

УДК 537.52

О накоплении продуктов распыления сегнетоэлектрической мишени в плазме тлеющего высокочастотного разряда

С. П. Зинченко, Г. Н. Толмачёв

Обнаружена зона накопления микрочастиц по рассеиванию излучения лазера на парах меди в плазме высокочастотного емкостного разряда при напылении многокомпонентных наноразмерных сегнетоэлектрических пленок, которая находится на границе раздела отрицательного свечения и темного катодного пространства тлеющего разряда. Предполагается, что таковыми частицами являются заряженные продукты распыления сегнетоэлектрической мишени.

PACS: 52.25.Fi

Ключевые слова: газовый разряд, плазма, лазерное излучение, рассеяние света.

Введение

Одним из способов создания наноразмерных сегнетоэлектрических пленочных структур является их напыление в плазме емкостного высокочастотного (ВЧ) разряда с убегающими электронами [1, 2]. Такой способ является одностадийным, и он для получения пленок с нужными свойствами не требует дополнительных операций после окончания напыления. Разряд с убегающими электронами в атмосфере активного газа (кислород, азот) при определенных режимах работы способствует образованию структурированной дисперсной фазы [3—6], которая гетероэпитаксиально осаждается на монокристаллическую поверхность подложки, формируя на ней пленки сложных оксидов с параметрами, близкими к параметрам объемных кристаллических материалов [1—6]. Однако многие вопросы образования в таком разряде дисперсной фазы, ее локализации в разряде, устойчивости до настоящего времени остаются не ясными.

Стадию напыления можно разделить на три этапа: первый — распыление многокомпонентной диэлектрической мишени в плазме ВЧ-разряда, второй — транспортировка продуктов распыления через плазму ВЧ-разряда к подложке и третий — кристаллизация продуктов распыления мишени на подложке. При рассмотрении первого этапа особых вопросов, как обычно, не возникает. Изучению самого важного и сложного вопроса — кристаллизации на подложке — посвящено огромное число работ, и в понимании этой проблемы достигнуты значительные результаты. Что касается

транспортировки продуктов распыления, то этот вопрос, с нашей точки зрения, представляется тоже чрезвычайно важным, тем более что он напрямую связан как с процессом кристаллизации, так и с процессом распыления мишени. В различных литературных источниках высказываются гипотезы, что перенос продуктов распыления материала мишени к подложке может осуществляться как в виде атомов или молекулярных соединений, так и в виде кластеров, микро- или макрочастиц [1, 2].

Наличие атомов и молекул в промежутке между мишенью и подложкой достаточно убедительно доказывается регистрацией известных эмиссионных спектров этих частиц, легко возбуждаемых в плазме ВЧ-разряда [7, 8]. Поэтому присутствие таких частиц в условиях напыления сегнетоэлектриков в плазме разряда не вызывает сомнений. Что касается кластерной компоненты плазмы, то, например, в работах [1—6, 9, 10] утверждается, что таковая в плазме ВЧ-разряда существует и характерным для нее (например, при использовании мишени из цирконата титаната свинца) является сплошной эмиссионный спектр излучения в области 300—400 нм, по которому косвенно можно контролировать ее присутствие. Спектры микро- и макрочастиц в условиях плазмы применяемого ВЧ-разряда возбуждаются не так легко, к тому же сплошные спектры дисперсной фазы [1, 2] являются лишь косвенным доказательством их присутствия в плазме. Следовательно, для таких частиц требуются другие методы их обнаружения.

Данная работа посвящена обнаружению и идентификации всего спектра частиц в плазме упомянутого ВЧ-разряда при напылении наноразмерных пленок.

Экспериментальная установка

Для обнаружения и идентификации частиц, присутствующих в плазме при напылении нано-

Зинченко Сергей Павлович, старший научный сотрудник.
Толмачёв Геннадий Николаевич, заведующий отделом.
Южный научный центр РАН. Отдел физики и астрономии.
Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41.
E-mail: tres-3@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 апреля 2012 г.

© Зинченко С. П., Толмачёв Г. Н., 2012

размерных пленок из мишени цирконата титаната свинца, мы проводили исследование эмиссионного спектра излучения плазмы ВЧ-разряда и применяли метод лазерного светового рассеяния, основанный на зондировании плазмы интенсивным излучением лазера видимого диапазона. В этом случае мы исходили из того, что присутствующие в плазме частицы способны с большей или меньшей эффективностью и различными индикатрисами рассеивать падающее на них излучение, что позволит их обнаружить, а по характеру рассеяния — идентифицировать.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Катодное распыление охлаждаемой водой мишени из цирконата титаната свинца осуществлялось в камере напыления 1 в плазме ВЧ-разряда (частота 13,56 МГц) в атмосфере кислорода с прокачкой при давлении 0,5 Торр и вводимой в разряд мощности около 500 Вт.

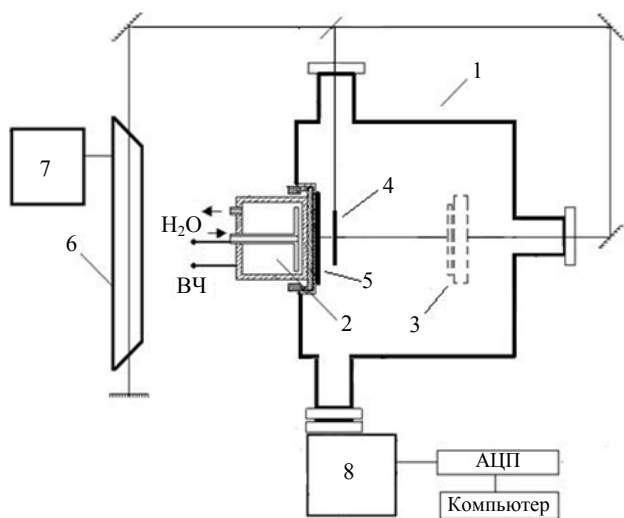


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для просвечивания плазмы ВЧ-разряда излучением лазера:
1 — камера напыления; 2 — катодный узел с распыляемой мишенью; 3 — подложка; 4 — место положения "светящегося диска"; 5 — мишень; 6, 7 — активная среда медного лазера с блоком питания; 8 — спектрограф с системой регистрации эмиссионного спектра

В качестве источника зондирующего излучения использовались импульсные лазеры на парах меди. Лазер фирмы Mechatron работал на длине волны 510,5 нм со средней мощностью излучения 2 Вт при частоте следования импульсов 7,5 кГц. Диаметр пучка излучения — 1,5 см. Применялся также лазер практически с теми же параметрами генерации, но с большим диаметром пучка (2 см) и, соответственно, с меньшей плотностью лазерного излучения. В качестве активного элемента в нем использовалась разрядная трубка серийного производства УЛ-101 и блок питания ИП-18.

Через кварцевые окна камеры излучение могло вводиться в камеру напыления как вдоль распы-

ляемой поверхности мишени, так и перпендикулярно ей. Мы не использовали технологию "лазерного ножа" как, например, в работе [11], поскольку оказалось, что для визуального наблюдения за рассеянием света на частицах в плазме разряда вполне достаточно интенсивности несфокусированного излучения лазера на парах меди.

Эмиссионный спектр плазмы в камере напыления регистрировался с помощью спектрографа МДР-23 (8) и фотоприемника ФД-24К. Регистрация сигнала с фотоприемника и управление спектрографом осуществлялось компьютером.

Результаты и обсуждение

В результате просвечивания лазерным излучением внутренней полости камеры напыления в плазме обнаружена область, интенсивно рассеивающая зондирующее излучение [12]. Область рассеяния представляет собой "светящийся диск" диаметром 3,5—4 см (диаметр сегнетоэлектрической мишени 5 см) и толщиной 0,5—0,8 мм (рис. 2).

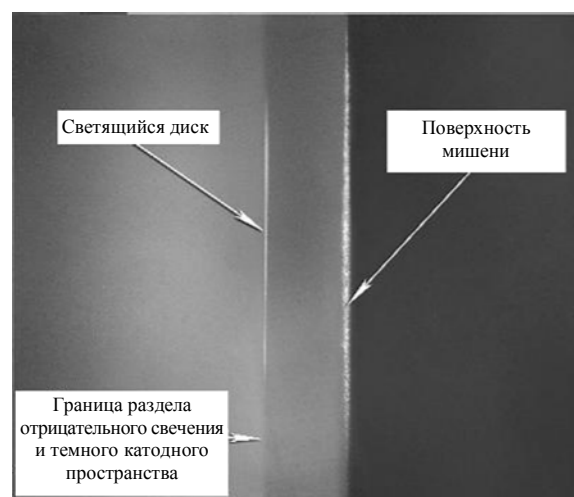


Рис. 2. Фотография светящегося "диска" (вид сбоку)

Для него характерно следующее. Во-первых, "диск" располагался параллельно распыляемой поверхности мишени на расстоянии нескольких миллиметров от последней, и его местоположение жестко совпадало с границей раздела между темным катодным пространством (ТКП) и отрицательным свечением (ОС) тлеющего разряда (с изменением размера ТКП, например, путем вариации давления кислорода, синхронно менялось расстояние между "диск" и поверхностью мишени). Во-вторых, свечение появляется через 1—2 мин после включения ВЧ-разряда и его интенсивность монотонно растет до максимального в течение последующих нескольких минут. После выключения разряда "светящийся диск" за доли секунды разлетался и исчезал (результаты визуального наблюдения). В-третьих, исследование спектра излуче-

ния из рассматриваемой области показало, что рассеяние является упругим. В-четвертых, индикатриса рассеяния зондирующего излучения является практически круговой и не зависит от поляризации как зондирующего излучения, так и рассеянного света.

Проведено исследование интенсивности спектра эмиссии из зоны "светящегося диска". На рис. 3 приведен характерный вид такого спектра, который аналогичен спектру, впервые полученному в [1]. Установлено, что при формировании "светящегося диска", т. е. при накоплении рассеивающих частиц, не происходит увеличения интенсивности ни сплошного кластерного спектра, ни эмиссионного спектра ионов, атомов и молекул, присутствующих в плазме. При этом в эмиссионном спектре отсутствуют смещенные частоты комбинационного рассеяния. Учет того факта, что индикатриса рассеяния атомов и молекул существенно отличается от круговой, позволяет исключить из списка рассеивающих частиц кластерную, атомную и молекулярную компоненты газовой смеси.

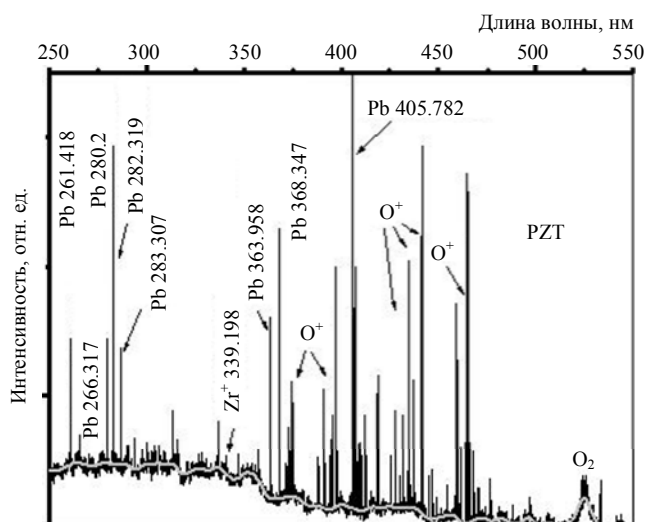


Рис. 3. Характерный вид спектра излучения плазмы в камере напыления

Мы предполагаем, что рассеивающими частицами являются микрочастицы размером $r \gg \lambda$ (для ансамбля именно таких частиц характерна круговая диаграмма направленности рассеянного излучения), которые образуются из продуктов распыления мишени. Радикальная разница между временем накопления частиц в разряде и временем их распада после выключения разряда позволяет предположить, что накапливающиеся частицы формируются из продуктов распыления мишени. При замене катода из цирконата титаната свинца на металлический (например, танталовый) яркость свечения "диска" снижалась в десятки раз, что подтверждает предварительный вывод о поступлении дисперсной фазы в разряд из материала ка-

тода. Остаточное же свечение "диска" обусловлено, по-видимому, присутствием в камере ранее накопившихся пылевых частиц цирконата титаната свинца.

Если учесть, что в плазме разряда такие частицы могут заряжаться [11], а направление электрического поля на границе раздела ТКП—ОС дважды меняет свой знак [13], то накопление заряженных частиц в такой ситуации представляется вполне логичным.

При приближении металлического и диэлектрического зондов к катоду на расстояние около 5 см пылевое образование исчезало. Это, видимо, связано с трансформацией обратного электрического поля за счет отраженных от зондов убегающих электронов разряда.

Заключение

По рассеянию интенсивного лазерного излучения видимого диапазона установлено, что в плазме тлеющего ВЧ-разряда присутствуют микрочастицы. Из-за специфичности распределения электрического поля в разряде происходит их накопление на границе ТКП—ОС. Предполагается, что такими являются продукты распыления сегнетоэлектрической мишени или их ассоциации. Заряжаясь в плазме разряда в результате прилипания или отрыва электронов, они удерживаются встречными полями, т. е. попадают в некую электростатическую "ловушку", что может оказаться важным для дальнейших приложений, например, при их более детальном изучении.

Литература

1. Мухортов В. М., Головки Ю. И., Маматов А. А., Толмачёв Г. Н., Бирюков С. В., Масычев С. И. // Труды Южного научного центра РАН. — Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН. 2007. Т. 2. С. 224.
2. Мухортов В. М., Толмачёв Г. Н., Головки Ю. И. // Вестник Южного научного центра РАН. 2006. Т. 2. № 1. С. 30.
3. Толмачёв Г. Н., Головки Ю. И., Мащенко А. И. // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 9. С. 96.
4. Мухортов В. М., Толмачёв Г. Н., Мащенко А. И. // Там же. 1993. Т. 63. № 11. С. 135.
5. Мухортов В. М., Головки Ю. И., Толмачёв Г. Н., Мащенко А. И. // Там же. 1999. Т. 69. № 12. С. 87.
6. Мухортов В. М., Головки Ю. И., Толмачёв Г. Н., Мащенко А. И. // Там же. 1998. Т. 68. № 9. С. 99.
7. Пляка П. С., Толмачёв Г. Н., Ковтун А. П. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 19. С. 60.
8. Young-Hwan Kim, Woon-Jo Cho // Journal of the Korean Physical Society. 2005. V. 46. No. 4. P. 926.
9. Gary S. Selwyn, Corey A. Weissb, Federico Sequedac, Carrie Huangd // J. Vac. Sci. Technol. 1997. A 15(4). Jul/Aug. P. 2023.
10. Vladimirov S. V., Ostrikov K. N. // Plasmas and Polymers. 2003. V. 8. No. 2. P. 135.
11. Лунаев А. М., Молотков В. И., Нефедов А. П. и др. // ЖЭТФ. 1997. Т. 112. № 6(12). С. 2030.

12. Зинченко С. П., Толмачёв Г. Н. //Груды конференции "Лазеры. Измерения. Информация". — Санкт-Петербург. 2010. С. 108.

13. Кудрявцев А. А., Нисимов С. У., Прохорова Е. И., Слышов А. Г. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. № 17. С. 104.

Accumulation of sputtering products of a ferroelectric target in the high-frequency glow discharge plasma

S. P. Zinchenko, G. N. Tolmachev

Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
41 Chekhov av., Rostov-on-Don, 344006, Russia
E-mail: tres-3@mail.ru

It is possible to detect the microparticle accumulation area between the cathode dark space and negative glow by scattering of copper vapor laser radiation in the high-frequency glow discharge plasma. It is supposed that these particles are the charged products of the ferroelectric target to be sputtered.

PACS: 52.25.Fi

Keywords: gas discharge, plasma, laser radiation, light scattering.

Bibliography — 13 references.

Received April 15, 2012