

Временная динамика фотонных мод периодических структур на краях запрещенной зоны

Максимов В.А.¹

Научный руководитель – д.ф.-м.н., Рыбин М.В.¹

¹Университет ИТМО

В этой работе средствами Meep FDTD Simulation был выполнен расчет прохождения одиночного импульса излучения (центральная частота $f = 282$ ТГц, его ширина на полувысоте $\Delta f = 150$ ТГц) через слоистые периодические структуры с контрастами $\gamma = 2 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1}$ от 0.46 до 0.67 и числом пар слоев n_{period} от 10 до 20. Это позволило изучить динамику локализованного в объёме структуры излучения. Полученные данные дают оценить время затухания и добротность состояний на краях запрещенных зон. Были проведены теоретические оценки добротности в двух-волновом приближении. Выбранная методика изучения локализации даёт результат, хорошо согласующийся с теорией.

Ключевые слова: слоистые периодические структуры, локализация, время затухания, добротность состояний.

Введение

Оптические свойства слоистых периодических структур достаточно обширная и хорошо изученная тематика. Они наиболее хорошо исследованы по причине их важной роли в прикладной физике: сильно-отражающие покрытия (или анти-отражающие), брэгговские зеркала, фазосдвигающие приборы и т.д. Существуют теоретические работы, посвященные методам численного расчета как дисперсионных характеристик для структур бесконечной длины, так и спектральных характеристик пропускания (отражения) для структур конечного размера, и других важных параметров (например, [1]).

Наиболее интересная тематика – сильная локализация фотонов в структурах подобного рода, она теоретически описана, и объясняется наличием высокой плотности состояний $\rho(\omega) = dk/d\omega$ на краях запрещенных зон [2]. Такие оптические свойства имеют прикладное применение, например, была предложена концепция распределенного лазера с обратной связью [3], [4].

Локализация излучения в этих структурах тоже хорошо изученная тема, однако все выше перечисленные исследования проводились только для случая гармонических осцилляций $E \sim e^{-i\omega t}$, где временная зависимость есть только во множителе $e^{-i\omega t}$. Современная вычислительная техника позволяет получить динамику распространения излучения в структурах, чего ранее сделано не было, и что реализовано этой работе.

В последнее время активно ведутся исследования оптических свойств квазикристаллов [5], [6], в частности, благодаря численному моделированию, была обнаружена сильная локализация. В будущем (в рамках следующего исследования) я планирую изучить эту локализацию, но перед этим считал необходимым отработать методику расчета полей на более простых и уже хорошо изученных структурах, а именно на выше упомянутых.

В этой работе программным пакетом Meep FDTD Simulation [7] были рассчитаны меняющиеся во времени и координатах поля. Полученные данные позволили оценить время затухания локализованного излучения и его спектральный состав, добротности структур.

Теоретические оценки хорошо согласуются с результатами расчета, что дает возможность дальнейшего исследования локализации излучения в более сложных структурах.

Модель

Одиночный импульс излучения (центральная частота $f = 282$ ТГц, его ширина на полувысоте $\Delta f = 150$ ТГц) падает на структуру конечной длины перпендикулярно попарно чередующимся слоям с показателями преломления $n_1 = 1$, n_2 от 1.26 до 1.4 и толщинами

$$L_1 = 266 \text{ нм} \text{ и } L_2 = \frac{L_1}{4n_2}.$$

За структурой и перед ней по направлению распространения излучения расположены детекторы электрического поля, которые записывают сигналы $E(t)$. Обработка сигналов позволяет получить спектры отражения, пропускания структур и динамику локализованного в объеме структуры и выходящего наружу излучения и спектральный состав.

Результаты

В качестве основного результата представлена зависимость времени затухания локализованного излучения τ от контраста γ , числа пар слоев и добротности состояний Q на границах запрещенных зон от числа пар слоев.

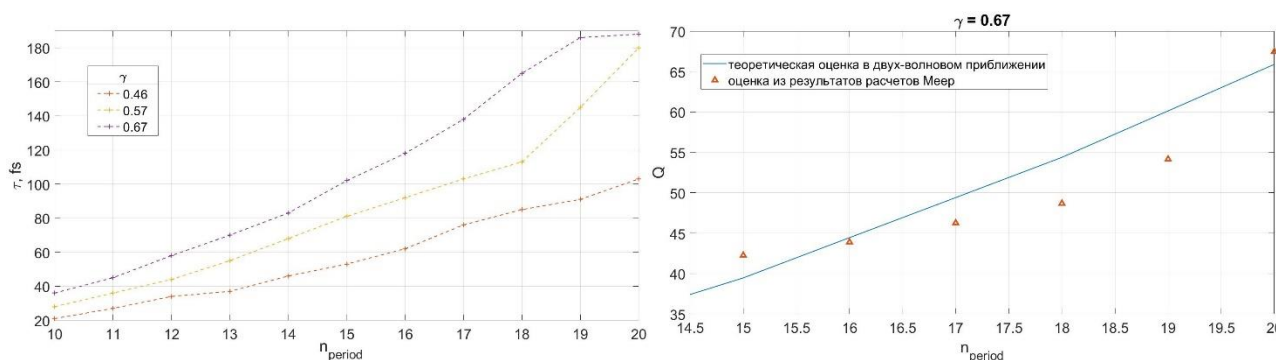


Рис. 1 Время затухания локализованного излучения τ и добротности состояний на границах запрещенной зоны Q в зависимости от её параметров.

Заключение

В этой работе было рассчитано прохождение одиночного импульса излучения через слоистые периодические структуры с различными параметрами. Из рассчитанных данных были получены времена затухания локализованного излучения и добротность состояний на границах запрещенной зоны в зависимости от параметров структуры.

Полученные результаты показывают, что время затухания локализованного излучения возрастает с увеличением числа пар слоев и контраста. Анализ рассчитанных данных согласуется с теорией, что позволяет считать выбранную методику исследования локализации корректной, и её можно использовать для дальнейших работ.

Литература

- [1] JOSA, Vol. 67, Issue 4, pp. 423 – 438 (1977)
- [2] Phys. Rev. Lett., 58, 2486 (1987)
- [3] Appl. Phys. Lett. 18, 152 (1971)
- [4] Journal of Applied Physics 43, 2327 (1972)
- [5] Advanced Optical Materials, vol.8, pp. 2001170 (2020)
- [6] Nature Physics volume 13, pages 363–368 (2017)
- [7] <https://meep.readthedocs.io/en/latest/>