

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Арояна Оганнеса Самвеловича на тему “Управление электромагнитными волнами с помощью резонансных, субволновых структур”, представленную в Специализированный совет 049 «Физика» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности А.04.03 — «Радиофизика»

Актуальность темы диссертации

Управление электромагнитными (ЭМ) волнами с применением субволновых структур является одним из ключевых направлений современной фотоники и электромагнетизма. В отличие от традиционных оптических и микроволновых устройств (линз, фильтров, антенн), работа которых основана на свойствах объемных материалов и строго ограничена дифракционным пределом, субволновые системы позволяют преодолеть физические барьеры локализации и управления ЭМ полями. Беспрецедентный прогресс и интеграция микро- и наномасштабных технологий сегодня диктуют острую необходимость в компактных, сверхэффективных компонентах, способных с высокой точностью контролировать процессы распространения, поглощения и рассеяния ЭМ волн.

Одним из наиболее эффективных путей решения этой проблемы стало целенаправленное применение метаматериалов и метаповерхностей. Эти искусственные структуры состоят из субволновых элементарных ячеек — метаатомов, уникальные резонансные свойства которых позволяют синтезировать эффективные материальные параметры, не встречающиеся в природе. За счет точного проектирования геометрии, пространственного расположения и материального состава этих элементов становится возможным управлять локальными электрическими и магнитными откликами системы. В результате возникают такие аномальные физические явления, как отрицательное преломление, почти идеальное поглощение, а также нестандартное отражение и пропускание. Такие метаструктуры в

субволновом масштабе позволяют обеспечение контроля над амплитудой, фазой и поляризацией ЭМ волн, прокладывая путь к проектированию и производству фотонных устройств нового поколения (плоских линз, сверхтонких поглотителей, компактных фильтров, антенн и модуляторов).

В прикладном аспекте внедрение субволновых резонаторов и метаструктур оказывает колоссальное влияние на области телекоммуникаций, сенсорики и преобразования энергии. В зависимости от диапазона электромагнитного спектра данные технологии решают разнообразные инженерные задачи: в терагерцовом и оптическом диапазонах частот они обеспечивают синтез сверхчувствительных сенсоров, сверхтонких поглотителей и перестраиваемых спектральных приборов, тогда как в микроволновом диапазоне открывают возможности для разработки широкополосных поглотителей и электрически малых антенн (ЭМА). Потребность в подобных антеннах и компактных компонентах сегодня носит императивный характер, что продиктовано жесткими требованиями к сверхкомпактности и энергоэффективности современных систем связи.

Помимо прикладного значения, субволновые плазмонные структуры и метаструктуры представляют ключевую ценность и в контексте фундаментальной науки. Они служат уникальной платформой для исследования суперлокализации электромагнитных полей в глубоко субволновых объемах, интенсификации взаимодействия света с веществом, а также таких механизмов передачи энергии, наблюдение которых в традиционных средах практически недостижимо. В частности, подобные искусственные системы позволяют радикальным образом вмешиваться в процессы излучения, многократно увеличивая скорость спонтанного излучения (существенное возрастание фактора Парселла), а также исследовать новые резонансные и интерференционные явления, не свойственные классическим материалам.

Таким образом, целенаправленное управление ЭМ волнами с применением субволновых плазмонных структур и метаструктур является одним из приоритетных

направлений современной науки, связующим звеном между достижениями фундаментальной физики и потребностями прикладной фотоники.

Основной целью представленной диссертационной работы является всестороннее исследование физических особенностей локализации и управления электромагнитными полями в субволновых плазмонных структурах и метаструктурах, выявление лежащих в их основе резонансных механизмов и, как следствие, предложение инновационных структурных решений для применения в современных фотонных и микроволновых устройствах.

Структура и объем диссертации

Общий объем работы составляет 253 страницы. Она состоит из четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 471 наименований. Основные результаты диссертации опубликованы в 21 научной работе и доложены на 11 международных конференциях.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы, научная новизна и практическая значимость, а также представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации рассмотрены различные плазмонные микрорезонаторы с цилиндрической симметрией, представлены теоретические и численные методы расчета, описывающие их дисперсионные соотношения, распределение полей и модовую структуру. Показано, что в тороидальных и V-образных желобковых резонаторах за счет строгой локализации модового объема в наноразмерном диапазоне (порядка одной десятой длины волны) существенно возрастает фактор Парселла, пропорциональный отношению добротности к модовому объему и характеризующий спонтанное излучение. Это обстоятельство открывает широкие возможности для практического применения подобных структур в источниках света, сенсорах, системах обработки квантовой информации и фотонных системах.

Предложена структура полуметаллического микрорезонатора с высокой добротностью, в которой применение плоского металлического слоя с толщиной

порядка скин-слоя обеспечивает эффективное возбуждение резонатора посредством эванесцентной связи в условиях взаимодействия с падающей плоской волной или волноводной модой.

Реализация резонансного условия Фабри-Перо в процессе формирования мод шепчущей галереи в полуцилиндрическом микрорезонаторе обеспечивает высокую добротность системы ($\approx 2.5 \times 10^4$) и формирование мод, локализованных вблизи искривленного периметра резонатора. Это позволяет применять его в высокочувствительных сенсорных системах, например, для регистрации изменений показателя преломления внешней среды с точностью до 10^{-4} .

Во **второй главе** диссертации исследовано явление структурного резонанса в цилиндрических и полосковых метаатомах. Показана возможность управления фазы отклика микроволнового излучения, падающего на системы, состоящие из микрополосок с примесью графита. Проанализированы условия широкополосного и перестраиваемого поглощения в метаструктурах, состоящих из субволновых элементов. Установлено, что благодаря возникающим резонансам в элементарных ячейках исследованных метаструктур субволновых масштабов, возможно обеспечение широкополосного и эффективного поглощения в микроволновом, терагерцовом и оптическом диапазонах.

- В микроволновом диапазоне сечение поглощения микрополосок с примесью графита, являющихся элементами метаповерхности, примерно в 22 раза превышает их геометрическое сечение. В результате удается обеспечить равномерное поглощение, превышающее значение 0.82 в частотном диапазоне 8–12 ГГц, при средних коэффициентах отражения и пропускания 0.13 и 0.05 соответственно.
- В терагерцовом диапазоне комбинация метаповерхности, состоящей из слоев диоксида ванадия с отражающим золотым слоем, которые разделены тонким диэлектрическим слоем толщиной 35 мкм, обеспечивает поглощение выше 0.9 в полосе частот 0.66–1.84 ТГц. Одновременно показана возможность

управления уровнем поглощения за счет температурно-зависимого изменения проводимости диоксида ванадия.

- В инфракрасном диапазоне метаповерхность, состоящая из никелевых полос, отделенная от отражающей плоской металлической поверхности никеля изолирующим слоем диоксида кремния толщиной около 1.8 мкм, демонстрирует широкополосное (8.2–18 мкм) поглощение с коэффициентом выше 0.9. Широкополосное поглощение обусловлено возбуждением резонансных мод с низкой добротностью в слоях никеля.

В **третьей главе** диссертации предложены подходы, основанные на применении магнитодиэлектрических материалов и связанных резонаторов, которые позволяют получить электрически малые антенны с высокой эффективностью и широкой полосой пропускания.

Показано, что:

- Применение магнитодиэлектрических материалов позволяет значительно уменьшить размеры антенны (примерно в 7 раз) и одновременно расширить ее полосу пропускания примерно в 6 раз, обеспечивая создание широкополосной электрически малой антенны. Данный подход позволяет преодолеть ограничение, характерное для проектирования малых антенн и обусловленное их высокой добротностью.
- Благодаря возбуждению резонансных мод шепчущей галереи в полусферических магнитодиэлектрических резонаторах, установленных на микрополосковой антенне, антенна начинает эффективно излучать на значительно более низких частотах — примерно в пять раз ниже изначально согласованных 13 ГГц, на частоте около 2.5 ГГц. При этом сохраняются приемлемо высокие значения коэффициента усиления.

В **четвертой главе** диссертации освещены методы разработки систем гигагерцового и терагерцового диапазонов с малыми омическими потерями, обеспечивающие высокие скорости передачи данных и имеющие широкополосный резонансный отклик. Указанные системы основаны на принципе возбуждения и

распространения поверхностных волн Зоммерфельда в проводящих линиях субволновых размеров.

Установлено, что в проводящих стержнях субволновых размеров возможно возбуждение поверхностных волн с формированием так называемых линий Губо, которые в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах частот обеспечивают малые омические потери, низкую дисперсию и высокую скорость передачи данных. Данное обстоятельство позволяет применять их в процессах манипуляции электромагнитными волнами и обработки сигналов в указанных диапазонах.

Показано также, что системы, состоящие из периодически расположенных проводящих стержней субволновых размеров, демонстрируют многорезонансное поведение, порождая в высших порядках безызлучательные режимы, способствующие строгой локализации волн и формированию сильных резонансных характеристик.

Обнаружено явление сильно дисперсионного пропускания ЭМ излучения в двухслойных метаповерхностях, состоящих из проводящих стержней, и выяснены основные факторы его возникновения. Показано, что микроволновое поле формирует на стержнях поверхностные стоячие волны, которые обеспечивают взаимодействие ближних полей в межстержневых областях. Одновременно установлено, что коэффициент связи между стержнями, расположенными в противоположных слоях, имеет комплексный характер, и наличие его мнимой части приводит к асимметрии резонансной линии и резким изменениям коэффициента пропускания. В результате показано, что подобные двухслойные метаповерхности могут применяться в качестве управляемых широкополосных заграждающих фильтров в ближнем инфракрасном диапазоне.

В заключении обобщены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Представленная диссертация на защиту ученой степени доктора наук, как и всякая работа столь большого объема, неизбежно всегда содержит некоторые сопутствующие недочеты, замеченные и изложенные ниже:

1. В экспериментальном исследовании, представленном в параграфе 1.5 первой главы, рассматривается возможность управления плазмонными волнами с помощью сферического резонатора. Вопрос же формирования коллимированного пучка возбужденной волны поверхностного плазмон-поляритона длиной около 15 мкм нуждается в некотором пояснении.
2. В параграфе 3.3 третьей главы, в рамках задачи миниатюризации антенной решетки было бы желательно рассмотреть и проанализировать также схему питания элементов с использованием микрополосковой линии.
3. В параграфе 3.4 той же главы путем применения магнитодиэлектрического резонатора автор демонстрирует возможность обеспечения работы антенны в более низком частотном диапазоне. Однако, согласно представленным результатам (рис. 3.19 и рис. 3.20), излучение антенны приобретает многополосный характер. В результате этого происходит перераспределение энергии по различным частотным диапазонам, что приводит к снижению эффективности излучения в целевой полосе частот.
4. На рисунке 4.9 (б) резонансные кривые 2 и 3 демонстрируют более существенное расхождение между результатами численных расчетов и экспериментальными данными, чего не наблюдается на графике (а). Причина данного расхождения в диссертации не прокомментирована.

Однако, изложенные выше недочеты не носят принципиальный характер и не снижают высокий научный уровень выполненной работы, в которой представлены инновационные результаты, имеющие высокую значимость как в теоретическом, так и в практическом планах.

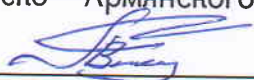
Научная новизна, выносимые на защиту научные положения и полученные результаты автором корректно отражены в реферате. Их достоверность подтверждается опубликованными 32-я работами в виде докладов на научных конференциях и статей в научных изданиях, уважаемых международным научным сообществом.

Заключение

Оценивая представленную к защите диссертационную работу О.С. Арояна на тему «Управление электромагнитными волнами с помощью резонансных субволновых структур» считаю, что она является весомым научным вкладом в развитие направления в радиофизике и радиоэлектронике, связанного как с самими процессами управления электромагнитным полем, так и с разработкой и созданием соответствующих компонент для ее практической реализации. Научный уровень выполненной диссертационной работы и ее корректное оформление всецело удовлетворяют требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, О.С. Ароян, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности А.04.03 — «Радиофизика».

Официальный оппонент:

д.т.н., профессор Института Математики, Физики и Высоких технологий
Российско – Армянского университета,


_____ В. Г. Аветисян

Подпись _____ В. Г. Аветисяна заверяю:

ученый секретарь Российско – Армянского университета,

к.ф.н., доцент _____ Р.С. Касабабова

«01» _____ 2026 г.

