

УДК 535.13

ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ДИПОЛЬНЫХ ОТКЛИКОВ НА ИНТЕРФЕРЕНЦИЮ КОЛЛЕКТИВНЫХ МОД В ЦЕПОЧКАХ НАНО-РЕЗОНАТОРОВ

Полева М.А. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, доцент Савельев Р.С.
(Университет ИТМО)

Введение. В последнее десятилетие у исследователей в области нанопотоники возник существенный интерес к изучению оптических свойств диэлектрических нанорезонаторов с высоким показателем преломления, представляющих из себя инструмент для эффективного управления взаимодействием света и вещества на наноуровне [1]. В то время как добротность одиночного нанорезонатора довольно мала, цепочки диэлектрических нанорезонаторов с субволновым периодом поддерживают коллективные моды с высокими добротностями, которые использовались в недавних работах для достижения эффективной полностью оптической модуляции и лазерной генерации [2]. Недавно было показано, что добротность таких коллективных мод в цепочках холодных атомов, характеризующихся дипольным откликом, может быть значительно повышена за счет взаимодействия двух коллективных мод через континуум излучения на периодах около 0.2λ , где λ это длина волны дипольного резонанса в одиночном атоме [3]. Подобная модель взаимодействующих дипольных рассеивателей, однако, слабо подходит для описания цепочки реальных диэлектрических нанорезонаторов, в которых существенную роль играют как электрический, так и магнитный дипольные отклики, а также эффекты, к которым приводит взаимодействие между ними [4]. Заметим также, что размеры кремниевого нано-резонатора, имеющего дипольный отклик в оптическом диапазоне, должен быть около 0.25λ , что с учетом текущих технологических возможностей делает нереалистичным экспериментальное подтверждение наличия высокодобротных состояний для цепочки рассеивателей с дипольным резонансом одного типа. В данной работе мы проводим теоретическое исследование высокодобротных состояний в цепочках нанорезонаторов, которые поддерживают оба типа дипольных резонансов, а также анализируем диаграммы направленности подобных состояний в дальней зоне.

Основная часть. Для исследования цепочки нанорезонаторов удобно построить дипольную модель, которая будет отражать их взаимодействие между собой. Параметры дипольных электрической и магнитной поляризуемостей для реалистичных резонаторов могут быть извлечены из моделирования их отклика в пакетах численного моделирования. При этом для магнитного дипольного отклика поляризуемость определяются только дипольным резонансом, тогда как для электрического - дипольным резонансом и электростатическим откликом. Построенная таким образом модель довольно точно учитывает электромагнитный отклик резонаторов и при этом позволяет быстро находить собственные моды цепочки, в отличие от моделирования в пакетах полноволнового моделирования.

Для численного исследования характеристик собственных мод и влияния на них взаимодействия магнитного и электрического резонансов в цепочках резонаторов, мы использовали программное обеспечение Matlab. Мы показали, что для бесконечной цепочки для любого периода между соседними резонаторами система имеет два решения. При этом верхняя из двух дисперсионных кривых стремится к численному решению в цепочке с чисто электрическим дипольным откликом. Кроме того, при определенно подобранных параметрах системы дисперсия становится немонотонной, то есть в системе имеется две коллективные моды на одинаковых частотах. Расчеты показали, что в системе взаимодействующих диполей двух типов изменение дисперсии происходит на периодах, превышающих типичное для дипольной модели значение 0.24λ [3], и может достигать до 0.34λ при определенном соотношении резонансных частот электрического и магнитных диполей.

Используя параметры системы, полученные при изучении бесконечных цепочек нанорезонаторов, при которых дисперсия становится немонотонной, мы с помощью построенной нами дипольной модели также изучили изменение добротности конечных систем. Мы показали, что резонансное значение добротности достигается на периодах, для которых дисперсия становится немонотонной, при этом добротность зависит от количества резонаторов в системе N как N^7 . Также было показано, что при достижении наибольшего значения добротности в дальнем поле большая часть излучения уходит в боковом направлении, при этом диаграмма направленности для состояния с наибольшим значением добротности оказывается наиболее узконаправленной.

Выводы. В данной работе была разработана модель, описывающая электромагнитные свойства цепочки диэлектрических резонаторов с одновременным магнитным и электрическим дипольными откликами. Мы показали, что характеристики собственных мод в такой модели существенно отличаются от характеристик в модели с дипольным откликом одного типа. При этом построенная модель является существенно более точной при описании свойств реалистичных резонаторов. Мы установили, что добротности собственных мод в конечной цепочке резонаторов зависят от их количества как N^7 , при этом диаграмма направленности оказывается наиболее узконаправленной при значении периода, для которого достигается максимум добротности.

Список использованных источников:

1. Kuznetsov A. I. et al. Optically resonant dielectric nanostructures //Science. – 2016. – Т. 354. – №. 6314. – С. aag2472.
2. Hoang T. X. et al. Collective Mie resonances for directional on-chip nanolasers //Nano Letters. – 2020. – Т. 20. – №. 8. – С. 5655-5661.
3. Kornovan D. F. et al. High-Q localized states in finite arrays of subwavelength resonators //ACS Photonics. – 2021. – Т. 8. – №. 12. – С. 3627-3632.
4. Sirmaci Y. et al. All-dielectric Huygens' meta-waveguides for resonant integrated photonics. – 2022.