

02;04

## О возможности образования конденсата возбужденных атомов в условиях газового разряда

© Э.А. Манькин, В.Б. Ошурко, А.Н. Федоров

Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,  
115409 Москва, Россия  
e-mail: manykin@mephi.ru

(Поступило в Редакцию 8 июня 2010 г.)

Экспериментально исследована возможность образования конденсата возбужденных атомов в условиях газового разряда. Обнаружено, что широкая и сдвинутая в красную область спектра полоса появляется в ридберговской серии спектральной области натрия в случае добавления паров натрия в атмосферу аргонового разряда. Наблюдалось образование объектов сферической плазмы.

### Введение

В последнее время задачи создания конденсата из возбужденных атомов или молекул стали вызывать заметный интерес. С практической стороны этот интерес вызван принципиальной возможностью создания новых технических устройств — теплоэнергетических преобразователей с коэффициентом полезного действия, близким к 100%. Такие высокие коэффициенты полезного действия связаны с уникально малой ( $< 0.1 \text{ eV}$ ) работой выхода электрона в конденсированной среде, образованной высоковозбужденными атомами. Другие технически интересные свойства такого конденсата:

- 1) возможность концентрации заметных количеств энергии в веществе, имеющем плотность газа;
- 2) создание вещества с металлическими свойствами при плотности, равной плотности газа.

Экспериментально в работах Холмлида [1] и Ярыгина [2] было обнаружено значительное снижение работы выхода электрона (до  $\sim 0.5 \text{ eV}$ ) при образовании большого количества атомов цезия в ридберговских состояниях в условиях газового разряда с применением специальных электродов с мембраной типа „aquadag“. Подобный конденсат из возбужденных атомов также получают при ультранизких температурах в экспериментах типа конденсации Бозе—Эйнштейна. Однако, как хорошо известно, создание больших количеств высоковозбужденных, например ридберговских, атомов не представляет проблемы и в более простых условиях. В работах, в частности Галлахера и др., экспериментально показаны широкие возможности управления свойствами и даже „формой“ атомов в ридберговских состояниях [3].

Как было показано в теоретических работах Манькина и др., энергия связи в конденсате из ридберговских атомов (в частности, щелочных металлов) может составлять  $\sim 0.1\text{--}0.2 \text{ eV}$  [4]. Это означает, что такая возбужденная „материя“ может не разрушаться (например, вследствие столкновений) даже при температурах газа в сотни градусов ( $< 1000^\circ\text{C}$ ). С другой стороны, как было теоретически показано, время жизни ридберговских состояний (и без того довольно большое, порядка

секунд) может увеличиваться более чем на порядок при образовании конденсата ридберговских атомов [4,5].

Все это говорит о принципиальной возможности получения конденсата высоковозбужденных атомов и в более простых случаях, например, при газовом разряде, в котором условия подобраны так, чтобы получать относительно большие количества ридберговских атомов. Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке такой возможности.

В настоящей работе была использована методика, основанная на создании разряда в легкоионизируемой примеси в атмосфере буферного инертного газа. Как показывает прямой анализ кинетики, в условиях малого количества легкоионизируемой примеси (пара щелочного металла) в достаточно плотном буферном газе с высоким потенциалом ионизации создаются условия для высокоэффективного образования высоковозбужденных атомов. В самом деле, буферный газ при достаточно высоком давлении ограничивает длину свободного пробега электрона, так что кинетической энергии электрона оказывается достаточно для ионизации примеси, но недостаточно для ионизации самого буферного газа. Таким образом, разряд протекает только по атомам примеси: неизбежная рекомбинация ионизированных атомов, как обычно в условиях разряда, приводит к заселению высоковозбужденных состояний. С другой стороны, внешнее электрическое поле ионизирует наиболее высоковозбужденные атомы примеси, тем самым ограничивая сверху максимальное главное квантовое число для возбужденных атомов. Таким образом, два параметра — напряженность электрического поля и давление буферного газа — позволяют в эксперименте управлять процессом накопления атомов в заданных высоковозбужденных состояниях. В экспериментах, очевидно, удобнее всего использовать атомы щелочных металлов из-за относительно низкоэнергетичного расположения серии Ридберга в таких атомах; в качестве буферного — инертный газ.

Объектом исследования данной работы являются КВС (комплексы возбужденных состояний) атомов натрия (потенциал ионизации  $5.15 \text{ eV}$ ), находящихся в атмосфере буферного газа аргона при тлеющем разряде. Целью

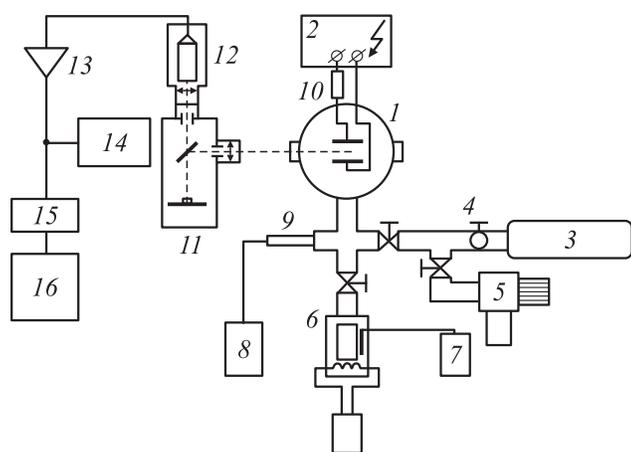
работы явилось исследование возможности накопления возбужденных атомов легкоионизируемой примеси атомов натрия в атмосфере буферного газа аргона и последующего образования конденсата возбужденных атомов.

## Экспериментальная методика

Для реализации описанной выше методики получения высоковозбужденных атомов была создана экспериментальная установка, включающая в себя вакуумную систему (состоящую, в свою очередь, из рабочей камеры с электродами, источника паров натрия и системы форвакуумной откачки) и газовый пост буферного газа (аргона). Рабочий диапазон давлений всей установки 0.1–1000 Па.

Схема установки приведена на рис. 1. Пары натрия с заданным давлением создавались в предварительно откачанной до 0.05 Па камере-испарителе (6) путем нагрева небольшого количества металлического натрия. Пары напускались в заполненную аргоном (с заданным давлением) рабочую камеру (1) через специальный натекатель. Напряжение для создания тлеющего разряда подавалось на электроды рабочей камеры от высоковольтного источника (2).

Для контроля образования высоковозбужденных атомов в этих условиях обычно (традиционно) используемая методика регистрации ридберговских атомов — методика ионизации внешним полем — очевидно, уже непригодна. С целью регистрации количества ридберговских атомов натрия была использована спектроскопическая установка (рис. 1) для анализа эмиссии света в диапазоне 800–180 нм ( $\sim 1\text{--}6\text{ eV}$ ). Установка состояла из согласующего сфероцилиндрического конденсатора,



**Рис. 1.** Принципиальная схема установки. 1 — вакуумная камера с электродами, 2 — источник напряжения разряда, 3 — баллон с аргоном, 4 — редуктор, 5 — форвакуумный насос, 6 — испаритель, 7 — термометр, 8 — вакуумметр, 9 — датчик вакуумметра, 10 — ограничительный резистор, 11 — монохроматор, 12 — фотоэлектронный умножитель, 13 — усилитель, 14 — осциллограф, 15 — аналогово-цифровой преобразователь, 16 — компьютер.

монохроматора (МДР2) и фотоумножителя (ФЭУ1000). По интенсивности серии Ридберга натрия (180–250 нм) можно судить о количестве ридберговских атомов.

В наших экспериментах с высоковозбужденными атомами наибольшую трудность представляло не столько их получение, сколько методика регистрации образования конденсата возбужденных атомов. Так, довольно трудно в эксперименте различить, например, образование обычного конденсата (т.е. невозбужденных атомов) или конденсата возбужденных атомов. Методики, позволяющие зарегистрировать факт образования конденсата возбужденных атомов, по необходимости, оказываются только косвенными.

Для выяснения того, образуется ли какое-либо количество конденсата высоковозбужденных атомов натрия в экспериментах, использовались следующие методики.

1. Спектральные измерения. Хорошо известно, что при образовании устойчивого комплекса возбужденных атомов или молекул, например эксимеров или эксплексов, спектральная полоса комплекса оказывается сильно уширенной (по сравнению с исходными атомами) и сдвинутой в красную сторону. Это — обычное следствие перераспределения электронной плотности в большей области пространства при образовании эксиплекса. Как показывает теоретический анализ, при образовании конденсата возбужденных атомов должна появляться широкая „металлическая“ полоса состояний коллективизированных электронов. Таким образом, факт появления широкой полосы поглощения или флуоресценции косвенно мог бы свидетельствовать об образовании конденсата возбужденных атомов.

Однако при этом возможны и другие известные механизмы уширения полосы — например, столкновительное уширение и др., испускание плазмы разряда может включать в себя широкую полосу планковского спектра испускания и т.п. Таким образом, все эти возможности должны быть учтены.

2. Генерация второй гармоники. Как показали теоретические оценки, конденсат возбужденных состояний может обладать уникально высокой поляризуемостью вплоть до высоких порядков зависимости от поля. Это означает, что в таком конденсате возможна высокоэффективная генерация второй гармоники оптического лазерного излучения. Однако следует учитывать известную возможность генерации второй гармоники в плазме разряда. В экспериментах использовалось излучение неодимового лазера с длиной волны 1064 нм, длительностью импульса 20 нс и энергией в импульсе  $\sim 5\text{ мДж}$ . Излучение фокусировалось в области разряда; регистрация второй гармоники проводилась синхронно на длине волны спектральной установки на рис. 1, равной 532 нм, в коллинеарном режиме. Для подавления исходного излучения с длиной волны 1064 нм использовался светофильтр СЗС-23.

3. Регистрация неоднородностей по спекл-структуре прошедшего света. В случае образования конденсированного вещества с упорядоченной структурой в неупорядоченной плазме, области такого конденсата могут

проявлять себя как оптические неоднородности. Как известно, спекл-структура — это случайная дифракционная картина, вторичными источниками для которой являются неоднородности рассеивающего объема. Следовательно, при изменении состава неоднородностей (появление частиц конденсата) с размерами, сравними или большими длины волны падающего излучения, возможно изменение случайной дифракционной картины. Регистрация спекл-структуры от излучения полупроводникового лазера (длина волны 620 nm) позволяет обнаружить появление новых неоднородностей в описанных условиях по сравнению с условиями обычного разряда.

4. Визуальные наблюдения. Как показывают теоретические оценки, конденсат возбужденных атомов может иметь некоторые свойства, близкие к свойствам жидкостей. Это означает, что частицы конденсата могут иметь определенное поверхностное натяжение, которое должно приводить к образованию частиц сферической формы, имеющих плотность газа. При распаде конденсата (вследствие неизбежной релаксации возбужденных состояний) такие частицы могут испускать излучение из нижеуказанных состояний, т. е. УФ и видимый свет. Таким образом, визуальные наблюдения (видеозапись) также являются одним из косвенных методов регистрации конденсата возбужденных атомов.

## Результаты и обсуждение

### Образование высоковозбужденных атомов натрия

В серии экспериментов был проведен качественный и количественный анализ наиболее благоприятных условий для образования больших концентраций высоковозбужденных атомов в условиях данного эксперимента. Было выявлено, что в чистом аргоне напряжение появления тлеющего разряда (порог) составляет  $\sim 400$  V (3 см между электродами) при давлении от 10 до 400 Pa и резко растет до 1000 V при 500 Pa. Добавление паров натрия с парциальным давлением  $\sim 100$  Pa, как оказалось, не влияет на порог разряда в области 10–400 Pa (аргона), но снижает порог с 1000 до 400 V при давлении аргона более 500 Pa. Видимо, как раз в этих условиях (более 500 Pa аргона, 100 Pa натрия, 400 V) разряд протекает именно по легкоионизируемой примеси. Зависимость порога возникновения разряда от парциальных давлений аргона и натрия приведена на рис. 2.

Спектральные наблюдения показали, что в этих условиях в спектре свечения разряда все-таки присутствуют интенсивные линии аргона. Это означает, что несмотря на относительно большие давления и малую длину свободного пробега электрона имеет место ионизация атомов аргона. По-видимому, это следствие того, что не удается полностью ограничить энергию электронов сверху до величин, не больших энергии ионизации натрия, т. е. имеет место широкое распределение электронов по энергиям. Тем не менее, хотя количество

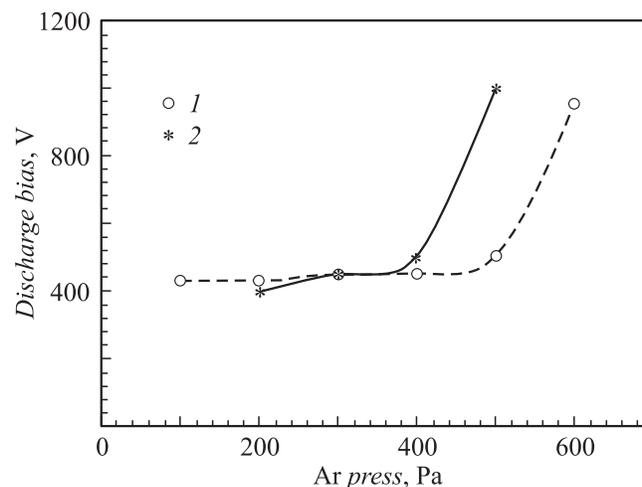


Рис. 2. Напряжение зажигания тлеющего разряда в чистом аргоне (2) и в аргоне с примесью паров натрия (1).

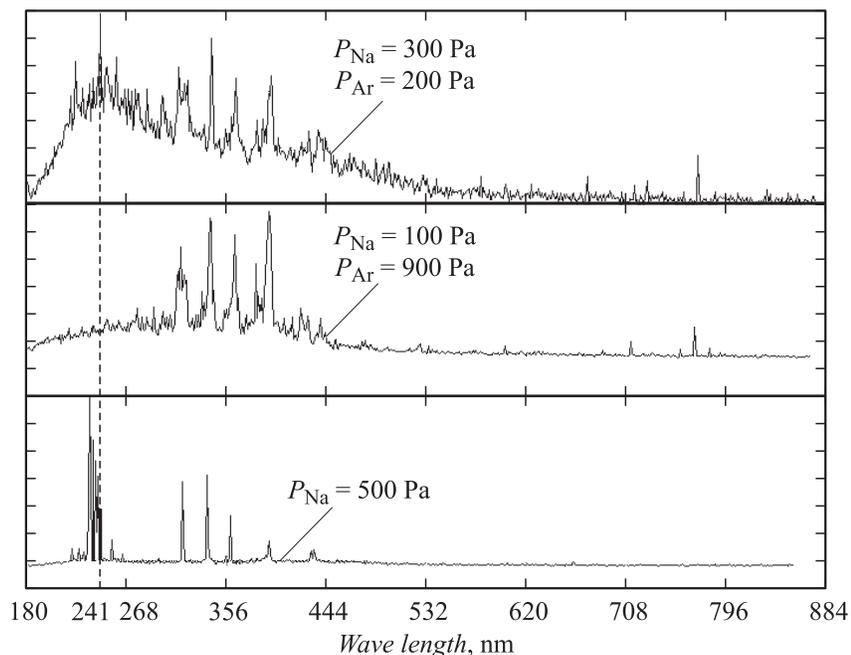
натрия составляло менее 20% от количества аргона, относительная (интегральная) интенсивность свечения в ридберговской части спектра натрия действительно оказывалась больше (в  $\sim 10$  раз), чем испускание аргона и свечение натрия в других областях спектра. По-видимому, действительно происходило довольно эффективное образование атомов натрия в высоковозбужденных (ридберговских) состояниях.

### Спектральные измерения

Для разряда в чистых парах натрия, без добавления аргона, спектр испускания ридберговской серии атомов натрия (чистые пары Na, 100 Pa) в области 238–242 nm хорошо виден на рис. 3. Что очень важно, как показали эксперименты, спектр чистых паров натрия (без аргона) состоял из аналогичной характерной серии узких линий вплоть до давления паров 700 Pa.

Как видно из рис. 3, в условиях разряда в парах Na в атмосфере аргона спектр испускания существенно отличается от обычного спектра паров даже при тех же давлениях. В области ридберговской серии вместо отдельных узких линий с наблюдаемой шириной 5–10 Å появляется широкая бесструктурная полоса испускания от 200 до 280 nm.

Это изменение, как уже говорилось, могло быть вызвано известным столкновительным уширением в присутствии аргона при высоком (500 Pa) давлении. Однако, как видим, при тех же (и даже значительно больших) давлениях в спектре чистых паров натрия — без аргона — наблюдаются только узкие линии, а не полоса. Следовательно, нельзя исключать образование такой полосы вследствие появления комплексов или конденсата возбужденных ридберговских атомов. Как уже говорилось, аналогичный эффект хорошо известен при меньших уровнях возбуждения — в эксимерах и эксиплексах. Другое важное наблюдение состоит в том,



**Рис. 3.** Сравнение спектров в тлеющем разряде при разном парциальном давлении  $P_{\text{Na}}$ ,  $P_{\text{Ar}}$  компонентов смеси — паров натрия и аргона.  $E = 300 \text{ V/cm}$ .

что максимум этой полосы лежит в области  $\sim 270 \text{ nm}$ , где изначально отсутствуют линии как натрия, так и аргона. Такое длинноволновое смещение полосы также характерно для комплексов возбужденных атомов. Можно полагать, что в описанных условиях экспериментов всегда образуются подобные комплексы.

Дополнительно были проведены серии экспериментов:

а) с различными формами электродов (плоские, полусферические),

б) с различным способом подачи натрия в разряд (непрерывная прокачка паров натрия, натриевый металлический катод, натриевый анод).

Эксперименты показали, что наиболее сильные спектральные проявления таких, предположительно, ридберговских комплексов наблюдаются при динамической подаче паров — поддерживалось давление паров натрия  $200 \text{ Pa}$  при давлении аргона  $300 \text{ Pa}$ . В этом случае интегральный сигнал от спектральной полосы на два порядка превышал сигнал всех линий в спектре.

### Генерация второй гармоники

Если предполагать наличие в тлеющем разряде не обязательно больших областей конденсата возбужденных атомов, но даже наноразмерных „кристаллических“ частиц, состоящих из возбужденных атомов, то возможно было бы ожидать высокоэффективную генерацию второй гармоники в такой среде (помимо известной сопутствующей генерации  $2\omega$  в плазме). Как описано выше, в эксперименте излучение импульсного твердотельного лазера на Nd:YAG с длиной волны  $1064 \text{ nm}$  пропускалось через кювету с газоразрядной плазмой;

выходящее излучение регистрировалось фотоприемником, настроенным на длину волны  $532 \text{ nm}$  и синхронизированным с твердотельным лазером. Убедительных подтверждений появления излучения второй гармоники на длине волны  $532 \text{ nm}$  в кювете с газоразрядной плазмой в большом количестве в условиях разряда легкоионизируемой примеси в буферном газе, нежели в обычном тлеющем разряде (плазме), не отмечено.

Спекл-структуры рассеянного света регистрировались при освещении кюветы с газоразрядной плазмой полупроводниковым лазером с длиной волны  $650 \text{ nm}$  для некоторых выбранных фиксированных параметров газового разряда и геометрии установки. Результаты сравнивались для случая обычного тлеющего разряда в парах натрия и описанных условиях образования конденсата возбужденных атомов. Проводилась видеосъемка изменения спекл-структуры с последующей компьютерной обработкой изображения. Визуально, а также после компьютерного анализа спекл-структуры изменений, отвечающих появлению новых микрочастиц, установлено не было.

### Визуальные наблюдения

В описанных экспериментах периодически наблюдалось кратковременное появление сферических светящихся объектов, как правило, желтого (желтый дублет натрия), а также красного цвета. Однако выявить какую-либо закономерность в появлении таких объектов или определить условия их появления в наших экспериментах не удалось. Выяснилось только то, что вероятность появления таких объектов несколько растет

с уменьшением напряжения (поля) и увеличением давления натрия.

Помимо вариации парциальных давлений и напряжения были проведены серии экспериментов с техническими изменениями:

- 1) геометрии разрядной камеры: расстояние между электродами, сечение разрядной кюветы;
- 2) формы электрических разрядников: формы разрядников (шар, игла, плоскость);
- 3) материала разрядников (сталь, медь, натрий на проводящей подложке);
- 4) введение дополнительных электродов-сеток;
- 5) конструкции испарителя металлического натрия и способа его натекания в разрядный объем: проточного типа (над поверхностью нагреваемого натрия продувался поток аргона), диффузионно-поточного типа (нагревательный объем имеет один выход (сопло) в разрядную камеру).

Визуально было отмечено появление сферического светящегося объекта — плазменного образования — необычного вида в непосредственной близости от катода (имевшего форму иглы). Объект имел идеально сферическую форму и ярко-красное свечение. Обычный коронный разряд в наших условиях имел голубую окраску. Нельзя исключать, что в этом случае в данной области происходило образование конденсата возбужденных атомов.

## Заключение

Проведенные эксперименты пока не позволили однозначно подтвердить или опровергнуть возможность образования конденсата из высоковозбужденных атомов при разряде в легкоионизируемой примеси в атмосфере буферного газа. Однако два факта — (1) образование широкой полосы испускания в области ридберговской серии натрия, смещенной в красную сторону от 270 nm (и не появляющейся при тех же давлениях и в чистых парах натрия, ни в аргоне), а также (2) случайное появление сферических плазменных образований, скорее, подтверждают эту возможность.

Работа проведена при поддержке гранта РФФИ № 08-02-01328-а.

## Список литературы

- [1] *Holmlid L., Маныкин Э.А.* // ЖЭТФ. 1997. Т. 111. № 5. С. 1601–1610.
- [2] *Ярыгин В.И., Сидельников В.Н., Красиков И.И., Смирнов В.С., Тулин С.М.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 77. Вып. 6. С. 330–334.
- [3] *Burke P.G., Gallaher D.F., Geltman S.* // J. Phys. B3. 1970. P. 1062.
- [4] *Маныкин Э.А., Ожован М.И., Полуэктов П.П.* // Природа. 2001. № 1.
- [5] *Агафонов А.И., Маныкин Э.А.* // ЖЭТФ. 2006. Т. 129. С. 895; ЖЭТФ. 2006. Т. 129. С. 183.