

04

Индуктивно-связанная плазма низкого давления как новый источник молекулярных пучков

© В.Л. Рябов, В.Ф. Ежов, М.А. Карташева

С.-Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН,
Гатчина

Всероссийский научный центр „Государственный оптический институт
им. С.В. Вавилова“, С.-Петербург

E-mail: vryabov@rnpfi.spb.ru

Поступило в Редакцию 19 мая 2006 г.

Предложен новый метод получения молекулярных пучков при использовании индуктивно-связанной плазмы низкого давления. В качестве тестового пучка получен пучок радикалов YbF с выведенной интенсивностью $1 \cdot 10^{18}$ mol/sr · s. Диагностика пучка проведена на эмиссионном спектрометре и на монопольном масс-анализаторе.

PACS: 39.10.+j

1. Введение. В последнее время для получения низкоэнергетичных пучков труднолетучих молекул и радикалов используют различные методы замедления пучков. Так, для получения медленного пучка тяжелых молекул YbF используется замедлитель, в котором замедление молекул происходит при взаимодействии электрического дипольного момента молекулы с градиентом электрического поля [1]. Существуют и другие методы замедления молекулярных пучков пропусканием исходного пучка либо через охлажденный буферный газ (прототипом может служить столкновительная ячейка) [2], либо через холодный скачок уплотнения [3]. Тем не менее для использования любого из упомянутых методов необходимо исходно иметь интенсивные молекулярные пучки. Стандартный способ получения — это термический нагрев в печи. Существует довольно новый метод — лазерная абляция, который использовался для получения молекулярного пучка YbF [1], в котором с помощью сфокусированного лазерного пучка из металлической иттербиевой мишени выбиваются горячие атомы и подхватываются сверхзвуковым потоком, состоящим из смеси Xe и SF₆.

В пучке происходит образование нужной молекулы и ее термализация с холодным пучком Хе. В качестве мишени можно либо использовать вещество нужного состава, либо пытаться получить нужную молекулу в реакции. В предлагаемой работе исследуется новая возможность получения интенсивного молекулярного пучка с использованием индуктивно связанной плазмы (ИСП) низкого давления.

2. Экспериментальная методика. Как известно, ИСП атмосферного давления служит прекрасным источником атомов и ионов для дальнейшего их исследования. В такой плазме температура достигает 5000–10 000 градусов, при которой говорить о получении молекулярных пучков, конечно, не приходится. В работах [4,5] было предложено использовать ИСП низкого давления как источник ионов для масс-спектрометрии. В плазме низкого давления растет температура электронов и основным каналом ионизации служит ионизация электронным ударом. В результате возможно получение молекулярных ионов. Естественно было предположить, что наряду с ионами должны получаться и нейтральные молекулы. Именно получению молекулярных пучков при использовании ИСП низкого давления посвящена данная работа. Исследования проводились с использованием двух методов диагностики молекулярного пучка:

— в ГОИ им. С.И. Вавилова исследования проводились на эмиссионном спектрометре JY38P с рабочим диапазоном 190–700 nm с фотоэлектрической регистрацией спектров с шагом 0.1 nm при времени накопления 1 s на точку и с записью в компьютере;

— в ПИЯФ РАН пучок исследовался с помощью масс-спектрометра MX7304A.

Для генерации плазмы использовался высокочастотный генератор ICP-200 с частотой 27.12 MHz, стабилизированной кварцем и максимальной выходной мощностью 200 W.

3. Получение эмиссионных спектров. Для возможности применения индуктивно-связанной плазмы низкого давления как источника молекулярного пучка YbF было необходимо выяснить условия образования YbF в плазме. Были рассмотрены три способа получения YbF с использованием регистрации эмиссионных молекулярных спектров в качестве диагностики присутствия интересующих молекул в плазме:

- 1) при разложении в плазме аргона соединения YbF₂;
- 2) при испарении иттербия в плазме, работающей на смеси газов Ne–Ar–F₂;
- 3) при испарении иттербия в смеси Ar–SF₆.

В случаях 1 и 2 в качестве плазменной горелки — реактора применяли кварцевую трубку, а в случае 3 была использована трубка из монокристалла Al_2O_3 , прозрачная для наблюдения эмиссионных спектров.

Способ 1. YbF_2 в виде таблетки, спрессованной из порошка YbF_2 , был расположен в устройстве для ввода пробы в плазму на уровне первого витка. Однако при таком способе получения YbF не удалось получить удовлетворительной воспроизводимости результатов. После проведения дополнительных экспериментов пришли к заключению, что наиболее вероятным объяснением является образование на поверхности пробы кристаллической, более устойчивой, формы фторида иттербия — YbF_3 , для разложения которого требуется значительно больший вклад энергии.

Способ 2. Плазма формировалась в потоке газа-смеси, содержащего неон как основу, 3% аргона и 1000 ppm фтора, наблюдение велось перпендикулярно оси разряда. При этом характерная эмиссионная линия иттербия 555.6 nm практически не видна. Спектральный состав зарегистрированного излучения плазмы (рис. 1, *b*) повторяет полученный при разложении таблетки из YbF_2 (рис. 1, *a*).

Способ 3. С целью избежать нежелательных реакций в плазме свободного фтора с кварцевыми стенками трубки и кварцем устройства для подачи пробы была применена прозрачная трубка из монокристалла Al_2O_3 . Металлический иттербий был укреплен в небольшой сапфировой трубке и помещен в центр индуктора, окружающего трубку-реактор. Плазма формировалась на смеси аргона, как основы, с примесью SF_6 на уровне 1–3%. На рис. 1, *c* представлен спектр при распылении иттербия в плазме, работающей на смеси аргона с SF_6 и спектр иттербия при распылении его в аргоне (рис. 1, *d*).

При сопоставлении всех полученных спектров (рис. 1) для области 550–560 nm видна качественная воспроизводимость спектрального состава молекулярного спектра. С другой стороны, видно, что для получения YbF можно применять реакцию металлического иттербия с фтором в ИСП низкого давления. Подробное обоснование полученных результатов с подтверждением теоретическими расчетами будет рассмотрено в статье, посвященной спектроскопическим исследованиям ИСП низкого давления.

4. Масс-спектрометрическая проверка состава пучка. Главная цель настоящей работы состояла в получении молекулярного пучка, т.е. во введении молекул, образованных в плазме, в вакуумную установку, давление в которой меняется от 1 в горелке до 10^{-6} Torr в

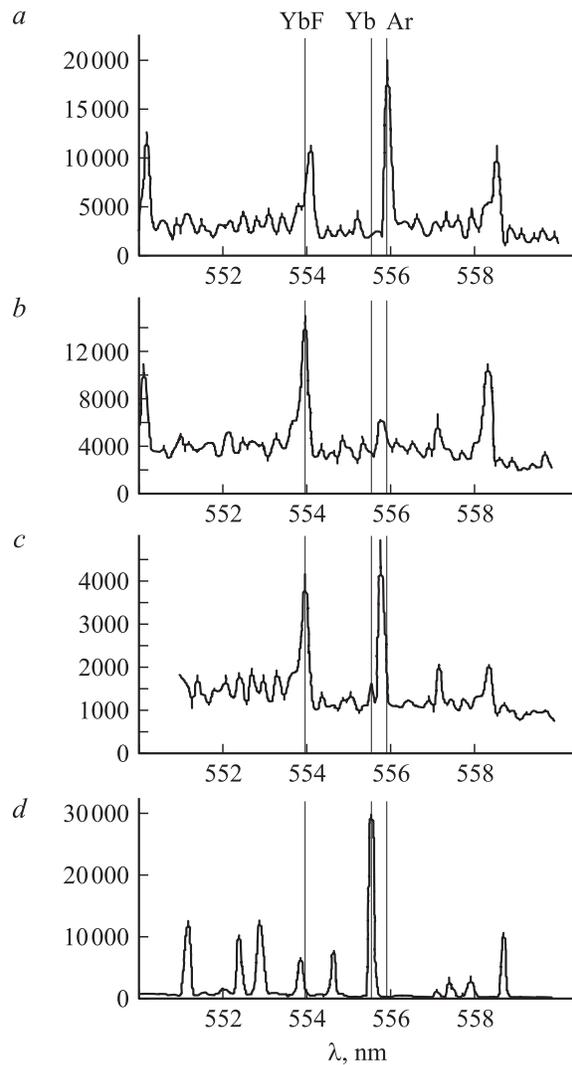


Рис. 1. Эмиссионные спектры, полученные для идентификации YbF. Давление газа в трубке-реакторе поддерживалось на уровне 1 Торг. Спектры получены при следующей подводимой к плазме мощности: *a* — для образца YbF₂ — 100 W, *b* — для иттербия в плазме Ne + Ar + F₂ — 100 W, *c* — для иттербия в плазме Ar + SF₆ — 70 W, *d* — для иттербия в плазме Ar — 70 W.

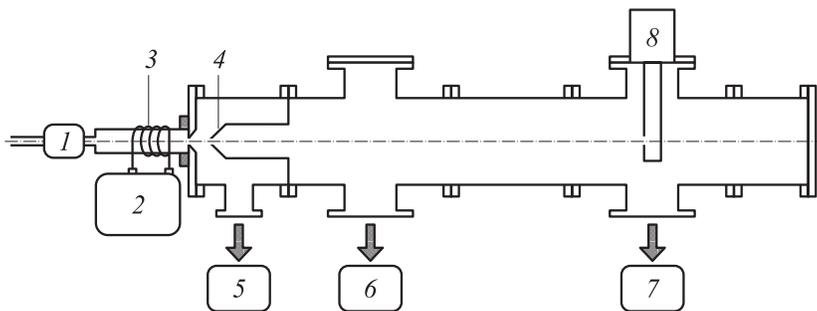


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — натекатель для подачи газа в горелку, 2 — высокочастотный генератор ICP-200, 3 — индуктор, 4 — продольно позиционируемый скиммер, 5 — форвакуумный насос АД-50, 6 — турбомолекулярный насос ТМН-500, 7 — криосорбционный насос, 8 — монопольный масс-спектрометр МХ7304А. Расстояние от входа молекул в вакуумную камеру до ионизатора масс-спектрометра составляет 105 см.

детекторной камере. Поэтому установка состоит из трех камер (рис. 2) для обеспечения дифференциальной откачки. Принципиально масс-спектрометр МХ7304А (МС) состоит из трех частей — источника ионов, анализатора и детектора, формирующего токовый сигнал с вторичного электронного умножителя (ВЭУ-6), который пропорционален интенсивности молекулярного пучка и снимается с входного сопротивления усилителя постоянного тока $R = 100 \text{ M}\Omega$: $I_{\text{MS}} = U_{\text{MS}}/R$, где U_{MS} — регистрируемый МС сигнал.

Для калибровки абсолютной интенсивности молекулярного источника мы использовали эффузионный режим истечения газа в вакуум, для которого интенсивность с хорошей точностью определяется по формуле [6], которая после подстановки в нее постоянных приводится к виду: $I_{\text{EFF}} = 1.125 \cdot 10^{22} \cdot P_0 \cdot S_0 / \sqrt{mT}$ [mol/sr · s], где P_0 — давление газа в источнике, Торг; S_0 — площадь отверстия источника, в cm^2 ; T — абсолютная температура газа, m — молекулярная масса газа в атомных единицах. Для калибровки использовался газ SF_6 , который в ионизаторе МС разваливается на полный набор осколочных ионов. Наибольшие пики в нашем МС дают ионы SF_5^+ и SF_3^+ (соотношение 77:23), выход которых мы только и учитываем при

калибровке, тем самым немного занижая реальную эффективность МС. Работая в эффузионном режиме истечения SF_6 , линейном по давлению P_0 , мы определили поправочный коэффициент k из соотношения: $k \cdot 6.25 \cdot 10^{18} \cdot U_{\text{MS}}/R = I_{\text{EFF}} \cdot \Omega_{\text{MS}}$ [mol/s], где Ω_{MS} — телесный угол входной апертуры МС. Полученный коэффициент $k = 4.8 \cdot 10^3$ использовался для определения интенсивности молекулярного пучка YbF , который получался по способу 3. Оптимизация интенсивности проводилась по исходному давлению, мощности, положению индуктора относительно входной апертуры вакуумной камеры, положению итерббия относительно индуктора, концентрации газа SF_6 в аргоне. При давлении 5% смеси газа SF_6 и аргона 1.3 Торг и при вводимой в плазму мощности 80 W регистрируемый МС сигнал составляет (за вычетом фона): $U_{\text{MS}} = 0.203 \text{ V}$ при регистрации на массе Yb^+ и $U_{\text{MS}} = 0.0624 \text{ V}$ при регистрации на массе YbF^+ . Контрольный эксперимент при горении итерббия в чистом аргоне без SF_6 , когда на уровне фона МС не было зарегистрировано атомарного Yb , и отсутствие пика Yb в эмиссионном спектре на рис. 1, с дают нам основание приписать оба зарегистрированных МС пика как происходящих от молекулярного пучка YbF . В результате интенсивность зарегистрированного МС пучка составляет $8 \cdot 10^{13} \text{ mol/s}$, что составляет для интенсивности выведенного пучка $1 \cdot 10^{18} \text{ mol/sr} \cdot \text{s}$.

Данная работа выполнена в рамках подготовки эксперимента по поиску электрического дипольного момента электрона и поддержана грантом РФФИ № 06-02-17099-а.

Список литературы

- [1] *Tarbutt M.R., Bethlem H.L., Hudson J.J. et al. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92. P. 173002.*
- [2] *Maxwell S.E. et al. // PRL 2005. V. 95. P. 173201.*
- [3] *Макаров Г.Н. // ЖЭТФ. 2003. Т. 123. № 2. С. 276–282.*
- [4] *Waggoner J.W., Belkin M., Sutton K.L. et al. // J. Anal. At. Spectrom. 1998. V. 13. P. 879.*
- [5] *Карташева М.А., Малешин М.Н., Даниленко В.И. и др. // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 1. С. 60–64.*
- [6] *Рамзей Н. Молекулярные пучки. М.: ИИЛ, 1960.*