hult J., Kaminski C.F.** – J. Phys.: Conf. Ser., 2005, v.15.
16. **Волков С.Ю., Козлов Д.Н., Прохоров А.М. и др.** – Тр. ИОФАН, т.2, 1986.
17. **Beaud P., Frey H.-M., Lang T., Motzkus M.** – Chem. Phys. Lett., 2001, v.344.
18. **Бояршинов Б.Ф., Федоров С.Ю.** – Прикладная механика и техническая физика, 2002, т.43, №6.
19. **Большаков А.А., Круден Б.А.** – ЖТФ, 2008, т.78, №11.
20. **Farooq A., Jeffries J.B., Hanson R.K.** – Meas. Sci. Technol., 2008, v.19. 075604.
21. **Zhou X., Liu X., Jeffries J.B., Hanson R.K.** – Meas. Sci. Technol., 2005, v.16.
22. **Rousseau A., Teboul E., Sadeghi N.** – Plasma Sources Sci. Technol., 2004, v.13.
23. **Linow S., Dreizler A., Janicka J., Hassel E.P.** – Meas. Sci. Technol., 2002, v.13.
24. **Овсянников А.А.**, Диагностика низкотемпературной плазмы. – Новосибирск: Наука, 1994.
25. **Ю.В.Быков, М.С.Гитлин, М.А.Новиков и др.** – ЖТФ, 1984, т.54, №7.
26. **Бондаренко С.Л., Бурлаков В.Д., Зуев В.В. и др.** – Опт. атмосферы и океана, 1994, т.7, №11.