دانشگاه صنعتی شیراز
دانشکدهٔ برق و الکترونیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد الکترونیک – گرایش اپتیک

عنوان:

تحلیل و شبیه‌سازی تنظیم‌شوندگی و باریک‌شدگی در ساختارهای مختلف میکروکاواک بلور فوتونی

بوسیلهٔ: محمدتقی اکبرزاده

استاد راهنما: دکتر فرزین امامی
استادان مشاور: دکتر مسعود محزون و دکتر علیرضا کشاورز

شهریور ۸۸

Shiraz University of Technology
Faculty of Electrical Engineering

A thesis for the degree of Master of Science in the Electrical Engineering

Thesis Title:

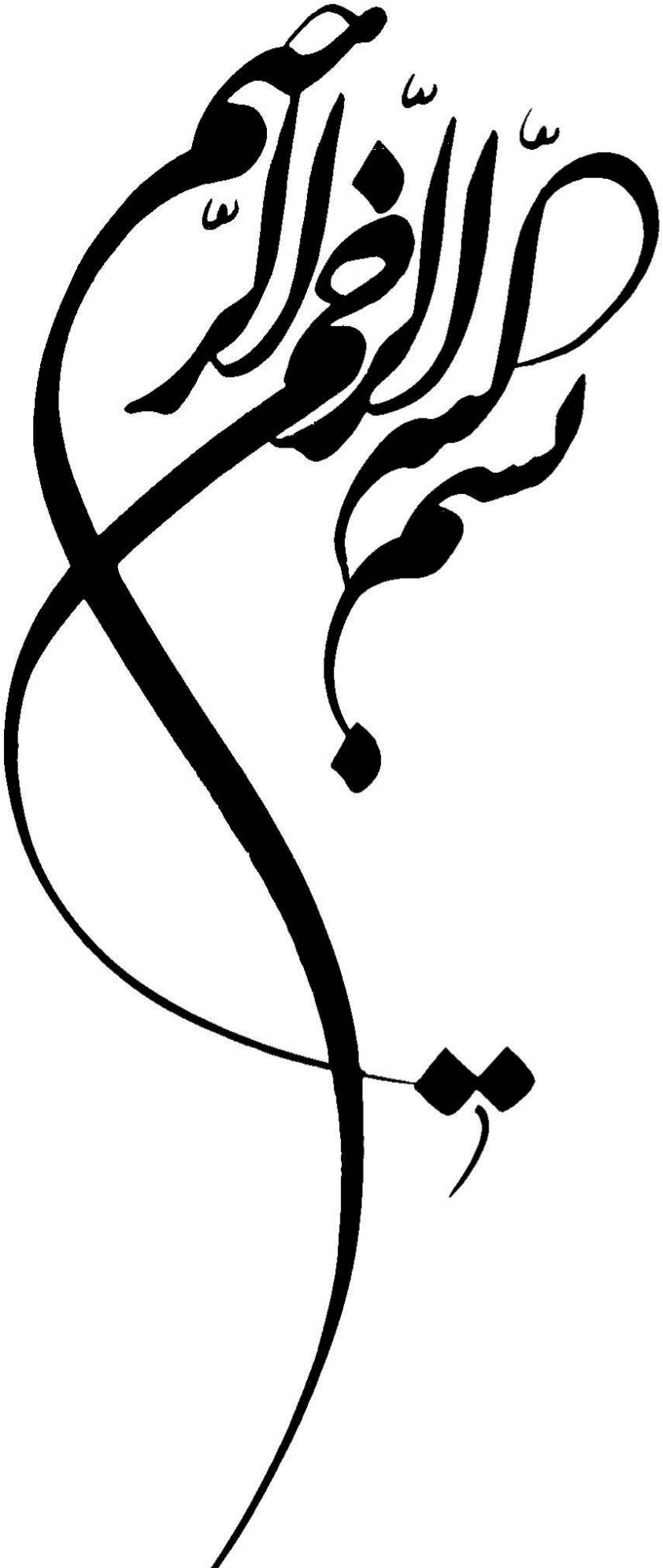
Analysis and Simulation of Tunability and Tapering Effect on the Different Structure of Photonic Crystal Microcavities

By: Mohammad Taghi Akbarzadeh

Supervisor: Farzin Emami PHD

Advisors: Masoud Mahzon PHD & Ali Reza Keshavarz PHD

Sep. 2009


بسم الله الرحمن الرحیم

به نام خدا

تحلیل و شبیه‌سازی تنظیم‌شوندگی و باریک‌شدگی در ساختارهای مختلف میکروکاواک بلور فوتونی

بوسیلهٔ: **محمدتقی اکبرزاده**

پایان‌نامهٔ ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از فعالیت‌های لازم جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته: **مهندسی برق – الکترونیک**

از دانشگاه صنعتی شیراز
شیراز
جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیتهٔ پایان‌نامه با درجه : **"عالی"**

دکتر فرزین امامی، استادیار دانشکدهٔ برق و الکترونیک (استاد راهنما) .....

دکتر مسعود محزون، استادیار دانشکدهٔ برق و الکترونیک (استاد مشاور) .....

دکتر علیرضا کشاورز، استادیار دانشکدهٔ علوم (استاد مشاور) .....

IN THE NAME OF GOD

Analysis and Simulation of Tunability and Tapering Effect on the Different Structure of Photonic Crystal Microcavities

By: **Mohammad Taghi Akbarzadeh**

THESIS SUBMITTED TO THE UNIVERSITY IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE (**MSC**)

In: **Electronics Engineering**

SHIRAZ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
SHIRAZ
ISLAMIC REPUBLIC OF IRAN

Evaluated and Approved by the Thesis Committee as: **"Excellent"**

…… Dr. Farzin Emami, Thesis Supervisor
Assistant Professor of Electrical and Electronics Engineering

…… Dr. Masoud Mahzon, Thesis Advisor
Assistant Professor of Electrical and Electronics Engineering

…… Dr. Ali Reza Keshavarz, Thesis Advisor
Assistant Professor of Physics

سپاسگذاری

سپاس خدا را که هر چه هست از اوست و اینکه نیازم را بی‌پاسخ نگذارد و مرا یاری نمود تا قسمتی از عمر خود را در راه تحصیل علم و دانش سپری نمایم.

سپاس خدا را که خانواده را کانون امن جهت تربیت و پیشرفت انسان، و پدر و مادر را تکیه‌گاهی مطمئن برای فرزندان قرار داد.

سپاس خدای را که همواره استادانی دلسوز و فرزانه را راهنمایم قرار داد تا در راه دراز و بی‌پایان تحصیل علم، تسکینی بر عطش سیری ناپذیرم باشند.

بر خود لازم می‌دانم که از تمامی عزیزانی که در مراحل مختلف انجام این تحقیق مرا یاری نمودند، تشکر و قدردانی نمایم.

با **تشکر** از یاوران همیشگی‌ام

پدر و مادر

با **تشکر** از مشوقان واقعی راه علم

استاد ارجمند جناب آقای دکتر امامی

استاد گرامی جناب آقای دکتر محزون

استاد گرامی جناب آقای دکتر کشاورز

تقدیم به

پدر بزرگوارم

که همواره مدیون حمایت‌های بی‌دریغش هستم

و

مادر عزیزم

که همواره از محبت‌های عاشقانه‌اش بهره‌مند هستم.

به **پاس** *تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی*

به **پاس** *عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان*

به **پاس** *قلب های بزرگشان که فریادرس است*

و به **پاس** *محبت های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند*

Abstract

Thesis Title: Analysis and Simulation of Tunability and Tapering Effect on the Different Structure of Photonic Crystal Microcavities

By: Mohammad Taghi Akbarzadeh

Dissertation`s summery: In the past years, the attention on all optical filters is increased rapidly. With the aid of the enhancing the line capacity of optical communication links, there are huge works on different types of filter structures, But they are not proper for integrating on a single chip. Because of the photonic crystal micro-cavity filters have small and simple structures, they are more applicable filter that the other structures. In these structures, the filter characteristics are strongly depended on the index, shape and geometry of the structure, and any change in the geometry, largely affects the transmittance spectrum of the filter.

In this project, several structures of the silicon photonic crystal microcavity filter is simulated and analyzed using the finite difference time domain (FDTD) method, to determine the frequency response curve. Also we will show how the change on the structure affects the filter characteristics.

In the end, a number of structure`s types are optimized by genetic algorithm (GA) and the particle swarm optimization (PSO) method.

Key Words:

Photonic Crystals, Ph.C Micro-Cavity filters, FDTD, PSO, GA

چکیده

عنوان پایان نامه : تحلیل و شبیه‌سازی تنظیم‌شوندگی و باریک‌شدگی در ساختارهای مختلف میکروکاواک بلور فوتونی

بوسیلهٔ : محمدتقی اکبرزاده

چکیده مطالب پایان نامه : در سالهای اخیر توجه زیادی به فیلترهای تمام نوری شده و تاکنون فیلترهای مختلفی ارائه شده اما اکثر آنها برای مجتمع کردن مناسب نیستند. امروزه از ساختارهای فیلتری بلور فوتونی به دلیل حجم کوچک و سادگی ساختار بیشتر استفاده می‌شود. در این ساختار ها مشخصه فیلتر وابستگی زیادی به ضریب شکست، شکل و هندسه ساختار دارد و کوچکترین تغییراتی در هندسه ساختار باعث تغیر زیادی در مشخصهٔ فرکانسی فیلتر می‌شود.

در این پروژه ساختارهای مختلفی از فیلتر بلور فوتونی میکروکاواک با روش «تفاضل‌های محدود در حوزهٔ زمان» تحلیل و پارامترهای مختلف روی آنها بررسی شده است و همچنین نشان داده شده که تغییرات شکل ساختار چگونه روی اسپکترم انتقالی تاثیر می‌گذارد.

در انتها چندین ساختار، با استفاده از روش‌های «الگوریتم ژنتیک» و یا «گروه ذرات» بهینه‌سازی شده‌اند.

کلمات کلیدی:
فوتونیک کریستال‌ها، فیلترهای میکروکاواک بلور فوتونی، روش تفاضل متناهی در زمان (FDTD)، بهینه‌سازی گروه ذرات(PSO)، الگوریتم ژنتیک(GA)

فهرست

فصل 1 : مقدمه 1
۱ـ۱ـ مقدمه ۲
۱ـ۲ـ معرفی بلورهای فوتونی ۵
۱ـ۳ـ تاریخچهٔ تنظیم‌پذیری ۷
۱ـ۴ـ کاربردها ۹
فصل 2 : روش‌های تحلیل 10
۲ـ۱ـ دسته بندی روش‌های تحلیل ۱۱
۲ـ ۱ـ ۱ـ روش‌های محاسبهٔ مد (Mode Solvers) ۱۱
۲ـ ۱ـ ۲ـ روش‌های محاسبهٔ انتشار امواج (Wave Propagators) ۱۲
۲ـ ۱ـ ۳ـ شباهت بین روش‌ها ۱۲
۲ـ ۱ـ ۴ـ روش‌های تحلیلی و تقریبی ۱۲
۲ـ ۱ـ ۵ـ روش‌های بسط به توابع پایه ۱۳
۲ـ ۱ـ ۶ـ روش‌های عددی ۱۳
۲ـ۲ـ معرفی نرم‌افزار ۱۵
۲ـ۳ـ معرفی انواع روش‌ها ۱۸
۲ـ ۳ـ ۱ـ روش ضریب شکست مؤثر (Effective Index Method) ۱۸
۲ـ ۳ـ ۲ـ روش بسط به امواج صفحه‌ای (Plane Wave Expansion) ۱۹
۲ـ ۳ـ ۳ـ روش توابع پایهٔ محلی (Localized Basis Function) ۲۱
۲ـ ۳ـ ۴ـ روش چند قطبی (MultiPole Method) ۲۱
۲ـ ۳ـ ۵ـ روش مدل منبع (Source Model Technique) ۲۲
۲ـ ۳ـ ۶ـ روش تفاضل متناهی در حوزهٔ زمان (FDTD) ۲۳
۲ـ ۳ـ ۷ـ روش انتشار پرتو (Beam Propagation Method) ۲۴
۲ـ ۳ـ ۸ـ روش المان محدود (Finite Element Method) ۲۵
۲ـ ۳ـ ۹ـ روش ماتریس انتقال (Transfer-Matrix Method) ۲۶
۲ـ ۳ـ ۱۰ـ روش بسط به مدهای ویژه (Eigen Modes Expansion) ۲۷
فصل 3 : مبانی نظری 28
۳ـ ۱ـ بلورهای فوتونی ۲۹
۳ـ ۱ـ ۱ـ معرفی بلورهای فوتونی ۳۰
۳ـ ۱ـ ۲ـ معرفی ساختار باند ۳۲
۳ـ ۱ـ ۳ـ معرفی فیلترهای میکروکاواک ۳۴
۳ـ۲ـ روش بسط به امواج صفحه‌ای (PWE) ۳۵

۳ـ۳ـ روش تفاضل متناهی (FDTD) ۴۳
۳ـ۳ـ۱ـ *الگوریتم FDTD* ۴۴
۳ـ۳ـ۲ـ *شرایط مرزی جاذب* ۴۹
۳ـ۳ـ۳ـ *تعریف منبع موج* ۵۵
۳ـ۳ـ۴ـ *خطاها و پاشندگی عددی* ۶۰
۳ـ۳ـ۵ـ *شرط پایداری* ۶۲
۳ـ۴ـ بهینه‌سازی ۶۴
۳ـ۴ـ۱ـ *الگوریتم ژنتیک* ۶۵
۳ـ۴ـ۲ـ *جعبه‌ابزار الگوریتم ژنتیک در MATLAB* ۷۶
۳ـ۴ـ۳ـ *بهینه سازی گروه ذرات* ۸۸
فصل 4 : نتایج شبیه‌سازی 93
۴ـ۱ـ تست نرم افزار ۹۴
۴ـ۱ـ۱ـ *حفره فلزی دو بعدی* ۹۶
۴ـ۱ـ۲ـ *محاسبهٔ شکاف باند نورانی* ۹۹
۴ـ۱ـ۳ـ *موجبر بلور فوتونی* ۱۰۲
۴ـ۱ـ۴ـ *فیلتر میان‌گذر بر بستر موجبر بلور فوتونی* ۱۰۴
۴ـ۱ـ۵ـ *تحلیل ساختار یک ماخ-زندر* ۱۰۶
۴ـ۲ـ فیلتر میکرو کاواک بلور فوتونی ۱۰۷
۴ـ۲ـ۱ـ *طراحی یک فیلتر ساده* ۱۰۷
۴ـ۲ـ۲ـ *ساختارهای جدید* ۱۱۳
۴ـ۳ـ بهینه‌سازی ساختار ۱۱۶
۴ـ۳ـ۱ـ *بهینه‌سازی شعاع* ۱۱۷
۴ـ۳ـ۲ـ *بهینه‌سازی فاصله* ۱۱۹
۴ـ۳ـ۳ـ *بهینه‌سازی همزمان شعاع و فاصله* ۱۲۱
۴ـ۳ـ۴ـ *بهینه‌سازی همزمان شعاع و فاصله و طول کاواک* ۱۲۱
جمع‌بندی و نتیجه‌گیری 122
منابع 125

فهرست شکل‌ها

شکل ۱ ـ ۱ : مثالی‌هایی از بلورهای فوتونی یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی ۲

شکل ۱ ـ ۲ : شبکهٔ بلور فوتونی با ساختار مربعی(سمت راست) و مثلثی(سمت چپ) ۵

شکل ۱ ـ ۳ : به ترتیب از راست به چپ؛ موجبر دی‌الکتریک معمولی؛ موجبر شکاف باند فوتونی؛ موجبر فوتونیک کریستال با میکروکاواک ؛ موجبر فوتونیک کریستال Taper شده..... ۶

شکل ۲ ـ ۱ : سلول واحد شش ضلعی و تقریب دایره‌ای آن..... ۱۹

شکل ۲ ـ ۲ : مثالی از نقاط مورد تحلیل در روش مدل منبع..... ۲۳

شکل ۲ ـ ۳ : شبکه‌بندی غیر یکنواخت در روش المان محدود ۲۶

شکل ۳ ـ ۱ : بلور فوتونی یک بعدی و پاسخ آن به دو طول موج متفاوت..... ۳۰

شکل ۳ ـ ۲ : نمایش دو هندسه پایهٔ بلور فوتونی دو بعدی؛ راست :ساختار مربعی؛ چپ :ساختار مثلثی..... ۳۱

شکل ۳ ـ ۳ : نمایش ساختار باند فرکانسی یک بلور فوتونی یک بعدی نمونه[۶]..... ۳۳

شکل ۳ ـ ۴ : نمایش ساختار باند فرکانسی یک بلور فوتونی دو بعدی نمونه[۶] ۳۳

شکل ۳ ـ ۵ : (الف) موجبر دی‌الکتریک و حفره‌های هوا (ب) نمای عرضی از فیلتر میکروکاواک بلور فوتونی.. ۳۴

شکل ۳ ـ ۶ : بلور فوتونی یک بعدی..... ۳۹

شکل ۳ ـ ۷ : سلولYee و قسمتی از فضای شبیه‌سازی دوبعدی ۴۶

شکل ۳ ـ ۸ : نمونه‌ای از فضای شبیه‌سازی دوبعدی برای مد TE..... ۴۸

شکل ۳ ـ ۹ : محیط شبیه‌سازی و منبع سخت..... ۵۵

شکل ۳ ـ ۱۰ : نمونه‌ای از محیط شبیه سازی و قسمتهای TF، SF و PML..... ۵۸

شکل ۳ ـ ۱۱ : دامنه منبع نسبت به (الف)زمان، (ب) فرکانس و (ج) محور y در حالت تحریک مدی موجبر ۵۹

شکل ۳ ـ ۱۲ : (الف) مثالی از یک شکل دقیق، (ب) تعریف لبه ها، (ج) لبه های sharp و مقدارهای گرد شده۶۱

شکل ۳ ـ ۱۳ : مثالی از روش کدگذاری باینری ۶۸

شکل ۳ ـ ۱۴ : مثالی از روش کدگذاری مقدار ۶۹

شکل ۳ ـ ۱۵ : انتخاب با استفاده از روش چرخ رولت ۷۰

شکل ۳ ـ ۱۶ : (الف) چرخ رولت برای برازندگی ؛ (ب) چرخ رولت برای رتبه..... ۷۱

شکل ۳ ـ ۱۷ : نحوهٔ تاثیر عملگر Crossover به روی کروموزوم‌ها؛ (الف) در حالت کدگذاری باینری ؛ (ب) برای کدگذاری مقدار ۷۲

شکل ۳ ـ ۱۸ : نحوهٔ تغییر کروموزوم‌ها با استفاده از ترکیب‌های (الف) ترکیب دونقطه‌ای (ب) ترکیب یکدست (ج) ترکیب محاسباتی ؛ ۷۳

شکل ۳ ـ ۱۹ : نحوهٔ تغییر کروموزوم‌ها با استفاده از جهش (الف) کدگذاری باینری (ب) کدگذاری مقدار (ج) جهش با تغییر ترتیب ؛..... ۷۴

شکل ۳ ـ ۲۰ : روش فراخوانی GUI مربوط به بهینه سازی.....۷۶

شکل ۳ ـ ۲۱ : رابط گرافیکی بهینه سازی و قسمت‌های مختلف آن..... ۷۷

شکل ۳ ـ ۲۲ : رابط گرافیکی الگوریتم ژنتیک – تنظیم پارامترها – جمعیت ۷۹

شکل ۳ ـ ۲۳ : رابط گرافیکی الگوریتم ژنتیک – تنظیم پارامترها – تغییر مقیاس..... ۸۰

شکل ۳ ـ ۲۴ : رابط گرافیکی الگوریتم ژنتیک – تنظیم پارامترها – انتخاب والد..... ۸۰

شکل ۳ ـ ۲۵ : رابط گرافیکی الگوریتم ژنتیک – تنظیم پارامترها – تکثیر و توالد ۸۰

شکل ۳ ـ ۲۶ : رابط گرافیکی الگوریتم ژنتیک – تنظیم پارامترها – جهش ژنی..... ۸۱

شکل ۳ ـ ۲۷ : رابط گرافیکی الگوریتم ژنتیک – تنظیم پارامترها – عملگر ترکیب..... ۸۲

شکل ۳ ـ ۲۸ : رابط گرافیکی الگوریتم ژنتیک – تنظیم پارامترها – مهاجرت..... ۸۳

شکل ۳ ـ ۲۹ : رابط گرافیکی الگوریتم ژنتیک – تنظیم پارامترها – پارامترهای خاص الگوریتم ۸۳

شکل ۳ ـ ۳۰ : رابط گرافیکی الگوریتم ژنتیک – تنظیم پارامترها – جستجوی ترکیبی ۸۳

شکل ۳ ـ ۳۱ : رابط گرافیکی الگوریتم ژنتیک – تنظیم پارامترها – شرایط توقف..... ۸۴

شکل ۳ ـ ۳۲ : رابط گرافیکی الگوریتم ژنتیک – تنظیم پارامترها – رسم نمودار..... ۸۵

شکل ۳ ـ ۳۳ : رابط گرافیکی الگوریتم ژنتیک – تنظیم پارامترها – تابع خروجی.....۸۶

شکل ۳ ـ ۳۴ : رابط گرافیکی الگوریتم ژنتیک – تنظیم پارامترها – نمایش نتایج.....۸۶

شکل ۳ ـ ۳۵ : رابط گرافیکی الگوریتم ژنتیک – تنظیم پارامترها – نحوهٔ پردازش ۸۷

شکل ۴ ـ ۱ : محیط شبیه‌سازی و معرفی متغییرهای آن..... ۹۵

شکل ۴ ـ ۲ : حفرهٔ فلزی دو بعدی ۹۶

شکل ۴ ـ ۳ : نمونه‌ای از خروجی نرم‌افزار هنگام تحلیل ساختار حفرهٔ دوبعدی..... ۹۷

شکل ۴ ـ ۴ : پاسخ فرکانسی حفرهٔ فلزی دو بعدی و مقایسهٔ آن با روش تحلیلی. خطوط نقطه چین فرکانس‌های رزنانس حفرهٔ فلزی است که بصورت تحلیلی بدست آمده است. منحنی پیوسته، پاسخ فرکانسی بین شکل موج ورودی و میدان در نقطهٔ خروجی می‌باشد..... ۹۸

شکل ۴ ـ ۵ : ساختار شبیه‌سازی شده یک بلور فوتونی برای بدست آوردن شکاف باند نورانی..... ۹۹

شکل ۴ ـ ۶ : ساختار باندهای بلور فوتونی دو بعدی در مد TM؛ محاسبه شده با روش PWE ۹۹

شکل ۴ ـ ۷ : پنجرهٔ خروجی نرم‌افزار در تحلیل بلور فوتونی دوبعدی.....۱۰۰

شکل ۴ ـ ۸ : پاسخ فرکانسی ساختار بلور فوتونی دوبعدی. خطوط خط چین بازهٔ فرکانسی شکاف باندها را نشان می‌دهند که با روش PWE محاسبه شده است.....۱۰۱

شکل ۴ ـ ۹ : ساختار موجبر بلور فوتونی دوبعدی؛ سمت چپ، مشخصات ضریب دی‌الکتریک در محدودهٔ شبیه‌سازی و سمت راست، یک نمونه از الگوی میدان درساختار در یک زمان خاص می‌باشد ۱۰۲

شکل ۴ ـ ۱۰ : نمودار پاسخ فرکانسی موجبر بلور فوتونی؛ محدودهٔ شکاف باندها که با روش PWE محاسبه شده‌اند نیز بصورت خط چین ترسیم شده است.....۱۰۳

شکل ۴ ـ ۱۱ : یک ساختار فیلتری در موجبر بلور فوتونی.....۱۰۴

شکل ۴ ـ ۱۲ : پاسخ فرکانسی فیلتر بلور فوتونی ۱۰۵

شکل ۴ ـ ۱۳ : توزیع میدان و نحوهٔ انتشار موج در یک ماخ-زندر ۱۰۶

شکل ۴ ـ ۱۴ : موجبر دی‌الکتریک ساده ۱۰۷

شکل ۴ ـ ۱۵ : پاسخ فرکانسی بلور فوتونی یک بعدی با شکل‌های مختلف (الف)حفره بشکل حلقه. (ب)حفره بشکل هلال. (ج)حفره بشکل دایره. ۱۰۸

شکل ۴ ـ ۱۶ : موقعیت و پهنای شکاف باند برای شعاع‌ها و فاصله‌های مختلف ۱۱۰

شکل ۴ ـ ۱۷ : شکاف باند فوتونی مربوط به ساختارهای (الف) شعاع ۱۲۰، فاصله ۳۷۵ (ب) شعاع ۱۵۰، فاصله ۴۲۵ ..... ۱۱۱

شکل ۴ ـ ۱۸ : (الف) شکل کلی فیلتر میکروکاواک و پاسخ فرکانسی فیلترها در (ب) b=500 (ج) b=535 (د) b=570 ..... ۱۱۲

شکل ۴ ـ ۱۹ : اثر taper شدگی مثبت و منفی ۱۱۳

شکل ۴ ـ ۲۰ : اثر تغییرات شعاع حفره میانی ۱۱۴

شکل ۴ ـ ۲۱ : اثر تغییرات فاصلهٔ عمودی (پارامتر h) ۱۱۴

شکل ۴ ـ ۲۲ : تاثیر مساحت نسبی سیلیکون و هوا در فرکانس مرکزی فیلتر ۱۱۵

شکل ۴ ـ ۲۳ : خروجی برنامه در اجرای روش PSO در بهینه‌سازی شعاع ۱۱۷

شکل ۴ ـ ۲۴ : خروجی برنامه در اجرای روش GA در بهینه‌سازی شعاع ۱۱۸

شکل ۴ ـ ۲۵ : خروجی برنامه در اجرای روش PSO در بهینه‌سازی فاصله ۱۱۹

شکل ۴ ـ ۲۶ : خروجی برنامه در اجرای روش GA در بهینه‌سازی فاصله ۱۲۰

شکل ۴ ـ ۲۷ : خروجی برنامه در اجرای روش PSO در بهینه‌سازی همزمان شعاع و فاصله ۱۲۱

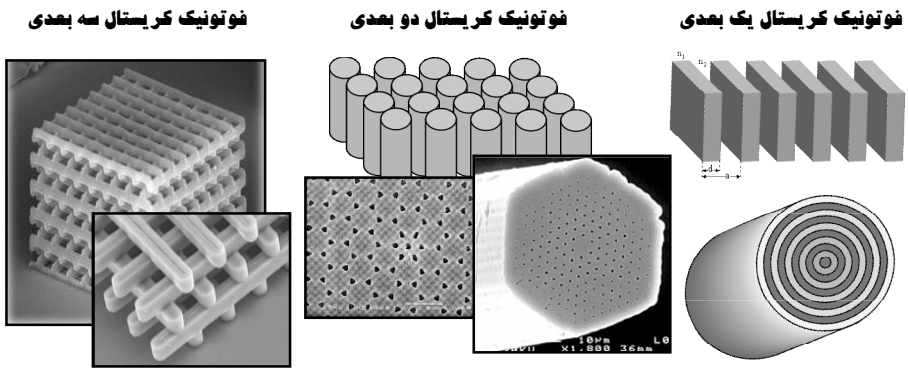
۱

مقدمه

1ـ1ـ مقدمه

جدیدترین پیشرفت‌ها و تحقیقات در ابزارها و قطعات نوری، در زمینهٔ بلورهای فوتونی[۱] می‌باشد و به دلیل قابلیت‌های بسیار زیاد آنها، کاربردهای فراوانی در تولید، تغییر، پردازش، انتقال و آشکارسازی سیگنال‌های نوری دارند[۱] و با استفاده از بلورهای فوتونی، ساخت ابزارهای نوری در مقیاس‌های خیلی کوچک امکان‌پذیر شد[۲و۳].

ساختارهای بلور فوتونی باعث پیشرفت‌های زیادی در فناوری سیستم‌های نوری شده است و نسل‌های جدید سیستم‌های نوری نیازهای زیادی به این ساختارها خواهند داشت[۴]. بلورهای فوتونی انتخاب خوبی برای ساخت قطعات سرعت بالا و کم مصرف هستند[۵]. بطور ساده تعریف بلور فوتونی، یک محیط با خواص اپتیکی متناوب است. مثلا محیطی که ضریب دی‌الکتریک آن روی مکان متناوب باشد و یا یک ساختار که از ترکیب دو ماده با ضریب شکستهای n_1 و n_2 تشکیل شده باشد. همانطور که در شکل زیر مشخص است، این تناوب ساختار در بلور فوتونی می‌تواند در یک، دو یا سه بعد باشد که به ترتیب به آنها بلور فوتونی یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی، می‌گویند[۶و۷].



شکل 1 ـ 1 : مثال‌هایی از بلورهای فوتونی یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی

مهمترین اثر ناشی از تناوب در بلورهای فوتونی وجود محدوده‌های پیوسته و کراندار در حوزهٔ فرکانس به نام «باند ممنوعه» یا «گاف فوتونی[۲]» است[۱۱- ۸]. که در این محدودهٔ فرکانسی دامنهٔ نور عبوری نزدیک به صفر است. این پدیده هم از لحاظ تئوری و هم عملی دارای اهمیت زیادی است و در قطعات نوری کاربردهای زیادی دارد[۱۴ – ۱۲].

ویژگی‌ها و خواص منحصر به فرد بلورهای فوتونی اساساً به هندسه و شکل ساختار آنها مربوط است[۸]. برای ساختارهای بلور فوتونی طرح‌ها و هندسه‌های مختلفی (از قبیل شبکه‌هایی با تقارن مثلثی، مربعی، شش‌گون، شبکهٔ Kagome و ...) معرفی شده است. گرچه این ساختارها کاربردهای

---

۱. Photonic Crystal
۲. Photonic Band-gap

خاص خود را دارند ولی اکثر آنها، بلورهای فوتونی پسیو (غیر فعال) و بدون هیچگونه کنترل خارجی می‌باشد[۱].

یک ایدهٔ خوب برای استفادهٔ کامل‌تر از قابلیت‌های بلورهای فوتونی کنترل، تغییر و تنظیم ساختار باند آنها است که به تبع آن می‌توان ویژگی‌ها و خواص اپتیکی آنها را نیز کنترل کرد. پس به بلور فوتونی‌ای، قابل تنظیم می‌گوییم که بتوان طیف آن را به گونه‌ای تغییر داد و در محدودهٔ دلخواه تنظیم کرد[۱۵]. ایده‌های زیادی برای تنظیم یا کنترل بلورهای فوتونی ارائه شده که به صورت استاتیک و یا دینامیک می‌توان خواص آنها را کنترل کرد.

در سالهای اخیر توجه زیادی به فیلترهای تمام نوری شده است. و تاکنون فیلترهای مختلفی از جمله تداخل‌سنج نامتقارن ماخ-زندر[۱] [۱۶و۱۷]، فیلترهای لایهٔ نازک[۲] [۱۸و۱۹]، Diffraction Grating Arrays [۲۰] و فیلترهای فوتونیک کریستال میکرو کاواک[۲۱و۲۲] ارائه شده است. اما اکثر آنها برای مجتمع کردن مناسب نیستند[۲۱].

ساختارهای فیلتری بلور فوتونی به دلیل تحلیل ساده‌تر و حجم کوچک توجه زیادی به آنها می‌شود. بلورهای فوتونی سه بعدی به دلیل فرآیند ساخت بسیار پیچیده و استفادهٔ مشکل چون برای تحریک مد محلی کاواک باید نور بطور دقیق به میکرو کاواک کانونی شود، به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد و در عوض بلورهای فوتونی دو بعدی و یک بعدی کاربرد بیشتری دارند. فیلترهای میکرو کاواک بلور فوتونی دو بعدی می‌توانند Q-factor بسیار بالایی داشته باشند[۲۳] ولی در عمل تلفات بسیار زیادتری نسبت به یک بعدی ها دارند که باعث عبور نور به فضای آزاد می‌شود به همین دلیل چنین ساختارهای دو بعدی کمتر برای کاربردهای فیلتری استفاده می‌شود. فیلترهای بلور فوتونی میکرو کاواک یک بعدی، با ایجاد چندین حفره در موجبر تیغه‌ای دی‌الکتریک[۳] معمولی ساخته می‌شود و محبوس‌سازی[۴] نور در دو بعد توسط بازتابش کلی[۵] انجام می‌شود و در بعد سوم توسط آینه‌های بلور فوتونی.

در این ساختارها مشخصه فیلتر وابستگی زیادی به شکل و هندسه ساختار دارد و کوچکترین تغییراتی در هندسه ساختار باعث تغییر زیادی در اسپکتروم انتقالی می‌شود به همین دلیل باید کنترل دقیقی در ابعاد نانو روی فرآیند ساخت آن انجام شود. روش‌های دقیق ساخت شامل لیتوگرافی‌های پرتوی الکترونی، یا لیتوگرافی Deep-UV و ... انتخاب‌های خوبی برای ساخت چنین ساختارهای بلور فوتونی‌ای هستند[۲۷ – ۲۴].

---

۱. Unbalanced Mach–Zehnder (MZ) interferometers
۲. Thin-film filters
۳. Di-electric slab waveguide
۴. Confinement
۵. Total Internal Reflection

در اینجا چندین ساختار فیلتر بلور فوتونی میکروکاواک با روش «تفاضل متناهی در حوزهٔ زمان» (FDTD) تحلیل شدند و پارامتهای مختلف روی آنها بررسی شده است و نشان داده شده که چگونه تغییرات شکل ساختار چگونه روی اسپکترم انتقالی تاثیر می‌گذارد.

در این پروژه با استفاده از روش عددی FDTD، ساختارهای تنظیم‌پذیر مورد تحلیل قرار می‌گیرند و با شبیه‌سازی عبور موج از ساختار بلور فوتونی و بررسی طیف در خروجی، تابع تبدیل و مشخصهٔ فیلتری آن تعیین شده و همچنین اثر تغییر پارامترهای مختلف ساختار را در مشخصهٔ فرکانسی بررسی شده است.

همانطور که در ادامه خواهید دید همهٔ ساختارهای تنظیم‌پذیر را می‌توان بوسیلهٔ روش FDTD تحلیل کرد. چون در چنین ساختارهایی رفتار گذرای لحظهٔ تغییر ساختار، مد نظر نیست و رفتار حالت پایدار بعد از تغییر ساختار مطرح است. براحتی می‌توان دو ساختار متفاوت قبل و بعد از تغییر را با روش FDTD تحلیل کرد و آنها را باهم مقایسه کرد. به همین دلیل عملا تمام تحلیل‌های این پروژه روی ساختارهایی است که تنظیم شوندگی با تغییر ساختار انجام می‌گیرد.

اصولا برای تنظیم ساختارهای بلور فوتونی دو روش بسیار کلی وجود دارد یک دسته از روش‌ها با استفاده از روش‌های مختلف ضریب شکست ساختار را تغییر می‌دهند و گروهی دیگر از روش‌ها، شکل ساختار و فاصلهٔ تناوب آنرا تغییر می‌دهند که در هر دو حالت برای تحلیل کافی است ساختار با هر شکل و ضریب شکستی را در برنامه تعریف کنیم. پس قسمت مهم و اعظم کار، تحلیل ساختار و بدست آوردن پاسخ فرکانسی آن است که توسط روش FDTD که برنامهٔ آن در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است، انجام می‌گیرید.

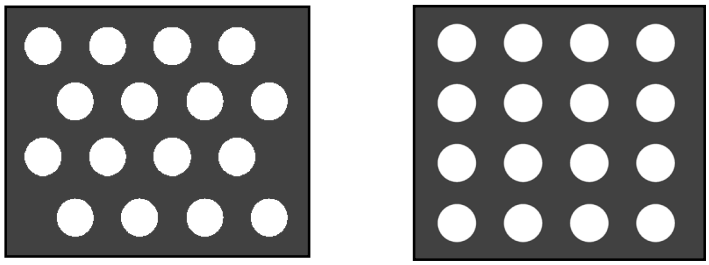
---

۱. Finite Difference Time Domain

1ـ2ـ معرفی بلورهای فوتونی

از سالها پیش دانشمندان فیزیک نور، قابلیت‌های جدید موادی را شناخته بودند که ساختارهایی در حد طول موج نور (کسری از میکرو متر) داشتند. این قابلیت‌ها باعث بوجود آمدن موادی شدند به نام «بلورهای فوتونی» که خواص نوری جالبی داشتند[۴].

بلور فوتونی به طور ساده، یک محیط با خواص اپتیکی متناوب است. این تناوب می‌تواند در یک، دو یا سه بعد باشد. در دو بعد، یک بلور فوتونی را می‌توان مانند یک آرایهٔ متناوب از دو دی‌الکتریک فرض کرد. دو نوع شبکهٔ بلوری «مربعی» و «مثلثی» از اهمییت بیشتری برخوردار هستند[۶].



شکل 1 ـ 2 : شبکهٔ بلور فوتونی با ساختار مربعی(سمت راست) و مثلثی(سمت چپ)

بلور فوتونی بسیار پاشنده[۱] است و میزان عبور و بازتاب آن به شدت وابسته به طول موج می‌باشد. می‌توان نشان داد که مهمترین اثر ناشی از تناوب، وجود محدوده‌هایی پیوسته و کران‌دار در حوزهٔ فرکانس است که در آنها امکان انتشار موج در ساختار وجود ندارد، به این نواحی گاف فوتونی یا نوار ممنوع فرکانس گفته می‌شود[۶].

اولین بلور فوتونی با گاف فوتونی کامل در سال ۱۹۹۱ توسط گروه Yablonovith ساخته شد[۲۸]. بعد از آن تلاش‌های زیادی برای ساخت بلورهای فوتونی سه‌بعدی انجام شد[۲۹] ولی چون ساخت بلورهای فوتونی سه‌بعدی نیاز به تکنولوژی پیچیده‌ای داشت، بلور فوتونی دوبعدی به صورت لایه‌ای[۲] مورد توجه قرار گرفت[۳۰و۳۱]. در این ساختارهای بلوری اگر یک نقص[۳] یا اغتشاش ایجاد شود، امواج نوری با فرکانس‌هایی که در محدودهٔ گاف فوتونی قرار دارند در منطقهٔ نقص، محدود[۴] می‌شوند[۳۲] و با توجه به نوع نقص بوجود آمده، نقطه‌ای یا خطی می‌توان به ترتیب میکروکاواک[۵] یا موجبر بلور فوتونی ایجاد کرد.

یکی از مهمترین ساختارهای فوتونیک کریستال، ساختارهای موجبری شکاف باند فوتونی[۶] هستند که در آنها از فوتونیک کریستال یک بعدی استفاده می‌شود و در این موجبرها محدودهٔ خاص طول موجی

---

۱. Dispersive
۲. Slab
۳. Defect
۴. Confinement
۵. Micro Cavity
۶. Photonic BandGap (PBG) Structures