

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КРЮКОВ РОЖДЕСТВЕНСКОГО ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ИСПАРЕНИЕМ МЕТАЛЛОВ СО СТЕНКИ РАЗРЯДНОЙ ТРУБКИ

В. Г. Мишаков и А. М. Шухтин

Методом крюков Рождественского наблюдалось испарение металлических слоев, предварительно нанесенных на внутреннюю поверхность разрядной трубки, при прохождении через нее импульса тока. Исследовались элементы первой, второй и третьей групп периодической системы. Обсуждается возможное применение наблюдаемого явления как способа получения паров металлов и его особенности в сравнении с другими методами получения паров.

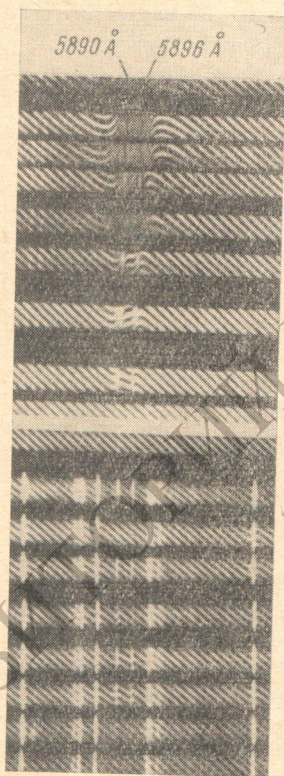


Рис. 1. Интерферограммы, полученные при наблюдении срыва атомов натриевого зеркала в водороде (вверху) и в неоне (внизу).

При прохождении достаточно мощного токового импульса через разрядную трубку происходит интенсивное взаимодействие плазмы газового разряда с поверхностью разрядной трубки. Это взаимодействие влияет как на характеристики самой плазмы, так и на состоянии поверхностей, граничащих с плазмой. Рядом авторов [1, 2] отмечалось интенсивное свечение линий элементов, входящих в состав материала стенки. Особый интерес представляет взаимодействие плазмы с металлическими поверхностями. Для изучения этого явления на стенку разрядной трубки обычно наносится металлический слой и через трубку пропускается импульс тока. Таким образом, например, Прокофьев и Волкова [3] наблюдали свечение атомов Zn, сорванных со стенок разрядной трубки мощным импульсным разрядом. Ранее авторы работы [4] наблюдали методом крюков Д. С. Рождественского поступление нормальных атомов натрия на ось разрядной трубки после прохождения импульса тока через трубку, на стенке которой существовало натриевое зеркало. В данной работе предпринято систематическое исследование явления испарения металлов со стенок разрядной трубки при пропускании через нее мощного импульсного разряда. Исследования проводились с использованием метода крюков Рождественского [5]. Экспериментальная установка была аналогична используемой в работе [6]. Разрядная трубка с нанесенным на внутреннюю поверхность металлическим слоем помещалась в интерферометр Рождественского, через нее пропускался импульс тока. В различные фазы импульса и послесвечения она просвечивалась с помощью импульсного источника излучения сплошного спектра. Интерференционная картина регистрировалась фотографически в фокальной плоскости спектрографа,

скрещенного с интерферометром. Установка позволяла измерять концентрацию нормальных атомов металла, сорванных со стенки разрядной трубки, с временным разрешением порядка трех микросекунд. На рис. 1 вверху приведены интерферограммы, полученные при срыве атомов с натриевого зеркала в атмосфере водорода, а на рис. 2 — график, соответствующий этим интерферограммам. Увеличивая энергию, вводимую в разряд, можно было получать концентрации нормальных атомов натрия, соответствующие давлению паров порядка 0.1 тора. Оказалось, что наблюдаемые после окончания импульса тока концентрации нормальных атомов зависят от рода балластного газа, заполняющего трубку. На рис. 1 изображены сравнительные интерферограммы, иллюстрирующие срыв нат-

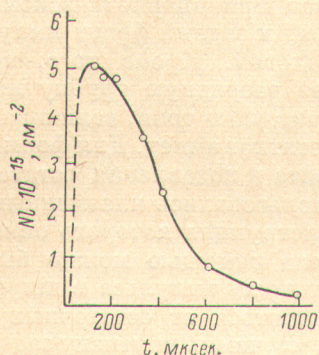


Рис. 2. Зависимость величины  $NI$  от времени после начала импульса.

$P_{H_2}$  — 1 тор,  $E$  — 0.5 кдж,  $l$  — 60 см,  $N$  — концентрация нормальных атомов натрия.

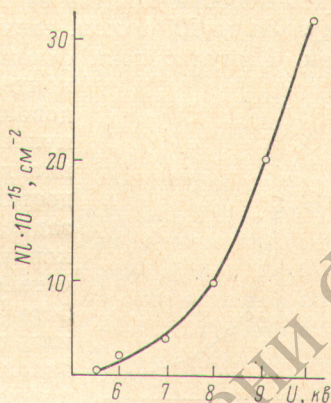


Рис. 3. Зависимость величины  $NI$  от напряжения на разряжаемой емкости.

$P_{H_2}$  — 1 тор,  $l$  — 60 см,  $C$  — 20 мкф,  $N$  — концентрация нормальных атомов натрия.

рия со стенки, полученные в атмосфере водорода (вверху) и в неоне (внизу). В обоих случаях через разрядную трубку разряжался конденсатор емкостью 20 мкф при напряжении 5 кв, давление балластного газа равнялось одному тору. Как видно из рис. 1, полученные концентрации отличаются на несколько порядков.

Максимальные значения концентраций нормальных атомов при различных энергиях  $E$ , вводимых в разрядную трубку

Смесь	$NI \cdot 10^{-15}, \text{см}^{-2}$	$E$ , кдж	Смесь	$NI \cdot 10^{-15}, \text{см}^{-2}$	$E$ , кдж
Li—H <sub>2</sub>	4.0	0.8	Cs—Ne	300	0.5
Na—H <sub>2</sub>	20	0.8	Ba—H <sub>2</sub> *	0.09	1.0
Na—H <sub>2</sub>	5.0	0.5	Al—Ne	2.0	0.06
Na—Ne	0.001	0.5	In—Ne	3.5	0.75
K—H <sub>2</sub>	44	0.5	Cd—Ne	100	0.5
Rb—H <sub>2</sub>	35	0.5			

\* При этом наблюдалась значительная концентрация ( $NI = 1.3 \cdot 10^{17}$ ) нормальных атомов натрия. Натрий получался в результате замещения барием атомов натрия в материале разрядной трубки.

Нами было проведено систематическое исследование срыва металлических покрытий следующих элементов: Li, Na, K, Rb, Cs, Cd, Ba, Ca, Al, In. В качестве балластных газов использовались H<sub>2</sub>, Ne, He, Ar, Xe, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>. Наиболее интересные результаты сведены в таблицу. В ней приведены значения непосредственно измеряемой методом крюков величины  $NI$  для различных пар металл—газ. Длина металлических покрытий обычно равнялась 60–80 см. Давление балластного газа поддержи-

валось равным одному тору. Как и следовало ожидать, количество испаряемого вещества резко растет с увеличением энергии, вводимой в разряд. Так, из рис. 3 видно, что при увеличении энергии в 4 раза максимальная концентрация нормальных атомов натрия, зарегистрированная после импульса, увеличивалась в 30 раз. Предварительный нагрев стенки на срыв атомов существенного влияния не оказывает. Представляло интерес выяснить вопрос о том, через какое время приходят сорванные со стенок атомы на ось разрядной трубки. При работе с натрием было отмечено, что дисперсия на желтом дублете появляется через различные промежутки времени в зависимости от длительности срывающего импульса тока. При длительности импульса тока порядка 20 мксек. дисперсия наблюдалась непосредственно за импульсом, а при увеличении длительности импульса до 100 мксек. дисперсия появлялась на временах порядка 1000 мксек. Импульс тока формировался при аperiodическом разряде конденсатора, и задний фронт импульса был довольно пологий. Кроме того, после импульса через разрядную трубку могли развиваться остаточные токи, величина которых достигала десятков ампер. Для формирования заднего фронта и подавления остаточных токов мы воспользовались плазменным выключателем, конструкция которого описана в работе [7]. С его помощью можно было изменять длительность импульса в широких пределах, избавляться от остаточных токов и, кроме того, улучшать крутизну заднего фронта импульса. При работе с отсечкой остаточных токов дисперсия наблюдалась сразу после обрыва тока в цепи. Это позволяет сделать следующий вывод: испарение вещества с поверхности стенки интенсивно происходит в самом импульсе, однако при попадании в разряд атомы металла ионизируются и не могут быть наблюдаемы по дисперсии

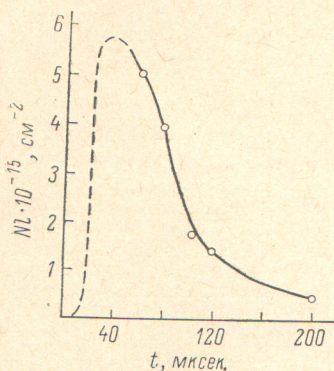


Рис. 4. Зависимость величины  $NI$  от времени после начала импульса.

$P_{H_2}$  — 1 тор,  $E$  — 0,8 кдж,  $l$  — 80 см,  $N$  — концентрация нормальных атомов лития.

у резонансных линий. Правда, дисперсия вблизи резонансных линий ионов некоторых металлов, например Са и Ва, доступна для наблюдения методом крюков. Пользуясь этим обстоятельством, мы провели измерения концентрации однажды ионизованного бария в различные фазы импульса и после него. Полученные концентрации ионов бария оказались на порядок меньше концентрации нормальных атомов. В самом импульсе ионов не наблюдалось. Однако это обстоятельство не опровергает высказанное ранее предположение о практически полной ионизации сорванных со стенки атомов металла. По-видимому, нельзя было ожидать больших концентраций однажды ионизованного бария, так как второй потенциал ионизации бария (10 эв) довольно низок. Наблюдать же ионы металлов с высоким вторым потенциалом ионизации не представляется возможным, поскольку их резонансные линии лежат в далеком ультрафиолете. Таким образом, количество вещества, срываемого со стенки, может значительно превышать регистрируемые методом крюков значения концентрации нормальных атомов. В связи с этим хочется вернуться к уже отмеченному ранее факту. В атмосфере водорода щелочные металлы натрий, калий и рубидий дают после импульса концентрации нормальных атомов на несколько порядков выше, чем в атмосфере инертных газов. Это явление наблюдалось только для указанных трех элементов, в остальных случаях явной зависимой эффективности срыва от рода балластного газа не наблюдалось. Полученный эффект трудно объяснить химическим взаимодействием калия, натрия и рубидия с водородом, поскольку другие щелочные металлы литий и цезий одинаковым образом вели себя как в атмосфере водорода, так и в инертных газах. Поскольку вся введенная в разряд энергия в конечном счете поглощается стенкой разрядной трубки,

то можно было бы ожидать, и это подтверждают опыты с другими металлами, что испарение со стенки не должно существенно зависеть от рода балластного газа. Возможно, что различие в наблюдаемых концентрациях натрия, калия и рубидия при заполнении трубки водородом и инертными газами объясняется объемными процессами, происходящими после импульса.

Получение значительных концентраций нормальных атомов металлов путем срыва их со стенки разрядной трубки при прохождении токового импульса можно рассматривать как способ введения паров металлов в распадающуюся плазму. В некотором смысле такой способ эквивалентен импульсной печи и обладает рядом особенностей в сравнении с обычными печами.

В качестве балластных газов можно использовать, как инертные, так и химически активные газы. Время нахождения паров металла в активной атмосфере может быть сделано достаточно малым, чтобы избежать химического взаимодействия, а с другой стороны, достаточным для использования данной смеси с целью наблюдения ряда явлений, например, для использования ее в качестве рабочего тела импульсных газовых лазеров. Таким образом, например, удавалось получать пары натрия в атмосфере кислорода. Длительность существования облака пара после импульса тока достигает величины порядка миллисекунды, поэтому даже за тысячу вспышек эффективное время взаимодействия паров со стенкой не превышает одной секунды, что позволяет работать с такими активными металлами как литий, магний и др. На рис. 4 приведен график, иллюстрирующий срыв лития со стенки стеклянной трубки.

Пары металла вводятся в уже приготовленную плазму балластного газа. Степень ионизации и температура газа электронов определяется условиями разряда, существовавшими до введения паров в плазму, и могут достигать высоких значений.

Вынос вещества за пределы рабочего объема практически не происходит. Металлические слои обычно хорошо держатся на поверхности трубки, и однажды приготовленная система может работать сколь угодно долго.

Концентрации нормальных атомов трудноиспаримых элементов, например Al, полученные с помощью срыва, соответствуют концентрациям атомов для насыщающих паров, возникающих при температурах порядка  $1400^{\circ}\text{K}$ , при этом энергия, вводимая в разряд, была сравнительно невелика. Это позволяет надеяться на получение таким способом значительных концентраций атомов трудноиспаримых металлов.

#### Литература

- [1] М. П. Ванюков, А. А. Мак, М. Я. Урес. *Опт. и спектр.*, 4, 90, 1958.
- [2] Н. Н. Огурцова, И. В. Подмошенский. *Опт. и спектр.*, 4, 539, 1958.
- [3] В. К. Прокофьев, Г. А. Волкова. *Опт. и спектр.*, 23, 640, 1967.
- [4] А. М. Шухтин, В. С. Егоров. *Изв. АН СССР, сер. физ.*, 22, 74, 1958.
- [5] Д. С. Рождественский. *Аномальная дисперсия*. Изд. АН СССР, М., 1951.
- [6] А. М. Шухтин, В. С. Егоров. *Опт. и спектр.*, 2, 543, 1957.
- [7] Л. С. Николаевский, А. Ф. Симоненко. *Ж. прикл. спектр.*, 3, 467, 1965.

Поступило в Редакцию 13 января 1971 г.