

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные реализации маскирующих покрытий

А.В. Щелокова, И.В. Мельчакова, А.П. Слободжанюк, Е.А. Янковская,
К.Р. Симовский, П.А. Белов

Успехи в области исследования метаматериалов явились толчком к разработке на их основе маскирующих покрытий, позволяющих подавлять рассеяние, вызываемое объектами, в определённых частотных диапазонах. За последние годы наблюдается переход от чисто теоретического рассмотрения эффекта маскировки к попыткам его практической реализации. Представлен обзор современного состояния в области маскирующих покрытий с упором на экспериментальные реализации таких устройств.

Ключевые слова: невидимость, маскировка, трансформационная оптика, метаматериалы, компенсация рассеяния, оптические иллюзии, ковровое маскирующее покрытие, активная маскировка

PACS numbers: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 42.30.Wb, 43.20.Gp

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201502e.0181

Содержание

1. Введение (181).
 2. Маскировка, основанная на явлении волнового обтекания (182).
 - 2.1. Волновое обтекание, основанное на трансформационной оптике.
 - 2.2. Реализация маскирующих покрытий без применения трансформационной оптики.
 3. Маскировка, основанная на компенсации рассеяния (195).
 - 3.1. Маскировка с помощью плазмонных покрытий.
 - 3.2. Маскировка с помощью структурированных метаповерхностей.
 4. Другие принципы маскировки (199).
 - 4.1. Маскирующее устройство на основе цепочек сосредоточенных LC-элементов.
 - 4.2. Иллюзионное устройство для радаров.
 - 4.3. Активная маскировка.
 - 4.4. Оптические иллюзии.
 5. Ограничения, накладываемые на маскирующие покрытия (204).
 6. Заключение (205).
- Список литературы (205).

1. Введение

Долгое время невидимость и маскировка относились к научной фантастике [1–3]. Однако в настоящее время эта

тема широко обсуждается мировым научным сообществом, что подтверждается постоянно увеличивающимся числом публикаций. Новый всплеск интереса в науке и технике к невидимости и маскировке объясняется появлением в начале XXI в. метаматериалов [4–17].

Что же такое невидимость и что такое маскирующее покрытие (invisibility cloak — в англоязычной литературе)? В настоящей статье под невидимостью мы понимаем ситуацию, в которой объект не рассеивает и не поглощает падающее электромагнитное излучение в заданном диапазоне частот. Невидимость объекта, строго говоря, есть отсутствие возмущений электромагнитного поля вокруг объекта на достаточно большом расстоянии от него.

Как известно, для обнаружения объекта необходимо заметить различие в распределении электромагнитного поля при наличии объекта и в его отсутствие [18]. Таким образом, для достижения идеальной невидимости не только объект должен не отражать электромагнитную волну назад, не поглощать и не рассеивать её в боковых направлениях, но и волновой фронт падающей электромагнитной волны после прохождения скрываемого объекта должен полностью восстановиться — стать таким же, как у волны, распространяющейся в пустом пространстве. В терминах теории рассеяния света это означает, что в идеальном случае полное сечение рассеяния σ должно быть равно нулю для любой частоты в пределах заданного частотного диапазона.

Устройства или покрытия, позволяющие достигнуть невидимости скрываемых объектов, мы будем называть *маскирующими устройствами или покрытиями*. Идеальной "шапки-невидимки" пока не создано, и, строго говоря, возможность создания подобной системы вызывает большие сомнения [18–20]. Однако благодаря бурному развитию новых направлений физики, таких как физика метаматериалов, трансформационная оптика [21], плазмоники [22, 23], стало возможным создание маскирующих покрытий, значительно уменьшающих рас-

А.В. Щелокова, И.В. Мельчакова, А.П. Слободжанюк, Е.А. Янковская, П.А. Белов. Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Кронверкский просп. 4, лит. А, 197101 С.-Петербург, Российская Федерация
E-mail: alena.schelokova@phoi.ifmo.ru, melchakova-i@yandex.ru, a.slobodzhanjuk@phoi.ifmo.ru, adfors@gmail.com, belov@phoi.ifmo.ru
К.Р. Симовский. Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Кронверкский просп. 4, лит. А, 197101 С.-Петербург, Российская Федерация;
Aalto University, School of Electrical Engineering, P.O.Box 15500, FI-00077, Aalto, Finland. E-mail: konstantin.simovski@aalto.fi

Статья поступила 4 февраля 2014 г.,
после доработки 12 мая 2014 г.

сеяние объектом падающего электромагнитного излучения, правда, пока в не слишком широком диапазоне частот и только для неподвижных или медленно движущихся объектов.

Отметим, что к нашему определению невидимости не относятся так называемая естественная маскировка, подразумевающая способность некоторых живых организмов маскироваться под окружающую среду, изменяя свои окраску или строение, и маскировка под другие предметы, например военный камуфляж.

Естественно, тема маскировки и невидимости актуальна для военных приложений. В связи с этим следует упомянуть достижения в области противолокационной маскировки. В 1962 г. советский учёный П.Я. Уфимцев опубликовал книгу *Метод краевых волн в физической теории дифракции* [24], которая послужила отправной точкой для появления так называемых стелс-технологий (stealth-technologies), направленных на создание новых типов вооружения (танков, самолётов, ракет, спутников, кораблей и др.) с низкой радиолокационной заметностью. Разработчик объекта, защищённого от радара стелс-технологиями, должен минимизировать обратное рассеяние (в направлении радарного луча), проектируя форму объекта так, чтобы падающая на объект волна не отражалась назад, а частично рассеивалась в других направлениях или частично поглощалась [25]. Однако стелс-технологии обладают существенным недостатком: они теряют эффективность, если радиолокационная система состоит из двух и более пространственно разделённых радаров.

Маскирующие покрытия, работающие в радиолокационном диапазоне частот, выгодно отличаются от стелс-покрытий, так как обеспечивают снижение уровня рассеяния излучения радаров во всех направлениях, а не только в обратном.

На сегодняшний день среди многообразия концепций маскировки можно выделить два наиболее разработанных принципа:

- 1) маскировка, основанная на явлении волнового обтекания (рис. 1а);
- 2) маскировка, основанная на компенсации рассеяния (рис. 1б).

Невидимость, достигаемая с помощью *маскировки, основанной на явлении волнового обтекания*, реализуется за счёт того, что объект помещается внутрь оболочки, благодаря которой электромагнитные волны огибают объект, после чего восстанавливают свои волновой фронт и распределение интенсивности. Такая оболочка работает вне зависимости от свойств скрываемого объекта, поскольку в этом случае электромагнитные волны не достигают объекта.

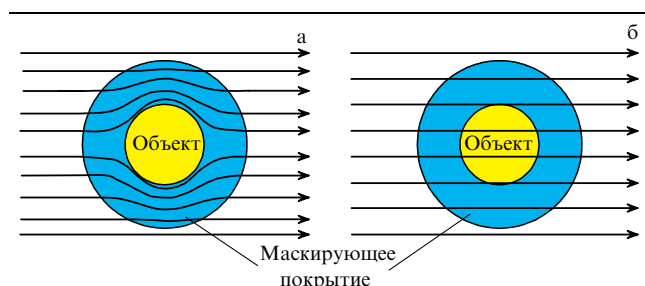


Рис. 1. Маскировка, основанная (а) на явлении волнового обтекания, (б) на компенсации рассеяния.

Маскировка, основанная на компенсации рассеяния, заключается в том, что рассеяние от объекта и рассеяние от специального покрытия компенсируют друг друга, в итоге излучение проходит сквозь объект, не замечая его. В этом случае свойства разрабатываемого покрытия должны учитывать свойства скрываемого объекта. В случае, когда объект поглощает излучение, для полной компенсации рассеяния требуется использование активных материалов или внутренних источников в покрытии.

Помимо упомянутых выше двух принципов создания эффекта невидимости существуют и другие принципы, например так называемые активная маскировка [26], внешняя маскировка [27], маскировка на основе массива длинных линий [28]. В российской литературе имеются обзоры, посвящённые невидимости и маскировке объектов [18, 21, 29–31], в которых можно прочитать обо всех теоретически известных принципах оптической невидимости.

Целью данной статьи является обзор наиболее убедительных *экспериментальных реализаций* маскирующих покрытий в различных частотных диапазонах. Поэтому более детально рассмотрены экспериментальные реализации маскирующих покрытий, основанных на явлении волнового обтекания и компенсации рассеяния. В разделе 4 представлены самые интересные, на наш взгляд, результаты экспериментов, основанных на других концепциях создания эффекта невидимости.

2. Маскировка, основанная на явлении волнового обтекания

2.1. Волновое обтекание, основанное на трансформационной оптике

В последние годы успехи ряда научных групп по разработке метаматериалов предоставляют широкие возможности по управлению световыми потоками как в микроскопическом, так и в макроскопическом масштабах. Недавно возникшая новая область физики — трансформационная оптика — позволяет исследователям бросить свежий взгляд на сами основы оптики и создавать новые направления в науке о свете [21, 32–35]. Одним из перспективных приложений трансформационной оптики является разработка маскирующих устройств.

В основе трансформационной оптики лежит инвариантность уравнений Максвелла относительно координатных преобразований при условии, что электромагнитные материальные параметры сред (как правило, тензоры диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей) при этом тоже преобразуются должным образом [21]. Условие невидимости объекта в однородной среде (без покрытия) — его исчезающе малый размер, так как любой объект конечного размера, конечно, рассеивает падающее на него поле. Проводя координатное преобразование, превращающее точечный объект в объект с конечными размерами, можно сохранить условие невидимости, создавая нужное распределение ϵ и μ вокруг него. Хотя трансформационная оптика — это новое направление в оптике и материаловедении, инвариантные преобразования уравнений Максвелла были известны [36–42] ещё в XX в.

В данной статье мы не будем излагать теорию волнового обтекания, основанного на трансформационной оптике, — для ознакомления с теоретическими

аспектами читатель может обратиться к работам [21, 29, 43]. Мы рассмотрим лишь экспериментальные реализации маскирующих устройств, но перед этим полезно сделать несколько замечаний.

Во-первых, для реализации необходимого распределения ε и μ по толщине покрытия, рассчитанного с помощью математического аппарата трансформационной оптики, невозможно использовать материалы, доступные в природе, так как они не позволяют получить нужный набор требуемых значений материальных параметров. Необходимы метаматериалы, желаемые макроскопические свойства которых могут быть получены посредством синтеза массивов структурных элементов (частиц). Как правило, структурными элементами метаматериала являются резонансные металлические элементы. В зависимости от выбранного рабочего диапазона устройства это могут быть разомкнутые кольцевые резонаторы (РКР) [44–46], канонические спирали [47, 48], пары плазмонных частиц, плазмонные нанопровода и др. В радиочастотном диапазоне метатомы — единичные элементы метаматериала — могут быть выполнены также из диэлектрика с большой диэлектрической проницаемостью [49]. Первые экспериментальные маскирующие устройства на основе трансформационной оптики были реализованы для микроволнового диапазона частот [44], позднее были предприняты попытки реализации устройств в инфракрасном (ИК) и видимом диапазонах.

Во-вторых, для создания маскирующих покрытий на основе трансформационной оптики необходимы чрезвычайно высокоанизотропные и весьма неоднородные метаматериалы с низкими оптическими потерями, которые крайне сложно реализовать на практике. Поэтому разработчики вынуждены искать компромисс между идеальным распределением ε и μ и возможностью его практической реализации. Этого компромисса можно достигнуть за счёт перехода от условия полной невидимости к условию частичной невидимости, например, в рамках двумерной оптической маскировки, отказа от некоторых других требований относительно невидимости, в частности сужение полосы частот, уменьшение размера маскируемых объектов и т.д.

Одним из главных преимуществ маскировки, основанной на трансформационной оптике, является именно отсутствие ограничений на размер маскируемых объектов. Как упоминалось выше, это непосредственно связано с максимально точной реализацией идеального пространственного распределения тензоров ε и μ , причём эти тензоры должны обладать гигантской анизотропией, а компоненты тензоров — малой мнимой частью. На практике удаётся достичь необходимой анизотропии только в узкой частотной полосе и только для радиочастот, например в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ).

Что касается оптических потерь, то высокие резонансные потери присущи всем известным объёмным метаматериалам. Наличие потерь является основным фактором, снижающим эффективность экспериментальных реализаций маскирующих покрытий на основе трансформационной оптики. В настоящее время самым распространённым решением проблемы потерь представляется использование усиливающей среды. Однако практические успехи в этой области пока более чем скромны [50].

2.1.1. Практические реализации маскирующих покрытий.

Маскирующие устройства на основе разомкнутых кольцевых резонаторов. Пионерская работа [44] 2006 года демонстрирует первую экспериментальную реализацию двумерного маскирующего устройства на основе метаматериала, работающего в микроволновом диапазоне. В качестве маскируемого объекта был выбран медный цилиндр диаметром приблизительно $1,4\lambda$, где λ — рабочая длина волны (маскирующее устройство являлось крайне узкополосным). Основой экспериментального макета маскирующего устройства, показанного на рис. 2, служила система из 10 концентрических цилиндрических слоёв диэлектрика, которые разбивались на отдельные элементарные ячейки (по три ячейки в высоту) с метатомами из РКР. Эксперимент был проведён в плоскопараллельном волноводе для частоты 8,5 ГГц в случае ТЕ-поляризованной волны. Изменение материальных параметров ε и μ обеспечивалось изменением геометрических параметров РКР.

На рисунке 3 представлены результаты расчётов и измерений распределения напряжённости электрического поля при падении волны слева на проводящий медный цилиндр (изображённый кружком в центре каждого рисунка). Кольцевая область вокруг цилиндра обозначает маскирующее устройство (оболочку из метаматериала), сплошные чёрные линии на рис. 3а и в показывают локальные направления потока энергии. Измерения комплексной амплитуды поля проводились с помощью специального точечного зонда, практически не возмущающего локальное электрическое поле. Маскирующее устройство уменьшает как обратное рассеяние (отражение), так и рассеяние вперёд. Ввиду того что при проектировании маскирующего устройства использовалась упрощённая гомогенизационная модель параметров, а также из-за наличия резонансных потерь в метаматериале не удалось добиться маскировки, близкой к идеальной.

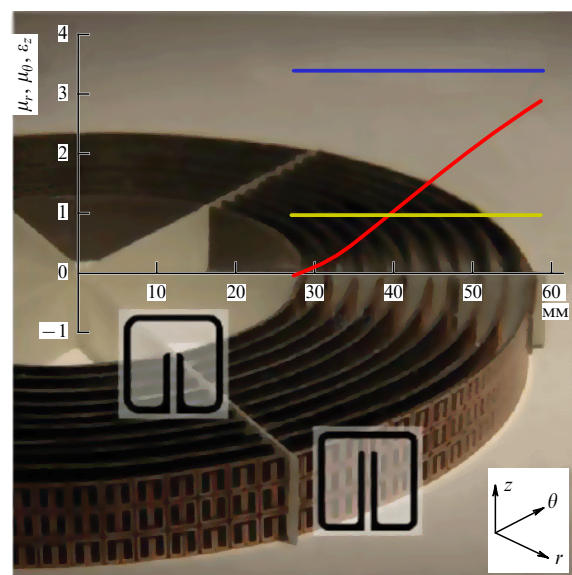


Рис. 2. (В цвете онлайн.) Двумерное маскирующее устройство, предназначенное для микроволнового диапазона длин волн, и графическое представление реализованных материальных параметров: μ_r (красная линия), $\mu_\theta = 1$ (жёлтая линия), $\varepsilon_z = 3,423$ (синяя линия), где r, z, θ — соответственно радиальная, вертикальная и угловая координаты [44].

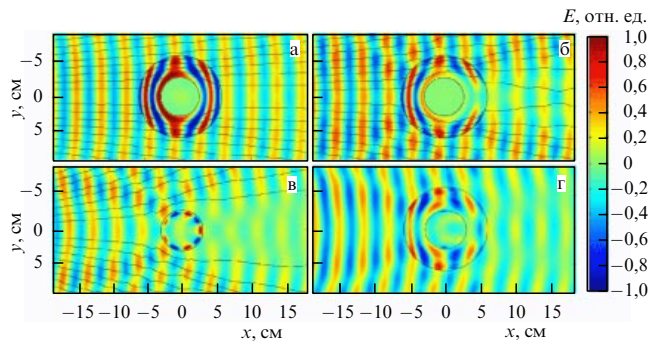


Рис. 3. (В цвете онлайн.) Распределение напряжённости электрического поля: (а) численное моделирование для маскирующего устройства при идеальном распределении материальных параметров среды; (б) численное моделирование для маскирующего устройства при использовании упрощённых параметров структуры; (в) эксперимент для цилиндра без маскирующего устройства; (г) эксперимент для цилиндра с маскирующим устройством [44]. Цветовая шкала в правой части рисунка показывает нормированное мгновенное значение электрического поля.

В 2010 г. в работе [45] было измерено поперечное сечение рассеяния для объекта, замаскированного с помощью рассматриваемого маскирующего устройства. Оказалось, что рассеяние удастся снизить всего на 24 %. Поэтому работа [44] имеет сугубо историческое значение как первая практическая иллюстрация концепции невидимости, основанной на трансформационной оптике.

Экспериментальные исследования с аналогичным образцом маскирующего устройства были проведены также российскими учёными [51]. Была разработана автоматизированная измерительная система, позволяющая получать в эксперименте пространственную картину распределения компонент электрического поля. Измерения проводились в широком частотном диапазоне, от 7 до 12 ГГц, и на отдельных частотах был продемонстрирован максимально возможный эффект маскировки.

В работе [46] 2009 года представлена ещё одна экспериментальная демонстрация двумерного немагнитного маскирующего устройства для маскировки в микроволновом диапазоне частот на основе электрических РКР. Маскирующее устройство состоит из 15700 РКР, находящихся в кремниевом каркасе. Образец имеет цилиндрический корпус, который разделён на 20 кольцевых областей, с линейным изменением радиальной составляющей ϵ от внутренней до внешней границы устройства (рис. 4а). Внутренний радиус устройства 6 см, а внешний — 15 см. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4б. Устройство возбуждалось рупорной антенной, и ближнее поле на нижней поверхности маскирующего устройства сканировалось магнитным зондом. В качестве рабочей частоты была выбрана частота 11 ГГц. Результаты эксперимента представлены на рис. 5. Впервые удалось скрыть область размером $4,4 \lambda$.

Теоретически данный подход к построению двумерного маскирующего устройства может быть распространён на инфракрасную и видимую области с заменой ТЕ-поляризованных волн ТМ-поляризованными. При этом следует заменить магнитные метаатомы — РКР — оптически короткими нанопроводами [52]. Однако соответствующий эксперимент пока не поставлен.

Маскирующее устройство на основе канонических спиралей. В работе [47] предложено двумерное маскирующее

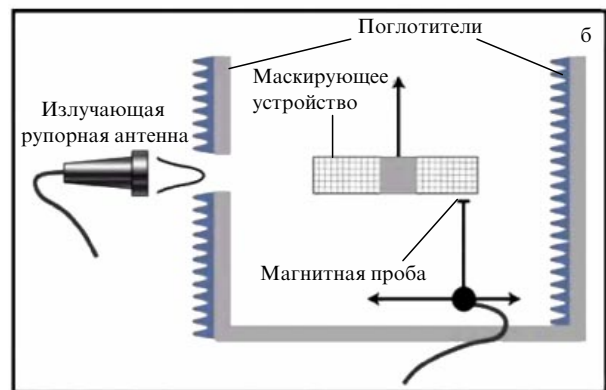
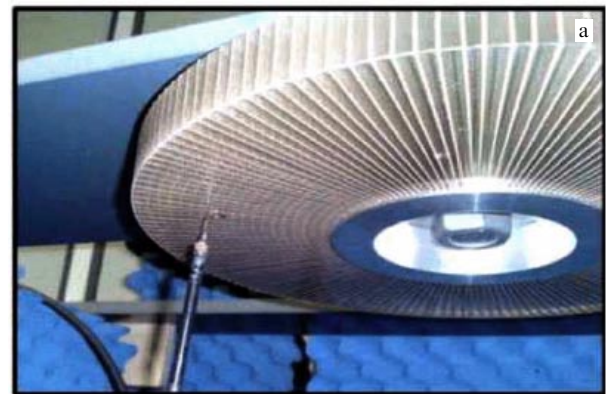


Рис. 4. Немагнитное метаматериальное устройство: (а) фотография и (б) схема экспериментальной установки [46].

устройство на основе так называемых канонических спиралей, показанных на рис. 6. Каноническая спираль представляет собой разомкнутое кольцо с двумя отрезками проволоки на обоих краях зазора, перпендикулярными плоскости кольца. Требуемая реализация материальных параметров может быть достигнута одновременно для ϵ и μ при использовании только одного вида элементов — спиралей. Индуцируемый ток в спирали порождает электрический диполь (за счёт провода) и магнитный диполь (за счёт кольца). Маскирующее устройство разделено на концентрические цилиндрические области (слои) с включениями из канонических спиралей. Необходимое радиальное изменение диэлектрической проницаемости в данном маскирующем устройстве осуществляется изменением плотности расположения спиралей с одинаковыми геометрическими параметрами в зависимости от расстояния до центра маскирующего устройства, тогда как в ранее рассмотренных работах использовались включения из резонансных элементов с разными параметрами. Использование спиралей с одинаковыми размерами упрощает изготовление маскирующего устройства.

Для работы предлагаемого маскирующего устройства в свободном пространстве необходимо компенсировать паразитный материальный параметр метаматериала на основе спиралей, так называемую киральность, которая описывает магнитную поляризацию единичного объёма метаматериала электрическим полем и его электрическую поляризацию магнитным полем. Компенсация киральности обеспечивается использованием в маскирующем устройстве равного числа правовинтовых

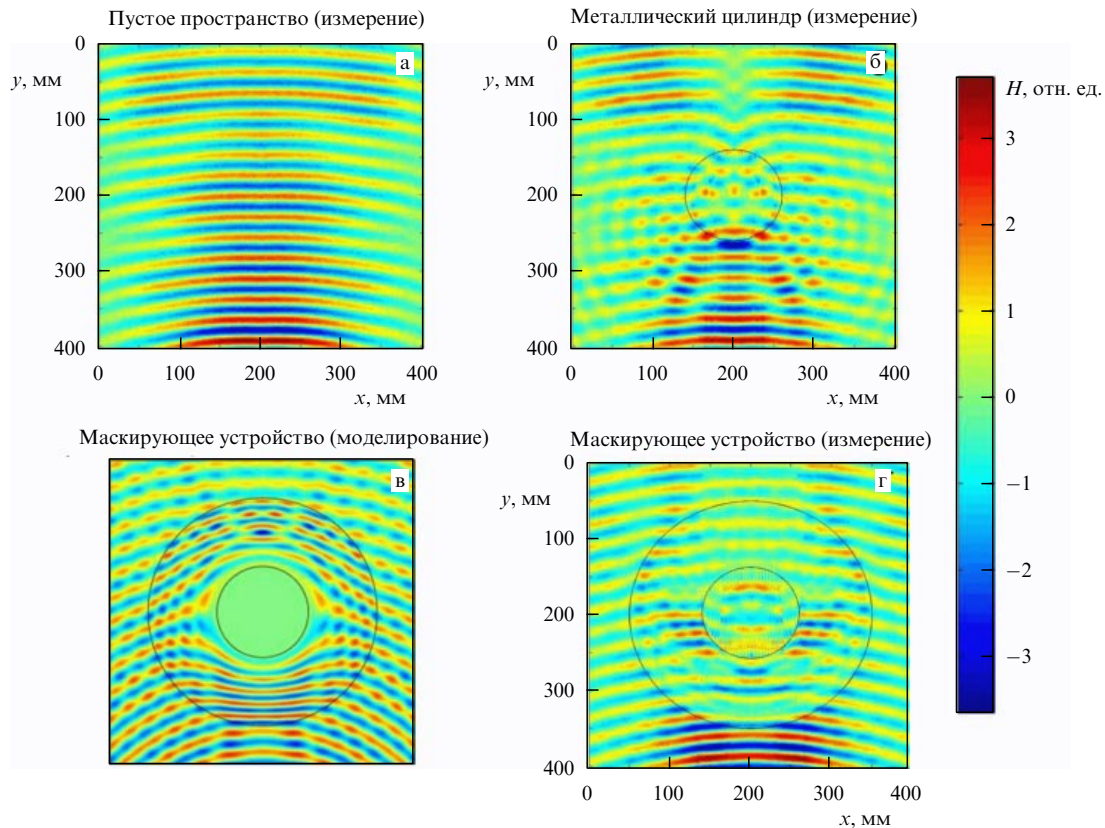


Рис. 5. (В цвете онлайн.) Вещественная часть измеренного магнитного поля: (а) в свободном пространстве; (б) только с металлическим цилиндром; (г) с металлическим цилиндром в маскирующем устройстве. (в) Результаты численного моделирования для маскирующего устройства вместе с металлическим цилиндром. Рабочая частота 11 ГГц, волны распространяются снизу вверх [46].



Рис. 6. Экспериментальный макет маскирующего устройства на основе канонических спиралей [47].

и левовинтовых спиралей. Такое двумерное маскирующее устройство работает в случае небольших по высоте цилиндрических объектов, на которые падают волны, распространяющиеся в горизонтальной плоскости. Однако данное двумерное маскирующее устройство обладает преимуществом перед большинством других двумерных маскирующих покрытий — оно работает как для ТЕ-поляризованных, так и для ТМ-поляризованных волн и является простым в изготовлении.

В качестве маскируемого объекта был выбран металлический цилиндр диаметром 3 см и высотой 1 см.

Моделирование и эксперимент проводились на частоте 8 ГГц для цилиндра без маскирующего покрытия и цилиндра с маскирующим устройством. Результаты эксперимента, проведённого в плоскопараллельном волноводе, представлены на рис. 7. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о частичной невидимости. Хотя уменьшить отражение с помощью маскирующего устройства не удаётся, область тени за цилиндром, помещённым в центр маскирующего устройства, оказывается существенно меньше тени цилиндра без маскирующего устройства. Кроме того, наблюдается практически полное восстановление фронта электромагнитной волны позади замаскированного цилиндра, в то время как увеличение отражения за счёт маскирующего устройства, которое предсказывает численная модель, экспериментально не наблюдается. Для повышения эффективности рассматриваемого маскирующего устройства необходимо увеличить плотность канонических спиралей в каждом слое.

2.1.2. Ковровые маскирующие покрытия. Как отмечалось выше, теоретически нет ограничений на размеры объекта, скрываемого с помощью маскирующих покрытий на основе трансформационной оптики, но на практике реализовать материалы с необходимым распределением материальных параметров для работы в широком диапазоне частот, особенно в оптическом, технологически достаточно сложно. Поэтому в статье [53] был предложен новый способ маскировки, основанный на трансформационной оптике и волновом обтекании, — невидимость под "прозрачным ковром" (рис. 8).

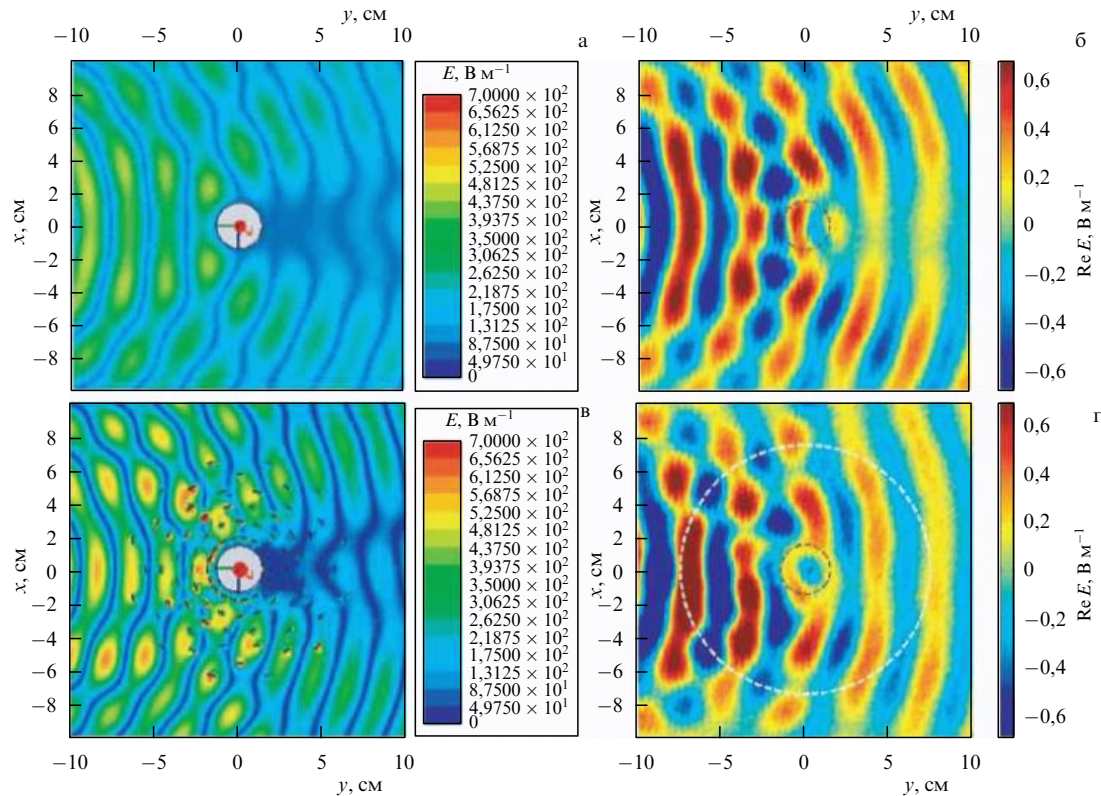


Рис. 7. (В цвете онлайн.) Численное моделирование амплитуды электрического поля для медного цилиндра (серый круг): (а) без маскирующего устройства и (б) с маскирующим устройством на основе спиралей. Результаты измерения вещественной части электрического поля для металлического цилиндра (в) без маскирующего устройства, (г) со спиральным маскирующим устройством. Чёрной штриховой окружностью обозначена поверхность цилиндра, белой — внешняя граница маскирующего устройства [47].



Рис. 8. Принцип работы коврового маскирующего покрытия [53].

При "ковровой" маскировке скрываемый объект помещается на хорошо отражающую поверхность и накрывается слоем, образующим прозрачное маскирующее покрытие. Объект является неровностью на отражающей поверхности. Достаточно подавить рассеяние, создаваемое этой неровностью, по всем направлениям, кроме направления луча, отражённого от зеркальной подложки. В направлении отражённого луча нет необходимости подавлять волну, но она должна быть такой, как если бы отражение происходило от зеркальной подложки. Оказывается, что в этом случае структура маскирующего покрытия может быть значительно упрощена, именно не требуется гигантской оптической анизотропии маскирующего покрытия, более того, можно использовать полностью изотропный материал.

Материальные параметры и форма коврового покрытия рассчитываются на основе математического аппарата трансформационной оптики. Помимо того что маскировка такого типа допускает изотропию, для её реализации нет необходимости в использовании резонансных метатомов. Поэтому для маскирующих по-

крытий, работающих по принципу "прозрачного ковра", не возникает проблем ни с высокими оптическими потерями, ни с узким диапазоном частот. Ковровые маскирующие покрытия могут быть применены и для неполяризованного света. Наиболее значительные экспериментальные результаты для таких маскирующих покрытий были достигнуты в микроволновом [54], терагерцевом [55] и оптическом [56] диапазонах частот.

Ковровые маскирующие покрытия в микроволновом диапазоне. В работе [54] представлено маскирующее покрытие, выполненное из более чем десяти тысяч частиц I-образной формы с различными размерами. Решётки таких частиц образуют слои метаматериала с различными эффективными показателями преломления и поверхностными импедансами (рис. 9). На рисунке 10 представлены результаты измерения электрического поля. Из-за ограничений измерительной аппаратуры эксперимент был проведён в частотном диапазоне от 13 до 16 ГГц, хотя его авторы утверждают, что диапазон частот, в котором должен наблюдаться эффект маскировки, является более широким.

В 2011 г. был выполнен эксперимент [57] по созданию коврового маскирующего покрытия из пенополиуретана с добавлением титаната бария с изменяющейся вдоль вертикальной координаты концентрацией (рис. 11). Эксперимент был реализован в плоскопараллельном волноводе в интервале частот от 7 до 12 ГГц (рис. 12). Главным преимуществом выбранного диэлектрического компонента является то, что он состоит не из небольших компонентов субволнового размера, а из блоков с размерами порядка нескольких десятков миллиметров, т.е.

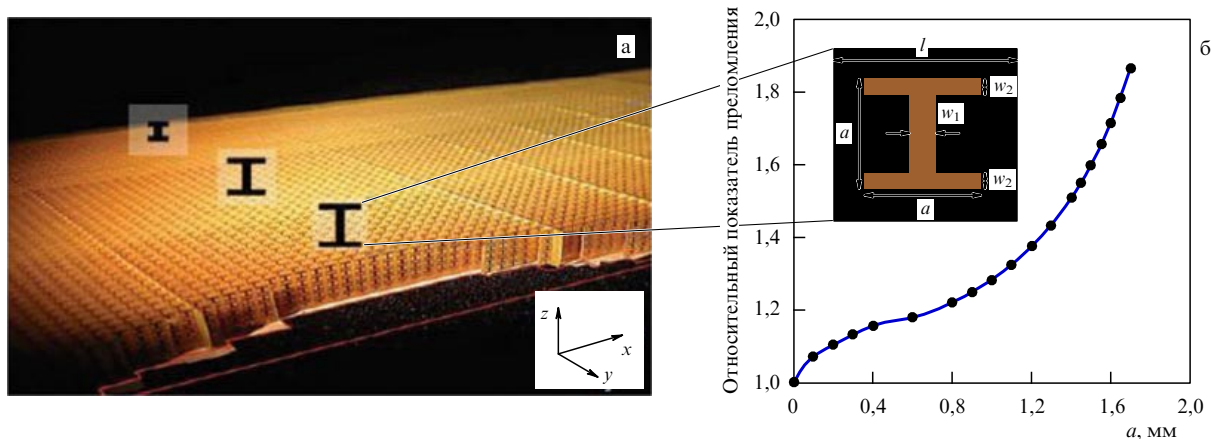


Рис. 9. (а) Модель покрытия. (б) Зависимость коэффициента преломления от размера элемента. Размеры элементарной ячейки метаматериала: $l = 2$ мм, $w_1 = 0,3$ мм, $w_2 = 0,2$ мм, размер a варьируется от 0 до 1,7 мм [54].

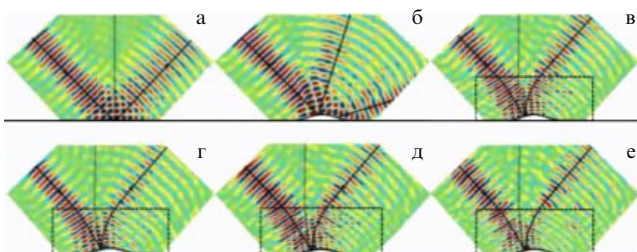


Рис. 10. Результаты измерения картины электрического поля для падения луча на обычную поверхность (частота 14 ГГц) (а), на поверхность с объектом без маскирующего покрытия (частота 14 ГГц) (б), на поверхность с объектом, находящимся под ковровым маскирующим покрытием при частоте 14 ГГц (в), 13 ГГц (г), 15 ГГц (д), 16 ГГц (е). Поля в отражённом луче мало отличаются от полей в луче, отражённом от поверхности при отсутствии объекта [54].

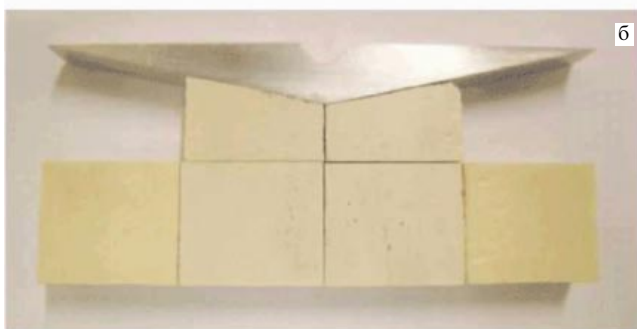
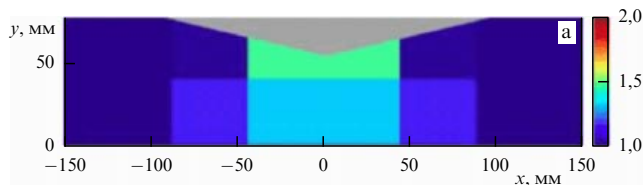


Рис. 11. Скрываемый объект ограничен блоками композитного диэлектрика с пространственно неоднородным распределением титаната бария. Электромагнитная волна распространяется снизу. Маскируемый объект — алюминиевый треугольник с высотой 16 мм и основанием 144 мм. (а) Распределение диэлектрической проницаемости блоков размерами 34,25 мм × 30 мм. (б) Вид изготовленного коврового маскирующего покрытия [57].

структура обладает низкими потерями и в то же время является простой в изготовлении.

Рассмотренные выше ковровые маскирующие покрытия работают только для ТМ-поляризованной падающей электромагнитной волны. Трёхмерное ковровое покрытие, работающее для обеих поляризаций, впервые было реализовано экспериментально в 2010 г. в работе [58]. Покрытие было разработано с использованием известных диэлектрических материалов с показателями преломления на микроволнах величиной от 1 до 1,63. Образец представлял собой цилиндр высотой 51 мм и радиусом 62,5 мм, сделанный из слоёв диэлектрических пластин с неоднородными отверстиями (рис. 13). Пластину были изготовлены из политетрафторэтилена и стекловолокна с относительной диэлектрической проницаемостью 2,65, высота пластин равнялась 1 мм. В нижней части цилиндра располагался конусообразный металлический объект с радиусом основания 62,5 мм и высотой 13 мм. Эксперимент показал хорошие результаты для обеих поляризаций падающей волны при разных углах падения волны в широком диапазоне частот, от 9 до 12 ГГц (рис. 14).

В рассмотренных выше работах [54, 57, 58] параметры маскирующего покрытия при его изготовлении определялись геометрией маскируемого объекта, т.е. любое изменение размеров и формы объекта требует разработки нового маскирующего покрытия.

В статье [59] был предложен новый способ ковровой маскировки — маскировка с использованием "умного" метаматериала — саморегулирующегося метаматериала на основе упругой матрицы с высокой диэлектрической проницаемостью. Этот метаматериал позволяет при необходимости изменять размеры и форму скрываемой области. В работе [59] также экспериментально подтверждена возможность реализации ковровой невидимости с помощью такого метаматериала. При разработке этого метаматериала аппарат трансформационной оптики не использовался — квазиконформное преобразование однородного пространства с точечным объектом в неоднородное пространство с конечным объектом "замещено" механическим преобразованием упругой среды. При численном моделировании наилучшего эффекта маскировки удалось достичь при использовании ауксетиков — материалов с отрицательным коэффициентом Пуассона, причём абсолютная величина коэффициента Пуассона должна быть достаточно велика. Однако на данный момент сложно реализовать

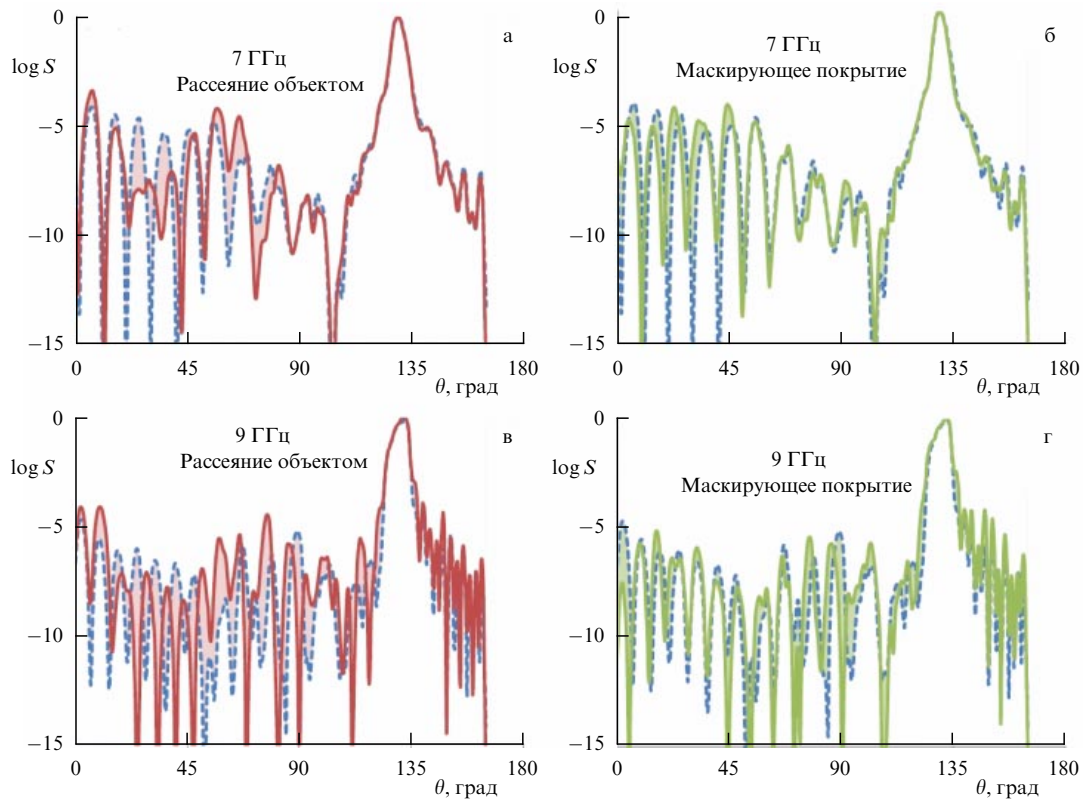


Рис. 12. (В цвете онлайн.) Экспериментальные результаты: коэффициент прохождения S [дБ] в зависимости от угла падения волны θ . Рассеяние объектом (а, в) без маскирующего покрытия (красная кривая) и (б, г) с маскирующим покрытием (зелёная кривая). Штриховые кривые соответствуют рассеянию в пустом плоскопараллельном волноводе [57].

материал с высокой диэлектрической проницаемостью и одновременно с отрицательным коэффициентом Пуассона. Поэтому в [59] была предложена схема, которая позволяет обеспечить частичную невидимость, являясь в то же время довольно простой в реализации. Экспериментальный образец "умного" коврового покрытия состоит из двух треугольных частей (C_1 и C_2 на рис. 15), каждая из которых представляет собой эластичную

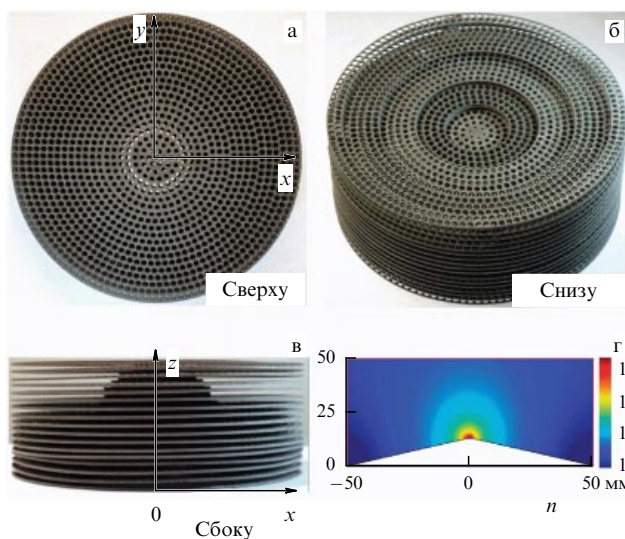


Рис. 13. (В цвете онлайн.) Экспериментальная модель трёхмерного коврового покрытия. Вид (а) сверху, (б) снизу и (в) сбоку. (г) Распределение показателя преломления в плоскости xz [58].

кристаллическую структуру, изготовленную из полых соприкасающихся друг с другом силиконовых трубок. Нижняя треугольная часть "вжимается" в верхнюю, в результате силиконовые трубки деформируются, что приводит к требуемому распределению ε в маскирующем покрытии, и образуется скрываемая область с регулируемой высотой. Следовательно, мы можем скрывать объекты с разными геометрическими размерами.

Как видно из результатов моделирования и эксперимента (рис. 16), наилучший эффект маскировки наблюдается при малых высотах скрываемой области. Как и другие виды ковровой маскировки, "умное" маскирующее покрытие работает в широкополосном диапазоне частот, от 10 до 12 ГГц.

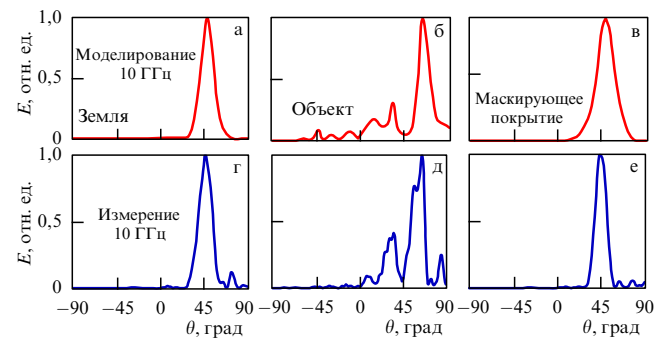


Рис. 14. Теоретические (а–в) и экспериментальные (г–е) результаты для частоты 10 ГГц при ТМ-поляризации. θ — угол падения волны, E — амплитуда электрического поля, нормированная на единицу [58].

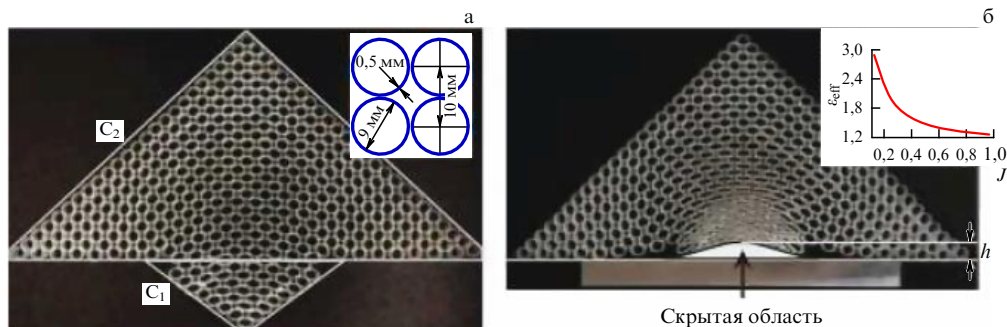


Рис. 15. Экспериментальный образец "умного" метаматериала с дополнительной нижней частью (длиной 125 мм и высотой 65 мм): (а) до деформации и (б) после деформации. Вставка на рис. а показывает геометрические параметры отверстий материала, на вставке рис. б — зависимость эффективной диэлектрической проницаемости ϵ_{eff} от якобиана J тензора деформации, который характеризует сжатие (растяжение) и изменение формы в каждой точке образца [59].

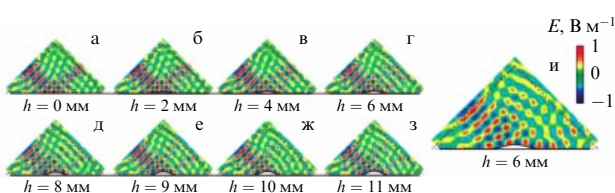


Рис. 16. (В цвете онлайн.) Экспериментально полученное распределение электрического поля E на частоте 10 ГГц: (а) при маскирующем покрытии без скрываемого объекта, (б–з) при наличии маскирующего покрытия и разных значениях высоты маскируемой зоны h , указанных на рисунке, (и) без маскирующего покрытия при $h = 6$ мм. Красной пунктирной линией выделен треугольник, соответствующий размерам маскирующего покрытия [59].

Существенный прорыв в разработке ковровых маскирующих покрытий произошёл в 2012 г. Прежде в результате многочисленных экспериментов удавалось достичь только частичной невидимости. Авторы ра-

боты [60] разработали двумерное маскирующее покрытие, позволяющее достичь практически полной невидимости цилиндрического объекта в микроволновом частотном диапазоне. Маскирующее устройство, имеющее ромбовидную форму (рис. 17), содержит два типа метаатомов: электрические и магнитные частицы, которые обеспечивают возможность получить необходимые распределения ϵ и μ . Вектор электрического поля падающей волны направлен перпендикулярно плоскости, в которой располагается маскирующее устройство, в связи с этим компонента диэлектрической проницаемости ($\epsilon_z = 2,36$) находится вне плоскости устройства, а компоненты магнитной проницаемости ($\mu_x = 3,27$, $\mu_y = 0,31$) лежат в плоскости устройства. Расположение координатных осей показано на рис. 17а. Необходимые материальные параметры были реализованы посредством отдельных метаматериальных включений — канонических двусторонних РКР (рис. 17б). Магнитными и электрическими свойствами можно легко управлять, изменяя

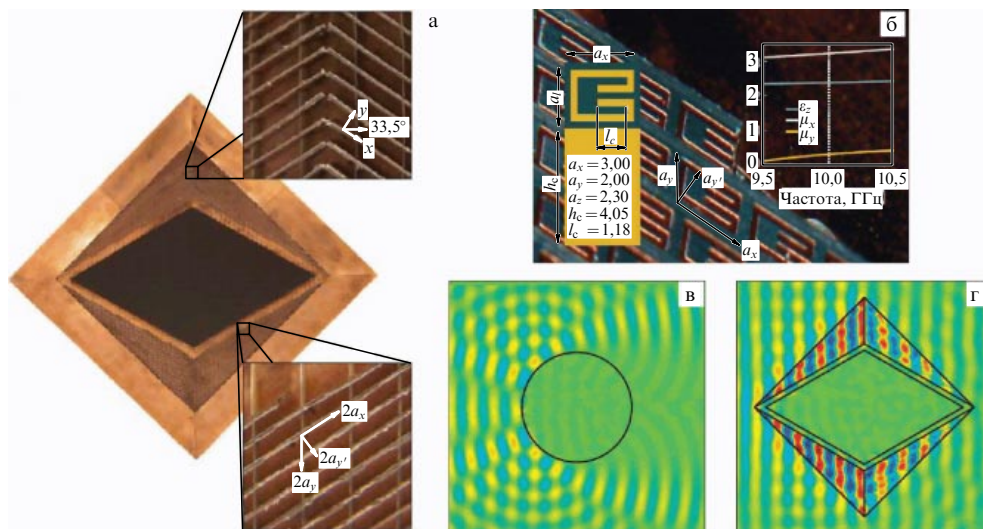


Рис. 17. (В цвете онлайн.) (а) Фотография экспериментального макета маскирующего устройства с длиной примерно 41 см. Квадрат в верхней части рисунка соответствует внутренней поверхности маскирующего устройства. Белыми стрелками показана локальная система координат. Рифления проходят вдоль оси x , тем самым обеспечивается эффективный отклик в данном направлении. Квадрат в нижней части рисунка — фотография материала с наложенными белыми стрелками, отображающими направления продольных векторов слоя для элементарной метаматериальной ячейки. (б) Конструкция элементарной метаматериальной ячейки. На вставке в левой части рисунка — схема элементарной метаматериальной ячейки, размеры указаны в миллиметрах. На вставке в правой части рисунка — зависимость материальных параметров от частоты вблизи значения 10 ГГц. (в, г) Результаты измерения электрического поля на частоте 10,2 ГГц для незамаскированного объекта и объекта в маскирующем устройстве соответственно [60].

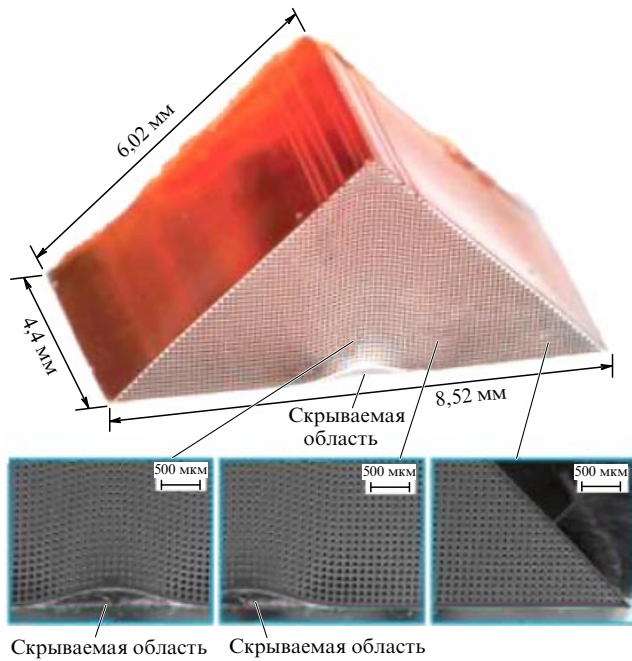


Рис. 18. Модель трёхмерного коврового покрытия. Изображения, полученные с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов. Для лучшего отображения мелких деталей на снимках поверхность покрытия металлизирована. Видно изменение размеров отверстий вблизи выпуклости [55].

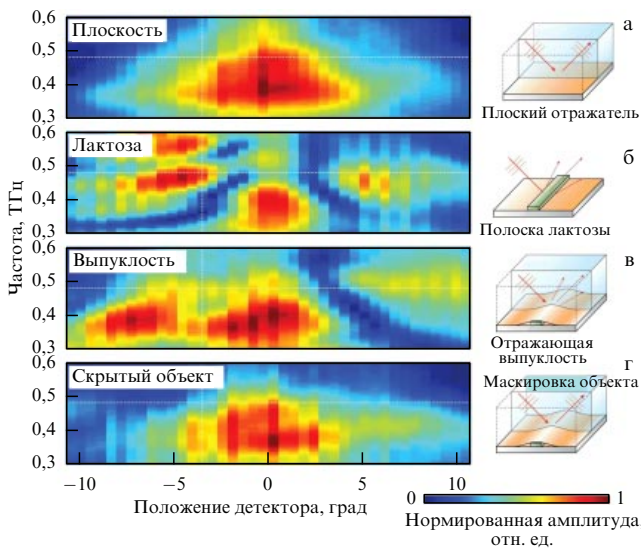


Рис. 19. (В цвете онлайн.) Спектр для четырёх экспериментальных случаев: (а) отражательная поверхность, (б) полоска лактозы — скрываемый объект, (в) отражающая выпуклость, (г) маскируемый объект с покрытием [55].

соответственно длину ёмкостного плеча l_c и высоту элементарной ячейки a_z . С помощью такой маскировки удаётся скрыть цилиндрический объект радиусом $R = 7,5$ см, находящийся в центре маскирующего устройства. В результате эксперимента в плоскопараллельном волноводе для частоты 10,2 ГГц было продемонстрировано уменьшение рассеяния от объекта с маскирующим покрытием в десять раз по сравнению с рассеянием от объекта без покрытия (рис. 17в, г).

Впрочем, невидимость в эксперименте [60], так же как и в упомянутых выше работах, по существу, является

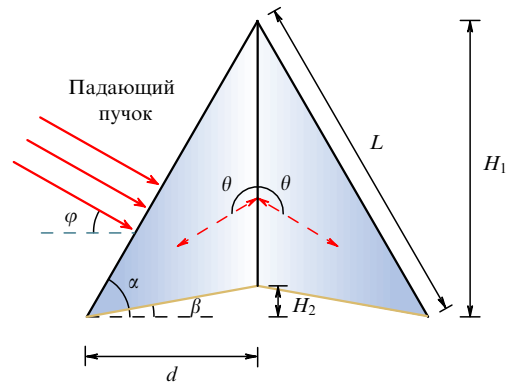


Рис. 20. Геометрическая схема маскирующего покрытия. Длина граней $L = 40$ мм и высота $H_1 = 34,78$ мм образуют нижний угол $\alpha = 60,4^\circ$. Маскируемый угол $\beta = 5^\circ$. Оптическая ось кристалла располагается под углом $\theta = 58,5^\circ$ [61].

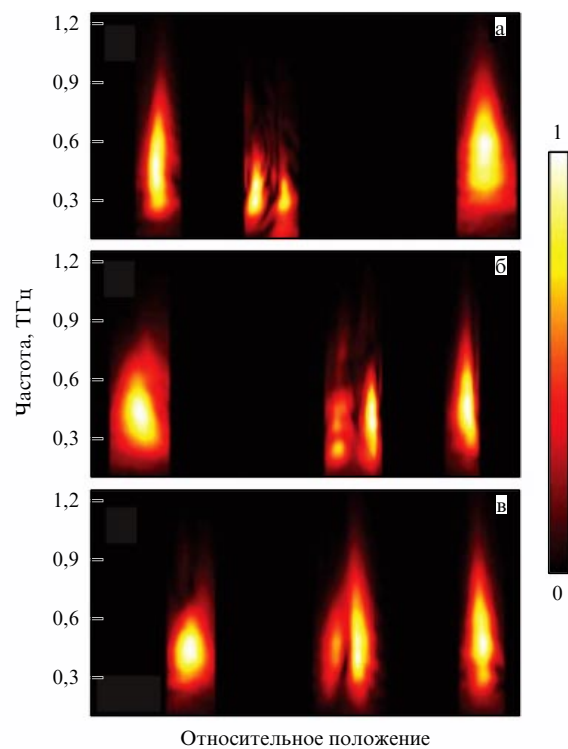


Рис. 21. (В цвете онлайн.) ТЕ- и ТМ-профили пучка для углов падения: (а) $\varphi_1 = 19,6^\circ$, (б) $\varphi_2 = 39,6^\circ$ и (в) $\varphi_0 = 29,6^\circ$ [61].

частичной, поскольку она может быть достигнута не при всех углах падения волны. Диапазон рабочих частот, хотя он и является широким, остаётся конечным, и в большинстве случаев речь идёт лишь об одной поляризации падающего поля.

Ковровые покрытия в терагерцевом диапазоне. В 2011 г. было предложено и экспериментально реализовано трёхмерное ковровое покрытие в терагерцевом диапазоне частот [55]. Покрытие (рис. 18), имеющее треугольнообразную форму с основанием 8,52 мм и высотой 4,26 мм, состоит из 220 слоёв с отверстиями разного диаметра; на подложку напылён ровный слой золота толщиной 200 нм, который работает как зеркало. Эффект маскировки наблюдается на частоте от 0,3 до 0,6 ТГц (рис. 19).

В работе [61] 2012 г. демонстрируется маскирующее покрытие, состоящее из двух зеркально расположенных

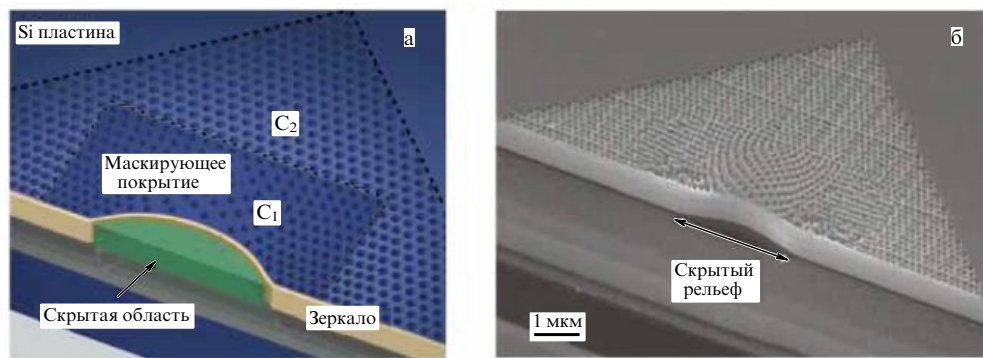


Рис. 22. (а) Графическая модель коврового покрытия, работающего в ИК-диапазоне. (б) Изображение коврового покрытия, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа, ширина и глубина маскируемого объекта соответственно 3,8 мкм и 400 нм [62].

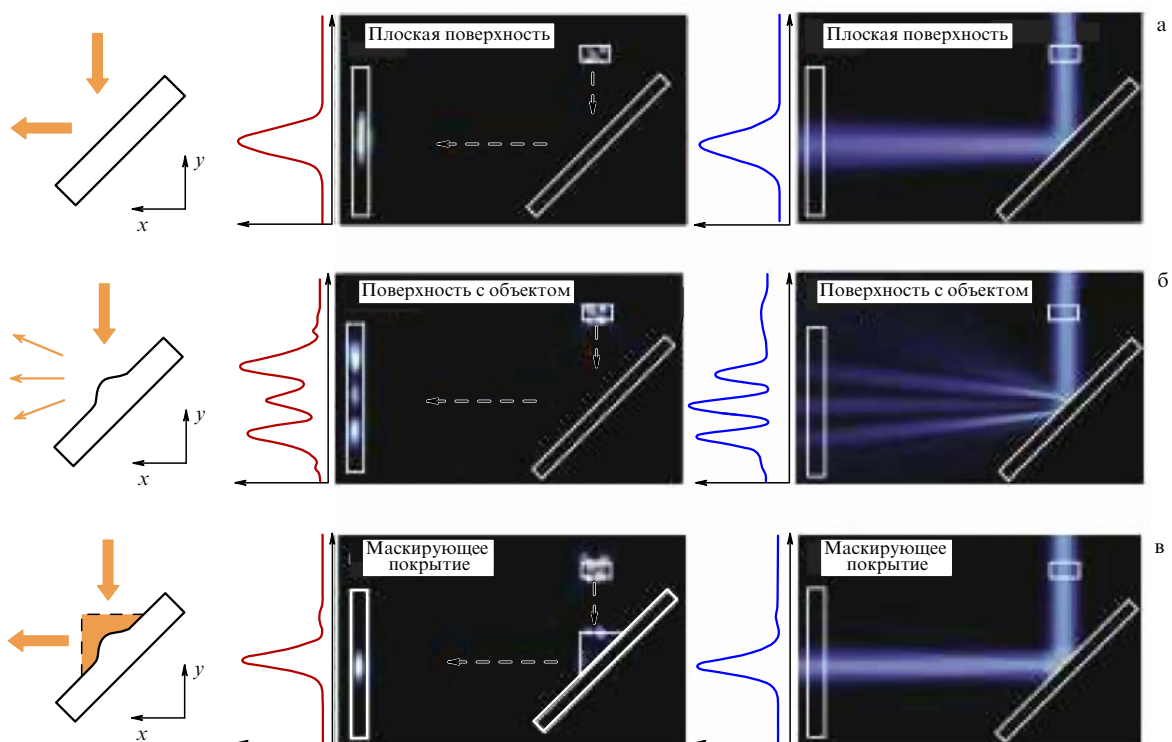


Рис. 23. Экспериментальные результаты для отражённого светового гауссова пучка на длине волны 1540 нм для (а) плоской поверхности золотого зеркала, (б) поверхности с выступом без маскирующего покрытия, (в) поверхности с выступом и маскирующим покрытием [62].

сапфировых призм, склеенных между собой. В треугольной области высотой $H_2 = 1,75$ мм, находящейся под призмами (рис. 20), может быть расположен скрываемый объект. Для проверки работы устройства были получены профили терагерцевого пучка, распространяющегося через маскирующее покрытие. Пучок падал на одну из боковых граней призмы, а профиль снимался с противоположной грани. Таким образом были получены результаты для ТМ-волн в частотном диапазоне от 0,2 до 1 ТГц для углов падения $\pm 10^\circ$ (рис. 21).

Ковровые покрытия в оптическом диапазоне. Первая реализация коврового покрытия на оптических частотах (в ИК-диапазоне) была описана в работе [62]. Покрытие выполнено на слоистой кремниевом-диэлектрической подложке, состоящей из слоя очищенного легированного кремния толщиной 250 нм, отделённого от подложки слоем оксида кремния толщиной 3 мкм (рис. 22). Роль

объекта играет неровность на зеркале, выполненная в виде золотой полоски шириной 250 нм и толщиной 100 нм, ограничивающей 250-нанометровый слой кремния сбоку. Под неровностью образуется скрываемая область. В слое легированного кремния сделаны отверстия диаметром 110 нм, превращающие его в анизотропный метаматериал в ближнем ИК-диапазоне. Маскирующее покрытие образуется в прямоугольной области вокруг неровности на зеркале благодаря тому, что в этом прямоугольнике те же 110-нанометровые отверстия проделаны аperiодически с нужным пространственным распределением. Данное маскирующее покрытие является двумерным — оно работает для волн, распространяющихся в 250-нанометровом слое кремния с отверстиями в горизонтальной плоскости (как в волноводе). Так как это покрытие не содержит резонансных метатомов (отверстия можно считать метатомами без

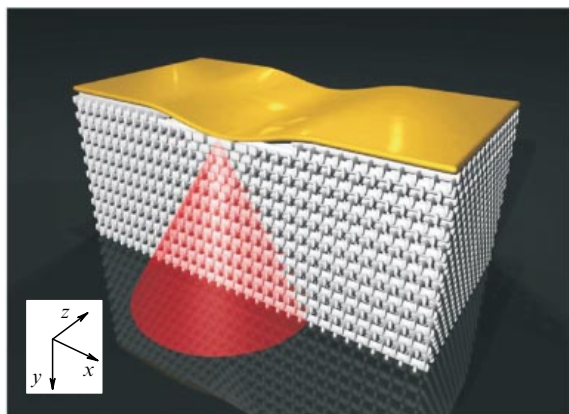


Рис. 24. (В цвете онлайн.) Модель трёхмерного коврового покрытия. Трёхмерный световой конус, показанный красным цветом, соответствует числовой апертуре микроскопа $NA = 0,5$ [56].

резонанса), маскировка с хорошим качеством (рис. 23) наблюдается в довольно широком диапазоне длин волн (1400 – 1800 нм).

В 2010 г. было разработано [56] трёхмерное ковровое покрытие для ИК-диапазона на основе диэлектрических гранецентрированных кубических фотонных кристаллов со штабелевой структурой (рис. 24). Эффект невидимости наблюдался для длин волн от 1,4 до 2,7 мкм и углов падения волны, не превышающих 60° .

В 2011 г. сразу в нескольких работах [63–65] была реализована двумерная ковровая маскировка, аналогичная представленной в [62], но для частот видимого света. В работе [63] такое покрытие было выполнено в силиконо-нитридном волноводе на специально разработанной нанопористой подложке из оксида кремния с очень низким показателем преломления, $n \approx 1,25$ (рис. 25). Полученное маскирующее покрытие демонстрирует широкополосный эффект невидимости — почти для всего диапазона видимого света (400–700 нм) (рис. 26).

В заключение этого раздела отметим, что маскировка на основе трансформационной оптики может быть также применена для изоляции от внешнего магнитного поля, что было продемонстрировано в работах [66, 67]. Для

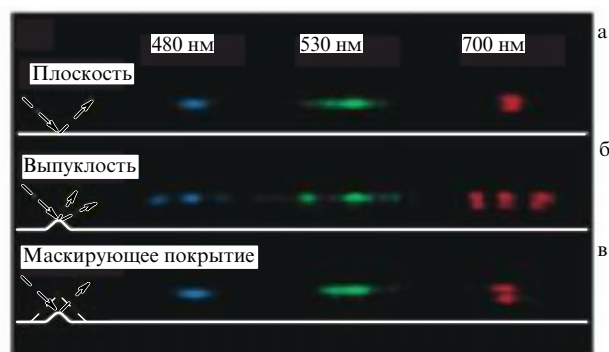


Рис. 26. Экспериментальные результаты на разных длинах волн: изображения интенсивности поля после отражения от (а) плоской поверхности, (б) от объекта без маскирующего покрытия, (в) от объекта с маскирующим покрытием [63].

этого было предложено изготовить маскирующее покрытие из сверхпроводника и ферромагнетика. В 2013 г. на основе принципов преобразования координат впервые было сконструировано "тепловое устройство маскировки", которое заключает поток тепла вокруг объекта в металлическую пластину, что позволяет минимизировать нагревание объекта [68]. Усовершенствованная конструкция такого устройства продемонстрирована в работах [69, 70]. Также недавно была опубликована работа [71], в которой представлены первые реализации макроскопического устройства маскировки при диффузионном рассеянии света. Это устройство превосходно скрывает объект для любого угла падения света и поляризации любого типа. Кроме того, применение данных принципов может быть полезным и в акустике [72].

2.2. Реализация маскирующих покрытий без применения трансформационной оптики

2.2.1. Маскирующее устройство на основе массива длинных линий.

В работе [73] представлен альтернативный способ маскировки объектов — по принципу волнового обтекания, но без применения трансформационной оптики. Это метод маскировки с использованием сетки,

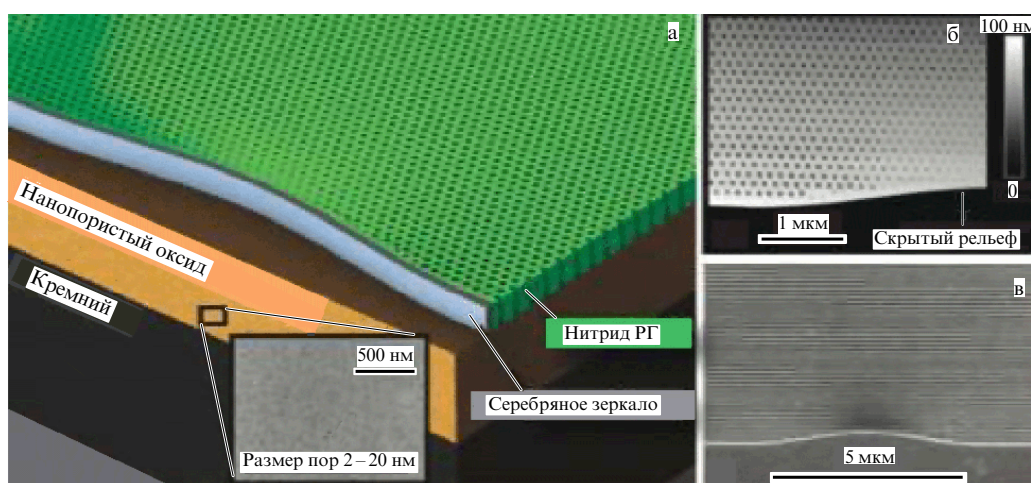


Рис. 25. (В цвете онлайн.) (а) Модель коврового покрытия, в котором толщина слоя нитрида составляет 300 нм, толщина нанопористого оксида — 5–10 мкм, размер отверстий изменяется от 65 нм до 20 нм. (б) Изображение отверстий, полученное атомным силовым сканирующим микроскопом. (в) Изображение устройства, содержащего около 3000 отверстий, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа [63].

образованной соединёнными между собой линиями передачи (в терминах радиотехники — длинными линиями). Электромагнитная волна, падая из окружающего пространства на поверхность маскирующего устройства, возбуждает сетку длинных линий, которая пронизывает маскируемый объект. По сетке длинных линий волна проходит сквозь объект так, что он остаётся незамеченным ни в падающем, ни в прошедшем, ни в рассеянном полях (рис. 27). Маскируемый объект, если его размеры существенно больше длины волны, должен либо иметь отверстия для сетки длинных линий, либо являться группой объектов малого поперечного размера, например (в двумерном случае) набором стержней с диаметрами, меньшими, чем у ячейки сетки.

В работе [74] в качестве скрываемого объекта был выбран двумерный массив металлических проводов, входящих в состав маскирующего устройства (рис. 28). Результаты эксперимента в плоскопараллельном волноводе представлены на рис. 29. Хотя экспериментально реализована именно двумерная невидимость на основе сетки длинных линий, в принципе её можно осуществить и для трёхмерного объекта с отверстиями (или трёхмер-

ного кластера из малых шариков) при условии реализации трёхмерной сетки длинных линий.

Данная концепция получила дальнейшее развитие в работах [75, 76]. Авторы [75, 76] усовершенствовали маскирующее покрытие, заменив его периферическую часть массивом твёрдых конических металлических слоёв. Конические слои играют роль согласующего устройства, так как радиальное сечение конического слоя может рассматриваться как продольное сечение рупорной антенны. Волновой импеданс внутри конического слоя плавно изменяется, что позволяет практически избавиться от обратного рассеяния. Получившийся образец маскирующего покрытия оказался наиболее простым в изготовлении и сборке. Кроме того, его преимуществом является возможность измерения в свободном пространстве. Измерения с образцом в виде набора массивных металлических стержней, соединённых между собой металлическими кольцами, проводились с помощью рупорной антенны. Было установлено слабое различие диаграмм направленности антенны при наличии образца с маскирующим покрытием, стоящего перед рупором, и при отсутствии его, а также значительное искажение диаграммы в случае образца без маскирующего покрытия, поставленного перед рупором. Макет экспериментальной установки и результаты эксперимента показаны на рис. 30, 31.

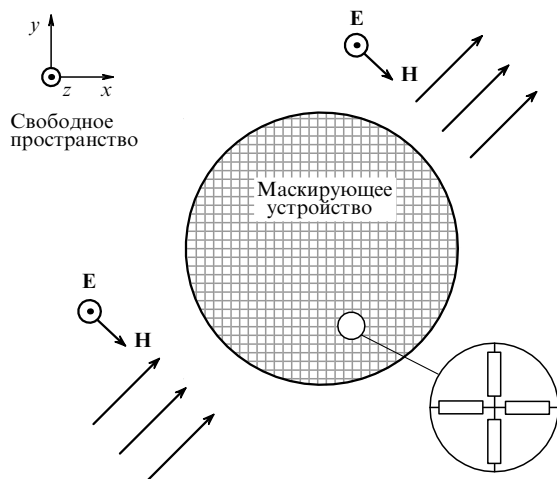


Рис. 27. Двумерное цилиндрическое электромагнитное маскирующее устройство, эффективность которого не зависит от угла падения электромагнитной волны при условии, что период решётки достаточно мал по сравнению с длиной волны [73].

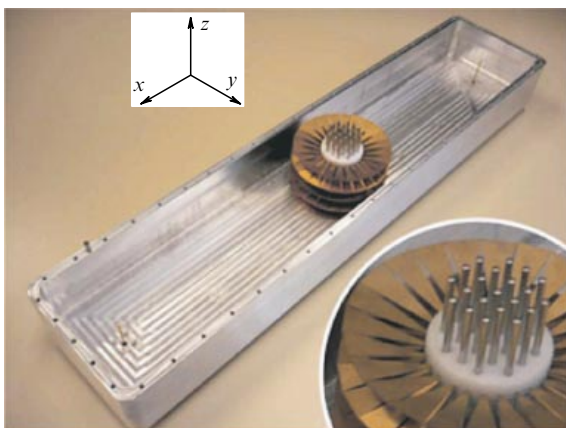


Рис. 28. Фотография волновода со скрываемым объектом и маскирующим устройством [74].

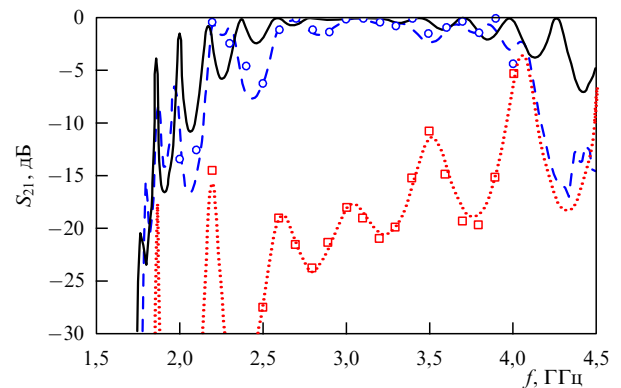


Рис. 29. (В цвете онлайн.) Коэффициент прохождения для пустого волновода (чёрная кривая), для волновода с маскируемым объектом внутри (синяя кривая), для волновода с маскируемым объектом и маскирующим устройством (красная кривая) [74].

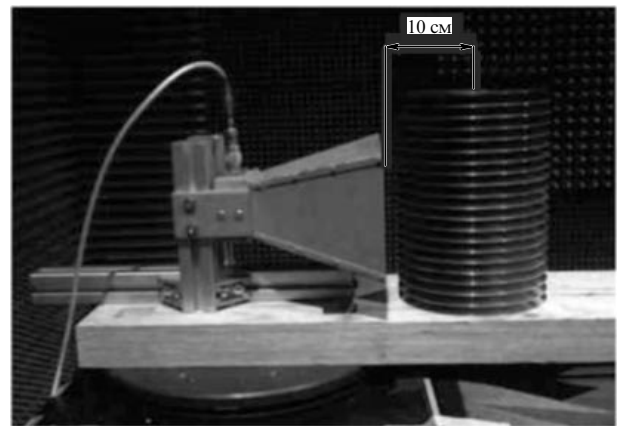


Рис. 30. Макет экспериментальной установки с маскируемым объектом, находящимся напротив рупорной антенны [75].

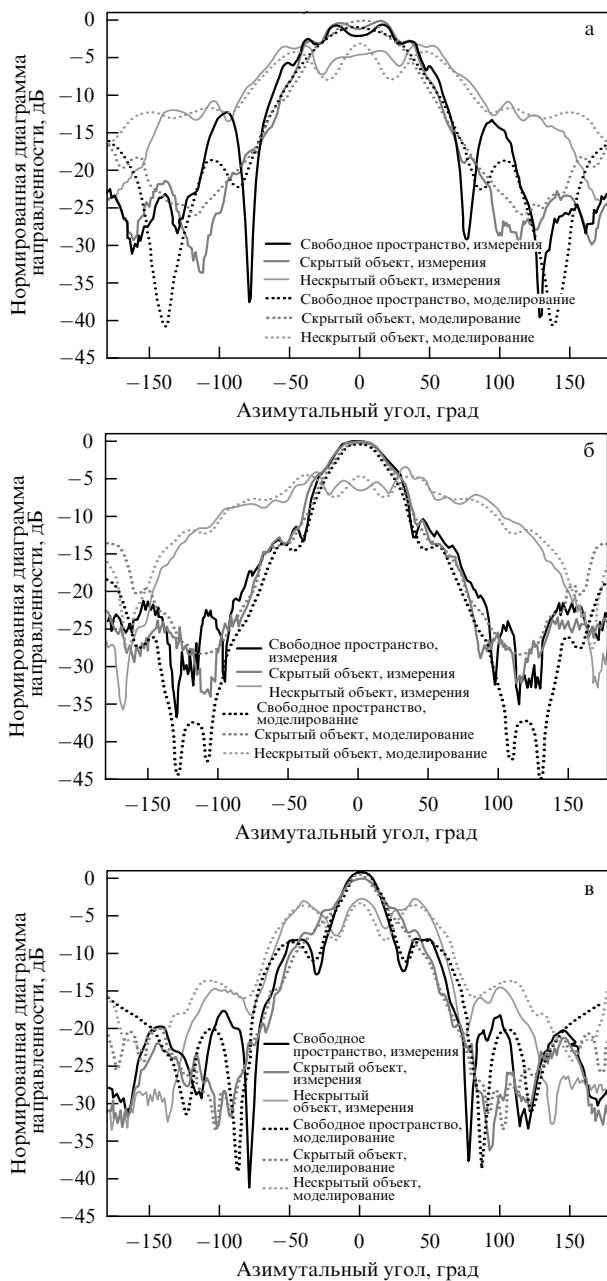


Рис. 31. (В цвете онлайн.) Диаграммы направленности при расстоянии между рупорной антенной и центром маскирующего устройства около 10 см: для частоты (а) 2,5 ГГц, (б) 3,0 ГГц (рабочая частота), (в) 3,5 ГГц [75].

2.2.2. Маскирующее устройство на основе металлических пластин. Маскирующие устройства на основе длинных линий являются достаточно простыми в реализации и обладают широким рабочим диапазоном, что, несомненно, делает их привлекательными для практического применения, однако главный их недостаток состоит в наличии ограничения на геометрию маскируемого объекта. В работах [77, 78] предложен иной способ двумерной маскировки для микроволнового и оптического (инфракрасного) диапазонов частот — маскировка на основе конических металлических пластин (конических слоёв металла). В отличие от маскирующего покрытия на основе длинных линий, маскирующее покрытие на основе таких пластин может скрывать сплошные, без сетки отверстий, объекты.

В работе [79] в качестве маскируемого объекта был выбран металлический цилиндр (медный для микроволнового диапазона частот и серебряный для оптического). Широкополосное электромагнитное маскирующее устройство представляет собой набор кольцевых конических слоёв металла (рис. 32). Эти слои образуют вдоль вертикальной оси z (электрическое поле предполагается поляризованным вдоль этой оси) периодическую структуру из металлических волноводов с высотой, плавно изменяющейся в радиальном направлении от H до h .

Как известно, распространение плоской электромагнитной волны в пространстве не изменится, если на её пути разместить набор параллельных идеально проводящих пластин, ориентированных так, чтобы они были ортогональными вектору электрического поля. В таких волноводах волна ничем не отличается от плоской волны в свободном пространстве. Поскольку наклон конических пластин к горизонтальной плоскости достаточно мал, отражение от системы пластин и рассеяние на ней также невелики. Маскировка объекта осуществляется посредством постепенного сокращения расстояния между металлическими пластинами в каждом эффективном волноводе, образованном парой конических пластин. При этом уменьшается объём волноводной моды и она вытесняется из области, в которой расстояние между пластинами приближается к h . В итоге происходит дифракционное волновое обтекание, аналогичное тому, которое было достигнуто в работе [80]. Однако в данном случае речь идёт о более простой реализации маскирующего устройства, не требующего применения метаматериала с магнитными свойствами, и, кроме того, являющегося значительно более широкополосным.

Первоначально маскирующее устройство на основе металлических пластин было изготовлено для работы на частотах $3,2 \pm 0,1$ ГГц. Размеры данного устройства являлись электрически малыми (диаметр всего маскирующего устройства равнялся примерно длине волны λ , а толщина маскируемого объекта составляла приблизительно $0,3 \lambda$ [77]). В дальнейшем в работе [78] параметры разрабатываемого маскирующего устройства были улучшены и теоретически была достигнута маскировка объекта толщиной около λ на частотах $10,00 \pm 0,25$ ГГц.

В [79] представлена экспериментальная реализация данного маскирующего устройства. Для экспериментального макета маскирующего устройства (рис. 32а) были выбраны следующие геометрические параметры: наружный диаметр устройства $L_1 = 61$ мм, его внутренний диаметр $L_2 = 32$ мм, наружное расстояние между коническими слоями $H = 9,2$ мм, зазор между соседними металлическими пластинами на внутренней границе маскирующего покрытия $h = 6$ мм, диаметр маскируемого объекта (медного цилиндра) $D = 30$ мм. Маскирующее устройство состоит из 20 слоёв (рис. 32б). Высота маскирующего устройства (и скрываемого цилиндра) 184 мм. Эксперимент проводился в свободном пространстве с помощью двух рупорных антенн, одна из которых служила источником электромагнитных волн, а другая — приёмником. При сканировании поля приёмная антенна вращалась вокруг замаскированного объекта (рис. 32б). Показано, что общее рассеяние системой, включающей в себя цилиндр с маскирующим устройством, уменьшается на 70 % по сравнению с рассеянием от того же цилиндра без маскирующего устройства

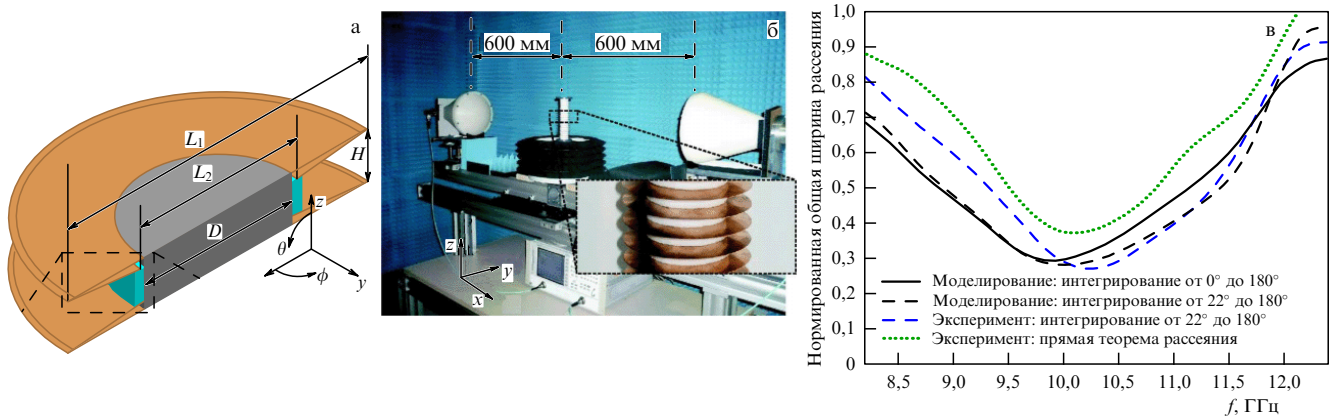


Рис. 32. (а) Геометрическая модель маскирующего устройства в плоскости xy . (б) Фотография экспериментальной установки для измерения рассеяния (на вставке показано увеличенное изображение маскируемого объекта). (в) Результаты эксперимента и численного моделирования по вычислению сечения рассеяния маскируемого объекта, нормированного на сечение рассеяния незамаскированного объекта [79].

(рис. 32в) [79]. В работе [79] также продемонстрировано, что такое маскирующее устройство позволяет сократить рассеяние от системы более чем на 50 % в диапазоне частот ± 20 %.

Маскирующее устройство такого типа, согласно [77], может работать не только в микроволновом, но и в инфракрасном диапазоне, для чего требуется использование специальных технологий, которые были недоступны авторам [77]. На сегодня экспериментальной проверки маскирующего устройства на основе конических металлических пластин, работающего на оптических частотах, не проведено.

2.2.3. Диэлектрическая оптическая маскировка. После многочисленных попыток реализовать близкие к идеальным маскирующие покрытия с помощью замысловатых метаматериалов некоторые исследователи вернулись к рассмотрению неидеальных маскирующих покрытий из природных материалов.

Так, в работе [81] предложена немагнитная маскирующая оболочка на основе обычного изотропного диэлектрика для двумерной маскировки объектов, поперечный размер которых может быть много больше длины волны. Для расчёта необходимого распределения плотности выбранного материала с фиксированной величиной ϵ для значительного (в несколько раз) уменьшения рассеяния замаскированным объектом был успешно применён метод оптимизации топологии (одношаговый метод оптимизации формы и топологии).

В 2013 г. этот способ реализации маскирующего покрытия подтверждён экспериментально [82]. Двумерное покрытие изготовлено из однородного диэлектрика с $\epsilon = 2,45$ с помощью метода стереолитографии и трёхмерной печати. Маскирующее покрытие скрывает объект с нескольких точек обзора, причём диаметр внутренней полости маскирующего покрытия составляет 138 мм, а длина волны равна 30 мм. Получены хорошие результаты для диапазона частот от 9,7 до 10,1 ГГц для ТЕ-поляризации.

Авторы [82] на основании результатов численного моделирования утверждают, что аналогичные результаты должны иметь место и для ТМ-поляризации, однако такие измерения не проводились. Для ТЕ-поляризации на частоте 9,9 ГГц поперечное сечение рассеяния

объектом при наложении маскирующего покрытия уменьшается в четыре раза. Авторы настоящей статьи уверены, что данный метод может быть применён и для оптических частот. Фотография экспериментального образца и результаты исследований приведены на рис. 33.

В [83] представлена альтернативная экспериментальная реализация диэлектрического однонаправленного маскирующего покрытия на основе другого метода оптимизации топологии — многоуровневого метода оптимизации.

В статье [84] рассмотрена возможность применения не однослойного, а многослойного диэлектрического маскирующего покрытия, при этом для выбора оптимальной величины ϵ каждого слоя предложено использовать генетический алгоритм (рис. 34). Теоретически показано, что благодаря такому покрытию толщиной всего $0,015 \lambda$ можно уменьшить сечение рассеяния объекта диаметром $1,5 \lambda$ или 2λ на 50 %. Таким образом, предоставляется возможность значительно уменьшить рассеяние от объекта, не прибегая к метаматериалам.

3. Маскировка, основанная на компенсации рассеяния

Альтернативой маскировке на основе волнового обтекания является маскировка, основанная на принципе компенсации рассеяния. Этот принцип заключается в том, что для подавления рассеяния к данному объекту необходимо добавить другой объект, который создаёт рассеянное поле, такое же по амплитуде, но в противофазе. В результате рассеяние системы будет стремиться к нулю [85–88]. Для оптически малых объектов, излучение которых является дипольным, такой принцип маскировки позволяет достичь невидимости в случае электромагнитных волн с любым типом поляризации, независимо от расположения источника излучения и наблюдателя.

У данного принципа маскировки есть существенное отличие от принципа волнового обтекания: маскируемый объект не изолирован от внешнего поля, и он может "видеть" то, что происходит снаружи, а значит, может служить идеальным датчиком поля.

Интерес к принципу маскировки на основе компенсации рассеяния существенно возрос после появления в

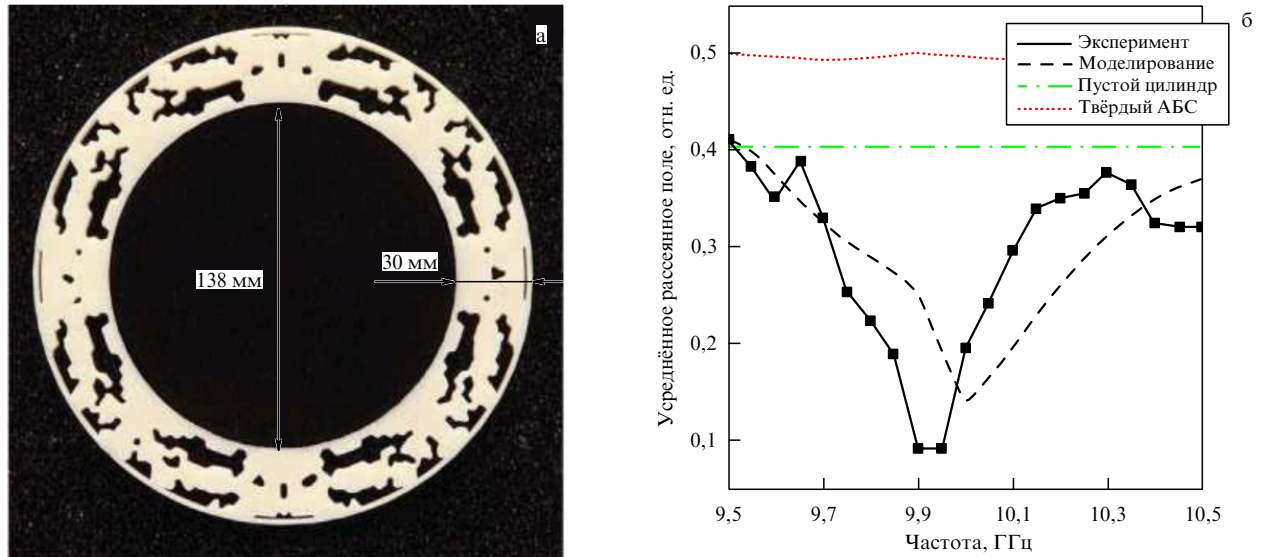


Рис. 33. (а) Фотография прототипа диэлектрического маскирующего покрытия. Внешний диаметр устройства 198 мм, внутренний — 138 мм. (б) Зависимость усреднённого рассеянного поля в зоне Френеля от частоты; АБС — сополимер акрилонитрина, бутадиена и стирола [82].

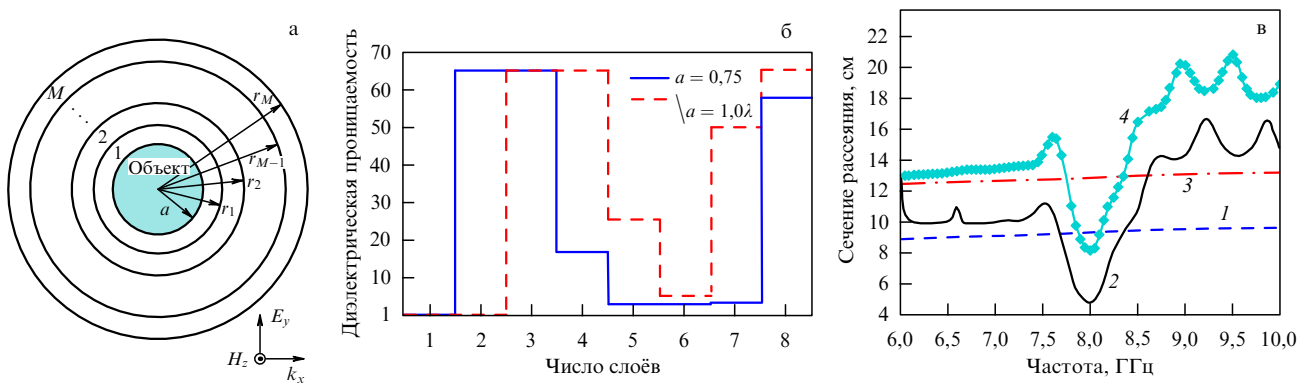


Рис. 34. (а) Схема многослойного диэлектрического маскирующего покрытия. (б) Диэлектрическая проницаемость слоёв, полученная с помощью генетического алгоритма. (в) Сечение рассеяния: 1 — незамаскированный объект ($a = 0,75\lambda$), 2 — замаскированный объект ($a = 0,75\lambda$), 3 — незамаскированный объект ($a = 1,0\lambda$), 4 — замаскированный объект ($a = 1,0\lambda$) [84].

2005 г. работы [89]. В настоящее время существует два способа реализации данного принципа:

- 1) с помощью плазмонных покрытий;
- 2) с помощью структурированных металлических поверхностей — двумерных аналогов метаматериалов, которые называются метаповерхностями.

3.1. Маскировка с помощью плазмонных покрытий

Суть маскировки с помощью плазмонных покрытий состоит в том, что объект помещается в оболочку из плазмонного материала (например, золота или серебра), которая имеет близкую к нулю или отрицательную диэлектрическую (и/или магнитную) проницаемость. Таким образом, дипольный момент оболочки (или её магнитный момент) находится в противофазе по отношению к вектору дипольного момента объекта (рис. 35) [89, 90].

Плазмонная маскировка по сравнению с маскировкой, осуществляемыми согласно другим принципам, обладает следующими преимуществами: устойчивостью к потерям в материале и возможностью взаимодействия маскируемого объекта с падающим излучением [89, 91 –

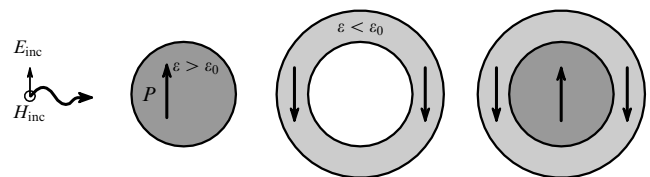


Рис. 35. Принцип маскировки с помощью плазмонных покрытий. Маскировка осуществляется благодаря компенсации поляризации объекта, вызванной взаимодействием с электромагнитной волной с обратной поляризацией, возникающей в плазмонной оболочке [89].

94]. Маскирующие покрытия, основанные на трансформационной оптике, более чувствительны к частотам, потерям в среде и погрешностям, обусловленным границами маскирующего покрытия; кроме того, объект в этом случае является полностью изолированным от падающего поля и не может служить его датчиком. Существенным недостатком этого метода является ограничение на оптический размер объекта.

Теоретическое описание принципа плазмонной маскировки для сферических и цилиндрических объектов по-

дробно рассматривается в работе [43]. В разделах 3.1.1, 3.1.2 мы обсуждаем экспериментальные реализации этого принципа.

3.1.1. Двумерная плазмонная маскировка. Впервые двумерная экспериментальная реализация плазмонной маскировки для микроволнового диапазона частот была представлена в работе [92]. Маскируемый объект представляет собой небольшой стержень (цилиндр) из материала с большой диэлектрической проницаемостью. Этот стержень окружён пластиковой оболочкой с меньшей диэлектрической проницаемостью, причём пространство между ним и оболочкой заполнено ацетоном и металлическими включениями.

Система, описанная выше, помещалась в плоскопараллельный волновод, в котором с помощью ближнепольного сканера измерялось электрическое поле, перпендикулярное плоскости волновода. Измерения проводились для трёх случаев: для падающего излучения без объекта, для незамаскированного объекта (тогда про-

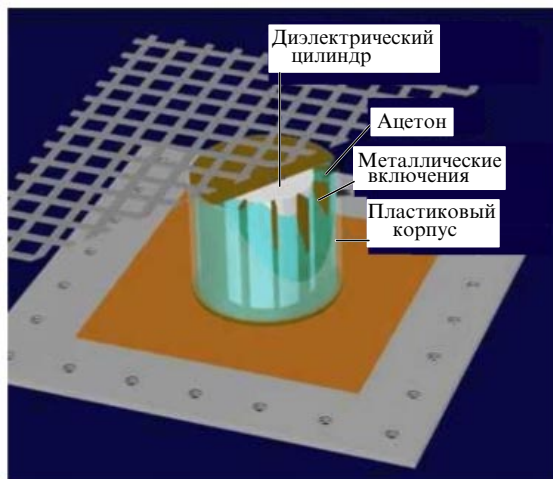


Рис. 36. Схема экспериментальной установки [92].

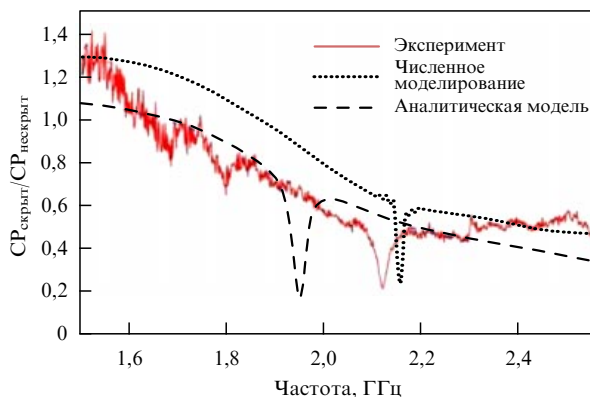


Рис. 37. Зависимость отношения ширины сечения рассеяния объекта с плазмонным маскирующим устройством к ширине сечения рассеяния объекта без маскирующего устройства ($CP_{\text{скрыт}}/CP_{\text{нескрыт}}$) от частоты [92].

странство между объектом и оболочкой заполнялось воздухом) и для объекта с учётом компенсации рассеяния. Затем вычислялись значения рассеяния от объекта (диэлектрический цилиндр) и объекта с плазмонной маскировкой для диапазона частот от 1,6 до 2,4 ГГц.

На рисунке 37 представлено сравнение результатов аналитической модели, численного моделирования и эксперимента. Отметим, что на всех кривых на рис. 37 наблюдается значительное уменьшение ширины сечения рассеяния, близкое к 75%. Очевидным достоинством приведённой реализации маскирующего покрытия является простота его изготовления.

3.1.2. Трёхмерная плазмонная маскировка. Более интересным экспериментальным подтверждением принципа плазмонной маскировки является реализация трёхмерной плазмонной маскировки в свободном пространстве, применимой для любого угла падения излучения в микроволновом диапазоне частот [43, 93]. В эксперименте [93] полый диэлектрический цилиндр небольшой длины покрывался тонкой оболочкой из синтезированного плазмонного метаматериала на основе металлических полосок (рис. 38). При этом эффективная диэлектрическая проницаемость маскирующего покрытия подбиралась таким образом, чтобы максимальное снижение рассеяния от цилиндра наблюдалось на частоте 3 ГГц при нормальном падении ТМ-поляризованной волны. Несмотря на цилиндрическую форму объекта, и покрытия, заметное снижение рассеяния происходит не только для нормального падения, но и для всех углов падения волны и для обеих (ТЕ и ТМ) её поляризаций. Оказывается, что и объект, и маскирующее покрытие, несмотря на их не очень малые по сравнению с длиной волны размеры, на рабочей частоте рассеивают примерно так же, как электрические диполи. Их дипольные поляризуемости слабо зависят от направления падения волны и её поляризации, как это имеет место для точечных диполей. В итоге можно добиться, чтобы дипольные моменты объекта и маскирующего покрытия приблизительно компенсировали друг друга.

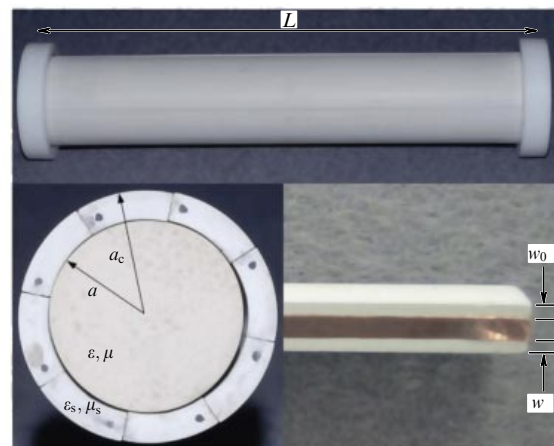


Рис. 38. Экспериментальный образец. В верхней части рисунка показано собранное маскирующее покрытие в тестовом цилиндре с заглушками на концах, длина всей структуры $L = 18$ см. В нижней левой части рисунка — маскирующее покрытие в поперечном разрезе, где $a = 1,25$ см, $a_c = 1,3a$. В нижней правой части рисунка — край фрагмента оболочки с медной лентой, используемой для формирования метаматериала [93].

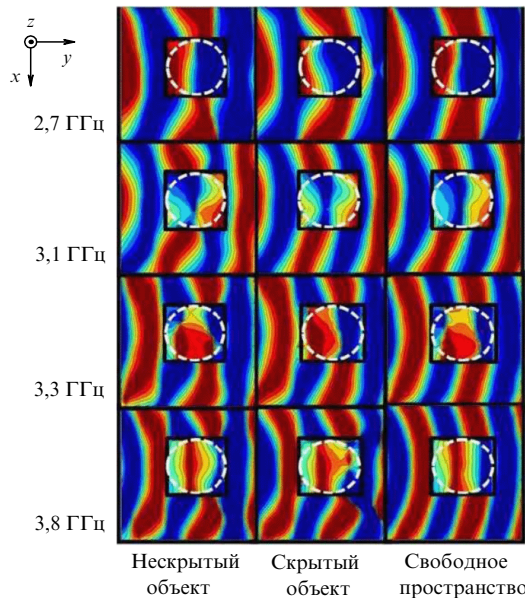


Рис. 39. Ближнепольное сканирование электрического поля вокруг исследуемого объекта и над ним. Первый и четвёртый ряды соответствуют частотам, на которых, как и ожидалось, маскировка работает плохо. Второй ряд показывает отсутствие рассеяния ближнего поля на указанной частоте. Третий ряд соответствует верхнему краю зоны частот, при котором ещё наблюдается эффект маскировки [93].

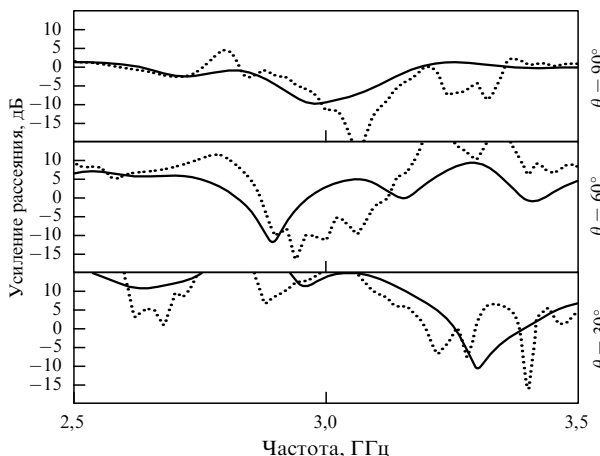


Рис. 40. Коэффициент моностатического усиления рассеяния замаскированного цилиндра по отношению к аналогичному коэффициенту незамаскированного цилиндра для различных углов падения излучения. Численное моделирование — пунктирная кривая, измерения — сплошная кривая [93].

Для экспериментального подтверждения эффективности маскирующего покрытия были проведены две независимые последовательности измерений замаскированного объекта, которые сравнивались с аналогичными измерениями для объекта без покрытия и для излучения в свободном пространстве без объекта. На рисунке 39 представлены результаты измерений ближнего поля, показывающие распределение электрического поля вдоль осям маскируемого цилиндра.

Далее было проведено измерение бистатического и моностатического сечений рассеяния для возбуждения в дальнем поле, результаты которого отражены на рис. 40, 41. Результаты эксперимента подтверждают, что снижение рассеяния мало чувствительно к углу падения из-

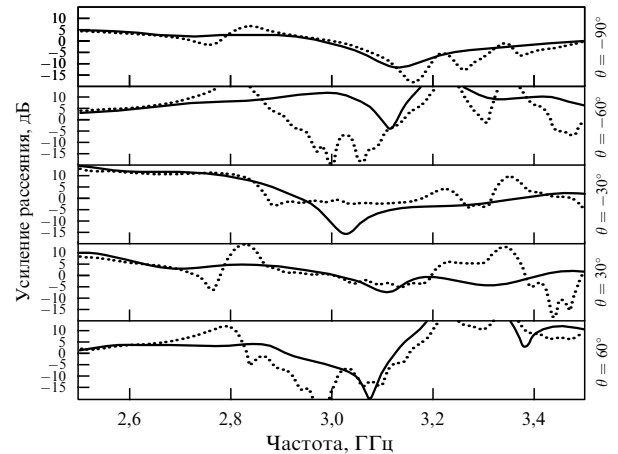


Рис. 41. Бистатическое усиление рассеяния для различных углов падения излучения. Результаты численного моделирования показаны пунктирной кривой, результаты измерения — сплошной кривой [93].

лучения и позиции наблюдателя, и, кроме того, оно может быть получено в широкой полосе частот.

3.2. Маскировка с помощью структурированных метаповерхностей

Альтернативной техникой создания маскирующих покрытий на основе компенсации рассеяния является разработка маскирующих покрытий из структурированных металлических поверхностей, иначе метаповерхностей (такое маскирующее покрытие в англоязычной литературе называется "mantle cloak"). В этом случае предлагается подавлять рассеяние от объекта не посредством плазменных покрытий, а с помощью поверхностных токов, наводимых на специально синтезированной метаповерхности. В результате поверхностный ток, наведённый падающим излучением, создаёт рассеяние в противофазе по отношению к рассеянию объекта и, соответственно, приводит к деструктивной интерференции. Для управления рассеянием от маскирующего покрытия достаточно создать метаповерхности с заданным распределением поверхностного импеданса.

Как показано в [43], синтезирование поверхностного импеданса позволяет восстановить распределение падающего электромагнитного поля даже вблизи объекта. Необходимый поверхностный импеданс может быть получен с помощью не только метаповерхностей (когда структурные элементы имеют оптически малые размеры), но и более изученных (для микроволновых приложений) частотно-селективных поверхностей [95]. Как известно, основные трудности, с которыми сталкиваются разработчики метаматериала, — это узкий рабочий диапазон частот, обусловленный резонансной природой метаатомов, высокие потери и необходимая высокая точность изготовления, которую особенно трудно обеспечить для объёмных метаматериалов. Маскирующее покрытие на основе метаповерхностей может быть достаточно широкополосным, метаповерхность значительно проще изготовить, чем объёмный метаматериал, и, наконец, получение необходимого поверхностного импеданса не обязательно требует резонанса структурных элементов.

В работах [96–99] теоретически показано, что с помощью однослойных структур (метаповерхностей или

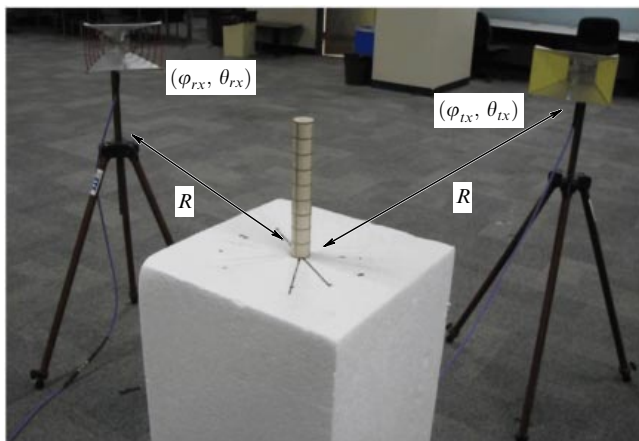


Рис. 42. Экспериментальная установка для измерений в дальнем поле. Передатчик и приёмник расположены на расстоянии $R = 17,5\lambda$ от маскируемого объекта [105].

частотно-селективных поверхностей) можно достичь значительного уменьшения рассеяния для любых углов падения волны и любой её поляризации. Увеличение ширины частотной полосы маскирующего покрытия может быть получено за счёт достаточно тонкой структуры самой метаповерхности [100–102]. Маскировка с помощью структурированных металлических поверхностей может применяться как для диэлектрических, так и для металлических объектов. Однако для маскировки диэлектрических объектов такие маскирующие покрытия работают лучше.

Для микроволнового диапазона маскирующее покрытие может быть создано на основе металлических решёток из элементов различных форм: иерусалимских крестов, наборов конечных металлических полосок, простых крестов и др. [95]. Для терагерцевого и инфракрасного диапазонов частот можно использовать монослой допированного графена [103]. Для создания метаповерхностей, работающих в диапазоне видимого света, можно применять теорию оптических наноцепей [104].

3.2.1. Экспериментальная реализация. В работах [105, 106] представлена экспериментальная реализация маскировки с помощью структурированных металлических поверхностей в радиочастотном диапазоне. Маскируемый объект — 18-сантиметровый цилиндрический стержень с диаметром 24,9 мм, маскирующее покрытие представляет собой "метаэкран" — слой гибкой поликарбонатной плёнки толщиной 100 мкм, который покрыт сеткой из медной ленты толщиной 66 мкм.

В дальнем поле эксперимент проводился для замаскированного и незамаскированного объектов. На равном расстоянии от объекта располагались передающая и принимающая рупорные антенны, которые могли перемещаться в азимутальной и вертикальной плоскостях, как показано на рис. 42. При наличии маскирующего покрытия наблюдалось значительное подавление рассеяния в достаточно широком диапазоне частот, от 1 до 5 ГГц, при разных углах падения излучения. Также было проведено сканирование ближнего поля (рис. 43). Для сканирования пространственного распределения ближнего поля вокруг маскируемого объекта использовалась трёхмерная ближнепольная система. Были рассмотрены три варианта: без объекта, с незамаскированным стерж-

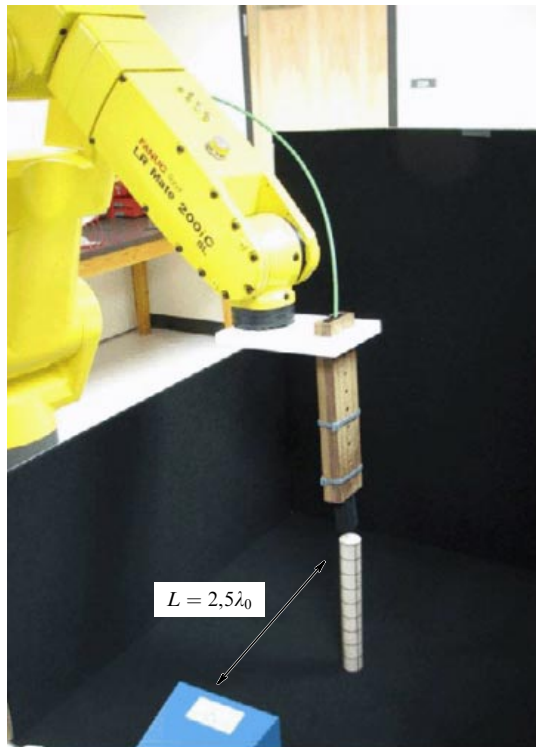


Рис. 43. Экспериментальная установка для измерений в ближнем поле [105].

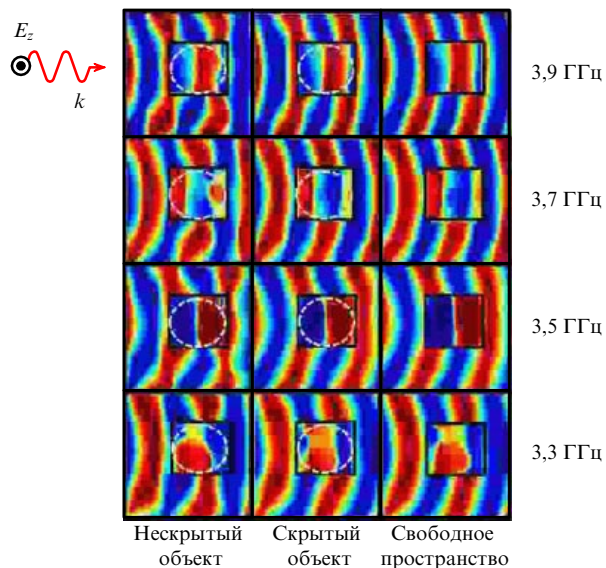


Рис. 44. Распределение электрического поля в азимутальной плоскости для разных частот [105].

нем и замаскированным стержнем. Как видно из рис. 44, наиболее сильное подавление рассеяния зарегистрировано в диапазоне частот от 3,3 до 3,9 ГГц, а наилучший результат получен на частоте 3,6 ГГц.

4. Другие принципы маскировки

4.1. Маскирующее устройство на основе цепочек сосредоточенных LC-элементов

В 2009 г. авторы [107] экспериментально продемонстрировали принципиальную возможность создания маски-

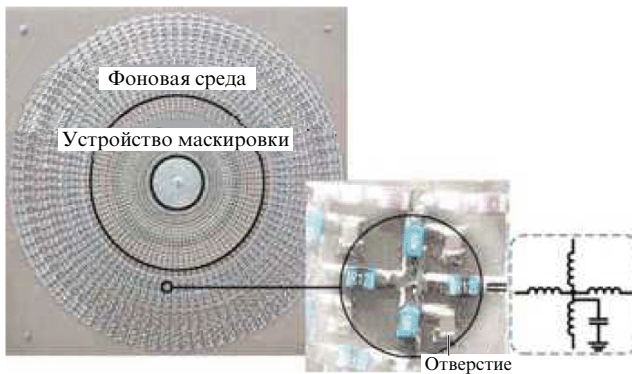


Рис. 45. Фотография двумерного экспериментального маскирующего устройства на основе цепочек сосредоточенных LC-элементов [107].

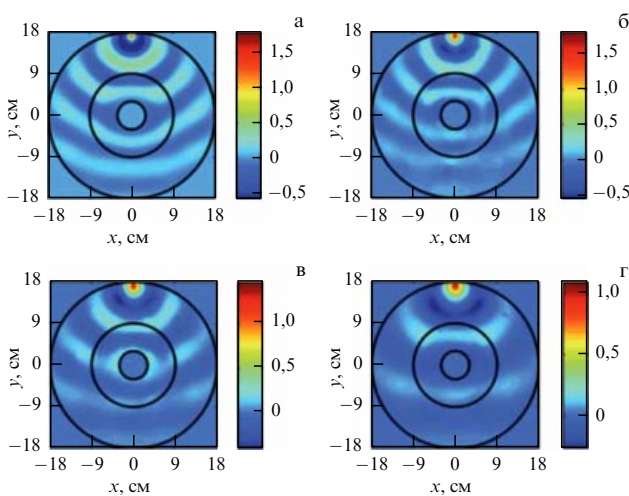


Рис. 46. (В цвете онлайн.) Распределение напряжения в маскирующем устройстве: (а) результат моделирования, (б) экспериментальные измерения на частоте 40,1 МГц. Экспериментально полученные картины распределения напряжения на частотах (в) 32 МГц и (г) 24 МГц [107].

рующего устройства на основе цепочек сосредоточенных LC-элементов. Фотография маскирующего устройства, в котором расположенные вдоль внутренней границы замкнутые на землю индуктивности имитировали идеальный проводящий цилиндр — скрываемый объект, представлена на рис. 45. Экспериментальные результаты — распределения напряжения в образце для диапазона высоких радиочастот — приведены на рис. 46.

4.2. Иллюзионное устройство для радаров

Авторы [108] представили новую концепцию маскировки на основе иллюзионного устройства для радара, которое может преобразовывать электромагнитное изображение цели, принимаемое радаром, в изображение другого объекта и тем самым вводить противника в заблуждение (рис. 47). Спроектировать такое устройство можно, опираясь на трансформационную оптику [32]. В реальном пространстве находится металлический цилиндр, окружённый маскирующим покрытием ("иллюзионным облаком"), а в виртуальном пространстве — цилиндр из диэлектрика, окружённый вакуумом. Экспериментальное устройство, сконструированное с помощью набора РКР, составляющих неоднородную метаматериальную

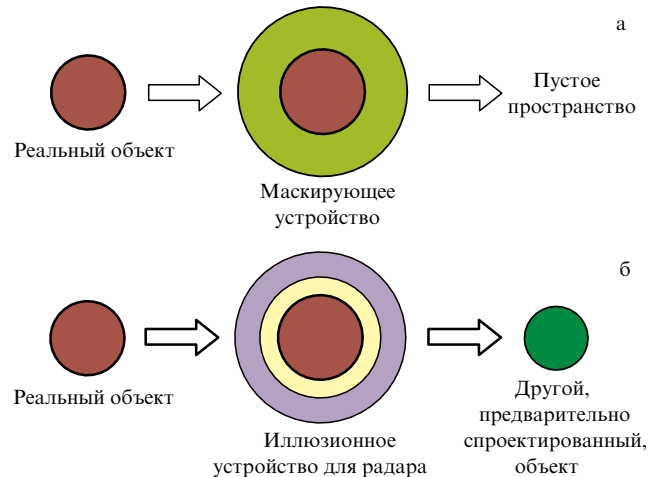


Рис. 47. Иллюстрация действия иллюзионного устройства для радара. (а) Металлический предмет заключён в идеальное маскирующее покрытие, на радиолокационном изображении ничего не будет видно. (б) Металлический предмет заключён в иллюзионное устройство, на радиолокационном изображении будет виден виртуальный диэлектрический объект [108].

структуру, теоретически позволяет обмануть радар: изображение металлического цилиндра сменяется изображением диэлектрического цилиндра, причём с другими размерами.

Измерения с иллюзионным устройством для радара проводились на рабочей частоте 9,8 ГГц в плоскопараллельном волноводе. Из экспериментальных результатов сканирования распределения электрического поля, показанных на рис. 48, видно, что желаемый эффект иллюзии был достигнут.

Продолжением данной концепции иллюзионного устройства для радара служит так называемое призрачное маскирующее устройство (ghost cloak), которое совсем недавно было предложено в работе [109]. Главным преимуществом этого устройства является его способность качественно изменить рассеяние от объекта, создавая его фантомные образы.

4.3. Активная маскировка

В рассмотренных в разделах 1–3, 4.1, 4.2 примерах для маскировки объекта предлагалось использовать материалы или поверхности с заданными характеристиками. Однако существует и другой принцип маскировки — *активная маскировка*. При таком способе маскировки скрываемый объект покрывается оболочкой, на одной стороне которой находятся датчики, регистрирующие падающее излучение, а на другой стороне — излучатели, принимающие сигнал от датчиков и преобразующие его в необходимый для компенсации рассеяния объектом так, чтобы объект был невидимым (рис. 49).

Таким образом, оказывается возможным скрыть любой объект, если известны его электромагнитные свойства, корректируя сигнал источников маскирующего покрытия. Первоначально такой способ маскировки был предложен для акустических волн [26, 110], так как для активной маскировки необходимо знать распределение поля в пространстве, чтобы источники маскирующего покрытия могли компенсировать рассеяние. В случае, когда волны распространяются медленно, внутри маскирующего покрытия информацию можно передавать с

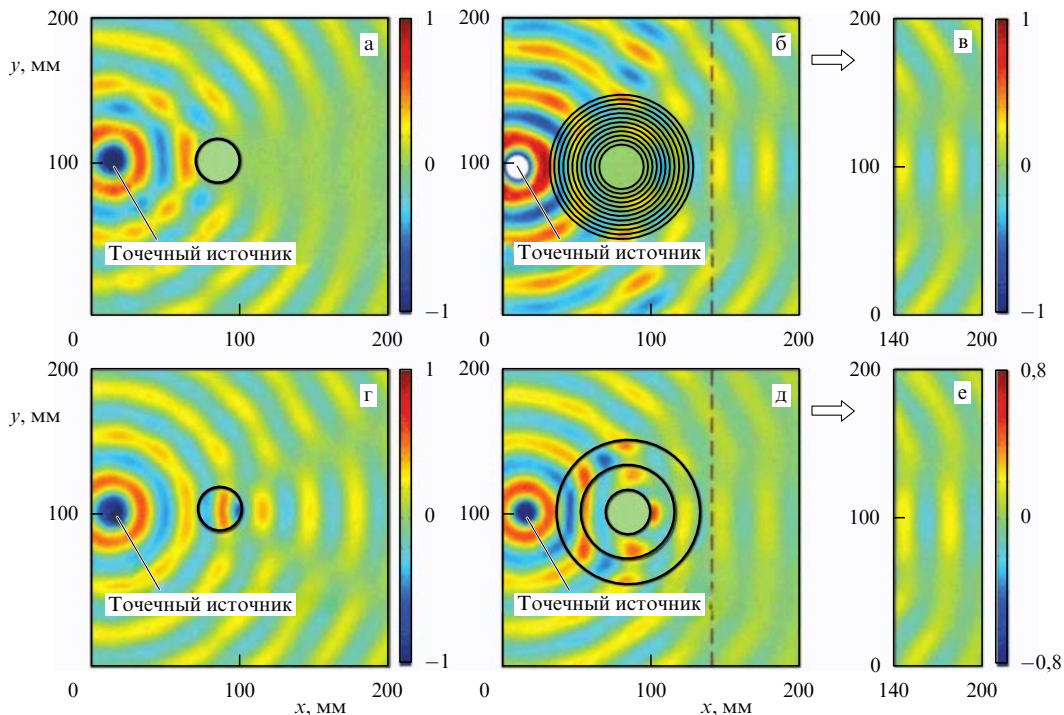


Рис. 48. (В цвете онлайн.) Результаты работы иллюзионного устройства для радара: (а) эксперимент с медным цилиндром; (б) моделирование при наличии медного цилиндра и маскирующего устройства; (в) результаты моделирования, отражающие распределение электрического поля позади устройства; (г) эксперимент с цилиндром из диэлектрика; (д) эксперимент с медным цилиндром и маскирующим устройством; (е) эксперимент, показывающий распределение электрического поля позади устройства [108].

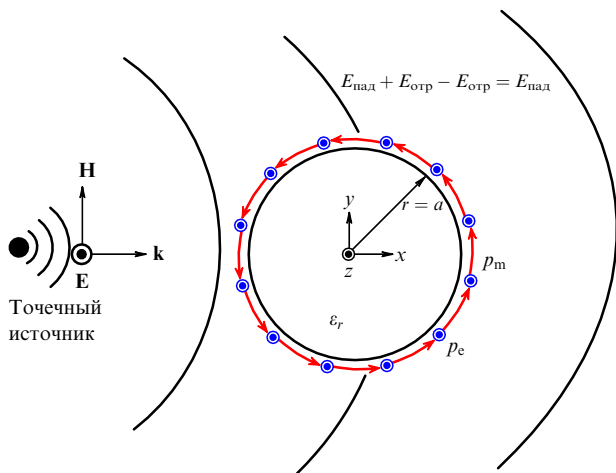


Рис. 49. Принцип активной маскировки [112].

большой скоростью, оставляя время для расчёта требуемого сигнала для каждого источника, в результате требуемый компенсационный сигнал будет появляться вовремя и объект невозможно будет обнаружить. В случае электромагнитных волн в вакууме активная маскировка может быть применена, если известны параметры падающего излучения и свойства рассеяния объекта, поскольку тогда можно заранее определить характеристики излучения, создаваемого источниками маскирующего покрытия [26].

Возможность реализации активной маскировки в случае, когда ничего не известно о падающем поле и его необходимо анализировать в реальном времени для расчёта компенсирующего излучения, также рассмотрена в [26]. Однако такая реализация представляется

сложно выполнимой, так как время расчёта нужного распределения поля должно быть меньше, чем время распространения электромагнитной волны в маскирующем покрытии. С этим фактом связано то, что до 2013 г. не было реализовано маскирующего покрытия на основе принципа активной маскировки.

В ноябре 2013 г. практически одновременно появились две работы разных групп, демонстрирующие экспериментальные реализации активных маскирующих покрытий для микроволнового диапазона частот [111, 112]. В обоих случаях источник падающего поля был известен и было получено хорошее соответствие результатов эксперимента и численного моделирования. Кроме того, было продемонстрировано, что данная концепция применима также для создания иллюзий.

4.4. Оптические иллюзии

С давних времён фокусники с помощью различных оптических иллюзий вводили зрителей в заблуждение своими трюками. Секрет этих трюков довольно прост: нужно всего лишь собрать оптическую установку из обычных зеркал или линз таким образом, чтобы лучи отражались под правильным углом. По тому же принципу работают "мнимый рентгеновский аппарат" (рис. 50), появившийся в XX в., и перископ, использующийся на подводных лодках [113]. Эффект оптической иллюзии (или эффект неверного представления действительности) является некой альтернативой невидимости. Более того, в настоящее время существует ряд работ, посвящённых именно оптическим иллюзиям, которые на первый взгляд выглядят как эффект невидимости.

Один из примеров оптической иллюзии представлен группой японских исследователей под руководством

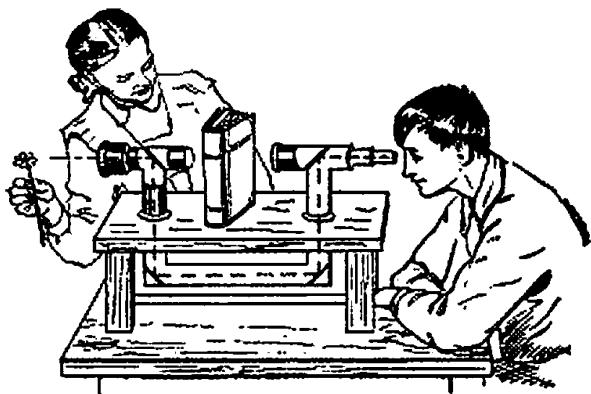


Рис. 50. Мнимый рентгеновский аппарат [113].



Рис. 51. "Плащ-невидимка", который создаёт оптическую иллюзию прозрачности. © Tachi Laboratory Graduate School of Media Design, Keio University.

С. Тачи [114]. Учёными был разработан так называемый прозрачный плащ-невидимка, ткань которого на каждой стороне воспроизводит изображение объектов, находящихся по другую сторону плаща (рис. 51). Таким образом, если смотреть на человека, одетого в такой плащ, спереди или сзади, то создаётся оптическая иллюзия, что человек прозрачен.

Секрет работы плаща-невидимки заключается в том, что он состоит из стеклянных бусин со встроенными мини-камерами. Камеры снимают всё, что происходит спереди, и затем передают изображение на другую сторону плаща. И напротив, то, что происходит за спиной человека, отражается в передней части плаща. Конечно, данная технология несовершенна, и она нуждается в доработке, но, по словам исследователей, она будет полезна при конструировании самолётов с прозрачными кабинами и в автомобилестроении.

Поскольку зрение большинства живых существ, в том числе человека, не чувствительно к поляризации и фазе света, последние можно не учитывать при создании маскирующего устройства, что упрощает его реализацию. Это допущение и использовали авторы работы [115]. В предложенных экспериментах маскирующее устройство представляет собой набор стеклянных линз с показателем преломления $n = 1,78$, склеенных определённым образом. В первом эксперименте (рис. 52) гексагональное маскирующее устройство помещалось в аквариум с водой, а в качестве маскируемого объекта была

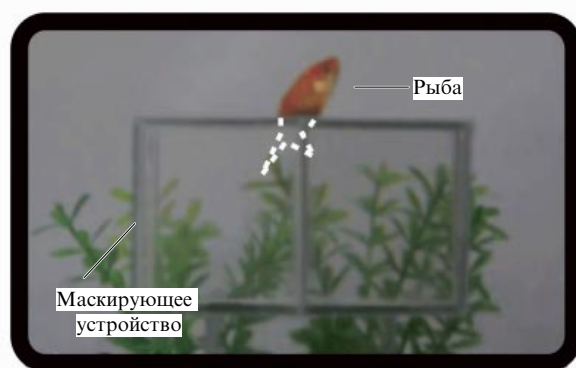
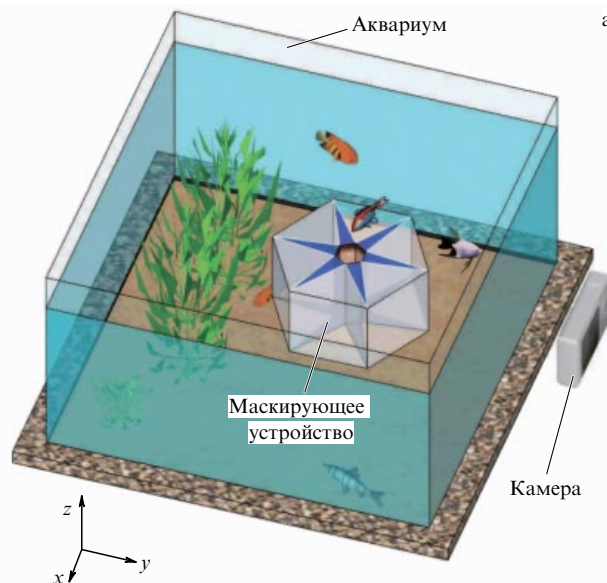


Рис. 52. Экспериментальное наблюдение рыбки, скрывающейся в аквариуме [115].

выбрана золотая рыбка. Попадая в зону действия маскирующего устройства, рыбка становится невидимой для человеческого глаза, а всё, что находится за ней, продолжает оставаться в поле зрения. Само маскирующее устройство при этом немного заметно для глаза из-за остатков клея на гранях линз, показатель преломления которого несколько отличается от показателя преломления воды. Такое маскирующее устройство работает для шести различных углов обзора.

Во втором эксперименте (рис. 53) в качестве маскируемого объекта был выбран кот, а гексагональная установка заменена четырёхугольной. Система линз помещается перед экраном, на который проецируется видео с летающей бабочкой, и когда кот оказывается в маскирующем устройстве, он становится невидимым, при этом бабочка по-прежнему заметна. Такое маскирующее устройство может работать для четырёх направлений распространения света, хотя в данном эксперименте оно было однонаправленным.

Ещё один пример оптической иллюзии — эффект возникновения миража в пустыне вследствие тропосферной рефракции (искривления луча света в неравномерно нагретом воздухе). При этом человек может видеть водоём там, где его нет, так как объекты из-за тропосферной рефракции кажутся находящимися ниже уровня

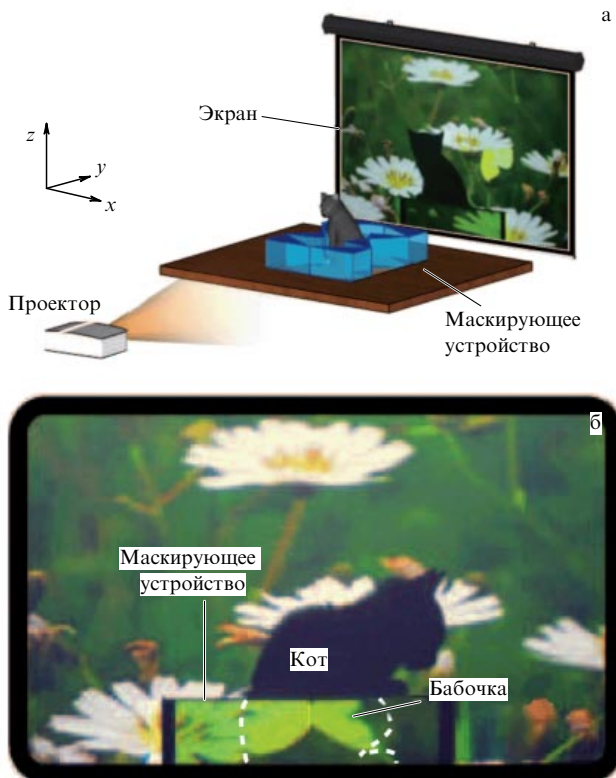


Рис. 53. Экспериментальное наблюдение кота, скрывающегося за экраном в траве [115].

горизонта и опрокинутыми. Это воспринимается как отражение объектов в воде. С другой стороны, свет, рассеянный объектом в сторону наблюдателя, может из-за тропосферной рефракции обогнуть последнего, и объект, находящийся в пределах прямой видимости, окажется невидимым.

Аналогичный тропосферной рефракции принцип маскировки основан на эффекте фототермального отклонения светового луча в композитных средах. Этот принцип экспериментально проверен в работе [116]. Трёхмерный массив из углеродных нанотрубок благодаря своей низкой теплоёмкости и высокой способности теплопередачи обеспечивает большую частоту модуляции температуры, тем самым вызывая резкое пространственное изменение градиента показателя преломления такого метаматериала. В представленном на рис. 54 эксперименте массив нанотрубок был помещён в жидкость, а скрываемый объект (надпись "Маскирующее покрытие") — на боковую сторону стеклянного контейнера. При нагреве метаматериала из нанотрубок, которое осуществлялось резистивным способом, и надпись, и сами трубки становились практически невидимыми, причём время реакции массива на включение/выключение нагревания не превышало нескольких секунд. Управлять показателем преломления массива нанотрубок можно также с помощью электромагнитных импульсов. Создаваемый таким образом градиент показателя преломления позволит отклонять световой луч в очень широком диапазоне длин волн — от ультрафиолетового до инфракрасного.

Маскирующие устройства, работающие на основе известных законов геометрической оптики, продемонстрированы авторами [117]. Устройства позволяют

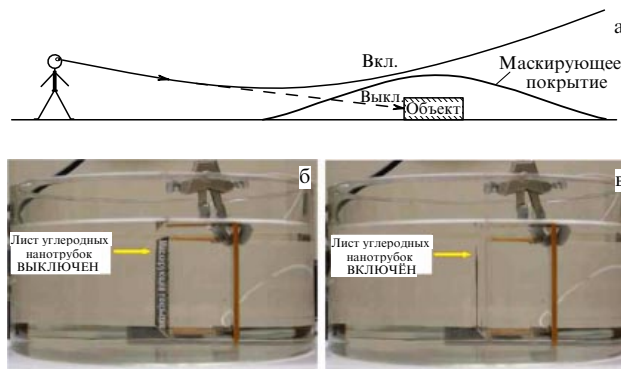


Рис. 54. (а) Схематичное представление маскирующей системы. (б, в) Эффект миража под водой [116].

скрывать любые объекты, размеры которых не превышают 10^6 мм^3 ; самый большой объём, который удалось скрыть, составляет 10^8 мм^3 . Всего было разработано три таких маскирующих устройства. Первое, основанное на законе Снеллиуса, состоит из двух L-образных резервуаров, наполненных водой для того, чтобы свет преломлялся вокруг маскируемой области. Первая линза создаёт параллельный пучок света, так чтобы лучи огибали маскируемую область, а вторая линза впоследствии сводит эти лучи. Таким образом, любой объект, помещённый в пространство между резервуарами, оказывается скрытым от человеческого глаза (в работе [117] был успешно скрыт игрушечный вертолёт). Главный недостаток состоит в том, что будет скрыта только та часть объекта, которая доходит до уровня воды. Выше этого уровня уже нет искусственного преломления света, и верхняя часть объекта будет просматриваться. Второе устройство, представленное на рис. 55а, состоит из линз Френеля, которые направляют свет так, чтобы он огибал маскируемую область и не испытывал краевого эффекта, как в первом случае. Аналогичным образом в третьем случае с помощью зеркал может быть достигнут тот же эффект направления света вокруг скрываемой области (рис. 56). Используется система из четырёх зеркал: две пары зеркал, расположенных под прямым углом. Одно зеркало отражает свет от маскируемой области, а остальные три выводят свет из неё. Бесспорным преимуществом всех представленных устройств являются их способность скрывать трёхмерные объекты достаточно большого размера, простота изготовления и возможность работы в оптическом диапазоне.

Разумеется, все эти оптические иллюзии не подпадают под определение невидимости. Помимо обнаружения человеческим глазом существует возможность обнаружения объекта посредством специальных измерений. Рассеянные поля могут быть обнаружены также с помощью фазовых (интерференционных) измерений, и все оптические иллюзии невидимости могут быть "разоблачены" посредством таких измерений. Мы комментируем данные работы именно для того, чтобы подчеркнуть разницу между иллюзией невидимости и собственно оптической невидимостью, хотя бы и неидеальной.

Следует упомянуть ещё один принцип маскировки, который относится именно к невидимости, но не получил широкого развития и экспериментального подтверждения, — принцип внешней маскировки. Согласно этому

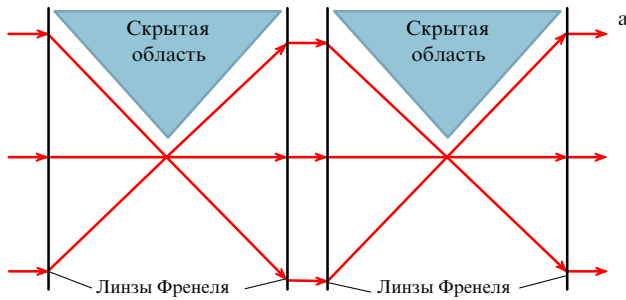


Рис. 55. Маскировка с линзами. (а) Схема установки: два комплекта линз Френеля, разнесённых на удвоенное фокусное расстояние для того, чтобы изображение не переворачивалось. Расстояние между парами линз может быть сколь угодно малым. В реальном эксперименте они были смонтированы вместе так, как если бы это была одна линза. (б) Изображение вдоль оптической оси: на месте хвоста вертолёта появляется грузовик. Фотография сделана с 21-кратным увеличением на расстоянии 6,4 мм от первой линзы [117].

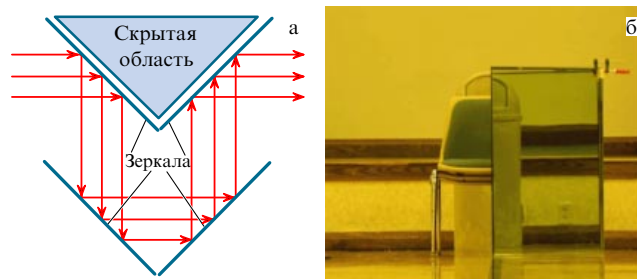


Рис. 56. Маскировка с зеркалами. (а) Схема установки. (б) Экспериментальное подтверждение: скрыта часть стула, находящаяся между зеркалами, а на её месте появился мусорный контейнер [117].

принципу существует некий объект, создающий вокруг себя "зону невидимости", попадая в которую, другие объекты тоже становятся невидимыми [27].

5. Ограничения, накладываемые на маскирующие покрытия

Существуют принципиальные ограничения на работу маскирующих покрытий, основанных как на явлении волнового обтекания, так и на принципе компенсации рассеяния.

Первое ограничение связано со *сверхсветовым распространением света*. Электромагнитные волны, распространяющиеся через маскирующее покрытие, как показано на рис. 1а, проходят более длинный путь, чем путь, который бы они прошли, распространяясь в пустом пространстве. Для того чтобы оптическая длина пути луча внутри маскирующего покрытия, определяемая как $\int n dl$, была такой же, как у лучей в вакууме (это

необходимо для восстановления волнового фронта за объектом), скорость распространения электромагнитной волны в маскирующем покрытии должна быть больше скорости света в вакууме c . Фазовая скорость волны может превышать скорость c , если показатель преломления среды маскирующего покрытия меньше единицы. Но, во-первых, такие среды трудно реализовать в виде твёрдой оболочки. Во-вторых, скорость распространения электромагнитной энергии, так же как и групповая скорость импульсного сигнала, не может превышать величину c . Поэтому маскировка объекта покрытием, выполненным из среды с показателем преломления меньше единицы, на практике не работает.

Отметим, что подобное ограничение отсутствует для акустических волн, т.е. проблема акустической маскировки решается проще. Для электромагнитной, в том числе визуальной, маскировки это ограничение оказывается непринципиальным, только если маскируемый объект находится в среде с большим показателем преломления. Тогда маскирующее покрытие может быть выполнено из менее оптически плотной среды. Однако для большинства практических применений интересна задача маскировки объекта именно в воздухе, где скорость света фактически равна c . Для таких маскирующих покрытий предлагают использовать усиливающие среды — среды с инверсией заселённости энергетических уровней [50], а также структуры, основанные на неевклидовой трансформационной оптике [118]. В обоих этих случаях геометро-оптическая картина сверхсветового обтекания, показанная на рис. 1а, не является вполне подходящей. Восстановление волнового фронта за объектом происходит благодаря специально синтезированной дифракции. Оба этих подхода, однако, очень трудно реализовать экспериментально. Так, например, маскирующие покрытия на основе неевклидовой трансформационной оптики должны быть изготовлены из материала с достаточно большим ϵ (порядка 1000), причём чем больше область мы хотим скрыть, тем более высокое значение ϵ требуется [118], что крайне сложно осуществить на практике.

Строго говоря, реализация идеи дифракционного восстановления волнового фронта за объектом не обязательно требует неевклидовой геометрии. Так, в 2012 г. в работе [80] экспериментально реализована двумерная оптическая маскировка (т.е. маскировка цилиндрических объектов при условии, что электромагнитные волны распространяются перпендикулярно оси цилиндра). Маскирующее покрытие представляло собой цилиндрическую оболочку из анизотропного метаматериала со свойствами магнетодиэлектрика. Компоненты тензора диэлектрической проницаемости метаматериала изменялись от 1 на внешней поверхности оболочки до 40 на внутренней, а компоненты тензора магнитной проницаемости — от 1 на её внешней поверхности до 0,18 на внутренней. Хотя в геометро-оптическом приближении лучи должны распространяться внутри оболочки со скоростью, большей, чем c , и волновой фронт в прошедшем поле должен был бы разрушиться, на самом деле подход геометрической оптики не работает, и в прошедшем поле наблюдается восстановление волнового фронта. Этот эффект возникает благодаря правильному выбору не только радиальной зависимости материальных параметров метаматериала, но и толщины метаматериальной оболочки, которая определяет режим диф-

рации. Отметим, что данный режим является резонансным, так что маскировка внутреннего цилиндра в работе [80] достигнута в довольно узкой полосе частот.

Ещё одна проблема при экспериментальной реализации связана с *правильным расчётом эффективных материальных параметров метаматериала*, из которого делается маскирующее покрытие. Точный численный расчёт маскирующего покрытия из метаматериала, который содержит огромное количество метаатомов, возможен в лучшем случае однократно, т.е. для одного набора параметров массива частиц. Даже однократный точный расчёт требует огромных вычислительных ресурсов. Поэтому оптимизация маскирующего покрытия проводится в рамках приближения эффективной среды, т.е. метаматериал, из которого состоит покрытие, считают сплошной средой и описывают в терминах диэлектрической и магнитной проницаемостей. Эта аналитическая модель метаматериала, называемая гомогенизационной моделью, имеет ограниченную область применимости.

К сожалению, ограничения применимости известных гомогенизационных моделей требуют, чтобы эффективная среда была почти однородной, т.е. расстояния между частицами метаматериала, их размеры и форма мало изменялись вдоль любого направления. Однако при создании маскирующего покрытия требуется вариация диэлектрической и магнитной проницаемостей среды, существенная на субволновых масштабах. Иными словами, в отличие от обычных метаматериалов, массивы частиц, реализующие маскирующее покрытие, должны быть аперидическими с заданными изменениями межчастичных расстояний, а иногда и геометрии частиц. Поэтому масштабы, на которых должны изменяться ϵ и μ эффективной среды, оказываются сравнимыми с расстояниями между частицами, т.е. используемая при проектировании маскирующего покрытия гомогенизационная теория является заведомо не вполне адекватной. Неадекватность рабочей модели превращает разработку маскирующего покрытия в своего рода искусство. Хотя синтезированное с помощью гомогенизационной модели маскирующее покрытие из реальных искусственных частиц обязательно испытывается точными численными симуляциями, плохая обусловленность самой модели синтеза маскирующего покрытия неизбежно препятствует успеху такой разработки. В этом мы видим главную причину того, почему экспериментальные реализации маскирующих покрытий, несмотря на значительное финансирование этих работ, заметно отстают от теории, особенно в оптическом диапазоне частот.

6. Заключение

В статье представлен обзор экспериментальных реализаций маскирующих покрытий, которые позволяют в той или иной степени достичь эффекта оптической (электромагнитной) невидимости объектов. Подробно описаны два наиболее распространённых принципа: волнового обтекания и компенсации рассеяния. У каждого метода оптической (электромагнитной) маскировки имеются свои достоинства и недостатки, с учётом которых можно выбирать наиболее подходящий метод в зависимости от конкретного приложения. Так, маскировка на основе волнового обтекания теоретически позволяет скрывать объекты любой формы и достаточно большого размера по отношению к рабочей длине волны.

Однако такие устройства в большинстве случаев узкополосны, очень чувствительны к оптическим потерям и точности изготовления элементов. Остальные случаи широкополосных и довольно устойчивых маскирующих покрытий обеспечивают только двумерную маскировку либо маскировку под "прозрачным ковром", при которой само маскирующее покрытие является видимым.

Устройства маскировки на основе компенсации рассеяния, напротив, получаются более устойчивыми к точности изготовления структуры и значительно более широкополосными, однако размеры скрываемого объекта не могут превышать длины волны.

Максимальный размер объекта, который удалось экспериментально скрыть от электромагнитных полей методом волнового обтекания, в настоящее время составляет шесть длин волн [82]. Идеальной невидимости при этом достигнуть не удалось. Однако надо отметить, что исследователи и разработчики значительно продвинулись в этом направлении по отношению к первой реализации маскирующего покрытия в 2006 г., по крайней мере в том, что касается микроволнового частотного диапазона.

Авторы благодарят Н.Н. Розанова и Ю.С. Кившаря за полезные обсуждения. Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (грант 074-U01, договор 11.G34.31.0020), Российским фондом фундаментальных исследований и фондом "Династия".

Список литературы

- Jacobs J *English Fairy Tales* (London: David Nutt, 1890)
- Rowling J K *Harry Potter and the Philosopher's Stone* (London: Bloomsbury, 1997)
- Wells H G *The Invisible Man* (London: C. Arthur Pearson, 1897)
- Слюсар В *Электроника НТБ* (7) 70 (2009)
- Вендик ИБ, Вендик ОГ *ЖТФ* **83**(1)3 (2013); Vendik IB, Vendik OG *Tech. Phys.* **58** 1 (2013)
- Lapine M, Tretyakov S *IET Microwaves Antennas Propag.* **1** 3 (2007)
- Shalaev V M *Nature Photon.* **1** 41 (2007)
- Sarychev A K, Shalaev V M *Electrodynamics of Metamaterials* (Singapore: World Scientific, 2007)
- Solymar L, Shamonina E *Waves in Metamaterials* (Oxford: Oxford Univ. Press, 2009)
- Noginov M A, Podolskiy V A (Eds) *Tutorials in Metamaterials* (Boca Raton, FL: Taylor and Francis, 2012)
- Engheta N, Zolowowski R W (Eds) *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations* (Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2006)
- Capolino F (Ed.) *Theory and Phenomena of Metamaterials* (Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor and Francis, 2009)
- Capolino F (Ed.) *Applications of Metamaterials* (Boca Raton, FL: CRC Press, 2009)
- Cui T J, Smith D R, Liu R (Eds) *Metamaterials: Theory, Design, and Applications* (New York: Springer, 2010)
- Zouhdi S, Sihvola A, Vinogradov A P (Eds) *Metamaterials and Plasmonics: Fundamentals, Modelling, Applications* (Dordrecht: Springer, 2009)
- Cai W, Shalaev V *Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications* (New York: Springer, 2010)
- Веселаго В Г *УФН* **181** 1201 (2011); Veselago V G *Phys. Usp.* **54** 1161 (2011)
- Розанов Н Н *Природа* (6) 3 (2008)
- Wolf E, Habashy T J. *Mod. Opt.* **40** 785 (1993)
- Monticone F, Alù A *Phys. Rev. X* **3** 041005 (2013)
- Кильдишев А В, Шалаев В М *УФН* **181** 59 (2011); Kildishev A V, Shalaev V M *Phys. Usp.* **54** 53 (2011)
- Maier S A *Plasmonics: Fundamentals and Applications* (New York: Springer, 2007)
- Климов В В *Наноплазмоника* (М.: Физматлит, 2010)
- Уфимцев П Я *Метод краевых волн в физической теории дифракции* (М.: Советское радио, 1962)

25. Ufimtsev P Y *Theory of Edge Diffraction in Electromagnetics* (Raleigh, NC: SciTech, 2009)
26. Miller D A B *Opt. Express* **14** 12457 (2006)
27. Nicorovici N P et al. *Opt. Express* **15** 6314 (2007)
28. Alitalo P, Tretyakov S *Proc. IEEE* **99** 1646 (2011)
29. Дубинов А Е, Мытарева Л А *УФН* **180** 475 (2010); Dubinov A E, Mutaeva L A *Phys. Usp.* **53** 455 (2010)
30. Розанов Н Н *УФН* **181** 787 (2011); Rozanov N N *Phys. Usp.* **54** 763 (2011)
31. Дубинов А Е, Мытарева Л А *УФН* **182** 337 (2012); Dubinov A E, Mutaeva L A *Phys. Usp.* **55** 315 (2012)
32. Pendry J B et al. *Science* **312** 1780 (2006)
33. Leonhardt U *Science* **312** 1777 (2006)
34. Leonhardt U *New J. Phys.* **8** 118 (2006)
35. Leonhardt U, Philbin T G *New J. Phys.* **8** 247 (2006)
36. Долгин Л С *Изв. вузов. Радиофизика* **4** 964 (1961)
37. Dantzig D V *Proc. Camb. Philos. Soc.* **30** 421 (1934)
38. Lax M, Nelson D F *Phys. Rev. B* **13** 1777 (1976)
39. Post E J *Formal Structure of Electromagnetics; General Covariance and Electromagnetics* (New York: Interscience Publ., 1962)
40. Ward A J, Pendry J B *J. Mod. Opt.* **43** 773 (1996)
41. Teixeira F L, Chew W C J. *Math. Phys.* **40** 169 (1999)
42. Teixeira F L, Chew W C J. *Electromag. Waves Appl.* **13** 665 (1999)
43. Chen P Y et al. *Adv. Mater.* **24** OP281 (2012)
44. Schurig D et al. *Science* **314** 977 (2006)
45. Kundtz N, Gaultney D, Smith D R *New J. Phys.* **12** 043039 (2010)
46. Kanté B, Germain D, de Lustrac A *Phys. Rev. B* **80** 201104(R) (2009)
47. Guven K et al. *New J. Phys.* **10** 115037 (2008)
48. Возианова А В, Ходзицкий М К *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики* (4) 28 (2012)
49. Semouchkina E et al. *Appl. Phys. Lett.* **96** 233503 (2010)
50. Greenleaf A et al. *Commun. Math. Phys.* **275** 749 (2007)
51. Karpov I A, Shoo E D *Rev. Sci. Instrum.* **83** 074704 (2012)
52. Kante B et al. *Opt. Express* **16** 6774 (2008)
53. Li J, Pendry J B *Phys. Rev. Lett.* **101** 203901 (2008)
54. Liu R et al. *Science* **323** 366 (2009)
55. Zhou F et al. *Sci. Rep.* **1** 78 (2011)
56. Ergin T et al. *Science* **328** 337 (2010)
57. Bao D et al. *New J. Phys.* **13** 103023 (2011)
58. Ma H F, Cui T J *Nature Commun.* **1** 21 (2010)
59. Shin D et al. *Nature Commun.* **3** 2013 (2012)
60. Landy N, Smith D R *Nature Mater.* **12** 25 (2012)
61. Liang D et al. *Adv. Mater.* **24** 916 (2012)
62. Valentine J et al. *Nature Mater.* **8** 568 (2009)
63. Gharghi M et al. *Nano Lett.* **11** 2825 (2011)
64. Fischer J et al. *Opt. Lett.* **36** 2059 (2011)
65. Ergin, Fischer J, Wegener M *Phys. Rev. Lett.* **107** 173901 (2011)
66. Narayana S, Sato Y *Adv. Mater.* **24** 71 (2012)
67. Gomory F et al. *Science* **335** 1466 (2012)
68. Schittny R et al. *Phys. Rev. Lett.* **110** 195901 (2013)
69. Xu H et al. *Phys. Rev. Lett.* **112** 054301 (2014)
70. Han T et al. *Phys. Rev. Lett.* **112** 054302 (2014)
71. Schittny R et al. *Science* **345** 427 (2014)
72. Stenger N, Wilhelm M, Wegener M *Phys. Rev. Lett.* **108** 014301 (2012)
73. Alitalo P et al. *IEEE Trans. Antennas Propag.* **56** 416 (2008)
74. Alitalo P et al. *Appl. Phys. Lett.* **94** 014103 (2009)
75. Vehmas J et al. *IET Microw. Antennas Propag.* **6** 830 (2012)
76. Alitalo P et al. *IET Trans. Antennas Propag.* **60** 4963 (2012)
77. Tretyakov S et al. *Phys. Rev. Lett.* **103** 103905 (2009)
78. Alitalo P, Tretyakov S A *Phys. Rev. B* **82** 245111 (2010)
79. Alitalo P et al. *J. Appl. Phys.* **111** 034901 (2012)
80. Xu S et al. *Phys. Rev. Lett.* **109** 223903 (2012)
81. Andkjær J, Sigmund O *Appl. Phys. Lett.* **99** 021112 (2011)
82. Urzhumov Y et al. *Opt. Lett.* **38** 1606 (2013)
83. Lan L et al. *Appl. Phys. Lett.* **103** 121113 (2013)
84. Wang X, Semouchkina E *Appl. Phys. Lett.* **102** 113506 (2013)
85. Kerker M J. *Opt. Soc. Am.* **65** 4 376 (1975)
86. Kahn W K, Kurss H *IEEE Trans. Antennas Propag.* **13** 671 (1965)
87. Chew H, Kerker M J. *Opt. Soc. Am.* **66** 445 (1976)
88. Sihvola A "Properties of dielectric mixtures with layered spherical inclusions", in *Microwave Radiometry and Remote Sensing Applications* (Ed. P Pampaloni) (Boca Raton, Fl.: CRC Press, 1989)
89. Alù A, Engheta N *Phys. Rev. E* **72** 016623 (2005)
90. Alù A, Engheta N *Phys. Rev. Lett.* **100** 113901 (2008)
91. Alù A, Rainwater D, Kerkhoff A *New J. Phys.* **12** 103028 (2010)
92. Edwards B et al. *Phys. Rev. Lett.* **103** 153901 (2009)
93. Rainwater D et al. *New J. Phys.* **14** 013054 (2012)
94. Filonov D et al. *Phys. Status Solidi RRL* **6** 46 (2012)
95. Munk B A *Frequency Selective Surface: Theory and Design* (New York: Wiley, 2000)
96. Alù A *Phys. Rev. B* **80** 245115 (2009)
97. Chen P-Y, Alù A *Phys. Rev. B* **84** 205110 (2011)
98. Chen P-Y et al. *IEEE Antennas Propag. Lett.* **5** 1598 (2011)
99. Chen P-Y, Alù A *ACS Nano* **5** 5855 (2011)
100. Alù A, Engheta N *Phys. Rev. E* **72** 016623 (2005)
101. Kallos E et al. *Phys. Rev. B* **84** 045102 (2011)
102. Alitalo P et al. *J. Appl. Phys.* **107** 034905 (2010)
103. Engheta N, Salandrino A, Alù A *Phys. Rev. Lett.* **95** 095504 (2005)
104. Engheta N *Science* **317** 5845 (2007)
105. Soric J C et al. *New J. Phys.* **15** 033037 (2013)
106. Soric J C et al. *Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.* 1–2 (2012)
107. Liu X et al. *Appl. Phys. Lett.* **95** 191107 (2009)
108. Jiang W X, Cui T J *Phys. Rev. E* **83** 026601 (2011)
109. Jiang W X et al. *Adv. Func. Mater.* **23** 4028 (2013)
110. Nelson P A, Elliott S J *Active Control of Sound* (New York: Academic Press, 1992)
111. Ma Q et al. *Phys. Rev. Lett.* **111** 173901 (2013)
112. Selvanayagam M, Eleftheriades G V *Phys. Rev. X* **3** 041011 (2013)
113. Перельман Я И *Занимательная физика*. Кн. 1 (М.: Наука, 1979)
114. Tachi Lab Projects, Retro-reflective Projection Technology, <http://www.tachilab.org/modules/projects/rpt.html>
115. Chen H et al. *Nature Commun.* **4** 1 (2013)
116. Aliev A E, Gartstein Yu N, Baughman R H *Nanotechnology* **22** 435704 (2011)
117. Howell J C et al. *Appl. Opt.* **53** 9 1958 (2014)
118. Perczel J, Tyc T, Leonhardt U *New J. Phys.* **13** 083007 (2011)

Experimental realization of invisibility cloaking

A.V. Shchelokova, I.V. Melchakova, A.P. Slobozhanyuk, E.A. Yankovskaya, P.A. Belov
*St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
 Kronverkskii prosp. 4, lit. A, 197101 St. Petersburg, Russian Federation*
 E-mail: alena.schelokova@phoi.ifmo.ru, melchakova-i@yandex.ru,
a.slobozhanyuk@phoi.ifmo.ru, adfors@gmail.com, belov@phoi.ifmo.ru

C.R. Simovski

*St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
 Kronverkskii prosp. 4, lit. A, 197101 St. Petersburg, Russian Federation;
 Aalto University, School of Electrical Engineering, P.O.Box 15500, FI-00077, Aalto, Finland. E-mail: konstantin.simovski@aalto.fi*

Advances in the studies of metamaterials pushed the development of invisibility cloaks which suppress the scattering by objects within certain frequency ranges. During recent years, there was a transition from a purely theoretical consideration of invisibility cloaks to its practical implementation. This paper is an overview of the current state of the art in the area of invisibility cloaks with an emphasis on experimental realization of such devices.

Keywords: invisibility, cloaking, transformation optics, metamaterials, scattering cancellation, optical illusions, carpet cloak, active cloaking

PACS numbers: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 42.30.Wb, 43.20.Gp
 Bibliography — 118 references
Uspekhi Fizicheskikh Nauk **185** (2) 181–206 (2015)

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201502e.0181
 Received 4 February 2014, revised 12 May 2014
Physics – Uspekhi **58** (2) (2015)