

УДК 535:535.4:620.22

## ПОГЛОТИТЕЛИ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО И СВЧ ДИАПАЗОНОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

В.А. БАННЫЙ<sup>1+</sup>, А.И. САВИЦКИЙ<sup>1</sup>, Л.И. КРАМОРЕВА<sup>1</sup>, Е.С. ПЕТРОВА<sup>1</sup>, Д.Б. КУЛИКОВИЧ<sup>1</sup>, Н.С. ВИНДИКТОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Гомельский государственный медицинский университет, ул. Ланге, 5, 246050, г. Гомель, Беларусь

<sup>2</sup>Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь

*Разработаны экспериментальные образцы поглотителей энергии электромагнитного излучения оптического и СВЧ диапазонов на основе полимерных композиционных материалов. Предложен способ локализации радиопоглощающих объектов лазерным излучением с гауссовым распределением интенсивности в поперечном сечении пучка.*

**Ключевые слова:** полимерные радиопоглощающие композиты, электромагнитное излучение, СВЧ-диапазон, оптическая локация, лазерное излучение.

### Введение

Среди многообразия радиопоглощающих материалов (РПМ) высокую эффективность показали композиты на основе конструкционных крупнотоннажно выпускаемых термопластов, в частности, полиэтилена (ПЭ) [1–4]. Введение полимерных связующих в состав композиционных РПМ позволяет: снизить вес конструкций, внедрить высокотехнологичные методы переработки полимерных композитов в изделия, упростить технологию формирования РПМ и получать пластичные РПМ и высокоэластичные обшивки, хорошо сопрягаемые с криволинейными поверхностями изделий сложной формы, изменять структуру и конфигурацию поглотителей энергии электромагнитного излучения (ЭМИ) в широких пределах, обеспечить требуемый комплекс их физико-механических, физико-химических и других эксплуатационных характеристик с минимальными затратами. Необходимое условие достижения материалом заданного уровня радиотехнических параметров – наличие в его составе компонентов, обеспечивающих потери СВЧ-энергии. К числу таких компонентов относят диэлектрические, электропроводящие, магнитные и комбинированные функциональные наполнители (ФН) [5–9].

Одной из ведущих тенденций развития оборонной техники является совершенствование средств и методов противодействия радиолокационному обнаружению и распознаванию объектов. Задача радиолокационной маскировки состоит в том, чтобы ограничить и исказить сигнал, поступающий

от объекта к радиолокационной станции (РЛС), а именно: повысить его пространственную, структурную, частотную, временную, поляризационную и энергетическую скрытность; изменить во времени параметры зондирующих импульсов и ухудшить их условия распространения в пространстве. С этой целью используют специальные устройства радиолокационного противодействия, которые генерируют активные электромагнитные помехи, либо пассивные заградительные и имитирующие помехи (дымовые завесы, облака дипольных отражателей, ложные цели и т.п.) [10, 11].

Наиболее прогрессивные разработки, направленные на создание объектов с малой величиной заметности для оптико-визуальных, оптико-электронных, радиолокационных и акустических систем обнаружения, базируются на комплексных технологиях Stealth [3, 4, 12]. В связи с этим, разрабатываемые поглотители энергии ЭМИ должны иметь низкий коэффициент отражения как в оптическом, так и в СВЧ диапазонах.

Основные преимущества оптической локализации перед РЛС – большая точность определения угловых координат объектов (по максимуму отраженного сигнала) и высокая разрешающая способность по дальности. Например, при использовании лазерного пучка с углом расходимости 10' погрешность определения угловых координат объекта составляет < 1' (у радиолокаторов 25–30'); при длительности светового импульса 10 нс разрешение по дальности мо-

<sup>+</sup> Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: bannyi@tut.by

жет достигать нескольких сантиметров. Кроме того, оптический локатор обладает высокой угловой разрешающей способностью.

Однако, существенным недостатком лазерных локаторов является сильная зависимость пространственных характеристик зондирующего пучка от наличия шумовых источников на пути его распространения. Так, присутствие в атмосфере рассеивающих частиц в виде тумана, дождевых капель, снега приводит к радикальному рассеянию зондирующего излучения, искажению его структуры и в большинстве случаев делает лазерный радар непригодным для использования. В связи с этим, актуальным является также изучение особенностей прохождения лазерного излучения через светорассеивающие среды.

**Цель работы:** создание экспериментальных образцов поглотителей энергии ЭМИ оптического и СВЧ диапазонов на основе полимерных композиционных материалов, исследование особенностей прохождения лазерного излучения через дисперсные среды, и изучение возможностей оптической локации РПМ лазерным излучением с гауссовым распределением интенсивности в поперечном сечении пучка в однородной среде.

**Объектами исследования** служили листовые монолитные и волокнистые РПМ на основе ПЭ (ГОСТ 16337-77, ГОСТ 16803-070). В качестве ФН использованы дисперсный магнитно-мягкий марганец-цинковый феррит (ММФ, ТУ 6-09-5111-84, марка 2500 НМС, размер частиц не превышает 200 мкм), стеклосферы (диаметр 200–500 мкм). Стеклосферы были использованы в качестве одного из компонентов наполнителя, обеспечивающего рассеяние и переотражение ЭМИ СВЧ-диапазона, прошедшего внутрь РПМ.

## Результаты и обсуждение

ПЭ-связующее механически смешивали с ФН и подвергали гранулированию на экструзионной линии. Листовые монолитные РПМ формировали методами термического прессования (образцы №№ 1 и 2), волокнистые РПМ в виде нетканых полотен (образцы №№ 3 и 4) – методом экструзии с пневматическим напылением полимерного расплава на формообразующую подложку [13]. Состав исследуемых образцов РПМ: № 1 – ПЭ и ММФ (50 мас.%,  $d = 50\text{--}200$  мкм); № 2 – ПЭ, ММФ (50 мас.%,  $d = 50\text{--}200$  мкм) и стеклосферы (10 мас.%,  $d = 200\text{--}500$  мкм); № 3 – ПЭ; № 4 – ПЭ и ММФ (38 мас.%,  $d < 50$  мкм).

Полимерные композиционные РПМ изготовлены в соответствии с принципами размерно-рецептурной и структурной оптимизации [14]. Радиофизические характеристики образцов РПМ оценены рефлектометрическим методом в волноводных трактах измерителей коэффициента стоячей волны и ослабления (P2-57, P2-58, P2-61, P2-67) в диапазоне частот 2–27 ГГц при нормальном падении электромагнитной волны (ЭМВ). Частотные зависимости коэффициента отражения  $R$  для монолитных образцов РПМ, измеренные в волноводных линиях, представлены на рис. 1.

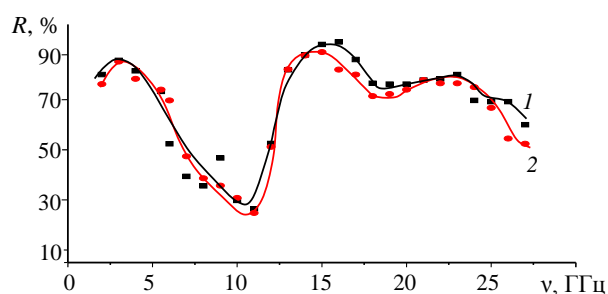


Рисунок 1 — Частотные зависимости коэффициентов отражения ( $R$ ) для образцов РПМ, толщиной  $h = 3$  мм. Состав образцов: 1 – ПЭ + ММФ (50 мас.%,  $d = 50\text{--}200$  мкм); 2 – ПЭ + ММФ (50 мас.%,  $d = 50\text{--}200$  мкм) + стеклосферы (10 мас.%,  $d = 200\text{--}500$  мкм).

В частотном диапазоне функционирования наземных РЛС (8–12 ГГц) полимерные композиционные РПМ обладают высокими радиофизическими характеристиками (коэффициент отражения от поверхности материала не более 25%).

## Методы оптической локации

Как указывалось выше, рассеивающие среды могут существенным образом затруднять оптическую локацию объектов. Ранее авторами [15–17] было предложено внедрить в передающую оптическую схему оптического радара дублет: аксикон-линза с сильной сферической aberrацией (рис. 2, позиция 3, 4).

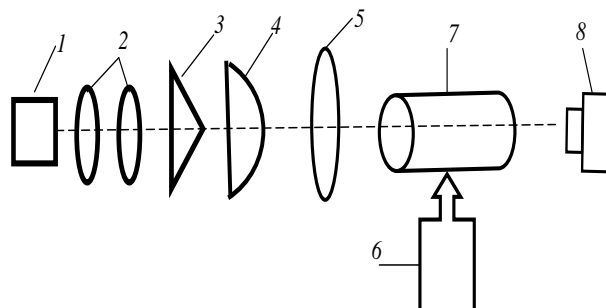


Рисунок 2 — Схема экспериментальной установки: 1 – лазер; 2 – коллиматор; 3 – аксикон; 4 – линза с сильной сферической aberrацией; 5 – длиннофокусная линза; 6 – ультразвуковой ингалятор; 7 – труба; 8 – CMOS-камера с матрицей  $22,3 \times 14,9$  мм с разрешением 15,1 млн. пикселей.

Это позволило сформировать лазерный зондирующий квазибездифракционный пучок и улучшило качество работы лазерного радара в неблагоприятных погодных условиях в следствие улучшения поперечной структуры центрального максимума и снижения спекл-шума [18].

Для получения тумана различной концентрации в лабораторных условиях использовался ультразвуковой ингалятор «ТНОМЕХ» в режиме 1 и 9. Условно эти два режима соответствуют туману слабой и сильной плотности. В качестве ингаляционной жидкости использовали дистиллированную воду. Дисперсионную смесь (туман) подавали в трубу диаметром 5 см и длиной 30 см. Затем через центр

трубы, заполненной дисперсионной динамической средой, представляющей собой туман, пропускали последовательно коллимированный гауссов пучок и пучок бесселева типа, сформированный с помощью дублета аксикон-линза с сильной сферической аберрацией. На выходе схемы помещали CMOS-камеру, с помощью которой регистрировали поперечное сечение обоих типов пучков.

На рис. 3 и 4 представлены результаты регистрации поперечного сечения гауссова пучка и пучка бесселева типа.

Как видно, интенсивность рассеянного излучения в обоих случаях ослабевает, но при прохождении пучка бесселевого типа через туман высокой концентрации интенсивность центрального максимума составляет около 70 отн. ед., а пучка гауссового типа – около 45 отн. ед. Следует отметить, что с увеличением плотности тумана ширина гауссового пучка и ширина центрального максимума пучка бесселевого типа уменьшается. В случае пучка бесселевого типа эта особенность связана с перекачкой энергии от боковых колец к центральному максимуму и свойством самореконструкции поля пучка. При этом прохождении пучка бесселевого типа через дисперсную среду

характеризуется значительно меньшим появлением спекл-шумов в сравнении с гауссовым зондирующим излучением, что делает перспективным использование пучков бесселевого типа, сформированных с помощью дублета аксикон-линза с сильной сферической аберрацией, в системах оптической локации.

Однако, в данной работе для изучения возможности оптической локации РПМ авторы первоначально выбрали среды, не обладающие сильными рассеивающими свойствами, и поэтому использовали лазерное излучение с гауссовым распределением интенсивности в поперечном сечении пучка.

Для определения коэффициента отражения ЭМВ в оптическом диапазоне собрана экспериментальная установка, состоящая из гелий-неонового лазера ЛГН-207, коллиматора из двух собирающих линз, держателя для исследуемого объекта, фотодиодного датчика (размер фоточувствительного элемента 100 мм<sup>2</sup>), микропроцессорного устройства для обработки полученного сигнала с фотодатчика, с последующей передачей цифрового сигнала на персональный компьютер, и специально разработанного программного обеспечения для отображения интенсивности сигнала в режиме реального времени (рис. 5).

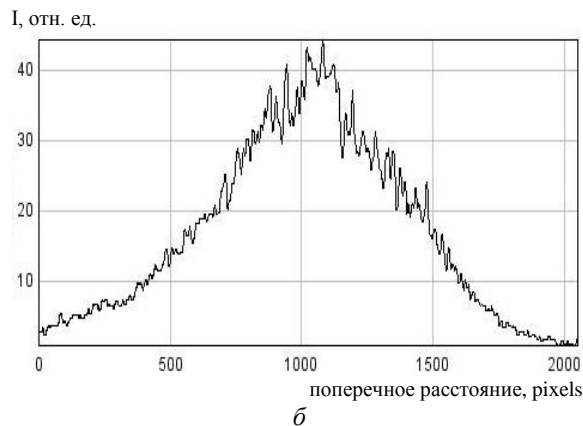
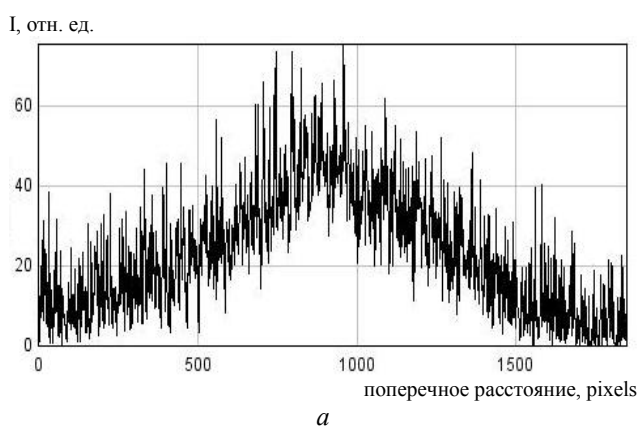


Рисунок 3 — Профиль коллимированного гауссова пучка: а, б – после прохождения тумана большой плотности, где б – сглаженный профиль с помощью прикладного пакета «Image»

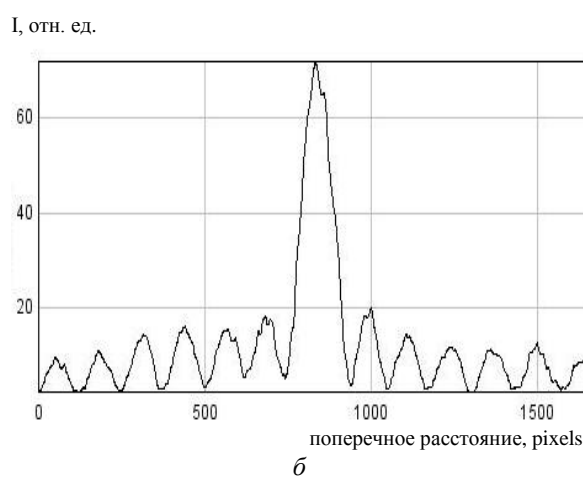
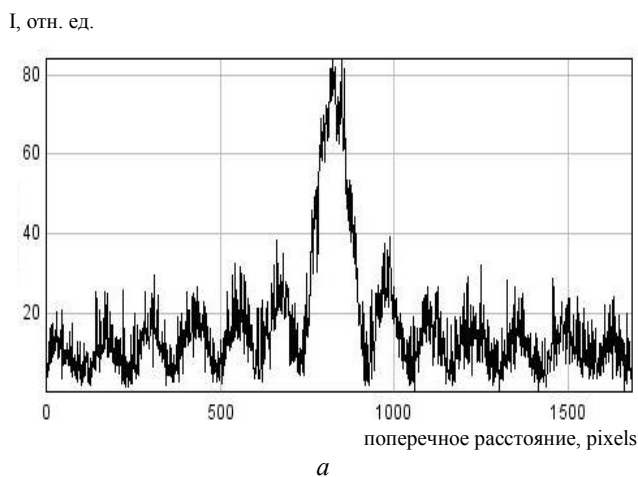


Рисунок 4 — Профиль пучка бесселева типа: а, б – после прохождения тумана большой плотности, где б – сглаженный профиль с помощью прикладного пакета «Image»

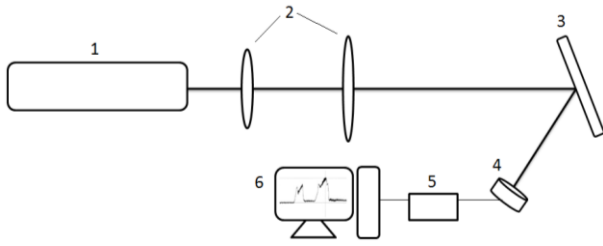


Рисунок 5 — Экспериментальная установка оптической локации. 1 – лазер ЛГН-207, 2 – коллиматор, 3 – исследуемый образец, 4 – фотодатчик, 5 – микропроцессорное устройство, 6 – ПЭВМ.

Коллимированный лазерный пучок, имеющий гауссово распределение интенсивности в поперечном сечении, падает на исследуемый объект (образцы №№ 1 – 4) и после отражения направляется на оптический датчик. Микропроцессорное устройство (на базе микропроцессора Atmega 128) с помощью аналого-цифрового преобразователя конвертирует сигнал в цифровой и передает его по протоколу RS-232 на ПЭВМ. Программное обеспечение интерпретирует полученные данные и непрерывно отображает их в графическом виде как интенсивность излучения, падающего на фотодатчик.

В качестве нормировочного множителя выбрана максимальная интенсивность, получаемая при нормальном падении пучка на фотодатчик. По результатам полученных измерений рассчитано процентное отношение коэффициента отражения ЭМВ от поверхности исследуемых объектов. На рис. 6 показана зависимость коэффициента отражения ЭМВ ( $\lambda = 630$  нм) в единицу времени для исследуемых образцов.

Внешний вид основного окна разработанной программы, регистрирующей интенсивность отраженного от исследуемых образцов РПМ ЭМИ гауссового типа, представлен на рис. 7.

Основная горизонтальная линия на рис. 7, соответствующая максимальной интенсивности ЭМИ, — интенсивность падающего на объект ла-

зерного излучения. Нижележащие горизонтальные линии обозначают интенсивность отраженного от объекта лазерного излучения гауссового типа, фиксируемого датчиком.

Как видно из рис. 7, образец № 3 (линия *d*) обладает самым высоким коэффициентом отражения. Фиксированный коэффициент отражения ЭМИ в реальном масштабе времени позволяет использовать метод оптической локации для обнаружения радиопоглощающих объектов. Отметим, что коэффициенты отражения ЭМИ для образцов № 1 и № 2 (линии *b* и *c*) отличаются незначительно. При этом, наименьший коэффициент отражения ЭМИ оптического диапазона принадлежит образцу № 4 (линия *a*), который также является эффективным поглотителем энергии ЭМИ в СВЧ диапазоне [19]. Из этого следует, что данный образец наиболее перспективен для его использования в качестве РПМ для малозаметных объектов, как в оптическом, так и в СВЧ диапазонах.

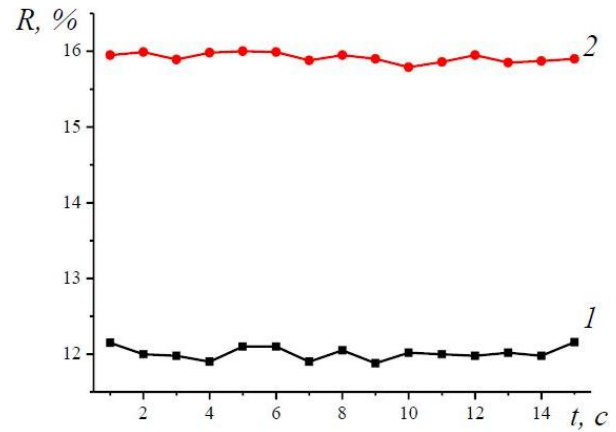


Рисунок 6 — Зависимости коэффициентов отражения от времени для образцов РПМ, толщиной  $h = 3$  мм. Состав образцов: 1 – ПЭ + ММФ (50 мас.%,  $d = 50-200$  мкм); 2 – ПЭ + ММФ (50 мас.%,  $d = 50-200$  мкм) + стеклосферы (10 мас.%,  $d = 200-500$  мкм).

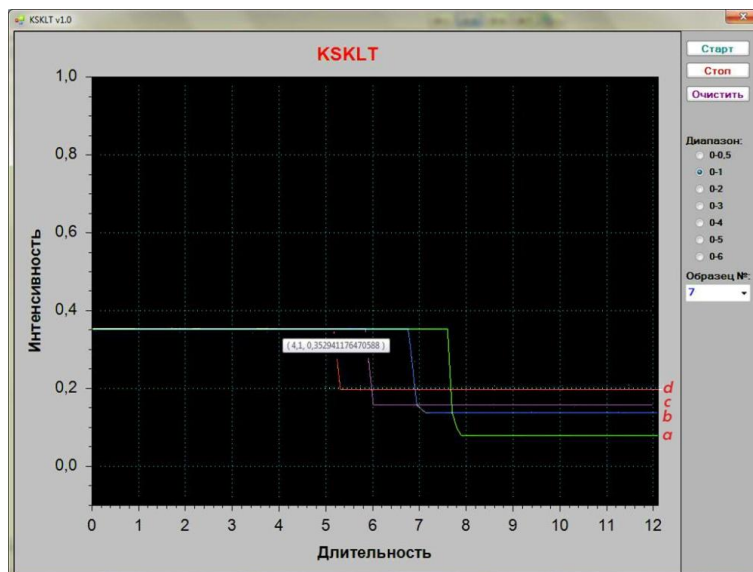


Рисунок 7 — Интенсивность ЭМИ гауссового типа, отраженного от исследуемых образцов РПМ (№№ 1–4).

## Заключение

Предложен способ локации радиопоглощающих объектов лазерным излучением с гауссовым распределением интенсивности в поперечном сечении пучка. Разработаны экспериментальные образцы поглотителей энергии ЭМИ, как для оптического, так и для СВЧ диапазонов на основе полимерных композитов. Показано, что эффективными поглотителями энергии ЭМИ оптического и радиочастотного диапазонов являются полимерные композиционные материалы, имеющие разветвленную волокнисто-пористую структуру и содержащие наполнители с высокими электромагнитными параметрами. Такие РПМ привлекают малой удельной массой и технологичностью, обеспечивая электромагнитную совместимость узлов электронной аппаратуры и регулируемый уровень электрических и магнитных потерь при взаимодействии с радиоизлучением.

## Обозначения

ММФ — магнитно-мягкий феррит; ПЭ — полиэтилен; РЛС — радиолокационная станция; РПМ — радиопоглощающий материал; СВЧ — сверхвысокочастотное излучение; ФН — функциональный наполнитель; ЭМВ — электромагнитная волна; ЭМИ — электромагнитное излучение;  $d$  — дисперсность ФН;  $h$  — толщина образцов;  $R$  — коэффициент отражения;  $\nu$  — частота ЭМИ.

## Литература

1. Алексеев А.Г., Гусева О.М., Семичев В.С. Композиционные ферромагнетики и электромагнитная безопасность.— СПб: НИИХ СПбГУ, 1998. — 296 с.
2. Ковверистый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. — М.: Наука, 1982. — 164 с.
3. Макаревич А.В., Банний В.А. Радиопоглощающие полимерные композиционные материалы в технике СВЧ // Материалы, технологии, инструменты. — 1999. — Т. 4. — № 3. — С. 24–32.
4. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. — СПб.: Научные основы и технологии, 2014. — 664 с.
5. Сонгсонг Ц., Банний В.А., Самофалов А.Л., Семченко И.В., Хахомов С.А. Поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе полимерных композитов и киральных структур // Проблемы физики, математики и техники. — 2014. — № 4 (21). — С. 40–45.
6. Быченко Д.С., Плющ А.О., Горохов Г.В., Быченко В.С., Кузир П.П., Максименко С.А. Поглотители СВЧ излучения на основе гофрированных композитов с углеродными волокнами // Журнал технической физики. — 2016. — Т. 86. — Вып. 12. — С. 124–128.
7. Латыпова А.Ф., Калинин Ю.Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2012. — Т. 8. — № 6. — С. 70–76.
8. Ломач В.А., Пинчук Л.С., Гольдаде В.А., Банний В.А. Эффективность несвязанной воды как радиопоглощающего компонента электромагнитных экранов при отрицательных температурах // Материалы, технологии, инструменты. — 2011. — Т. 16. — № 4. — С. 41–41.
9. Банний В.А., Макаревич А.В., Орехов Д.А. Взаимодействие СВЧ-излучения нетепловой интенсивности с культурой дрожжевых клеток // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. — 2002. — № 5–6. — С. 102–105.
10. Калинин Ю.Н., Кононов А.Ф., Костылев А.А., Левченко В.К. Сверхширокополосные методы и средства контроля радиолокационной заметности объектов // Зарубежная радиоэлектроника. — 1994. — № 6. — С. 17–36.
11. Ананьин Э.В., Ваксман Р.Г., Петриков Ю.М. Методы снижения радиолокационной заметности // Зарубежная радиоэлектроника. — 1994. — № 4–5. — С. 5–21.
12. Алексеев А.Г., Штагер Е.А. Физические основы Stealth технологии // Вестник СПбО РАЕН. — 1997. — № 1–2. — С. 139–146.
13. Гольдаде В.А., Макаревич А.В., Пинчук Л.С., Сиканевич А.В., Чернорубашкин А.И. Полимерные волокнистые melt-blown материалы. — Гомель: ИММС НАНБ. — 2000. — 260 с.
14. Банний В.А., Макаревич А.В., Пинчук Л.С. Влияние размерных и рецептурных параметров полимерных композитов на их радиофизические характеристики // Доклады НАН Беларуси. — 2000. — Т. 44. — № 4. — С. 109–111.
15. Передающая оптическая система лазерного радара: пат. 9028 Респ. Беларусь, МПК7 G02F / Краморева Л.И., Савицкий А.И.; заявитель Гомел. гос. мед. ун-т. — № a20120709; заявл. 24.07.2012; опубл. 31.03.2013 // Афицыйныбул. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. — 2013. — № 1. — С. 203.
16. Kramoreva L., Petrova E., Razhko J. Quasi-nondiffractive beams for OCT-visualization: theoretical and experimental investigation // Book Selected topics in OCT, Dr. Gangjun Liu (Ed.), ISBN: 978-953-51-0034-8, InTech, — 2012. — Chapter 5. — P. 83–106. — Available from: <http://www.intechopen.com/books/selected-topics-in-optical-coherence-tomography/quasi-nondiffractive-beam-for-oct-visualization-theoretical-and-experimental-investigations>.
17. Focusing Bessel beam by a lens with strong spherical aberrations / V.N. Belyi [et al.] // Int. Jour. of Opt. — 2012. — Vol. 2012. — Article ID 739413, 12 p. — Available from: <http://dx.doi.org/10.1155/2012/739413>.
18. Савицкий А.И., Банний В.А., Краморева Л.И., Петрова Е.С., Куликович Д.Б. Оптическая локация радиопоглощающих объектов // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 11–12 мая 2017 г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А.Н. Севченко БГУ»; редкол.: В.И. Попечич (гл.ред.). — Минск, 2017 — С.127–129.
19. Банний В.А., Пинчук Л.С., Гольдаде В.А. Физико-химические и технологические особенности формирования полимерных композитных радиопоглощающих материалов // Материаловедение. — 2007. — № 6. — С. 17–24.

V.A. Bannyi, A.I. Savitsky, L.I. Kramoreva, E.S. Petrova, D.B. Kulikovich, N.S. Vinidiktova

**Absorbers of energy of electromagnetic radiation optical and microwave ranges based on polymeric composites**

Experimental absorbers of energy of electromagnetic radiation optical and microwave ranges based on polymeric composite materials were developed. The method of location of radio absorbing objects by laser radiation with Gaussian intensity distribution in the cross section of the beam was proposed and tested.

**Keywords:** polymeric radioabsorbing composites, electromagnetic radiation, microwave range, optical location, laser radiation.

Поступила в редакцию 11.07.2017

© В.А. Банний, А.И. Савицкий, Л.И. Краморева, Е.С. Петрова, Д.Б. Куликович, Н.С. Винидиктова, 2017