

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: mathmod.esrae.ru/42-168

Ссылка для цитирования этой статьи:

Селина Н.В., Хить Я.В., Иващенко Н.Г. Смещение перетяжки гауссова пучка в многослойной металлодиэлектрической структуре // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2023. № 2

УДК 537.876

DOI:10.24412/2541-9269-2023-2-29-32

СМЕЩЕНИЕ ПЕРЕТЯЖКИ ГАУССОВА ПУЧКА В МНОГОСЛОЙНОЙ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ

Селина Н.В., Хить Я.В., Иващенко Н.Г.

Кубанский государственный технологический университет

Краснодар, ул. Московская 2

Аннотация. Предложен способ плавного изменения положения перетяжки гауссова пучка с использованием многослойной металлодиэлектрической двухкомпонентной структуры при соотношении диэлектрических проницаемостей металла и диэлектрика: $\epsilon_d \ll |\epsilon_m|$.

Ключевые слова: гауссов пучок, перетяжка гауссова пучка, многослойная линза Пендри.

DISPLACEMENT OF THE GAUSSIAN BEAM CONSTRICTION IN A MULTILAYER METAL-DIELECTRIC STRUCTURE

Selina N.V., Khit Ya.V., Ivashchenko N.G.

Kuban State Technological University

Krasnodar, Moskovskaya str. 2

Abstract. A method for smoothly changing the position of the Gaussian beam binding using a multilayer metal-dielectric two-component structure with the ratio of the permittivity of metal and dielectric: $\epsilon_d \ll |\epsilon_m|$ has been proposed.

Keywords: Gaussian beam, Gaussian beam constriction, multilayer Pendry lens.

1. Введение

С развитием современных высоких технологий формируется новый класс оптоэлектронных устройств микромасштаба. Такая тенденция ведет к миниатюризации приборов с одновременным улучшением их качества и эффективности посредством использования нанотехнологий.

Между тем, перед учеными сегодня стоят задачи, уже решенные в традиционных оптических устройствах, для получения необходимого результата эксперимента или практического применения. Так в работах [1, 2] приведены оптические схемы, обеспечивающие непрерывное изменение положения перетяжки гауссова пучка (лазерного излучения) [3] без изменения радиуса перетяжки. Там применялись линзы с перестраиваемым фокусом. Изобретение относится к области оптического приборостроения и может быть использовано в приборостроении, медицине и других областях науки и техники, где возникает необходимость непрерывного и плавного изменения положения перетяжки лазерного гауссова пучка при обеспечении постоянства ее диаметра.

В настоящей статье предложено для достижения заявленного результата вместо классической линзы с перестраиваемым фокусом использовать многослойную линзу Пендри [4] (устройство наномасштаба) согласно теории, разработанной в статье [5]. Представлен расчет изменения положения перетяжки гауссова пучка при распространении его в многослойной периодической структуре с двумя слоями в ячейке, которые имеют различные по знаку диэлектрические проницаемости. Величина смещения перетяжки определяется геометрическими и материальными параметрами слоев.

2. Условие задачи и теоретический расчет

Как известно, лазерный пучок теоретически предполагает гауссово распределение интенсивности в поперечном сечении [3]. Интенсивность определяется формулой:

$$J(r, z) = \exp\left(\frac{nk_0^2 r^2}{ik_0 z + \text{const}} + izk_0 n\right)$$

где r – радиальная поперечная координата в пучке, z – продольная координата, n – показатель преломления среды распространения пучка, k_0 – волновой вектор излучения в свободном пространстве.

В случае неоднородной среды – многослойной периодической металлодиэлектрической структуры с двумя компонентами в ячейке, для нормального падения луча на структуру, справедлива формула [5]:

$$J(r, z) = \exp\left(\frac{\varepsilon n k_0^2 r^2}{\frac{i\varepsilon}{\varepsilon_d} k_0 z + \text{const}} + ib(z)\right)$$

Где ε_d – диэлектрическая проницаемость диэлектрической компоненты,

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} \varepsilon_d, z = n(d_d + d_m) + \Delta_d \\ \varepsilon_m, z = l(d_d + d_m) + d_d + \Delta_m \end{cases}$$

ε_m – диэлектрическая проницаемость металлической компоненты, d_d и d_m – толщины диэлектрического и металлического слоев соответственно, $0 < \Delta_m < d_m$, $0 < \Delta_d < d_d$, $l, n = 1, 2, 3 \dots N$, N – число ячеек в структуре. Функция $b(z)$ задана рекуррентной формулой:

$$b(z) = \begin{cases} k_m \Delta_m + \arctan\left(\frac{\varepsilon_m k_d}{\varepsilon_d k_m} \tan(b(n(d_m + d_d)))\right), z = n(d_d + d_m) + \Delta_d \\ k_d \Delta_d + \arctan\left(\frac{\varepsilon_d k_m}{\varepsilon_m k_d} \tan(b(l(d_m + d_d) + d_m))\right), z = l(d_d + d_m) + d_d + \Delta_m \end{cases}$$

$$k_d = \sqrt{\varepsilon_d k_0^2 - k_x^2} \quad k_m = \sqrt{\varepsilon_m k_0^2 - k_x^2}$$

k_x – продольная слагаемая компонента волнового вектора луча.

По формуле (1) рассчитаем величину смещения перетяжки гауссова пучка при распространении его в единичной ячейке многослойной металлодиэлектрической структуры в случае нормального падения на нее пучка.

$$\frac{k_0^2 r^2}{ik_0 \left(z_1 - z_0 - \frac{|\varepsilon_m|}{\varepsilon_d} (z_2 - z_1) + z - z_2 \right) + C} = \frac{k_0^2 r^2}{ik_0 \left(z - z_0 - \left(\frac{|\varepsilon_m|}{\varepsilon_d} + 1 \right) d_m \right) + C},$$

где C определяется параметрами пучка, z_1 – координата границы между первым (диэлектрическим) и вторым (металлическим) слоями ячейки, z_2 – граница между вторым слоем ячейки и первым (диэлектрическим) слоем следующей ячейки.

Таким образом, в одной ячейке перетяжка смещается вперед на расстояние: $d_m(|\varepsilon_m|/\varepsilon_d + 1)$. Изменение параметров структуры непосредственно влияет на эту величину. Увеличение смещения возможно получить, во-первых, если увеличить число слоев, но еще более существенный фактор при наноразмере толщин слоев – выбрать металл и диэлектрик с материальными параметрами, удовлетворяющими неравенству: $\varepsilon_d \ll |\varepsilon_m|$.

3. Выводы

Задача смещения перетяжки гауссова пучка решается применением в оптической схеме периодической металлодиэлектрической наноструктуры с двумя слоями в ячейке. В отличие от суперлинзы Пендри, применяемой для

получения изображения с характерными параметрами: $\varepsilon_d = 1$, $\varepsilon_m = -1$, здесь для получения существенного результата должно выполняться условие: $\varepsilon_d \ll |\varepsilon_m|$.

Литература

1. J. , M. Lee, A. Morales, T. Karg, T. Esslinger, T. Donner. Optical transport of ultracold atoms using focus-tunable lenses // New J. Phys. 16093028 (2014)
2. Antonin Miks and Pavel Novak // Paraxial properties of three-element zoom system for laser beam expanders based on tunable-focus lenses // Opt. Express 23, 15635-15640 (2015)
3. Пахомов И.И., Цибуля А.Б. Расчет оптических систем лазерных приборов. М.:Радиоисвязь,1986.152с.
4. Дорофеенко А.В. Асимметричная многослойная линза Пендри//Радиотехника и электроника, 2007, том 52, № 9, с. 1116-1121
5. Селина Н.В. Дифракция света в плоскопараллельной слоистой структуре с параметрами линзы Пендри// УФН 192 443–452 (2022)