**Тема 6. Возникновение и развитие метаматериалов. Перспективы и проблемы их использования**

**План:**

1. Отрицательная рефракция и левые среды

2. Отрицательно преломляющие среды для света

3. Перспективы практического использования метаматериалов

4. Недостатки существующих метаматериалов и возникающие проблемы

**1. Отрицательная рефракция и левые среды**

Метаматериалы (от греч. meta – над, после) – это искусственные композитные среды, электрический и магнитный отклики которых существенно отличаются от соответствующих откликов в составляющих средах, благодаря чему возникают свойства, не достижимые в природных материалах.

Одним из наиболее ярких примеров таких материалов являются так называемые левые среды, в которых реализуется отрицательная рефракция электромагнитных волн.

**История вопроса.** Интерес к отрицательной рефракции электромагнитных волн, в том числе света, при которой преломленный луч отклоняется по другую строну от нормали к границе раздела сред, возник в начале XXI в. после появления публикации группы ученых из университета Сан-Диего (США), возглавляемой Д. Р. Смитом, сообщивших о создании композитных материалов, обладающих отрицательным показателем преломления. При этом данные ученые сослались на то, что возможность существования сред с отрицательным показателем преломления была теоретически обоснована советским физиком В. Веселаго еще в 1967 г.

Веселаго показал, что в средах с одновременно отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей показатель преломления изменяет знак вследствие того, что изменяет свое направление на противоположное вектор Пойнтига, образуя с векторами напряженностей электрического и магнитного полей левовинтовую тройку. Такие среды он назвал «левыми». Веселаго показал также, что в левых средах должны наблюдаться и другие аномальные явления: изменение знака групповой скорости и в доплеровском сдвиге частоты, обращение эффекта Вавилова –Черенкова, рассеяние света выпуклой линзой и, наоборот, его фокусировка вогнутой линзой.

Статья Веселаго, приобрела характер основополагающей работы в теории отрицательно преломляющих сред, называемых также левыми средами и средами Веселаго. В англоязычной литературе такие среды называют NIM (negative index materials) или LHM (left-handed materials). В последнее время все большее распространение получает термин «метаматериалы», указывающий на то, что свойства этих материалов зависят не от их химического состава, а от особенностей искусственно созданной конструкции из наноразмерных емкостных и индуктивных элементов. Резонансные свойства этих материалов таковы, что приводят к отрицательным значениям диэлектрической и магнитной проницаемостей в определенном диапазоне частот.

В 2000 г. идею Веселаго о фокусирующих свойствах плоскопараллельной пластинки из материала с отрицательным показателем преломления подхватил английский физик Дж. Пендри, показавший, что в этом случае отсутствует дифракционный предел на размер фокального пятна, присущий обычным линзам. Подобное фокусирующее устройство Пендри назвал совершенной линзой (perfect lens). Это означает, что можно создавать оптические микроскопы с недоступным ранее разрешением.

В 2006 г. Дж. Пендри выступил с новой идеей: если окружить объект материалом, показатель преломления которого плавно изменяется от 0 на внутренней поверхности до 1 на внешней, то свет будет огибать объект, и последний станет невидимым для наблюдателя. Идея была успешно проверена путем компьютерного моделирования, а затем реализована экспериментально в микроволновом диапазоне. Возможность создания такого «плаща-невидимки», способного сделать невидимым танк или самолет, вызвала чрезвычайный интерес у военных.

С 2004 г. группы Смита и Пендри объединили свои усилия в разработке метаматериалов, обладающих управляемым коэффициентом преломления, в том числе могущим принимать отрицательные значения. В различных университетах США и Западной Европы в создании новых метаматериалов участвуют и многие бывшие российские ученые: В Шалаев, А. Кильдишев, В. Драчев (университет Пурдю, США), А Пименов (университет Аугсбурга, Германия), А. Болташева (Датский технический университет, Люнгбю, Дания) и др.

**2. Отрицательно преломляющие среды для света**

Метаматериалы для микроволн. Как уже отмечалось выше, отрицательные значения показатель преломления может принимать лишь в магнитодиэлектриках. Первые попытки поиска таких материалов, у которых в определенном диапазоне частот одновременно становились бы отрицательными ε и μ, были предприняты еще В. Г. Веселаго. Он пытался создать материал с отрицательным преломлением «на основе магнитного полупроводника CdCr2Se4, однако эти усилия не увенчались успехом из-за существенных технологических трудностей, которые характеризуют синтез этого материала».

Затем Кэмли и Миллс предположили, что материалами с отрицательным показателем преломления могут быть антиферромагнитные металлы. Они исходили из того факта, что металлы могут обладать отрицательной диэлектрической проницаемостью, а антиферромагнетики – отрицательной магнитной проницаемостью. Исходя из этого, они показали, что в антиферромагнитных металлах фазовая скорость как объемных, так и поверхностных поляритонов направлена противоположно их групповой скорости.

В 1996 г. Дж. Пендри предположил, что кубическая решетка из тонких металлических проводников может являться моделью металла для электромагнитного излучения сверхвысокой частоты. В этой модели использовались проводники диаметром в несколько десятков микрометров, расположенные на расстоянии нескольких миллиметров друг от друга, а облучение велось на гигагерцевых частотах. В 1999 г. Пендри предложил создать искусственный материал, состоящий из так называемых расщепленных кольцевых резонаторов (SRR – split ring resonators), который демонстрировал в определенной полосе частот отрицательные значения ε.

Эта идея была усовершенствована в 2000 г. Д. Смитом с коллегами, которые создали первый композитный материал с одновременно отрицательными ε и μ, состоящий из перемежающихся слоев SRR и тонких металлических проволочек. Такой материал обнаруживал отрицательный показатель преломления для электромагнитных волн частотой около 10 ГГц.

**3. Перспективы практического использования метаматериалов**

Уникальные свойства метаматериалов, в частности, возможность получения в них отрицательных значений показателя преломления, позволяют надеяться, что в недалеком будущем появятся созданные на их основе совершенно новые, неизвестные ранее технические устройства.

**Совершенные линзы.** Обычные линзы, по сути дела, являются дифракционными устройствами. Диаметр ограниченного центральным дифракционным максимумом фокального пятна выпуклой сферической линзы не превышает значения 1,22λ, где λ - длина волны падающего света. Разрешающая сила линзы тем больше, чем больше ее диаметр и чем меньше длина воны света. В любом случае это величина конечная.

Как было показано Дж. Пендри, плоскопараллельная пластинка из материала с показателем преломления n=1, играющая роль фокусирующей линзы, не обладает этим недостатком. Дело в том, что в этом случае фокусировка света имеет совершенно иную физическую природу: не дифракционную, а рефракционную. Поэтому световые лучи с помощью такой линзы могут быть сфокусированы практически в точку. Интенсивность света в фокусе теоретически может стремиться к бесконечности. Подобные совершенные линзы, если они будут созданы, позволят резко увеличить разрешающую способность оптических микроскопов, сделать ее независящей от длины волны света.

Кроме того, такие линзы найдут применение в фотолитографии, позволяя уменьшить размеры изображения элементов интегральных схем с большой степенью интеграции. Использование УФ-литографии позволяет пока снизить разрешение этих элементов до 0,25 мкм. Для получения более мелких деталей применяются электронно-лучевая и рентгеновская литография.

Однако использование этих высокоэнергетичных методов во многих случаях может нанести создаваемым приборам необратимые повреждения. Поэтому расширение возможностей фотолитографии, особенно в сочетании с ее высокой производительностью и стабильностью получаемых фотошаблонов, представляется весьма перспективным.

**«Плащи-невидимки».** Представляет интерес и другая идея Дж. Пендри – создание оболочек, способных сделать укрываемый ими объект невидимым для наблюдателя. Действительно, представим себе некий объект, окруженный оболочкой, показатель преломления которой изменяется от n=-1 на внешней поверхности до n=0 на внутренней поверхности (рис. 1).

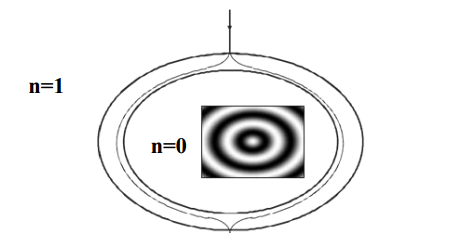


Рис. 1. Обтекание светом объекта, укрытого «плащом-невидимкой»

Тогда внешнюю поверхность такого «плаща» световые лучи будут пересекать без отражения и преломления. По мере проникновения вглубь слоя угол преломления будет возрастать от значения, равного углу падения, до 90º, так как при n=0 для любого падающего луча имеет место полное внутреннее отражение. Свет будет попросту обтекать предмет подобно тому, как обтекала бы его жидкость.

Поскольку отраженные лучи отсутствуют, то наблюдатель предмета не видит. Правда, для этого надо позаботиться о том, чтобы отсутствовали или, по крайней мере, были незначительны потери света на поглощение в укрывающем слое, иначе наблюдатель увидит перед собой некоторое темное пятно непонятного происхождения. Для уменьшения потерь на поглощение света такие «плащи-невидимки» должны быть достаточно тонкими.

К метаматериалам, из которых можно создавать оболочки, способные сделать невидимыми для человека и радаров, например, танк или самолет, проявили особый интерес военные ведомства. Достаточно сказать, что Агентство передовых исследований при Министерстве обороны США (DARPA) выделило на эти исследования солидный грант.

**4. Недостатки существующих метаматериалов и возникающие проблемы**

Метаматериалам на основе периодически распределенных резонансных металлических элементов присущи следующие недостатки:

- сильная зависимость показателя преломления от частоты, угла падения и поляризации падающего излучения;

- невозможность плавного и динамического (посредством внешних полей) управления показателем переломления;

- сложность получения протяженных по площади, гибких пленок с показателем переломления n≤1.

Эти недостатки делают проблематичным использование таких метаматериалов для тех основных целей, ради которых и затевалось их создание: использования в линзах субволнового разрешения и в качестве материалов для «плащей-невидимок», укрывающих объект от внешнего наблюдателя. По этой причине возникает актуальная проблема создания иных сред для реализации этих целей. Такие среды должны быть свободны, если не от всех, то хотя бы от части недостатков, свойственных композитным метаматериалам. Желательно, чтобы такие среды обладали следующими качествами:

- оптическая изотропия;

- достаточная широкополосность;

- возможность изменения показателя преломления, заложенная в среду конструктивно, или посредством внешних полей;

- возможность создания слоев достаточно больших размеров.