

## АНАЛИЗ ОТРАЖЕНИЯ НАНОСЕКУНДНЫХ СИГНАЛОВ ОТ БИНЕГАТИВНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА

© 2016 г. И.Ф. БУДАГЯН

Московский технологический университет (МИРЭА)  
e-mail: budif@yandex.ru

Разработка современных радиотехнических систем, используемых в технике радиосвязи, радиолокации, радиоастрономии, оборонных областях радиоэлектроники требует новых принципов в построении функциональных устройств и антенн, уменьшения их массогабаритных параметров одновременно с обеспечением широкополосности, надежности и многофункциональности. Удовлетворение таким требованиям невозможно без реализации новых физических явлений, материалов и технологий. В последние годы разработчиков СВЧ устройств и антенн всё больше привлекают новые материалы и среды с необычными электродинамическими свойствами. Целью работы является проведение анализа волновых процессов при отражении наносекундных сигналов от полубесконечного бинегативного метаматериала, представляющего смесь электронов плазмы и газа из магнитных монополей, для различных форм импульсов, поскольку изучение свойств метаматериалов представляет собой актуальное направление в современной радиофизике.

Метаматериалы – это искусственно сформированные и особым образом структурированные среды, обладающие электромагнитными свойствами, сложно достижимыми технологически либо не встречающимися в природе. В последние годы новые понятия и концепции в синтезе метаматериалов способствовали созданию структур, имитирующих электромагнитные свойства известных веществ или обладающих качественно новыми функциями, выходят за пределы свойств образующих их компонентов.

Анализ публикаций по различным аспектам технологий метаматериалов позволяет классифицировать все многообразие естественных и искусственных сред в зависимости от эффективных значений их диэлектрической  $\epsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостей (рис. 1) [1].

Существенно, что у подавляющего большинства сред в наиболее интересных для практического использования диапазонах частот эти параметры, как правило, вообще больше или равны единице. В зарубежной литературе данные материалы обычно называют DPS (double positive, двойные позитивные), подчеркивая тем самым положительность значений как  $\epsilon$ , так и  $\mu$ . DPS-среды считаются прозрачными для электромагнитных волн, если внутренние потери в них малы. Последние несколько лет были богаты событиями в области развития концепций и решения проблем создания метаматериалов с отрицательным

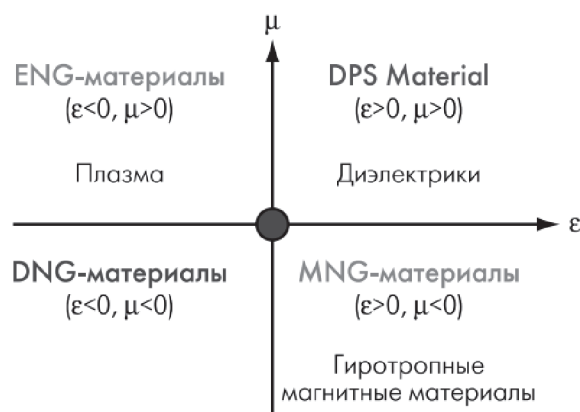


Рис. 1. Классификация физических сред в зависимости от знака величин диэлектрической  $\epsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостей.

коэффициентом преломления электромагнитных волн. Эффект отрицательного преломления обусловлен одновременно отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей ( $\epsilon < 0$  и  $\mu < 0$ ). Такие материалы часто называют бинегативными средами (DNG, double negative).

Первый этап на пути формирования современных представлений о DNG связывают с развитием теории обратных волн, одним из ключевых понятий которой явилась отрицательная групповая скорость волны. Формальным началом второго этапа становления теории DNG-сред можно считать лекции по оптике Л. И. Мандельштама [2], в которых были более детально рассмотрены эффект обратного распространения волн и необычный закон преломления при падении волны из свободного пространства в среду, где групповая и фазовая скорости волн направлены навстречу друг другу. При этом преломленный луч отклоняется в противоположную сторону от нормали к поверхности. Наиболее развитую теорию веществ с отрицательным коэффициентом преломления, с одновременно отрицательными  $\epsilon$  и  $\mu$ , предложил, как это признано зарубежными учеными, советский физик В. Г. Веселаго [3]. Его основополагающая работа содержала теоретическое описание свойств среды с одновременно отрицательными  $\epsilon$  и  $\mu$ , а также исследование решения уравнений Максвелла для этого случая. При интерпретации уравнений Максвелла он впервые использовал в качестве индекса преломления выражение  $n = -\sqrt{\epsilon\mu}$  для  $\epsilon, \mu < 0$ , что явилось довольно неожиданным логическим приемом. Отмечая гипотетичность соответствующей среды, Веселаго указал на бесспорный факт, что ее существование не исключается уравнениями Максвелла, и теоретически проанализировал процесс распространения электромагнитных волн в подобных средах. В обычных средах, когда  $\epsilon > 0$  и  $\mu > 0$ , электромагнитная волна имеет правостороннюю ориентацию тройки векторов  $\mathbf{H}, \mathbf{E}, \mathbf{k}$  (магнитная и электрическая компоненты поля, а также волновой вектор). В DNG-среде векторы Умова-Пойтинга и фазовой скорости (волновой вектор  $\mathbf{k}$ ) противоположны, соответственно  $\mathbf{E}, \mathbf{H}$  и  $\mathbf{k}$  формируют левостороннюю систему координат. Отрицательная величина индекса преломления изменяет геометрическую оптику линз и других объектов, образованных из DNG-материалов. Основными недостатками первых метаматериалов, основанных на использовании кольцевых и прямоугольных SRR - двойных кольцевых резонаторов (split ring resonator), являются узкополосность, высокие уровни электромагнитных потерь, громоздкость и непрактичность для микроволновых технических применений.

Для решения проблемы узкополосности в дальнейшем было предложено много вариантов магниточувствительных элементов, в частности, в форме  $\Omega$ . Существенно, что проблема узкой полосы пропускания может быть в определенной мере решена путем оптимизации геометрических размеров SRR-резонаторов. Обнаруженные свойства DNG-сред свидетельствуют, что их применение теоретически позволяет получить разрешающую способность оптических приборов, превосходящую дифракционный предел. Используя материалы с  $\epsilon < 0$  (и, по возможности, с  $\mu < 0$ ), можно за счет плазменного резонанса усилить ближние (неоднородные) волны, ответственные за перенос информации о деталях, размером много меньше длины волны. Оптимальной для этой цели является среда с  $\epsilon = \mu = -1$ . DNG-структуры обладают и другими интересными и полезными для практики свойствами.

В.Г. Веселаго был предложен гипотетический метаматериал, который может быть реализован на основе смеси электронов плазмы и газа из магнитных монополей. Его эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости при разных концентрациях  $N_e$  и  $N_m$ :

$$\epsilon = 1 - \frac{4\pi N_e q_e^2}{m_e \omega^2}, \quad \mu = 1 - \frac{4\pi N_m q_m^2}{m_m \omega^2} \quad (1)$$

где  $q_{em}$  и  $m_{em}$  – заряды и масса соответственно электронов и магнитных монополей. Основываясь на этих формулах можно получить выражения для плазменной частоты

$$\omega_{pe,m} = 5,64 * 10^4 \sqrt{N_{e,m}}, \quad \text{где } \omega_p = \sqrt{4\pi N q^2 / m}. \quad (2)$$

Этот материал и будет исследован при работе с наносекундными сигналами.

В последние годы сверхширокополосные (СШП) сигналы успешно применяются в различных областях науки и техники. Более того, сегодня СШП технологии продолжают бурное и стремительное развитие. СШП сигналы и процессы электромагнитного происхождения достаточно широко распространены в современной радиофизике и радиоэлектронике. Методы спектрального анализа позволяют разработать эффективные алгоритмы для минимизации искажений наносекундных импульсов различной формы, установить закономерности между их длительностью и параметрами метаструктур [4].

При падении импульса  $s(t)$  заданной формы со стороны свободного пространства на границу раздела сред с полубесконечной структурой предполагается, что волна распространяется вдоль оси  $z$ , вектор напряженности электрического поля ориентирован вдоль оси  $y$ , а магнитного поля – вдоль оси  $x$

$$E_y(t,0) = E_{y0}s(t); \quad H_x(t,0) = E_{x0}s(t)$$

где  $E_{y0}$  и  $E_{x0}$  – амплитуды соответствующих векторов напряженности падающего поля.

Анализируется процесс отражения импульсов различной формы от полубесконечного бинегативного метаматериала. Форма импульсов прямоугольная, гауссова и в виде разности полиномов Лагерра [5]. Рабочий диапазон частот выбран от 50 Гц до 50 ГГц. Можно, используя обратное преобразование Фурье, найти отраженное поле

$$E_{\text{отр}}(t,0) = \int_{2\pi f_{\text{min}}}^{2\pi f_{\text{max}}} S(\omega)R(\omega)e^{j\omega t}d\omega. \quad (3)$$

Процесс вычислений сводится к следующему: задается интервал по оси времени, выбирается тип падающего импульса и по соответствующей формуле вычисляется его форма; для вычисления спектра падающего импульса  $S(\omega)$  используется быстрое преобразование Фурье; коэффициенты отражения  $R(\omega)$  вычисляются для полубесконечной среды (1) при нормальном падении волны на слой; с учетом  $R(\omega)$  вычисляется дискретный спектр отраженного сигнала  $S_r(\omega) = S(\omega) \cdot R(\omega)$ . Обратное преобразование Фурье позволяет перейти от спектральной плотности к отраженному сигналу  $s_r(t)$ .

Коэффициент отражения от полубесконечных сред определяется стандартной формулой Френеля на границе раздела двух однородных сред

$$r(\omega) = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon(\omega)\mu(\omega)}}{1 + \sqrt{\varepsilon(\omega)\mu(\omega)}}. \quad (4)$$

По расчетам В.Г. Веселаго [3] считается, что коэффициент отражения во всем диапазоне частот  $R(\omega) = r(\omega)$ , т.е. равен коэффициенту отражения от полубесконечных сред (4). При  $N_e = 5.4 \cdot 10^{12}$  и  $N_m = 5 \cdot 10^{18}$  [м<sup>-3</sup>], используя формулы (2), получим линейные плазменные частоты  $f_{pe} = 2,091 \cdot 10^{10}$  Гц и  $f_{pm} = 7,995 \cdot 10^7$  Гц. На основе (1) построим (рис. 2) зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей от частоты и коэффициент отражения (4).

Перейдем к анализу отражения наносекундных сигналов прямоугольной формы, гауссовой формы и в виде разности полиномов Лагерра от бинегативного метаматериала (1). Оценим влияние концентраций  $N_e$  и  $N_m$  и длительности импульсов. Для анализа использованы длительности  $T = 1$  нс, 0,5 нс, 0,2 нс; и концентрации  $N_{e1} = 5.4 \cdot 10^{12}$ ,  $N_{e2} = 5.4 \cdot 10^{20}$ ,  $N_{e3} = 5.4 \cdot 10^{15}$ ;  $N_{m1} = 5 \cdot 10^{18}$ ,  $N_{m2} = 5 \cdot 10^{19}$ ,  $N_{m3} = 5 \cdot 10^{25}$  [м<sup>-3</sup>].

Сравнение форм отраженного  $g(t)$  и падающего  $s(t)$  сигналов осуществляется путем вычисления величины

$$\delta = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (|s(t)| - |g(t)|) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} (|s(t)| + |g(t)|) dt},$$

при  $\delta \leq 0,1$  формы сигналов можно признать близкими друг к другу. Знак энергии импульса (положительный или отрицательный) не имеет значения. При этом оптимальные значения концентраций  $N_e$ ,  $N_m$  для прямоугольного импульса:  $N_{e1} = 5.4 \cdot 10^{12}$ ,  $N_{m3} = 5 \cdot 10^{25}$  [м<sup>-3</sup>]; для сигнала в виде формы Гаусса:  $N_{e2} = 5.4 \cdot 10^{20}$ ,  $N_{m3} = 5 \cdot 10^{25}$  [м<sup>-3</sup>]; для

сигнала в виде разности полиномов Лагерра:  $N_{eT}=5.4 \cdot 10^{12}$ ,  $N_{mT}=5 \cdot 10^{18}$  [м<sup>-3</sup>] при длительности импульсов  $T=1 \cdot 10^{-9}$  с. Соответствующие формы графиков приведены на рис. 3.

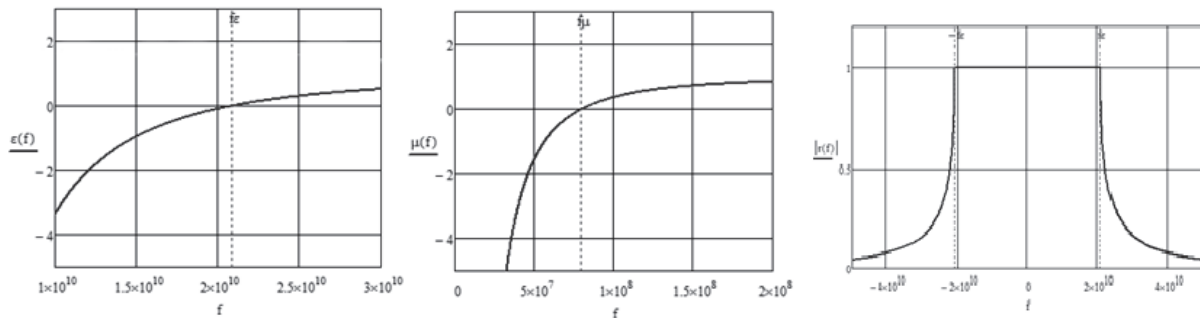


Рис. 2. Эффективные диэлектрическая и магнитная проницаемости DNG метаматериала соответственно при  $N_e=5.4 \cdot 10^{12}$  и  $N_m=5 \cdot 10^{18}$  [м<sup>-3</sup>] и график коэффициента отражения R.

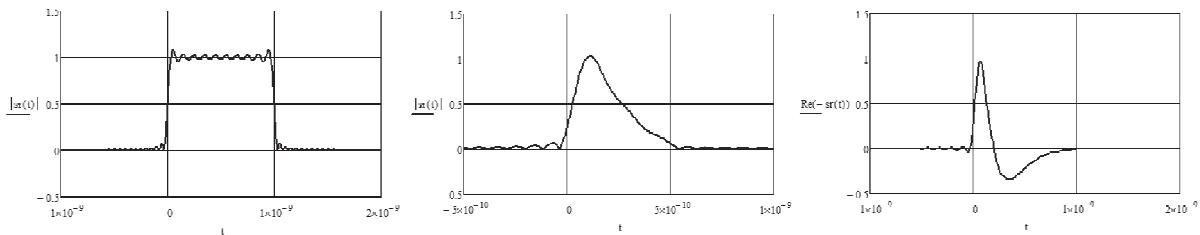


Рис. 3. Графики отраженных наносекундных сигналов при оптимальных параметрах.

### Заключение

Из результатов анализа и графических материалов видна зависимость изменений отраженного сигнала при различных значениях концентраций  $N_e$  и  $N_m$ , и длительности импульсов. Форма импульсов искажается при отражении от полубесконечного слоя бинегативного материала представленного в виде смеси электронов плазмы и газа из магнитных монополей. Наибольшее искажение наблюдается в импульсе в форме Гаусса, а наименее подвержены искажению импульсы в виде разности полиномов Лагерра и прямоугольный. При меньшей длительности форма импульса искажается сильнее. Качественных различий при отражении импульсов разной длительности нет. Если подобрать оптимальные значения соотношений концентраций  $N_e$  и  $N_m$  и длительности импульса  $T$ , то можно добиться наилучшей картины для отраженного сигнала. Полученные выводы для рассмотренного бинегативного материала хорошо согласуются со сделанными ранее для метаматериала с  $\epsilon = \mu = -1$  [5].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будагян И.Ф., Щучкин Г.Г. Волновые процессы в материальных средах. Диэлектрические и метаматериалы: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. 2016. 201 с.
2. Мандельштам Л.И. Лекции по некоторым вопросам теории колебаний (1944 г.). Четвертая лекция / В кн.: Мандельштам Л.И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механики. – М.: Наука, 1972, с. 431–437.
3. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$ . // Успехи физических наук, 1967, т.92, №7, с. 517– 526.
4. Будагян И.Ф., Илющечкин М.Н. Компьютерное моделирование процессов отражения наносекундных сигналов. // Т-Comm. 2011, №8, с. 22-27.
5. Будагян И.Ф. Наносекундные технологии и метаматериалы. // «INTERMATIC– 2015» / Материалы Международной НТК, 1-5 декабря 2015 г. Москва. – М.: МИРЭА, 2015, ч.2, с. 17-19.