

Импульсный испаритель электродинамической дисперсной взвеси частиц

© Ю.И. Анисимов, К.Е. Метельский, Е.Л. Рябчиков

Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: konstantinmet@gmail.com

(Поступило в Редакцию 22 ноября 2013 г.)

Рассмотрена методика создания электродинамической дисперсной взвеси частиц металлов Al, W, Cu и диэлектриков (полупроводников) SiO₂, Al₂O₃, CuO, Cu₂O и ее испарение с помощью диффузного электрического разряда. Измерены временные зависимости тока и интегральной интенсивности свечения при импульсном электрическом разряде в трубке с пленкой из вещества (Cu) электродинамической дисперсной взвеси.

Одним из способов создания оптических сред для прикладных целей и исследований является воздействие электрического разряда на различные вещества. Например, пары металлов — активную среду многих лазеров — можно получить, испаряя металлы (или вещества, содержащие металлы) электрическим разрядом. Развитие газовых лазеров на парах химических элементов непосредственно связано с поиском путей создания высоких концентраций атомов рабочего вещества в разрядной трубке, так как удельный энергозатрат таких лазеров, как правило, пропорционален этой концентрации вплоть до весьма высоких значений. Использование же вещества в виде взвеси резко увеличивает КПД вложения энергии, что позволяет получить высокие концентрации паров вплоть до 10^{18} cm^{-3} [1]. Именно поэтому интересны лазеры на электродинамических дисперсных (ЭДД) средах, в которых высокая концентрация паров металлов создается испарением ЭДД-взвеси частиц импульсным электрическим разрядом [2].

Также в последнее время большое внимание уделяется исследованиям двухуровневых и трехуровневых квантовых систем при их резонансном взаимодействии с когерентным излучением. Интерес к такого рода исследованиям обусловлен многообразием нелинейных оптических процессов, которые являются следствием нелинейных интерференционных эффектов. Благодаря определенным преимуществам (большие силы осцилляторов резонансных переходов, близость собственных частот к частотам генерации мощных лазеров, возможность плавного изменения концентрации, относительная простота создания) пары щелочных металлов являются весьма удобными средами для таких исследований. Речь главным образом идет о легкоиспаримых парах Na и K. Также интересны резонансные среды паров Pb и Ba. Несмотря на длительный период изучения, нелинейные эффекты, возникающие в атомной системе под действием сильного поля резонансной частоты, до конца не исследованы. Нет единой теоретической модели, которая достаточно полно описывала бы процессы такого взаимодействия [3]. Поэтому весьма актуальной является

задача создания новых резонансных сред чистых паров металлов большой концентрации для дальнейшего изучения нелинейных эффектов, которая также может быть эффективно решена испарением ЭДД-взвеси.

Однако интерес представляет не только испарение металлов электрическим разрядом. Описанная ниже методика позволяет создавать также и взвеси диэлектриков. При взаимодействии диэлектрических веществ с разрядом могут происходить химические реакции, в результате которых вещества могут распадаться или образовываться новые соединения. Например, при прохождении электрического разряда через взвесь частиц графита могут быть получены чистые фуллерены без содержания кислорода. Кроме того, можно получать пары металлов из их диэлектрических соединений: из Cu₂O в электрическом разряде можно получить пары меди, которые в свою очередь могут являться активной средой.

В настоящей работе рассматривается оригинальная методика создания ЭДД-взвеси частиц металлов и диэлектриков и ее испарение с помощью электрического разряда.

ЭДД-взвесь частиц (размером 1–100 μm) создается при помощи электрического поля: частицы порошка, помещенные в высоковольтное (постоянное или переменное) электрическое поле, заряжаются тем или иным способом, и при достаточной напряженности поля начинают совершать возвратно-поступательные движения [4,5].

Механизм образования зарядов у частиц металлов и неметаллов существенно разный. Исследования показали, что электродинамическая взвесь металлов создается относительно легко и существует в широком диапазоне давлений ($P \leq 10^{-2} \text{ Torr}$ и $P \geq 100 \text{ Torr}$ буферного газа). Электрическое поле низкой частоты (50 Hz), необходимое для создания взвеси частиц Al, W, Cu, составляет величину 2–5 kV/cm. Механизм образования зарядов у частиц металлов в этом случае связан с наличием этого „подъемного“ поля.

Электродинамическую взвесь частиц неметаллов (SiO₂, Al₂O₃, CuO, Cu₂O) создать трудно, тем более в

широком диапазоне давлений. Для них необходим источник электрических зарядов. В качестве такого источника могут служить, например, импульсные барьерный или высокочастотный емкостной (ВЧЕ) разряды в буферном газе. Возникающие импульсы плазмы „обогащают“ частицы неметаллов зарядами, и эти частицы под действием низкочастотного (НЧ) подъемного электрического поля создают электродинамическую взвесь. Диапазон давлений буферного газа, в котором существует электродинамическая взвесь частиц неметаллов, определяется возможностью создания в нем ВЧЕ-плазмы и отсутствием барьерного разряда от НЧ подъемного электрического поля [6].

Для получения паров различных веществ был создан импульсный испаритель ЭДД-взвеси частиц. Разработанная методика опирается на впервые исследованную нашей группой возможность создания мощного диффузного электрического разряда в ЭДД-среде частиц металла. Этот разряд приводит к испарению металлических частиц взвеси и последующему созданию относительно однородного металлического покрытия внутри разрядной трубки. Толщина этого покрытия составляет несколько микрон, само покрытие не является гальванически связанным, что в принципе позволяет подобным же образом создавать еще один слой покрытия (например, из другого металла).

На рис. 1 показан импульсный испаритель электродинамической дисперсной взвеси частиц. Кварцевая трубка с интегрированными разрядными электродами располагается между парой внешних подъемных электродов, переменное электрическое поле между которыми создает ЭДД-среду (к электродам приложено переменное напряжение амплитудой несколько кВ). Эта среда представляет из себя взвесь частиц (размером около $20 \mu\text{m}$) металла с максимально достигнутой нами концентрацией (частиц) 10^5cm^{-3} . Частицы рабочего вещества предварительно тем или иным способом помещаются в испаритель.

Далее между разрядными электродами создается продольный диффузный электрический разряд. Большая эффективность взаимодействия продольного электрического разряда со взвесью частиц металла обусловлена их большой суммарной поверхностью. В эксперименте

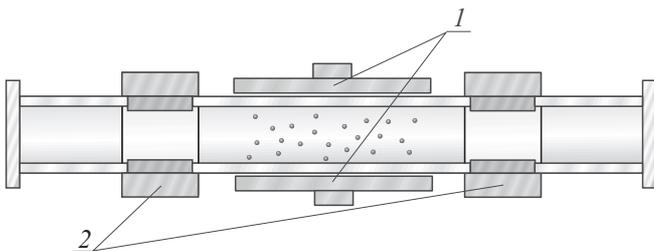


Рис. 1. Кварцевая разрядная трубка для испарителя ЭДД-взвеси. 1 — подъемные электроды, 2 — разрядные электроды.

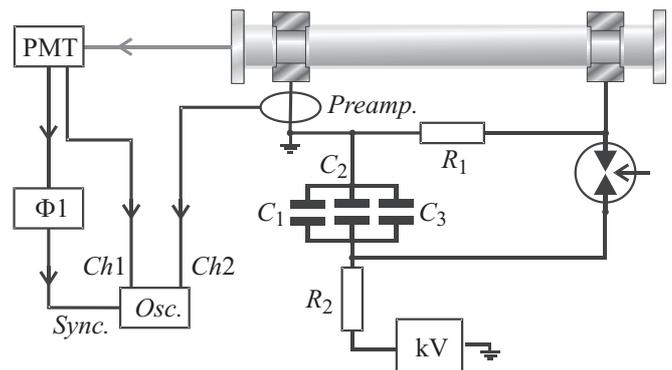


Рис. 2. Схема установки.

эта площадь поверхности частиц сравнима с площадью внутренней поверхности разрядной трубки.

Заряженные частицы металла двигаются в поперечном направлении разрядной трубки со скоростями $0.1-5 \text{ m/s}$, но это не существенно на временах продольного разряда в $100 \mu\text{s}$ [7].

Взвесь частиц создавалась с помощью поперечного относительно разрядной трубки поля амплитудой $3-7 \text{ kV}$ частотой 50 Hz , и контролировалась по визуализации лазерного луча во взвеси частиц.

Перед засыпкой металлический порошок прокаливался в муфельной печи в течение суток, а разрядную трубку обезгаживали последовательной откачкой и непрерывным тлеющим разрядом. Эти процедуры необходимы для обеспечения однородности взвеси порошка и минимального размера летающих частиц (уменьшение ван-дер-ваальсовских сил сцепления между частицами).

Схема установки показана на рис. 2. Интегральный свет при импульсном электрическом разряде в РТ по оптическому световоду попадает на ФЭУ-79, предусилитель и канал 1 цифрового осциллографа Tektronix TDS1001B (1), на канал 2 поступает электрический сигнал с пояса Роговского (2). Синхронизация запуска цифрового осциллографа и начала электрического разряда в исследуемой трубке осуществлялась формирователем (3).

Разрядная батарея была составлена из трех конденсаторов по $8 \mu\text{F}$ каждый и заряжалась до напряжения 7 kV . Трубка откачивалась до давления 10^{-2} Torr .

На рис. 3 и 4 представлены экспериментальные временные зависимости тока (сигнал с пояса Роговского) и интегральной интенсивности (сигнал с ФЭУ) при импульсном электрическом разряде в кварцевой трубке с медной пленкой, полученной по ЭДД-технологии. Для устранения электрической наводки эти сигналы были пропущены через цифровые FFT-фильтры.

Простейший анализ этих экспериментальных зависимостей показывает несовпадение во времени максимума интегральной интенсивности по сравнению с максимумом тока, который достигает 11 kA , длительность разрядного тока составила в схеме $\sim 30 \mu\text{s}$, а длительность

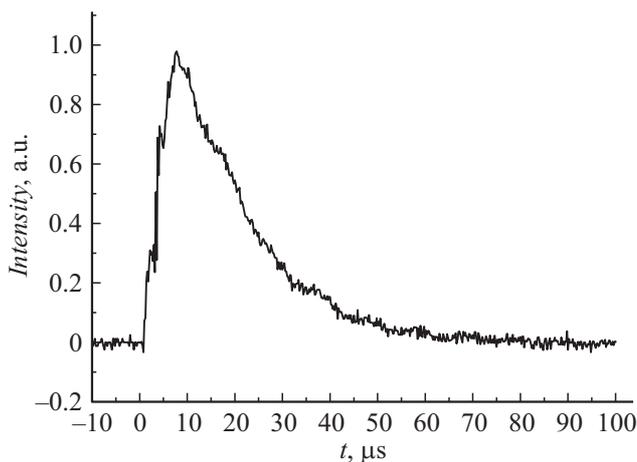


Рис. 3. Зависимость интегральной интенсивности свечения разряда от времени.

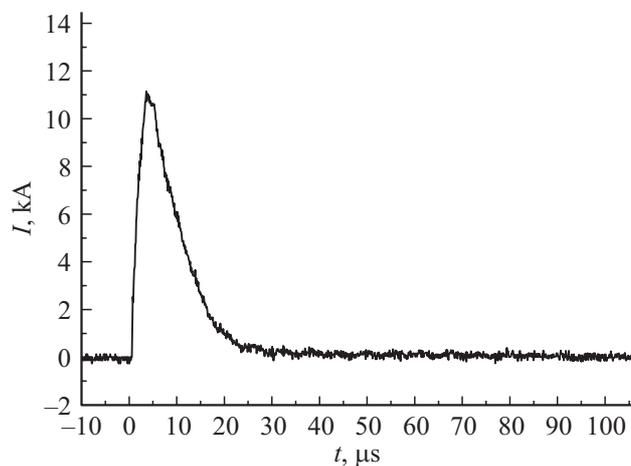


Рис. 4. Зависимость силы тока в разряде от времени.

сигнала интегральной интенсивности свечения разрядной трубки $\sim 70 \mu\text{s}$. Пояс Роговского был изготовлен в соответствии с рекомендациями [8]. Его коэффициент передачи согласуется с экспериментальными данными.

Режим электрического испаряющего разряда в рассматриваемой системе является моноимпульсным в том смысле, что после него исчезает вся взвесь частиц металла, частицы испаряются, а пары оседают на внутренней поверхности трубки. Могут быть произведены последующие разряды уже при других условиях, не связанных с необходимостью обеспечения существования электродинамической взвеси, приводящие к срыву атомов металлов с внутренней поверхности разрядной трубки. Частоты повторения таких разрядов связаны только с термической устойчивостью трубки. При достаточной толщине металлической пленки внутри разрядной трубки электрический разряд становится поверхностным. Атомы металла срываются с поверхности и устремляются к оси разрядной трубки. Таким образом,

на оси трубки образуются встречные потоки паров, создавая высокую концентрацию паров металла.

В принципе можно организовать доставку металлических частиц взвеси в разрядную трубку из некоторого контейнера, тогда продольный электрический разряд будет одновременно производить испарение частиц взвеси и срыв атомов с поверхности [9]. Эффективность такой реализации должна проявляться в увеличении импульсной концентрации паров металлов в трубке, однако она нуждается в дополнительном экспериментальном исследовании. Эта „гибридная“ методика получения паров металлов (в том числе и тугоплавких) может использоваться при разработке импульсных лазеров на основе ЭДД-сред.

Пары вещества после испарения ЭДД-взвеси конденсируются на стенках разрядной трубки, образуя однородную тонкую пленку. Подобное напыление может быть использовано непосредственно, например в качестве металлических фильтров в ядерной физике, также может применяться в качестве исходного материала в срывном методе импульсного получения паров [9,10]. Кроме того, предложенный метод позволяет создавать многослойное напыление.

Для создания пленки на внутренней поверхности РТ нами первоначально использовались частицы металлов Cu, Al, W. В кварцевую трубку с расстоянием между медными разрядными электродами в 30 см и внутренним диаметром 8 мм, внешним диаметром 12 мм помещалось 40 мг металлического порошка со средним диаметром $20 \mu\text{m}$ (Cu, Al, W). Расчетные оценки энергии, необходимой для полного испарения данного количества металла, составили величины: Cu — 300 J, Al — 600 J, W — 300 J.

Энергия разрядной батареи конденсаторов ($C = 24 \mu\text{F}$, $U = 10 \text{kV}$) составила 1200 J. С учетом потерь энергии на коммутатор (управляемый разрядник) и конечную эффективность разрядной трубки [10] оценочная энергия испарения составила 600 J. Разрядная трубка откачивалась до остаточного давления воздуха 10^{-2}Torr .

В результате проведенного эксперимента было получено относительно однородное напыление по всей длине трубки металлов Cu, Al и W. Причем геометрические параметры этой разрядной трубки не являются предельными и могут быть увеличены по крайней мере втрое (созданная трубка наибольшего размера имела длину 1 м и диаметр 1 см).

Также были проведены исследования по созданию электродинамических дисперсных взвесей частиц химических элементов SiO_2 , Al_2O_3 , CuO, Cu_2O . Размер частиц составлял менее $60 \mu\text{m}$. Эти химические соединения по своим электропроводным свойствам являются типичными представителями диэлектриков и полупроводников в отличие от рассмотренных ранее металлов Al, W, Cu. Для этих частиц требовался дополнительный источник зарядов, а именно ВЧЕ-разряд, после которого взвесь успешно создавалась.

Таким образом, в результате эксперимента были созданы ЭДД-взвеси различных веществ, как металлов, так и диэлектриков, причем частицы этих веществ имели разнообразные формы и размеры. Были использованы вещества Al, W, Cu, SiO₂, Al₂O₃, CuO и др. Успешно испарена ЭДД-взвесь частиц металлов электрическим разрядом. На внутренней поверхности РТ получены пленки металлов Cu, W, Al. Сняты зависимости разрядного тока и интегральной светимости в разрядной трубке от времени.

Список литературы

- [1] Гордон Е.Б., Егоров В.Г., Павленко В.С. // Квант. электрон. 1979. Т. 6. № 12. С. 2633–2636.
- [2] Анисимов Ю.И., Машек А.Ч., Метельский К.Е., Рябчиков Е.Л. // Опт. и спектр. 2009. Т. 107. № 3. С. 394–397.
- [3] Гайда Л.С. Взаимодействие мощного оптического излучения с парами щелочных металлов. Гродно: ГрГУ, 2006. 143 с.
- [4] Машек А.Ч., Мяздриков О.А., Николаев О.С. // Изв. вузов. Физика. 1976. № 9. С. 34–37.
- [5] Машек А.Ч., Машек И.Ч. // Вестник Инжексона. СПбГИЭУ. Сер. физ. науки. 2004. Вып. 3. С. 95–102.
- [6] Анисимов Ю.И., Машек А.Ч., Метельский К.Е., Рябчиков Е.Л. // Вестник СПб ун-та. 2012. Сер. 4. Вып. 2. С. 113–114.
- [7] Анисимов Ю.И., Метельский К.Е., Рябчиков Е.Л. // Конф. ОМИП-2009. М., 2009.
- [8] Диагностика плазмы / Под ред. А. Хаддлстоуна, С. Леонарда. Пер. с англ. М.: Мир, 1967. 516 с.
- [9] Анисимов Ю.И., Машек А.Ч., Метельский К.Е., Рябчиков Е.Л. // Вестник СПб ун-та. 2010. Сер. 4. Вып. 2. С. 28–31.
- [10] Ткаченко Т.Л. Получение и исследование активной среды лазера на парах натрия. Канд. дис. Л., 1985. 208 с.