

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Влияние фокусного расстояния линзы на энерговклад в среду и генерацию терагерцевого излучения при фокусировке двухцветного фемтосекундного излучения в воздухе

Д. В. Пушкарев,¹ А. А. Ушаков,^{1,2} Е. В. Митина,¹ Н. А. Панов,^{1,3} Д. С. Урюпина,¹ Д. Е. Шипило,¹
Р. В. Волков,¹ П. А. Чижов,² А. П. Шкуринов,^{1,3} О. Г. Косарева,^{1,3} А. Б. Савельев^{1,3,а}

¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей физики и волновых процессов. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

² *Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН. Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38.*

³ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Международный учебно-научный лазерный центр. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 62.*

Поступила в редакцию 21.11.2018, после доработки 26.11.2018, принята к публикации 27.11.2018.

Представлены результаты экспериментальных исследований энерговклада в среду и генерации терагерцевого излучения при филаментации в воздухе двухцветного излучения в условиях мягкой фокусировки линзами с фокусными расстояниями от 30 до 312 см при диаметре пучка на линзе 0.8 см. Двухцветное излучение создавалось преобразованием во вторую гармонику фемтосекундного субтерагерцевого излучения с центральной длиной волны 812 нм в нелинейном кристалле, установленном в сходящемся лазерном пучке. Измерения показали, что энерговклад в среду резко возрастает при уменьшении фокусного расстояния до 50 см и менее, а энергия импульса терагерцевого излучения при $F = 30$ см линейно зависит от энергии лазерного импульса и существенно возрастает при $F = 50$ см. Вместе с тем при больших фокусных расстояниях наблюдать терагерцевое излучение не удалось, что связано, по-видимому, с пространственно-временным рассогласованием излучения первой и второй гармоники.

Ключевые слова: фемтосекундная филаментация, терагерцевое излучение, энерговклад, двухцветное излучение, числовая апертура.

УДК: 537.862. PACS: 42.65.Jx, 42.65.Ky, 42.65.Tg.

ВВЕДЕНИЕ

Фемтосекундные лазерные филаменты в воздухе [1] являются источником терагерцевого излучения [2], в том числе на атмосферной трассе, и могут обеспечивать удаленную диагностику объектов. Так, в экспериментах [3] удалось зарегистрировать терагерцевый сигнал множества филаментов, сформировавшихся на расстоянии около 30 м от выхода лазерной системы. Однако эффективность конверсии энергии оптического импульса в энергию терагерцевого невелика — $\sim 10^{-6}$ и менее.

Смешение основной и второй гармоник (двухцветная филаментация) [4] позволяет увеличить эффективность конверсии в терагерцевое излучение примерно на 3 порядка [5]. В подавляющем большинстве исследований двухцветное излучение фокусируется достаточно жестко, $NA > 0.05$ [6], вплоть до формирования микроплазменного терагерцевого источника [7, 8]. Применение данной схемы при мягкой фокусировке и на протяженных трассах ограничено в первую очередь потерей временного и пространственного перекрытия между оптическими гармониками вследствие нормальной дисперсии воздуха: на расстоянии ~ 1 м вторая гармоника отстает от первой на ~ 70 фс. Тем не менее применение chirpированных импульсов длительностью ~ 100 фс и более позволило реализовать эффективную генерацию терагерцевого излучения двухцветными импульсами на расстоянии 70 см [9] и 10 м [10] от выхода лазерной системы. Данные работы являются во многом уникальными.

Терагерцевое излучение, возникающее при филаментации, распространяется в узком конусе относительно оптической оси лазерного пучка [3], при этом разворот конуса определяется длиной излучающей области филамента [3, 11]. Таким образом, при увеличении фокусного расстояния, т. е. при малых NA, основная часть терагерцевого излучения распространяется вперед, что существенно для большинства применений этого излучения. Кроме того, применение более мягкой фокусировки позволяет использовать большие энергии лазерных импульсов. В настоящей работе нами представлены результаты первых исследований генерации терагерцевого излучения при мягкой фокусировке ($NA = 0.001 - 0.01$) спектрально ограниченных двухцветных лазерных импульсов в воздухе.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальная схема установки приведена на рис. 1. Фемтосекундное излучение (центральная длина волны 812 нм, длительность импульса 50 фс, энергия в импульсе 1–20 мДж, частота следования импульсов 10 Гц, диаметр пучка 8 мм по половине высоты) фокусировалось линзой ОЛ в воздухе. Примерно в области фокальной перетяжки на расстоянии 3–4 мм от оптической оси устанавливался широкополосный акустический датчик АД (на основе пленки PVDF), сигнал с которого подавался на вход высокоскоростного аналого-цифрового преобразователя (PLX9054 PCI PC карта, 500 МГц, 8 бит). Исходя из измерения амплитуды и длительности регистрируемого импульса нами оценивались диаметр акустического источника

^а E-mail: abst@physics.msu.ru

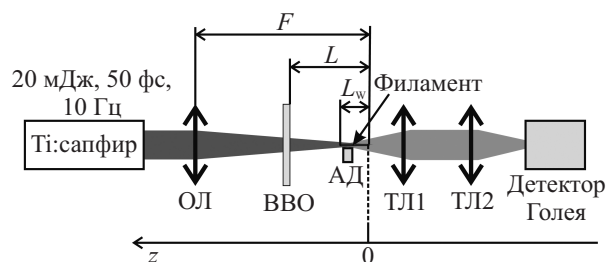


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: ОЛ — оптическая линза, ТЛ1, ТЛ2 — тефлоновые линзы, ВВО — нелинейно-оптический кристалл, АД — акустический детектор

и объемная плотность энергии в нем (в предположении о начальном акустическом источнике в виде цилиндра) по разработанной нами ранее методике [12, 13]. Для повышения эффективности генерации терагерцевого излучения в сходящийся лазерный пучок устанавливался нелинейно-оптический кристалл ВВО толщиной 200 мкм (синхронизм *ооe*). Это обеспечивало генерацию второй гармоники излучения с максимальной эффективностью около 10%.

Терагерцевое излучение собиралось в детектор Голея (Tudex, GC-1P) с помощью двух тефлоновых линз ТЛ1 и ТЛ2 диаметром 5 см с фокусными расстояниями 10 и 6 см. Входное окно детектора было дополнительно закрыто пластиной из тефлона для предотвращения попадания электромагнитного излучения других диапазонов (в первую очередь оптического) в детектор. Импульс с детектора подавался на цифровой осциллограф TDS20204. Положение линз соответствовало максимальной амплитуде регистрируемого терагерцевого сигнала. Поскольку протяженность источника (лазерного филамента) составляла порядка нескольких сантиметров, расстояния между линзами, источником и детектором выбирались близкими к таковым, рассчитанным на основании формулы тонкой линзы для точечного источника. Положение нелинейного кристалла ВВО относительно точки фокуса выбиралось исходя из двух критериев. Во-первых, интенсивность лазерного излучения на входе в кристалл не должна превышать пороги пробоя его поверхности и самофокусировки в объеме кристалла. Во-вторых, осуществлялась тонкая подстройка положения по максимуму энергии терагерцевого излучения, регистрируемого детектором Голея, для компенсации фазового рассогласования первой и второй гармоник излучения в области фокальной перетяжки [14]. Отметим, что в нашей экспериментальной схеме поляризации излучения первой и второй гармоник ортогональны, что не оптимально для генерации терагерцевого излучения в двухцветной схеме [15]. Для каждой используемой в экспериментах фокусирующей линзы осуществлялась также оптимизация (по максимуму выхода терагерцевого излучения) положения ближней к филаменту тефлоновой линзы, при этом расстояние между линзами и от второй линзы до детектора Голея сохранялось.

Поскольку детектор Голея предназначен в первую очередь для регистрации мощности квазинепрерывного терагерцевого излучения, нами был проведен тестовый эксперимент для калибровки детектора Голея в режиме регистрации одиночного терагерцевого импульса. С этой целью использовалось терагерцевое излучение, полученное при оптическом выпрямлении

фемтосекундных импульсов с наклонным фронтом интенсивности в кристалле ниобата лития [16]. В качестве источника накачки выбран титан-сапфировый лазер с частотой следования импульсов 1 кГц. В схему устанавливался механический модулятор с частотой модуляции 15 Гц. Для детектирования сигналов использовались ключевой синхронный детектор или осциллограф при снижении частоты следования импульсов до 10 Гц. Средняя мощность терагерцевого источника была 2.1 ± 0.1 мВт, т.е. энергия отдельного терагерцевого импульса составила 2.1 ± 0.1 нДж. При частоте следования 10 Гц амплитуда отдельного импульса была 56 ± 0.5 мВ, т.е. калибровочный коэффициент детектора при регистрации одиночных терагерцевых импульсов составляет 36 ± 2 нДж/В.

Оценка диаметра терагерцевого пучка на линзе ТЛ1 с помощью диафрагмы диаметром 7 мм, установленной перед этой линзой и смещаемой поперек пучка, показала, что данная диафрагма незначительно уменьшает амплитуду регистрируемого сигнала, т.е. диаметр измеряемого пучка составляет около 7 мм. Это подтверждает, что наша регистрирующая система обеспечивает попадание в детектор всего пучка терагерцевого излучения.

На рис. 2 представлены зависимости максимальной объемной (а) и линейной (б) плотностей энергии, поглощенной в филаменте от фокусного расстояния используемой линзы. В каждом случае акустический датчик устанавливался в положение вдоль оптической оси, в котором акустический сигнал был максимален. Это соответствовало смещению датчика из плоскости точной фокусировки в сторону фокусирующей линзы на 3–30 мм в зависимости от ее фокусного расстояния. На рисунке представлены графики для энергий лазерного импульса в 3 и 20 мДж. Первый из этих режимов соответствует формированию одиночного филамента при $F = 312$ см, а второй — формированию множества филаментов, сливающихся затем в единый суперфиламент с высокой плотностью энергии [17]. Из рис. 2 видно, что максимальная плотность энергии (как объемная, так и линейная) достигается при наиболее коротких фокусных расстояниях. Поскольку в первую очередь энергия поглощается вследствие ионизации атомов и молекул, то этот режим облучения соответствует максимальной концентрации электронов и максимальным ионизационным токам. Именно эти токи являются источником терагерцевого излучения и, следовательно, следует ожидать максимальной эффективности генерации терагерцевого излучения при более коротких фокусных расстояниях.

Проведенные измерения терагерцевого излучения при различных фокусных расстояниях показали, что данная зависимость не является монотонной. Так, максимальная энергия терагерцевого импульса была зарегистрирована при $F = 50$ см, в то время как при $F = 30$ см регистрируемый терагерцевый сигнал был несколько меньше. Вместе с тем при больших фокусных расстояниях в 75, 100 и 312 см терагерцевое излучение зарегистрировать не удалось. На рис. 3 показана зависимость энергии терагерцевого импульса от энергии входного лазерного импульса. Видно, что при фокусировке с помощью линзы с $F = 30$ см зависимость близка к линейной. При фокусировке линзой

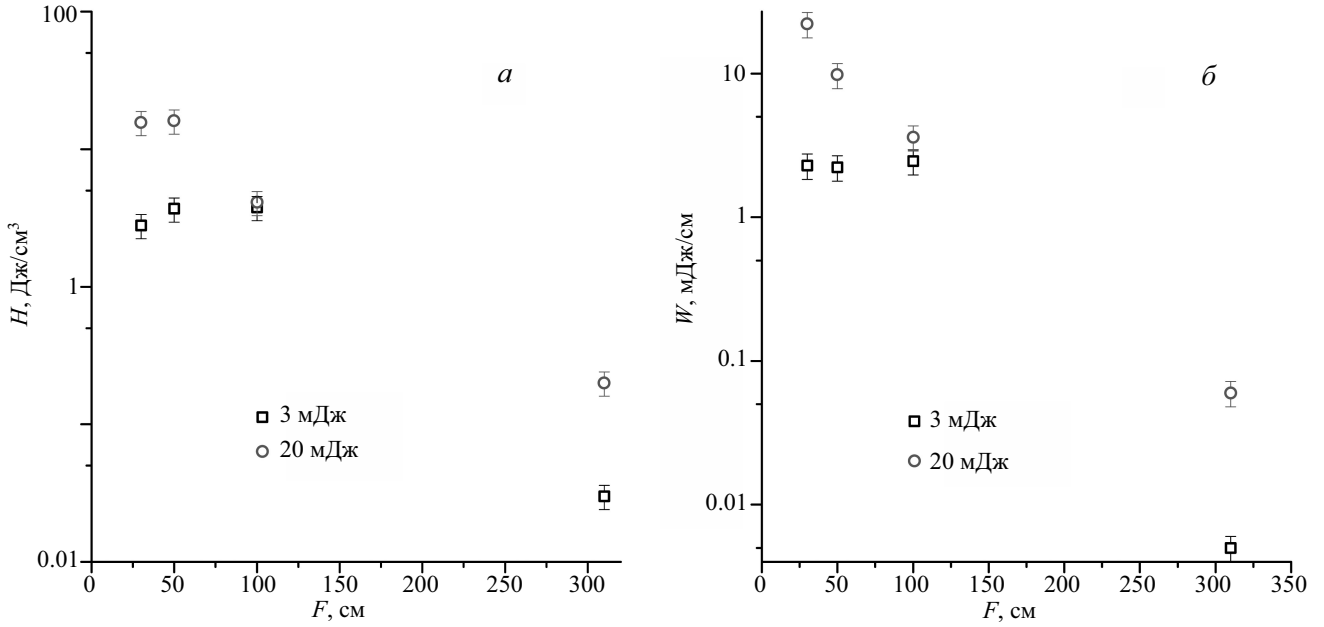


Рис. 2. Зависимость объемной (а) и линейной (б) плотностей энергии, поглощенной в филаменте, от фокусного расстояния линзы при энергии лазерного импульса 3 мДж (квадраты) и 20 мДж (круги)

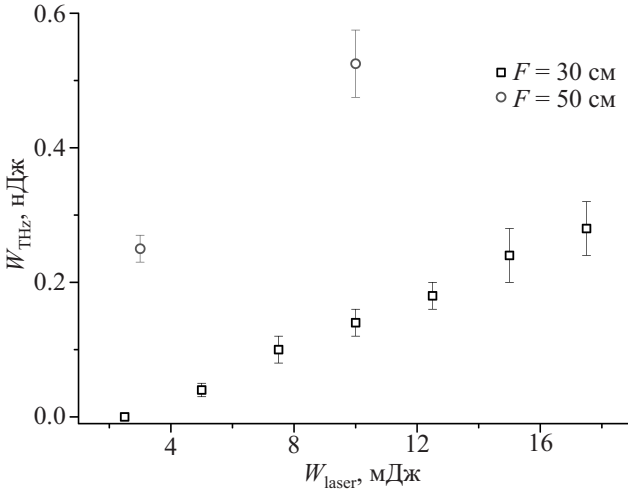


Рис. 3. Зависимость энергии терагерцевого импульса от энергии лазерного импульса для двух фокусных расстояний: $F = 30 \text{ см}$ (квадраты) и $F = 50 \text{ см}$ (круги)

с $F = 50 \text{ см}$ терагерцевый сигнал существенно возрастает — примерно в 3.7 раза при энергии лазерного импульса 10 мДж. При дальнейшем увеличении энергии в этом режиме терагерцевый сигнал уменьшается и такое поведение требует дальнейших исследований.

2. ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдаемый линейный рост энергии терагерцевого импульса с ростом энергии лазерного импульса при $F = 30 \text{ см}$ и увеличение энергии терагерцевого импульса при переходе к $F = 50 \text{ см}$ может быть объяснен в рамках простой модели. Предположим, что терагерцевое излучение генерируется во всей области существования филамента, при этом эффективность генерации определяется интенсивностью поля второй гармоники (поскольку для поля первой гармоники интенсивность внутри филамента ограничена на уровне $5 \times 10^{13} \text{ Вт}/\text{см}^2$ [18]). Известно, что филамент,

как правило, формируется до линейного фокуса линзы, а за этим фокусом быстро прекращается [19]. Таким образом, длина области, в которой генерируется терагерцевое излучение, примерно равна расстоянию l_w от точки формирования филамента до геометрического фокуса линзы. Точка формирования филамента в отсутствие линзы может быть рассчитана по формуле Марбургера [20], однако однозначной формулы при фокусировке линзой нет. Поскольку самофокусировка излучения определяется эффектом самовоздействия, примем, что расстояние до точки фокусировки от линзы определяется набегом нелинейной фазы на оси, т. е. B -интегралом:

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_F^z n_2 I(z) dz,$$

где λ — длина волны излучения, $n_2 = 10^{-19} \text{ Вт}/\text{см}^2$ — коэффициент керровской нелинейности воздуха,

$$I(Z) = I_0 \frac{F^2}{(F - z)^2}$$

— интенсивность лазерного излучения. Последняя формула предполагает, что длина перетяжки $\propto \lambda F^2/D^2$ (D — начальный диаметр пучка) меньше расстояния до точки старта филамента l_w и, следовательно, изменение интенсивности с расстоянием можно описывать в приближении геометрической оптики. Если принять, что точка старта филамента соответствует условию $B = 2\pi$, то для координаты старта филамента получим

$$l_w = \frac{\beta I_0 F^2}{1 + \beta I_0 F} \approx \beta I_0 F^2 = \beta P_0 F^2/D^2,$$

поскольку $\beta I_0 F \ll 1$ (здесь $\beta = \lambda/(4\pi P_c)$, $P_c = 10 \text{ ГВт}$ [19] критическая мощность самофокусировки). Оценка дает $l_w = 0.5\text{--}1.5 \text{ см}$ при $F = 30\text{--}50 \text{ см}$, т. е. точка старта филамента действительно находится

вне перетяжки лазерного пучка. Отметим, что полученная оценка находится в хорошем согласии с экспериментально наблюдаемой длиной филамента в нашем эксперименте. Интенсивность излучения второй гармоники в точке старта филамента

$$I_0^{2\omega} = \eta \left(I_0 \frac{F^2}{l^2} \right)^2 \frac{l^2}{l_w^2} = \eta \frac{D^2}{l^2 \beta^2},$$

где η — коэффициент преобразования во вторую гармонику, l — координата расположения кристалла для генерации второй гармоники. Положим, что интенсивность второй гармоники вдоль филамента постоянна и равна $I_0^{2\omega}$. Тогда энергия W_{THz} , излучаемая в терагерцевый диапазон, будет пропорциональна $I_0^{2\omega} l_w$, т. е.

$$W_{\text{THz}} \propto \frac{\eta}{\beta} P_0 \frac{F^2}{l^2}.$$

Полученная зависимость соответствует экспериментальным данным, представленным на рис. 3 и в смысле зависимости от энергии лазерного импульса (или мощности P_0), и в смысле зависимости от фокусного расстояния F . Отметим, что в наших экспериментах расстояния l при $F = 30$ и 50 см практически совпадали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами представлены экспериментальные результаты по генерации терагерцевого излучения при мягкой фокусировке двуцветного субтераваттного фемтосекундного лазерного импульса в воздухе. Обнаружено, что энергия терагерцевого импульса при $F = 30$ см линейно зависит от энергии исходного лазерного импульса и существенно возрастает при увеличении фокусного расстояния до 50 см. Построена простейшая модель, адекватно описывающая наблюдаемые закономерности: зависимость от энергии лазерного импульса и фокусного расстояния. Вместе с тем при больших фокусных расстояниях (75 и более сантиметров) терагерцевого излучения нами не наблюдалось, и даже для линзы с $F = 50$ см терагерцевый сигнал существенно уменьшался при больших энергиях лазерного импульса. Это может быть связано с пространственно-временным рассогласованием импульсов

первой и второй гармоник в области филаментации и будет предметом дальнейших экспериментальных исследований и численного моделирования.

Настоящая работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-42-01060).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Braun A., Korn G., Liu X. et al. // *Optics Letters*. 1995. **20**. P. 73.
2. Hamster H., Sullivan A., Gordon S. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1993. **71**. P. 2725.
3. D'Amico C., Houard A., Franco M., Prade B. // *Phys. Rev. Lett.* 2007. **98**. 235002.
4. Cook D., Hochstrasser R. // *Optics Letters*. 2000. **25**. P. 1210.
5. Houard A., Liu Y., Prade B., Mysyrowicz A. // *Optics Letters*. 2008. **33**. P. 1195.
6. Koskoster H. G., Thomson M. D., Kreß M., Löffler T. // *Laser Photonics Review*. 2007. **1**. P. 349.
7. Ushakov A. A., Matoba M., Nemoto N. et al. // *JETP Letters*. 2017. **106**. P. 706.
8. Ushakov A. A., Chizhov P. A., Andreeva V. A. et al. // *Optics Express*. 2018. **26**. P. 18202.
9. Wang T.-J., Chen Y., Marceau C. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2009. **95**. 131108.
10. Wang T.-J., Yuan S., Chen Y. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. **97**. 111108.
11. Панов Н. А., Косарева О. Г., Андреева В. А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2011. **93**. С. 715 (JETP Lett. 2011. **93**. P. 638.)
12. Uryupina D., Bychkov A., Pushkarev D., Mitina E. et al. // *Laser Physics Lett.* 2016. **13**. 095401.
13. Pushkarev D., Mitina E., Shipilo D. et al. // submitted to New J. of Physics
14. Xie X., Dai J., Zhang X.-C. // *Phys. Rev. Lett.* 2006. **96**. 075005.
15. Kosareva O., Esaulkov M., Panov N. et al. // *Optics Letters*. 2018. **43**. P. 90.
16. Hebling J., Yeh K.-L., Hoffmann M. C. et al. // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2008. **25**. P. 6.
17. Пушкарёв Д. В., Митина Е. В., Урюпина Д. С. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2017. **106**. С. 545 (Pushkarev D., Mitina E., Uryupina D. et al. // JETP Lett. 2017. **106**. P. 561.)
18. Kasparian J., Sauerbrey R., Chin S. L. // *Applied Physics B*. 2000. **71**. P. 877.
19. Liu W., Chin S. L. // *Optics Express*. 2005. **13**. P. 5750.
20. Marburger J. H. // *Progress Quantum Electron*. 1975. **4**. P. 35.

The Focal Length Effect on Energy Absorption and Terahertz Generation upon Focusing Two-Color Radiation in Air

D. V. Pushkarev¹, A. A. Ushakov^{1,3}, E. V. Mitina¹, N. A. Panov^{1,2}, D. S. Uryupina¹, D. E. Shipilo¹, R. V. Volkov¹, P. A. Chizhov³, A. P. Shkurinov^{1,2}, O. G. Kosareva^{1,2}, A. B. Savel'ev^{1,2,a}

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, chair of general physics and wave processes. Moscow 119991, Russia.

²International Laser Center, Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

³Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences. Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^aabsst@physics.msu.ru.

Generation of terahertz radiation upon filamentation in air of two-color radiation in loose focusing conditions with focal lengths from 30 to 312 cm and a beam diameter of 0.8 cm was studied. Two-color radiation was generated in a nonlinear BBO crystal irradiated by a converging laser beam. Measurements show that the energy input into the medium increases dramatically with a decrease in the focal length to 50 cm or less; at $F = 30$ cm, the energy of a terahertz pulse linearly depends on the laser pulse energy and increases significantly at $F = 50$ cm. Terahertz radiation is still not observed at longer focal lengths, which is apparently due to a spatio-temporal mismatch of the radiation of the first and second harmonics.

Keywords: femtosecond filamentation, terahertz radiation, energy input, two-color radiation, numerical aperture.

PACS: 42.65.Jx, 42.65.Ky, 42.65.Tg.

Received 21 November 2018.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2019. **74**, No. 2. Pp. 155–159.

Сведения об авторах

1. Пушкарев Дмитрий Владимирович — аспирант; тел.: (495) 939-53-18, e-mail: d.push@yandex.ru.
2. Ушаков Александр Александрович — аспирант; тел.: (495) 939-53-18, e-mail: ushakov.aleksandr@physics.msu.ru.
3. Митина Екатерина Владимировна — аспирант; тел.: (495) 939-53-18, e-mail: convallaria_lo@mail.ru.
4. Панов Николай Андреевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-53-18, e-mail: panov_na@mail.ru.
5. Урюпина Дарья Сергеевна — канд. физ.-мат. наук, ассистент; тел.: (495) 939-53-18, e-mail: dasha_uryupina@mail.ru.
6. Шипило Даниил Евгеньевич — аспирант; тел.: (495) 939-53-18, e-mail: shipilodan-frya@mail.ru.
7. Волков Роман Валентинович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-53-18, e-mail: rv_volkov@phys.msu.ru.
8. Чижов Павел Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (499) 135-30-09, e-mail: pvch@inbox.ru.
9. Шкуринов Александр Петрович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-11-06, e-mail: ashkurinov@gmail.com.
10. Косарева Ольга Григорьевна — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-30-91, e-mail: kosareva@physics.msu.ru.
11. Савельев Андрей Борисович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-53-18, e-mail: abst@physics.msu.ru.