

УДК 535.14+681.7

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ «СВЕТОВЫХ ПУЛЬ» В ПРОЗРАЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

Н.Ю. Вислобоков

Витебский филиал Международного университета «МИТСО»

Одним из приоритетных направлений научной и инновационной деятельности сегодня являются математика и моделирование сложных функциональных систем наряду с исследованиями в области лазерных, плазменных и оптических технологий, что обуславливает актуальность численных исследований процессов нелинейной оптики и фотоники. Спектр применения результатов таких исследований – от разработки компонентов лазерных систем до создания устройств микроэлектроники.

Цель статьи – провести численное исследование закономерностей распространения и условий осуществления пространственно-временной локализации мощных лазерных импульсов в диэлектрических средах в условиях аномальной дисперсии.

Материал и методы. Численная модель распространения тераваттных лазерных импульсов в диэлектрических средах строится на основе волнового уравнения и нелинейного уравнения Шредингера, модифицированного для учета всех тех эффектов, которые проявляются в процессе распространения. В данном случае учтены самовоздействие импульсного излучения, нелинейность среды, дисперсия и ионизационные эффекты, индуцированные электромагнитным полем излучения.

Результаты и их обсуждение. Автором приводятся основные результаты численного исследования процесса распространения и филаментации мощных световых импульсов фемтосекундной длительности в полосе частот аномальной дисперсии для прозрачных диэлектриков типа плавленого кварца и CaF_2 . Выделен диапазон начальных параметров, благоприятствующих процессам филаментации и формирования т.н. «световых пуль», проходящих в кристалле диэлектрика на значительно большие расстояния.

Заключение. Таким образом, в данной работе составлена математическая и численная модель, позволяющая имитировать процесс распространения и филаментации мощных световых импульсов фемтосекундной длительности в полосе частот аномальной дисперсии для прозрачных диэлектриков типа плавленого кварца и CaF_2 . Посредством изучения эволюции пространственно-временного профиля, огибающей поля импульса и его частотного спектра выделен диапазон начальных параметров, благоприятствующих процессам филаментации и формирования «световых пуль», проходящих в кристалле диэлектрика расстояние не менее 1,5 см.

Ключевые слова: световой импульс, ультракороткий лазерный импульс, фемтосекундный импульс, филаментация, индуцированная ионизация, аномальная дисперсия.

NUMERICAL STUDY OF THE IMPACT OF LASER RADIATION PARAMETERS ON THE PROCESS OF “LIGHT BULLET” PRODUCTION IN TRANSPARENT DIELECTRICS

N.Yu. Vislobokov

Vitebsk Branch of The International University MITSO

One of the priority areas of scientific and innovative work today is mathematics and modeling of complex functioning systems along with the research in the field of laser, plasma and optic technologies, which determines the relevance of numerical studies of non-linear optics and photonics processes. The range of the application of such research findings varies from the development of laser system components to the creation of microelectronic devices.

The purpose of the article is to conduct a numerical study of the propagation pattern and conditions for space and time localization of high-power laser pulses in dielectric media under conditions of anomalous dispersion.

Material and methods. The numerical model of the propagation of terawatt laser pulses in dielectric media is constructed on the basis of the wave equation and Schrodinger non-linear equation, modified to account for all the effects which appear in the process of propagation. In this case the self-impact of pulse radiation, the non-linearity of the media, dispersion and ionization effects, which are induced by the electromagnetic field of the radiation, are taken into consideration.

Findings and their discussion. The author presents the main results of the numerical study of the process of propagation and filamentation of high-power femtosecond light pulses in the frequency band of anomalous dispersion for transparent dielectrics such as fused quartz and CaF_2 . The range of initial parameters favoring the processes of filamentation and shaping the so-called light bullets, which go through a dielectric crystal over much longer distances, is identified.

Conclusion. Thus, in the paper a mathematical and numerical model is compiled that makes it possible to simulate the process of propagation and filamentation of high-power femtosecond pulses in the frequency band of anomalous dispersion for transparent dielectrics such as fused quartz and CaF_2 . By studying the evolution of the space and time profile which envelopes the pulse field and its frequency spectrum, a range of initial parameters that favors the processes of filamentation and shaping light bullets which go through the dielectric crystal over the distance of at least 1,5 cm, is identified.

Key words: light pulse, ultrashort laser pulse, femtosecond pulse, filamentation, induced ionization, anomalous dispersion.

Одним из приоритетных направлений научной и инновационной деятельности сегодня является математика и моделирование сложных функциональных систем наряду с исследованиями в области лазерных, плазменных, оптических технологий и оборудования, что делает безусловно одними из наиболее актуальных и перспективных численные исследования процессов нелинейной оптики, фотоники и распространения лазерного излучения в различных средах. Непосредственно предшествуют разработке новых видов продукции и технологических решений исследования экспериментальные, однако данному виду исследований, ввиду широчайшего диапазона возможных направлений и параметров для проведения эксперимента, всегда предшествует исследование численное, позволяющее смоделировать в виртуальной среде и предсказать с определенной точностью результаты реального эксперимента. Данное обстоятельство обуславливает особую значимость как математического, компьютерного и численного исследования в целом, так и численного исследования процессов филаментации и пространственно-временной локализации высокоинтенсивных ультракоротких лазерных импульсов в прозрачных диэлектрических средах, включая формирование областей с динамически изменяющимися характеристиками и параметрами, в частности.

Интерес ученых к исследованиям в этой области активизировался и не ослабевает со времен разработки лазерных систем, генерирующих импульсы с тераваттной пиковой интенсивностью фемтосекундной длительностью, которые распространялись во многих средах, значительно лучше сохраняя энергию импульса и не повреждая среду распространения, чем импульсы даже пикосекундной длительности. Однако с самого начала исследований было очевидно, что изучение процессов, связанных с распространением таких импульсов, является вопросом насколько интересным и перспективным для изучения и дальнейшего применения результатов исследований, так и сложным, из-за того, что целый ряд процессов и явлений активизируется и протекает одновременно.

Соответственно после проведения исследований того, какие именно процессы сопровождают прохождение высокоинтенсивных ультракоротких лазерных импульсов в различных средах (твердотельных, жидких и газообразных), включая закономерности генерации электронной плазмы, многофотонного поглощения и условий лавинного плазмаобразования, особое значение приобрели исследования в области формирования квазисолитонов и пульсирующих каналов в прозрачных диэлектриках [1–3], изучения влияния обратных волн, отраженных от т.н. нелинейного фокуса [4], а также воздействия индуцированной плазмы электронов и дисперсии на ширину спектра мощных оптических импульсов и условий генерации суперконтинуального излучения [5].

Логичным продолжением данных исследований являются научные изыскания в сфере фемтосекундной филаментации и формирования так называемых «световых пуль» (самоорганизующихся локализованных в пространстве-времени и солитоноподобных в процессе распространения электромагнитных волновых пакетов [6–7]), которые сегодня можно отнести к одним из наиболее актуальных. Причем надо отметить, что особого внимания в рамках указанного научного направления заслуживает проблема исследования динамики процессов филаментации оптических импульсов ультракороткой (фемтосекундной) длительности в кристаллах прозрачных диэлектриков, характеризующихся аномальной дисперсией, а также эволюционных закономерностей изменения их параметров и характеристик в процессе распространения.

Обусловлено это в первую очередь просто огромной шириной спектра возможных применений результатов исследований в данной области. Так, например, их можно будет использовать в спектроскопии, для разработки компонентов лазерных систем, в проектировании и производстве

волноводов [6], при создании инновационных 3D накопителей информации и целого ряда других устройств микроэлектроники [2; 5; 7; 8].

В настоящей работе нами приводятся основные результаты численного исследования процесса распространения и филаментации мощных световых импульсов фемтосекундной длительности в полосе частот аномальной дисперсии для прозрачных диэлектриков типа плавленого кварца и CaF_2 . Выделен диапазон начальных параметров, благоприятствующих пространственно-временной локализации таких импульсов в структуры, проявляющие свойства солитонов при распространении («световые пули») и проходящие в кристалле диэлектрика на значительные расстояния.

Цель исследования – провести численное исследование закономерностей распространения и условий осуществления пространственно-временной локализации мощных лазерных импульсов в диэлектрических средах в условиях аномальной дисперсии.

Материал и методы. Известно, что «световые пули» наблюдались в ряде случаев при распространении световых пучков со сложным пространственным профилем огибающей интенсивности и в линейном режиме, однако наиболее интересно и актуально для дальнейшего применения исследование динамики появления солитоноподобных волновых пакетов в нелинейных режимах распространения как результата процесса динамической локализации профиля мощного электромагнитного импульса, поддерживающейся на сравнительно протяженном интервале благодаря установлению динамического равновесия фокусирующих и дефокусирующих эффектов (т.н. эффекта филаментации) в процессе распространения лазерных импульсов высокой мощности в прозрачных диэлектрических средах с аномальной дисперсией (плавленый кварц, CaF_2). Причем следует отметить, что от процессов расщепления импульса на субимпульсы под воздействием плазмы свободных электронов достаточно высокой плотности [4] и пульсирующего режима распространения ультракоротких импульсов [5] «световые пули» отличает наличие локализации профиля огибающей интенсивности, как по пространственной, так и по временной координатам одновременно [3] и отсутствие непосредственной зависимости от субимпульсов, находящихся в непосредственной близости (опережающих или отстающих по временной координате на время $< \tau_r$, где τ_r – время релаксации среды).

Результаты и их обсуждение. С математической точки зрения, эволюционное уравнение для распространения лазерных импульсов с пиковой интенсивностью ($I = |E^2|$) более 10^{12}Вт/см^2 в диэлектрических средах строится на основе волнового уравнения $\Delta E - \ddot{D}/c^2 = 0$ с индукцией

$$D = \int_{-\infty}^t \varepsilon(r, z, t - t') E(t') dt', \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость, и нелинейного уравнения Шредингера, модифицированного для учета всех тех эффектов, которые проявляются в процессе распространения, в том числе и эффектов, вызванных электромагнитным полем самого излучения. В данном случае нам необходимо учесть самовоздействие импульсного излучения и нелинейность самой среды распространения, которая вводится в уравнение через нелинейную и зависящую от интенсивности (I) поправку n_i в показателе преломления $n = (n_0 + n_2 I^2 + n_4 I^4 + \Delta n_e)$, где $(i+1)$ соответствует порядку нелинейности, а Δn_e – изменение, вызванное ионизированной плазмой, а также дисперсионные и ионизационные эффекты, индуцированные возрастанием напряженности электромагнитного поля (E). Поправка Δn_e может быть вычислена как соотношение:

$$\Delta n_e = - \frac{2\pi e^2 \rho}{n_0 m_e (\omega_0^2 + \nu^2)}, \quad (2)$$

где e и m_e – заряд и масса электрона соответственно, а ν – их частота столкновений, ρ – плотность плазмы свободных электронов. А учет того, что в данном случае $\omega_0^2 \gg \nu^2$, позволит сделать вычисления более простыми. Влиянием волны, отраженной от неоднородностей диэлектрика, в нашем случае можно пренебречь даже в области максимальной амплитуды данной волны.

Кроме того, необходимо помнить и том, что в одних диапазонах частот дисперсия групповой скорости оказывает рассеивающее влияние на временной профиль поля импульсного пучка, которое считается нормальным, а в других – компрессионное (аномальная дисперсия).

В процессе численного исследования начальные параметры импульсного излучения для 2D+1 случая выберем соответствующими типовым характеристикам такового для реальных лазерных систем, генерирующих импульсы фемтосекундной длительности, с гауссовой формой осесимметричной огибающей напряженности электромагнитного поля, варьируемыми начальными длительностью (τ_0) и шириной (w_0) импульса:

$$E(r, z = 0, \tau) = E_0 \exp \left[-\frac{r^2}{2w_0^2} - \frac{\tau^2}{2\tau_0^2} \right], \quad (3)$$

$$I_0 = |E_0|^2,$$

$$P_{in} = \pi I_0 w_0^2.$$

Граничные условия очевидны и могут быть записаны как

$$\begin{cases} E(z, r = R, t) = 0 \\ \frac{\partial E(z, r=0, t)}{\partial r} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

А параметры диэлектрика как среды распространения установим соответствующими характеристикам кварцевого стекла bk7 и CaF₂. Начальную несущую частоту (ω_0) будем варьировать в пределах полосы аномальной дисперсии, т.к. известно, что именно в этом диапазоне частот для исследуемых диэлектриков наблюдалось формирование «световых пульс».

Изменение частоты в любой точке пространства и любой момент времени может быть вычислено через временной градиент нелинейной фазы φ_{nl} :

$$\Delta\omega(r, \tau) = \frac{\partial \varphi_{nl}(r, \tau)}{\partial \tau}. \quad (5)$$

Теперь перейдем к системе уравнений численной модели. После проведения математических преобразований по методикам, аналогичным тем, которые уже были описаны в [4], получим уравнение, описывающее динамику изменения пространственно-временного профиля огибающей комплексной напряженности электромагнитного поля вдоль продольной координаты z:

$$\begin{aligned} & \frac{\gamma \alpha_1}{2} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{i \Delta_1 E}{2k_0 n_0} + \frac{\partial E}{\partial z} + \\ & + \frac{1}{2} \frac{d(\ln n_{nl})}{dz} E - \frac{ik_0}{2n_0} (n^2 - n_{nl}^2) E - \\ & - \gamma \sum_{m=2}^{\infty} \frac{\beta_m + i\alpha_m}{2m!} \left(i \frac{\partial}{\partial t} \right)^m E - \frac{4\pi}{cn_0} \partial_t \chi_{nl} E = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

$$n_{nl} = n_2 I^2 + n_4 I^4 + \Delta n_e, \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{n_2 I^2 + n_4 I^4 + \Delta n_e}{n_0}, \quad (8)$$

где χ_{nl} – диэлектрическая восприимчивость, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, при этом λ_0 – начальная длина волны на несущей частоте, β_1 и β_m вычисляются по методике, описанной в [4].

Далее учитывая, кроме нелинейностей 3-го и 5-го порядков, эффекты, обусловленные ионизацией кристалла диэлектрика электромагнитным полем проходящего светового импульса, и помня о необходимости изучения также частотного спектра излучения, получим следующее уравнение

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial z} = & \frac{i(\partial^2 k / \partial \omega^2)^{-1}}{2k} \nabla_{\perp} E - \\ & - \frac{i}{2} \partial^2 k / \partial \omega^2 \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial \tau^2} - \left(\frac{\sigma}{2} \hat{T}^{-1} (1 + i\omega\tau_c) \rho \right) E - \\ & - \frac{1}{2} \frac{W(|E|) \cdot U}{|E|^2} E - \frac{i}{2k} \alpha E + G, \end{aligned} \quad (9)$$

$$G = ik_0 n_2 \hat{T} |E|^2 E + ik_0 n_4 \hat{T} |E|^4 E, \quad (10)$$

где $D = \frac{i}{2} \partial^2 k / \partial \omega^2$, k_0 – начальный волновой вектор; $\tau = t - \frac{z}{v_g}$, где v_g – групповая скорость, ρ – плотность электронной плазмы в поле электромагнитного импульса, $W(|E|)$ – скорость фотонной ионизации будем вычислять согласно модели, уже рассмотренной нами в [4], оператор $\hat{T} = \left(\frac{i\partial}{\omega\tau_p\partial\tau} + 1 \right)$, параметр σ – характеризует тормозное излучение и вычисляется по формуле, предложенной Друдде-Стюартом.

Далее для завершения численной модели и перехода к исследованию перейдем к безразмерным величинам путем нормирования всех величин и параметров на характерные величины, такие как дифракционная (L_0), плотность электронов вне поля импульса (ρ_0), начальные длительность и ширина импульса (так, например, от величин E, z, τ, w, ρ перейдем к безразмерным $A, \zeta, \tau', w', \rho'$):

$$\begin{aligned} |E|^2 = I_0 |A|^2, \quad \zeta = \frac{z}{L_0}, \\ \tau' = \frac{\left(t - \frac{z}{v_g} \right)}{\tau_p}, \quad w' = \frac{w}{w_0}, \quad \rho' = \frac{\rho}{\rho_0}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$L_0 = L_{df} = \frac{kw_0^2}{2}, \quad \frac{L_0}{2kw_0^2} = \frac{1}{4}.$$

Соответственно уравнение для плотности индуцированной электронной плазмы можно будет записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} = W_{PIM} + \eta_{PL} |A|^2 \rho - \eta_r \rho, \\ W_{PIM} = W_{PI} \cdot \tau_p / \rho_0, \quad \eta_{PL} = \tau_p I_0 \sigma_{IBS} / U, \quad \eta_r = \tau_p / \tau_r, \end{aligned} \quad (12)$$

где величину W_{PIM} будем рассчитывать по методике, уже описанной автором ранее в статье [5].

В ходе численного исследования изучались закономерности процесса эволюции профиля огибающей интенсивности ультракоротких импульсов мощностью $(1 - 10) \cdot 10^{12}$ Вт/см², а также их параметров в процессе прохождения через диэлектрические среды с параметрами, соответствующими bk7 и CaF₂ в условиях аномальной дисперсии, благоприятных для филаментации излучения. На основе данных об интенсивности электромагнитного поля в различных точках пространства исследовалось поведение сформировавшихся филаментов.

По результатам численного исследования четко наблюдалось, что в начале распространения в диэлектрике первоначально осесимметричный импульс подвергается фокусировке в начале по пространственной координате (рис. 1а, 1б), что легко объяснимо воздействием нелинейностей 3-го и 5-го порядков для мощности $P > P_{cr}$, а затем под воздействием аномальной дисперсии групповой скорости еще и по временной (рис. 1в), благодаря чему его форма становится опять близкой к осесимметричной, однако энергия импульса уже в значительно большей степени сконцентрирована в его центре, т.е. возрастает пиковая интенсивность (рис. 2). Такое возрастание пиковой интенсивности излучения приводит к значительному увеличению плотности плазмы свободных электронов (ПСЭ) (рис. 3), фактически изменяющей свойства среды распространения и оказывающей обратное действие на форму пространственно-временной огибающей профиля лазерного импульса, приводя к рассеиванию его

энергии вплоть до остановки процессов фокусировки и установления динамического равновесия, благодаря которому при благоприятных условиях появляется локализованный в пространстве–времени импульсный пучок высокой мощности, поведение которого при распространении во многом напоминает солитон, т.е. можно сказать, что наблюдается появление т.н. «световой пули», которая продолжает свое движение, однако из-за высокой концентрации энергии и, как следствие, плотности ПСЭ в центре импульса существует достаточно большой риск ее распада на субимпульсы. Одновременно в процессе дальнейшего распространения возможна и обратная самоорганизация субимпульсов в единый волновой пакет.

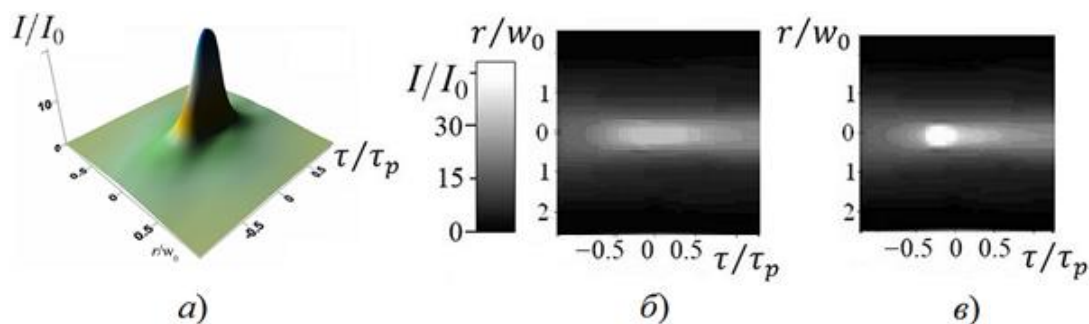


Рис. 1. Пространственно-временное (а) и тоновое (б) изображения пространственно-временного распределения интенсивности ультракороткого импульса, распространяющегося в плавленом кварце, на расстоянии 0,5 см от входа; тоновое изображение того же импульса на расстоянии 1,87 см от входа (в)

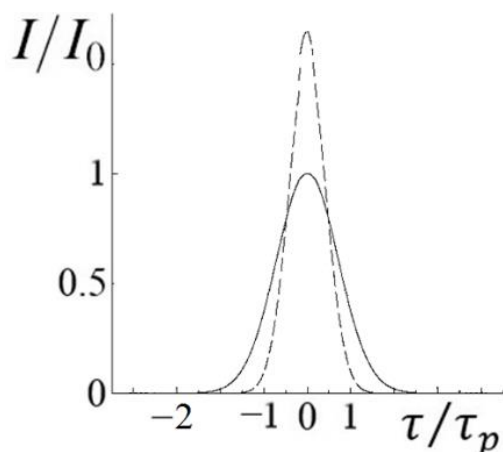


Рис. 2. Изменение огибающей интенсивности импульса в среде с аномальной дисперсией (в плавленом кварце, на входе – сплошная линия и на расстоянии 0,1 см от входа – штриховая линия)

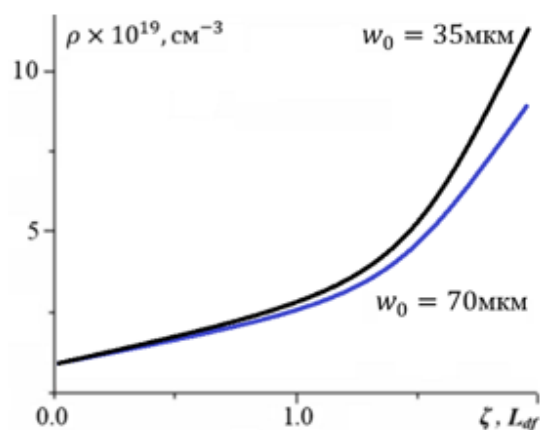


Рис. 3. Динамика изменения плотности плазмы свободных электронов в плавленом кварце при разных значениях начальной ширины светового пучка

Соответственно далее перейдем к вопросу выявления диапазона начальных параметров излучения, способствующих возникновению долгоживущих «световых пулей», возможности определять место их формирования и управления их параметрами, а также условий, приводящих к самоорганизации субимпульсов, появившихся в результате распада, обратно в единый волновой пакет без значимого рассеивания энергии. Вначале определим такие параметры, как длительность импульса и ширина пучка, благоприятные для появления «световой пули» в CaF₂ bk7 при несущей частоте, соответствующей 3 мкм. Для этого повaryируем τ_p в пределах от 10 до 300 фс с шагом 5 фс, а w_0 в пределах от 5 до 100 мкм – с шагом 5 мкм. Было выявлено, что при заданной начальной мощности вероятность фокусировки энергии импульса в локализованный волновой пакет с солитоноподобными свойствами, распространяющийся до распада по крайней мере на 1,5 см от входа, значительно повышалась, при начальных длительностях $\tau_p = 30 \div 50$ фс и $w_0 = 20 \div 50$ мкм для bk7 и $\tau_p = 15 \div 30$ фс и $w_0 = 10 \div 50$ мкм для CaF₂. В то же время надо отметить, что особого внимания требует вопрос

изучения того, как влияет мощность импульса на изучаемое явление и как изменяется спектр излучения на разных удаленностях от центра импульсного пучка.

Заключение. Таким образом, в данной работе составлена математическая и численная модель, позволяющая имитировать процесс распространения и филаментации мощных световых импульсов фемтосекундной длительности в полосе частот аномальной дисперсии для прозрачных диэлектриков типа плавленого кварца и CaF_2 . На основе изучения эволюции пространственно-временного профиля, огибающей поля импульса и его частотного спектра выделен диапазон начальных параметров, благоприятствующих процессам филаментации и формирования т.н. «световых пульс», проходящих в кристалле диэлектрика расстояние не менее 1,5 см, а также обоснована особая значимость изучения эволюции частотного спектра излучения в процессе филаментации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zaloznaya, E.D. Similarity parameter for the process of mid-IR light bullet formation / E.D. Zaloznaya [et al.] // *Quantum Electronics*. – 2020. – Vol. 50, № 8. – P. 354–372.
2. Proudnik, A. Electromagnetic interference shielding properties of the Cu, Ti and Cr coatings deposited by Arc-PVD on textile materials / A. Proudnik, Y. Zamastotsky, V. Siarheyev, V. Siuborov, E. Stankevich, I. Pobol // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2012. – Vol. 1, № 6. – P. 81–83.
3. Fu, W. High-power femtosecond pulses without a modelocked laser / W. Fu, L.G. Wright, F.W. Wise // *JOSA Optica*. – 2017. – Vol. 4, № 7. – P. 831–834.
4. Вислобоков, Н.Ю. Численное моделирование филаментации ультракороткого импульсного излучения в диэлектриках в условиях аномальной дисперсии / Н.Ю. Вислобоков // *Весн. Віцеб. дзярж. ун-та*. – 2022. – № 1(114). – С. 26–33.
5. Вислобоков, Н.Ю. Численное моделирование процесса формирования пульсирующего канала распространения мощного светового импульса в прозрачных диэлектриках / Н.Ю. Вислобоков // *Весн. Віцеб. дзярж. ун-та*. – 2018. – № 4(101). – С. 29–37.
6. Hayden, T. Large amplitude wavelength modulation spectroscopy for sensitive measurements of broad absorbers / T.S. Hayden, G.B. Rieker // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24, № 4. – P. 27910–27921.
7. Sugioka, K. Ultrafast lasers-reliable tools for advanced materials processing / K. Sugioka and Y. Cheng // *Light Sci. Appl.* – 2014. – Vol. 85, № 3. – P. 435–448.

REFERENCES

1. Zaloznaya, E.D. Similarity parameter for the process of mid-IR light bullet formation / E.D. Zaloznaya [et al.] // *Quantum Electronics*. – 2020. – Vol. 50, № 8. – P. 354–372.
2. Proudnik, A. Electromagnetic interference shielding properties of the Cu, Ti and Cr coatings deposited by Arc-PVD on textile materials / A. Proudnik, Y. Zamastotsky, V. Siarheyev, V. Siuborov, E. Stankevich, I. Pobol // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2012. – Vol. 1, № 6. – P. 81–83.
3. Fu, W. High-power femtosecond pulses without a modelocked laser / W. Fu, L.G. Wright, F.W. Wise // *JOSA Optica*. – 2017. – Vol. 4, № 7. – P. 831–834.
4. Vislobokov N.Yu. *Vesn. Vitseb. dziazh. un-ta* [Bulletin of Vitebsk State University], 2022, 1(114), pp. 26–33.
5. Vislobokov N.Yu. *Vesn. Vitseb. dziazh. un-ta* [Bulletin of Vitebsk State University], 2018, 4(101), pp. 29–37.
6. Hayden, T. Large amplitude wavelength modulation spectroscopy for sensitive measurements of broad absorbers / T.S. Hayden, G.B. Rieker // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24, № 4. – P. 27910–27921.
7. Sugioka, K. Ultrafast lasers-reliable tools for advanced materials processing / K. Sugioka and Y. Cheng // *Light Sci. Appl.* – 2014. – Vol. 85, № 3. – P. 435–448.

Поступила в редакцию 11.10.2022

Адрес для корреспонденции: e-mail: nkt_2004@mail.ru – Вислобоков Н.Ю.