

Генерация трёхатомных ионов дейтерия в разряде с полым катодом*А. В. Визирь, А. Г. Николаев, Е. М. Окс, М. В. Шандриков, Г. Ю. Юшков*

Процесс генерации трёхатомных ионов дейтерия D_3^+ в дейтериевой плазме отражательного разряда с полым катодом исследован в широком диапазоне токов разряда в непрерывном и импульсном режимах. Показано, что при оптимальном токе разряда и давлении дейтерия (~ 100 мА и 1×10^{-4} Торр, соответственно) максимальная доля ионов D_3^+ в плазме может достигать 70 %. При извлечении ионов из плазмы максимальный ток эмиссии ионов D_3^+ составлял 12 мА.

Ключевые слова: отражательный разряд с полым катодом, трёхатомные ионы дейтерия, ионный состав плазмы, время-пролётный анализатор.

Введение

Трёхатомные ионы водорода H_3^+ впервые были обнаружены в работе Томсона [1], а история их дальнейших исследований подробно рассмотрена в обзоре [2]. Ионы H_3^+ наиболее распространены в относительно холодном межзвездном пространстве, и они играют важную роль в протекающих в нем ионно-молекулярных реакций [3]. В лабораторных условиях ионы H_3^+ эффективно образуются в разрядных системах с осциллирующими электронами [4–6], и потоки таких ионов могут представлять интерес в фундаментальных и прикладных исследованиях.

Поскольку сечения ионизации электронным ударом водорода и дейтерия близки [7], то в таких разрядных системах при использовании в качестве рабочего газа дейтерия следует ожидать эффективную генерацию трёхатомных ионов D_3^+ . Несмотря на очевидность этого предположения,

публикации по данному вопросу ограничены работой [8], в которой ток ускоренных трёхатомных ионов дейтерия, отбираемых из плазмы разряда с накаливаемым катодом, не превышал 40 нА.

Целью настоящей работы является исследование процессов генерации ионов D_3^+ в отражательном разряде с полым катодом в широком диапазоне токов разряда, обеспечивающих возможность формирования пучков с существенно более высоким током уровня нескольких миллиампер.

Экспериментальное оборудование

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Плазма изотопа водорода (дейтерия) генерируется в разрядной системе, образованной катодами 1 и 2, электрически соединенными между собой, и анодом 3. Такая разрядная система совмещает в себе ячейки двух разрядов с осциллирующими электронами, а именно, отражательного разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях и разряда с холодным полым катодом [9].

Разрядная система функционирует следующим образом. В полость катода 1 диаметром 4 мм и длиной 30 мм напускается дейтерий. В ряде экспериментов для сравнения параметров разряда и плазмы вместо дейтерия использовался водород. При приложении напряжения между катодами и анодом 3 зажигается отражательный (пеннинговский) разряд и образуется плазма. При достижении определенной плотности плазма отражательного разряда проникает в катодную полость электрода 1, что приводит к появлению эффекта полого катода, заключающегося в осцилляции

Визирь Алексей Вадимович¹, старший научный сотрудник, д.т.н.

Николаев Алексей Геннадьевич¹, старший научный сотрудник, к.т.н.

Окс Ефим Михайлович^{1,2}, зав. лабораторией, зав. кафедрой, д.т.н.

Шандриков Максим Валентинович¹, научный сотрудник, к.т.н.

Юшков Георгий Юрьевич¹, ведущий научный сотрудник, д.т.н.

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН. Россия, 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/3.

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 40.

Тел. +7(3822) 49-17-76. E-mail: nik@opee.hcei.tsc.ru

Статья поступила в редакцию 10 октября 2017 г.

© Визирь А. В., Николаев А. Г., Окс Е. М., Шандриков М. В., Юшков Г. Ю., 2017

электронов в сформированной полостью электростатической ловушке. Магнитное поле создаётся кольцевым постоянным магнитом 4, намагниченным в осевом направлении. Катод 1 выполнен из ферромагнитного материала для предотвращения проникновения в его полость остаточного осевого магнитного поля с целью обеспечения эффекта полого катода. Катод 2 имеет центральное эмис-

сионное отверстие диаметром 2 мм, через которое (при приложении между ним и электродом 5 ускоряющего напряжения величиной до 15 кВ) ведется отбор и ускорение ионов. Электрод 5 находится под потенциалом -300 В относительно «земли» для предотвращения проникновения вторичных электронов из области транспортировки ионного пучка в ускоряющий промежуток.

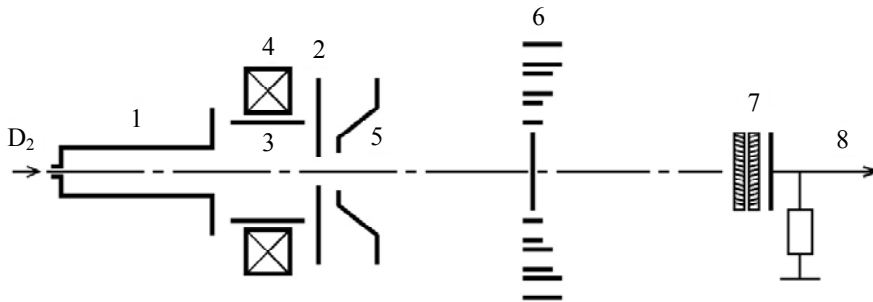


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – полый катод, 2 – катод-отражатель, 3 – анод, 4 – постоянный магнит, 5 – ускоряюще-запирающий электрод, 6 – затвор время-пролётного анализатора, 7 – детектор ионов, 8 – выход сигнала анализатора к осциллографу.

Для обеспечения функционирования разряда в широком диапазоне токов его питание осуществлялось двумя независимо регулируемым источниками питания, которые подключались к разрядному промежутку по отдельности или одновременно. Первый источник обеспечивал горение разряда в непрерывном режиме с током от 0,2 до 60 мА, а второй – в импульсной форме с амплитудой импульса тока от 250 мА до 40 А при длительности импульсов от 10 до 250 мкс и частоте их следования от 20 до 500 Гц. Источники питания были изолированы от «земли» на величину ускоряющего напряжения.

Эксперименты проводились в вакуумной камере диаметром 0,3 м и длиной 2 м, откачиваемой до остаточного давления 2×10^{-6} Торр турбомолекулярным насосом производительностью 900 л/с. Приведённые ниже значения рабочих давлений при напуске газообразных изотопов водорода соответствуют давлению в вакуумной камере. Давление в разрядной системе превышает давление в вакуумной камере, по крайней мере, на 2 порядка величины из-за существования перепада давления на отверстиях в электродах 2 и 5.

Ионный состав плазмы разряда определялся на основе анализа состава извлекаемого из неё пучка времяпролетным масс-спектрометром с радиальным отклонением ионов и вторично-электронным умножителем (ВЭУ) в качестве детектора [10]. Отклоняющий ионы к оси спектрометра импульс напряжения амплитудой 2 кВ и длительностью 150 нс прикладывался между двумя группами концентрических колец затвора спектрометра 6. Разделение ускоренных ионов по массам осуществлялось при их движении от затвора спектрометра 6 до детектора ионов 7 на расстоя-

нии 1,2 м, составлявшим пролётную базу спектрометра. Использование в качестве детектора ионов вторичного электронного умножителя ВЭУ-7М позволило измерить ионный состав плазмы при минимальных токах разряда. При токах разряда, близких к максимальным, для уменьшения потока ионов на детектор использовалась сетка с прозрачностью 1 %, располагающаяся перед входной апертурой ВЭУ.

Одновременно с регистрацией ионного состава извлекаемого из плазмы пучка проводились измерения тока эмиссии ионов из плазмы разряда, который определялся по току в цепи ускоряющего напряжения.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Характерные осциллограммы напряжения и тока на разрядном промежутке в случае функционирования непрерывного разряда в водороде с током 5 мА и при приложении к промежутку импульса напряжения квазипрямоугольной формы, обеспечивающего в течении 40 мкс ток разряда амплитудой около 4 А, представлены на рис. 2. В непрерывном режиме функционирования разряда напряжение его горения составляет величину порядка 600 В (начальный участок осциллограммы 1 рис. 2). При приложении напряжения более 1 кВ приблизительно через 1 мкс ток разряда начинает увеличиваться и достигает значения, заданного источником питания (в данном случае 4 А), а напряжение горения снижается до значений около 400 В. Увеличение тока непрерывного разряда свыше 50 мА также приводило к снижению напряжения горения разряда до этой же величины.

Простые оценки с использованием закона Чайлда–Ленгмюра показывают, что для указанных выше размеров катодной полости для тока на катодную полость 25 мА и напряжения на катодном слое 400 В протяженность катодного падения составляет 2,5 мм, что практически совпадает с радиусом катодной полости. Этим обусловлено формирование эффекта полого катода именно при данном уровне тока.

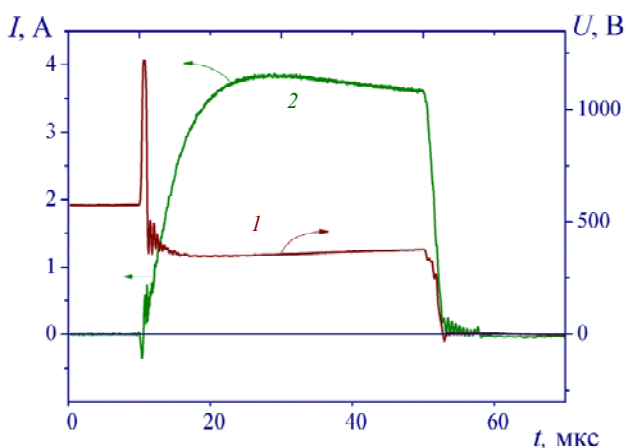


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке (1) и тока разряда (2). Ток непрерывного разряда 5 мА, частота следования импульсов 50 Гц, рабочий газ – водород, давление 5×10^{-5} Торр.

Отметим, что функционирование слаботоочного непрерывного разряда с токами в единицы миллиампер обеспечивало стабильное инициирование сильноточного импульсного разряда. При этом задержка зажигания импульсного разряда во всем исследуемом диапазоне давлений не превышала 2 мкс. Незначительное увеличение напряжения горения в течении импульса тока (осциллограмма 1 рис. 2) связано, по-видимому, с уменьшением концентрации нейтралов газа при его нагреве в разряде.

Сравнительные измерения состава плазмы разряда в случае использования в качестве рабочего газа дейтерия или водорода представлены на рис. 3. Прежде всего следует отметить, что соотношение одно-, двух- и трёхатомных ионов изотопов водорода и дейтерия практически совпадают. Это, как уже отмечалось, связано с практически одинаковыми сечениями ионизации таких ионов, которые слабо зависят от массы ядра элемента и определяются структурой электронных оболочек, одинаковых для водорода и дейтерия.

При использовании дейтерия в качестве рабочего газа, кроме упомянутых одно-, двух- и

трёхатомных ионов дейтерия, наблюдаются ионы с массой 5 а.е.м., что связано с присутствием в плазме незначительного количества трехатомных ионов D_2H^+ , доля которых не превышала 2 % от доли ионов D_3^+ . Появление в плазме ионов D_2H^+ обусловлено наличием в напускаемом в разрядный промежуток газообразном дейтерии небольшой доли примеси водорода, а также присутствием в остаточной атмосфере вакуумной камеры молекул воды, диссоциирующих в плазме разряда в результате столкновений с электронами плазмы.

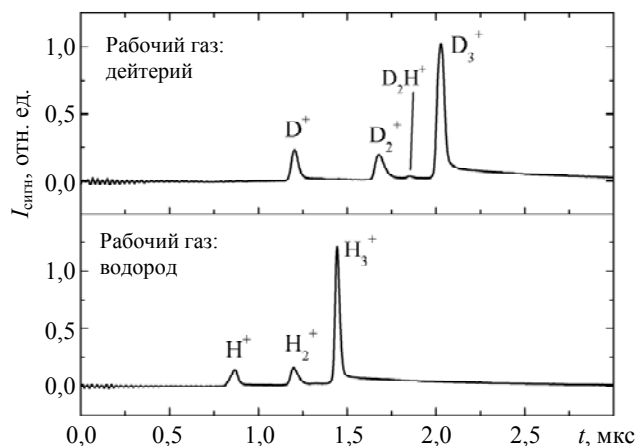


Рис. 3. Ионный состав плазмы разряда для дейтерия (вверху) и водорода (внизу), получаемый по показаниям времяпролетного масс-спектрометра. Рабочие давления - 1×10^{-4} Торр, токи разрядов – 200 мА.

На рис. 4 представлены зависимости ионного состава плазмы (левая ордината) и тока эмиссии ионов D_3^+ (правая ордината) от тока разряда, причем как в непрерывной (левые ветви кривых рис. 4), так и импульсной (правые ветви кривых рис. 4) формах разряда. Доля каждого компонента плазмы определялась как временной интеграл соответствующего пика спектра, нормированный на сумму долей всех ионов плазмы. Каждый спектр являлся результатом усреднения по 16 измерениям. Приведённые на рисунке значения погрешностей определялись как среднеквадратичное отклонение для этих 16 измерений. Для определения тока ионов D_3^+ их доля умножалась на полный ток ускоренных ионов.

Эксперименты показали, что длительность и частота импульсов не оказывали заметного влияния на ионный состав плазмы. Ключевыми параметрами, приводившими к изменению ионного состава плазмы разряда, являлись ток разряда и давление рабочего газа в разрядном промежутке.

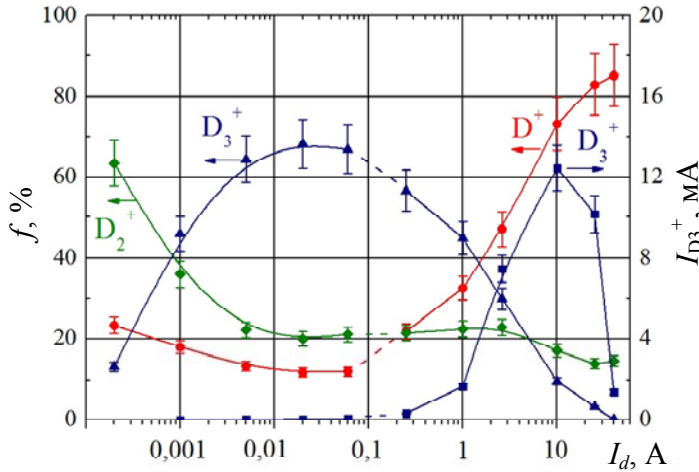
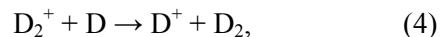
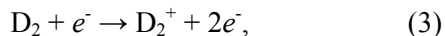
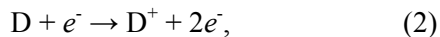
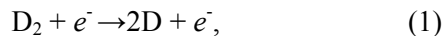


Рис. 4. Зависимости ионного состава плазмы (левая ордината) и тока эмиссии ионов D_3^+ (правая ордината) от тока разряда. Давление $2,5 \times 10^{-5}$ Торр.

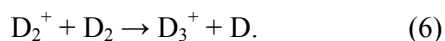
Как следует из анализа зависимостей, представленных на рис. 4, скачкообразного изменения ионного состава плазмы при увеличении тока разряда от 60 до 250 мА, когда реализуется переход от непрерывной формы разряда в импульсную, не наблюдается. Доля ионов D_3^+ возрастает при увеличении тока разряда и достигает максимального значения около 70 % при токе около 20 мА. Отметим, что при этом значении тока разряда происходит снижение долей одно- и двухатомных ионов дейтерия. Дальнейший рост тока разряда ведёт к снижению доли D_3^+ , сопровождающемуся повышением доли, прежде всего, ионов D^+ . При токах выше 3 А начинает снижаться и доля ионов D_2^+ , а ионы D_3^+ практически исчезают при максимальном токе 40 А.

Анализ процессов в плазме

Полученные экспериментальные зависимости ионного состава дейтериевой плазмы обусловлены процессами, аналогичными процессам в водородной плазме [6]. Ионы D^+ и D_2^+ образуются, в основном, в результате следующих реакций, имеющих наибольшие скорости протекания [11, 12]:

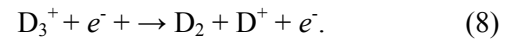
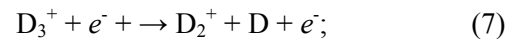


А ионы D_3^+ , аналогично процессу образования ионов H_3^+ [13], появляются в реакции:



Поскольку энергия диссоциации ионов H_3^+ составляет 4,355 эВ [14], а для ионов D_3^+ , очевидно, имеет близкую величину, то распад ионов D_3^+

может осуществляться, как и в случае распада ионов H_3^+ , при столкновении с электронами плазмы как термализованными, так и высокоэнергетичными, т. е. ускоренными в катодном падении потенциала, за счет реакций:



При токе разряда, существенно меньшем 20 мА, когда концентрация плазмы мала, преобладает реакция ионизации молекул D_2 по формуле (3). При токах, существенно превышающих 20 мА, молекулярный дейтерий D_2 диссоциирует на атомы в результате реакции (1) и ионизируется электронным ударом в результате реакции (2). На соотношение долей ионов D^+ и D_2^+ в плазме разряда влияют реакции перезарядки (4) и (5), сечение которых одинаково [11, 12]. В промежуточном случае, т. е. при токах порядка 20 мА, в плазме присутствуют ионы и атомы молекулярного дейтерия в достаточном количестве для протекания реакции (6) с высокой скоростью, обеспечивающей в плазме разряда эффективную генерацию ионов D_3^+ . Дальнейший рост тока разряда ведёт к росту столкновений электронов плазмы с ионами D_3^+ и, как следствие, к их распаду за счет реакций (7) и (8).

Эксперименты показали, что повышение давления до 2×10^{-4} Торр существенно влияет на ионный состав плазмы. Оно приводит к смещению максимума зависимости доли ионов D_3^+ в область больших токов. Полученные в настоящем исследовании зависимости ионного состава плазмы от давления и тока разряда для дейтерия качественно совпадают с аналогичными зависимостями, полученными нами ранее для водорода [6].

Ток эмиссии ионов из плазмы разряда был примерно пропорционален току разряда и составлял 600 мА для максимального тока разряда 40 А.

Однако при таких значениях доля ионов D_3^+ в плазме разряда снижалась до 0,15 %. Поэтому зависимость тока эмиссии ионов D_3^+ от тока разряда (см. рис. 4) имела максимум при токе около 10 А, когда ток эмиссии уже составлял 120 мА, а доля ионов D_3^+ в плазме разряда – 10 %. Таким образом, снижение зависимости тока эмиссии ионов D_3^+ от тока разряда слева от максимума связано с уменьшением полного ионного тока, а её снижение справа от максимума – с быстрым уменьшением доли ионов D_3^+ в плазме разряда.

Заметим, что максимальный ток эмиссии ионов D_3^+ из плазмы разряда составлял около 12 мА, что на несколько порядков величины превышало соответствующее значение тока ионов D_3^+ , полученное ранее в работе [8].

Заключение

В отражательном разряде с полым катодом осуществлена генерация трёхатомных ионов дейтерия. Показано, что ключевыми параметрами, ответственными за генерацию ионов дейтерия в плазме разряда, являются ток разряда и давление дейтерия в разрядном промежутке. Доля трёхатомных ионов дейтерия в плазме разряда при давлении $2,5 \times 10^{-5}$ Торр достигает максимума при токе разряда 20 мА и составляет около 70 %. Максимальный ток эмиссии ионов D_3^+ достигается при токе разряда 10 А и составляет 12 мА. Изучение условий достижения максимальной доли и максимального тока эмиссии ионов D_3^+ в отражательном разряде с полым катодом и генерация плазмы с указанными выше параметрами проведены впервые.

Полученные результаты актуальны для изучения свойств трёхатомных ионов дейтерия или при проведении модельных экспериментов для задач астрофизики, а также для других потенциальных исследовательских и прикладных задач.

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-00484.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thomson J. J. // Philosophical Magazine. 1911. Vol. 21. P. 225.
2. Oka T. The H_3^+ ion. In Book «Molecular ions: spectroscopy, structure and chemistry». Ed. by Miller T. A., and Bondybyey V. E. – Amsterdam, The Netherlands: North Holland. 1983. P. 73–90.
3. Geballe T. R., Oka T. // Nature. 1996. Vol. 384. P. 334.
4. Вересов Л. П., Вересов О. Л. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 10. С. 122.
5. Вересов Л. П., Вересов О. Л., Чачаков А. Ф. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 1. С. 132.
6. Визирь А. В., Окс Е. М., Шандриков М. В., Юшков Г. Ю. // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 3. С. 356.
7. Cowling I. R., Fletcher J. // J. Phys. B: Atom. Molec. Phys. 1973. Vol. 6. P. L258.
8. Application of Accelerators Research and Industry. Ed. by Druggan J. L. and Morgan I. L. (IAP Press, New York, 1997).
9. Oks E. M., Shandrikov M. V., Vizir A. V. // Rev. Sci. Instrum. 2016. Vol. 87. No. 2. P. 02B703.
10. Визирь А. В., Шандриков М. В., Окс Е. М., Юшков Г. Ю. // Изв. Вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 9/3. С. 232.
11. Hjartarson A. T., Thorsteinsson E. G., Gudmundsson J. T. // Plasma Sources Sci. Technol. 2010. Vol. 19. P. 065008.
12. Ichihara A., Iwamoto O., Janev R. K. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2000. Vol. 33. P. 4747.
13. Herbst E. // Phil. Tr. Roy. Soc. A. 2000. Vol. 358. No. 1774. P. 2523.
14. Carrington A., McNab I. R. // Acc. Chem. Res. 1989. Vol. 22. No. 6. P. 218.

PACS: 52.80.Sm

Generation of triatomic deuterium ions in reflective discharge with hollow cathode

A. V. Vizir¹, A. G. Nikolaev¹, E. M. Oks^{1,2}, M. V. Shandrikov¹, and G. Yu. Yushkov¹

¹Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Academicheskoy av., Tomsk, 634055, Russia

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: nik@opee.hcei.tsc.ru

Received October 10, 2017

A process of generation of triatomic deuterium ions D_3^+ in a deuterium plasma of the reflective discharge with hollow cathode is studied in a wide range of the discharge current in a steady-state and

pulsed mode. It is shown that for optimal discharge current and pressure of 100 mA and 1×10^{-4} Torr, respectively, the maximal fraction of D_3^+ ions in the plasma can reach 70 %. When the ions were extracted from the plasma, their maximal current was 12 mA.

Keywords: reflective discharge with hollow cathode, triatomic deuterium ions, plasma ion composition, time-of-flight spectrometer.

REFERENCES

1. J. J. Thomson, *Philosophical Magazine* **21**, 225 (1911).
2. T. Oka *The H_3^+ ion*. In *Book "Molecular ions: spectroscopy, structure and chemistry"*. Ed. by T. A. Miller, and V. E. Bondybey (Amsterdam, The Netherlands: North Holland. 1983), P. 73–90.
3. T. R. Geballe and T. Oka, *Nature* **384**, 334 (1996).
4. L. P. Veresov and O. L. Veresov, *Technical Physics* **48**, 1338 (2003).
5. L. P. Veresov, O. L. Veresov, and A. F. Chachakov, *Technical Physics* **51**, 130 (2006).
6. A. V. Vizir, E. M. Oks, M. V. Shandrikov, and G. Yu. Yushkov, *Technical Physics* **62**, 380 (2017).
7. I. R. Cowling and J. Fletcher, *J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.* **6**, L258 (1973).
8. *Application of Accelerators Research and Industry*. Ed. by J. L. Druggan and I. L. Morgan (IAP Press, New York, 1997).
9. E. M. Oks, M. V. Shandrikov, and A. V. Vizir, *Rev. Sci. Instrum.* **87** (2), 02B703 (2016).
10. A. V. Vizir, M. V. Shandrikov, E. M. Oks, and G. Yu. Yushkov, *Russ. Phys. Journ.* **59** (9/3), 232 (2016).
11. A. T. Hjartarson, E. G. Thorsteinsson, and J. T. Gudmundsson, *Plasma Sources Sci. Technol.* **19**, 065008 (2010).
12. A. Ichihara, O. Iwamoto, and R. K. Janev, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **33**, 4747 (2000).
13. E. Herbst, *Phil. Tr. Roy. Soc. A* **358** (1774), 2523 (2000).
14. A. Carrington and I. R. McNab, *Acc. Chem. Res.* **22** (6), 218 (1989).