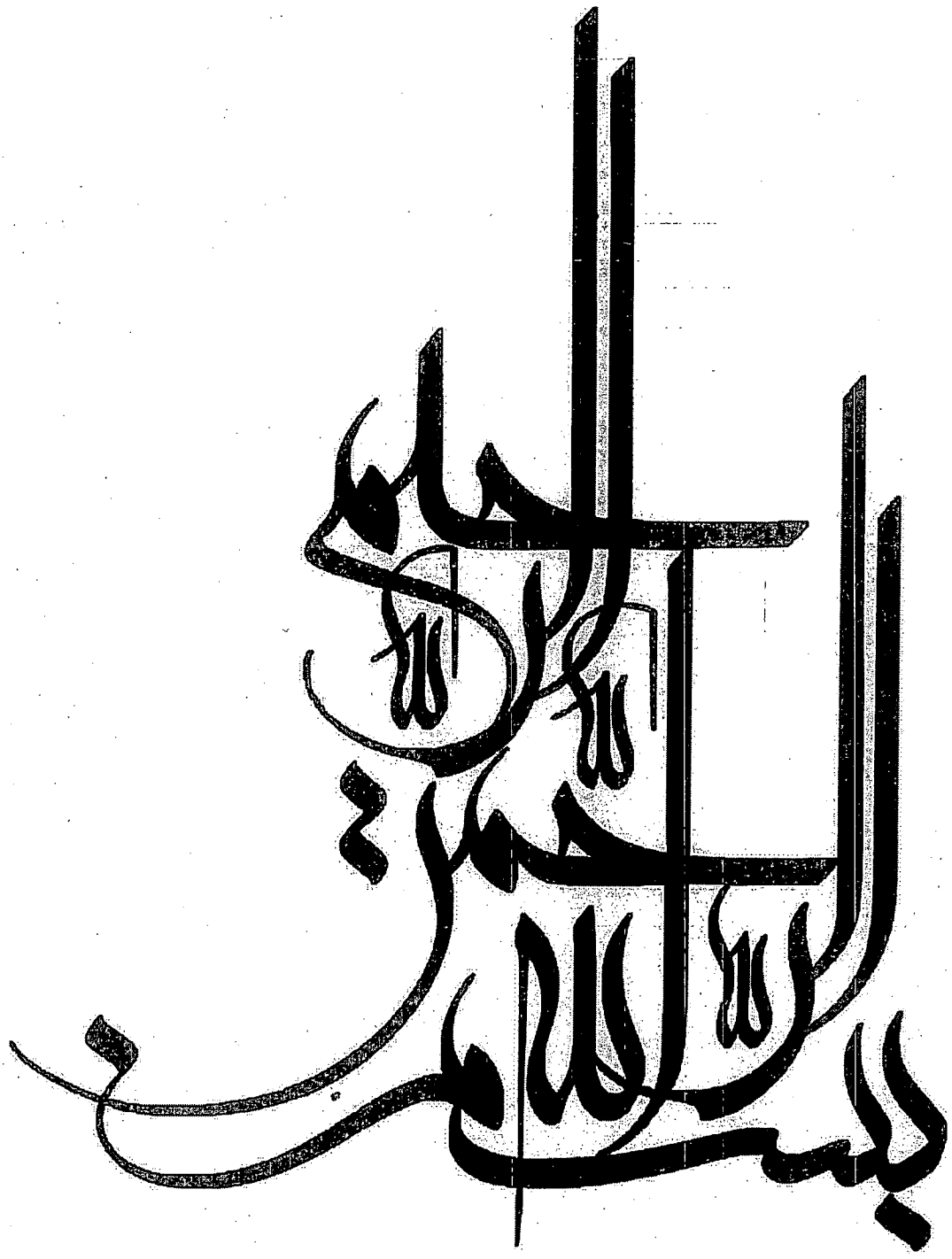

١٤٧٣٠٩

دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان
کتابخانه مرکزی ۱۳۷۰

دانشگاه ولی عصر (عج)

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش پلاسما

بررسی تولید هماهنگ دوّم لیزر تشدیدی از پلاسمای فروچگال و ارائه‌ی مدل بلور فوتونی

استاد راهنما:

دکتر حسن رنجبر عسکری

استاد مشاور:

دکتر علیرضا بهرامپور

پژوهشگر:

مریم نوروزی

۱۳۸۹/۶/۱۲

شهریور ۱۳۸۷

۱۴۷۳۰۹

مدیریت تحصیلات تکمیلی
دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

دانشکده‌ی علوم‌پایه

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک خانم مریم نوروزی کورگاهی

تحت عنوان:

بررسی تولید هماهنگ دوّم لیزر تشدیدی از پلاسمای فروچگال و ارائه‌ی مدل کریستال فوتونی

در تاریخ ۸۷/۷/۳۰ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه ..عالی..... به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه آقای دکتر حسن رنجبرعسکری با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

۲- استاد مشاور پایان‌نامه آقای دکتر علیرضا بهرامپور با مرتبه‌ی علمی استاد امضاء

۳- داور خارج از گروه آقای دکتر مجید تراز با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

۴- داور داخل گروه آقای دکتر سید مهدی بیضایی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

۴- نماینده تحصیلات تکمیلی، آقای دکتر رویین‌تن فرهمند با مرتبه‌ی علمی استادیار امضاء

کلیّه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه
متعلق به دانشگاه ولی‌عصر (عج) است.

تقدیر و تشکر

پروردگارا

تو به من آموختی . . .

تو، از فراز،

تو، از نهایت،

تو، از حضور،

تو، از متن ممهور آمدی . . .

از قله‌ی صبور و آرام آمدی، همچون نسیم کوهساران.

به دشت و دریا، به کوه و صحرا، به همه بخشیدی، همچون ابر بهاران. از آسمان آمدی، مهربان و بخشنده. تو، از فراز،

تو، از نهایت،

تو، از حضور،

تو، از متن ممهور آمدی

و جنین خفته‌ی دانش را که پنجاه ساله بود، به آغوش مادران مشتاق، به دامان پدران خسته، نشاندی. با آن که من دیر آمدم و از پشت قرن‌ها، امروز، به زمین آمدم، امّا تو، آنقدر برایم، در شکاف سینه‌های صبور و در وسعت دست‌های امین، روزی گذاشتی، که تمامی مهمان‌های دور و نزدیکم را، می‌توانم سرشار کنم. اگر از دیگران نمی‌گویم ناسپاس نیستم. من از آن‌ها وامی ندارم. بنازم تو را که این‌گونه به دورها بخشیدی و مرا وامدار هیچ کس نساختی. در جشن غرور دانش، گرچه مرا راه نمی‌دهند، ولی هنگامی که به هدیه‌هاشان، نگاه می‌کنم، شعله‌ی آرزوی، هر چند کوتاه و شراره‌ی تمنای، هر چند کمرنگ، دلم را به آتش نمی‌کشد. در وسعت آسمان سخاوت تو، چه جای حسرت اندک شراره‌ای. در هنگامه‌ی بلوغ، که جبرها را برایم فرستاده بودند، اگر درس تو نبود، به کدام سو می‌رفتم، تو جزیره‌ی آزادی را میان قساوت جبرها، نشانم دادی. با چشمی که تو در میان سینه‌ام گشودی، خود را در لایه‌های وراثت گم نمی‌کنم. در میان رشته‌های تاریخ زنجیری نمی‌شوم. در دست‌های خواهش و احساس، در چنگال خشم و نفرت، به اسارت نمی‌روم. من، همراه نوری، که تو به جام من ریختی، من،

همراه عشقی که تو در سینه‌ام افروختی، می‌توانم، ترس‌هایم را به قدرت و بخل‌هایم را به سخاوت بدهم. من از تو، قانون تبدیل را آموخته‌ام.

چگونه می‌توانم تو را ستایش کنم؟

تو به من آموختی که خوبی و بدی را در رابطه‌ها جستجو کنم. تو نشان دادی می‌توان از بدها، به خوبی بهره گرفت. تو به من آموختی در دنیایی که بت‌ها را می‌شکنند، راحت‌تر از بت‌ها بگذرم. تو زیبایی رنج‌ها را نشانم دادی. انسان، فرزند راه بود و رنج، تازیانه‌ی سلوک. من با نگاه تو زیبایی رنج‌ها را کشف کردم.

چگونه می‌توانم تو را ستایش کنم؟

دل بزرگ‌تر از زندگی را چه کسی می‌فهمد؟ چه دانشی او را تجربه می‌کند؟ چه اندیشه‌ی او را می‌سنجد؟

چگونه می‌توانم تو را ستایش کنم؟

چگونه می‌توانم تو را سپاس گویم . . .

به مصداق کلام شریف « **من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق** »، بر خود فرض میدانم تا از همراهی اطرافیان و کمک‌های بی‌دریغشان، صمیمانه تشکر کنم.

پدر و مادر مهربانم با روح بلند و صبر بی‌انتهایشان، که وجودم از تشکر ناتوان است.

خواهر و برادران عزیزم، ملیحه، مجتبی، رضا، هادی و مهدی که به کارم ایمان دارند.

استادادان گرامی، آقای دکتر رنجبر عسکری و آقای دکتر بهرامپور با همراهی پدرانه و بزرگوارنه‌ی خود، آقای دکتر بیضایی و دکتر تراز، که داوری این پایان‌نامه را قبول زحمت کردند.

آقای دکتر فرهمند، ناظر تحصیلات تکمیلی، تمامی اساتیدی که در مدت تحصیل علم، من را بنده‌ی خود ساخته و خواهند ساخت، به‌خصوص آقایان دکتر حسینی‌زاده، دکتر فرهی مقدم، دکتر خان‌زاده ودکتر سویزی، کارمندان دانشگاه ولی عصر(عج)، خصوصاً خانم شهاب الدینی مسئول محترم سایت تحصیلات تکمیلی و تمامی دوستانی که در این سنگر پرورش و آموزش با هم همراه شدیم و یاد و ناممان تا همیشه در آسمان وسیع قلبهایمان ماندگار است.

خالصانه‌ترین سپاس‌ها نثارشان.

گامی کوچک

در،

راهی دراز

تقدیم به پیشگاه مقدس انسان کامل،

مظهر اتم جلال و جمال خدا،

یادگار انبیا و اولیا، بقیه الله فی الارضین،

خلیفه‌ی خدا و وصی پیامبر عظیم الشأن اسلام،

و وارث امیرالمؤمنین و ائمه معصومین (علیه السلام)، امام شیعیان،

مکمّل دوستان و متوسّلان، مربی کمّلین شیعه،

واسطه‌ی بین خدا و مخلوقات،

غیاث المستغیثین، قطب عالم امکان، قائم آل محمّد،

حجه بن الحسن العسکری

صلوات الله علیه و علی آبائه و ابنائه و اصحابه و اعوانه.

السلام علیک یا بقیه الله فی ارضه

السلام علیک سلام من عرفک بما عرّفک به الله

ای نزدیک‌تر از ما به ما، می‌خواهیم از دوری‌ها و بیگانگی‌ها بگوییم.

ای حضور امن و امان، می‌خواهیم از آشوب و بحران بگوییم، از عفونت سنگین گفته‌ها و از زخم سیاه نوشته‌ها.

می‌گویند این قرن آشوب و بحران، می‌خواهد با سرعت علم و شتاب ارتباطات، پا در مقطعی بگذارد که به پیش‌بینی معرفت‌شناسان، سال‌های حیرت‌زدایی علم است و برکناری وحی و عزلت دین.

می‌گویند در این سال‌ها جایی برای تو نیست و کاری برای تو نیست. می‌گویند تو نیستی، ضرورتی نداری که انسان معاصر سرپرست نمی‌خواهد، که دین، بر فرض راه باشد تنها راه نیست و خدا بر فرض اثبات شود و وجود داشته باشد، که، لزومی ندارد. آدمی آموخته که با پای علم و همّت خویش گام بردارد و منتظر رسالت و ولایتی نباشد. می‌گویند که دین، این دنیایی نیست. بیشتر از هدایت به

مبدأ و معاد، رسالتی ندارد، که انسان علمانی و عقلانی، مشکلات برخاسته از جهل و خرافه را سامان می‌دهد، که در دنیای ارتباطات دیگر وحشتی نیست . . . .

این‌ها را می‌گویند و می‌نویسند و ما این‌ها را می‌شنویم و می‌خوانیم. تو بگو با این همه زخم، با این همه شماتت چه می‌توان کرد؟ تو بگو در این جدال حسّ و حافظه و عشق و عاطفه، آن هم با دل‌های که تو را تجربه کرده و تو را می‌خواهد، چه می‌توان کرد؟ . . . .

ای عزیز فاطمه! می‌بینی که از کجا تا به کجا آمده‌ایم و با شهادت و تجربه و عبرت و حضور دلمان، به غیبت تو ایمان آورده‌ایم و یافته‌ایم که تو ضرورت ناگزیر و باید محتوم این من تاریخی و این تجربه‌های دیوار و بن‌بست و آزادی و عدالت و عرفان و شکوفایی و پوچی‌های چند لایه و عمیق و گسترده هستی . . . .

و تو می‌دانی که اگر از بیگانگی‌های رنگارنگ می‌گوییم، خودمان را جدا نمی‌کنیم که ما هم بیگانه‌ای آلوده‌ایم ولی به نزدیکی و جوار و به پاکی و قدس تو پناهنده‌ایم. به راستی سوگند! بیگانگی از تو، فقط در حوزه‌ی غفلت و سرگرمی و یا حوزه‌ی کفر و چشم‌پوشی می‌تواند مطرح شود.

این‌جاست که می‌گوییم، این‌هایی که تو را نمی‌خواهند و غفلت و سرگرمی و لهو و لعب را به خاطر طرح نشدن تو و یا طرد تو، در برنامه دارند، باز مجبورند که تو را احساس کنند و با این احساس نزدیک دست به گریبان شوند، که بیگانگی و دوری از این احساس نزدیک و از این تجربه‌ی مشهود، میسر نیست. چون گذشته از این‌ها تو هستی، همان‌طور که حس ما هست، شعور ما هست، فکر ما هست و قلب ما هست.

تو هستی، چون تو بیش از این‌ها ضرورت داری، که باید به این همه معنا بدهی و این همه را در طرحی با وسعت غیب و شهود به کار بگیری.

ای نزدیک‌تر از ما به ما، تو می‌آیی،

تو از نسل آمدنی،

از نسل بشارت،

از نسل جاء الحق و زهق الباطل.

تو می‌آیی، و ما تا آمدنت شعر انتظار را می‌سراییم.

چکیده:

تولید هماهنگ‌های مرتبه بالا یکی از اساسی‌ترین فرآیندهای غیرخطی، در برهم‌کنش پالس لیزر شدید با پلاسماهای فروچگال و فراچگال را بیان می‌کند. تولید هماهنگ‌های مرتبه‌ی بالای لیزر یک منبع قابل دسترسی برای نور فرابنفش‌فرین (EUV)، اشعه‌ی X نرم و سخت هستند که به توسعه‌ی مؤلفه‌های نوری مربوط به تکنولوژی حیاتی کمک می‌کنند. در مدت ده سال گذشته، علاقه بسیار زیادی به تولید هماهنگ‌های مرتبه‌ی بالا به علّت کاربردهای بالقوه بسیاری که در دانش و تکنولوژی داشته‌اند ایجاد شده است. امّا، عدم مطابقت بین سرعت‌های فاز پالس لیزر و هماهنگ تولید شده و واکنش تجمعی پلاسما راندمان تبدیل پایین است، مگر این‌که ابزاری برای انطباق فاز اجرا شود. در این پایان‌نامه، تولید هماهنگ دوّم و انطباق فاز در پلاسمای فروچگال در حضور یک میدان مغناطیسی ویگلر بررسی شده است. میدان مغناطیسی نقش دینامیکی در تولید چگالی جریان هماهنگ عرضی و یک نقش سینماتیکی در برقراری انطباق فاز بازی می‌کند. نیروی اثرگذار اینرسی از جمله منبعی برای تولید هماهنگ‌ها است. سرعت ذرات الکترونی با یکدیگر تنش ایجاد کرده و هماهنگ‌های متفاوت را تولید می‌کنند. نیروی اثرگذار اینرسی می‌تواند در راندمان تولید هماهنگ دوّم مؤثر باشد و ما در این جا اثر این نیرو و چگالی گاز را بر تولید هماهنگ دوّم اتمی و نسبیتی بررسی کرده‌ایم. این کار به صورت تجربی در تولید فرآیندهای غیرخطی تشدیدی تنها در نیمه رساناها انجام شده است و امید است که توسط محیط پلاسما نیز به مرحله‌ی عملی درآید. از طرفی میدان مغناطیسی ویگلر تناوبی رفتار پلاسما را به صورت یک بلور فوتونی می‌کند که به مدل‌بندی آن در پلاسما می‌پردازیم و با ایده گرفتن از بلورهای فوتونی نشان داده می‌شود که میدان مغناطیسی ویگلر تناوبی رفتار پلاسما را به صورت یک بلور فوتونی غیرخطی می‌کند و انطباق فاز یا انطباق شبه فاز به آسانی به‌دست می‌آید به عبارتی پلاسمای فوتونی ساخته می‌شود.

فهرست مطالب

عنوان.....صفحه

فهرست شکل‌ها..... ح

فهرست جدول‌ها..... ل

فصل اوّل: مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی تولید هماهنگ دوّم تشدیدی....۱

فصل دوّم: مقدمه‌ای بر فیزیک پلاسما.....۵

۲-۱ پلاسما چیست؟.....۶

۲-۲ تاریخچه‌ی مختصری از فیزیک پلاسما.....۷

۲-۳ پلاسما چهارمین حالت ماده.....۹

۲-۴ انواع پلاسما.....۱۰

۲-۴-۱ پلاسماهای نجومی.....۱۰

۲-۴-۲ پلاسماهای آزمایشگاهی.....۱۱

۲-۵ مشخصه‌های پلاسما.....۱۲

۲-۵-۱ یونیزاسیون.....۱۲

۲-۵-۲ تبهگنی و طول موج حرارتی..... ۱۲

۲-۵-۳ اثرات نسبیتی..... ۱۳

۲-۶ معیارهای لازم جهت تعریف پلاسما..... ۱۴

۲-۶-۱ خنثایی ماکروسکوپیکی..... ۱۴

۲-۶-۲ حفاظ الکتریکی دبای..... ۱۵

۲-۶-۳ پارامتر پلاسما..... ۱۶

۲-۶-۴ فرکانس پلاسما..... ۱۷

۲-۷ چهارچوب منطقی از فیزیک پلاسما ۱۹

۲-۷-۱ اصول اولیّه ۲۲

۲-۷-۲ معادلات انتقال ماکروسکپی..... ۲۳

۲-۸ انتشار امواج الکترومغناطیسی در پلاسما..... ۲۶

فصل سوّم: نورشناخت و بلورهای فوتونی..... ۳۲

۳-۱ مقدمه‌ی براپتیک غیرخطی..... ۳۳

۳-۱-۱ اپتیک خطی..... ۳۴

۳-۱-۲ اپتیک غیرخطی..... ۳۵

۳-۲ معادلات ماکسول در اپتیک غیرخطی..... ۳۷

۳-۲-۱ معادلات موج جفت‌شده..... ۳۸

۳-۳ تولید هماهنگ دوّم و انطباق فاز..... ۴۰

۳-۴ بلورهای فوتونی..... ۴۳

۳-۴-۱ تعریف بلورهای فوتونی..... ۴۳

۳-۴-۲ ویژه مدهای بلورهای فوتونی..... ۴۶

۳-۴-۳ تئوری بلاخ..... ۴۸

۳-۴-۴ بلورهای فوتونی غیرخطی..... ۵۰

۳-۴-۵ شبکه‌ی وارون..... ۵۰

فصل چهارم: برهم‌کنش لیزر-پلاسما..... ۵۲

۴-۱ مقدمه..... ۵۳

۴-۲ تاریخچه‌ی لیزرهای پرتوان پالس کوتاه همدوس..... ۵۳

۴-۳ سیستم (CPA)..... ۵۶

۴-۴ تئوری برهم‌کنش لیزر–پلاسما..... ۵۸

۴-۴-۱ حرکت ارتعاشی الکترون در محیط پلاسما..... ۵۹

۴-۴-۲ اثرات تجمعی محیط..... ۶۱

۴-۴-۳ فشار اثرگذار..... ۶۳

۴-۴-۴ شتاب الکترون..... ۶۴

۴-۴-۵ اصول تولید هماهنگ‌های مرتبه‌ی بالا..... ۶۶

۴-۴-۵-۱ تولید هماهنگ‌ها در سطح اتمی..... ۶۷

فصل پنجم: تولید هماهنگ دوّم تشدیدی پالس لیزر کوتاه در پلاسما..... ۷۱

۵-۱ مقدمه..... ۷۲

۵-۲ چرا پلاسما؟..... ۷۳

۵-۳ انطباق فاز در تولید هماهنگ‌ها ۷۴

۵-۳-۱ عدم انطباق فاز پلاسمایی ۷۶

۵-۳-۲ عدم انطباق فاز وابسته به شدت..... ۷۷

۵-۴ معادلات حاکم بر دینامیک پلاسما و میدان‌های الکترومغناطیسی.....۷۷

۵-۴-۱ معادلات حاکم بر هماهنگ‌ها.....۷۷

۵-۵ تولید هماهنگ دوّم تشدیدی پالس کوتاه لیزر در پلاسما.....۷۹

۵-۵-۱ چگالی جریان غیرخطی.....۷۹

۵-۵-۲ محاسبات تحلیلی و نتایج نموداری.....۸۲

۵-۵-۳ نتیجه گیری.....۸۵

فصل ششم: تأثیر میدان مغناطیسی ویگلر و نیروی اثرگذار اینرسی، در تولید هماهنگ دوّم لیزر در پلاسمای فروچگال و ارائه‌ی مدل بلور فوتونی.....۸۷

۶-۱ مقدمه.....۸۸

۶-۲ اثر میدان مغناطیسی ویگلر و نیروی غیرخطی اینرسی بر روی تولید هماهنگ دوّم در اندرکنش لیزر-پلاسما.....۸۹

۶-۲-۱ حل تحلیلی معادلات غیرخطی حاکم بر پلاسما با استفاده از تئوری اختلال.....۸۹

۶-۲-۲ محاسبات تحلیلی و نتایج نموداری.....۹۲

۶-۲-۲-۱ محاسبات هماهنگ اوّل.....۹۲

۶-۲-۲-۲ محاسبات هماهنگ دوّم..... ۹۶

۶-۲-۳ نتیجه‌گیری..... ۱۰۲

۶-۳ تولید هماهنگ دوّم پالس کوتاه لیزر از پلاسمای نسبیتی..... ۱۰۵

۶-۳-۱ پراکندگی تامسون غیرخطی..... ۱۰۶

۶-۳-۲ معادلات حاکم بر پلاسمای نسبیتی..... ۱۰۸

۶-۳-۳ تئوری اختلال برای انتشار امواج الکترومغناطیسی در پلاسمای نسبیتی..... ۱۰۹

۶-۳-۴ نتایج نموداری ۱۱۱

۶-۴ مدل‌بندی پلاسما به عنوان بلور فوتونی..... ۱۱۷

۶-۴-۱ پلاسما به عنوان یک محیط دی‌الکتریک..... ۱۱۸

۶-۴-۲ شیوه‌های انطباق فاز..... ۱۱۹

۶-۴-۲-۱ انطباق فاز دو شکستی..... ۱۱۹

۶-۴-۲-۲ انطباق فاز توسط تنظیم دما..... ۱۲۰

۶-۴-۲-۳ انطباق شبه فاز توسط قطعه‌های متناوب..... ۱۲۱

۶-۴-۳ انطباق شبه‌فاز در تبدیل فرکانس نوری غیرخطی توسط بلورهای غیرخطی.....۱۲۲

۶-۴-۴ ایجاد بلور فوتونی غیرخطی در پلاسما ۱۲۵

۶-۴-۴-۱ معادلات غیرخطی حاکم بر پلاسما ۱۲۶

۶-۴-۴-۲ فرآیندهای غیرخطی مرتبه‌ی دوّم.....۱۲۹

۶-۴-۴-۲-۱ غیر همسانگردی محیط با اعمال میدان ویگلر.....۱۳۰

۶-۴-۴-۲-۲ تانسور رسانندگی الکتریکی غیرخطی مرتبه‌ی دوّم.....۱۳۱

۶-۴-۴-۳ ارتباط رسانندگی الکتریکی با پذیرفتاری الکتریکی.....۱۳۳

۶-۴-۴-۴ معادلات موج.....۱۳۴

۶-۴-۴-۵ معادلات موج برای فرآیند غیر خطی مرتبه‌ی دوّم.....۱۳۵

۶-۴-۴-۵-۱ معادلات موج برای فرآیند ***SHG***.....۱۳۶

فصل هفتم: نتیجه‌گیری.....۱۳۹

منابع.....۱۴۳

فهرست شکل‌ها

شکل(۲-۱): طرحی از حالت‌های H_2O هنگامی که حرارت به آن داده می‌شود، هم‌چنین وضعیت‌های متناظر ماده و برخی از انواع پلاسماها را که می‌تواند در محدوده دماهای گوناگون رخ دهد نیز نشان داده شده است..... ۱۱

شکل(۲-۲): دما و چگالی پلاسماهای نجومی و آزمایشگاهی..... ۱۳

شکل(۲-۳): پوشش؛ سطح پلاسما-جامد..... ۱۶

شکل(۲-۴): رابطه بین معادلات ماکسول و معادله لورنتس..... ۱۹

شکل(۲-۵): رابطه‌ی پاشندگی برای امواج الکترومغناطیسی در پلاسما..... ۲۸

شکل(۲-۶): انتشار یک موج الکترومغناطیسی در پلاسما..... ۳۰

شکل(۳-۱): فرکانس دو برابر یاقوتی: $\lambda = ۶۹۴/۳ nm \leftarrow \lambda = ۳۴۷/۱ nm$ توسط فرانکن و همکارانش مشاهده شد..... ۳۵

شکل(۳-۲): توصیف طرح مانندی از برهم‌کنش‌ها در فرآیندهای غیرخطی مرتبه‌ی دوّم..... ۳۷

شکل(۳-۳): افزایش سیگنال منطبق شده فازی (a)، در مقایسه با سیگنال عدم منطبق شده فازی (b)، برای چندین طول همدوسی..... ۴۲

شکل(۳-۴) طرحی از بلورهای فوتونی یک بعدی(1D)، دو بعدی(2D) و سه بعدی(3D) است، a ثابت شبکه است..... ۴۵
شکل(۳-۵): شبکه‌های وارون و حقیقی برای یک ساختار مربعی..... ۵۱
شکل(۴-۱) :سیر تحول لیزرهای پر توان..... ۵۵
شکل(۴-۲): طرح کلی سیستم تقویت کننده (*CPA*)..... ۵۷
شکل(۴-۳): اپتیک کلاسیک در مقابل اپتیک نسبیتی: الف) اپتیک کلاسیک. ب) اپتیک نسبیتی..... ۶۰
شکل(۴-۴): a) تولید هماهنگ‌های نسبیتی از پراکندگی تامسون غیرخطی و حرکت هشتی شکل الکترون. b) حرکت ارتعاشی غیرخطی الکترون‌ها (تولید هماهنگ‌ها)..... ۶۱
شکل(۴-۵): (*a*) خود کانونی نسبیتی. (*b*) خود کانال زنی اثرگذار..... ۶۲
شکل(۴-۶): خود هدایت نسبیتی پالس لیزر..... ۶۳
شکل(۴-۷): (a) شتاب میدان ردپای لیزر (*LWFA*). (b) شتاب میدان ردپای لیزر خودمدوله شده (*SMLWFA*)..... ۶۵
شکل(۴-۸): هماهنگ‌های تولید شده در کانون لیزر..... ۶۶

شکل(۴-۹): a) چاه پتانسیل اتمی یک بعدی (خط توپر) و پتانسیل الکتریکی اعمالی (خط فاصله‌دار). b) پتانسیل یک اتم که درمیدان لیزر شدید در یک زمان، واپیچیده شده است. ۶۸

شکل(۵-۱): تولید هماهنگی خاص از اتم ها در موقعیت های متفاوت درکانون لیزر ۷۵

شکل(۵-۲): تغییر فاز هماهنگ گسیلی درون کانون لیزر ۷۵

شکل(۵-۳): طرح مسئله‌ی مورد بررسی، از برهم‌کنش لیزر با پلاسما ۷۹

شکل(۵-۴): نمودارهای، $|A_{۲x}^{w}/A_{۰}|$ (۲) و $|A_{۱x}^{'}/A_{۰}|$ (۱)، بر حسب فاصله‌ی انتشار نرمالیزه، z' برای $t' = ۰$ ۸۴

شکل(۵-۵): نمودارهای، $|A_{۲x}^{w}/A_{۰}|$ (۲) و $|A_{۱x}^{'}/A_{۰}|$ (۱)، بر حسب فاصله‌ی انتشار نرمالیزه، z' برای $t' = ۲$ ۸۴

شکل(۵-۶): نمودارهای، $|A_{۲x}^{w}/A_{۰}|$ (۲) و $|A_{۱x}^{'}/A_{۰}|$ (۱)، بر حسب فاصله‌ی انتشار نرمالیزه، z' برای $t' = ۴$ ۸۵

شکل(۵-۷): نمودارهای، $|A_{۲x}^{w}/A_{۰}|$ (۲) و $|A_{۱x}^{'}/A_{۰}|$ (۱)، بر حسب فاصله‌ی انتشار نرمالیزه، z' برای $t' = ۶$ ۸۵

شکل(۶-۱): نمودارهای دامنه‌های نرمالیزه شده‌ی $A_{۲x}^{(۱)}/A_{o}$ و $A_{۲x}^{w(۱)}/A_{o}$، که به ترتیب توسط خطوط تیره و فاصله‌دار علامت گذاری شده‌اند، بر حسب ω_p/ω، در فاصله‌ی انتشار $z = ۳۰\mu m$، و زمان $t = ۱۲۰ fs$ ۱۰۲

شکل(۶-۲): نمودارهای دامنه‌ی نرمالیزه شده‌ی (a) A^{i1}_{2x}/A_o و (b) A^{w1}_{2x}/A_o. بر حسب فاصله‌ی انتشار z، در زمان $t=120fs$، برای ($\omega_p/\omega=0/5, 0/6, 0/7, 0/8$ و $0/92$). که به ترتیب توسط منحنی‌های خط‌چین کوتاه به بزرگ علامت گذاری شده‌اند.....۱۰۳

شکل(۶-۳): دامنه‌های نرمالیزه شده‌ی A^{o}_{1}/A_o، A^{i1}_{2}/A_o و A^{w1}_{2x}/A_o که به ترتیب نمودارهای خط تیره، خط فاصله و نقطه چین هستند، برحسب فاصله‌ی انتشار z، برای $\omega_p/\omega=0/89$ و مقادیر متفاوت (a) $t=0fs$، (b) $t=40fs$، (c) $t=80fs$، (d) $t=130fs$، (e) $t=170fs$، (f) $t=200fs$.....۱۰۴

شکل(۶-۴): حرکت 8–شکل، ومشاهده‌ی گسیل از پراکندگی تامسون غیرخطی.....۱۰۸

شکل(۶-۵): هماهنگ دوّم نسبیتی؛ دامنه‌های نرمالیزه شده‌ی A^{o}_{1}/A_o، A^{i1}_{2}/A_o و A^{w1}_{2x}/A_o که به ترتیب نمودارهای خط تیره، خط فاصله و نقطه چین هستند، برحسب فاصله‌ی انتشار z، برای $\omega_p/\omega=0/89$ و مقادیر متفاوت (a) $t=0fs$، (b) $t=40fs$، (c) $t=80fs$، (d) $t=130fs$، (e) $t=170fs$، (f) $t=200fs$.....۱۱۲

شکل(۶-۶): دامنه‌های نرمالیزه شده‌ی A^{o}_{1}/A_o، A^{i1}_{2}/A_o و A^{w1}_{2x}/A_o که به ترتیب نمودارهای خط تیره، خط فاصله و نقطه چین هستند، برحسب فاصله‌ی انتشار z، برای هماهنگ نسبیتی، $(a)-(f)$ و هماهنگ اتمی، $(a')-(f')$ به ازای مقادیر متفاوت (a،a') $t=0fs$، (b،b') $t=40fs$، (c،c') $t=80fs$، (d،d') $t=130fs$، (e،e') $t=170fs$، (f،f') $t=200fs$..۱۱۳-۱۱۴

شکل(۶-۷): دامنه‌های نرمالیزه شده‌ی A^{o}_{1}/A_o و A^{i1}_{2}/A_o، که به ترتیب نمودارهای خط تیره و خط فاصله هستند، برحسب فاصله‌ی انتشار z، برای شدت لیزر $I_L\simeq 10^{18}W/cm^2$، نمودارهای $(a)-(c)$ و شدت $I_L\simeq 10^{17}W/cm^2$، نمودارهای $(a')-(c')$ در سه زمان $t=0fs$، $t=80fs$ و $t=170fs$.....۱۱۵