

Планарный метаматериал на основе фотонного кристалла и пленки с наноотверстиями: асимметрия пропускания и оптический диод

Калмыков А.С.^{1,2}, Мелентьев П.Н.¹, Афанасьев А.Е.¹, Балыкин В.И.¹

¹Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

²Московский Государственный Физико-Технический Институт (Государственный Университет)

Оптический диод – важный элемент в построении лазерных систем и систем оптической передачи информации. Оптический диод (изолятор) необходим при создании лазерных систем, обладающих узкой и стабильной спектральной линией, для защиты диодного лазера от обратных отражений, так как отраженный сигнал, попадая в резонатор лазера, способен индуцировано усиливаться, приводя к паразитному сигналу.

Традиционно, принцип работы оптического диода основывается на нарушении теоремы Лоренца, который доказал, что нарушение взаимности возможно только в следующих случаях: магнито – оптические среды, нелинейные среды, среды с зависящими от времени диэлектрической или магнитной проницаемостями. Наиболее известный пример невзаимной системы - оптический диод, основанный на эффекте Фарадея, в таких диодах используются магнитооптические материалы. Свет, распространяясь в магнитооптическом материале, меняет свою поляризацию в присутствии внешнего магнитного поля, в результате достигается большой контраст между прямо и обратно прошедшим излучением.

Однако, оптический изолятор можно реализовать не только с помощью невзаимной системы, существует множество примеров асимметрии пропускания во взаимной системе, то есть можно добиться высокого контраста интенсивности между прямо и обратно прошедшим светом [1].

В данной работе экспериментально реализован оптический элемент (Рис. 1), состоящий из фотонного кристалла и металлической пленки с наноотверстиями, и обладающий асимметрией пропускания более 30000 раз (Рис. 2).

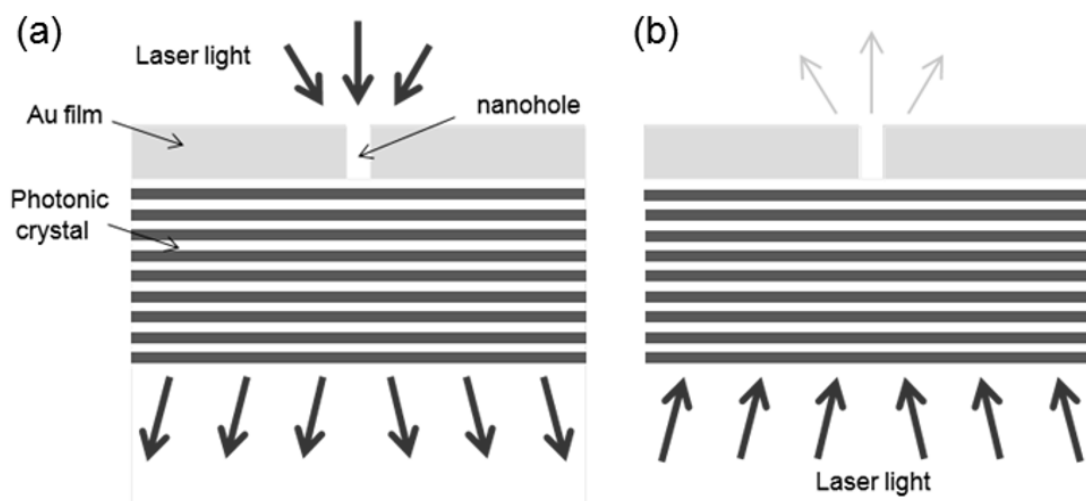


Рис. 1 - Схематическое изображение образца: (a) прямое пропускание света, (b) обратное пропускание.

Асимметрия пропускания в предложенной схеме достигается за счет особенности прохождения света сквозь наноотверстие [2], а также за счет эффекта просветления фотонного кристалла (при больших углах падения происходит значительное увеличение коэффициента пропускания оптического фильтра). Хотя эта система удовлетворяет условиям

теоремы Лоренца о взаимности, тем не менее, на практике рассмотренная оптическая система обладает сильной оптической невзаимностью, связанной с невозможностью обращения волнового фронта излучения, прошедшего через наноотверстие, с диаметром много меньше длины волны.

В данном устройстве при падении света на металлическую нанопленку с отверстием реализуется прямое пропускание, при падении света на фотонный кристалл – обратное. Диапазон рабочих длин волн устройства определяется шириной запрещенной зоны фотонного кристалла. При обратном пропускании, свет падая по нормали на фотонный кристалл не может распространяться дальше и ослабляется примерно в 10 000 раз, кроме того фотонный кристалл нарушает фокусировку, что снижает пропускную способность наноотверстия. В случае прямого пропускания свет попадая на наноотверстие, создает нанолокализованный источник излучения, излучение которого в дальней зоне характеризуется большим набором направлений волновых векторов, лежащих внутри телесного угла в 2π стерадиан. Следовательно, свет пройдя через пленку с наноотверстиями попадает на фотонный кристалл под различными углами, а увеличение угла падения по отношению к нормали приводит к увеличению пути прохождения света в каждом слое фотонного кристалла, что приводит к нарушению условий для интерференции излучения в фотонном кристалле, формирующей его запрещенную зону. Таким образом, свет падающий под углом на фотонный кристалл без помех в нем распространяется и реализуется прямое пропускание.

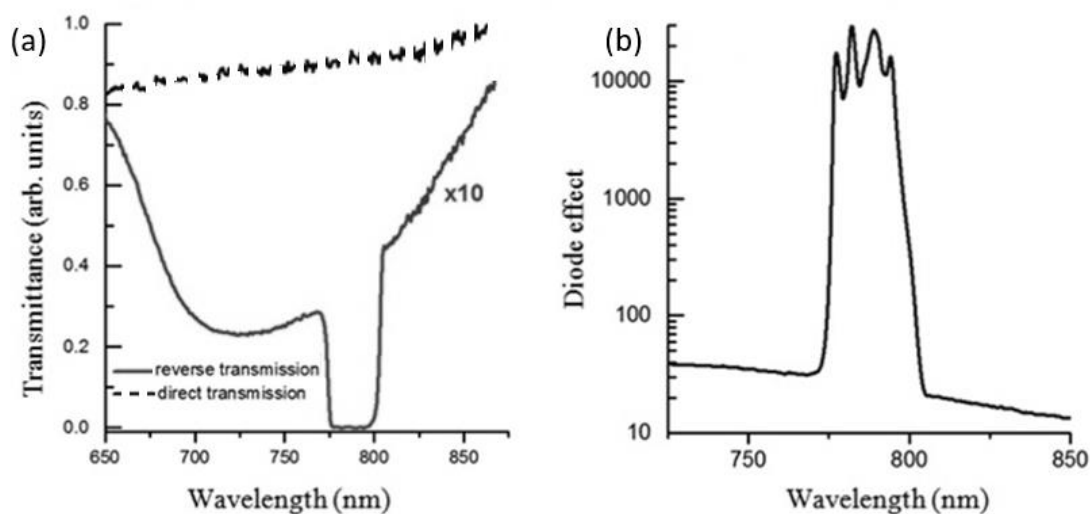


Рис. 2 – (а) спектральное пропускание образца в прямом и обратном направлении, (б) отношение спектральных пропусканий в прямом и обратном направлениях.

Полученный контраст оптического диода значительно превышает найденные ранее значения в наносистемах на основе магнитооптических эффектов [3], а также в оптических системах, в которых была продемонстрирована асимметрия пропускания [5,6].

Литература

1. V. V. Klimov, I. V. Treshin, A. S. Shalin, P. N. Melentiev, A. A. Kuzin, A. E. Afanasiev, and V. I. Balykin Optical Tamm state and giant asymmetry of light transmission through an array of nanoholes // Phys. Rev. A 92. 2015. P. 063842.
2. Bethe H. A. Theory of diffraction by small holes // Physical Review. 66. 7-8. 1944. P. 163.
3. A. R. Davoyan and N. Engheta Nonreciprocal rotating power flow within plasmonic nanostructures // Phys. Rev. Lett. 111. 2013. P. 047401.

4. *T. Xu and H. J. Lezec* "Visible-frequency asymmetric transmission devices incorporating a hyperbolic metamaterial" // Nat. Commun. 5. 2014.
5. *H. Kurt, D. Yilmaz, A. Akosman, and E. Ozbay* Asymmetric light propagation in chirped photonic crystal waveguides // Opt. Express. 20(18). 2012. P. 20635-20646.