



دانشگاه شیراز  
دانشکده فیزیک

گروه اتمی و مولکولی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک لیزر

عنوان

بررسی جابجایی عرضی گوس - هانچن در بلورهای حاوی مواد  
تک محوری

استادان راهنما

دکتر صمد روشن انتظار

دکتر ابراهیم صفری

پژوهشگر

ندا حقیقی

دی ۱۳۹۰

نام خانوادگی: حقیقی		نام: ندا
عنوان پایان نامه: بررسی جابجایی عرضی گوس- هانچن در بلورهای حاوی مواد تک محوری		
استاد راهنمای اول: دکتر دکتر صمد روشن انتظار		
استاد راهنمای دوم: دکتر ابراهیم صفری		
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: فیزیک	گرایش: اتمی و ملکولی- لیزر
دانشگاه: تبریز	دانشکده: فیزیک	
تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۹۰/۱۰/۱۹	تعداد صفحات: ۸۹	
کلید واژه‌ها: جابجایی گوس- هانچن، امواج سطحی، مواد تک محوری، بلور فوتونیک		
<p><b>چکیده:</b></p> <p>در این پایان نامه جابجایی گوس- هانچن در بازتاب از بلورهای فوتونیک حاوی متامواد و مواد تک محوری مطالعه شده است. بلورهای فوتونیک به شکل بلورهای یک- بعدی، نیمه بینهایت، و تمامی لایه ها بصورت همسانگرد، همگن و بدون اتلاف در نظر گرفته شده است. در سطح مشترک بین محیط راستگرد و متامواد امواج سطحی تولید می شوند. این امواج انرژی پرتو را در راستای سطح مشترک دو محیط جابجا می کنند به همین دلیل مرکز پرتو تابشی و مرکز پرتو بازتابی بر هم منطبق نخواهد بود، بلکه مقداری فاصله خواهد داشت. این فاصله جابجایی گوس- هانچن نام دارد. امواج سطحی پیشرو انرژی پرتو فرودی را در راستای سطح، روبه جلو انتقال می دهند، و باعث جابجایی گوس- هانچن مثبت می شوند. در حالیکه امواج سطحی پسرو انرژی پرتو فرودی را در راستای سطح، روبه عقب منتقل می کنند و باعث جابجایی گوس- هانچن منفی می شوند. در این پایان نامه به بررسی، جابجایی گوس- هانچن در بازتاب از فصل مشترک متاماده چپگرد و محیط راستگرد، جابجایی گوس- هانچن در بازتاب از مرز محیط چپگرد و بلور فوتونیک همسانگرد، جابجایی گوس- هانچن در عبور از بلوری حاوی مواد تک محوری، پرداخته شده است. همچنین تاثیر حضور متاماده ی ناهمسانگرد بر جابجایی گوس- هانچن در بازتاب از مرز محیط چپگرد و بلور فوتونیک ناهمسانگرد، مورد بررسی قرار گرفته است.</p>		

فصل اول- بررسی منابع

- ۱-۱- بلورهای فوتونیکی..... ۱
- ۲-۱- پارامترها و ویژگی های مهم بلور فوتونیکی..... ۱
- ۱-۲-۱- ابعاد..... ۱
- ۲-۲-۱- منشا گاف باندهای فوتونیکی..... ۳
- ۳-۱- بلورهای تک محوری..... ۳
- ۴-۱- متاماده..... ۵
- ۱-۴-۱- متامواد ناهمسانگرد پاشنده..... ۷
- ۲-۴-۱- عناصر اصلی تانسور و ساختار متامواد ناهمسانگرد..... ۸
- ۵-۱- تعریف پلاسمون های سطحی..... ۱۰
- ۱-۵-۱- امواج سطحی..... ۱۰
- ۶-۱- جابجایی گوس- هانچن..... ۱۲
- ۱-۶-۱- جابجایی گوس- هانچن در بازتاب از فصل مشترک متاماده چپگرد و محیط راستگرد... ۱۴
- ۲-۶-۱- جابجایی گوس- هانچن در بازتاب از فصل مشترک متاماده چپگرد و بلور فوتونیکی..... ۱۶
- ۳-۶-۱- بلورهای فوتونیکی یک بعدی حاوی محیط نامعین تک محوری..... ۱۸

فصل دوم- مبانی و روش ها

- ۱-۲- انتشار نور در بلورهای فوتونیکی..... ۲۱
- ۲-۲- روش ماتریس انتقال..... ۲۲
- ۱-۲-۲- روش اول بدست آوردن ماتریس انتقال..... ۲۳
- ۲-۲-۲- روش دوم بدست آوردن ماتریس انتقال..... ۲۷
- ۳-۲- امواج بلوخ و ساختارهای باندها..... ۲۸
- ۱-۳-۲- شرط تشکیل مدهای سطحی..... ۳۰
- ۲-۳-۲- محدوده فرکانسی برای تشکیل امواج سطحی..... ۳۴
- ۳-۳-۲- بردار پوینتینگ امواج سطحی..... ۳۶
- ۴-۳-۲- محاسبه رابطه پاشندگی برای امواج سطحی..... ۳۸

۴-۲- محاسبه مقدار جابجایی گوس- هانچن در بازتاب از سطح..... ۴۱

۵-۲- محاسبه جابجایی گوس- هانچن در عبور از بلورهای فوتونیک یک بعدی حاوی محیط نامعین تک محوری..... ۴۳

## فصل سوم- نتایج و بحث

۳-۱- کوپلاژ مناسب فوتون های فرودی و پلاسمون های سطحی تحریک شده..... ۴۷

۳-۲- انتشار امواج سطحی در فصل مشترک میان بلور فوتونی نیمه بی نهایت و محیط همگن نیمه بینهایت..... ۴۸

۳-۲-۱- بررسی منحنی های پاشندگی در اولین و دومین گاف باند بلور فوتونیک..... ۴۹

۳-۲-۲- نیم رخ میدان الکتریکی برای مدهای سطحی..... ۵۲

۳-۲-۳- ناحیه های مجاز برای وجود مدهای سطحی..... ۵۵

۳-۳- جابجایی گوس- هانچن در بازتاب از فصل مشترک متاماده چپگرد و محیط راستگرد..... ۵۷

۳-۴- اثر حضور اتلاف ها در جابجایی گوس- هانچن..... ۶۱

۳-۵- جابجایی گوس- هانچن در بازتاب از فصل مشترک متاماده چپگرد و بلور فوتونیک..... ۶۴

۳-۶- بررسی تاثیر ناهمسانگردی محیط بر جابجایی گوس- هانچن در بازتاب از فصل مشترک متاماده چپگرد و بلور فوتونیک..... ۶۹

۳-۷- جابجایی گوس- هانچن در عبور از بلورهای فوتونیک یک بعدی حاوی محیط نامعین تک محوری..... ۷۲

۳-۷-۱- تاثیر مقادیر مختلف گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی در جابجایی گوس- هانچن..... ۷۲

۳-۷-۲- تاثیر زاویه ی برخورد و جهت گیری محور اپتیکی روی جابجایی گوس- هانچن..... ۸۰

نتیجه گیری نهایی..... ۸۳

پیشنهادات..... ۸۵

مراجع..... ۸۶

## فهرست شکل ها

- شکل (۱-۱) نمایش ساختار بلور فوتونیکی یک-بعدی..... ۲
- شکل (۲-۱) بلور فوتونیکی دو-بعدی و بلور فوتونیکی سه-بعدی..... ۳
- شکل (۳-۱) بیضوی ماتریس ضرایب برای بلور تک محوری مثبت..... ۴
- شکل (۴-۱) بیضوی ماتریس ضرایب برای بلور تک محوری منفی..... ۵
- شکل (۵-۱) ساختار دو نوع سلول واحد از متاماده..... ۸
- شکل (۶-۱) موج سطحی در فصل مشترک متاماده و بلور فوتونیکی..... ۱۱
- شکل (۷-۱) جابجایی گوس-هانچن..... ۱۲
- شکل (۸-۱) ساختار سه لایه ای حاوی متاماده..... ۱۵
- شکل (۹-۱) بلور فوتونیکی با لایه کلاهدک متاماده..... ۱۷
- شکل (۱۰-۱) بلور فوتونیکی یک بعدی شامل لایه های متناوب از محیط همگن و محیط نامعین تک محوری..... ۱۸
- شکل (۱-۲): طرحواره ساختار متناوب..... ۲۱
- شکل (۲-۲) بلور فوتونیکی..... ۲۳
- شکل (۳-۲) موج سطحی در فصل مشترک متاماده و بلور فوتونیکی..... ۳۰
- شکل (۴-۲)..... ۳۸
- شکل (۵-۲) ساختار سه لایه ای حاوی مواد چپگرد..... ۴۱
- شکل (۶-۲) بلور فوتونیکی یک بعدی شامل لایه های متناوب از محیط همگن و محیط نامعین تک محوری..... ۴۳
- نمودار (۱-۳) منحنی پاشندگی..... ۴۸
- شکل (۲-۳) بلور فوتونیکی..... ۴۹
- شکل (۳-۳): منحنی پاشندگی امواج سطحی بر اساس  $\beta$ ، در حضور لایه کلاهدک متاماده..... ۵۰
- شکل (۴-۳): نیم رخ میدان الکتریکی برای، مدهای سطحی در بلور فوتونیکی..... ۵۲
- شکل (۵-۳): نیم رخ میدان الکتریکی..... ۵۳
- شکل (۶-۳): نیم رخ میدان الکتریکی..... ۵۴
- شکل (۷-۳): شارش انرژی کل ببر حسب  $\beta$ ..... ۵۴
- شکل (۸-۳): نیم رخ میدان الکتریکی..... ۵۵
- شکل (۹-۳): ناحیه مجاز برای وجود مدهای سطحی در گاف باند اول..... ۵۶
- شکل (۱۰-۳): ناحیه مجاز برای وجود مدهای سطحی در گاف باند دوم..... ۵۶
- شکل (۱۱-۳) ساختار سه لایه ای حاوی متاماده..... ۵۷

## فهرست شکل ها

- شکل (۱۲-۳) نمودار جابجایی گوس - هانچن و عرض پرتو بر اساس زاویه برخورد..... ۵۸
- شکل (۱۳-۳) نمودار شدت میدان موج بازتابی برای نقاط متناظر روی نمودار جابجایی گوس - هانچن..... ۵۸
- شکل (۱۴-۳) نمودار جابجایی گوس - هانچن و عرض پرتو بر اساس ضخامت لایه گپ..... ۵۹
- شکل (۱۵-۳) نمودار شدت میدان موج بازتابی برای نقاط متناظر روی نمودار جابجایی گوس - هانچن..... ۶۰
- شکل (۱۶-۳) شارش انرژی برای مورد جابجایی گوس - هانچن منفی..... ۶۰
- شکل (۱۷-۳) نمودار جابجایی گوس - هانچن بر اساس  $\text{Im}(\epsilon_r)$ ، برای پرتو باریک..... ۶۲
- شکل (۱۸-۳) نمودار شدت میدان موج بازتابی برای نقاط متناظر روی نمودار جابجایی گوس - هانچن، برای پرتو باریک..... ۶۲
- شکل (۱۹-۳) نمودار جابجایی گوس - هانچن بر اساس  $\text{Im}(\epsilon_r)$ ، برای پرتو عریض..... ۶۳
- شکل (۲۰-۳) نمودار شدت میدان موج بازتابی برای نقاط متناظر روی نمودار جابجایی گوس - هانچن، برای پرتو عریض..... ۶۳
- شکل (۲۱-۳) بلور فوتونیک با لایه کلاهدک متاماده چپگرد..... ۶۴
- شکل (۲۲-۳) نمودار جابجایی گوس - هانچن و عرض پرتو بر اساس زاویه برخورد برای امواج سطحی پسر و با  $\beta = 1/0.16, L = 5/7$ ..... ۶۵
- شکل (۲۳-۳) نمودار جابجایی گوس - هانچن و عرض پرتو بر اساس زاویه برخورد برای امواج سطحی پیشرو با  $\beta = 1/13, L = 3$ ..... ۶۵
- شکل (۲۴-۳) نمودار شدت میدان موج بازتابی برای نقاط متناظر ۲ و ۱ روی نمودار جابجایی گوس - هانچن امواج سطحی پسر و..... ۶۶
- شکل (۲۵-۳) نمودار شدت میدان موج بازتابی برای نقاط متناظر ۳ و ۴ روی نمودار جابجایی گوس - هانچن امواج سطحی پیشرو..... ۶۶
- شکل (۲۶-۳) نمودار جابجایی گوس - هانچن و عرض پرتو بر اساس ضخامت لایه ی متاماده ی چپگرد، برای امواج سطحی پسر و با  $\theta = 16/78$  درجه، متناظر با نقطه ۲ در نمودارهای فوق..... ۶۷
- شکل (۲۷-۳) نمودار جابجایی گوس - هانچن و عرض پرتو بر اساس ضخامت لایه ی متاماده ی چپگرد، برای امواج سطحی پیشرو با  $\theta = 18/88$  درجه، متناظر با نقطه ۴ در نمودارهای فوق..... ۶۷
- شکل (۲۸-۳) توزیع میدان الکتریکی امواج سطحی پسر و امواج سطحی پیشرو..... ۶۸

(۲۹-۳) نمودار گاف باندهای بلور فوتونیکي همسانگرد و موج سطحی تحریک شده در اولین گاف باند بلور..... ۶۹

شکل (۳۲-۳) نمودار ضریب عبور بلور ناهمسانگرد بر حسب فرکانس فرود  $\beta=1/3$ ..... ۷۰

نمودار(۳۳-۳) نمودار گاف باندهای بلور فوتونیکي ناهمسانگرد..... ۷۱

شکل(۳۴-۳) بلور فوتونیکي یک بعدی شامل لایه های متناوب از محیط همگن و محیط نامعین تک محوری..... ۷۲

شکل (۳۵-۳) ضریب عبور بلور فوتونیکي یک بعدی و جابجایی گوس- هانچن بر اساس فرکانس پرتو فرودی برای  $(\mu_{B\perp}=1, \mu_{Bz}=1, \epsilon_{B\perp}=2)$ ..... ۷۳

شکل (۳۶-۳) ضریب عبور بلور فوتونیکي یک بعدی و جابجایی گوس- هانچن بر اساس فرکانس پرتو فرودی برای  $(\mu_{B\perp}=-0.1/2, \mu_{Bz}=-0.1/5, \epsilon_{B\perp}=-1)$ ..... ۷۳

شکل (۳۷-۳) ضریب عبور بلور فوتونیکي یک بعدی و جابجایی گوس- هانچن بر اساس فرکانس پرتو فرودی برای  $(\mu_{B\perp}=1, \mu_{Bz}=-1, \epsilon_{B\perp}=-1)$ ..... ۷۴

شکل (۳۸-۳) ضریب عبور بلور فوتونیکي یک بعدی و جابجایی گوس- هانچن بر اساس فرکانس پرتو فرودی برای  $(\mu_{B\perp}=0.1/2, \mu_{Bz}=-0.1/3, \epsilon_{B\perp}=-1)$ ..... ۷۷

شکل (۳۹-۳) ضریب عبور بلور فوتونیکي یک بعدی و جابجایی گوس- هانچن بر اساس فرکانس پرتو فرودی برای  $(\mu_{B\perp}=0.1/8, \mu_{Bz}=-1, \epsilon_{B\perp}=1)$ ..... ۷۸

شکل (۴۰-۳) ضریب عبور بلور فوتونیکي یک بعدی و جابجایی گوس- هانچن بر اساس فرکانس پرتو فرودی برای  $(\mu_{B\perp}=0.1/2, \mu_{Bz}=-0.1/3, \epsilon_{B\perp}=1)$ ..... ۷۹

شکل (۴۱-۳) ضریب عبور بلور فوتونیکي یک بعدی و جابجایی گوس- هانچن بر اساس فرکانس پرتو فرودی برای  $(\mu_{B\perp}=1, \mu_{Bz}=1, \epsilon_{B\perp}=-1)$ ..... ۸۰

شکل (۴۲-۳) وابستگی جابجایی گوس- هانچن موج عبوری به زاویه ی برخورد برای مقادیر  $(\mu_{B\perp}=0.1/2, \mu_{Bz}=-0.1/3, \epsilon_{B\perp}=1)$ ..... ۸۱

شکل (۴۳-۳) وابستگی جابجایی گوس- هانچن موج عبوری به  $\varphi$  برای مقادیر  $(\mu_{B\perp}=0.1/2, \mu_{Bz}=-0.1/3, \epsilon_{B\perp}=1)$ ..... ۸۲

قوانین اساسی حاکم بر فیزیک در مورد موادی صادق هستند که بطور طبیعی در دسترس هستند. اما نوع دیگری از مواد مصنوعی، ساخته ی دست بشر، وجود دارند که قوانین حاکم بر فیزیک، که به صورت متعارف شناخته شده هستند، در آنها صادق نمی باشد. برای مثال در مواد معمولی گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی مثبت می باشند. در اواخر دهه ی ۱۹۶۰ وی.جی.وسلاگو<sup>۱</sup> به صورت تئوری به مطالعه موادی پرداخت که در آنها گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی در فرکانس های خاصی به طور همزمان دارای مقادیر حقیقی منفی می باشند، و انتشار امواج تخت را در این مواد بررسی کرد [۳]. او نشان داد در محیطی که از چنین موادی ساخته شده اند، بردار موج در خلاف جهت بردار پوئین تینگ بوده و سه بردار میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و بردار انتشار، یک دستگاه چپگرد را تشکیل می دهند و از این جهت این مواد را چپگرد<sup>۲</sup> نامید. وی همچنین زاویه ی شکست منفی در قانون اسنل، عکس شدن اثر دوپلر و مخروطی با زاویه ی منفرجه برای تابش چرنکوف را در مواد چپگرد بررسی کرد. در اواخر دهه ی ۱۹۹۰ جی.بی.پندری<sup>۳</sup> و همکارانش ساختارهایی پیشنهاد دادند که می توانند در فرکانس های پایین واقع در ناحیه گیگا هرتز، گذردهی الکتریکی منفی و تراوایی مغناطیسی منفی داشته باشند [۴-۵]. به دنبال آن دی.آر.اسمیت<sup>۴</sup> و همکارانش این ساختارها را در آزمایشگاه تولید کردند [۶-۷].

می توان از کنار هم قرار دادن و جفت نمودن یک لایه گذردهی الکتریکی منفی و یک لایه تراوایی مغناطیسی منفی به پدیده های جالبی مانند تشدید، تونل زنی کامل، بازتاب صفر و شفافیت دست یافت [۹]. یکی از خواص جالب توجهی که مواد چپگرد دارند، در مورد بازتاب نور از ساختارهایی است که شامل محیط های چپگرد می باشد. وقتی محیط دوم، یک محیط چپگرد باشد، در سطح

<sup>۱</sup> - V.G.veselago

<sup>۲</sup> - Left-handed material

<sup>۳</sup> - J. B Pendry

<sup>۴</sup> - D. R.Smith



مشترک بین محیط راستگرد و چپگرد امواج سطحی تولید می شوند. این امواج انرژی پرتو را در راستای سطح مشترک دو محیط جابجا می کنند به همین دلیل مرکز پرتو تابشی و مرکز پرتو بازتابی بر هم منطبق نخواهد بود، بلکه مقداری فاصله خواهد داشت. این فاصله جابجایی گوس-هانچن<sup>۱</sup> نام دارد. این پدیده اولین بار توسط نیوتن پیش گویی شد و گوس و هانچن در سال ۱۹۴۷ در آزمایشگاه این اثر را مشاهده کردند. در این پایان نامه برای درک هرچه عمیقتر پدیده ی جابجایی گوس-هانچن، ابتدا به تشریح امواج سطحی و نقش اساسی آن در ایجاد جابجایی گوس-هانچن، پرداخته شده است.

در مرز محیط های فیزیکی مختلف، نوع جدیدی از امواج جایگزیده می توانند منتشر شوند که امواج سطحی نامیده می شوند [۲۴]. تا قبل از پیدایش متاماده امکان ایجاد امواج سطحی با قطبش الکتریکی عرضی به دلیل فقدان ماده با نفوذ پذیری مغناطیسی منفی میسر نبود، تا اینکه با ساخت متاماده امکان وجود امواج سطحی با هر دو نوع قطبش الکتریکی عرضی و مغناطیسی عرضی فراهم شد [۲۴]. این امواج در نزدیکی فصل مشترک محدود می شوند و دارای یک مولفه میدان الکتریکی است که با افزایش فاصله از فصل مشترک به صورت نمایی کاهش می یابد [۲۵]. گاف باند از بارزترین ویژگی های بلور فوتونیک است که نشان از عدم انتشار ناحیه ای از موج الکترومغناطیسی در آن است. همانطور که می دانیم بلور فوتونی آرایه ای متناوب از لایه های دی الکتریک با ضرایب شکست متفاوت است. این بلورها فقط با آن دسته امواج الکترومغناطیسی اندرکنش می کنند که طول موجشان در حدود تناوب شبکه باشد. چنین امواجی در مرز لایه ها دچار بازتاب های متعددی می شوند و اگر شرط براگ برقرار شود امواج بازتابیده با هم تداخل سازنده کرده، موج از محیط بازتاب خواهد شد و منجر به تشکیل گاف باند در بلور فوتونی می

<sup>۱</sup> -Goos-Hanchen shift

شود [۱]. پیدایش بلورهای فوتونی به خاطر وجود مدهای سطحی در چنین موادی، علاقه زیادی برای مطالعه آنها ایجاد کرده است. برای تشکیل امواج سطحی مغناطیسی عرضی باید گذردهی های الکتریکی دو محیط مختلف علامه باشند و برای تشکیل امواج سطحی الکتریکی عرضی باید تراوایی های مغناطیسی دو محیط مختلف علامه باشند. امواج سطحی به دو صورت پیشرو و پسرو تحریک می شوند. امواج سطحی پیشرو انرژی پرتو فرودی را در راستای سطح، روبه جلو (در جهت انتشار پرتو) انتقال می دهند، و باعث جابجایی گوس- هانچن مثبت می شوند. در حالیکه امواج سطحی پسرو انرژی پرتو فرودی را در راستای سطح، روبه عقب (در خلاف جهت انتشار پرتو) منتقل می کنند و باعث جابجایی گوس- هانچن منفی می شوند [۲۶].

موضوع این پایان نامه مربوط به جابجایی گوس- هانچن می باشد. حال کارهایی را که قبلا در این زمینه انجام شده را بررسی می کنیم. همانطور که گفته شد، این پدیده اولین بار توسط نیوتن پیش گویی شد و گوس و هانچن در سال ۱۹۴۷ در آزمایشگاه این اثر را مشاهده کردند. در سال ۱۹۴۸ آرتمن<sup>۱</sup> این جابجایی را بر اساس بحث پایداری فاز فرموله کرد. و در سال ۱۹۵۵ فدروو<sup>۲</sup>، جابجایی منفی را بیان کرد و ایم برت<sup>۳</sup> این جابجایی را با استفاده از بحث شار انرژی محاسبه کرد [۲۷]. تحقیقات در مورد جابجایی گوس- هانچن به بازتاب و عبور جزئی در ساختارهای لایه ای گسترش یافت، همچنین به حوزه های دیگر فیزیک نیز راه یافت، از جمله: آکوستیک، اپتیک غیر خطی، فیزیک پلاسما و مکانیک کوانتمی. در سال ۱۹۹۲ آلبرت- لی- فلوچ<sup>۴</sup> و همکارانش توانستند در آزمایشگاه، جابجایی طولی گوس- هانچن را برای پرتو گوسی لیزر اندازه گیری کنند [۲۸].

<sup>۱</sup> - Artmann

<sup>۲</sup> - Fedorov

<sup>۳</sup> - Imbert

<sup>۴</sup> - A. Le Floch

اخیرا جابجایی گوس- هانچن در بلور های فوتونیکی توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۳۱-۳۵]. فلباکو<sup>۱</sup> و اسمعیلی<sup>۲</sup> مقدار جابجایی گوس- هانچن را در بلورهای فوتونیکی یک بعدی، با پرتو فرودی گاوسی، تخمین زدند و به صورت تئوری، وجود جابجایی گوس- هانچن را در گاف باندهای بلور فوتونیکی، را اثبات کردند [۲۹]. ونگ<sup>۳</sup> و زو<sup>۴</sup>، جابجایی گوس- هانچن را در موج عبوری، برای بلورهای فوتونیکی، با یک لایه نقص<sup>۵</sup> را بررسی کردند [۳۰].

همزمان با آن، بررسی جابجایی گوس- هانچن روی مواد چپگرد یا یک محیط نامحدود، مورد توجه زیادی قرار گرفت [۳۱-۳۲]. برمن<sup>۶</sup> جابجایی گوس- هانچن منفی را در سطح بین یک محیط معمولی و یک محیط چپگرد بررسی کرد [۳۱]، چن<sup>۷</sup> و لی<sup>۸</sup> فهمیدند که جابجایی گوس- هانچن نور عبوری، از یک تیغه متشکل از محیط چپگرد، می تواند منفی باشد [۳۲]. ونگ و زو، به صورت تئوری نشان دادند که برای محیطی با ضریب شکست منفی و جذب کم، در نزدیکی عبور ماکزیمم، جابجایی گوس- هانچن می تواند بزرگ و منفی باشد. همچنین نشان دادند که جابجایی گوس- هانچن برای پرتو بازتابی، برای موج مغناطیسی عرضی، در نزدیکی زاویه ی برونتر، بزرگ و مثبت (یا منفی) می باشد [۳۳].

گروه ونگ جابجایی گوس- هانچن را در یک لایه نازک از مواد چپگرد ناهمسانگرد با دقت شرح دادند و در مورد علامت جابجایی گوس- هانچن، در بازتاب کلی و بازتاب امواج از سطح اول، بحث کردند [۳۴]. ایکسنگ<sup>۹</sup> و کروکرز<sup>۱</sup> جابجایی گوس- هانچن را در پرتو عبوری از یک تیغه

<sup>۱</sup> -Felbacq

<sup>۲</sup> -Smaali

<sup>۳</sup> Wang

<sup>۴</sup> -Zhu

<sup>۵</sup> - defect layer

<sup>۶</sup> -Berman

<sup>۷</sup> -Chwn

<sup>۸</sup> -Li

<sup>۹</sup> -Xiang

حاوی مواد نامحدود<sup>۲</sup> بررسی کردند. جابجایی گوس- هانچن منفی یا مثبت، وابسته به زاویه برخورد و پارامترهای فیزیکی محیط نامحدود می باشد [۳۵].

در این پایان نامه به بررسی، جابجایی گوس- هانچن در بازتاب از فصل مشترک متاماده چپگرد و محیط راستگرد، جابجایی گوس- هانچن در بازتاب از مرز محیط چپگرد و بلور فوتونیکي همسانگرد، جابجایی گوس- هانچن در عبور از بلوری حاوی مواد تک محوری، پرداخته شده است. همچنین تاثیر حضور متاماده ی ناهمسانگرد بر جابجایی گوس- هانچن در بازتاب از مرز محیط چپگرد و بلور فوتونیکي ناهمسانگرد، مورد بررسی قرار گرفته است.

ترتیب مطالب پایان نامه به این صورت است: فصل اول به معرفی بلور فوتونیکي، گاف باندها، متامواد و امواج سطحی اختصاص یافته است. در فصل دوم روش های نظری، برای به دست آوردن ضرایب عبور و بازتاب از بلورهای فوتونیکي، شرط تشکیل امواج سطحی، رابطه پاشندگی برای امواج سطحی و مقدار جابجایی گوس- هانچن بیان شده است. در فصل سوم انتشار امواج سطحی در فصل مشترک میان بلور فوتونی نیمه بی نهایت و محیط همگن نیمه بی نهایت، جابجایی گوس-هانچن در بازتاب از فصل مشترک متاماده چپگرد و محیط راستگرد، اثر حضور اتلاف ها در جابجایی گوس-هانچن، جابجایی گوس-هانچن در بازتاب از فصل مشترک متاماده چپگرد و بلور فوتونیکي، بررسی تاثیر ناهمسانگردی محیط بر جابجایی گوس-هانچن در بازتاب از فصل مشترک متاماده چپگرد و بلور فوتونیکي و جابجایی گوس- هانچن در عبور از بلورهای فوتونیکي یک بعدی حاوی محیط نامحدود تک محوری، تحلیل و نتیجه گیری شده است.

---

<sup>۱</sup> -Coworkers

<sup>۲</sup> -indefinite medium

فصل اول

بررسی منابع

## ۱-۱- بلورهای فوتونیک<sup>۱</sup>

پیشرفت های اخیر در زمینه رشد بلورها، این امکان را فراهم ساخته تا ساختارهای چند لایه ای پیرویدیک با خواص قابل کنترل و ضخامت لایه کمتر از ۱۰ آنگستروم، ساخته شوند. با اندرکنش امواج الکترومغناطیس با چنین محیط های اپتیکی مفاهیم مدهای بلوخ، گاف های ممنوعه، امواج محو شونده و امواج سطحی مطرح می شود [۱]. امواج الکترومغناطیسی بسته به طول موجشان می توانند درون بلورهای فوتونیک منتشر شده و از آن عبور کنند و یا بطور کامل منعکس شوند، محدوده ی طول موج هایی که اجازه عبور ندارند را گاف باندهای فوتونیک می نامند .

## ۱-۲- پارامترها و ویژگی های مهم بلور فوتونیک

برای ساخت بلورهای فوتونیک، به بررسی ویژگی ها و پارامترهای مهم آنها نیازمندیم، برای این منظور به توصیف برخی ویژگی ها و پارامترهای مهم از بلور فوتونیک می پردازیم.

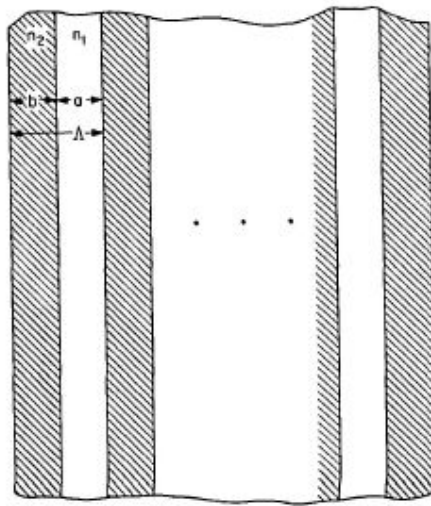
### ۱-۲-۱- ابعاد

تناوب ضریب شکست، ابعاد بلور فوتونیک را مشخص می کند یعنی با توجه به تناوب ضریب شکست در یک- بعد، دو- بعد و یا در سه- بعد، بلورهای فوتونیک یک- بعدی، دو- بعدی و یا سه- بعدی خواهیم داشت. در اینجا هر یک از بلورهای فوتونیک یک- بعدی، دو- بعدی و سه- بعدی را به ترتیب معرفی می کنیم.

◀ بلور فوتونیک یک-بعدی: ساده ترین بلور فوتونیک ممکن بلور فوتونیک یک- بعدی است که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است و مرکب از لایه های یک درمیان از مواد با ثابت های دی

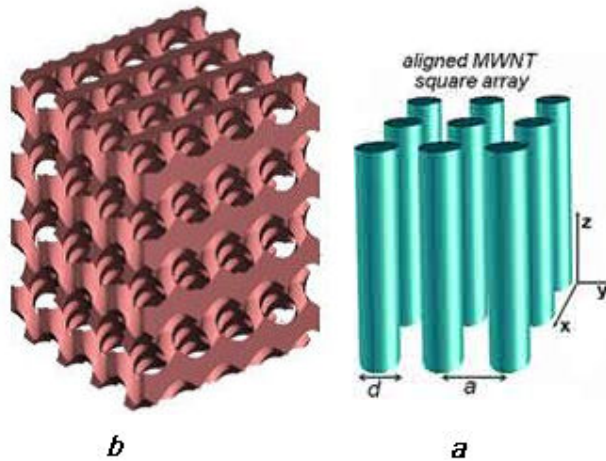
<sup>۱</sup> -photonic crystals

الکترونیک متفاوت است. کلمه یک بعدی به این واقعیت برمی گردد که دی الکترونیک تنها در یک راستا متناوب است. این آرایش ایده خیلی تازه ای نیست و خواص نوری یک چنین فیلم های چند لایه، بطور گسترده مطالعه شده است. این بلور فوتونیک می تواند به صورت آینه کامل برای نور با فرکانسی داخل گاف عمل کند. این آرایش در آینه های دی الکترونیک و فیبرهای نوری استفاده شده است.



شکل (۱-۱) نمایش ساختار بلور فوتونیک یک-بعدی [۱].

◀ بلور فوتونیک دو- بعدی: بلور فوتونیک دو- بعدی در طول دو محورش متناوب و در طول محور سوم همگن است. یک نمونه از بلورهای فوتونیک دو- بعدی یک شبکه مربعی از استوانه های دی الکترونیک است. برای مقادیر خاصی از فاصله استوانه ها، این بلور می تواند دارای یک گاف باند فوتونیک در صفحه  $XY$  باشد. داخل این گاف هیچ حالتی مجاز نمی باشد و نور فرودی بازتابیده می شود. شکل (۱-۲) یک بلور فوتونیک دو- بعدی با یک شبکه مربعی از استوانه های دی الکترونیک و یک بلور فوتونیک سه- بعدی را نشان می دهد.



شکل (۲-۱) a: بلور فوتونیک دو-بعدی و b: بلور فوتونیک سه-بعدی

### ۲-۲-۱- منشأ گاف باندهای فوتونیک

منشأ گاف باندهای فوتونیک در بلورهای فوتونیک را می توان اینگونه بیان کرد که امواج الکترومغناطیسی در مرز لایه ها دچار بازتابهای متعددی می شوند و اگر شرط براگ برقرار شود امواج بازتابیده با هم تداخل سازنده کرده، لذا موج از محیط بازتاب خواهد شد، چنین گافی که یک ناحیه فرکانسی غیر مجاز برای انتشار مدهای الکترومغناطیسی می باشد، یک گاف باند فوتونیک نامیده می شود و ویژگی اساسی بلورهای فوتونیک به شمار می آیند. پس از یک سری مطالعات در نهایت این نتیجه حاصل شد که مواد بلور فوتونیک در ناحیه ی ریز موج قابل استفاده هستند [۲].

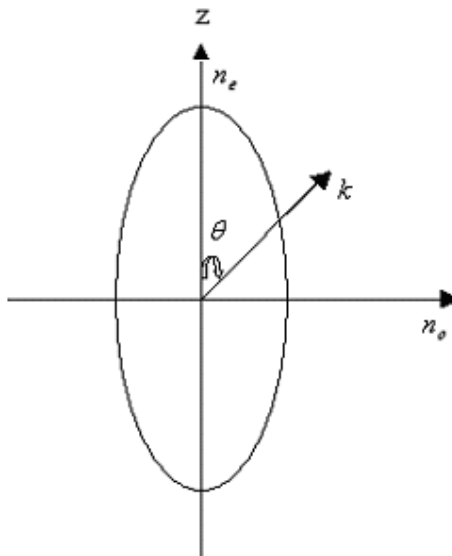
### ۳-۱- بلورهای تک محوری

اگر  $n_x$  را ضریب شکست محیط در راستای محور X ها و  $n_y$  را ضریب شکست محیط در راستای محور Y ها و  $n_z$  را ضریب شکست محیط در راستای محور Z ها در نظر بگیریم، برای محیط همگن همواره رابطه ی  $n_x = n_y = n_z$  برقرار می باشد. یعنی ضریب شکست در راستاهای



مختلف با یکدیگر برابرند. حال اگر ضریب شکست در یکی از راستاهای محورهای مختصات (مثلا در راستای محور Z) متفاوت باشد، رابطه ی بالا بصورت  $n_x = n_y \neq n_z$  در می آید. محیطی را که حاوی موادی با این خاصیت هستند را مواد تک محوری<sup>۱</sup> می نامند. بلورهای تک محوری به دو دسته تقسیم می شوند، بلورهای تک محوری مثبت و بلورهای تک محوری منفی. اگر  $n_o$  را ضریب شکست عادی بلور (که قانون اسنل برای آن برقرار است) و  $n_e$  را ضریب شکست غیر عادی بلور در نظر بگیریم، محور اپتیکی (محور نوری) سیستم در راستایی خواهد بود که ضریب شکست عادی بلور با ضریب شکست غیر عادی بلور برابر باشد ( $n_o = n_e$ ). با توجه به مقادیر  $n_o$  و  $n_e$ ، دو حالت برای بلور می توانیم داشت باشیم:

۱- اگر  $n_o < n_e$  باشد. در این حالت بلور تک محوری مثبت خواهیم داشت. بیضوی ماتریس ضرایب برای چنین بلوری بصورت زیر است:



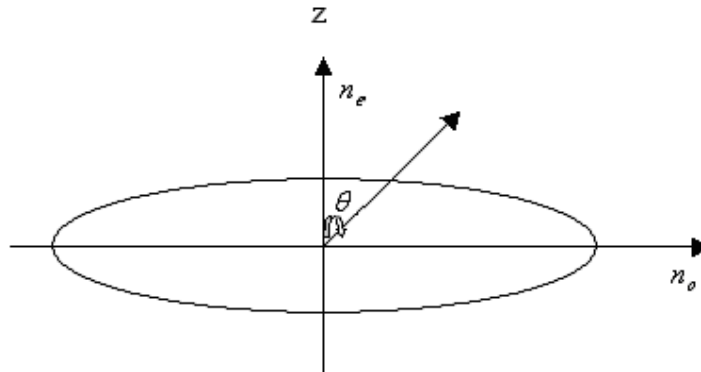
شکل (۳-۱) بیضوی ماتریس ضرایب برای بلور تک محوری مثبت

که در آن  $k$  بردار انتشار موج و محور Z ها محور اپتیکی است.

<sup>۱</sup> -uniaxe

۲- اگر  $n_o > n_e$  باشد. در این حالت بلور تک محوری منفی خواهیم داشت. بیضوی ماتریس

ضرایب برای چنین بلوری بصورت زیر است:



شکل (۱-۴) بیضوی ماتریس ضرایب برای بلور تک محوری منفی

وقتی ضریب شکست در راستاهای مختلف متفاوت می شود، ضریب شکست محیط و به طبع آن

گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی آن را، طبق رابطه ی  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ ، بصورت تانسور نشان

می دهیم نه عدد. که در بخش های بعد بصورت کامل توضیح داده خواهد شد.

#### ۱-۴- متاماده<sup>۱</sup>

در مواد معمولی گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی مثبت می باشند. در اواخر دهه ی ۱۹۶۰

وی.جی.وسلاگو<sup>۲</sup> به صورت تئوری به مطالعه موادی پرداخت که در آنها گذردهی الکتریکی و

تراوایی مغناطیسی در فرکانس های خاصی به طور همزمان دارای مقادیر حقیقی منفی می باشند، و

انتشار امواج تخت را در این مواد بررسی کرد[۳]. او نشان داد در محیطی که از چنین موادی

ساخته شده اند، بردار موج در خلاف جهت بردار پوئین تینگ بوده و سه بردار میدان الکتریکی،

<sup>۱</sup>  
<sup>۲</sup> - V.G.veselago

میدان مغناطیسی و بردار انتشار، یک دستگاه چپگرد را تشکیل می دهند و از این جهت این مواد را چپگرد<sup>۱</sup> نامید. وی همچنین زاویه ی شکست منفی در قانون اسنل، عکس شدن اثر دوپلر و مخروطی با زاویه ی منفرجه برای تابش چرنکوف را در مواد چپگرد بررسی کرد. در اواخر دهه ی ۱۹۹۰ جی.بی.پندری<sup>۲</sup> و همکارانش ساختارهایی پیشنهاد دادند که می توانند در فرکانس های پایین واقع در ناحیه گیگا هرتز، گذردهی الکتریکی منفی و تراوایی مغناطیسی منفی داشته باشند [۴-۵]. به دنبال آن دی.آر.اسمیت<sup>۳</sup> و همکارانش این ساختارها را در آزمایشگاه تولید کردند [۶-۷]. مواد چپگرد را مواد با ضریب شکست منفی یا تماموادی دو منفی<sup>۴</sup> نیز می نامند [۸]. تماموادی در اصطلاح به موادی گفته می شود که به طور مصنوعی ساخته شده اند و دارای خواص الکترومغناطیسی هستند که در طبیعت یافت نمی شوند [۸]. به غیر از تماموادی دو منفی که در آنها هر دو ضریب گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی، دارای قسمت حقیقی منفی هستند، تماموادی دیگری نیز وجود دارند که در آنها تنها یکی از ضرایب گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی، قسمت حقیقی منفی دارند [۴-۵]. این دسته از تماموادی را تک منفی<sup>۵</sup> می نامند که خود بر دو نوع اند: تماموادی با گذردهی الکتریکی منفی<sup>۶</sup> ( $\epsilon < 0$  و  $\mu > 0$ ) و تماموادی با تراوایی مغناطیسی منفی<sup>۷</sup> ( $\mu < 0$  و  $\epsilon > 0$ ). می توان از کنار هم قرار دادن و جفت نمودن یک لایه گذردهی الکتریکی منفی و یک لایه تراوایی مغناطیسی منفی به پدیده های جالبی مانند تشدید، تونل زنی کامل، بازتاب صفر و شفافیت دست یافت [۹]. همچنین در بازتاب و عبور از ساختارهایی شامل، محیط های چپگرد، شاهد پدیده ی جابجایی گوس - هانچن خواهیم بود، که در این پایان نامه به آن پرداخته شده است.

<sup>۱</sup> - Left-handed material

<sup>۲</sup> - J. B Pendry

<sup>۳</sup> - D. R. Smith

<sup>۴</sup> - double-negative material

<sup>۵</sup> - single-negative material

<sup>۶</sup> - epsilon-negative media

<sup>۷</sup> - mu-negative media

## ۱-۴-۱ - تمامواد ناهمسانگرد پاشنده

در سال ۲۰۰۱، تمامواد چپگرد، توسط شل بای<sup>۱</sup>، با استفاده از سلول های پریودیک سیم فلزی و مشدد حلقه- شکاف (SRR)، در آزمایشگاه تولید شد [۱۰]. از کاربردهای تمامواد چپگرد که می توان به آن اشاره کرد، به عنوان مثال، پندری<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۰ پیشنهاد کرد که یک تیغه بدون اتلاف از تمامواد چپگرد را می توان به عنوان یک لنز کامل با دقت ریز موج استفاده کرد [۱۱]. تولید هماهنگ دوم، در ساختار یک بعدی شامل لایه های متناوب با مواد با ضریب شکست مثبت و منفی نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲، ۱۳]. مطالعه موجبرهای ساخته شده از تمامواد چپگرد یکی دیگر از موضوعات جالب برای دانشمندان است [۱۴-۱۸]. تیغه موجبر متقارن، با هسته همگن از تمامواد چپگرد نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴-۱۶]. برخی از این موجبرها شامل، حضور مد نهایی، انتشار موج سطحی، امکان تبهگنی دوگانه در مدها، و انتشار پسر و امواج با شار انرژی منفی، می باشند. همچنین تیغه ی موجبر غیر متقارن از تمامواد چپگرد [۱۸، ۱۹] و تیغه موجبر دی الکتریک با یک روکش از تمامواد چپگرد نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۲۰].

در تمام تحقیقات و مطالعات بالا، تمامواد چپگرد همگن و همسانگرد فرض شده اند. با این وجود تمامواد ساخته شده در آزمایشگاه عموماً ناهمسانگرد هستند، لذا گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی آنها، هر دو به صورت تانسور مرتبه دوم هستند. خواص الکترومغناطیسی تمامواد ناهمسانگرد، کاملاً متفاوت از خواص الکترومغناطیسی تمامواد چپگرد همگن است [۲۱]. ما در اینجا ساختار متا مواد غیر همسانگرد را شرح می دهیم.

<sup>۱</sup> -Shelby  
<sup>۲</sup> -Pendry