

06:07;11

Особенности распределения электромагнитной энергии в диэлектрической сфере с оптическими неоднородностями на ее поверхности

© В.И. Тригуб

E-mail: matinform@yandex.ru

Поступило в Редакцию 22 июля 2011 г.

На основе качественного теоретического анализа показано, что неоднородности на поверхности однородной диэлектрической сферы, размеры которых не превышают длины волны света, способствуют накоплению энергии модами шепчущей галереи.

В настоящее время актуальны исследования в области полупроводниковых лазеров на модах шепчущей галереи (МШГ), поскольку МШГ-резонаторы обладают высокой добротностью [1]. Однако с физической и технической точек зрения представляет интерес весь комплекс твердотельных МШГ-лазеров, включая и твердотельные МШГ-лазеры с оптической накачки. Последний вид МШГ-лазеров интересен, прежде всего из-за разнообразия геометрических форм резонаторов [2]. Свойства МШГ-резонаторов пока еще не достаточно хорошо исследованы. В данной работе будет показано, что шероховатость (или неоднородности) на поверхности прозрачной однородной диэлектрической сферы способствует накоплению энергии модами ШГ, если ширина и высота выступов шероховатости не превышает длины волны света (подобная шероховатость достаточна для рассеяния света [3]). Автору неизвестны

работы, в которых исследовался бы данный эффект. Поэтому данная работа посвящена изучению этой темы. В своих исследованиях мы будем опираться на свойства лазера с активным элементом в виде диэлектрической сферы $\text{CaF}_2 \cdot \text{Sm}^{2+}$, помещенной в среду с меньшим показателем преломления (жидкий водород) [4]. Выбор данного лазера обусловлен тем, что диэлектрическая сфера имеет на своей поверхности неоднородности (даже царапины) достаточной величины, чтобы менять картину возбужденных колебаний [4]. Кроме того, в сфере, несмотря на неоднородности, на поверхности генерируются вырожденные МШГ очень высокой добротности [4]. Для исследования распределения электромагнитной энергии в диэлектрической сфере (с неоднородностями на ее поверхности) мы воспользуемся методом геометрической оптики, как наиболее простым и наглядным. Если поверхность прозрачной диэлектрической сферы идеально гладкая, то отдельные моды (или лучи с разными углами падения) распространяются в ней независимо друг от друга. Однако наличие неоднородностей на поверхности сферы приводит к связи между модами [2]. В представлениях геометрической оптики это значит, что луч с углом падения ϕ_1 , преломившись на неоднородности, меняет угол распределения на ϕ_2 . Моды, при наличии связи, обмениваются энергией [2]. В работе [5] был получен важный результат: шероховатость с шириной и высотой выступов, меньшей или равной длине волны света, не снижает добротности кольцевых мод, расположенных вблизи поверхности сферы (МШГ). На языке геометрической оптики это означает, что луч света, падающий почти касательно на шероховатую поверхность, отражается от нее, как от зеркала, а с точки зрения волновой оптики это значит, что электромагнитная волна туннелирует сквозь выступы шероховатости [5]. Этот эффект объясняет высокую добротность мод ШГ в диэлектрической сфере при наличии неоднородностей на ее поверхности [5] и позволяет рассматривать поверхность с указанными выше неоднородностями как идеально гладкую для мод ШГ.

В случае точной сферической симметрии резонатора, моды ШГ, даже при наличии вышеуказанных неоднородностей, вырождены [4,5]. Поскольку нами рассматривается шероховатость, представляющая собой ансамбль выступов разного вида, но не превышающих по ширине и высоте длину волны света, причем геометрические характеристики выступов случайны, то лучи, преломившись на подобных неоднородностях, меняют величину угла распределения также случайным образом.

Следовательно, вероятность того, что при рассеянии на неоднородностях некоторые лучи приобретут угол отражения, соответствующий углу отражения лучей, распределяющих вблизи поверхности сферы (т. е. соответствующих модам ШГ), не равна нулю. В этом случае энергия мод ШГ должна пополняться по закону геометрической прогрессии:

$$W = W_0\varepsilon(1 + X^2 + X^3 + \dots + X^N + \dots) = W_0\varepsilon/(1 - X) = W_0, \quad (1)$$

где W_0 — энергия, принадлежащая кольцевым модам, отличным от мод ШГ; ε — доля энергии (суммарная), поступающая в моды ШГ от других кольцевых мод, в результате рассеяния на неоднородностях, за проход; $X = 1 - \varepsilon$ ($0 < X < 1$); N — количество отражений.

При выводе (1) мы не учитывали энергетические потери сферой, так как диэлектрическая сфера постоянно облучается [4]. Из (1) следует, что энергия W_0 , принадлежащая кольцевым модам, отличным от мод ШГ, полностью переходит в энергию W мод ШГ, т. е. имеет место накопление энергии модами ШГ. Таким образом, в диэлектрической сфере с неоднородностями на поверхности все кольцевые моды, за исключением мод ШГ, будут затухающими.

Список литературы

- [1] Ораевский А.Н. // Квант. электрон. 2002. Т. 32. В. 2. С. 377.
- [2] Бирнбаум Дж. Оптические квантовые генераторы. М.: Советское радио, 1967. 360 с.
- [3] Рытов С.М., Крайцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую физику. Часть 2. Случайные поля. М.: Наука, 1978. 464 с.
- [4] Garret C.G.B., Kaiser W., Bond W.L. // Phys. Rev. 1961. V. 124. N 6. P. 1807.
- [5] Тригуб В.И. // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 2. С. 150.