

УДК 537.525

**Положительный столб тлеющего разряда в неоне  
с заряженными микрочастицами (обзор)**

Д. Н. Поляков, В. В. Шумова, Л. М. Василяк

*Экспериментально и численно исследовано влияние заряженных пылевых частиц микронного размера на электрические параметры положительного столба тлеющего разряда постоянного тока низкого давления в неоне. Численный анализ выполнен в рамках модели плазмы разряда в диффузионно-дрейфовом приближении с учётом взаимодействия пылевых частиц с метастабильными атомами неона. В разряде с облаком пылевых частиц напряженность продольного электрического поля возрастает. При увеличении концентрации пылевых частиц, в осесимметричном пылевом облаке цилиндрической формы приращение напряженности электрического поля выходит на насыщение. Показано, что вклад метастабильных атомов в ионизацию выше в разряде с частицами, несмотря на тушение метастабильных атомов на пылевых частицах. Рассмотрены процессы зарядки пылевых частиц и пылевого облака. С ростом концентрации пылевых частиц их заряд уменьшается, однако объемный заряд пылевого облака увеличивается. Результаты работы могут быть использованы в области плазменных технологий с микрочастицами.*

PACS: 52.27.Lw; 52.50.Nr.

*Ключевые слова:* тлеющий разряд, пылевая плазма, неон, напряжённость электрического поля, вольт-амперная характеристика, диффузионно-дрейфовая модель, метастабильные атомы, заряд пылевых частиц.

**Введение**

Плазма газового разряда с частицами конденсированной дисперсной фазы (комплексная плазма или плазма с пылевыми частицами) является отдельным направлением фундаментальных исследований в области физики плазмы [1] и широко применяется в области прикладных исследований [2] и плазменных технологий [3]. Для длительного удержания пылевых частиц в плазме необходимо наличие или создание в ней различного вида градиентных полей, компенсирующих воздействие сил, действующих на пылевые частицы, а именно, силы тяжести, силы увлечения ионами, конвективными потоками газа или силами термофореза при наличии градиентов температур. Такие усло-

вия удержания микрочастиц можно реализовать в низкотемпературной плазме газовых разрядов низкого давления. Пылевые частицы в плазме заряжаются потоками ионов и электронов и приобретают значительный отрицательный заряд порядка нескольких тысяч зарядов электрона ( $e^-$ ). Заряженные микрочастицы, взаимодействуя с плазмой и между собой, образуют пылевые структуры различной степени упорядоченности. В положительном столбе тлеющего разряда пылевые структуры образуются и удерживаются в электростатических и тепловых ловушках. Градиентное электрическое поле, способное удерживать пылевые частицы, реализуется, как правило, в стратах в положительном столбе разряда [4—6], либо в протяжённых разрядах с переменным диаметром [4, 6]. Естественные тепловые ловушки могут быть образованы, например, в разряде при глубоком охлаждении до криогенных температур [7].

Пылевые частицы в плазме могут являться объектом плазменной модификации [8, 9], реагентом в плазмохимических реакциях, компонентом для модификации поверхностей, продуктом, полученным в результате плазмохимического синтеза [10—12], а также выступать в роли элемента,

---

Поляков Дмитрий Николаевич, старший научный сотрудник.  
Шумова Валерия Валерьевна, старший научный сотрудник.  
Василяк Леонид Михайлович, главный научный сотрудник.  
Объединенный институт высоких температур РАН.  
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.  
Тел. (8-495) 484-26-10. E-mail: cryolab@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 9 июня 2016 г.

© Поляков Д. Н., Шумова В. В., Василяк Л. М., 2016

управляющего параметрами плазмы, при их поступлении в плазму извне [13]. Такой способ управления параметрами плазмы создаёт возможность оптимизации эффективности и контроля физико-химических процессов в реакционной плазме. Заряженные микрочастицы и их структуры, образующиеся в плазме газовых разрядов, изменяют свойства окружающей их плазмы вследствие диссипации энергии плазмы при её взаимодействии с пылевыми частицами. Эти процессы обусловлены гибелью электронов и ионов на поверхности микрочастиц, или их образованием в процессах фото и вторичной эмиссии с поверхности пылевых частиц при взаимодействии пылевых частиц с возбуждёнными частицами плазмы.

Взаимодействия плазменной компоненты с пылевыми частицами самосогласованно определяют концентрацию плазменной компоненты и влияют на электрические параметры газового разряда. Это влияние находит многочисленное экспериментальное подтверждение. В работе [14] обнаружено уменьшение концентрации электронов в пылевом облаке по сравнению с концентрацией электронов в плазме чистого аргона. Показано, что изменение концентрации электронов зависит от концентрации пылевых частиц. Изменение концентрации электронов в разряде влечёт за собой изменение его вольт-амперных характеристик. Изменение продольного электрического поля и напряжения тлеющего разряда постоянного тока, вызванное присутствием пылевых частиц в разряде, было обнаружено в экспериментах с разными газами и различными микрочастицами [6, 13—19]. Было экспериментально подтверждено, что это изменение напряженности электрического поля в положительном столбе зависит от потерь электронов на пылевых частицах, т. е. от количества и концентрации пылевых частиц в пылевом облаке [13, 17, 19, 20].

Дефицит концентрации электронов в пылевой плазме, вызванный их потерями на пылевых частицах, может быть столь значительным, что может привести к развитию в газовом разряде различных неустойчивостей, погасанию разряда и развитию автоколебательного режима горения разряда [21]. Обратный эффект может вызвать фотоэлектронная или вторичная электронная эмиссия с поверхности пылевых частиц, которая может привести к росту концентрации электронов в плазме, вызвать рост разрядного тока [22] либо привести к уменьшению напряжения на разряде [15]. Такая зависимость от свойств материала пылевых частиц в процессе их роста в разряде постоянного тока экспериментально обнаружена в [23, 24].

Изменения электрических параметров разряда, вызванные наличием пылевых частиц в плазме,

находят практическое применение в технологических экспериментах, где измерение этих параметров используется для диагностики размеров частиц, синтезируемых в плазмохимических реакторах [11, 25, 26]. Изменение электрических параметров плазмы с пылевыми частицами проявляется также в изменении интенсивности излучения плазмы [23, 24, 27, 28].

В пылевой газоразрядной плазме в инертных газах процессы ионизации происходят с участием метастабильных атомов. Роль метастабильных атомов, участвующих в процессах взаимодействия с пылевыми частицами в плазме, может быть столь значительной, что они влияют на интегральные характеристики разряда, так как эти процессы могут быть источником дополнительных электронов в плазме и влиять на процессы зарядки пылевых частиц [29].

При анализе процессов в пылевой плазме в инертных газах необходим учёт дополнительного канала тушения метастабильных состояний на пылевых частицах и взаимного тушения метастабильных атомов [17, 29—33]. В инертных газах процессы тушения на пылевых частицах и химиионизации могут увеличить долю свободных электронов в высокоэнергетичном хвосте функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) и уменьшить их долю в процессах ступенчатой ионизации. Данные утверждения основаны на результатах экспериментальных исследований роли метастабильных атомов в процессах взаимодействия в пылевой плазме инертных газов [34—41]. Эти процессы наиболее подробно исследованы экспериментально и теоретически для плазмы радиочастотного разряда в аргоне. В работе [34] обнаружено уменьшение интенсивности спектральных линий аргона в разряде с пылевыми частицами авторы связывают с уменьшением температуры электронов, а наблюдаемое в работе [35] уменьшение концентраций метастабильных состояний в области пылевой структуры авторы объясняют их тушением на пылевых частицах. Обычно рост концентрации метастабильных атомов и излучения плазмы ассоциируется с ростом температуры электронов и, соответственно, с увеличением электрического поля разряда. В этом случае скорости потери электронов на пылевых частицах и в реакциях возбуждения преобладают над скоростью их рождения в реакциях тушения [36]. Тогда наблюдается рост величины электрического поля, рост температуры электронов и увеличение концентрации возбуждённых состояний при наличии пылевых частиц в разряде [36—43]. Значительное увеличение плотности метастабильных состояний аргона в пылевой плазме радиочастотного разряда по сравнению с разрядом без пы-

левых частиц наблюдалось в [37, 38], что является следствием повышения электронной температуры в плазме с пылевыми частицами. Изменение распределений метастабильных состояний аргона в радиочастотном разряде, вызванное пылевыми частицами, обнаружено как внутри пылевой структуры [33], так и за пределами границ пылевой структуры [40], что указывает на нелокальный характер взаимодействия пылевого облака с плазмой. Увеличение числа и размера пылевых частиц изменяет ФРЭЭ в плазме, приводя к росту доли электронов с более высокой энергией при уменьшении концентрации свободных электронов в разряде [39]. Модели плазмы тлеющих разрядов в переменном и постоянном электрическом поле с пылевыми частицами, описывающие некоторые экспериментально наблюдаемые процессы, предложены в работах [13, 16, 17, 19, 27, 29—33, 41—47].

В данной работе проведено экспериментальное изучение вольт-амперных характеристик (ВАХ) положительного столба разряда постоянного тока при разных давлениях неона и проведено сравнение с расчётами по диффузионно-дрейфовой модели плазмы. Выполнен численный анализ влияния пылевых частиц микронного размера на напряжённость продольного электрического поля в положительном столбе с учётом взаимодействия пылевых частиц с метастабильными атомами. Рассмотрены процессы зарядки пылевых частиц, помогающие объяснить взаимодействие микрочастиц с плазмой разряда.

### Численная модель

Для расчёта параметров плазмы использовалась диффузионно-дрейфовая модель [29, 30] для плазмы неона. В модели рассмотрены образование и гибель электронов, ионов и возбуждённых состояний неона. Средняя энергия электронов, транспортные коэффициенты и константы скоростей реакций возбуждения и ионизации с участием электронов рассчитаны с помощью пакета BOLSIG+ [48] и базы данных SIGLO [49]. Заряд пылевых частиц рассчитан с учётом ион-атомных столкновений в приближении слабо столкновительной плазмы (СЕС) [50], а поток возбуждённых атомов на пылевые частицы — в газокинетическом приближении. Коэффициент аккомодации энергии при взаимодействии метастабильного атома с пылевыми частицами принимался равным 1. Предполагалось, что при взаимодействии плазменных частиц с пылевыми частицами выделение энергии на поверхности пылевых частиц не приводит к эмиссии электронов с их поверхности, а ультрафиолетовое излучение плазмы разряда не вызывает фотоэмиссию электронов с поверхности пылевых частиц.

Решение задачи для однородного положительного столба тлеющего разряда проводилось для экспериментальных параметров пылевых структур (радиус пылевой структуры и концентрация пылевых частиц) и соответствующих им значений тока и напряжённости электрического поля. Распределение пылевых частиц внутри пылевой структуры и на её границе (при  $r \leq r_d$ ) было задано постоянным с концентрацией пылевых частиц  $n_d(r) = n_d(0)$ , где  $r_d$  — радиус пылевой структуры. На краю пылевой структуры (при  $r > r_d$ ) принято экспоненциально спадающее распределение пылевых частиц  $n_d(r) = n_d(0)\exp[10(r_d - r)/R]$ , где  $R$  — внутренний радиус разрядной трубки.

Вследствие того, что напряжённость продольного электрического поля определяет величину электронной температуры, интенсивность ионизационных процессов в плазме и заряд пылевых частиц, то, в определенном смысле, она является критерием удержания пылевых частиц в плазме. Точность расчета этой величины определяет надежность всей модели, поэтому проведено сравнение полученных расчётных значений напряжённости продольного электрического поля в положительном столбе разряда с данными, полученными как в наших экспериментах, так и в экспериментах, выполненных другими авторами [51].

### Эксперимент

Средняя величина продольной напряжённости электрического поля  $E = \Delta U/l$  определена путём измерения значений падения напряжений  $\Delta U$  в положительном столбе разряда между двумя кольцевыми измерительными электродами, где  $l$  — расстояние между ними. Эксперименты проведены в цилиндрической разрядной трубке длиной 20 см и внутренним диаметром 1,65 см.

Пылевая плазма создавалась при инъекции сферических частиц из меламин-формальдегида диаметром 2,55 мкм в тлеющий разряд постоянного тока в неоне при давлении  $P = 17$ —160 Па и токах  $I = 0,1$ —4,5 мА. Регистрация изображений пылевых частиц была осуществлена в отражённом свете плоского лазерного луча с помощью микроскопа и видеокамеры в продольном сечении разряда. Из полученных изображений были определены радиус пылевой структуры  $r_d$  и средняя концентрация пылевых частиц в структуре  $n_d$ . Эксперимент подробно описан в [13, 16].

### Результаты и обсуждение

Результаты сравнения экспериментальных и расчётных значений напряжённости продольного электрического поля в свободном от пылевых час-

тиц разряде  $E$  приведены на рис. 1. Из графиков видно, что при давлении более 60 Па экспериментальные и расчетные значения для тока 1 мА удовлетворительно согласуются, а для тока 3 мА наблюдается увеличение расхождения экспериментальных и расчетных значений. Величина расхождения расчетных и экспериментальных данных не превышала 14 % при токах менее 1,5 мА. Для тока 3 мА при 160 Па это расхождение увеличилось до 30 %.

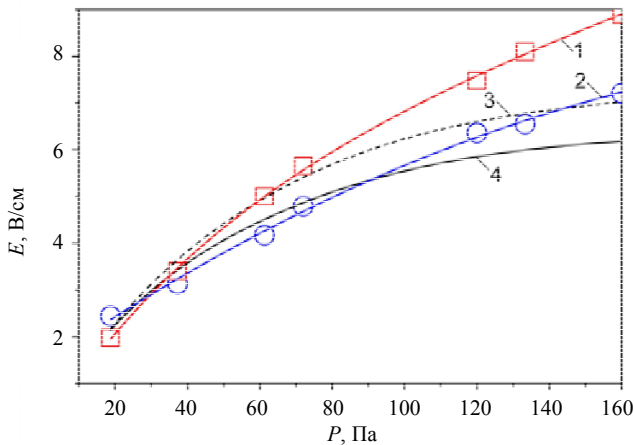


Рис. 1. Экспериментальные (знаки, аппроксимация — линии 1 и 2) и расчетные (линии 3 и 4) зависимости напряженности продольного электрического поля  $E$  от давления неона  $P$  в разряде без пылевых частиц для разных токов разряда, мА: 1 (круги и линии 2 и 3), 3 (квадраты и линии 1 и 4).

Анализ экспериментальных ВАХ показал, что наблюдаемое расхождение при увеличении давления и тока в первую очередь связано с отклонением от теории Шоттки экспериментальных ВАХ разряда [17], где вместо ВАХ с незначительным отрицательным наклоном (расчёт), наблюдались растущие характеристики. Растущие участки ВАХ наблюдались также в разрядах диаметром 2,5 см в аргоне [52, 53] и неоне [52] при токах от 2 до 10 мА и давлении около 267 Па, что было связано с добавлением малой примеси азота. Отметим, что растущие участки ВАХ наблюдались в чистом неоне, а добавление азота приводило к увеличению угла наклона ВАХ к оси абсцисс [52]. Присутствие примесей различных газов в наших экспериментах, вероятно, имело место. Наличие примесей могло определяться как исходной чистотой используемого газа, так и их десорбцией с различных поверхностей при их нагреве в разрядном устройстве при увеличении тока разряда. Возможно также поступление иных примесей, связанных с разложением материала частиц (меламин — формальдегида) в разряде. Деградация поверхности пылевых частиц из этого материала наблюдалась и изучалась в работах [54—57].

Для проверки точности наших расчётов при давлении 160 Па и больших токах мы провели расчёт параметров разряда, соответствующих экспериментальным данным [51], полученным в чистом неоне в разряде диаметром 2,36 см (табл. 1). Можно видеть, что отклонение наших расчётов от эксперимента в чистом неоне не превышает 10 %. Расчет дает завышенные значения, в отличие от рис. 1, где расчетные ВАХ расположены ниже экспериментальных.

Таблица 1

Результаты расчёта экспериментальных значений ВАХ

$I$ мА	$E$ , эксперимент [51] В/см	$E$ , расчёт В/см
3	3,72	3,95
5	3,42	3,76
10	3,17	3,42

Таким образом, при больших токах и давлениях газа применяемая модель расчёта даёт значения электрического поля и, соответственно, электронной температуры с весьма хорошей точностью относительно экспериментальных данных [51].

При одинаковом значении тока разряда измеренная в разряде с пылевыми частицами напряжённость продольного электрического поля  $E_d$  выше, чем напряжённость продольного электрического поля  $E$  в разряде без пылевых частиц (рис. 2). Ранее увеличение напряжённости продольного электрического поля в разряде с пылевыми частицами наблюдалось в воздухе [3, 6, 13, 16].

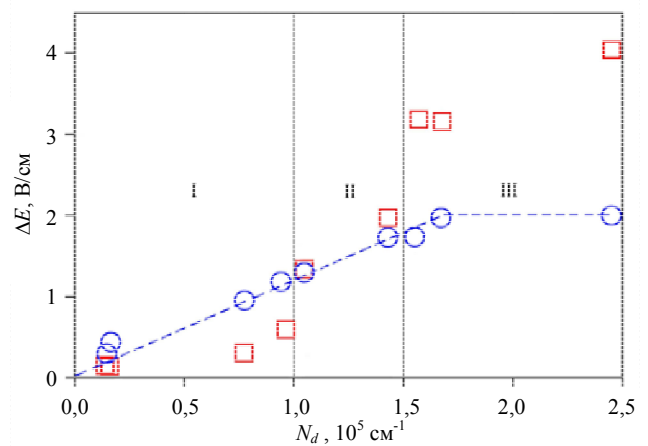


Рис. 2. Экспериментальные (квадраты) и расчетные (круги, пунктирная линия — аппроксимация) зависимости приращений напряженности продольного электрического поля  $\Delta E$  от погонной плотности пылевых частиц  $N_d$ .

На рис. 2 представлены результаты измерений и расчёта приращений напряжённости электрического поля  $\Delta E = E_d - E$  в разряде при давлении 47 Па

при токах менее 1 мА, определяемых наличием пылевых частиц в разряде, в зависимости от погонной плотности пылевых частиц в пылевой структуре  $N_d = \int_{0-R} [2\pi r n_d(r)] dr / L$ . Здесь каждому значению  $N_d$  соответствовал набор значений параметров пылевой структуры: длина  $L$ , радиус  $r_d$ , концентрации пылевых частиц  $n_d$ , а также величина тока разряда  $I$  и напряжённость электрического поля  $E$ . Приращение напряжённости электрического поля отражает возрастание потерь частиц и энергии плазмы на поверхности пылевых частиц. Видно, что экспериментальные значения  $\Delta E$  связаны с погонной плотностью пылевых частиц нелинейно. Наблюдаются три области, характеризующиеся различным наклоном линии, которую можно провести через экспериментальные точки. До значений  $N_d < 1,8 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$  расчётные значения  $\Delta E$  линейно возрастают с ростом погонной плотности частиц (области I и II, рис. 2) и при  $N_d > 1,8 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$  не зависят от плотности частиц (область III, рис. 2). Это связано с тем, что возрастание  $N_d$  в пылевой структуре происходит в основном за счёт возрастания концентрации пылевых частиц  $n_d$ , и для плотной пылевой структуры модель расчёта становится нечувствительной к потерям на частицах (занижает их заряд) вследствие ограниченной применимости приближения СЕС для зарядки частиц. При высоких значениях  $N_d$ , когда расстояния между пылевыми частицами становятся соизмеримыми с ионным радиусом Дебая, начинается экранировка потоков заряженных частиц внутри пылевой структуры. Это приводит к вытеснению заряженных частиц за наружную границу пылевой структуры и к изменению радиального профиля концентрации свободных электронов, так что область, занятая плотной пылевой структурой, становится слабо проводящей [17, 19, 58, 59]. При этом изменение напряжённости продольного электрического поля, отнесённое к одной пылевой частице  $\Delta E / N_d$ , уменьшается (табл. 2), что также отражается в падении заряда частиц с ростом их концентрации в пылевой структуре (см. рис. 5). Точность модели зарядки пылевой частицы в плотной пылевой структуре с существенным дефицитом концентрации электронов уменьшается, и расчёт занижает  $\Delta E$ .

Таблица 2

Изменение напряжённости продольного электрического поля, отнесённое к одной пылевой частице  $\Delta E / N_d$

$N_d$	$\Delta E / N_d$ , эксперимент	$\Delta E / N_d$ , расчёт
$10^5 \text{ см}^{-1}$	$10^{-5} \text{ В/частица}$	$10^{-5} \text{ В/частица}$
1	1,52	1,51
1,4	1,68	1,47
1,6	2,25	1,19

В предельном случае (для абсолютно непроникающей пылевой структуры) при выходе значений  $\Delta E$  (область III, рис. 2) в насыщение пылевая структура может рассматриваться как сплошная среда из материала пылевой частицы. Плотные пылевые структуры становятся «непроницаемыми» для свободных электронов, вызывая практически полное вытеснение тока разряда в свободное от частиц сечение разрядной трубки. Тогда плотная пылевая структура ведет себя как сплошной стержень, расположенный в центре разрядной трубки [60], и задача переходит к случаю плазмы тлеющего разряда между двумя цилиндрами. В этом варианте приращение электрического поля стремится к значению, которое реализуется при потерях, равных диффузионным потерям на стенках коаксиального электроразрядного устройства. При малом количестве пылевых частиц в структуре  $N_d < 10^5 \text{ см}^{-3}$  (область I, рис. 2) расчёт завышает значения  $\Delta E$ . Это происходит вследствие того, что при малых количествах частиц в структуре это приращение определяется их количеством и не зависит от погонной плотности частиц.

Для анализа зависимости напряжённости электрического поля для разряда с пылевыми частицами мы провели расчёт при более высоких значениях давления неона и тока разряда с варьируемым значением  $N_d$ . В расчёте использовался экспериментально полученный средний радиус пылевой структуры  $r_d = 4 \text{ мм}$ , соответствующий пылевой структуре с максимальным числом пылевых частиц. Общий вид зависимости на рис. 3 показывает экспоненциальный рост напряжённости электрического поля при значениях  $N_d < 2 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$  с выходом на насыщение при высоком значении  $N_d > 3 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$ . При малых значениях  $N_d < 1 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$  пылевые частицы фактически работают как индивидуальные объекты, поглощающие частицы плазмы и слабо оказывающие влияние на распределение электронной плотности [17, 59]. В случае высоких значений  $N_d$  частицы воздействуют на плазму коллективно. Из рис. 3 видно, что приращение напряжённости поля разряда, вызванное пылевым облаком, зависит как от параметров пылевой структуры, так и от параметров самого разряда. Этот факт отражает самосогласованный характер процессов взаимодействия газоразрядной плазмы с пылевой структурой. При более высоком давлении газа введение микрочастиц в разряд приводит к большим потерям энергии плазмы на поверхности пылевых частиц, складывающимся из потерь заряженных частиц и потери энергии возбуждения метастабильных атомов. Это требует большего повышения напряжённости продольного электрического поля, необходимого для поддержания тока разряда. Вклад пылевых частиц в изменение электрического поля при взаимодействии

плазмы с пылевыми частицами отражает значение напряжённости продольного электрического поля с пылевыми частицами, нормированное к значению электрического поля в разряде без пылевых частиц  $E_d/E$ .

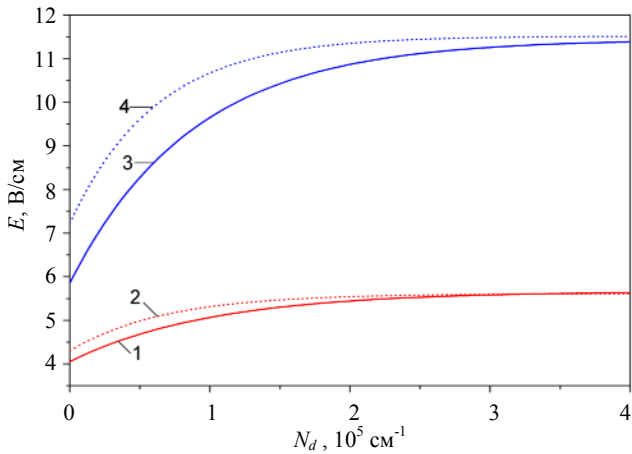


Рис. 3. Напряжённость продольного электрического поля  $E$  в зависимости от погонной плотности пылевых частиц  $N_d$  при различных давлениях неона, Па: 47 (линии 1 и 2), 120 (линии 3 и 4) и разных токах разряда, mA: 0,5 (линии 2 и 4), 3 (линии 1 и 3).

Из результатов расчёта видно, что с увеличением давления газа возникает более сильная зависимость  $E_d/E$  от величины тока разряда (рис. 4, линии 1–4). Из анализа вклада и потерь различных компонент плазмы следует, что это обусловлено возрастанием вклада процессов ступенчатой и химионизации в полный ионизационный баланс плазмы. В разряде без пылевых частиц эти процессы могут определять отклонения от теории Шоттки экспериментальных данных при возрастании тока разряда. В присутствии пылевых частиц к этим процессам добавляется гибель на пылевых частицах метастабильных атомов, концентрация которых с ростом давления газа и тока разряда повышается.

Роль метастабильных атомов во взаимодействии плазмы с пылевыми частицами может быть определена количественно при сравнении их вклада в ионизацию  $W^+ = (k_{im}n_e n_m + k_{mm}n_m^2)/(k_i n_e n_a + k_{im}n_e n_m + k_{mm}n_m^2)$  и вклада плазменных потерь на пылевых частицах  $W^- = (J_{dm}n_d)/(J_{dm}n_d + J_{de}n_d)$ . Здесь  $n_{a,i,e,m}$  — концентрации атомов, ионов, электронов и метастабильных атомов,  $J_{de}$  и  $J_{dm}$  — потоки электронов и метастабильных атомов на пылевые частицы,  $k_i$  and  $k_{im}$  константы ионизации с основного и метастабильного уровня и  $k_{mm}$  константа химионизации. Расчёт показал, что  $W^+ > W^-$  [29] и отношение  $W^+/W^-$  растёт с увеличением давления (рис. 4, линии 5–8), аналогично зависимости вклада метастабильных атомов в ионизацию в разряде без пылевых частиц. Метастабильные

атомы дают более высокий вклад в ионизацию, чем в плазменные потери при взаимодействии с пылевыми частицами. При давлении 120 Па и токе разряда 3 mA расчёт даёт более чем удвоенный вклад метастабильных атомов в ионизацию с пылевыми частицами при их погонной плотности  $4 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ . Несмотря на то, что метастабильные атомы представляют собой источник плазменных потерь на пылевых частицах, их относительный вклад в ионизацию может превышать их гибель при взаимодействии с пылевыми частицами.

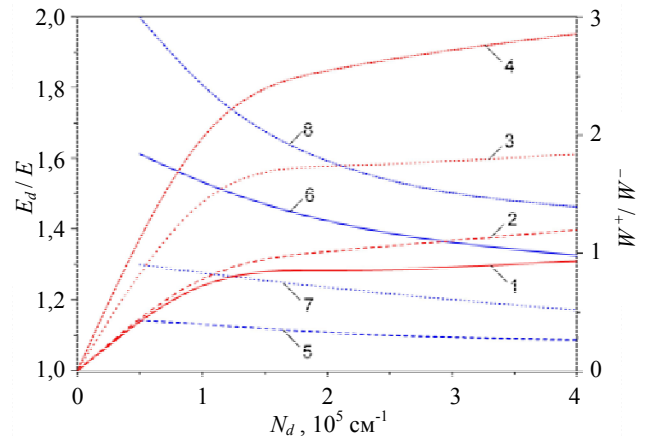


Рис. 4. Нормированная напряжённость продольного электрического поля  $E_d/E$  (линии 1–4) и отношение вклада метастабильных атомов неона в ионизацию к потерям плазмы  $W^+/W^-$  (линии 5–8) в зависимости от погонной плотности пылевых частиц  $N_d$  при различных давлениях неона, Па: 46,7 (линии 1, 2, 5, 6), 120 (линии 3, 4, 7, 8) и разных токах разряда, mA: 0,5 (линии 1, 3, 5, 7), 3 (линии 2, 4, 6, 8).

На рис. 5 показаны радиальные распределения заряда на частицах  $Z_d$  и объёмной плотности заряда пылевых частиц  $Z_d n_d$  при различных значениях концентрации частиц пыли. Наблюдается, что при возрастании концентрации пылевых частиц и соответствующем перераспределении электронной концентрации в разряде пылевые частицы, расположенные вблизи границы пылевой структуры, приобретают более высокий заряд. Это приводит к более сильному взаимному отталкиванию частиц вблизи границы пылевой структуры и изменению условия равновесия на её границах [58]. Заряд частиц самосогласованным образом определяется как параметрами разряда, так и их концентрацией. Обеднение электронной плотности внутри пылевой структуры при возрастании  $n_d$  приводит к снижению заряда пылевых частиц внутри пылевой структуры и возрастанию объёмной плотности заряда в непосредственной близости от границы пылевого облака. В рамках данной модели, увеличение объёмной плотности заряда у границы связано с немонотонным изменением заряда на пылевых частицах при различных ради-

альных координатах и достижением локальных максимумов (кривые 2 и 3) на границе в области высокой плотностью электронов. Снижение объёмной плотности заряда при росте концентрации пылевых частиц может наблюдаться при учёте вторичной или фотоэмиссии с поверхности пылевых частиц в тех случаях, где эти процессы могут иметь место [24] и при существенном вкладе этих процессов в баланс плазмы.

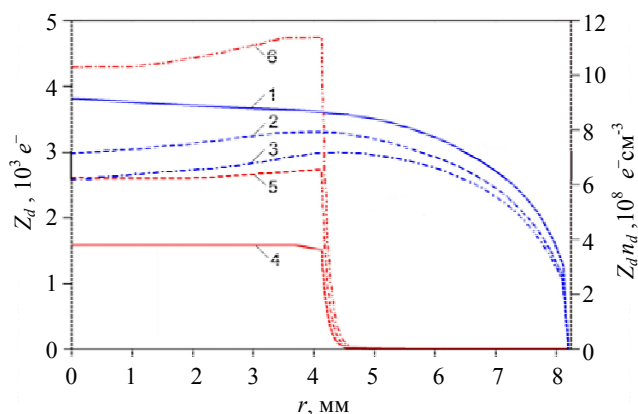


Рис. 5. Радиальные распределения заряда  $Z_d$  (кривые 1, 2, 3) и объёмной плотности заряда  $Z_d n_d$  (линии 4, 5, 6) пылевых частиц при давлении 120 Па, токе 0.5 мА для разных концентраций пылевых частиц,  $10^5 \text{ см}^{-3}$ : 1 (линии 1, 4), 2 (линии 2, 5), 4 (линии 3, 6).

Расчёт по предложенной модели электрофизических параметров плазмы с пылевыми частицами находится в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными. Это согласие получено для случая 100%-вероятности тушения метастабильных атомов неона на поверхности пылевых частиц, которое было принято в данной постановке задачи.

### Заключение

Экспериментально получены значения приращений продольного электрического поля в положительном столбе тлеющего разряда постоянного тока в неоне с пылевыми частицами при различных значениях тока разряда и проведён расчёт этих значений в рамках диффузионно-дрейфовой модели с учётом взаимодействия пылевых частиц с электронами, ионами и метастабильными атомами. Эксперимент и моделирование показали, что приращение напряжённости продольного электрического поля в положительном столбе тлеющего разряда, вызванное пылевыми частицами, зависит от числа пылевых частиц, концентрации пылевых частиц, погонной плотности частиц и от параметров тлеющего разряда. Приращение электрического поля в положитель-

ном столбе разряда при малом числе частиц в пылевой структуре пропорционально погонной плотности пылевых частиц. При большом числе частиц в более плотной пылевой структуре эта величина зависит от концентрации пылевых частиц и стремится к насыщению. Относительное возрастание величины напряжённости продольного электрического поля, обусловленное наличием пылевых частиц, увеличивается с ростом тока и ростом давления газа, что связано с возрастанием вклада процессов ступенчатой и химионизации в полный ионизационный баланс плазмы. Заряд пылевых частиц уменьшается с увеличением концентрации частиц в пылевом облаке, тем не менее, при этом объёмная плотность заряда увеличивается.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-02-00991).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Shukla P. K., Eliasson B. // Rev. Mod. Phys. 2009. Vol. 81. P. 25.
2. Vladimirov S. V., Ostrikov K. // Phys. Rep. 2004. Vol. 393. P. 175.
3. Ostrikov K., Cvelbar U., Murphy A. B. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. Vol. 44. P. 174001.
4. Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Nefedov A. P., Polyakov D. N. // High Temp. 2000. Vol. 38. No. 5. P. 675.
5. Balabanov V. V., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Nefedov A. P., Polyakov D. N., Fortov V. E. // J. Exp. Theor. Phys. 2001. Vol. 92. No. 1. P. 86.
6. Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Polyakov D. N., Fortov V. E. // J. Exp. Theor. Phys. 2002. Vol. 94. No. 3. P. 521.
7. Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Zimnukhov V. S., Polyakov D. N., Fortov V. E. // J. Exp. Theor. Phys. 2003. Vol. 96. No. 3. P. 436.
8. Kersten H., Thieme G., Frohlich M., Bojic D., Tung D. H., Quaas M., Wulff H., Hippler R. // Pure Appl. Chem. 2005. Vol. 77. No. 2. P. 415.
9. Vasilyak L. M., Vasiliev M. N., Vetchinin S. P., Polyakov D. N., Fortov V. E. // Tech. Phys. Lett. 2005. Vol. 31. No. 10. P. 827.
10. Mikikian M., Couedel L., Cavarroc M., Tessier Y., Boufendi L. // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2010. Vol. 49. P. 13106.
11. Boufendi L., Jouanny M. Ch., Kovacevic E., Berndt J., Mikikian M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. Vol. 44. 174035.
12. Polyakov D. N., Vasilyak L. M., Shumova V. V. // Surf. Eng. Appl. Elect. 2015. Vol. 51. No. 2. P. 143.
13. Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M. // Surf. Eng. Appl. Elect. 2013. Vol. 49. No. 2. P. 114.
14. Goertz I., Greiner F., Piel A. // Phys. Plasmas 2011. Vol. 18. P. 013703.
15. Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Polyakov D. N., Fortov V. E. // J. Exp. Theor. Phys. 2005. Vol. 100. No. 5. P. 1029.
16. Polyakov D. N., Vasilyak L. M., Shumova V. V., Fortov V. E. // Phys. Lett. A. 2011. Vol. 375. P. 3300.
17. Vasilyak L. M., Polyakov D. N., Shumova V. V. // Contrib. Plasma Phys. 2013. Vol. 53. No. 4-5. P. 432.
18. Abbas Q. A. // Journal of Application or Innovation in Engineering & Management. 2013. Vol. 2. Is. 12. P. 470.
19. Vasilyak L. M., Polyakov D. N., Fortov V. E., Shumova V. V. // High Temp. 2011. Vol. 49. No. 5. P. 623.

20. Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M. // Rom. Rep. Phys. 2015. Vol. 67. No. 3. P. 1040.
21. Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M. // IEEE T. Plasma Sci. 2014. Vol. 42. Is. 10. P. 2684.
22. Abbas Q. A., Edan R. A. H. // System Eng. & Tech. Journal. 2013. Vol. 31. Part B. No. 5. P. 633.
23. Arnas C., Michau A., Lombardi G., Couëdel L., Kumar K. K. // Phys. Plasmas. 2013. Vol. 20. P. 013705.
24. Kumar K. K., Couëdel L., Arnas C. // Phys. Plasmas. 2013. Vol. 20. P. 043707.
25. Boufendi L., Gaudin J., Huet S., Viera G., Dudemaine M. // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 79. P. 4301.
26. Wattiaux G., Boufendi L. // Phys. Plasmas. 2012. Vol. 19. P. 033701.
27. Sukhinin G. I., Fedoseev A. V., Ramazanov T. S., Aman-galiyeva R. Zh., Dosbalayev M. K., Jumabekov A. N. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. Vol. 41. P. 245207.
28. Pikalev A. A., Luizova L. A. // Ukr. J. Phys. 2014. Vol. 59. No. 4. P. 375.
29. Shumova V. V., Polyakov D. N., Vasilyak L. M. // J. Phys.: Conf. Series. 2015. Vol. 653. P. 012132.
30. Shumova V. V., Polyakov D. N., Vasilyak L. M. // Plasma Sources Sci. T. 2014. Vol. 23. P. 065008.
31. Fedoseev A. V., Sukhinin G. I. // Ukr. J. Phys. 2011. Vol. 56. No. 12. P. 1272.
32. Sukhinin G. I., Fedoseev A. V., Antipov S. N., Petrov O. F., Fortov V. E. // Phys. Rev. E. 2013. Vol. 87. P. 013101.
33. Denysenko I., Stefanovic I., Sikimic B., Winter J., Azarenkov N. A., Sadeghi N. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. Vol. 44. P. 205204.
34. Orazbayev S. A., Jumagulov M. N., Dosbolayev M. K., Silamiya M., Ramasanov T. S., Boufendi L. // AIP Conf. Proc. 2011. Vol. 1397. P. 379.
35. Do H. T., Kersten H., Hippler R. // New J. Phys. 2008. Vol. 10. P. 053010.
36. Killer C., Bandelow G., Matyash K., Schneider R., Melzer A. // Phys. Plasmas. 2013. Vol. 20. P. 083704.
37. Stefanovic I., Sadeghi N., Winter J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. Vol. 43. P. 152003.
38. Bouchoule A., Boufendi L. // Plasma Sources Sci. T. 1994. Vol. 3. P. 292.
39. Layden B., Cheung V., Samarian A. // IEEE T. Plasma Sci. 2011. Vol. 39. No. 11. P. 2762.
40. Mitic S., Pustyl'nik M. Y., Morfill G. E. // New J. Phys. 2009. Vol. 11. P. 083020.
41. Denysenko I., Berndt J., Kovacevic E., Stefanovic I., Se-lenin V., Winter J. // Phys. Plasmas. 2006. Vol. 13. P. 073507.
42. Melzer A., Hubner S., Lewerentz L., Matyash K., Schneider R., Ikkurthi R. // Phys. Rev. E. 2011. Vol. 83. P. 036411.
43. Do H. T., Sushkov V., Hippler R. // New J. Phys. 2009. Vol. 11. P. 033020.
44. Schweigert I. V., Alexandrov A. L. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. Vol. 45. P. 325201.
45. Michau A., Lombardi G., Delacqua L. C., Redolfi M., Arnas C., Jestin P., Bonnin X., Hassouni K. // Plasma Chem. Plasma P. 2012. Vol. 32. P. 451.
46. Totsuji H. // Phys. Lett. A. 2016. Vol. 380. P. 1442.
47. Totsuji H. // Plasma Phys. Contr. F. 2016. Vol. 58. No. 4. P. 045010.
48. Hagelaar G. J. M., Pitchford L. C. // Plasma Sources Sci. Technol. 2005. Vol. 14. P. 722.
49. Alves L. L., Bartschat K., Biagi S. F., Bordage M. C., Pitchford L. C., Ferreira C. M., Hagelaar G. J. M., Morgan W. L., Pancheshnyi S., Phelps A. V., Puech V., Zatsarinny O. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. Vol. 46. P. 334002.
50. D'yachkov L. G., Khrapak A. G., Khrapak S. A., Mor-fill G. E. // Phys. Plasmas. 2007. Vol. 14. P. 042102.
51. Bindemann T., Tichy M., Behnke J. F., Deutsch H., Becker K. // Rev. Sci. Instrum. 1998. Vol. 69. No. 5. P. 2037.
52. Барзилович К. А., Дятко Н. А., Ионих И. З., Меца-нов А. В., Напартович А. П. / Сборник Материалов Всероссийской (с международным участием) конференции (ФНТП-2011) «Физика низкотемпературной плазмы» (Петрозаводск. 2011). С. 20—23.
53. Dyatko N. A., Ionikh Yu. Z., Meshchanov A. V., Napar-tovich A. P., Barzilovich K. A. // Plasma Phys. Rep. 2010. Vol. 36. No. 12. P. 1040.
54. Ermolenko M. A., Dzlieva E. S., Karasev V. Yu., Pav-lov S. I., Polishchuk V. A., Gorbenko A. P. // Tech. Phys. Lett. 2015. Vol. 41. No. 12. P. 1199.
55. Karasev V. Yu., Polishchuk V. A., Gorbenko A. P., Dzlieva E. S., Ermolenko M. A., Makar M. M. // Phys. Solid State. 2016. Vol. 58. Is. 5. P. 1041.
56. Semenov A. V., Khakhaev A. D., Shcherbina A. I., Velichko A. A. // J. Surf. Invest.-X-Ray. 2012, Vol. 6. No. 1. P. 137.
57. Семенов А. В., Перамент А. Л., Цербина А. И., Пу-калев А. А. // Прикладная физика. 2016. № 2. С. 66.
58. Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M., For-tov V. E. // Phys. Scr. 2010. Vol. 82. P. 055501.
59. Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M. // Dig. J. Nanomater. Bios. 2014. Vol. 9. No. 3. P. 1249.
60. Kreher J., Stern W. // Contrib. Plasma Phys. 1989. Vol. 29. No. 6. P. 643.

## Positive column of glow discharge in neon with charged microparticles (a review)

*D. N. Polyakov, V. V. Shumova, and L. M. Vasilyak*

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences  
Bld. 2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia  
E-mail: cryolab@ihed.ras.ru

Received June 09, 2016

**Experimentally and numerically is studied the effect of charged dust particles of micron size on the electrical parameters of the positive column of a low pressure dc glow discharge in neon. Numerical analysis is carried out in frames of the discharge plasma model in the diffusion-drift approximation, taking into account the interaction of dust particles with metastable neon atoms. In the discharge**



*with the cloud of dust particles, the longitudinal electric field strength increases. With the increase in the concentration of dust particles in the axisymmetric cylindrical dust cloud, the increment of the electric field strength reaches the saturation. It is shown that the contribution of metastable atoms in the ionization is higher in the discharge with dust particles, despite the quenching of metastable atoms on dust particles. The processes of charging of the dust particles and the dust cloud are considered. With the increase of dust particle concentration their charge decreases, however, the space charge of the dust cloud increases. The results can be used in the field of plasma technologies with microparticles.*

PACS: 52.27.Lw; 52.50.Nr.

*Keywords:* dusty plasma, glow discharge, neon, electric field strength, current-voltage characteristic, drift-diffusion model, metastable atom, dust particle charge.

#### REFERENCES

1. P. K. Shukla, B. Eliasson, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 25 (2009).
2. S. V. Vladimirov and K. Ostrikov, *Phys. Rep.* **393**, 175 (2004).
3. K. Ostrikov, U. Cvelbar, and A. B. Murphy, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44**, 174001 (2011).
4. L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, A. P. Nefedov, and D. N. Polyakov, *High Temp.* **38** (5), 675 (2000).
5. V. V. Balabanov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, A. P. Nefedov, D. N. Polyakov, and V. E. Fortov, *J. Exp. Theor. Phys.* **92** (1), 86 (2001).
6. L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, D. N. Polyakov, and V. E. Fortov, *J. Exp. Theor. Phys.* **94** (3), 521 (2002).
7. L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. S. Zimmukhov, D. N. Polyakov, and V. E. Fortov, *J. Exp. Theor. Phys.* **96** (3), 436 (2003).
8. H. Kersten, G. Thieme, M. Frohlich, D. Bojic, D. H. Tung, M. Quaas, H. Wulff, and R. Hippler, *Pure Appl. Chem.* **77** (2), 415 (2005).
9. L. M. Vasilyak, M. N. Vasiliev, S. P. Vetchinin, D. N. Polyakov, and V. E. Fortov, *Tech. Phys. Lett.* **31** (10), 827 (2005).
10. M. Mikikian, L. Couedel, M. Cavarroc, Y. Tessier, and L. Boufendi, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **49**, 13106 (2010).
11. L. Boufendi, M. Ch. Jouanny, E. Kovacevic, J. Berndt, and M. Mikikian, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44**, 174035 (2011).
12. D. N. Polyakov, L. M. Vasilyak, and V. V. Shumova, *Surf. Eng. Appl. Elect.* **51** (2), 143 (2015).
13. D. N. Polyakov, V. V. Shumova, and L. M. Vasilyak, *Surf. Eng. Appl. Elect.* **49** (2), 114 (2013).
14. I. Goertz and F. Greiner, *A. Piel, Phys. Plasmas.* **18**, 013703 (2011).
15. L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, D. N. Polyakov, and V. E. Fortov, *J. Exp. Theor. Phys.* **100** (5), 1029 (2005).
16. D. N. Polyakov, L. M. Vasilyak, V. V. Shumova, and V. E. Fortov, *Phys. Lett. A.* **375**, 3300 (2011).
17. L. M. Vasilyak, D. N. Polyakov, and V. V. Shumova, *Contrib. Plasma Phys.* **53** (4-5), 432 (2013).
18. Q. A. Abbas, *Journal of Application or Innovation in Engineering & Management.* **2** (12), 470 (2013).
19. L. M. Vasilyak, D. N. Polyakov, and V. E. Fortov, V. V. Shumova, *High Temp.* **49** (5), 623 (2011).
20. D. N. Polyakov, V. V. Shumova, and L. M. Vasilyak, *Rom. Rep. Phys.* **67** (3), 1040 (2015).
21. D. N. Polyakov, V. V. Shumova, and L. M. Vasilyak, *IEEE T. Plasma Sci.* **42** (10), 2684 (2014).
22. Q. A. Abbas and R. A. H. Edan, *System Eng. & Tech. Journal.* **31B** (5), 633 (2013).
23. C. Arnas, A. Michau, G. Lombardi, L. Couedel, and K. K. Kumar, *Phys. Plasmas.* **20**, 013705 (2013).
24. K. K. Kumar, L. Couedel, and C. Arnas, *Phys. Plasmas.* **20**, 043707 (2013).
25. L. Boufendi, J. Gaudin, S. Huet, G. Viera, and M. Dudenaine, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 4301 (2001).
26. G. Wattiaux and L. Boufendi, *Phys. Plasmas.* **19**, 033701 (2012).
27. G. I. Sukhinin, A. V. Fedoseev, T. S. Ramazanov, R. Zh. Amangaliyeva, M. K. Dosbalayev, and A. N. Jumabekov, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 245207 (2008).
28. A. A. Pikalev and L. A. Luizova, *Ukr. J. Phys.* **59** (4), 375 (2014).
29. V. V. Shumova, D. N. Polyakov, and L. M. Vasilyak, *J. Phys.: Conf. Series.* **653**, 012132 (2015).
30. V. V. Shumova, D. N. Polyakov, and L. M. Vasilyak, *Plasma Sources Sci. T.* **23**, 065008 (2014).
31. A. V. Fedoseev and G. I. Sukhinin, *Ukr. J. Phys.* **56** (12), 1272 (2011).
32. G. I. Sukhinin, A. V. Fedoseev, S. N. Antipov, O. F. Petrov, and V. E. Fortov, *Phys. Rev. E.* **87**, 013101 (2013).
33. I. Denysenko, I. Stefanovic, B. Sikimic, J. Winter, N. A. Azarenkov, and N. Sadeghi, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44**, 205204 (2011).
34. S. A. Orazbayev, M. N. Jumagulov, M. K. Dosbolayev, M. Silamiya, T. S. Ramasanov, and L. Boufendi, *AIP Conf. Proc.* **1397**, 379 (2011).
35. H. T. Do, H. Kersten, and R. Hippler, *New J. Phys.* **10**, 053010 (2008).
36. C. Killer, G. Bandelow, K. Matyash, R. Schneider, and A. Melzer, *Phys. Plasmas.* **20**, 083704 (2013).
37. I. Stefanovic and N. Sadeghi, *J. Winter, J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 152003 (2010).
38. A. Bouchoule and L. Boufendi, *Plasma Sources Sci. T.* **3**, 292 (1994).
39. B. Layden, V. Cheung, and A. Samarian, *IEEE T. Plasma Sci.* **39** (11), 2762 (2011).
40. S. Mitic, M. Y. Pustynnik, and G. E. Morfill, *New J. Phys.* **11**, 083020 (2009).
41. I. Denysenko, J. Berndt, E. Kovacevic, I. Stefanovic, and V. Selenin, *J. Winter Phys. Plasmas.* **13**, 073507 (2006).
42. A. Melzer, S. Hubner, L. Lewerentz, K. Matyash, R. Schneider, and R. Ikkurthi, *Phys. Rev. E.* **83**, 036411 (2011).
43. H. T. Do, V. Sushkov, and R. Hippler, *New J. Phys.* **11**, 033020 (2009).
44. I. V. Schweigert and A. L. Alexandrov, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45**, 325201 (2012).

45. A. Michau, G. Lombardi, L. C. Delacqua, M. Redolfi, C. Arnas, P. Jestin, X. Bonnin, and K. Hassouni, *Plasma Chem. Plasma P.* **32**, 451 (2012).
46. H. Totsuji, *Phys. Lett. A.* **380**, 1442 (2016).
47. H. Totsuji, *Plasma Phys. Contr. F.* **58** (4), 045010 (2016).
48. G. J. M. Hagelaar and L. C. Pitchford, *Plasma Sources Sci. Technol.* **14**, 722 (2005).
49. L. L. Alves, K. Bartschat, S. F. Biagi, M. C. Bordage, L. C. Pitchford, C. M. Ferreira, G. J. M. Hagelaar, W. L. Morgan, S. Pancheshnyi, A. V. Phelps, V. Puech, and O. Zatsarinny, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46**, 334002 (2013).
50. L. G. D'yachkov, A. G. Khrapak, S. A. Khrapak, and G. E. Morfill, *Phys. Plasmas.* **14**, 042102 (2007).
51. T. Bindemann, M. Tichy, J. F. Behnke, H. Deutsch, and K. Becker, *Rev. Sci. Instrum.* **69** (5), 2037 (1998).
52. K. A. Barzilovich, N. A. Dyatko, Yu. Z. Ionikh, A. V. Meshchanov, and A. P. Napartovich, in *Proc. Russian conference on Physics of low temperature plasma* (Petrozavodsk, 2011), V. 2, pp. 20–23.
53. N. A. Dyatko, Yu. Z. Ionikh, A. V. Meshchanov, A. P. Napartovich, and K. A. Barzilovich, *Plasma Phys. Rep.* **36** (12), 1040 (2010).
54. M. A. Ermolenko, E. S. Dzlueva, V. Yu. Karasev, S. I. Pavlov, V. A. Polishchuk, and A. P. Gorbenko, *Tech. Phys. Lett.* **41** (12), 1199 (2015).
55. V. Yu. Karasev, V. A. Polishchuk, A. P. Gorbenko, E. S. Dzlueva, M. A. Ermolenko, and M. M. Makar, *Phys. Solid State.* **58** (5), 1041 (2016).
56. A. V. Semenov, A. D. Khakhaev, A. I. Shcherbina, and A. A. Velichko, *J. Surf. Invest.-X-Ray.* **6** (1), 137 (2012).
57. A. V. Semenov, A. L. Pergament, A. I. Scherbina, and A. A. Pikalev, *Prikladnaya Fizika (Applied Physics)*. **2**, 66 (2016).
58. D. N. Polyakov, V. V. Shumova, L. M. Vasilyak, and V. E. Fortov, *Phys. Scr.* **82**, 055501 (2010).
59. D. N. Polyakov, V. V. Shumova, and L. M. Vasilyak, *Dig. J. Nanomater. Bios.* **9** (3), 1249 (2014).
60. J. Kreher and W. Stern, *Contrib. Plasma Phys.* **29** (6), 643 (1989).