

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه قم

دانشکده علوم

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد فیزیک

عنوان:

**عنوان بررسی اثر پروفایل چگالی بر روی ساختار
غیر خطی امواج الکترومغناطیس در پلاسماهای
زیر چگال**

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر علیرضا نیکنام

نگارش:

محمد مهدی منتظری

شهریور ماه ۱۳۸۹

تقدیم به

(روشنی بخشان راه زندگی)

پدر و مادر مهربانم

و همسر عزیزم

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب علم و دانش را به ما عطا فرمود. در اینجا بر خود لازم می دانم از زحمات استاد خوبم جناب آقای دکتر نیکنام به خاطر راهنمایی هایشان در انجام این پروژه تشکر کنم. بی شک اگر راهنمایی های ایشان نبود این پروژه با این حجم کاری به انجام نمی رسید. همچنین از دوست خوبم جناب آقای مجتبی هاشم زاده به خاطر کمک های بی دریغشان تشکر می کنم. در پایان از همسر عزیزم که مرا در انجام این پایان نامه یاری کردند، کمال تشکر را دارم.

چکیده

در این پایان نامه، ما به بررسی برهم کنش امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا با پلاسمای زیر چگال غیرمغناطیده و ناهمگن در حضور پروفایل چگالی خطی و نمایی پرداخته ایم. با در نظر گرفتن ناهمگنی محیط و نیروی اثرگذار غیرخطی، ضریب دی الکتریک غیرخطی برای پلاسمای سرد بررسی می شود. همچنین با استفاده از ضریب دی الکتریک غیرخطی و معادلات ماکسول، معادلات دیفرانسیل غیرخطی برای میدان های الکتریکی و مغناطیسی در داخل پلاسمای بدست آمدند. با در نظر گرفتن پروفایل چگالی نمایی، حل این معادلات نشان می دهد که با افزایش شدت پالس لیزر، طول موج نوسانات میدان ها کاهش یافته و شکل چگالی الکترون بسیار تیز می شود. و در نهایت با استفاده از پروفایل چگالی خطی، حل این معادلات نشان می دهد که با افزایش شدت پالس لیزر، طول موج نوسانات میدان ها کاهش یافته و شکل چگالی الکترون تیز می شود. سرانجام، نشان داده شد که با افزایش طول موج لیزر، توزیع چگالی الکترون کاهش می یابد.

کلمات کلیدی: برهم کنش لیزر با پلاسمای، نیروی اثرگذار، پلاسمای زیرچگال

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه.....
۹	فصل دوم: برهم کنش لیزر با پلاسما.....
۱۰	۱-۲ مقدمه
۱۲	۲-۲ چگونگی تشکیل پلاسما روی جسم جامد توسط لیزر
۱۵	۳-۲ پارامترها و معادلات اساسی در پلاسما
۱۶	۱-۳-۲ فرکانس پلاسما.....
	۲-۳-۲ انتشار امواج الکترومغناطیسی در یک پلاسمای سرد و محاسبه رابطه
۱۷	پاشندگی
۲۳	فصل سوم: آثار غیرخطی
۲۴	۱-۳ مقدمه
۲۷	۲-۳ نیروی اثرگذار
۳۴	۳-۳ ناپایداری های پارامتریک
۴۳	۱-۳-۳ پراکندگی بریلوئن برانگیخته :
۴۴	۲-۳-۳ پراکندگی رامان برانگیخته :
۴۵	۳-۳-۳ ناپایداری رشته ای :
۴۶	۴-۳-۳ ناپایداری مدولاسیون :
۴۶	۴-۳ مکانیسم فیزیکی امواج برانگیخته برحسب نیروی اثر گذار

فصل چهارم: بررسی اثر پروفایل چگالی در برهمکنش لیزر توان بالا با پلاسمای زیر چگال در	
رژیم غیرنسبیتی	۵۰
۱-۴ مقدمه	۵۱
۲-۴ معادلات اساسی	۵۵
۳-۴ معادلات غیر خطی	۶۲
۴-۴ حل عددی و بدست آوردن شکل میدان های الکتریکی و مغناطیسی و چگالی	
الکترونی	۶۴
۱-۴-۴ پروفایل چگالی اولیه :	۶۶
۲-۴-۴ پروفایل چگالی نمایی :	۷۲
۳-۴-۴ پروفایل چگالی خطی :	۷۵
فصل ۵: نتیجه گیری	۸۱
مراجع	۸۵
Abstract	۸۸

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱) تکنیک CPA	۵
شکل (۲-۱) سیر تاریخی پیشرفت تکنولوژی لیزر و ارتباط آن با ماده	۷
شکل (۱-۲) شماتیکی از تشکیل پلازما روی جسم جامد توسط لیزر	۱۳
شکل (۲-۲) شماتیکی از برهم کنش لیزر با پلازما	۲۰
شکل (۱-۳) شماتیکی از حرکت پالس لیزر در محیط پلازما	۲۸
شکل (۲-۳) پدیده خود کانونی یک باریکه لیزری در اثر نیروی اثرگذار	۳۴
شکل (۳-۳) شرح نموداری قانون پایستگی بدست آمده در معادلات (۳-۱۷) با در نظر گرفتن رابطه های پاشندگی (۳-۱۴)، (۳-۱۵) و (۳-۱۶) برای ناپایداریهای (a) ناپایداری واپاشی (b) ناپایداری بر انگیخته (c) ناپایداری بریلون برانگیخته.	۳۹
شکل (۴-۳) مکانیزمهای جذب ممکن و حوزه برهمکنش های موج-موج در طول پروفایل شدت.	۴۱
شکل (۵-۳) مشابه مکانیکی یک ناپایداری پارامتریک	۴۲
شکل (۶-۳) مکانیسم فیزیکی ناپایداری دو جریانی نوسان کننده	۴۸
شکل (۱-۴) الف) میدان الکتریکی E_x ب) میدان مغناطیسی B_y بصورت تابعی بر حسب z در خلا (خطوط نقطه چین) و در پلازما (خطوط پر)	
برای $T_e = 10keV$ ، $n_{e0} = 1 \times 10^{21} cm^{-3}$ ، $I = 1 \times 10^{17} W/cm^2$ و چگالی بحرانی	
$n_c = 1.72 \times 10^{21} cm^{-3}$	۶۷
شکل (۲-۴) الف) میدان الکتریکی E_x ب) میدان مغناطیسی B_y تغییر چگالی الکترون بصورت تابعی بر حسب z برای مقادیر مختلف $n_{e0} = 1 \times 10^{20} cm^{-3}$	
$\delta n / n_{e0} = (n_e / n_{e0}) - 1$	

(خطوط نقطه چین)، $n_{e0} = 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ (خطوط خط چین) و $n_{e0} = 1.5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$)
خطوط پر). بقیه پارامترها شبیه پارامترهای شکل (۱) می باشد. ۶۹
شکل (۳-۴) الف) میدان الکتریکی E_x (ب) میدان مغناطیسی B_y (ج) تغییر چگالی الکترون
 $\delta n / n_{e0} = (n_e / n_{e0}) - 1$ بصورت تابعی بر حسب z برای مقادیر مختلف
 $I = 1 \times 10^{16} \text{ W / cm}^2$ (خطوط نقطه چین)، $I = 1 \times 10^{17} \text{ W / cm}^2$ (خطوط خط چین) و
 $I = 5 \times 10^{17} \text{ W / cm}^2$ (خطوط پر). بقیه پارامترها شبیه پارامترهای شکل (۱) می باشد. .. ۷۱
شکل (۴-۴) میدان الکتریکی بصورت تابعی از z برای مقادیر مختلف
شدت $I = 5 \times 10^{16} \text{ W / cm}^2$ (نقطه چین)، $I = 10^{17} \text{ W / cm}^2$ (نقطه-خط) و $I = 5 \times 10^{17} \text{ W / cm}^2$
(خط ممتد). کمیت های دیگر عبارتند از: $T_e = 10 \text{ keV}$ ، $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ و $n_{cr} = 1.72 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$.. ۷۳
شکل (۵-۴) - میدان مغناطیسی بصورت تابعی از z برای مقادیر مختلف
شدت $I = 5 \times 10^{16} \text{ W / cm}^2$ (نقطه چین)، $I = 10^{17} \text{ W / cm}^2$ (نقطه-خط) و $I = 5 \times 10^{17} \text{ W / cm}^2$
(خط ممتد). کمیت های دیگر نیز مشابه با شکل (۱) می باشد. ۷۴
شکل (۶-۴) - چگالی الکترون بصورت تابعی از z برای مقادیر مختلف شدت
 $I = 5 \times 10^{16} \text{ W / cm}^2$ (نقطه چین)، $I = 10^{17} \text{ W / cm}^2$ (نقطه-خط) و $I = 5 \times 10^{17} \text{ W / cm}^2$
(خط ممتد). کمیت های دیگر نیز مشابه با شکل (۳-۴) می باشد. ۷۴
شکل (۷-۴) - میدان الکتریکی بصورت تابعی از z برای مقادیر مختلف
شدت $I = 5 \times 10^{16} \text{ W / cm}^2$ (نقطه چین)، $I = 10^{17} \text{ W / cm}^2$ (نقطه-خط) و $I = 5 \times 10^{17} \text{ W / cm}^2$
(خط ممتد). کمیت های دیگر عبارتند از: $T_e = 10 \text{ keV}$ ، $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ و $n_{cr} = 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$... ۷۶
شکل (۸-۴) - میدان مغناطیسی بصورت تابعی از z برای مقادیر مختلف
شدت $I = 5 \times 10^{16} \text{ W / cm}^2$ (نقطه چین)، $I = 10^{17} \text{ W / cm}^2$ (نقطه-خط) و $I = 5 \times 10^{17} \text{ W / cm}^2$
(خط ممتد). کمیت های دیگر نیز مشابه با شکل (۴-۷) می باشد. ۷۷

شکل ۴-۹) - چگالی الکترون بصورت تابعی از z برای مقادیر مختلف شدت

$$I = 5 \times 10^{16} W/cm^2 \text{ (نقطه چین)}, I = 10^{17} W/cm^2 \text{ (نقطه - خط)} \text{ و } I = 5 \times 10^{17} W/cm^2$$

(خط ممتد). کمیت های دیگر نیز مشابه با شکل (۴-۷) می باشد. ۷۸

شکل ۴-۱۰) میدان الکتریکی بصورت تابعی از z برای مقادیر مختلف طول موج

$$\lambda = 1.06 \mu m \text{ (نقطه - خط)} \text{ و } \lambda = 0.8 \mu m \text{ (خط ممتد)} \text{ شدت لیزر } I = 10^{17} W/cm^2 \text{ کمیت}$$

های دیگر نیز مشابه شکل (۴-۷) می باشد. ۷۸

شکل ۴-۱۱) میدان مغناطیسی بصورت تابعی از z برای مقادیر مختلف طول موج

$$\lambda = 1.06 \mu m \text{ (نقطه - خط)} \text{ و } \lambda = 0.8 \mu m \text{ (خط ممتد)} \text{ شدت لیزر } I = 10^{17} W/cm^2$$

کمیت های دیگر نیز مشابه شکل (۴-۷) می باشد. ۷۹

شکل ۴-۱۲) - چگالی الکترون بصورت تابعی از z برای مقادیر مختلف طول موج

$$\lambda = 1.06 \mu m \text{ (نقطه - خط)} \text{ و } \lambda = 0.8 \mu m \text{ (خط ممتد)} \text{ کمیت های دیگر مشابه با شکل (۴-۱۰)}$$

۷۹



The University of Qom
Faculty of science

Thesis
for Degree of Master of science (MSC)
In Physics

Title:

*Investigation of the effect of density profile
on the nonlinear structure of the
electromagnetic waves in underdense
plasmas*

Supervisor:

Dr. Ali Reza Niknam

By:

Mohammad Mahdi Montazeri

September ۲۰۱۰

مقدمه

مقدمه

انیشتین^۱ در سال ۱۹۱۷ میلادی نظریه گسیل القایی را بیان داشت و روابط مشهور جذب و نشر را به جهان عرضه نمود. بر پایه این تئوری چهل سال بعد، تاونز^۲ و همکاران او، نخستین تقویت کننده گسیل القایی را با بکار گیری آمونیاک مورد آزمایش قرار داده و سیستمی به اسم میزر پدید آوردند که در فرکانس 10^{11} Hz کار می کرد.

اولین لیزر حقیقی در سال ۱۹۵۹ توسط میمن^۳ ساخته شد. در این لیزر، انرژی ماکروویو توسط کریستال یاقوت تقویت می شد تا پرتوی نور قرمزی با طول موج ۶۹۴ نانومتر تولید شود. بعد از ساخت اولین لیزر توسط میمن در این سال، دانشمندان در پی آن بودند تا با مواد فعال دیگر، لیزرهای جدیدی طراحی کنند.^[۱] مدت کوتاهی پس از لیزر یاقوت، لیزرهای جامد دیگری مثل $Nd:YAG$ تولید شد. بطور کلی این لیزرها دارای دو نوع پیوسته و پالسی بودند. لیزرهای FR ^۴ اولیه بصورت موج پیوسته بودند که توانی در حدود کیلو وات تولید می کردند. هدف اصلی محققان بعد از کشف اولین لیزرها، افزایش توان این لیزرها بود.

در زمان کوتاهی پس از تولید لیزرهای درمانی، آزمایشهایی جهت کاهش مدت تماس با لیزر از میلی ثانیه به نانو ثانیه انجام شد. این تکنیک که Q-switched (QS) نامیده می شد پالس را کوتاه و پیک انرژی را از طریق استفاده از دیافراگم الکتریکی نوری افزایش داد. این امر امکان ذخیره و متعاقباً آزاد سازی انرژی در حد گیگا وات را امکان پذیر می کرد.

^۱ Einstein

^۲ Tawns

^۳ Maiman

^۴ Free-Running

اولین لیزر QS یک لیزر یاقوتی اصلاح شده بود که توسط دکتر گلدمن^۱ در سال ۱۹۶۷ برای برداشتن خالکوبی‌ها استفاده شد. لیزر یاقوتی QS یک پرتو نور قرمز رنگ با طول موج ۶۹۴ نانومتر تابش می‌کرد. اگرچه لیزر یاقوتی QS در درمان خالکوبی ایمن و کارآمد بود اما FDA^۲ (اداره نظارت بر غذا و داروی آمریکا) این روش درمانی را تا ۲۲ سال بعد یعنی ۱۹۸۹ تأیید نکرد. پیشگامانی مثل رید^۳ و همکارانش سبب ایجاد علاقه‌ی مجدد به روش QS شدند. با کشف QS بیشینه توان به مگاوات افزایش یافت تا اینکه در سال ۱۹۶۴ میلادی بیشینه توان لیزرها با استفاده از روش جدیدی به نام قفل شدگی مد^۴، دوره‌ی پالس‌ها به نانو ثانیه ($1\text{ns}=10^{-9}\text{s}$) تقلیل و توان لیزر تا گیگاوات افزایش یافت. در مدت زمان نزدیک به دو دهه توان لیزرها در این حد ثابت ماند تا اینکه در دهه‌ی ۸۰ میلادی با کشف روش تقویت پالس کشیده شده (CPA)^۵ انقلاب عظیمی در صنعت لیزر بوجود آمد. این کشف مهم توانایی تولید پالس‌های فوق کوتاه و کاربرد سیستم تقویت پالس کشیده در لیزرهای حالت جامد بود، به گونه‌ای که توانست زمینه را برای تولید پالس‌های لیزری پتاوات فراهم کند. محققانی همچون جرارد مورو^۶ و دونا استریکلند^۷ توانستند با دستیابی به روش تقویت پالس کشیده شده (CPA)، لیزرهایی با دوره‌ی پالس فمتو ثانیه ($1\text{fs}=10^{-15}\text{s}$) تولید کنند.

روش CPA ابتدا به صورت تکنیکی برای افزایش توان رادارها در سال ۱۹۶۰ معرفی گردید. در اواسط دهه ۸۰ جرارد مورو و دونا استریکلند در دانشگاه روچستر^۸ این تکنیک را برای تقویت لیزرها به کار بردند. قبل از آن، توان پالس‌های لیزر محدودیت داشتند چرا که یک پالس لیزر با شدت گیگاوات بر هر سانتیمتر مربع در اثر فرایندهای غیر خطی مانند خود کانونی باعث

^۱ Goldman

^۲ Food and Drug Administration

^۳ Reid

^۴ Mode-Locking

^۵ Chirped pulse amplification

^۶ Gerard Moreau

^۷ Donna Strickland

^۸ University of Rochester

تخریب محیط تقویت لیزر می شد. برای مثال برخی از پرتوهای لیزر CPA فشرده شده با توان بسیار بالا، حتی در یک روزنه بزرگ غیرکانونی می تواند شدت های ۷۰۰ گیگاوات بر سانتیمتر مربع را ایجاد کند، که اگر امکان انتشار در هوا یا محیط تقویت لیزر را داشته باشند فوراً خود کانونی شده و یا منجر به انتشار رشته ای می شوند که هر دوی این موارد می تواند باعث تخریب عناصر سیستم لیزر و کیفیت پرتوی لیزر شوند.

به منظور کنترل شدت پالس های لیزر، پائین تر از آستانه اثرات غیر خطی، سیستم های لیزر بسیار بزرگ و گران قیمت شده، و توان پالس های لیزر محدود به حداکثر سطح گیگا وات و تراوات شدند.

فرایندهای غیر خطی، توسط لیزرهای توان بالا ایجاد می شوند که چنین پدیده هایی منجر به تخریب وسایل تقویت کننده می شوند. به این دلیل است که توان بیشینه ی سیستم های لیزر، به آستانه تخریب وسایل تقویت کننده محدود می شود. بنابراین برای بالا بردن شار انرژی در لیزر می بایست مساحت بخش های اپتیکی را نیز افزایش داد. اما این مسئله هزینه سیستم را با افزایش اندازه پرتو لیزر به طور نمایی بالا می برد. به این دلیل است که استفاده از این لیزرها محدود به آزمایشگاه های ملی می شود. اولین لیزرهای شدت بالا در آزمایشگاه های ملی LLNL^۱ در آمریکا و وولکان^۲ در رادرفورد انگلستان^۳ تولید شدند.

در دهه ۹۰ لیزر جدیدی به نام تیتانیوم-سفایر^۴ توانست بهره بالایی در محدوده وسیعی از طول موج ها عرضه کند. با استفاده از تکنیک CPA علاوه بر آنکه بر محدودیت توان لیزر غلبه کرده بود، آسیب ناشی از لیزرهای شدت بالا بر روی محیط تقویت کننده را به حداقل رسانید و استفاده از لیزرهای تیتانیوم-سفایر به عنوان تقویت کننده امکان ایجاد مستقیم پالس های

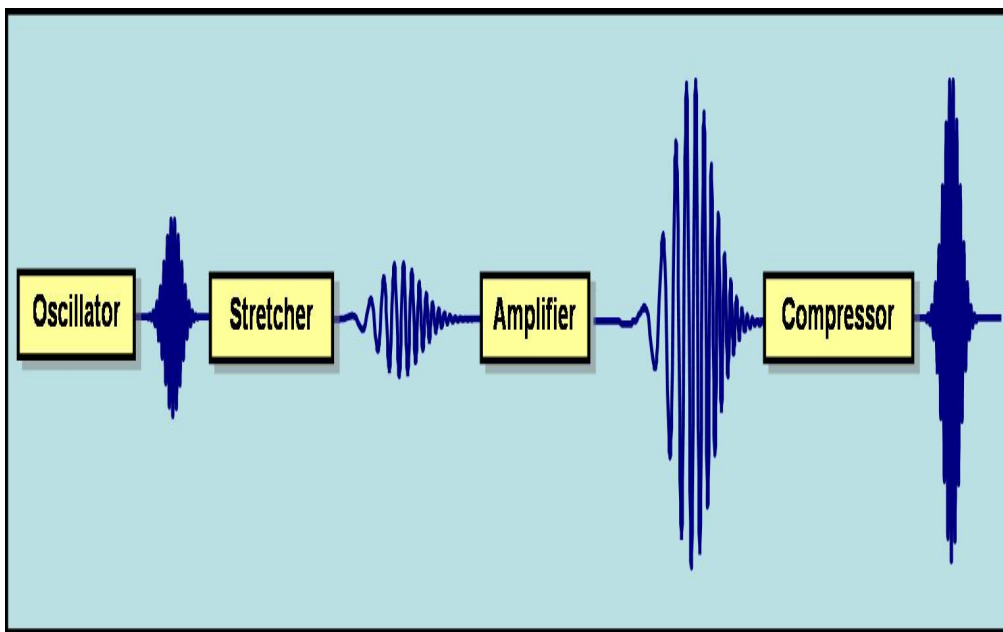
^۱ Lawrence Livermore National Laboratory

^۲ Vulcan

^۳ Rutherford Appleton Laboratory

^۴ Ti-Sapphire

شدت بالای بسیار کوتاه (کمتر از ۵ فمتو ثانیه) از یک لیزر حالت جامد فراهم شد. لیزرهای فمتو ثانیه پالس های پتاوات ($1PW = 10^{15}W$) تولید می کنند که اغلب لیزرهایی مانند تیتانیوم-سفایر، اگزایمر و $Nd-glass$ می باشند. امروزه می توان به کمک چنین تکنیکی لیزرهایی با توان تراوات در یک آزمایشگاه کوچک به صورت رومیزی تولید کرد. با اینکه انرژی متوسط این لیزرها بسیار کمتر از لیزرهای بزرگی هم چون لیزر نووا^۱ و وولکان می باشد ولی کوتاه بودن پالس، آنها را وسیله ای مناسب برای بسیاری از کاربردهای دیگر نموده است که این امر باعث شده توجه بیشتری به آنها حتی در مقایسه با لیزرهای بزرگ شود.



شکل ۱) تکنیک [CPA]^۱

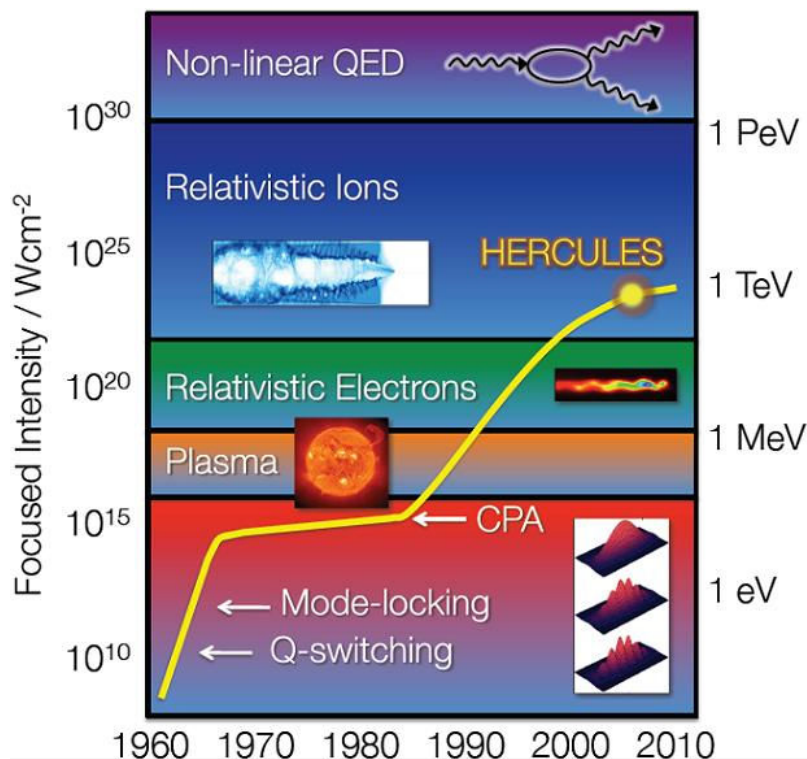
روش کار تکنیک CPA به این صورت است که ابتدا یک پالس لیزر با دوره نانو ثانیه را کشیده و پس از آن توسط یک تقویت کننده این پالس کشیده را تقویت می کنند در مرحله بعد پالس تقویت شده را فشرده کرده تا دوره آن به فمتو ثانیه برسد. شماتیکی از این مراحل در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که گفته شد اولین بار تکنیک CPA توسط مورو شرح داده شد،

^۱ Nova

در این روش اولیه، پالس لیزر ناشی از CPA ترکیبی از مدولاسیون خود فازی و پاشندگی سرعت گروه در فیبر نوری بوده و به وسیله آن طیف را گسترش دادند و پالس نوسانگر پیکو ثانیه را می کشند، پالس کشیده شده توسط فیبر به خوبی با متراکم کننده تطابق نداشته و این امر باعث ضعیف بودن تراکم می شود. برای حل این مشکل آنها متوجه شدند که با قراردادن یک تلسکوپ 1:1 داخل سیستم کشنده، می توانند باعث تغییر علامت پالس کشیده شده توسط سیستم متراکم کننده شوند. با این ترکیب جدید مورو موفق به ساخت اولین سیستم *compressor – stretcher* شد. در اوایل دهه ۹۰ کشف Kerr-lens-modelocking باعث پیشرفت چشم گیری در تکنیک CPA شد، بدین صورت که امکان ساخت نوسانگر فمتو ثانیه پایدار در آن بوجود آمد، که این امر باعث شد تا تولید پالس لیزر توسط CPA آسانتر شود. پیشرفته ترین لیزرهایی که توسط این روش ساخته شد، لیزرهای حالت جامدی مانند تیتانیوم-سفاير، اگزایمر و Nd-glass می باشند که پالس های پتا وات ($1PW = 10^{15}W$) تولید می کنند. در چنین توان هایی شاهد پدیده های غیرخطی جالبی هستیم که در ادامه در مورد آنها بحث خواهیم کرد.

روند رو به رشد توان لیزرها در سالهای اخیر در شکل ۲ نشان داده شده است. [۲] همانطوری که از شکل مشخص است با کشف کیوسوئیچینگ و قفل شدگی مد، پیشرفت صعودی در صنعت لیزر بوجود آمده است. پس از آن، این روند تا نیمه دوم دهه ۸۰ میلادی به یکباره کند شد، تا اینکه با کشف تکنیک CPA دوباره شاهد پیشرفت صنعت لیزر شدیم. دانشمندان با توجه به شکل انتظار دارند که با پیشرفت علم لیزر بتوانند اثرات درون هسته ای، الکتروپدینامیک کوانتومی و لحظه ی آغازین خلقت را بسیار آسانتر و ارزانتر از سرن^۱ شبیه سازی و بررسی کنند.

^۱ CERN



شکل ۲) سیر تاریخی پیشرفت تکنولوژی لیزر و ارتباط آن با ماده [۲]

با دستیابی به لیزرهای توان بالا، محققان شاهد اثرات غیرخطی زیادی در این گستره بودند. اپتیک غیرخطی بعد از اختراع لیزر و با کشف دو برابر کردن فرکانس در کوآرترز شکل گرفت. بسیاری از اتم‌ها شامل گازهای نجیب بودند و در اثر لیزری با شدت بیشتر از $10^{11} \frac{W}{cm^2}$ ناپایدار می‌شوند. اتم‌ها به وسیله‌ی جذب چند فوتونی و تونل زنی کوانتومی در جهت میدان لیزر یونیزه شده، لذا پاسخ آنها به میدان لیزر کاملاً غیرخطی می‌باشد. از جمله این پدیده‌ها، تولید پلاسما و اثرات غیرخطی ناشی از آن است. از جمله این اثرات غیرخطی می‌توان به نیروی اثرگذار و جرم نسبیتی اشاره کرد. جرم نسبیتی هنگامی ظاهر می‌شود که شدت لیزر ورودی بالاتر از $10^{18} \frac{W}{cm^2}$ باشد در این صورت سرعت ذرات قابل مقایسه با سرعت نور در خلا می‌شوند. جرم نسبیتی و نیروی اثرگذار می‌توانند روی ضریب دی‌الکتریک پلاسما اثر گذاشته

و آن را به شدت میدان فرودی وابسته کنند در این صورت میدان الکتریکی لیزر باعث خنثی شدن سد کولنی اتم ها شده و موجب یونیزاسیون تونلی سریع خواهد شد. این فرآیند یونیزش سریع باعث ایجاد ضریب شکست متغیر در طول مسیر لیزر خواهد شد و در نتیجه آن **Blue-Shifting** طیف لیزر و **Self- steepening** پالس لیزر رخ خواهد داد. این عوامل همانطور که بعداً به آنها اشاره خواهیم کرد باعث می شوند تا شکل موج در داخل پلاسما دچار تغییر شود. [۳]

از اثرات غیرخطی که در برهمکنش لیزر با پلاسما وجود دارد می توان به پراکندگی رامان برانگیخته^۱ [۵و۴]، پراکندگی بریلوئن برانگیخته^۲ [۶و۵]، پدیده خودکانونی^۳ [۵]، ناپایداری های رشته ای^۴ [۷]، مدولاسیون^۵ [۷] و ... اشاره کرد. این پدیده ها در عین حال که جالب می باشند فوق العاده پیچیده بوده و این پیچیدگی خود باعث جذابیت موضوع شده و ما را بر آن داشته تا در فصل های بعد این پایان نامه به بررسی برخی از این مباحث به طور مشروح بپردازیم.

^۱ Stimulated Raman Scattering
^۲ Stimulated Brillouin Scattering
^۳ Self-focusing
^۴ Filamentation instability
^۵ Modulation instability

برهم کنش لیزر با پلاسما