

Роль стримеров в формировании коронного разряда при резко неоднородном электрическом поле

В. Ф. Тарасенко^{+,*}, В. С. Кузнецов^{+,1)}, В. А. Панарин⁺, В. С. Скакун⁺, Э. А. Соснин^{+,*}, Е. Х. Бакшт⁺

⁺ Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, 634055 Томск, Россия

^{*} Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия

Поступила в редакцию 7 мая 2019 г.

После переработки 7 мая 2019 г.

Принята к публикации 16 мая 2019 г.

В воздухе атмосферного давления исследовано зажигание коронного разряда на острие, имеющем малый радиус кривизны. Установлено, что в резко неоднородном электрическом поле независимо от полярности напряжения инициирование коронного разряда обусловлено формированием стримеров шаровой формы как при высокой (≥ 10 кВ/мкс), так и при медленной (≤ 0.2 кВ/мс) скорости нарастания напряжения на промежутке игла–плоскость. Показано, что при положительной полярности острия, амплитуда тока через промежуток первых стримеров примерно в два раза меньше, чем при отрицательной полярности, а частота их появления отличается на два и более порядков. Установлено, что с острием отрицательной полярности в области формирования стримеров шаровой формы высокие частоты следования импульсов приводят при одинаковых напряжениях на промежутке к большим средним токам через промежуток и большому размеру наблюдаемой светящейся области.

DOI: 10.1134/S0370274X19130137

Введение. Изучению и применению коронного разряда в воздухе атмосферного давления уделялось [1–3] и продолжает уделяться большое внимание [4–13]. Это обусловлено потерями энергии при возникновении короны в линиях передач электрической энергии и других устройствах, а также широким спектром применений коронного разряда. Известно, что на проводниках с малым радиусом кривизны реализуются различные режимы коронного разряда, в том числе наблюдается стационарная корона [1, 5]. При отрицательной полярности напряжения на острие возникает нестационарная корона и регистрируются импульсы тока (импульсы Тричелла [14]), частота следования которых возрастает при увеличении напряжения [1, 5, 6, 11, 14]. На острие положительной полярности коронный разряд возникает при больших напряжениях, чем при отрицательной полярности [4, 5]. Регистрируемые импульсы тока ряд авторов связывает с формированием стримеров [5, 8].

Образование импульсного коронного разряда также наблюдается при подаче на промежуток острие–плоскость импульсов высокого напряжения короткой длительности с фронтом ~ 1 мкс и менее, см., например, [9, 10, 13, 15–17]. За счет малой длительности им-

пульса напряжения коронный разряд не успевает перейти в диффузный или искровой.

В работе [16] было установлено, что пробой промежутка при высоких скоростях роста напряжения на электроде с малым радиусом кривизны начинается с формирования стримера шаровой формы при обеих полярностях импульса напряжения. При малых амплитудах импульсов напряжения эта стадия пробоя соответствует импульсному коронному разряду. Причем “коронные вспышки” у электрода–острия отрицательной полярности известны давно, см. статью [14] и монографию [1].

Как мы уже отметили, исследования коронного разряда, проведенные при медленном нарастании напряжения на промежутке, показали, что коронный разряд зажигается при более низких напряжениях на отрицательном острие, см., например, [4]. С другой стороны, хорошо известно, что для продвижения катодонаправленного стримера напряженности электрического поля примерно в два раза меньше, чем для анодонаправленного стримера. Эти напряженности составляют в воздухе атмосферного давления соответственно ~ 5 и ~ 10 кВ/см², см. [5], с. 588.

Цель настоящей работы исследовать зажигание коронного разряда в воздухе атмосферного давления при низких напряжениях и высоких напряженностях электрического поля, для достижения которых применялось острие с малым радиусом кривизны.

¹⁾e-mail: robert_smith_93@mail.ru

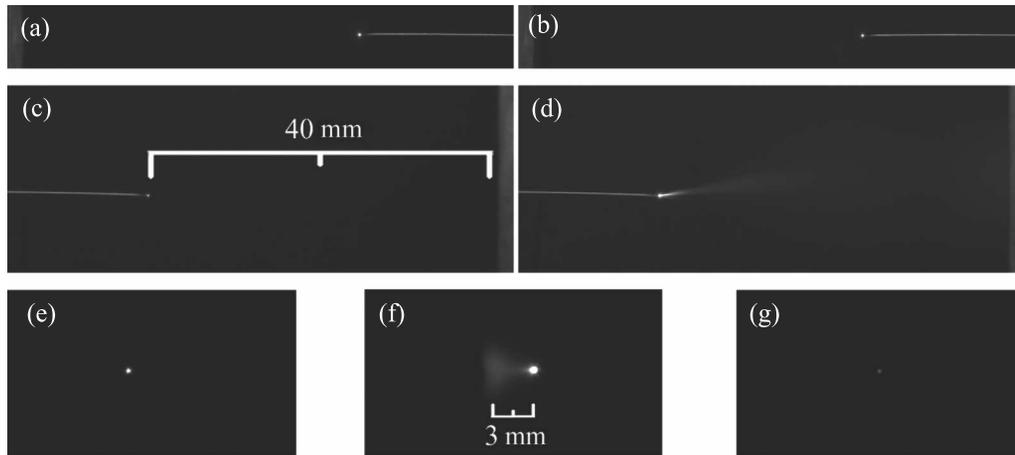


Рис. 1. (Цветной онлайн) Фотографии свечения плазмы, образовавшейся у острия иглы, при межэлектродном зазоре $d = 40$ (a), (b), (c), (d) и 3 мм (e), (f), (g), отрицательном (a), (b), (e), (f) и положительном (c), (d), (g) напряжении U на острие. $U = 2.5$ (e), (g), 3.8 (f), 19.2 (a), (c) и 23.3 кВ (b), (d). При отрицательной полярности острие расположено справа, а при положительной слева. Длительность экспозиции 15 с

Экспериментальная установка и методики измерений. Экспериментальная установка была традиционной для исследований коронного разряда с промежутком острие–плоскость. Электрод с малым радиусом кривизны был изготовлен из “биссерной” иглы длиной 55 мм, диаметром 0.3 мм, которая имела радиус скругления острия после нескольких искровых пробоев ≈ 40 мкм. Второй электрод был плоским и устанавливался на расстоянии от кончика иглы от 1 до 50 мм. В экспериментах использовались три источника напряжения. С первым, стабилизированное напряжение $U = 0.4\text{--}5$ кВ с точностью не хуже 0.5% повышалось на промежутке со скоростью не более 0.2 кВ/мс. Второй источник питания с напряжением до 36 кВ также обеспечивал скорость роста не более 0.2 кВ/мс. Третий источник формировал импульсы напряжения синусоидальной формы обеих полярностей с амплитудой до 15 кВ и длительностью фронта ≈ 500 нс.

Фотография коронного разряда были получены цифровым фотоаппаратом Canon PowerShot SX 60 HS в режиме покадровой съемки с временем экспозиции 15 с. Свечение плазмы коронного разряда с третьим источником также регистрировалось с разрешением во времени с помощью четырехканальной ICCD камеры HSFC PRO.

С помощью осциллографа TDS 3034 (Tektronics, Inc.) и высоковольтного пробника снимали временной ход напряжения. Импульсы тока разряда регистрировались с высокоомного токового шунта ($R = 1$ кОм). Это позволяло измерять как импульсную, так и постоянную составляющую тока через промежуток.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Проведенные исследования показали, что инициирование коронного разряда в резко неоднородном электрическом поле независимо от полярности напряжения иглы происходит за счет формирования стримера, имеющего форму, близкую к шаровой. На рисунке 1 показаны фотографии свечения плазмы, образовавшейся у острия при различных напряжениях и расстояниях до второго электрода.

Съемка проводилась в темноте. При $d = 40$ мм игла слабо освещалась. Свечение короны у острия при малых напряжениях можно было регистрировать только с использованием больших экспозиций. Свечение появлялось на острие иглы отрицательной полярности при меньших напряжениях и имело, при равных напряжениях, большие размеры (рис. 1a, c и e, g). При высоких напряжениях коронный разряд переходит в тлеющий, рис. 1f.

При увеличении напряжения с иглы положительной полярности начинали стартовать струи, рис. 1d, которые являются цилиндрическими стримерами. При дальнейшем увеличении напряжения стримеры достигали плоского электрода и формировался тлеющий (диффузный) разряд, который переходил в искровой. При этом пробой промежутка наблюдался при более низких напряжениях, чем при отрицательной полярности острия, что согласуется с данными по пробую в неоднородном электрическом поле, см., например, [5].

До появления первых стримеров, можно было с помощью шунта и осциллографа зарегистрировать постоянный ток темного таунсендовского разряда, величина которого была менее 1 мкА. При появле-

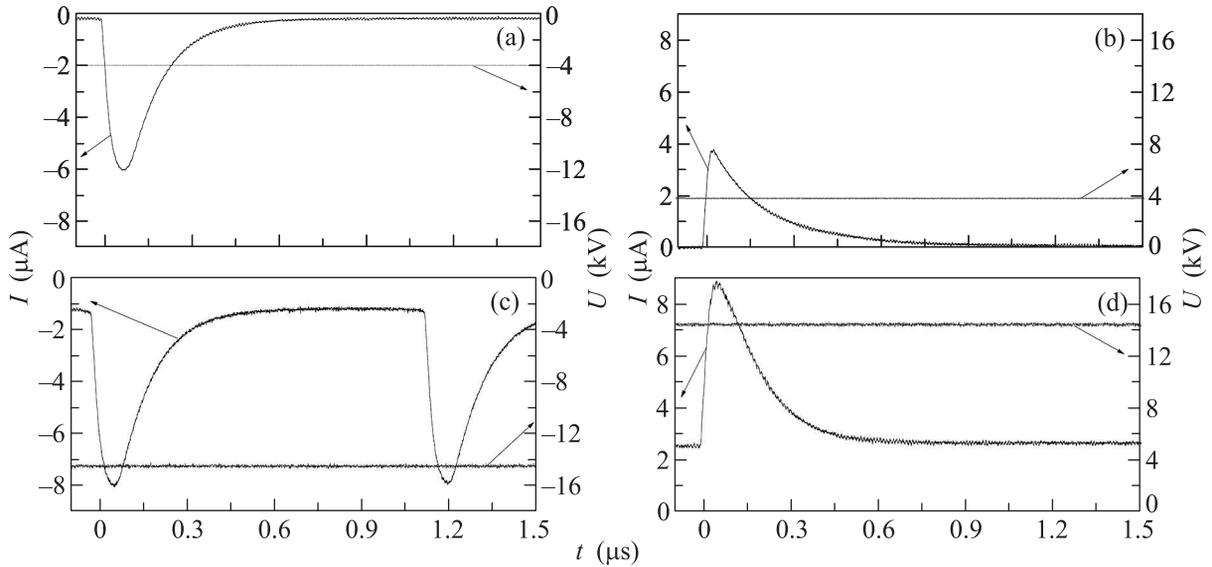


Рис. 2. Импульсы тока стримеров, полученные при отрицательной (а), (с) и положительной полярности напряжения (b), (d). $d = 40$ мм. $U = 3.9$ (а), (b) и 14.4 кВ (с), (d)

нии свечения на острие начинали регистрироваться импульсы тока с амплитудой в десятки сотни мкА, которые обусловлены формированием стримеров шаровой формы.

Нами было установлено, что корона начинает формироваться за счет образования стримеров при обеих полярностях напряжения. Каждый из первых стримеров, свечение которых наблюдалось только у острия и имело шаровую форму, сопровождается импульсами тока с длительностью на полувысоте ~ 200 нс. На рисунке 2 приведены импульсы тока стримеров для длины разрядного промежутка 40 мм при напряжениях разной полярности и амплитуды в условиях наблюдения у острия свечения в виде шара.

При повторении этих экспериментов разброс амплитуды тока не превышал 20%. Осциллограммы тока свидетельствуют о формировании анодо- и катодонаправленных стримеров с острия. Как видно из рис. 2а, b, амплитуды импульсов тока при напряжении 3.9 кВ были больше при отрицательной полярности острия. Однако при напряжении 14.4 кВ амплитуды импульсов уже примерно равны и заметно возросла для обеих полярностей иглы постоянная составляющая тока разряда, рис. 2с, d. Частоты следования импульсов тока были существенно больше при отрицательной полярности напряжения. Сравнение величин напряжения при регистрации первых импульсов показало, что при положительной полярности для появления первого импульса тока нужны более высокие напряжения, чем при отрицательной.

На рисунке 3 приведены импульсы тока при напряжении 24.5 кВ и зазоре 40 мм.

Амплитуда тока стримера при отрицательном острие, рис. 3а, существенно не изменилась, но увеличилась постоянная составляющая тока разряда. Однако и при высоких напряжениях область свечения у острия имела форму, близкую к шаровой, рис. 1b, тогда как при положительной полярности и том же напряжении форма короны изменялась, рис. 1d. Ток с пунта при формировании цилиндрического стримера существенно возрос, рис. 3б.

Амплитуды импульсов и паузы между ними зависели от полярности острия и величины напряжения. Например, с $d = 8$ мм и напряжении положительной полярности острия 8 кВ длительность импульсов на полувысоте $\tau_{0.5} = 220$ нс, амплитуда тока 6 мА и период повторения импульсов ≥ 240 мкс. Этот период соответствовал частоте следования импульсов $f \approx 4.2$ кГц. С тем же зазором и напряжением при отрицательной полярности острия $\tau_{0.5} = 94$ нс, $f = 5$ МГц, а амплитуда импульсов тока равнялась 56 мкА. Также перед формированием следующего импульса регистрировалась постоянная составляющая тока ~ 42 мкА. Частота следования импульсов при одинаковых напряжениях была на два и более порядков больше при отрицательной полярности острия. Это приводило к существенно большому среднему току коронного разряда. При отрицательной полярности острия, обычно начиная с первого импульса тока, формируется последовательность

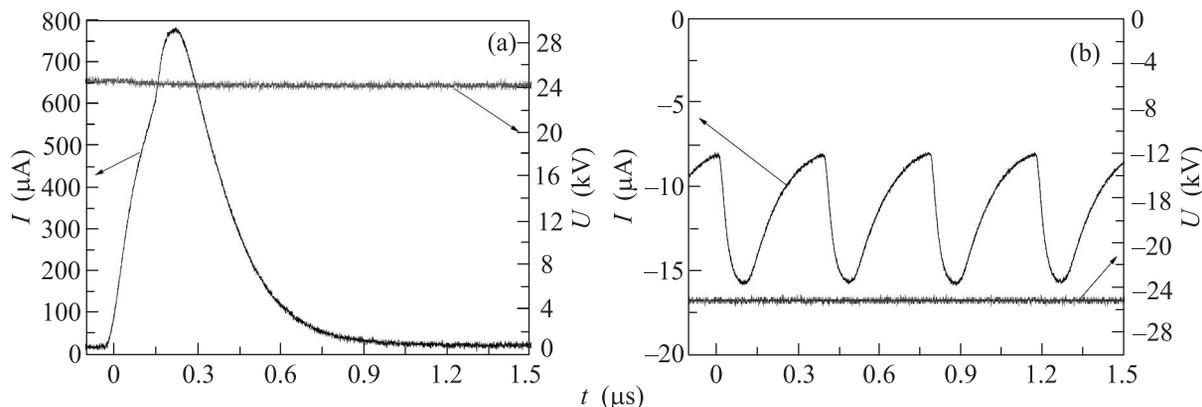


Рис. 3. Импульсы тока разряда, полученные при отрицательной (а) и положительной (б) полярности напряжения

импульсов, частота которых увеличивается с ростом напряжения. Это хорошо известные импульсы Тричела, которые описаны во многих работах и монографиях [1, 4–7, 11, 14].

Кроме частоты следования импульсов Тричела, с ростом напряжения несколько увеличивается их длительность на полувысоте и постоянная составляющая тока разряда. Амплитуда импульсов тока при этом уменьшается относительно постоянной составляющей тока в паузе между импульсами, но увеличивается относительно нулевого уровня. Из настоящей работы следует, что импульсы Тричела обусловлены формированием стримеров. Кроме того, в данных экспериментах было впервые обнаружено, что при положительной полярности острия зажигание короны также начинается с формирования стримера. Амплитуда тока стримеров зависела от расстояния до плоского электрода и была, как правило, меньше, чем при отрицательной полярности напряжения. Частота следования импульсов тока при появлении катодонаправленных стримеров была на два порядка и более меньше, чем при отрицательной полярности. В результате средний ток коронного разряда при свечении у острия шаровой формы с положительным острием был на порядок меньше, чем с отрицательным. Также, при одинаковых напряжениях область регистрируемого фотоаппаратом свечения у положительного острия была меньше, рис. 1.

Поскольку время появления первых стримеров при малых напряжениях и малой скорости увеличения напряжения имело большой разброс, то динамику их формирования зарегистрировать с помощью ICCD камеры не удалось. Эксперименты по регистрации первых стримеров были проведены с использованием импульсного источника напряжения. Это позволило увеличить напряжение на промежутке и

яркость свечения плазмы у острия, а также сфотографировать динамику развития первых стримеров, рис. 4.

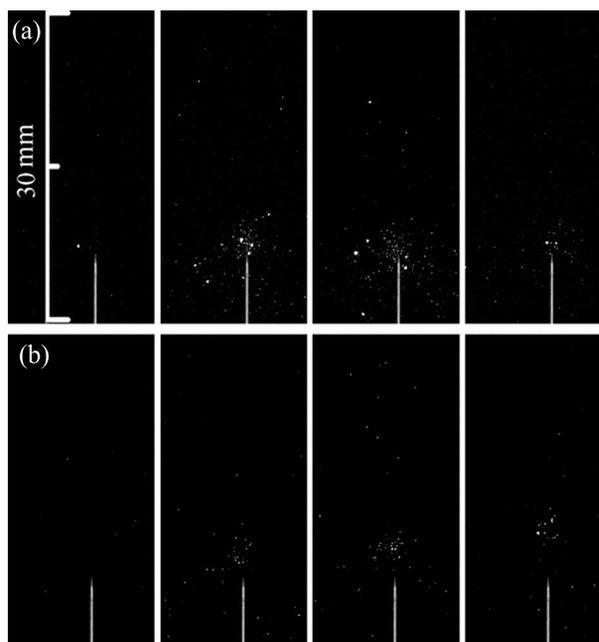


Рис. 4. Фотографии свечения плазмы у острия иглы при длительности одного кадра 100 (а) и 10 нс (б). Полярность импульсов напряжения отрицательная (а) и положительная (б). Каждый последующий кадр включался после предыдущего без задержки. Максимальное напряжение на промежутке 7 кВ

На рисунке 4а приведены четыре фотографии свечения плазмы при отрицательной полярности острия. Длительность каждого кадра составляла 100 нс, кадры были получены последовательно с задержками от начала фотографирования 0, 100, 200 и 300 нс. Для дополнительной стабилизации мо-

мента времени появления стримера использовался импульсно-периодический режим работы генератора с частотой 7 кГц. Из рисунка 4а видно, что на первом кадре излучение отсутствует и, что основное свечение у острия длится около 200 нс (второй и третий кадры). Это соответствует длительности импульса тока через промежуток. На четвертом кадре интенсивность излучения уменьшалась. При длительности кадра 10 нс интенсивности излучения анодо-направленного стримера было недостаточно для его регистрации, хотя на фотографиях, рис. 1, свечение у отрицательного острия более яркое из-за высокой частоты формирования стримеров.

При положительной полярности импульса напряжения той же амплитуды, также удалось зарегистрировать динамику формирования одиночных стримеров. Причем, как следует из фотографий, полученных с помощью ICCD камеры, рис. 4б, интенсивность излучения одиночных стримеров при положительной полярности и импульсном напряжении была больше. Свечение у острия зарегистрировалось и при меньшей на порядок длительности одного кадра (10 нс). Из рисунка 4б также видно, что головка стримера удаляется от острия, см. четвертый кадр. Это свидетельствует о начале формирования в этих условиях цилиндрического стримера. Увеличение интенсивности излучения согласуется с большими амплитудами импульсов тока в первом импульсе при зажигании коронного разряда с положительного острия при увеличении напряжения на промежутке, рис. 4б. Тогда как на фотографиях интегрального свечения короны, полученных с помощью фотоаппарата при больших выдержках и одинаковом напряжении на промежутке, размеры светящейся области больше при отрицательной полярности острия. Это объясняется наличием больших пауз между стримерами при положительной полярности и меньшими средними токами.

Для продвижения катодонаправленного стримера нужны более низкие напряженности электрического поля, чем для продвижения анодонаправленного стримера [5]. В данной работе зажигание коронного разряда, как и в других работах см., например, [1, 4, 5, 7], наблюдалась с отрицательным острием при более низких напряжениях. Мы считаем, что это обусловлено эмиссией электронов с отрицательного острия. В результате, при меньших напряжениях появляются первые электроны и формируется лавина, которая достигает критического размера. При острие положительной полярности электроны быстро уходят в острие и критическая концентрация ионов у острия, достаточная для начала движения

катодонаправленного стримера, достигается только при более высоком напряжении.

С другой стороны, формирование цилиндрических стримеров начинается с положительного острия при меньших напряженностях электрического поля. Это приводит к увеличению тока стримера, см. рис. 4б, и обусловлено увеличением динамического емкостного тока [17]. Фронт стримера приближается к плоскому электроду на меньшие расстояния, а затем замыкается на него. Соответственно, напряжение пробоя промежутка при положительном острие меньше. Эксперименты с ICCD камерой подтверждают этот вывод.

Заключение. В данной работе впервые показано, что в воздухе атмосферного давления при резко неоднородном электрическом поле зажигание коронного разряда происходит при обеих полярностях за счет формирования стримеров, которые имеют шаровую форму. Причем, с иглы положительной полярности стример стартует при более высоком напряжении на промежутке. При одинаковом напряжении на промежутке в режиме шаровых стримеров большие средние токи коронного разряда регистрируются с отрицательной полярностью иглы. Увеличение среднего тока коронного разряда достигается при отрицательном острие за счет высокой частоты следования отдельных импульсов (на два порядка и более), чем при положительной полярности иглы. Формирования цилиндрических стримеров с положительного острия при увеличении напряжения приводит к существенному росту амплитуд импульсов тока, и они начинают превышать при одинаковом напряжении амплитуды импульсы тока с отрицательного острия. Считаем, что при больших размерах коронирующих электродов, а также их произвольной форме и полярности, зажигание коронного разряда начинается с формирования стримеров, которые стартуют за счет усиления электрического поля на микронеоднородностях электрода с малым радиусом кривизны.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН по теме # 13.1.4.

1. Л. Леб, *Основные процессы электрических разрядов в газах*, Гостехиздат, М. (1950).
2. В. Н. Ужов, *Очистка промышленных газов электрофильтрами*, Химия, М. (1967).
3. В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь, *Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах*, Энергоатомиздат, М. (1986).

4. С. Б. Афанасьев, Д. С. Лавренюк, И. Н. Петрушенко, Ю. К. Стишков, *ЖТФ* **78**, 30 (2008).
5. Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда*, 3-е изд., испр., доп., Интеллект, М. (2009).
6. Э. И. Асиновский, А. А. Петров, И. С. Самойлов, *Письма в ЖЭТФ* **86**, 354 (2007).
7. Ю. С. Акишев, Г. И. Апонин, М. Е. Грушин, В. Б. Каральник, М. В. Панькин, А. В. Петряков, Н. И. Трушкин, *Физика плазмы* **34**, 347 (2008).
8. G. V. Naidis, *Phys. Rev. E* **79**, 057401 (2009).
9. D. Z. Pai, D. A. Lacoste, and C. O. Laux, *J. Appl. Phys.* **107**, 093303 (2010).
10. T. Shao, V. F. Tarasenko, Ch. Zhang, I. D. Kostyrya, H. Jiang, R. Xu, D. V. Rybka, and P. Yan, *Appl. Phys. Express* **4**, 0660 (2011).
11. Z. Kexin, P. Yongjun, T. Miao, T. Jingfeng, W. Liqiu, and Z. Chaohai, *J. Phys. Conf. Ser.* **652**, 012016 (2015).
12. W. Shuqun, Ch. Wenxin, H. Guowang, W. Fei, L. Chang, L. Xueyuan, Zh. Chaohai, and L. Xinpei, *Phys. Plasmas* **25**, 123507 (2018).
13. В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт, Э. А. Соснин, *Физика плазмы* **44**, 447 (2018).
14. G. W. Trichel, *Phys. Rev.* **54**, 1078 (1938).
15. P. Tardiveau, N. Moreau, S. Bentaleb, C. Postel, and S. Pasquiers, *J. Physics D: Appl. Phys.* **42**, 175202 (2009).
16. Д. В. Белопотов, В. Ф. Тарасенко, Д. А. Сорокин, М. И. Ломаев, *Письма в ЖЭТФ* **106**, 627 (2017).
17. Д. В. Белопотов, М. И. Ломаев, В. Ф. Тарасенко, Д. А. Сорокин, *Письма в ЖЭТФ* **107**, 636 (2018).