

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 177658

Нелинейная диэлектрическая наноантенна

Патентообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики" (Университет ИТМО) (RU)*

Авторы: *Зограф Георгий Петрович (RU), Макаров Сергей Владимирович (RU), Зуев Дмитрий Александрович (RU), Миличко Валентин Андреевич (RU)*

Заявка № 2016151225

Приоритет полезной модели 26 декабря 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 05 марта 2018 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 26 декабря 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Иевлев





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B82B 1/00 (2017.08); H01Q 1/00 (2017.08)

(21)(22) Заявка: 2016151225, 26.12.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
26.12.2016

Дата регистрации:
05.03.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 26.12.2016

(45) Опубликовано: 05.03.2018 Бюл. № 7

Адрес для переписки:

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49,
Университет ИТМО, ОИС и НТИ

(72) Автор(ы):

Зограф Георгий Петрович (RU),
Макаров Сергей Владимирович (RU),
Зуев Дмитрий Александрович (RU),
Миличко Валентин Андреевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский
национальный исследовательский
университет информационных технологий,
механики и оптики" (Университет ИТМО)
(RU)

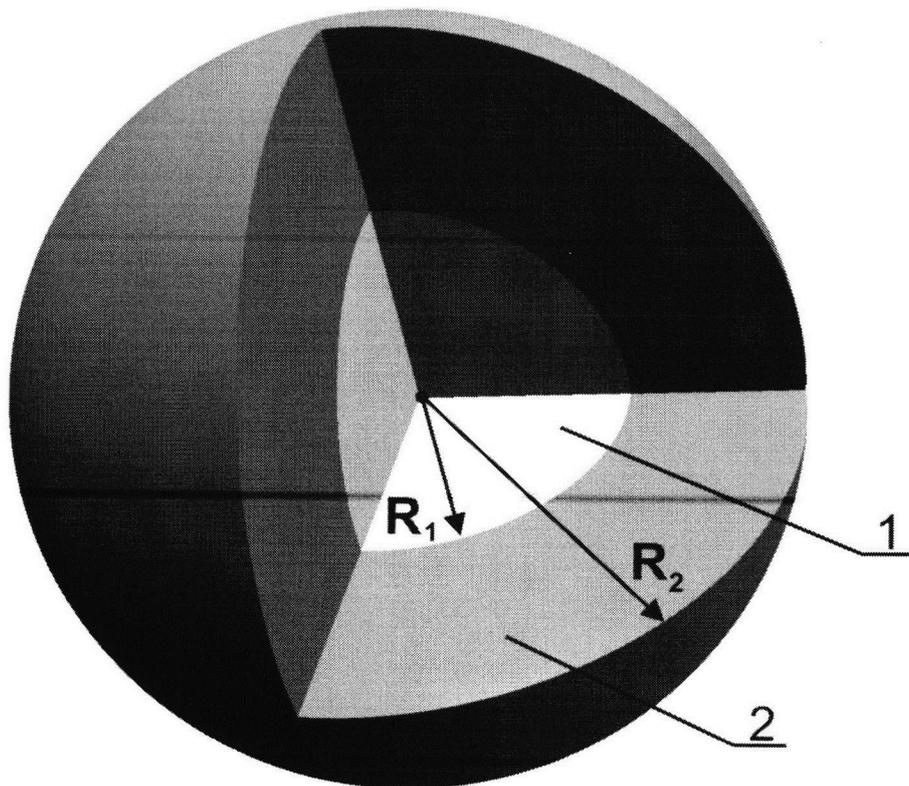
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: Alexandr E. Krasnok, Pavel A.
Belov, Andrey E. Miroshnichenko, Arseniy I.
Kuznetsov, Boris S. Luk'yanchuk, Yuri S.
Kivshar, Progress in Compact Antennas, глава
6, 10.09.2014. Manuel Decker, Isabelle Staude,
Resonant dielectric nanostructures: a low-loss
platform for functional nanophotonics, Journal
of Optics, Volume 18, Number 10, 08.09.2016.
R (см. прод.)

(54) **Нелинейная диэлектрическая наноантенна**

(57) Реферат:

Нелинейная диэлектрическая наноантенна относится к области физики и служит для преобразования длины электромагнитной волны падающего излучения и может быть использована для широкополосного фотовозбуждения окружающих ее нанообъектов и для эффективной генерации когерентного излучения на кратных частотах. Наноантенна состоит из диэлектрического резонатора, выполненного в виде шара радиусом R_1 , где $60 \text{ нм} < R_1 < 200 \text{ нм}$, резонатор выполнен из материала с высоким

показателем преломления $n > 3$ и помещен в однородный сферический металлический слой с внешним радиусом R_2 , оболочка выполнена из материала отрицательной действительной частью диэлектрической проницаемости и низкой мнимой ее частью, а величина R_2 лежит в пределах $R_1 < R_2 < 2R_1$. Заявляемая полезная модель решает задачу по повышению коэффициента преобразования энергии падающего излучения в излучение на других частотах и увеличению спектра генерируемых длин волн. 1 ил.



(56) (продолжение):

E Noskov, A E Krasnok, Yu S Kivshar, Nonlinear metal-dielectric nanoantennas for light switching and routing, New Journal of Physics 14, 04.09.2012. WO 2016154657 A1, 06.10.2016.

R U 1 7 7 6 5 8 U 1

R U 1 7 7 6 5 8 U 1

Нелинейная диэлектрическая наноантенна относится к области физики и служит для преобразования длины электромагнитной (ЭМ) волны падающего излучения, например инфракрасного лазерного излучения, излучение видимого диапазона, и может быть использована для широкополосного фотовозбуждения (фотолюминесценция) окружающих ее нанообъектов (молекул красителей, квантовых точек, резонансных наноструктур и др.) и для эффективной генерации когерентного излучения на кратных частотах (высшие гармоники).

Известная нелинейная диэлектрическая наноантенна (Maxim R. Shcherbakov et al. "Enhanced Third-Harmonic Generation in Silicon Nanoparticles Driven by Magnetic Response", Nano Lett., vol. 14, 6488-6492, 2014). Данная наноантенна представляет собой диск из кремния с наиболее оптимальной конфигурацией для генерации третьей гармоники (ТГ): диаметр $d=360$ нм и высота $h=260$ нм. Однако стоит отметить, что приведенная нелинейная наноантенна не позволяет эффективно генерировать широкополосное излучение в видимом диапазоне длин волн.

Наиболее близким аналогом предлагаемой полезной модели и выбранным в качестве прототипа является нелинейная диэлектрическая наноантенна на основе кремниевой наносферы (R.A. Dmitriev et al. "Resonant Raman scattering from silicon nanoparticles enhanced by magnetic response", Nanoscale, 8(9), 5045, 2016). В приведенной работе изучалось усиление комбинационного рассеяния света на таких наноантеннах, то есть усиление генерации излучения на фотонах с другой частотой излучения. Такой эффект достигался за счет выбора параметров наносферы таким образом, что длина волны падающего когерентного лазерного излучения совпадала с собственной длиной волны магнитного дипольного (МД) резонанса наноантенны. Это позволяет значительно усилить эффективность комбинационного рассеяния света наноантенной. В данной работе использовался HeNe (гелий-неоновый лазер) с рабочей длиной волны 632.8 нм. В соответствии с изложенными выше условиями был подобран оптимальный диаметр кремниевой наносферы - 158 нм. Для такой наноантенны экспериментально наблюдалось усиление комбинационного рассеяния до 140 раз по сравнению с нерезонансными значениями. Недостатками известной диэлектрической наноантенны является низкий коэффициент преобразования энергии падающего излучения в энергию излучения на другой частоте, а также величина спектральной отстройки является недостаточно сильной для большинства биомедицинских задач, использующих функциональные наночастицы.

Задачей, на решение которой направлена данная полезная модель, является повышение коэффициента преобразования энергии падающего излучения в излучение на других частотах, а также увеличение спектра генерируемых длин волн.

Поставленная задача решается за счет достижения технического результата, заключающегося в оптимизации геометрических параметров и используемых материалов для нелинейной диэлектрической наноантенны, соответствующей повышению ее эффективности. Данный технический результат достигается тем, что нелинейная диэлектрическая наноантенна диэлектрического резонатора, выполненного в виде шара радиусом R_1 , где $60 \text{ нм} < R_1 < 200 \text{ нм}$, резонатор выполнен из материала с высоким показателем преломления $n > 3$, помещенного в однородный сферический металлический слой с внешним радиусом R_2 , оболочка которого выполнена из материала с отрицательной действительной и малой мнимой частями диэлектрической проницаемости, а величина R_2 лежит в пределах $R_1 < R_2 < 2R_1$. Конфигурация нелинейной диэлектрической наноантенны приводит к эффективному усилению возбуждаемых

внутри диэлектрического резонатора высших мультипольных моментов электромагнитного поля. Параметры нелинейной диэлектрической наноантенны подобраны для наиболее эффективного возбуждения магнитной дипольной моды диэлектрического резонатора и электрической дипольной (ЭД) моды металлической оболочки падающим электромагнитным излучением. За счет положительной интерференции мод электромагнитных полей резонатора и оболочки достигается значительное повышение эффективности генерации новых частот.

5
10
15
20
25
30
35
40
45

Сущность заявляемой полезной модели поясняется следующим. В качестве материальной составляющей сферического резонатора субволнового размера используются диэлектрические материалы с высоким значением показателя преломления $n > 3$. В качестве примера таких материалов можно указать кремний. При взаимодействии такого резонатора с падающей ЭМ волной возбуждаются электрический и магнитный дипольные моменты, то есть мультипольные моменты первого порядка. Усиление полей на резонансных значениях частот для ЭД и МД может достигать нескольких десятков. Однако помещение диэлектрического резонатора в однородный сферический металлический слой приводит к еще большему локальному усилению полей вблизи наноантенны, в результате, усиливая излучение на кратных частотах (вторая гармоника (ВГ), третья гармоника) и увеличивая интенсивность широкополосного излучения от диэлектрического резонатора. Высокий уровень направленности излучения нелинейной диэлектрической наноантенны также достигается за счет положительной интерференции возбуждаемых моментов электрической и магнитной природы. Материалы поглощают падающее излучение, которое усиливается и маршрутизируется наноантенной, и преобразуют его в новые частоты. В результате от наноантенны происходит излучение на новых частотах, имеющее коэффициент преобразования до 1% в широком диапазоне излучаемых длин волн, что больше по сравнению с известными металлическими и диэлектрическими наноантеннами, включая наиболее близкий аналог. Условие выбора показателя преломления диэлектрического материала обосновывается необходимостью возбуждения в резонаторе резонанса Ми в видимом диапазоне длин волн с сохранением субволнового размера наноантенны. В качестве материальной составляющей внешнего металлического слоя можно привести материалы с отрицательной действительной и малой мнимой частью диэлектрической проницаемости. В качестве примера таких материалов можно указать золото.

Другими словами, параметры нелинейной диэлектрической наноантенны подбираются таким образом, чтобы частота ЭД резонанса металлической оболочки совпадала с частотой падающей плоской электромагнитной волны, тем самым, усиливая локальное электромагнитное поле за счет ЭД резонанса, что усиливает генерацию кратных гармоник и широкополосного излучения. А совмещение частоты МД резонанса диэлектрического резонатора и частот генерируемого излучения позволит увеличить коэффициент преобразования частоты лазерного излучения и способствует значительному улучшению направленности излучения. В оптической области частот этим условиям удовлетворяют целый набор материалов. В качестве примера таких материалов для изготовления диэлектрического резонатора можно привести кристаллический кремний. В свою очередь, в качестве примера материалов для изготовления металлического слоя можно привести золото. Условия, наложенные на величину радиуса металлического сферического слоя R_2 и радиуса резонатора R_1 - 60 нм $< R_1 < 200$ нм, $R_1 < R_2 < 2R_1$, определены рядом аналитических и численных расчетов, а также экспериментальными исследованиями.

Сущность полезной модели поясняется на фиг., где приведена геометрическая

структура нелинейной диэлектрической наноантенны. Нелинейная диэлектрическая наноантенна включает резонатор 1 из диэлектрического материала, выполненный в виде шара радиусом R_1 , и однородного металлического сферического слоя 2 с внешним радиусом R_2 . Для удобства восприятия геометрии из резонатора и внешнего слоя
5 вырезан прямоугольный сектор.

Нелинейная диэлектрическая наноантенна работает следующим образом. В силу того, что преобразование частот падающего излучения должно происходить в нелинейном режиме, нелинейная диэлектрическая наноантенна должна облучаться лазерным
10 импульсом (на фиг. не показан) с большой интенсивностью (не менее 100 МВт/см^2). Преобразование данного импульса в когерентное излучение на кратных частотах происходит преимущественно в металлическом слое 2 за счет наведения нелинейной поляризации второго, третьего и более высоких порядков. В свою очередь, генерация некогерентного широкополосного излучения происходит из-за многофотонного
15 поглощения падающего света и быстрого переизлучения до полной термализации сгенерированных свободных носителей в зоне проводимости. Помимо этого, падающая на нелинейную диэлектрическую наноантенну электромагнитная волна возбуждает в металлической оболочке 2 ЭД, который усиливает электромагнитное поле внутри резонатора 1, тем самым усиливая как широкополосное излучение, так и генерацию
20 кратных гармоник от диэлектрического резонатора 1.

В качестве примера конкретной реализации предлагается наноантенна, состоящая из кремниевого резонатора радиусом R_1 80 нм и золотой оболочки с внешним радиусом R_2 140 нм. Данные параметры подобраны для наиболее эффективного преобразования
25 лазерных импульсов на длинах волн в диапазоне 750-1500 нм с длительностями в диапазоне 10-1000 фс. Усиление электрического поля и положения резонансов были рассчитаны в профессиональном программном пакете для электродинамических численных вычислений CST Microwave Studio 2015. Материал - микрокристаллический кремний, который подобран для эффективной фотолюминесценции в видимом диапазоне 400-900 нм, а также эффективной генерации третьей и второй гармоник, что
30 неоднократно подтверждено в литературе.

Таким образом, заявляемая полезная модель решает задачу по повышению коэффициента преобразования энергии падающего излучения в излучение на других частотах и увеличение спектра генерируемых длин волн.

35 (57) Формула полезной модели

Нелинейная диэлектрическая наноантенна, состоящая из диэлектрического резонатора, выполненного в виде шара радиусом R_1 , резонатор выполнен из материала с высоким показателем преломления $n > 3$, отличающаяся тем, что $60 \text{ нм} < R_1 < 200 \text{ нм}$, резонатор помещен в однородный сферический металлический слой с внешним радиусом
40 R_2 , оболочка которого выполнена из материала с отрицательной действительной и малой мнимой частями диэлектрической проницаемости, а величина R_2 лежит в пределах $R_1 < R_2 < 2R_1$.

45

Нелинейная диэлектрическая наноантенна

