

УДК 538.9

РАЗРУШЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК СВИНЦА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2020 г. А. В. Овчинников¹, *, О. В. Чефонов¹, М. Б. Агранат¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: ovch2006@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.02.2020 г.

После доработки 10.03.2020 г.

Принята к публикации 31.03.2020 г.

Рассматривается вопрос о получении новых экспериментальных данных по деформированию, модификации и разрушению тонких пленок свинца под действием субпикосекундных импульсов терагерцевого излучения с напряженностью электрического поля до 23 МВ/см.

DOI: 10.31857/S0040364420040110

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря появлению в настоящее время одно- и двухпериодных импульсов терагерцевого (ТГц) спектра излучения с амплитудой электрического поля порядка 10^7 – 10^8 В/см [1–4] открылось новое направление в фундаментальных и прикладных исследованиях. Это – индуцированные ТГц-полями нелинейные процессы в поверхностных слоях металлов и полупроводников, а также силовое воздействие (деформирование, модификация и разрушение) на тонкие пленки металлов [5–14].

ТГц-импульс длительностью в половину периода электромагнитной волны (доли пикосекунды) по сути моделирует нерезонансное воздействие на объект квазипостоянного электрического поля с высокой напряженностью, что невозможно создать другими методами.

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований образования высокоскоростного деформирования, модификации и разрушения тонких пленок свинца под действием сверхкоротких импульсов дальнего инфракрасного ТГц-спектра излучения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения исследований разработан и создан экспериментальный стенд, состоящий из фемтосекундной хром-форстеритовой лазерной системы, генератора ТГц-импульсов, системы диагностики лазерного и ТГц-излучений. Генерация импульсов ТГц-излучения осуществлялась методом оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов в нелинейных органических кристаллах ОН1 [4, 15] и DSTMS [16]. В качестве накачки ТГц-кристаллов использовалась хром-форстеритовая фемтосекундная лазер-

ная система, которая позволяла получить излучение на длине волны 1240 нм с длительностью импульса 80 фс и энергией до 90 мДж. Излучение с длиной волны 1240 нм является оптимальным для генерации ТГц-импульсов с высокой конверсионной эффективностью (до 3%) и гауссовым пространственным распределением профиля интенсивности.

Выходная энергия импульсов ТГц-излучения измерялась калиброванной ячейки Голя (GC-1D Tydex). ТГц-кристалл с рабочим диаметром 8 мм позволял получать энергию ТГц-излучения величиной до 120 мкДж. Регулировка плотности энергии накачки на поверхности ТГц-кристалла и, следовательно, регулировка энергии импульса осуществлялась путем изменения энергии лазерного импульса с помощью поляризационного ослабителя, состоящего из полуволновой пластины и призмы Глана. Напряженность электрического поля ТГц-импульса измерялась с помощью методики электрооптического детектирования с использованием электрооптического кристалла GaP (110) толщиной 100 мкм, закрепленного на оптическом контакте на подложке GaP (100) толщиной 2 мм. Длительность импульса ТГц-излучения составляла 700 фс по уровню 0.5 от максимума интенсивности и измерялась с помощью автокоррелятора первого порядка (интерферометра Майкельсона). Помимо контроля параметров лазерного импульса в каждом импульсе, созданная система регистрации обеспечивала запись информации, получаемой в измерениях: энергии ТГц-импульса, энергии прошедшего образец оптического импульса на основной частоте или на частоте его второй гармоники, либо после электрооптического детектирования и другой необходимой информации.

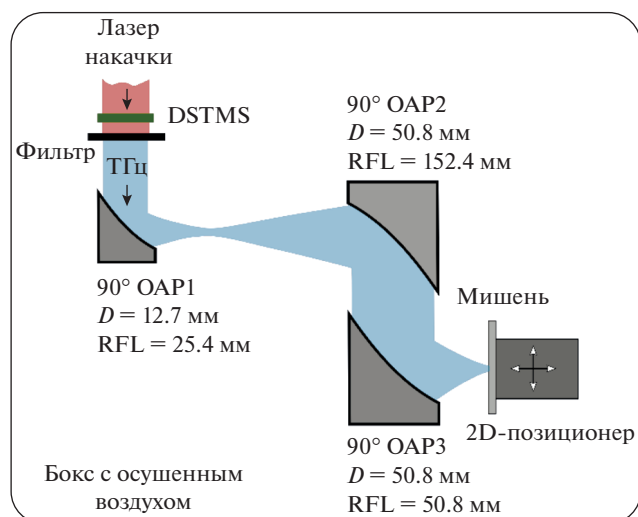


Рис. 1. Экспериментальная схема измерений.

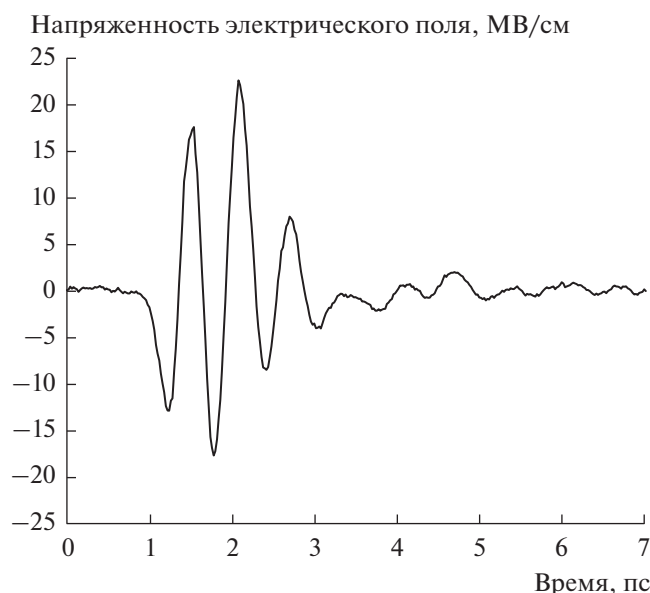


Рис. 2. Временная форма ТГц-импульса.

Для блокировки излучения лазерной накачки на длине волны 1240 нм и ее второй гармоники на длине волны 620 нм, возникающей в процессе генерации ТГц-излучения в нелинейном органическом кристалле DSTMS, после кристалла был установлен отрезающий ТГц-фильтр (LPF8.8-47, Tydex), не пропускающий излучение с длинами волн меньше 34 мкм. Коэффициент ослабления фильтра на длине волны излучения 1240 нм составлял не менее 10^8 .

Для проведения экспериментальных исследований по высокоскоростному деформированию и разрушению конструкционных материалов и сплавов с помощью сверхкоротких импульсов направленного ТГц-излучения разработана методи-

ка измерения порогов разрушения исследуемых объектов. На рис. 1 представлена оптическая схема проведения измерений.

Максимальная конверсионная эффективность обеспечивалась плотностью энергии лазерного излучения на поверхности кристалла DSTMS, равной 15 мДж/см^2 , в центре пятна с гауссовым распределением. При такой плотности энергии накачки лазерного излучения не происходит каких-либо необратимых процессов с нелинейным кристаллом, что позволяет работать с частотой повторения импульсов лазера накачки 10 Гц.

Для корректировки расходимости и обеспечения оптимальных условий фокусировки пучка ТГц-излучения в пятно близко к дифракционному пределу использовался телескоп, который увеличивал диаметр исходного ТГц-пучка в шесть раз (для полного заполнения апертуры фокусирующего параболического зеркала) и состоял из двух внеосевых параболических зеркал с эффективным фокусным расстоянием 25.4 мм (ОАР1) и 152.4 мм (ОАР2). Фокусировка ТГц-пучка на образец осуществлялась внеосевым параболическим зеркалом диаметром 50.8 мм с фокусным расстоянием 50.8 мм (ОАР3). Все элементы экспериментальной схемы размещались в боксе с осушенным воздухом (относительная влажность меньше 5%) для уменьшения поглощения ТГц-излучения парами воды.

Измерения размера ТГц-пучка в фокальной плоскости фокусирующего параболического зеркала проводились “ножевым” методом, что позволило определить плотность энергии ТГц-излучения на поверхности исследуемого образца. Диаметр пучка на уровне $1/e$ от максимума составлял 180 мкм. При максимальной энергии ТГц-импульса (120 мкДж) плотность энергии на поверхности образца достигала 470 мДж/см^2 . Измерения напряженности электрического поля ТГц-импульса в фокальной плоскости параболического зеркала осуществлялись методом электрооптического детектирования. В максимуме напряженности достигала 23 МВ/см. Временная форма импульса представлена на рис. 2.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты по исследованию разрушения конструкционных материалов и сплавов проводились с пленками свинца толщиной 50 нм, напыленными на стеклянную подложку толщиной 150 мкм. Толщина пленок примерно совпадает с глубиной скин-слоя для частоты 1 ТГц. Определено пороговое значение напряженности электрического поля ТГц-импульса, при котором происходит разрушение пленки. Для этого были получены разрушения пленки при различной напряженности электрического поля ТГц-импульса (рис. 3).

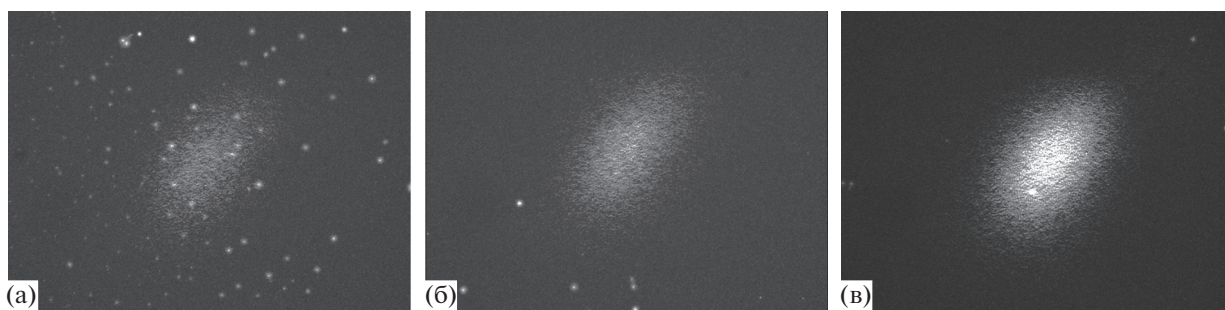


Рис. 3. Изображения повреждений свинцовой пленки толщиной 50 нм, напыленной на стеклянную подложку толщиной 150 мкм, при воздействии на нее одиночным ТГц-импульсом с разными значениями напряженности электрического поля: (а) – 15 МВ/см, (б) – 19, (в) – 23.

Для определения порогового значения использовалась методика, основанная на измерениях размера пятна высокоинтенсивного импульсного ТГц-излучения с гауссовым профилем по оптически индуцированным фазовым изменениям на поверхности пленки свинца. Данный подход справедлив для любого чувствительного материала и широко используется в измерениях порогового значения плотности энергии различных лазерно-индуцированных явлений.

На рис. 4 приведены зависимости квадрата радиуса области повреждения пленки от логарифма падающей энергии ТГц-импульса. Для пучка с гауссовым профилем интенсивности эта зависимость должна иметь вид прямой линии. По значению в точке пересечения подгоночной прямой с горизонтальной осью определяется пороговое значение энергии, при которой происходит повреждение пленки, а по наклону прямой находится параметр гауссова пучка r_0 , который определяет радиус пучка на уровень $1/e$ от максимума интенсивности. Исходя из полученных экспериментальных данных, r_0 составлял 100 мкм, что хорошо коррелирует с полученными размерами пучка на образце ножевым методом, а пороговое значение плотности энергии, при котором происходит разрушение пленки свинца, составляло 72 мДж/см² при напряженности электрического поля ТГц-импульса 14 МВ/см.

Также исследован характер разрушения пленки свинца при многократном воздействии ТГц-импульсом с напряженностью поля 23 МВ/см. На рис. 5 представлены оптические изображения повреждений поверхности металлической пленки при многократном облучении ТГц-импульсом с напряженностью электрического поля более 20 МВ/см, полученные с помощью оптического микроскопа в проходящем свете. При увеличении количества облучений до пяти область повреждений растет и приходит к “насыщению”, т.е. при дальнейшем увеличении количества облучений размеры повреждения не меняются.

На рис. 6 представлены изображения повреждений пленки свинца, полученные с помощью электронного микроскопа с различным пространственным разрешением в центральной части пятна и на периферии. Напряженность поля ТГц-импульса на поверхности пленки составляла величину 23 МВ/см. Характер разрушений при многократном воздействии ТГц-импульса представляет собой набор хаотично расположенных трещин субмикронной толщины. В отличие от характера разрушений пленки из нержавеющей стали периодическая структура в виде вытянутых каналов нарушения сплошности металлической пленки, ориентированных перпендикулярно вектору напряженности электрического поля [1], отсутствует. На рис. 7 показаны характерные изображения повреждений пленки из стали 12Х18Н10Т на подложке из стекла толщиной 20 нм [17].

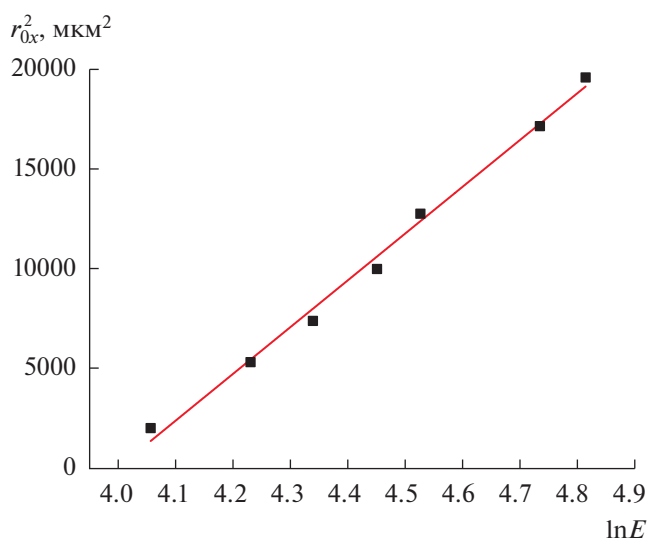


Рис. 4. Зависимость квадрата радиуса области повреждения пленки свинца от логарифма энергии ТГц-импульса.

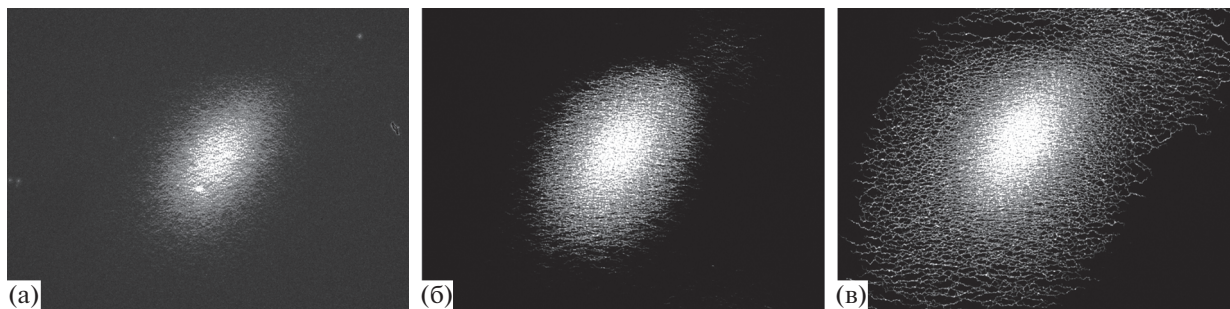


Рис. 5. Изображения повреждений свинцовой пленки при воздействии на нее разным количеством ТГц-импульсов: (а) – 1 импульс, (б) – 5, (в) – 600, с напряженностью электрического поля 23 МВ/см.

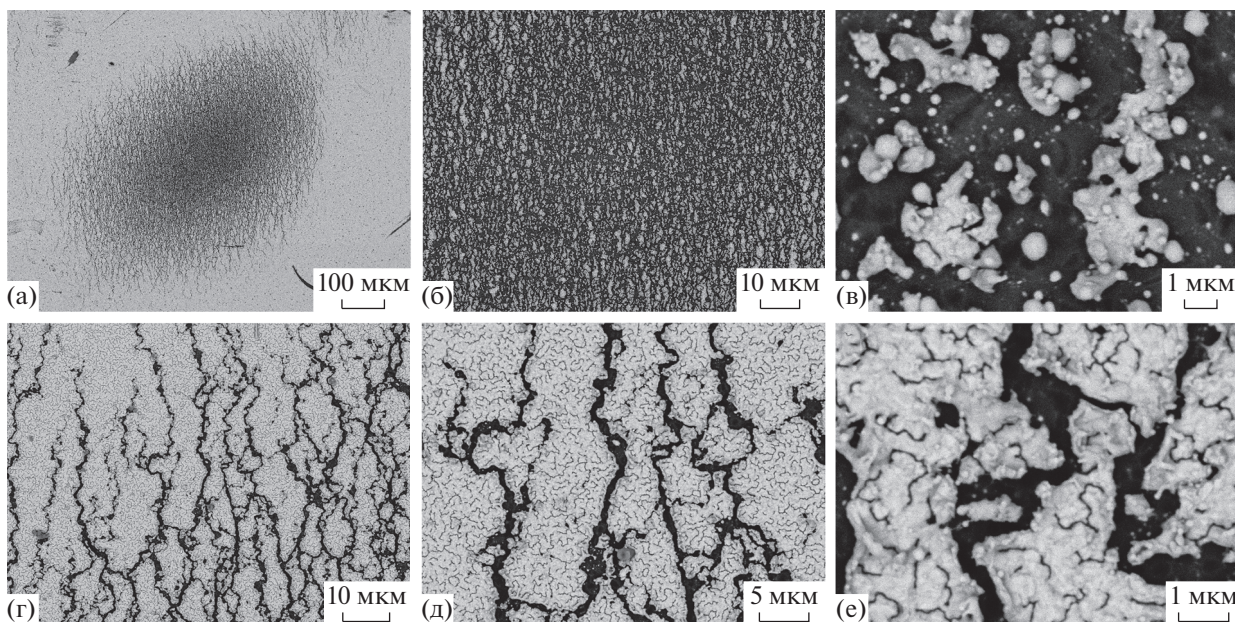


Рис. 6. СЭМ-изображения повреждений пленки свинца: центральная часть области облучения (верхний ряд), периферия (нижний ряд); темные полосы – сквозные отверстия.

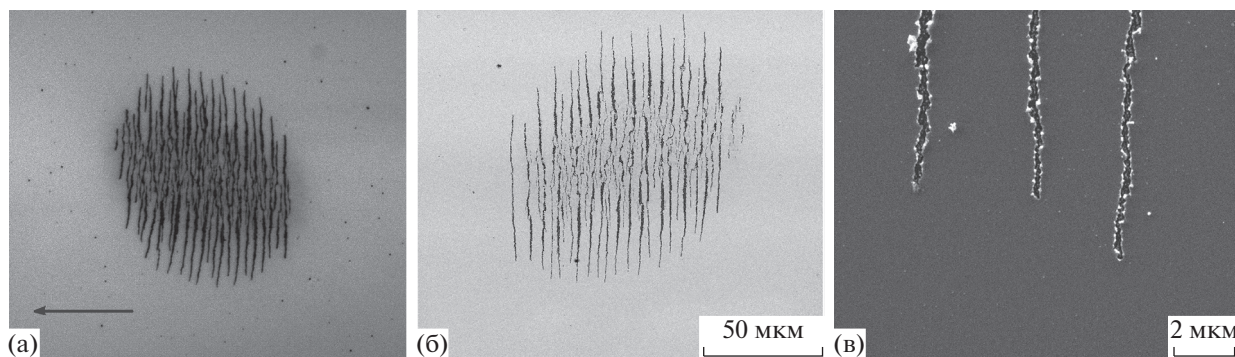


Рис. 7. Изображения повреждений пленки из стали 12Х18Н10Т на подложке из стекла [1]: (а) – оптическое, (б) и (в) – СЭМ-изображения с различным пространственным разрешением (стрелка – направление вектора электрического поля).

Характер разрушения пленки свинца резко отличается от характера разрушений пленки из нержавеющей стали. Ранее в работе [11] было вы-

двинуто предложение об электрострикционном механизме разрушения пленки алюминия как одним из возможных путей разрушения тонких ме-

таллических пленок под действием импульсов ТГц-излучения с высокой напряженностью электрического поля. Однако представляется, что для обоснования электрострикционного механизма разрушения пленки свинца недостаточно экспериментальных данных. Также открытым остается вопрос о влиянии материала подложки на характер разрушений, так как используемая стеклянная подложка сильно поглощает ТГц-излучение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые экспериментально исследованы прочность свинца и характер его разрушения при нерезонансном воздействии сильного квазипостоянного электрического поля сверхкоротких импульсов направленного ТГц-излучения с напряженностью поля до 23 МВ/см. ТГц-импульс длительностью в единицы пикосекунд по сути моделирует нерезонансное воздействие на объект квазипостоянного электрического поля с высокой напряженностью, что невозможно создать другими методами. Пороговое значение напряженности электрического поля, при которой происходит разрушение тонкой пленки свинца, напыленной на стеклянную подложку, определено по отсутствию повреждений на поверхности пленки и составило величину 14 МВ/см. Полученные экспериментальные данные не позволяют сделать однозначного вывода о механизме разрушения тонких металлических пленок.

Все экспериментальные работы выполнены на уникальной тераваттной хром-форстеритовой лазерной системе (УНУ “ЛТФК”) в центре коллективного пользования “Лазерный фемтосекундный комплекс” ОИВТ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vicario C., Ovchinnikov A., Ashitkov S., Agranat M., Fortov V., Hauri C.* Generation of 0.9-mJ THz Pulses in DSTMS Pumped by a Cr:Mg₂SiO₄ Laser // *Opt. Lett.* 2014. V. 39. P. 6632.
2. *Vicario C., Monoszlai B., Hauri C.P.* GV/m Single-Cycle Terahertz Fields from a Laser-driven Large-size Partitioned Organic Crystal // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 112. P. 213901.
3. *Shalaby M., Hauri C.P.* Demonstration of a Low-frequency Three-dimensional Terahertz Bullet with Extreme Brightness // *Nat. Comm.* 2015. V. 6. P. 5976.
4. *Vicario C., Jazbinsek M., Ovchinnikov A., Chefonov O., Ashitkov S., Agranat M., Hauri C.* High Efficiency THz Generation in DSTMS, DAST, and OH1 Pumped by Cr:forsterite Laser // *Opt. Exp.* 2015. V. 23. P. 4573.
5. *Bahk Y.-M., Kang B.J., Kim Y.S., Kim J.-Y., Kim W.T., Kim T.Y., Kang T., Rhie J., Han S., Park C.-H., Roter-mund F., Kim D.-S.* Electromagnetic Saturation of Angstrom-Sized Quantum Barriers at Terahertz Frequencies // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 115. P. 125501.
6. *Shalaby M., Vicario C., Hauri C.P.* Low Frequency Terahertz-induced Demagnetization in Ferromagnetic Nickel // *Appl. Phys. Lett.* 2016. V. 108. P. 182903.
7. *Chefonov O., Ovchinnikov A., Romashevskiy S., Chai X., Ozaki T., Savel'ev A., Agranat M., Fortov V.* Giant Self-induced Transparency of Intense Few-cycle Terahertz Pulses in *n*-doped Silicon // *Opt. Lett.* 2017. V. 42. P. 4889.
8. *Romashevskiy S.A., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Agranat M.B.* Subpicosecond Terahertz Radiation with an Electric Field above 1 MV/cm: Interaction with Condensed Matter and its Applications // *High Temp.* 2017. V. 55. № 6. P. 859.
9. *Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Agranat M.B., Fortov V.E., Efimenko E.S., Stepanov A.N., Savel'ev A.B.* Nonlinear Transmittance of Intense Few Cycle Terahertz Pulse Through Opaque *n*-doped Si // *Phys. Rev. B.* 2018. V. 98. P. 165206.
10. *Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Evlashin S.A., Agranat M.B.* Damage Threshold of Ni Thin Film by Terahertz Pulses // *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves.* 2018. V. 39. Iss. 11. P. 1047.
11. *Agranat M.B., Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Kondratenko P.S., Ashitkov S.I., Fortov V.E.* Damage in a Thin Metal Film by High-power Terahertz Radiation // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 120. P. 085704.
12. *Chai X., Ropagnol X., Ovchinnikov A., Chefonov O., Ushakov A., Garcia-Rosas C.M., Isgandarov E., Agranat M., Ozaki T., Savel'ev A.* Observation of Crossover from Intra-band to Interband Nonlinear Carrier Dynamics Driven by Extremely Intense Terahertz Field // *Opt. Lett.* 2018. V. 43. № 21. P. 5463.
13. *Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Sitnikov D.S., Agranat M.B.* Focal Spot Imaging of Terahertz Subpicosecond Pulse by THz-field-induced Optical Second Harmonic Generation // *High Temp.* 2019. V. 57. № 1. P. 137.
14. *Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Mishina E.D., Agranat M.B.* Second Harmonic Generation in the Bulk of Silicon Induced by an Electric Field of a High Power Terahertz Pulse // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. № 1. P. 9753.
15. *Brunner F., Kwon O., Kwon S., Jazbinsek M., Schneider A., Günter P.* A Hydrogen-bonded Organic Nonlinear Optical Crystal for High-efficiency Terahertz Generation and Detection // *Opt. Exp.* 2008. V. 16. № 21. P. 16496.
16. *Stillhart M., Schneider A., Günter P.* Large-Size Bulk and Thin-film Stilbazolium-salt Single Crystals for Nonlinear Optics and THz Generation // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2018. V. 25. P. 1914.
17. *Чефонов О.В., Овчинников А.В., Евлашин С.А., Агранат М.Б.* Деградация и разрушение тонких стальных пленок при многократном воздействии сверхкоротких импульсов ТГц-излучения // *Письма в ЖТФ.* 2019. Т. 45. № 11. С. 41.