

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

СБОРНИК ТРУДОВ  
VII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ  
«ОПТИКА – 2011»

СБОРНИК ТРУДОВ СЕМИНАРОВ  
«ТЕРАГЕРЦОВАЯ ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ»,  
«ОПТИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ, ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ  
И НАНОСТРУКТУРЫ»

СБОРНИК ТРУДОВ ШКОЛЫ  
ПО МЕТАМАТЕРИАЛАМ И НАНОСТРУКТУРАМ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

17-21 октября 2011



Санкт-Петербург  
2011

ББК 22.34. Оптика  
Т79  
УДК 535

**Т79** Сборник трудов Международной конференции и семинаров.

Т.1. «Оптика-2011» Т.2. «Терагерцовая оптика и спектроскопия», «Оптические метаматериалы, фотонные кристаллы и наноструктуры» Т.3. Школа по метаматериалам и наноструктурам. Санкт-Петербург. 17-21 октября 2011 / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова.– СПб: НИУИТМО, 2011. – Т.1. 577 с., Т.2. 44 с., Т.3. 100 с.: с ил.

В сборник вошли труды конференции «Оптика-2011», семинаров «Терагерцовая оптика и спектроскопия» и «Оптические метаматериалы, фотонные кристаллы и наноструктуры», а также Школы по метаматериалам и наноструктурам, прошедших 17-21 октября 2011 года.

Издание сборника поддержано грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 11-02-06826-моб\_г

ISBN 978-5-7577-0385-5

ББК 22.34. Оптика



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Авторы, 2011

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2011

4. H. F. Ma and T. J. Cui, *Nature Commun.*, **1**(3), 1–6, (2010).
5. Liu R, *Science*, **323**, 366–369, (2009).
6. A. Alù and N. Engheta, *Phys. Rev. E*, **72**, 016623, (2005).
7. A. A. Zharov and A. A., Zharova, *Bulletin of the Russian Academy of Science: Physics*, **74**, 88-92, (2010).

## УСТРОЙСТВА НЕВИДИМОСТИ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СРЕД

Галынский В.М.\*, Новицкий А.В.\*\*

\*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

\*\*Технический университет Дании, Люнбю, Дания

Идеальная маскировка методом волнового обтекания возможна только при использовании сред без дисперсии либо в очень узком диапазоне частот. В данной работе исследуются возможности отклонения материальных параметров маскировочного слоя от идеальных значений, при которых маскировочные свойства сохраняются.

Один из методов маскировки предмета состоит в том, чтобы создать вокруг объекта, который необходимо спрятать, маскировочный слой с определенными свойствами материала<sup>1-4</sup>, а именно, слой должен быть анизотропным и пространственно неоднородным. Тогда электромагнитные волны без отражения проникают в этот слой, огибают спрятанный объект, не покидая пределов маскирующего слоя, и выходят из него так, словно этого слоя не было. Самый простой цилиндрический маскировочный слой можно построить с помощью линейного преобразования, которое переводит цилиндр радиуса  $b$  в кольцо, ограниченное двумя радиусами  $a$  и  $b$  ( $a \leq r' \leq b$ ), согласно формуле<sup>5</sup>:

$$r' = g(r) = a + \frac{b-a}{b}r. \quad (1)$$

В более общем случае, по заданному преобразованию координат  $r' = g(r)$  значения компонент диагональных тензоров диэлектрической и магнитной проницаемостей находятся с помощью граничных условий (условий маскировки) и инвариантности уравнений Максвелла относительно координатных преобразований:

$$g(0) = a, \quad g(b) = b, \quad (2)$$

$$\varepsilon_r = \mu_r = \frac{r(dg/dr)}{g(r)}, \quad \varepsilon_\varphi = \mu_\varphi = \frac{g(r)}{r(dg/dr)}, \quad \varepsilon_z = \mu_z = \frac{r}{g(r)(dg/dr)}.$$

На практике любой материал обладает дисперсией, материальные параметры зависят от частоты, к тому же среда обладает поглощением в согласии с соотношениями Крамерса-Кронига. Эти факторы в совокупности приводят к ухудшению маскирующих свойств: формулы (2) задают параметры слоя для некоторой рабочей частоты  $\omega_0$ , а для других частот условия маскировки не выполняются. Выделим частотную зависимость в явном виде:

$$\varepsilon(r, \omega) = \mu(r, \omega) = \chi(r) F(\omega), \quad (3)$$

где  $\chi(r)$  — тензор проницаемости на рабочей частоты  $\omega_0$ ,  $F(\omega)$  — диагональный тензор зависимости от частоты. В первом приближении  $F(\omega)$  вблизи рабочей частоты

можно представить в виде  $F(\omega) \approx 1 + \gamma \Delta\omega$ ,  $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ . Для преобразования (1) материальные параметры маскировочного слоя вблизи рабочей частоты в первом приближении имеют вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r(r, \omega) &= \frac{(r-a)}{r} (1 + \gamma_r \Delta\omega), & \mu_r(r, \omega) &= \frac{(r-a)}{r} (1 + \delta_r \Delta\omega), \\ \varepsilon_\phi(r) &= \frac{r}{r-a} (1 + \gamma_\phi \Delta\omega), & \mu_\phi(r, \omega) &= \frac{r}{r-a} (1 + \delta_\phi \Delta\omega), \\ \varepsilon_z(r, \omega) &= \frac{b^2(r-a)}{r(a-b)^2} (1 + \gamma_z \Delta\omega), & \mu_z(r, \omega) &= \frac{b^2(r-a)}{r(a-b)^2} (1 + \delta_z \Delta\omega). \end{aligned} \quad (4)$$

Для исследования поля, рассеянного на неоднородной и анизотропной цилиндрической оболочке была разработана программа с помощью метода <sup>6</sup>. По заданным параметрам слоя (4) рассчитывалось сечение рассеяния для падающей на цилиндр, перпендикулярно его оси, электромагнитной ТЕ или ТМ волны. Слой считался маскировочным, если сечение рассеяния во всех направлениях было меньше -15 децибел (на рабочей частоте, как правило, не превышало -20 децибел).

Оказалось, что некоторые компоненты тензоров проницаемостей маскировочного слоя более чувствительны к дисперсии, чем другие. Так, для **ТМ волны** параметр  $\varepsilon_z$  может меняться в пределах от -0,3% до 1%,  $\mu_r$  и  $\mu_\phi$  — от -0,6% до 2%, в то время как  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_\phi$ ,  $\mu_z$  могут отклониться от -6% до 20%, а слой еще будет вести себя как маскировочный. Большое отклонение для последних трех параметров обусловлено тем, что они не задействованы явно при прохождении ТМ волны. Для **ТЕ волны** обратная ситуация:  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_\phi$  могут отклониться от -0,6% до 2%,  $\mu_z$  — от -0,3% до 1%, а  $\varepsilon_z$ ,  $\mu_r$  и  $\mu_\phi$  — от -6% до 20%. В случае, когда на цилиндр падает **суперпозиция из ТЕ и ТМ волн**, максимальные отклонения следующие: для  $\varepsilon_r$ ,  $\mu_r$  возможно отклонения от -0,5% до 1,5%, для  $\varepsilon_\phi$ ,  $\mu_\phi$  — от -0,6% до 2%, а для  $\varepsilon_z$  и  $\mu_z$  — от -0,3% до 1%. Если же величина  $\gamma \Delta\omega$  сразу для одного или нескольких параметров мала (меньше 0,1%), то указанные выше пределы отклонения для оставшихся параметров можно расширить в 2–3 раза. Зная максимальное допустимое отклонение  $\delta_i \Delta\omega$ ,  $\gamma_i \Delta\omega$  для материальных параметров, при котором слой все еще сохраняет маскировочные свойства можно определить рабочий диапазон частот устройства в каждом конкретном случае.

Для расширения диапазона частот, в котором будут сохраняться маскировочные свойства необходимо использовать метаматериалы без дисперсии, например, такие как в работе <sup>7</sup>, либо вместо преобразования (1) попробовать подобрать более сложное  $g(r, \omega)$ , с частотной зависимостью и попытаться подобрать  $\varepsilon(r, \omega)$   $\mu(r, \omega)$ , которые будут меняться согласовано, всегда оставляя слой маскировочным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, тема №Ф10М-021.

1. J.B.Pendry, D. Schurig, D.R. Smith, *Science*, **312**, 1780–1783, (2006).
2. U. Leonhardt, T.G. Philbin, *Prog. Opt.*, **53**, 69–152, (2009).
3. А.Е. Дубинов, Л.А. Мытарева, *УФН*, **180**, 475–501, (2010).
4. А.В. Кильдишев, В.М. Шалаев, *УФН*, **181**, 59–70, (2011).
5. U. Leonhardt, T.G. Philbin, *New J. Phys.*, **8**, 247, (2006).

6. A.V. Novitsky, *J. Phys.: Condens. Matter*, **19**, 086213, (2007).
7. H.S. Chen, L. Huang, X.X. Cheng, H. Wang, *Progress In Electromagnetics Research*, **115**, 317, (2011).