

УДК 537.868.4
EDN: QIRRAWA

PACS: 75.78.-n, 77.84.-s

**Воздействие плазмы на резонансное рассеяние магнитного поля
диэлектрическим кольцом**

© М. С. Доброклонская*, В. Я. Печеркин, Л. М. Василяк

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия***E-mail: m.dobro42@gmail.com**Статья поступила в редакцию 2.03.2026; после доработки 23.03.2026; принята к публикации 27.04.2026**Шифр научной специальности: 1.3.9*

Экспериментально изучены спектры резонансного рассеяния на основной магнитной моде структур, состоящих из субволнового тонкого диэлектрического кольца и плазмы низкого давления. Плазма создавалась в линейной и спиральной люминесцентных лампах, возбуждаемых плоской СВЧ-волной. Обнаружено, что при включении разряда амплитуда индуцированного кольцом магнитного поля на резонансной частоте кольца значительно уменьшается. Эффект уменьшения реализуется при определенной ориентации разряда относительно кольца. Компьютерное моделирование подтверждает эффект уменьшения индуцированного кольцом магнитного поля на резонансной частоте. Электрический разряд может быть использован для переключения резонансных электромагнитных полей диэлектрических элементов в фильтрах, антеннах, системах перераспределения энергии.

Ключевые слова: разряд низкого давления, диэлектрический магнитный диполь, диэлектрическое кольцо, плоская СВЧ-волна, резонанс.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-47-52

Введение

Для создания метаматериалов [1], метаповерхностей [2] антенн [3–5], систем фильтрации и перераспределения излучения [6, 7], идеальных линз [8] применяются резонансные элементы различных типов [9–11]. Первые метаматериалы были созданы на основе резонансного LC-контура в виде металлического кольца с тонкой щелью [12, 13], свойства которого хорошо известны и резонансная частота может быть рассчитана на основе емкости и самоиндуктивности, а магнитные поля из закона Био-Савара-Лапласа. На основе таких элементов было создано достаточно много конструкций для микроволновой области, в фильтрах и в антенной технике. Замена металлических метаяэлементов диэлектрическими является одной из возможностей снизить диссипативные потери на высоких частотах.

Однако даже в простых диэлектрических телах, например, сфера, диск, цилиндр, электромагнитная волна инициирует много различных типов резонансов, частоты которых могут совпадать, поэтому расчеты резонансных частот и полей рассеяния для диэлектрических тел становятся сложной задачей [14–19]. Исследования показали, что субволновое диэлектрическое кольцо является идеальным магнитным диполем [20] с основной резонансной частотой, которую можно рассчитать из понятий емкости и самоиндуктивности, а поля рассеяния из закона Био-Савара-Лапласа. Следовательно, диэлектрическое кольцо можно использовать в конструкциях, которые уже созданы на основе металлического кольцевого диполя.

Целью работы являлось исследование резонансного магнитного поля системы из диэлектрического кольца и плазменного эле-

мента в виде положительного столба разряда низкого давления при возбуждении плоской ЭМ-волной СВЧ-диапазона.

Результаты экспериментов и компьютерного моделирования

Схема проведения экспериментов по измерению магнитных полей структуры из диэлектрического кольца и дополнительного проводящего элемента, возбуждаемой плоской электромагнитной волной, была аналогична использованной нами ранее [21]. Задающим генератором служил один из каналов спектроанализатора Agilent E5071C ENA Network Analyzer, сигнал от которого поступал на усилитель (20 дБ) и далее на рупорную антенну ETS-Lindgren's model 3115, которая формировала плоскую линейно поляризованную волну. Магнитные поля измерялись датчиком Beehive Electronics 100B EMC Probe с внутренним диаметром кольца детектора 3,7 мм, сигнал с которого поступал на вход анализатора спектров Agilent E5071C ENA Network Analyzer. Плоская СВЧ-волна возбуждала систему из диэлектрического кольца ($\epsilon = 149$, $\text{tg}\alpha = 0,0003$, внешний диаметр 38 мм, внутренний 28 мм, высота 5 мм) и плазменного элемента. В качестве плазменного элемента использовались прямые и спиральные люминесцентные лампы.

На рисунке 1 показана система из диэлектрического кольца, расположенного сверху на спиральной лампе мощностью 13 Вт с внешним диаметром колец 38 мм и диаметром плазмы 7 мм. Кольцо с лампой расположены на расстоянии 25 см от антенны таким образом, чтобы волновой вектор и вектор электрического поля плоской падающей волны были параллельны плоскости диэлектрического кольца и колец газоразрядной лампы, а вектор магнитного поля волны перпендикулярен. Диэлектрическое кольцо помещалось либо непосредственно на лампу, либо над верхним кольцом лампы на расстоянии 5 мм. Поскольку конструктивно спираль лампы свернута в торце, то диэлектрическое кольцо тесно прижимается только к полукольцу спирали лампы. Зонд магнитного поля был расположен с дальней от антенны стороны диэлектрического кольца. Расстояние от края кольца до зонда

составляло 10 мм, поэтому зонд измеряет резонансный спектр прошедшего сигнала в ближней зоне кольца. Плоскость кольца магнитного зонда была перпендикулярна вектору магнитного поля и параллельна волновому вектору и вектору электрического поля падающей волны.



Рис. 1. Фотография системы диэлектрическое кольцо на спиральной лампе. Справа расположен зонд магнитного поля

Экспериментальные результаты измерений спектров магнитного поля кольца и спиральной лампы приведены на рисунке 2. При выключенной лампе наблюдается стандартный резонансный пик магнитного диполя (кривая 1). При создании плазмы в лампе (лампа включена) резонансный пик пропадает (кривая 2). Кривая 3 представляет фоновый сигнал с зонда, когда нет кольца и лампа выключена. Включенная лампа с плазмой (без кольца) незначительно экранирует прошедший сигнал (кривая 4). При других расположениях диэлектрического кольца около спиральной лампы такого сильного эффекта затухания резонансной частоты не наблюдается. Следовательно, эффект взаимодействия полей диэлектрического кольца с плазменным полукольцом возникает только при близком взаимодействии индуцированного электрического поля в диэлектрическом кольце с плазмой в лампе, в результате чего в плазме протекает наведенный ток с диссипацией энергии. Если длина взаимодействия мала, то и затухание мало. При удалении кольца от лампы более 5 мм эффект резко ослабевает. Таким образом, плазменный элемент в виде электрического разряда низкого давления может выполнять роль ключа, с помощью которого можно включать и выключать резонансный элемент.

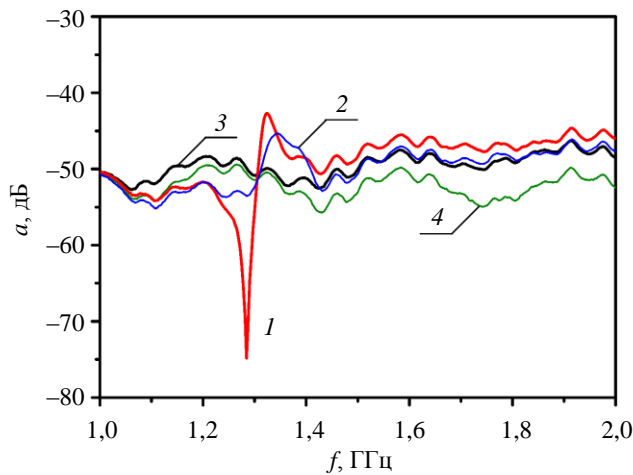


Рис. 2. Измеренные спектры магнитного поля.
 1 – кольцо на лампе без плазмы (красная линия 1);
 2 – кольцо на лампе с плазмой (синяя линия 2);
 3 – без кольца, лампа без плазмы (черная линия 3);
 4 – без кольца, лампа с плазмой (зеленая линия 4)

По оценкам, исходя из мощности лампы и ее тока, средняя концентрация электронов составляет порядка 10^{13} см^{-3} при типичной напряженности электрического поля в столбе около 1 В/см, поэтому плазменная частота на порядок превышает область резонансных частот диэлектрического кольца. Следовательно, экспериментальное и компьютерное моделирование можно проводить, используя вместо плазмы медный провод в форме полукольца, помещенный сверху на диэлектрическое кольцо. Для выделения рассеянной составляющей магнитного поля исследуемой системы перед каждым испытанием проводилось измерение уровня фонового излучения иницирующей волны с зондом при отсутствии тестовых объектов. Затем фоновый сигнал вычитали из измеренного сигнала при наличии тестовых элементов. Компьютерное моделирование проводилось с использованием программы CST Microwave Studio. Параметры расчета были заданы в соответствии с условиями эксперимента для медного провода (проводимость 58 млн См/м) диаметром 2 мм в изоляции толщиной 0,7 мм. Полукольцо располагалось в разных положениях на диэлектрическом кольце. Результаты экспериментов и расчетов с медным полукольцом, расположенным выпуклостью к зонду, приведены на рис. 3. Видно, что рассчитанные и экспериментальные резонансные спектры одиночного диэлектрического кольца хорошо согласуются по частоте (кривые 1 и 2). При добавлении

медного полукольца резонансная частота сдвигается в сторону низких частот и уменьшается по амплитуде, как в экспериментах, так и при расчетах (кривые 3 и 4). Уменьшение резонансной частоты связано с увеличением эффективной емкости в резонансной цепи при добавлении металлического полукольца. В случае плазмы возникает еще и диссипация энергии, поэтому и амплитуда рассеянного магнитного поля сильно затухает.

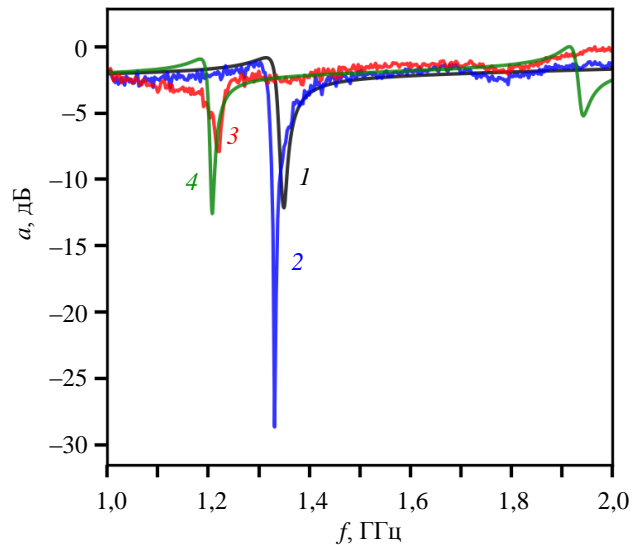


Рис. 3. Резонансные спектры магнитного поля для диэлектрического кольца и полукольца из медного провода диаметром 2 мм в изоляции толщиной 0,7 мм выпуклостью к зонду. Расстояние от кольца до зонда 30 мм: 1 (черный) – расчет, одиночное диэлектрическое кольцо, $f_0 = 1,350 \text{ ГГц}$, $a_0 = -11,832 \text{ дБ}$; 2 (синий) – эксперимент, одиночное диэлектрическое кольцо $f_0 = 1,331 \text{ ГГц}$, $a_0 = -28,675 \text{ дБ}$; 3 (красный) – эксперимент, металлическое полукольцо $f_0 = 1,222 \text{ ГГц}$, $a = -7,903 \text{ дБ}$; 4 (зеленый) – расчет, медное полукольцо $f_0 = 1,208 \text{ ГГц}$

Были также исследованы системы диэлектрическое кольцо и линейные лампы низкого давления с мощностями 12 Вт и 15 Вт диаметрами 12,5 мм и 26 мм, длинами 370 мм и 430 мм, соответственно, а также медные провода разной длины для замены лампы. Лампа или медный провод были расположены сразу после диэлектрического кольца перпендикулярно волновому вектору и параллельно вектору электрического поля падающей СВЧ-волны. Зонд расположен после лампы или проводника на расстоянии от кольца 30 мм. Пример результатов экспериментов и расчетов для системы кольцо и медный провод

длиной полуволны на резонансной частоте (115 мм) показан на рис. 4. Рассчитанный и экспериментальный спектры хорошо совпадают по резонансной частоте (кривые 1 и 2). При добавлении провода за кольцом происходит затухание амплитуды магнитного поля на резонансной частоте как в эксперименте (кривая 3), так и при расчетах (кривая 4).

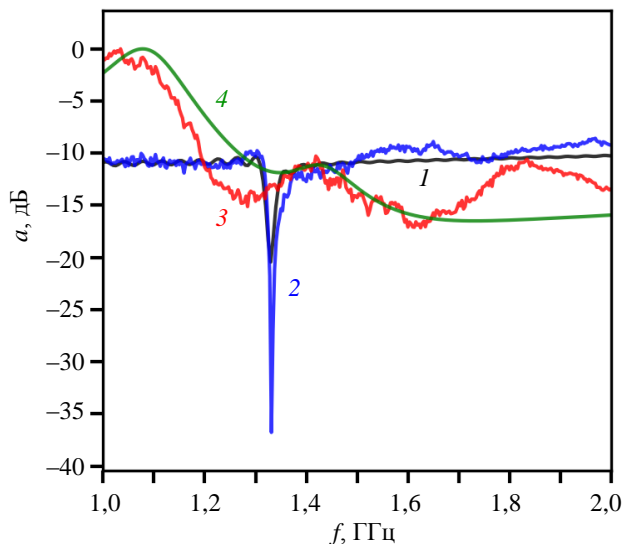


Рис. 4. Резонансные спектры магнитного поля для кольца и прямого проводника длиной полволны (115 мм): 1 (черный) – расчет, одиночное диэлектрическое кольцо, $f_0 = 1,350$ ГГц, $a_0 = -11,832$ дБ; 2 (синий) – эксперимент, одиночное диэлектрическое кольцо $f_0 = 1,331$ ГГц, $a_0 = -28.675$ дБ; 3 (красный) – эксперимент, кольцо с проводником; 4 (зеленый) – расчет, кольцо с проводником

Следует отметить, что затухание резонансной амплитуды магнитного поля происходит только при определенной ориентации лампы относительно диэлектрического кольца. Если кольцо надето на лампу, т. е. оси лампы и кольца совпадают, то влияния лампы на спектр не оказывает. Нет влияния, если ось лампы параллельна магнитному полю и в других положениях лампы около кольца. Наибольшее влияние лампы и проводник оказывают в положении, когда они параллельны вектору электрического поля. Если проводник или лампа параллельны волновому вектору, то влияние на резонансный спектр кольца они оказывают только в случае, когда часть лампы или провода находится на левой или правой половине кольца, т. е. они могут взаимодействовать с электрическим полем половины кольца. Если лампа или провод проходят

через центр кольца, то влияния нет. Следовательно, прямая лампа или прямой проводник могут взаимодействовать либо через круговые электрические поля кольца, как в случае спиральной лампы, либо создать дополнительную резонансную систему и экранировать проходящую волну, индуцируемую резонансным полем диэлектрического кольца. Во втором случае высокая проводимость оказывается более важным фактором, чем затухание в плазме, что подтверждается расчетами. Следовательно, плазменный элемент в виде прямой лампы может также включать или выключать проходящую резонансную волну или резонансное магнитное поле. Такие ключи могут найти применение в фильтрах, антеннах, системах перераспределения СВЧ-энергии.

Заключение

Исследованы резонансные спектры рассеяния системы диэлектрическое кольцо - плазменный элемент. Обнаружено, что при включении разряда резко возрастает затухание амплитуды рассеянного резонансного магнитного поля кольца. Экспериментальное и компьютерное моделирование при замене плазмы медным проводом показало, что в случае полукольца происходит сдвиг плазменной частоты и затухание амплитуды. В случае прямого провода и прямой лампы происходит резонансное взаимодействие подающей плоской ЭМ-волны не только с диэлектрическим кольцом, но и с прямым проводом, в результате чего наиболее сильное взаимодействие происходит в случаях, когда длина провода кратна четверти длины волны на резонансной частоте. Обнаружено, что сдвиг резонанса и затухание резонансного рассеяния возникает только при определенной ориентации плазменного столба относительно диэлектрического кольца, когда вектор индуцированной напряженности электрического поля параллелен оси разряда. Таким образом, плазменный элемент может выполнять роль ключа, с помощью которого можно включать и выключать резонансные рассеянные поля от диэлектрического кольца. Такие ключи могут найти применение для переключения резонансных фильтров, в антенной технике и для перераспределения потоков СВЧ-излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zheng Y., Dai H., Wu J., Zhou C., Wang Z., Zhou R., Li W. / *Frontiers in Physics*. 2022. Vol. 10. P. 1069722.
2. Ремнев М. А., Климов В. В. / УФН. 2018. Т. 188. С. 169–205.
3. Glybovski S. B., Tretyakov S. A., Belov P. A., Kivshar Y. S., Simovski C. R. / *Physics reports*. 2016. Vol. 634. P. 1–72.
4. Engheta N. / *IEEE Transactions on Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2002. Vol. 1. № 1. P. 10–13.
5. Paniagua-Dominguez R., Luk'yanchuk B., Kuznetsov A. I. Control of scattering by isolated dielectric nanoantennas. In *Dielectric Metamaterials*. – Woodhead Publishing, 2020. P. 73–108.
6. Lagarkov A., Kissel V. / *Phys. Rev. Lett.* 2004. Vol. 92. № 7. P. 077401
7. Климов В. В. / УФН. 2021. Т. 191. С. 1044–1076.
8. Лагарьков А. Н., Сарычев А. К., Кисель В. Н., Тартаковский Г. / УФН. 2009. Т. 179. С. 1018–1027.
9. Рыбин М. В., Лимонов М. Ф. / УФН. 2019. Т. 189. С. 881–898.
10. Климов В. В. / УФН. 2023. Т. 193. С. 279–304.
11. Климов В. В. / УФН. Т. 189. С. 1131–1133.
12. Pendry J. B. / *Phys. Rev. Lett.* 2000. Vol. 85. № 18. P. 3996.
13. Smith D. R., Padilla W. J., Vier D. C., Nemat-Nasser S. C., Schultz S. / *Phys. Rev. Lett.* 2000. Vol. 84. P. 4184–4187.
14. Kapitanova P., Ternovski V., Miroshnichenko A. et al. / *Sci Rep*. 2017. Vol. 7. P. 731.
15. Shvartsburg A. B., Pecherkin V. Ya., Jimenez S., Vasilyak L. M., Viazquez L., Vetchinin S. P. / *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2021. Vol. 54. P. 075004.
16. Luk'yanchuk B., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Vetchinin S. P., Fortov V. E., Wang Z. B., Paniagua-Dominguez R., Fedyanin A. A. / *Sci Rep-UK*. 2021. Vol. 11. P. 23453.
17. Bukharin M. M., Pecherkin V. Y., Ospanova A. K., Il'in V. B., Vasilyak L. M., Basharin A. A., Luk'yanchuk B. / *Sci Rep-UK*. 2022. Vol. 12. № 05. P. 7997.
18. Kapitanova P., Zanganeh E., Pavlov N., Song M., Belov P., Evlyukhin A., Miroshnichenko A. / *Annalen der Physik*. 2020. Vol. 532. № 12. P. 2000293.
19. Enriquez J. A., Balafendiev R., Millar A. J., Simovski C., Belov P. / *Physical Review Applied*. 2025. Vol. 23. № 5. P. 054053.
20. Bukharin M. M., Vasilyak L. M., Basharin A., Luk'yanchuk B., Ospanova A., Pecherkin V. Ya. / *Journal of Applied Physics*. 2025. Vol. 137. P. 203101.
21. Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Бухарин М. М., Доброклонская М. С. / *Прикладная физика*. 2023. № 5. С. 15–21.

PACS: 75.78.-n, 77.84.-s

The effect of plasma on resonant scattering of a magnetic field by a dielectric ring

M. S. Dobroklonskaya*, V. Ya. Pecherkin, and L. M. Vasilyak

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

*E-mail: m.dobro42@gmail.com

Received 2.03.2026; revised 23.03.2026; accepted 27.04.2026

The resonance scattering spectra on the main magnetic mode of structures made of a subwavelength dielectric thin ring and a low-pressure discharge plasma in a linear fluorescent lamp and a spiral lamp excited by an incident plane electromagnetic wave of the microwave range have been experimentally studied. It was found that when the discharge is turned on, the amplitude of the magnetic field induced by the ring at the resonant frequency of the ring decreases significantly. The reduction effect is realized with a certain orientation of the discharge relative to the ring. Computer simulation confirms the effect of reducing the magnetic field induced by the ring at the resonant frequency. An electric discharge can be used to switch the resonant electromagnetic fields of dielectric elements in filters, antennas, and energy redistribution systems.

Keywords: low pressure discharge, dielectric magnetic dipole, negative magnetic response, dielectric ring, plane microwave, resonance.

REFERENCES

1. Zheng Y., Dai H., Wu J., Zhou C., Wang Z., Zhou R., and Li W., *Frontiers in Physics* **10**, 1069722 (2022).
2. Remnev M. A. and Klimov V. V., *Phys. Usp.* **61**, 157–190 (2018).

3. Glybovski S. B., Tretyakov S. A., Belov P. A., Kivshar Y. S., and Simovski C. R., *Physics reports* **634**, 1–72 (2016).
4. Engheta N., *IEEE Transactions on Antennas and Wireless Propagation Letters* **1** (1), 10–13 (2002).
5. Paniagua-Dominguez R., Luk'yanchuk B., and Kuznetsov A. I., Control of scattering by isolated dielectric nano-antennas. In *Dielectric Metamaterials*. Woodhead Publishing, 2020, pp. 73–108.
6. Lagarkov A. and Kissel V., *Pys. Rev. Lett.* **92** (7), 077401 (2004).
7. Klimov V. V., *Phys. Usp.* **64**, 990–1020 (2021).
8. Lagarkov A. N., Sarychev A. K., Kissel V. N., and Tartakovskiy G., *Phys. Usp.* **52**, 959–967 (2009).
9. Rybin M. V. and Limonov M. F., *Phys. Usp.* **62**, 823–838 (2019).
10. Klimov V. V., *Phys. Usp.* **66**, 263–287 (2023).
11. Klimov V. V., *Phys. Usp.* **62**, 1058–1059 (2019).
12. Pendry J. B., *Phys. Rev. Lett.* **85** (18), 3996 (2000).
13. Smith D. R., Padilla W. J., Vier D. C., Nemat-Nasser S. C., and Schultz S., *Phys. Rev. Lett.* **84**, 4184–4187 (2000).
14. Kapitanova P., Ternovski V., Miroshnichenko A., et al., *Sci Rep.* **7**, 731 (2017).
15. Shvartsburg A. B., Pecherkin V. Ya., Jimenez S., Vasilyak L. M., Vrazquez L., and Vetchinin S. P., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54**, 075004 (2021).
16. Luk'yanchuk B., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Vetchinin S. P., Fortov V. E., Wang Z. B., Paniagua-Dominguez R., and Fedyanin A. A., *Sci Rep-UK* **11**, 23453 (2021).
17. Bukharin M. M., Pecherkin V. Y., Ospanova A. K., Il'in V. B., Vasilyak L. M., Basharin A. A., and Luk'yanchuk B., *Sci Rep-UK* **12** (05), 7997 (2022).
18. Kapitanova P., Zanganeh E., Pavlov N., Song M., Belov P., Evlyukhin A., and Miroshnichenko A., *Annalen der Physik* **532** (12), 2000293 (2020).
19. Enriquez J. A., Balafendiev R., Millar A. J., Simovski C., and Belov P., *Physical Review Applied* **23** (5), 054053 (2025).
20. Bukharin M. M., Vasilyak L. M., Basharin A., Luk'yanchuk B., Ospanova A., and Pecherkin V. Ya., *Journal of Applied Physics* **137**, 203101 (2025).
21. Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Bukharin M. M., and Dobroklonskaya M. S., *Applied Physics*, № 5, 15–21 (2023) [in Russian].

Об авторах

Доброклонская Марина Сергеевна, аспирант, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: m.dobro42@gmail.com SPIN-код: 5232-9283, AuthorID: 1175259

Печеркин Владимир Яковлевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: vpecherkin@yandex.ru SPIN-код: 4910-0417, Author ID: 1089774, ORCID 0000-0001-7470-5132, Scopus ID: 6507468054

Василяк Леонид Михайлович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru SPIN-код: 5623-5167, AuthorID: 19599, ORCID 0000-0001-6982-3038, Scopus ID 7004886755