

УДК 396.15(5):396.18(1)

А.Б. Егоров<sup>1</sup>, А.М. Сотников<sup>2</sup><sup>1</sup> Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков<sup>2</sup> Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ РАДИОИЗОТОПНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Предложена модель твердотельной плазменной среды на основе радиоизотопных технологий для поглощения мощных электромагнитных излучений (ЭМИ) в широкой полосе частот. Проведен анализ физических механизмов, определяющих отражающие и поглощающие свойства среды. Получено аналитическое выражение для оценки коэффициента отражения ЭМИ твердотельной плазменной среды.

**Ключевые слова:** твердотельная плазменная среда, радиоизотопная технология, электромагнитные излучения, радиоэлектронные средства, коэффициент отражения.

### Постановка проблемы и анализ литературы

В интересах передачи информации на большие расстояния и решения других технических задач в настоящее время разрабатываются генераторы мощных электромагнитных импульсов длительностью порядка единиц наносекунд. Эти генераторы имеют гигаваттную пиковую мощность, причем существуют реальные пути ее значительного увеличения [1 – 3]. При попадании в зону работы таких генерирующих систем других радиоэлектронных средств (РЭС) может произойти не только нарушение процесса приема и обработки информации, но и нарушение их функциональной целостности [4 – 5]. Воздействие мощного электромагнитного излучения (ЭМИ) на высокочувствительную радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) СВЧ диапазона может приводить к изменению параметров или полному выходу ее из строя. Это связано с переходом приемно-усилительных трактов в рассогласованный режим и возникновению перенапряжений в элементной базе.

Обеспечение надежного функционирования РЭС в условиях внешних воздействий, в том числе и мощных импульсных ЭМИ, обуславливает необходимость применения соответствующих средств защиты. Однако, как показал анализ [6 – 9], разработанные к настоящему времени методы и средства защиты РЭС не могут обеспечить по своим характеристикам требуемую эффективность их защиты, и тем более с учетом перспектив развития средств генерирования. Это обстоятельство требует проведения исследований, направленных, прежде всего, на поиск принципиально новых подходов к защите РЭС от мощных импульсных ЭМИ.

В настоящее время имеется значительное число публикаций, посвященных традиционным методам и средствам защиты РЭС от СВЧ-излучений [10 – 14]. В то же время отсутствуют данные по разработке и

созданию эффективных средств защиты РЭС от мощных ЭМИ.

**Целью статьи** является разработка базовой модели среды, обеспечивающей поглощение мощного ЭМИ в широкой полосе частот, и определение основных физических механизмов, определяющих отражающие и поглощающие свойства среды.

### Основная часть

Проведенный нами в [15] анализ путей и механизмов воздействия мощных импульсных ЭМИ на элементную базу РЭС показал, что одним из направлений создания эффективных средств защиты является разработка и использование новых технологий, обеспечивающих при ограничениях на стоимостные и массогабаритные показатели надежное функционирование РЭА в условиях воздействия мощных ЭМИ. Новые технологии должны обеспечивать сочетание всех известных физических механизмов для реализации эффективного поглощения и отражения ЭМИ. Кроме того, эти технологии должны быть технически реализуемыми и применимыми на РЭС для их защиты по основным и неосновным каналам приема.

Исходя из проведенного нами в [15] анализа свойств известных радиопоглощающих покрытий и материалов, снижение или полное исключение воздействия ЭМИ на объекты защиты может быть достигнуто за счет комплексного использования следующих физических механизмов:

1. согласование свободного пространства с характеристиками среды;
2. увеличение поглощения энергии падающего ЭМИ;
3. уменьшение отражения энергии падающего ЭМИ;
4. формирование нелинейных эффектов в облучаемых средах с целью изменения спектральных характеристик отраженного ЭМИ.

На наш взгляд, наиболее перспективными являются плазменные технологии, которые в настоящее время применяются при решении задач снижения радиолокационной заметности различных объектов. Эти технологии основаны на модификации околообъектовой среды путем ионизации воздушного пространства, однако они не реализуют совокупность сформулированных выше физических механизмов [16]. Одной из возможностей реализации физических механизмов, обеспечивающих защиту РЭС от мощ-

ных ЭМИ, является использование диэлектрического (полупроводникового) материала с радиоизотопными включениями, представляющего собой композитный материал. В результате возникает твердотельная ионизованная среда, свойства которой будут определяться величиной активности радиоизотопных включений. Материал может быть как однослойный, так и многослойный. Простейшая структура двухслойного композитного материала с радиоизотопными включениями (КМРВ) представлена на рис. 1.

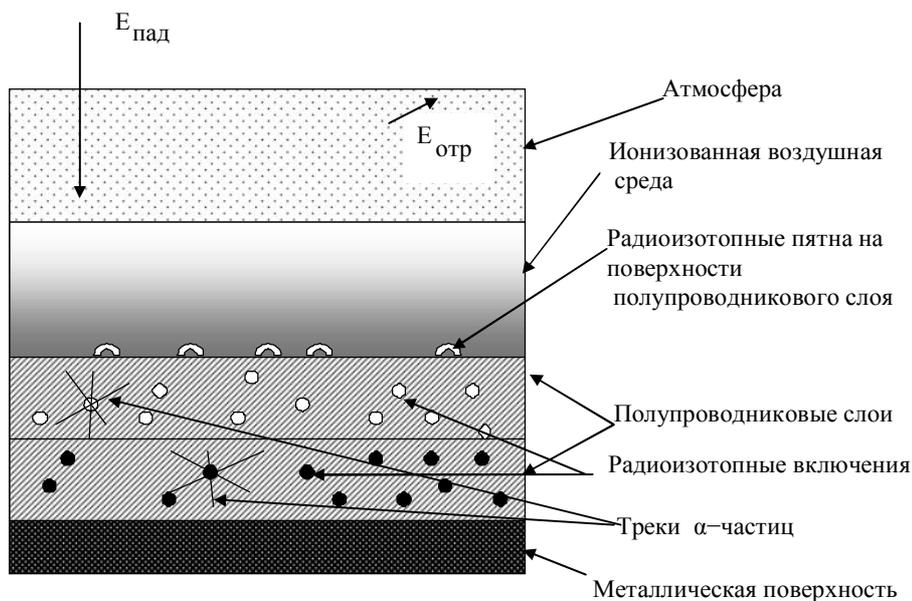


Рис. 1. Структура базовой модели композитного материала с радиоизотопными включениями

В соответствии с показанной на рис. 1 структурой, базовая модель композитного материала с радиоизотопными включениями представляет собой многослойную структуру, имеющую в своем составе один ионизованный воздушный (газообразный) слой и несколько полупроводниковых (твердотельных) слоев с различными по активности радиоизотопными включениями (радиоизотопные включения представляют собой чистые источники  $\alpha$ -частиц, к которым относятся Po-210, Pu-238).

Падающее ЭМИ первым на своем пути встречает ионизованный воздушный слой, прилегающий к полупроводниковому слою материала, который возникает за счет как наносимых на его поверхность радиоактивных пятен, так и за счет вылетающих из него  $\alpha$ -частиц, вызванных радиоизотопными включениями.

Эти источники ионизации приводят к созданию самосогласованной части среды за счет плавного уменьшения по мере удаления от защищаемого объекта концентрации заряженных частиц (на интервале до максимальной длины свободного пробега заряженной  $\alpha$ -частицы в воздухе), что в свою очередь может обеспечить снижение отражения падающего ЭМИ. Кроме того, они являются источниками мо-

дификации воздушной среды, непосредственно прилегающей к материалу, за счет создания в ней неравновесного состояния электронной подсистемы воздушной среды, приводящей к увеличению поглощающих свойств среды в целом.

Полупроводниковые слои КМРВ, количество которых определяется как требованиями к отражающим свойствам, так и требованиями к массогабаритным характеристикам материала, обеспечивают работу созданной плазменной среды в различных частотных поддиапазонах за счет использования радиоизотопных включений с разной по величине активностью, определяющей как число треков  $\alpha$ -частиц, так и макроскопические свойства твердотельной плазмы (плотность частиц, электропроводность, теплопроводность и т.д.), возникающей вдоль треков. Необходимо отметить, что по мере удаления от источника ионизации (радиоизотопного включения) концентрация заряженных частиц будет уменьшаться из-за процессов релаксации.

Ионизация атомов вещества полупроводникового материала вдоль треков приводит к созданию неоднородности в импульсном пространстве, ограниченном размерами полупроводниковых слоев, и, как следствие, к образованию неравновесных состояний

электронов, что может привести к существенному увеличению поглощения ЭМИ в созданной среде. Причем в зависимости от величины активности радиоизотопных включений, определяющей механизмы ионизации и рекомбинации, диссипативные процессы могут иметь разную природу происхождения. Кроме того, неравновесное распределение электронной компоненты твердотельной части покрытия может привести как к изменению дисперсии плазменных колебаний, так и к появлению мнимой части диэлектрической проницаемости, рост которой обеспечит увеличение тангенса угла потерь  $\text{tg } \delta$ , а, соответственно, уменьшение толщины материала.

Использование источников ионизирующего излучения для создания неоднородности в импульсном пространстве твердотельной части материала неразрывно связано с созданием неоднородности в координатном пространстве – треков  $\alpha$ -частиц. Испускаемые радиоизотопными включениями  $\alpha$ -частицы приведут к образованию в полупроводниковой (диэлектрической) матрице покрытия треков, которые представляют собой сложную рассеивающую нестационарную систему тонких проводящих нитей, обеспечивающую за счет своих резонансных свойств поглощение прошедших вглубь материала ЭМВ.

Таким образом, поскольку основной материал покрытия (полупроводник) обладает диэлектрическими свойствами, а  $\alpha$ -радиоактивные включения имеют хорошую проводимость, то твердотельная часть среды по отношению к поглощению и рассеянию ЭМИ будет представлять собой одновременно среду трех типов, реализуемых в традиционных РПП: плоскостойких, градиентных и геометрически неоднородных.

Кроме того, поскольку многие радиоактивные материалы являются металлами, то наносимые на полупроводниковый слой пятна радиоактивного материала приведут к образованию на его поверхности неоднородной по проводимости структуры. Созданная таким образом структура может привести к увеличению рассеяния падающего ЭМИ, а также к преобразованию ЭМИ на возникающей при концентрации проводящей компоненты вблизи порога протекания (перколяции) нелинейности проводимости и, как следствие, к искажению отраженного излучения. То есть, выбирая геометрические параметры пятен радиоактивного материала, так и радиоизотопных включений в полупроводниковые слои, определяющих внутреннюю структуру проводимости материала за счет треков  $\alpha$ -частиц, можно существенно уменьшить уровень отраженного излучения от защищаемого объекта.

Поскольку распределение высокопроводящих радиоактивных включений в материале покрытия имеет нерегулярный характер, то по отношению к распределению проводящих элементов среда явля-

ется фрактальной [17]. Одним из основных свойств такой среды является инвариантность геометрических и физических свойств в широком диапазоне изменения масштабов, что показывает целесообразность использования такого построения материала в целях расширения рабочего диапазона частот.

Таким образом, основная идея разработки защитного материала с использованием радиоизотопных технологий направлена на создание и использование специфических неоднородностей фазового пространства среды в целом, ограниченного размерами всех слоев материала, для обеспечения в широком частотном диапазоне требуемых отражающих и поглощающих свойств. То есть в основу разработки эффективной поглощающей среды положено использование радиоизотопных включений, применение которых позволит использовать не только естественную неоднородность, связанную с присутствием самих включений, но и ряд дополнительных эффектов, а, соответственно, и преимуществ на основе того, что возникают линейные области повышенной проводимости – треки; появляется прилегающий к объекту защиты воздушный слой повышенной ионизации и возникает эффект, связанный с неравновесным состоянием электронной подсистемы материала вдоль треков.

Поскольку основной характеристикой любого радиопоглощающего материала является его коэффициент отражения  $R(\lambda, \theta)$ , который существенно зависит от длины волны, вида и направления распространения падающей волны, формы отражающего объекта, то его поглощающие свойства принято характеризовать величиной коэффициента отражения плоской волны  $R_0$ , падающей нормально на бесконечный плоский лист поглощающего материала [18].

В соответствии с предложенной базовой моделью защитной среды рассмотрим прохождение через нее плоской волны и определим коэффициент отражения  $R_0$ .

Рассмотрим среду, имеющую один полупроводниковый слой. Исходя из этого, представим структуру среды в виде, приведенном на рис. 2.

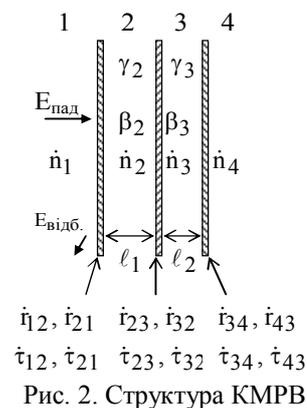


Рис. 2. Структура КМРВ

В рассматриваемом случае из-за наличия радиоизотопных включений возникает двухслойная структура материала. Известно, что коэффициент отражения ЭМИ от слоя определяется в соответствии с выражением [18]:

$$\dot{\tau}_{12} = \frac{\dot{E}_{отр}}{\dot{E}_{пад}} = \frac{\dot{Z}_{n2} - \dot{Z}_{n1}}{\dot{Z}_{n2} + \dot{Z}_{n1}}, \quad (1)$$

а коэффициент пропускания определяется следующим образом

$$\dot{\tau}_{12} = \frac{\dot{E}_{пр}}{\dot{E}_{пад}} = \frac{2\dot{Z}_{n2}}{\dot{Z}_{n2} + \dot{Z}_{n1}}, \quad (2)$$

где  $\dot{E}_{пад}$  – комплексная амплитуда электрического

$$R_0 = \dot{\tau}_{14} = \frac{\dot{\tau}_{12} + (\dot{\tau}_{12}\dot{\tau}_{21} - \dot{\tau}_{12}\dot{\tau}_{21})\dot{\tau}_{23}e^{-\gamma_2\beta_2}e^{-\gamma_2} + (\dot{\tau}_{23}\dot{\tau}_{32} - \dot{\tau}_{23}\dot{\tau}_{32})\dot{\tau}_{34}e^{-\gamma_3\beta_3}e^{-\gamma_3}}{1 + \dot{\tau}_{12}\dot{\tau}_{23}e^{-\gamma_2\beta_2}e^{-\gamma_2} + \dot{\tau}_{23}\dot{\tau}_{34}e^{-\gamma_3\beta_3}e^{-\gamma_3}}, \quad (3)$$

где  $\beta_2, \beta_3$  – набег фазы для ЭМИ на длине волны  $\lambda$  в среде между отражающими слоями при отражении излучения, соответственно, от первого и второго слоев ( $\beta = \frac{4\pi}{\lambda}n\ell$ , где  $\ell$  – толщина слоя);  $\dot{\tau}_{ij}$  – коэффициент пропускания соответствующего слоя КМРВ;  $\dot{\tau}_{ij}$  – коэффициент отражения соответствующего слоя КМРВ;  $\gamma_2, \gamma_3$  – показатели затухания отраженного излучения, соответственно, от второго и третьего слоев, обусловленные поглощением в средах между слоями.

Известно [18], что показатель затухания отраженного излучения определяется выражением

$$\gamma = \frac{4\pi}{\lambda}\ell\alpha, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – мнимая часть показателя преломления  $\dot{n} = n - j\alpha$ .

$\varepsilon(\omega, \vec{k}) = 1 + \varepsilon_m + \sum_{i=1}^N \delta\varepsilon_{вкл_i}(\omega, \vec{k}) + \sum_{j=1}^M \delta\varepsilon_{неравн_j}(\omega, \vec{k}) + i\left(\frac{4\pi}{\omega}(\sigma_{эфф}(\omega, \vec{k}) + \alpha_e E^2)\right)$ ,  
 где  $\varepsilon_m$  – диэлектрическая проницаемость полупроводникового слоя;  $\sum_{i=1}^N \delta\varepsilon_{вкл_i}(\omega, \vec{k})$  – вклад в диэлектрическую проницаемость стационарных и нестационарных включений (радиоактивных включений и треклов);  $\sum_{j=1}^M \delta\varepsilon_{неравн_j}(\omega, \vec{k})$  – вклад в диэлектрическую проницаемость неравновесных состояний электронных подсистем композитного материала и слабоионизованной воздушной (газовой) среды;  $\frac{4\pi}{\omega}(\sigma_{эфф}(\omega, \vec{k}) + \alpha_e E^2)$  – вклад в мнимую часть диэлектрической проницаемости радиоактивных пятен с учетом нелинейных составляющих;  $\alpha_e$  – эффективная нелинейная проводимость;  $E$  – среднее элек-

поля падающей волны;  $\dot{E}_{отр}$  – комплексная амплитуда электрического поля отраженной волны;  $\dot{E}_{пр}$  – комплексная амплитуда электрического поля прошедшей волны;  $\dot{Z}_{n1}, \dot{Z}_{n2}$  – приведенные волновые сопротивления слоев 1 и 2.

Учитывая, что для всех составляющих структуры материала можно принять  $\mu = 1$ , тогда в выражениях (1) и (2) вместо приведенного волнового сопротивления  $\dot{Z}_n$  можно использовать коэффициент преломления  $\dot{n} = \sqrt{\varepsilon}$  [18].

Можно показать, что выражение для коэффициента отражения  $R_0$  от КМРВ будет иметь вид:

Зависимость  $\dot{n}$  и  $\alpha$  от длины волны  $\lambda$  и проводимости  $\sigma$  определяются следующими соотношениями [18]:

$$\dot{n} = \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{60\sigma\lambda}{\varepsilon}\right)^2} + 1}; \quad (5)$$

$$\alpha = \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{60\sigma\lambda}{\varepsilon}\right)^2} - 1}. \quad (6)$$

Таким образом, в соответствии с выражениями (1) – (6) коэффициент отражения КМРВ –  $R_0$  на длине волны  $\lambda$  определяется диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_i$  и проводимостью  $\sigma_i$  отдельных слоев.

Каждая из выше определенных составляющих структуры КМРВ дает свой вклад в диэлектрическую проницаемость, которая в общем случае может быть представлена следующим выражением:

$$\varepsilon(\omega, \vec{k}) = 1 + \varepsilon_m + \sum_{i=1}^N \delta\varepsilon_{вкл_i}(\omega, \vec{k}) + \sum_{j=1}^M \delta\varepsilon_{неравн_j}(\omega, \vec{k}) + i\left(\frac{4\pi}{\omega}(\sigma_{эфф}(\omega, \vec{k}) + \alpha_e E^2)\right), \quad (7)$$

трическое поле;  $\omega, \vec{k}$  – частота и волновой вектор, соответственно.

Составляющие диэлектрической проницаемости, описываемой выражением (7), являются частотно-зависимыми, что может обеспечить при определенных условиях необходимые отражающие и поглощающие свойства КМРВ в широком частотном диапазоне. Эти физические механизмы определяются диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_i$  и проводимостью  $\sigma_j$  отдельных его слоев.

## Выводы

Разработана модель твердотельной плазменной среды на основе радиоизотопных технологий, которая обеспечивает поглощение мощных ЭМИ в широкой полосе частот.

Использование радиоизотопных включений приводит как минимум к двухслойной структуре материала с различными физическими механизмами, определяющими необходимые отражающие и поглощающие свойства каждого из слоев и их совокупности.

Основные физические механизмы, реализованные в новой радиоизотопной технологии создания материала для защиты РЭС по основным и неосновным каналам приема, состоят в следующем:

- 1) снижение отражения ЭМИ за счет согласования импедансов воздушной среды и прилегающей к среде слабоионизированной воздушной среды;
- 2) поглощение ЭМИ в неравновесной слабоионизированной воздушной среде;
- 3) поглощение ЭМИ в неравновесной твердотельной плазме, возникающей вдоль треков  $\alpha$ -частиц;
- 4) рассеяние ЭМИ за счет неоднородности проводимости включений;
- 5) рассеяние ЭМИ на нестационарной структуре треков, возникающих в полупроводниковом слое;
- 6) преобразование сигнала за счет возникновение нелинейных свойств полупроводникового материала, вызванных радиоизотопными включениями.

### Список литературы

1. Taylor C.D. *High-Power Microwave* / C.D. Taylor, D.V. Giri. – A. Summa Book, Taylor-Frankis, 1994. – 280 p.
2. Benford J. *High-Power Microwave* / J. Benford, J. Swegle. – ArtechHons, Norwood, VF, 1991. – 412 p.
3. Ковтуненко О.П. *Зброя на нетрадиційних принципах дії (стан, тенденції, принципи дії та захист від неї): монографія* / О.П. Ковтуненко, В.В. Богучарський, В.І. Слюсар, П.М. Федоров. – Полтава: ПВІЗ, 2006. – 247 с.
4. Кравченко В.И. *Электромагнитное оружие* / В.И. Кравченко. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 185 с.
5. Добыкин В.Д. *Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем* / В.Д. Добыкин, А.И. Куприянов, В.Г. Пономарев, Л.Н. Шустов; под ред. А.И. Куприянова. – М.: Вузовская книга, 2007. – 487 с.
6. Старостенко В.В. *Влияние электромагнитных полей на стойкость ИМС* / В.В. Старостенко, В.В. Григорьев, Е.П. Таран // *Мат. 6-й Межд. Крымской микроволновой конф.*, 16-19 сент. 1996. – Севастополь. – С. 188-191.
7. *Исследование воздействия электромагнитных излучений УКД импульса на радиоэлектронную аппаратуру СВЧ диапазона* / Н.П. Гадецкий, К.А. Кравцов, И.И. Магда и др. // *Мат. 6-й Межд. Крымской микроволновой конф.*, 16-19 сент. 1996. – Севастополь. – С. 141-146.
8. Мырова Л.О. *Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям* / Л.О. Мырова, А.З. Чепиженко. – М.: Радиосвязь, 1988. – 296 с.
9. *Studes on electronic device degradation phenomena under interference of pulsed-power electromagnetic fields* / I.I. Magda, S.P. Bludov, N.P. Gadetski et al. / 3-rd Int. Crimian Conf. "UNF Tech. and satellite reseption", Sevastopol, 1993. – V.5. – P. 523-526.
10. Лебедев И.В. *Квазиактивный защитный ограничитель СВЧ мощности* / И.В. Лебедев, М.В. Семенча // *Радиотехника*. – 2001. – №2. – С. 17-21.
11. Крутов А.В. *Защитное устройство малого уровня мощности* / А.В. Крутов, В.А. Митмен, А.С. Ребров // 12-я Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конференции. – Севастополь, 2002. – Вебер, 2002. – С. 93.
12. Риккетс Л.У. *Электромагнитный импульс и методы защиты: Пер. с англ.; под ред. Н.А. Ухина / Л.У. Риккетс, Дж. Бриджес, Дж. Майлетта*. – М.: Атомиздат, 1979. – 328 с.
13. Алыбин В.Г. *Проблемы создания СВЧ защитных устройств для радиолокации и связи* / В.Г. Алыбин // 12<sup>th</sup> Int. Crimean Conference "Microwave Telecommunication Technology", 2002, 9-13 September. – P. 15-21.
14. Ропий А.Н. *Сверхвысокочастотные защитные устройства* / А.Н. Ропий, А.М. Старик, К.К. Шустов. – М.: Радио и связь, 1993. – С. 128.
15. Егоров А.Б. *Воздействие мощного электромагнитного излучения на радиоэлектронные средства* / А.Б. Егоров, А.М. Сотников // *Матеріали 3-ї міжвузівської НТК викладачів, молодих вчених та студентів*. – 29-30 листопада 2011р. – Донецьк: ДонІЗТ, 2011. – С. 113.
16. August H. *Energy absorption by radioisotope produced plasma* / August H. USA Pat. - № 3.713.157, 343 – 18. 23.1.1973.
17. Сотников А.М. *Использование фрактальных, неравновесных и нелинейных свойств покрытий для повышения затухания электромагнитных волн* / А.М. Сотников // *Проблемы информатики и моделирования. Материалы 2-й межд. НТК (г. Харьков, 28-30 ноября 2002 г.)* – Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – С. 40.
18. Захарьев Л.Н. *Рассеяние волн «черными» телами* / Л.Н. Захарьев, А.А. Леманский. – М.: Мир, 1972. – 318 с.

Поступила в редколлегию 17.02.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### БАЗОВА МОДЕЛЬ ТВЕРДОТІЛОГО ПОГЛИНАЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА НА ОСНОВІ РАДІОІЗОТОПНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

О.Б. Єгоров, О.М. Сотніков

У статті запропонована модель твердотілого плазмового середовища на основі радіоізотопних технологій для поглинання потужних електромагнітних випромінювань (ЕМВ) у широкій смузі частот.

**Ключові слова:** твердотільне плазмове середовище, радіоізотопна технологія, електромагнітні випромінювання, радіоелектронні засоби, коефіцієнт відбиття.

### BASE MODEL OF THE SOLID-STATE ABSORBING ENVIRONMENT ON THE BASIS OF RADIO ISOTOPE TECHNOLOGIES

A.B. Yegorov, A.M. Sotnikov

In article the model of the solid-state plasma environment on the basis of radio isotope technologies for absorption of powerful electromagnetic radiations (EMR) in a wide strip of frequencies is offered.

**Keywords:** the solid-state plasma environment, radio isotope technology, electromagnetic radiations, radio-electronic means, reflection factor.