04

Транспортные свойства дрейфа электронов в смеси ксенона с парами воды

© Г.Б. Рагимханов[1], Р.И. Голятина[2], С.А. Майоров[3]

[1] Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия
[2] Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия
[3] Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
E-mail: gb-r@mail.ru

Поступило в Редакцию 18 июня 2026 г.
В окончательной редакции 17 июля 2026 г.
Принято к публикации 23 июля 2026 г.

Для смеси ксенона с парами воды путем численного решения уравнения Больцмана в двучленном приближении выполнен расчет транспортных коэффициентов переноса электронов: скорости дрейфа, средней энергии, подвижности и ионизационного коэффициента Таунсенда в диапазоне изменения параметра $E/N = 0.1-100$ Td (отношение напряженности внешнего электрического поля к плотности газа). Определены области полей и концентраций примеси паров H_2O, которые приводят к возникновению отрицательной дифференциальной проводимости.

Ключевые слова: ксенон, пары воды, газовый разряд, скорость дрейфа, электрон, ионизация, двучленное приближение, кинетическое уравнение Больцмана.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.21.63662.20818

Добавка в атомарные газы примесей молекулярных газов (искусственных или естественных загрязнений) приводит к значительному изменению свойств газовых разрядов в них. При добавке в тяжелый инертный газ молекулярных примесей может возникать эффект отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП), который заключается в уменьшении дрейфовой скорости электронов при увеличении напряженности электрического поля [1–4]. Эффект ОДП преимущественно наблюдается в газовых смесях, содержащих молекулярные компоненты [5–10]. В смесях тяжелых инертных газов (Ar, Kr и Xe) с малыми молекулярными примесями основную роль играет наличие минимума Рамзауэра–Таунсенда в сечении упругого рассеяния электронов на атомах. Также известно, что эффект ОДП возникает и в смеси тяжелого инертного газа с гелием [11,12] при высокой относительной плотности возбужденных атомов [13]. При высоких значениях степени ионизации газа кулоновские электрон-электронные столкновения также могут приводить к появлению отрицательной дифференциальной проводимости в чистых аргоне, криптоне и ксеноне [14]. Совместное влияние кулоновских столкновений и процессов с участием возбужденных атомов расширяет область параметров, в которой реализуется ОДП, например, в смеси He–Xe [15].

В работах [16,17] показано, что даже незначительные добавки водяного пара к гелию или аргону могут приводить к ОДП. Отрицательная дифференциальная проводимость может возникать в смесях $He-H_2O$ при мольной доле воды $x_{H_2O} = 0.01$ и 0.02 (1 и 2 mol.%) [16], а также в смесях $Ar-H_2O$ при $x_{H_2O} = 0.02$ и 0.10 (2 и 10 mol.%) [17].

В настоящей работе проведено исследование условий возникновения ОДП в смеси ксенона с парами воды. Для этой цели решалось уравнение Больцмана в двухчленном приближении и вычислялись транспортные характеристики дрейфа электронов в диапазоне отношений напряженности внешнего электрического поля к плотности газа $E/N = 0.1-100$ Td: скорость дрейфа $v_{dr}(E/N)$, подвижность электронов $\mu(E/N)$ и коэффициент диффузии $D_T(E/N)$ поперек электрического поля. Набор сечений рассеяния электронов на атомах ксенона был взят из [18], для молекул воды был использован набор сечений из [19], для учета возбуждения вращательных уровней применялись сечения из [18].

На рис. 1, *a* и *b* представлены рассчитанные зависимости скорости дрейфа и средней энергии электрона от E/N при различном процентном содержании паров воды.

Как видно из рис. 1, *a*, примеси паров воды способны многократно увеличить скорость дрейфа электронов в ксеноне. При этом имеет место условие $\frac{dv_{dr}}{dE} < 0$, средняя энергия электронов остается монотонно возрастающей функцией поля $\frac{d\varepsilon}{dE} > 0$ (рис. 1, *b*).

На рис. 2, *a* приведены характерные зависимости энергетического коэффициента Таунсенда в смеси ксенона с парами воды от поля E/N. Как видно из представленных зависимостей, малые концентрации паров воды (вплоть до 1%) практически не влияют на ионизационные процессы.

На рис. 2, *b* приведены зависимости коэффициента подвижности от E/N при различных концентрациях паров воды, наглядно иллюстрирующие влияние примеси на подвижность.

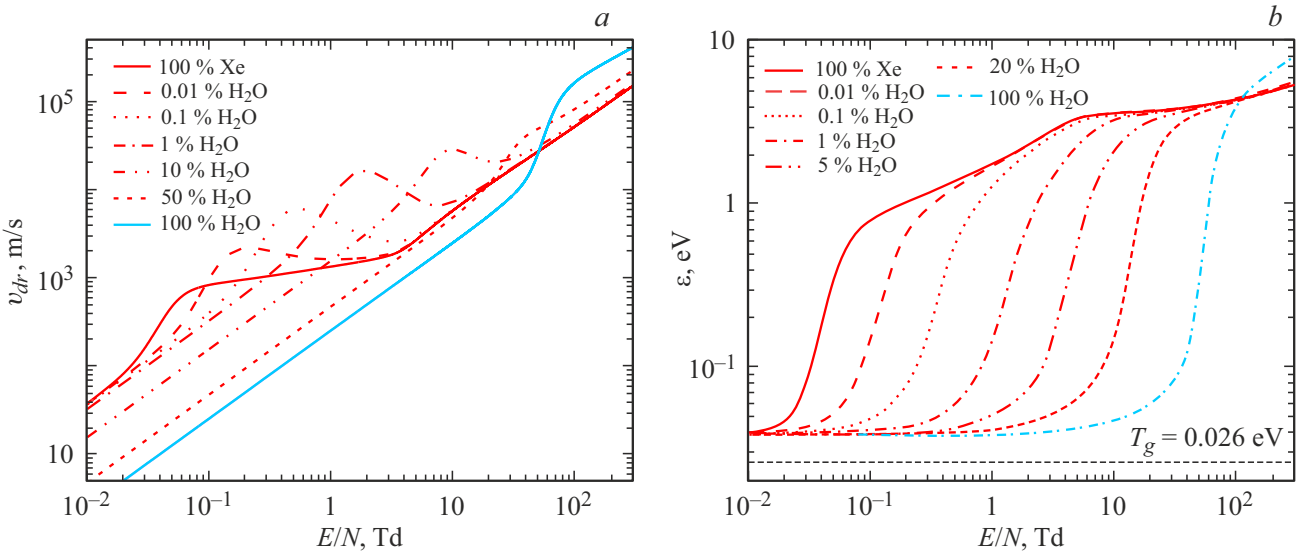


Рис. 1. Зависимости скорости дрейфа (a) и средней энергии электронов (b) от E/N для различных концентраций примесей паров H_2O в Xe.

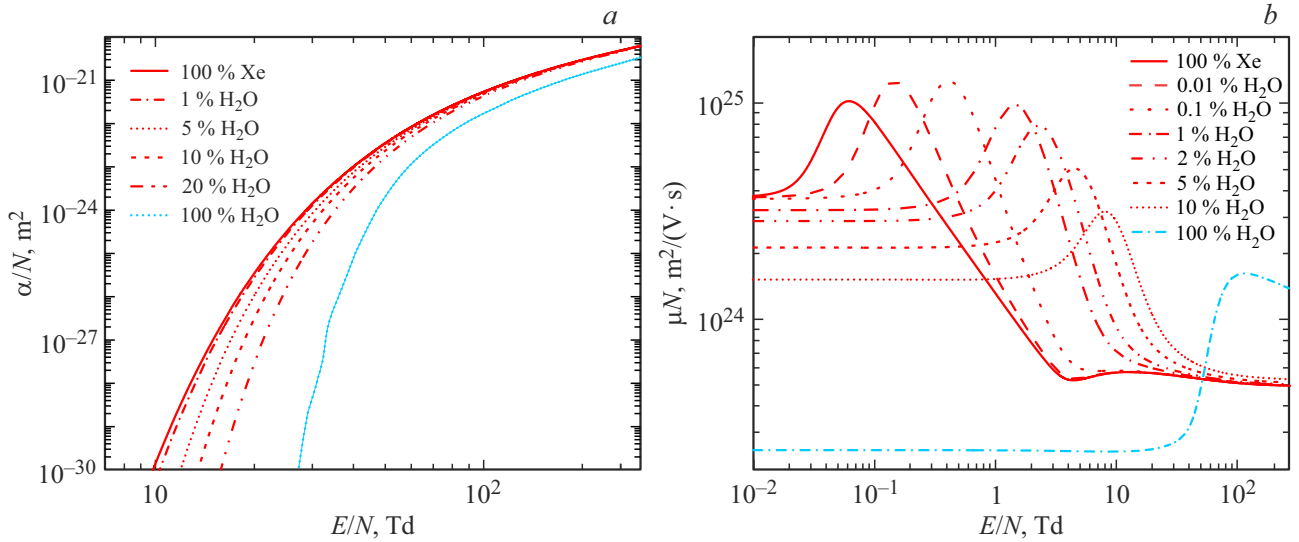


Рис. 2. Зависимости энергетического коэффициента Таунсенда (a) и подвижности (b) в смеси ксенона с парами воды от E/N.

Из анализа результатов численных расчетов следует, что транспортные коэффициенты электронов (подвижность, средняя энергия, коэффициенты диффузии) в смеси с малым количеством примеси воды удовлетворяют правилу подобия по параметру $X \cdot E/N$, где

$$X = \frac{1}{\chi[1-\chi]^{\alpha}}, \quad \alpha \approx 0.42\text{–}0.43, \quad 10^{-4} \leqslant \chi \leqslant 10^{-1},$$

χ — мольная доля H_2O в смеси.

На рис. 3 представлены характерные зависимости подвижности электронов от $X \cdot E/N$. Аналогичные зависимости для смеси ксенона с водородом получены авторами работы [20].

В диапазоне E/N от 0.1 до 100 Td добавки паров воды приводят к уменьшению средней энергии электронов. Зависимости средней энергии электрона от скорости дрейфа (рис. 4, a) наглядно демонстрируют влияние паров воды на транспортные характеристики электрона. Отметим, что значению скорости дрейфа, при котором выполняется условие $\frac{dv_{dr}}{dE} = 0$, соответствует средняя энергия ~ 0.6 eV вне зависимости от процентного содержания паров воды, что соответствует минимуму Рамзауэра в сечениях упругих электрон-атомных столкновений для атома ксенона.

На рис. 4, b приведена область проявления эффекта ОДП в зависимости от E/N в Xe с примесями H_2O. Отметим, что данный эффект проявляется при незна-

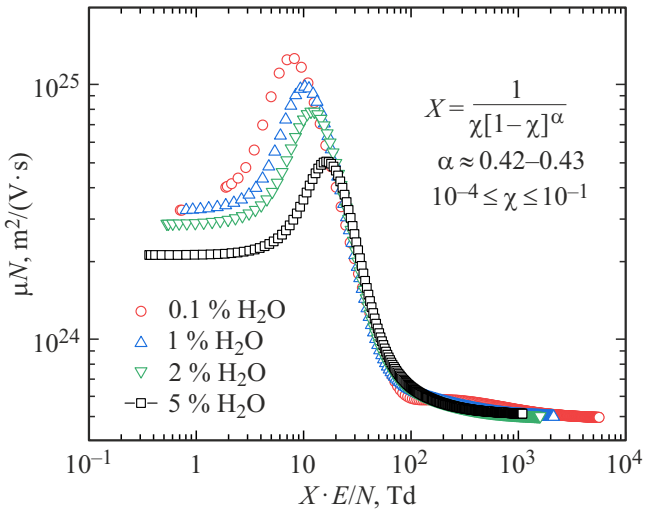


Рис. 3. Подвижность электронов в смеси ксенона с парами воды как функция $X \cdot E/N$.

чительном количестве паров воды (вплоть до тысячных долей процента). Следует обратить внимание на характерную зависимость сечения упругих электрон-атомных столкновений для молекул воды (вставка на рис. 4, *a*), которое в области минимума для ксенона намного больше, чем для Xe ($\sim$ 200 раз).

Наблюдаемая немонотонная зависимость скорости дрейфа электронов от E/N в смеси Xe–H_2O имеет следующий физический механизм.

В чистом ксеноне минимум Рамзауэра–Таунсенда в сечении упругого рассеяния расположен вблизи энергии $\sim$ 0.6 eV. Электроны с такой энергией испытывают минимальное сопротивление при дрейфе. При добавке паров H_2O резко увеличивается суммарное сечение упругих столкновений в области энергий, соответствующих минимуму для Xe. Это приводит к сдвигу функции распределения в область энергий, близких к минимуму Рамзауэра для ксенона. В результате возрастает доля электронов с высокой эффективной подвижностью, и скорость дрейфа увеличивается, несмотря на снижение средней энергии.

При дальнейшем увеличении E/N средняя энергия электронов возрастает и достигает порогов возбуждения колебательных и вращательных уровней молекул воды. Включение этих неупругих каналов резко увеличивает потери энергии и усиливает угловое рассеяние электронов, что приводит к уменьшению продольной составляющей скорости и, как следствие, к снижению скорости дрейфа — формируется область ОДП.

В работе путем численного моделирования переноса электронов в смеси Xe–H_2O показано, что добавки паров воды оказывают существенное влияние на скорость дрейфа и энергетические характеристики электронов в ксеноне. Примеси H_2O приводят к значительному увеличению скорости дрейфа электронов при малых и умеренных значениях E/N, несмотря на уменьшение средней энергии электронов. В смеси Xe–H_2O реализуется область отрицательной дифференциальной проводимости, проявляющаяся уже при крайне малых концентрациях водяного пара.

Полученные результаты расширяют понимание механизмов формирования отрицательной дифференциальной проводимости, а также важны для верификации наборов сечений электронных столкновений.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-22-20090).

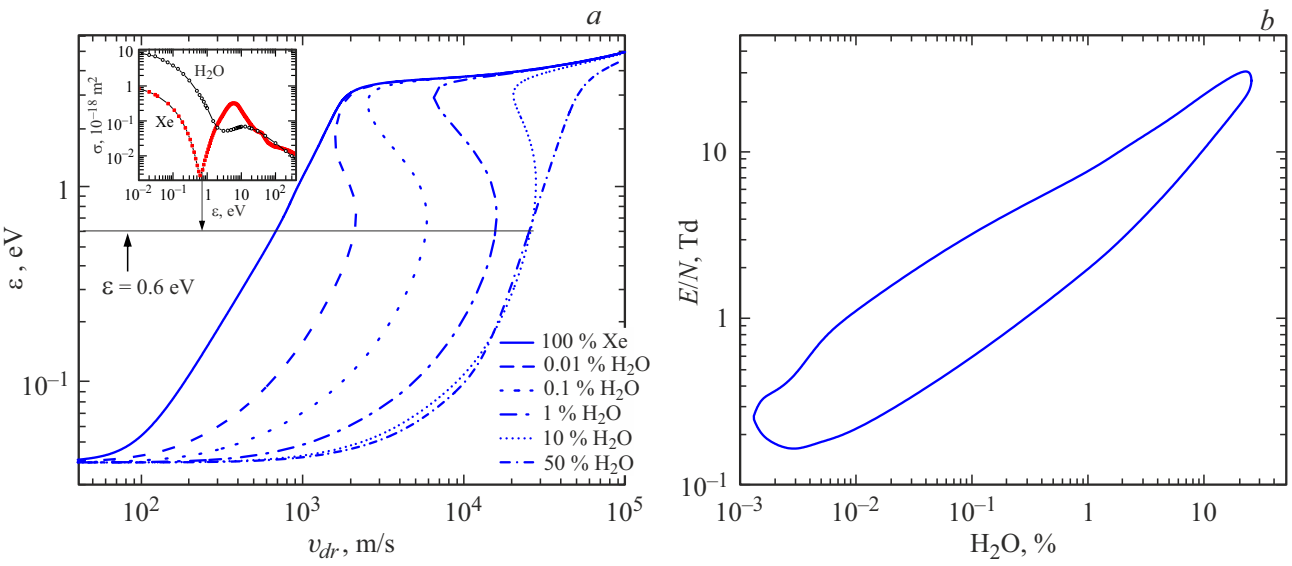


Рис. 4. Зависимости средней энергии электронов от скорости дрейфа (*a*) и область проявления эффекта отрицательной дифференциальной проводимости в зависимости от E/N в Xe с примесями H_2O (*b*).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Z. Donkó, N. Dyatko, Eur. Phys. J. D, **70**, 135 (2016). DOI: 10.1140/epjd/e2016-60726-4
[2] R.E. Robson, Aust. J. Phys., **37** (1), 35 (1984). DOI: 10.1071/PH840035
[3] S.B. Vrhovac, Z.L. Petrović, Phys. Rev. E, **53** (4), 4012 (1996). DOI: 10.1103/PhysRevE.53.4012
[4] J. Mirić, I. Simonović, Z.L. Petrović, R.D. White, S. Dujko, Eur. Phys. J. D, **71**, 289 (2017). DOI: 10.1140/epjd/e2017-80403-4
[5] W.H. Long, Jr., W.F. Bailey, A. Garscadden, Phys. Rev. A, **13** (1), 471 (1976). DOI: 10.1103/PhysRevA.13.471
[6] G.N. Haddad, Aust. J. Phys., **36** (3), 297 (1983). DOI: 10.1071/PH830297A
[7] G.N. Haddad, H.B. Milloy, Aust. J. Phys., **36** (4), 473 (1983). DOI: 10.1071/PH830473
[8] S.R. Hunter, J.G. Carter, L.G. Christophorou, J. Appl. Phys., **58** (8), 3001 (1985). DOI: 10.1063/1.335849
[9] E.L. Patrick, M.L. Andrews, A. Garscadden, Appl. Phys. Lett., **59** (25), 3239 (1991). DOI: 10.1063/1.105744
[10] M. Stano, N. Pinhão, D. Loffhagen, M. Kučera, Z. Donkó, Š. Matejčík, Eur. Phys. J. D, **65**, 489 (2011). DOI: 10.1140/epjd/e2011-20296-7
[11] B. Shizgal, Chem. Phys., **147** (3), 271 (1990). DOI: 10.1016/0301-0104(90)85043-V
[12] R. Nagpal, A. Garscadden, Phys. Rev. Lett., **73** (12), 1598 (1994). DOI: 10.1103/PhysRevLett.73.1598
[13] М.Г. Войтик, А.Г. Молчанов, ЖТФ, **49**, 2289 (1979). [M.G. Voitik, A.G. Molchanov, Sov. Phys. Tech. Phys., **24**, 1293 (1979).].
[14] N.L. Aleksandrov, N.A. Dyatko, I.V. Kochetov, A.P. Napartovich, D. Lo, Phys. Rev. E, **53** (3), 2730 (1996). DOI: 10.1103/PhysRevE.53.2730
[15] N.L. Aleksandrov, D. Lo, I.V. Kochetov, A.P. Napartovich, J. Phys. D, **30** (15), 2217 (1997). DOI: 10.1088/0022-3727/30/15/013
[16] J. de Urquijo, E. Basurto, A.M. Juárez, K.F. Ness, R.E. Robson, M.J. Brunger, R.D. White, J. Chem. Phys., **141** (1), 014308 (2014). DOI: 10.1063/1.4885357
[17] M. Shorifuddoza, M.H. Khandker, G.B. Ragimkhanov, Z.R. Khalikova, P.K. Das, H. Watabe, A.K.F. Haque, M.A. Uddin, Eur. Phys. J. D, **79**, 62 (2025). DOI: 10.1140/epjd/s10053-025-01012-y
[18] TRINITI database [Электронный ресурс]. www.lxcat.net/TRINITI
[19] Hayashi database [Электронный ресурс]. www.lxcat.net/Hayashi
[20] В.М. Атражев, В.В. Дмитренко, И.В. Чернышева, Письма в ЖТФ, **30** (7), 88 (2004). [V.M. Atrazhev, V.V. Dmitrenko, I.V. Chernysheva, Tech. Phys. Lett., **30** (4), 301 (2004). DOI: 10.1134/1.1748606].