بسم الله الرحمن الرحیم

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

تاثیر پیش یونش در تخلیه پلاسما لیزر X-UV

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته‌ی فیزیک

گرایش اتمی- مولکولی

نگارنده:

الهام خلیلی

اساتید راهنما:

دکتر مجید امامی خوانساری

دکتر الهه نحوی فرد

استاد مشاور:

دکتر محمدرضا بذرافکن

اسفند 90

تقدیم به

پدرم، استوارترین پشتوانه زندگی که همواره چتر محبتش بر سرم باز است

و مادرم، دل انگیزترین رایحه مهر که دامان پر مهرش یگانه پناه همیشگی‌ام است.

ای هستی بخش، وجود مرا بر نعمات بی‌کرانت توان شکر نیست. ذره ذره وجودم برای تو و نزدیک شدن به تو می‌تپد. الهی، مرا مدد کن تا دانش اندکم نه نردبانی باشد برای فزونی تکبر و غرور، نه حلقه‌ای باشد برای اسارت و نه دست‌مایه‌ای برای تجارت، بلکه گامی باشد برای تجلیل از تو و متعالی ساختن زندگی خود و دیگران.

حال که توفیق جمع‌آوری و تهیه این مجموعه را یافته‌ام بر خود واجب می‌دانم از تمامی عزیزانی که در طول انجام این پژوهش از راهنمایی و یاری‌شان بهره‌مند گشته‌ام، تشکر و قدردانی کنم و برای ایشان از درگاه پروردگار مهربان، آرزوی سعادت و پیروزی نمایم.

در ابتدا صمیمانه‌ترین تقدیرها، تقدیم به خانواده عزیز و مهربانم که همواره حامی و مشوقم بوده‌اند و پیمودن روزهای سخت و آسان زندگی‌ام بدون دعای خیر و برکت وجودشان غیرممکن بود.

از اساتید راهنمای ارجمند جناب آقای دکتر امامی خوانساری و سرکار خانم دکتر نحوی فرد که با سعه صدر و صبوری مرا راهنمایی نموده و با ارائه نظرات سازنده و رهنمودهای بی‌دریغشان در پیشبرد این پایان نامه، سعی تمام مبذول داشته‌اند کمال تشکر را دارم.

از استاد مشاور ارجمند جناب آقای دکتر بذرافکن که در طول این تحقیق با رهنمودهای خویش مرا مورد لطف قرار دادند صمیمانه سپاسگزارم.

همچنین از راهنمایی‌های جناب آقای مهندس آرام که در تدوین این پایان نامه مرا یاری نمودند، قدرانی می‌نمایم.

در انتها نیز از سازمان انرژی اتمی ایران به جهت همکاری صمیمانه در انجام این پروژه نهایت تشکر را دارم.

چکیده

با توجه به پیشرفت لیزرهای اشعه x مبتنی بر تنگش تخلیه z در لوله باریک به ویژه در سال‌های اخیر، توجه به ساختار این نوع لیزرها از اهمیت خاصی برخوردار است. به منظور دستیابی به لیزرهای با انرژی بالاتر و طول موج کوتاهتر، درک دینامیک فشردگی پلاسما ضروری است. در این پایان نامه سعی شده است به اهمیت شرایط پلاسمای اولیه در تشکیل یک تخلیه پایدار پرداخته شود. پیش یونش با توجه به تاثیر موثری که در تشکیل تنگش یکنواخت در فاز تخلیه اصلی، کاهش ناپایداری‌های آن و نهایتا در انرژی خروجی لیزر دارد، به عنوان مهم‌ترین شرط پلاسمای اولیه مورد توجه قرار می‌گیرد. در مورد نتایج تجربی تاثیر جهت جریان پیش یونش برای لیزر یون Ar شبه Ne در تشکیل میدان مغناطیسی پایدار که خودمنجر به پایداری پلاسمای نهایی می-گردد، بحث و میزان چگالی و دمای الکترونی مورد نیاز در مرحله پیش یونش محاسبه و تطابق آن با نتایج تجربی ارائه می‌شود.

کلید واژه : لیزر اشعه X نرم، تنگش Z، یون Ar شبه Ne، پیش یونش

Abstract

In the recent years, because of development of z-pinch capillary discharge x-ray lasers, understanding of the working mechanism for such lasers becomes very important. In order to achieve higher power lasers with shorter wavelengths, it is necessary to understand the dynamics of plasma compression. In this thesis special attention is paid on the importance of the primary plasma condition on the formation of a stable plasma discharge. In the main discharge phase, since the pre-ionization has an effective role on the decreasing the plasma instabilities (by creating a uniform pinch) plus improving the profile of the laser output energy, so it is considered to be one of the most important system in lasers. The experimental results on the effects of the pre-ionization on the formation of a stable magnetic field which leads to formation of a uniform plasma in a Ne-like Ar laser are discussed. Also, the amount of electron density and electron temperature which are required in the pre-ionization stage are calculated which show good agreement with the experimental results.

Ministry of Science, Research and Technology

Imam Khomeini International University
Faculty of basic
Department of physics

pre-ionization effect study on the capillary plasma discharge in a X-UV laser

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in atomic and molecular physics

By:
Elham Khalili

Supervisor:
Dr. Majid Emami Khansari
Dr. Elahe Nahvi Fard

Advisor:
Dr. Mohammad Reza Bazrafkan

February, 2012

فهرست مطالب

مقدمه 1

اهداف پایان نامه 1

تاریخچه توسعه لیزر 2

تاریخچه توسعه لیزرهای اشعه X مبتنی بر تنگش تخلیه در لوله موبین 3

حالت‌های ارائه شده از محرک‌های رومیزی 5

لیزرهای پالسی طول موج کوتاه و توان بالا 6

تخلیه سریع در لوله 6

مشخصات باریکه لیزر مبتنی بر تخلیه در لوله موبین در یون Ar شبه Ne 10

ساختار پایان نامه 13

فصل اول (فیزیک پلاسما لیزر اشعه X نرم مبتنی بر تنگش تخلیه در لوله موبین) 14

1-1- مقدمه 15

2-1- پلاسما 15

1-2-1- پارامترهای اصلی پلاسما 16

2-2-1- فرکانس پلاسما 16

3-2-1- معیارهای وجود پلاسما 17

3-1- شرایط لازم جهت تقویت لیزر اشعه X نرم در پلاسما 18

1-3-1- شرایط لازم برای توان پمپ 18

2-3-1- اتلاف‌های ناشی از شکست در پلاسما 21

1-4- مکانیزم‌های وارونی جمعیت 24
1-4-1- پمپ به روش برانگیختگی برخوردی الکترون 24
1-4-2- پمپ به روش بازترکیب برخوردی الکترون 26
1-4-3- پمپ تبادل بار 28
1-4-4- مقایسه مکانیزم‌های برانگیختگی برخوردی و بازترکیب برخوردی 28
1-5- تخلیه‌های گازی 30
1-5-1- دسته‌بندی تخلیه‌های گازی 31
1-5-2- محصورسازی به روش تنگش z 34
1-5-2-1- طرز کار z-pinch 34
فصل دوم (دینامیک پلاسمای با تنگش Z) 37
2-1- مقدمه 38
2-2- روابط حاکم در مدل سیالی 38
2-2-1- رابطه پیوستگی (بقای جرم) 39
2-2-2- رابطه تکانه 40
2-2-3- رابطه تعادلی انرژی الکترون‌ها 40
2-2-4- رابطه تعادلی انرژی یون‌ها 42
2-2-5- رابطه نفوذ میدان مغناطیسی 43
2-2-6- جمعیت حالت پایه 43
2-3- آماده سازی معادلات جهت محاسبات عددی 45
2-3-1- نرمالیزه کردن معادلات 45
2-3-2- شرایط مرزی 46

2-3-3- شرایط اولیه 47
2-3-4- حالت خاص با هدایت الکتریکی زیاد 48
2-4- مدل ساده توصیف کننده پلاسما با تنگش z 50
2-4-1- مدل snowplow 50
2-4-2- مدل‌های دیگر توصیف کننده دینامیک تنگش z 53
2-4-2-1- مدل snowplow اصلاح یافته 53
2-4-2-2- مدل اسلاگ 54
2-4-2-3- مدل مگنتوهیدرودینامیکی (MHD) 55
فصل سوم (پیش یونش) 57
3-1- مقدمه 58
3-2- ناپایداری‌های ایجاد شده در لیزر اشعه x مبتنی بر تنگش تخلیه 59
3-2-1- خواص پایداری و ناپایداری 59
3-2-2- ناپایداری‌های تخلیه 61
3-2-2-1- ناپایداری گرمایی 61
3-2-2-2- ناپایداری ضمیمه‌ای 63
3-2-2-3- ناحیه domain 64
3-2-2-4- ماکسولی شدن الکترون‌ها 64
3-2-2-5- ناپایداری‌های طولی و عرضی و اثرات ایجاد کننده آن‌ها 65
3-2-2-5-1- لایه‌ها 66
3-2-2-5-2- فیلمان و قوس الکتریکی 67
3-2-2-5-3- بررسی روابط موجود بین لایه‌ها و فیلمان‌ها 69

3-3- روش‌های کاهش ناپایداری 78
3-4- پیش یونش 79
3-4-1- روش‌های پیش یونش 81
3-4-2- پیش یونش به روش تخلیه گازی 81
3-5- تحلیل فیزیکی پلاسمای تنگیده در لیزر یون Ar شبه Ne 82
3-5-1- چگالی الکترونی مورد نیاز برای شکست همگن در پلاسما 86
3-5-2- تاثیر پیش یونش بر گسیل اشعه X نرم 88
3-5-2-1- تاثیر جهت جریان پیش یونش بر گسیل اشعه x در یک لیزر 88
3-5-2-2- میزان انرژی قله SXR 96
3-6- چگالی الکترون در فاز پیش یونش 98
3-6-1- روش محاسباتی چگالی الکترون در فاز پیش یونش 98
3-6-2- تکنیک‌های اندازه‌گیری 100
3-6-3- طرح تحلیل در اندازه‌گیری‌ها 101
3-6-3-1- برآوردهای تحلیلی از مدار اندازه‌گیری شده 101
3-6-4- مقدار بهینه چگالی الکترون 106
3-7- دمای الکترون در فاز پیش یونش 108
3-7-1- روش محاسباتی دمای الکترون در فاز پیش یونش 108
3-8- نتیجه‌گیری 110
پیشنهادات 110
منابع 111

فهرست شکل‌ها

شکل (1) افزایش شدت خط لیزر در طول موج $46.9nm$ برای یون Ar شبه Ne با افزایش طول ستون پلاسما 9

شکل (2) مقایسه اندازه لیزر اشعه x نرم تخلیه در لوله موئین با لیزر هلیم- نئون 10

شکل (3) الگوهای نزدیک و دور از میدان در یک لیزر Ar شبه Ne مبتنی بر تخلیه درلوله به شکل تابعی از فشار تخلیه درلوله 11

شکل (1-1) تغییرات شدت در خط $46.9nm$ برای یون Ar شبه Ne به عنوان تابعی از طول ستون پلاسما دریک تقویت کننده تخلیه در لوله موئین 19

شکل (1-2) شارش لیزر بر محور به عنوان تابعی از طول پلاسما 23

شکل (1-3) نمودار تراز انرژی برای پمپ به روش برانگیختگی الکترون 24

شکل (1-4) نمودار تراز انرژی برای بازترکیب برخوردی الکترون 27

شکل (1-5) مثالی از یک تخلیه در لوله 31

شکل (1-6) طرحی از مشخصه ولتاژ-جریان یک تخلیه خودنگهدار (منحنی توپر) که به یک ذخیره ساز توان DC با ولتاژ V_0 و مقاومت R_0 و خط بار مقاومت (نقطه چین) متصل شده است 32

شکل (1- 7) تخلیه در لوله موئین با تنگش z 35

شکل (1-8) مراحل تنگش پلاسما در لوله موئین 36

شکل (2-1) نمایی از گسیل خودبخودی، واداشته و جذب در یک لیزر 44

شکل (2-2) تنگش پلاسما 51

شکل (2-3) تنگش پلاسما در اثر اعمال جریان سینوسی i_p 53

شکل (3-1) منحنی تعادل حالت پایدار و ناپایدار با توجه به نرخ تولید Z_+ و اتلاف Z_- (a تعادل پایدار و b تعادل ناپایدار) 61

شکل (3-2) اختلالات طولی (a) و عرضی (b) چگالی الکترونی 65

شکل (3-3) تشکیل لایه‌ها 67

شکل (3-4) نمونه‌ای از ساختار تجربی یک لیزر با تنگش z برای یون Ar شبه Ne 82

شکل (3-5) مدار الکتریکی هم ارز لوله با حضور سیستم پیش یونش 83

شکل (3-6) خط پیوسته: سیگنال خروجی XRD و نقطه چین: تحول شعاع پلاسما (زمان صعود جریان $30ns$ برای (a) و $36ns$ برای (b) 85

شکل (3-7) SIGNAL facility 1) لوله موبین، 2) سیم‌پیچ روگوسکی، 3) محفظه تشخیصی، 4) منبع پلاسما، 5) کاتد، 6) گاف جرقه تیزکننده (sharpening spark gap)، 7) کابل‌های ولتاژ بالا، 8) خازن‌ها، 9) گاف جرقه مبدل (cpmmuting spark gap)، 10) مقاومت غیرخطی 89

شکل (3-8) طرح تخلیه SIGNAL facility و سیستم پیش یونش 90

شکل (3- 9) شکل موج جریان پیش یونش در یک لوله موبین 90

شکل (3-10) طرح اندازه‌گیری گسیل اشعه X : 1) لوله موبین، 2) آینه Si ، 3) شکاف، 4) XRD 91

شکل (3-11) انعکاس‌پذیری آینه Si به عنوان تابعی از انرژی فوتون اشعه X در زاویه فرود 22.5 درجه 92

شکل (3-12) 1)پالس جریان اصلی و 2) سیگنال XRD برای موردی که جهت جریان‌های پیش یونش و اصلی یکسان است 93

شکل (3-13) 1)پالس جریان اصلی و 2) سیگنال XRD برای موردی که جهت جریان‌های پیش یونش و اصلی مخالف هم است 93

شکل (3-14) 1)پالس جریان اصلی و 2) سیگنال XRD برای موردی که جهت جریان‌های پیش یونش و اصلی مخالف هم است و پالس جریان اصلی $20\mu s$ پس از پالس جریان پیش یونش اعمال می‌شود 94

شکل (3-15) عکسبرداری بخش وابسته به زمان طیف (a) شامل خط تولید یون‌های Ar شبه Ne، (b) توزیع شدت طیف در طول خط میانی تصویر 97

شکل (3-16) وابستگی زمانی چگالی الکترون در محور 100

شکل (3-17) مدار معادل اندازه‌گیری 101

شکل (3-18) مدار ساده هم ارز طرح مجموعه بار 104

شکل (3-19) دوربین روزنه‌ای چهاروجهی: تصویر اشعه X نرم از ماکزیمم فشردگی پلاسما، جریان پیش یونش برای a = 50A و برای $b = 5A$ 106

مقدمه

اهداف پایان‌نامه

در این پایان‌نامه روند توسعه منابع عملی تابش لیزرهای اشعه X نرم رومیزی بررسی می‌شوند تا جایی که این لیزرها به قدر کافی فشرده شده و بتوانند در یک میز نوری رومیزی جا بگیرند.

این کار نتیجه‌ای از پیشرفت‌های اخیر در تقویت تابش اشعه X نرم در وسایل پمپاژ به روش‌های تحریک لیزری و تخلیه الکتریکی است. استفاده از مکانیزم برانگیختگی منجر به نمایش لیزر اشعه X نرم اشباع با استفاده از چندین ژول انرژی پمپ لیزری در طول موج‌هایی به کوتاهی $14nm$ می‌شود. به هر حال طرح‌هایی وجود دارند که بهره مشخصی را به همراه تنها کسری از یک ژول انرژی پمپ لیزری به دست می‌دهند [1] و [2].

در این پایان‌نامه سعی شده است به اهمیت لیزرهای اشعه X نرم مبتنی بر تنگش تخلیه در لوله باریک در تولید انرژی خروجی بهینه و با میزان بهره بالا پرداخته شود. از آنجایی که حضور ناپایداری‌ها در تشکیل پلاسما امری اجتناب‌ناپذیر است، لذا به منظور کاهش این ناپایداری‌ها پیش یونش مورد توجه قرار می‌گیرد که منجر به تولید پلاسمای همگن، یکنواخت و متقارن شده و در نهایت پلاسمای پایدارتری را تولید می‌کند.

در ادامه میزان جریان پیش یونش، چگالی و دمای الکترونی مورد نیاز در فاز پیش یونش محاسبه و روابط حاکم بر آن‌ها ارائه می‌شود.

تاریخچه توسعه لیزر

تاریخچه لیزر به سال 1917، زمانی که آلبرت انیشتین[1] برای اولین بار مفهوم گسیل واداشته را معرفی کرد برمی‌گردد. این کار تا سال 1953 ادامه یافت، یعنی قبل از اینکه جردن[2]، زیگر[3] و تونس[4] اولین وسیله تقویت کننده را که از اثر گسیل واداشته استفاده می‌کرد ارائه کنند. این وسیله یک تقویت کننده میکروموجی NH_3 در فرکانس $24GHz$ بود. اختراع آن‌ها یک میزر نامیده شد که به معنای تقویت میکروموج به وسیله گسیل واداشته تابشی است (MASER)[5].

بدین ترتیب اولین لیزر توسط میمن[6] در سال 1960 ساخته شد که اولین لیزر حالت جامد بود. این لیزر از یک میله یاقوت ساخته شد که به وسیله نور فلش پمپ می‌شد و در طول موج $694nm$ نوسان می‌کرد. کلمه لیزر به معنای تقویت نور به وسیله گسیل واداشته تابشی می‌باشد (LASER)[7].

اولین لیزر گازی توسط علی جوان[8] ، بنت[9] و هریت[10] در سال 1961 در کمتر از یکسال پس از آنکه میمن اولین مشاهده تجربی از لیزر را در لیزر حالت جامد یاقوت به دست آورد، درک شد.

علی جوان از ترکیب گازهای نادر He و Ne لیزری ساخت که در طول موج $1.15\mu m$ کار می‌کرد. از طرفی این لیزر، اولین لیزر مبتنی بر روش تخلیه گازی بود [3]. تاکنون انواع بسیاری از لیزرهای مختلف از لیزرهای حالت جامد گرفته تا لیزرهای پالسی و پیوسته(CW)[11] توسعه یافته‌اند که طیف گسیل بزرگی از مادون قرمز تا تابش فرابنفش قوی(XUV)[12] را در برمی‌گیرند.

---

۱ Albert Einstein
۲ Gordon
۳ Zeiger
۴ Townes
۵ Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
۶ Maiman
۷ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
۸ A.Javan
۹ W.R.Bennett
۱۰ W.R.Herriot
۱۱ Continuous wave
۱۲ Extreme Ultraviolet Radiation

تاریخچه توسعه لیزرهای اشعه X نرم مبتنی بر تنگش تخلیه در لوله مویین

یک لیزر اشعه X وسیله‌ای است که از گسیل واداشته برای تولید یا تقویت تابش الکترومغناطیسی در نزدیکی ناحیه اشعه X یا فرابنفش قویXUV طیف که معمولاً طول موجی از مرتبه چند ده نانومتر دارد استفاده می‌کند.

XUV تابش فرابنفش انرژی بالا در گستره $10 - 120nm$ است که فوتون‌هایی با انرژی $10eV$ تا بالاتر از $124eV$ دارد. در چند سال اخیر، پیشرفت‌های عظیمی در توسعه لیزرهای اشعه X نرم فشرده به دست آمده است.

به طور کلی لیزرهای اشعه X مبتنی بر دو روش هستند:

1- تحریک لیزری که در آن با استفاده از ضربان‌های لیزری کوتاه یا فوق کوتاه، اتم مورد نظر چند بار یونیده شده و به عنوان محیط لیزری استفاده می‌شود.

2- تحریک با استفاده از تنگش تخلیه در لوله مویین که در این روش از اثر تنگش برای یونش محیط گازی و ایجاد محیط فعال لیزری استفاده می‌شود.

دلایل گرایش به سمت توسعه لیزرهای اشعه X نرم فشرده رومیزی بسیار است که از جمله می-توان به توصیف مشخصات و پردازش مواد، مطالعات در فیزیک اتمی، فوتوشیمی، فوتوفیزیک، تصاویر زیستی، امکانات تشخیص پلاسمای چگال و ... اشاره کرد.

همچنین لیزرهای اشعه X نرم در عمل راهی را برای شناخت زمینه‌های کاملاً جدید همچون اپتیک غیرخطی در طول موج‌های خیلی کوتاه باز می‌کند.

در آینده‌ای نه چندان دور، زمانی که طول موج این لیزرها به کمتر از $1nm$ برسد، کاربردهایی همچون پراش اشعه X از مواد معدنی و زیستی و نیز امکانات پزشکی با پرتوهای X همدوس قابل درک خواهند بود [4] و [5].

لازم به ذکر است که در کنار لیزرهای اشعه X نرم پمپ شده با روش تحریک لیزری و تخلیه الکتریکی، روش‌های دیگری نیز شامل هارمونیک‌های بالاتر در لیزرهای مرئی توان بالا، منابع سیکروترونی و لیزرهای الکترون آزاد جهت تولید این نوع لیزر وجود دارند. اما به دلیل اندازه بزرگ و نیز قیمت بالای آن‌ها، این منابع برای کاربردهای حجیم وکلان مناسب نیستند [6].

لیزرهای اشعه X نرم رومیزی برتری تولید انرژی بالایی را در هر پالس دارند. به عنوان مثال در حال حاضر یک لیزر اشعه X نرم رومیزی مبتنی بر روش تخلیه الکتریکی که در انرژی فوتون $26.5eV$ کار می‌کند، پالس‌های خروجی را با متوسط انرژی ($0.88mj$ $\simeq 2 \times 10^{19} \frac{photon}{pulse}$) و با نرخ تکرار $4Hz$ و متوسط توان خروجی $3.5MW \simeq$ تولید می‌کند [7].

با وجود این، همان طوری که کاربردهای مختلف به تابش اشعه X نرم با مشخصات خاصی نیازمند است در بسیاری از موارد، استفاده از این منابع مختلف تکمیل کننده خواهد بود.

تحقیقات برای لیزرهای اشعه X عملی، خیلی سریع پس از نمایش اولین لیزرها در سال 1960 آغاز شد. به طور کلی تلاش در دستیابی به لیزرهای اشعه X بلافاصله پس از لیزر مرئی یاقوت و لیزر هلیوم ـ نئون در سال‌های 1960 و1961 آغاز شد. پیشنهاد برای طرح‌های برانگیختگی در لیزرهای اشعه X به سال 1965 برمی‌گردد، زمانی که امکان دستیابی به تقویت اشعه X به وسیله بازترکیب برخوردی اولین بار توسط گادزنکو[1] و شلپین[2] پیشنهاد شد [8].

آزمایش‌های بسیاری در طول سال‌های 1976 و 1980 منجر به مشاهده وارونی جمعیت و بهره شد. با وجود این، نمایش تجربی تقویت بالا در طول موج‌های اشعه X نرم تا سال 1984، زمانی که مسوست[3] و ساکور[4] به ترتیب تقویت را از تولید وارونی جمعیت به روش‌های برانگیختگی برخوردی برخوردی الکترون و بازترکیب برخوردی الکترون- یون در پلاسماها مشاهده کردند، درک نشد.

---

[1] Gudzenko
[2] Shelepin
[3] Matthewest et al
[4] Suckewer et al

به زودی این ساختارهای اولیه توسط آزمایشگاه‌های موفق در زمینه تقویت اشعه X نرم که به وسیله لیزرهای پر توان به عنوان منابع پمپ هدایت می‌شدند، به کار گرفته شد. این کاربردها شامل میکروسکوپی، هولوگرافی، امکانات پلاسمای چگال و غیره است [9] و [10].

به هر حال پیچیدگی، قیمت و اندازه بزرگ این لیزرها و نیز پایین بودن نرخ تکرار آن‌ها همگی عواملی هستند که استفاده فراگیر از این منابع را محدود می‌کنند. واضح است که در لیزرهای اشعه X نرم که اغلب به عنوان لیزرهای اپتیکی به کار برده می‌شوند، توسعه تقویت کننده‌های اشعه X نرم رومیزی با قیمت پایین‌تر و حجم کمتر ضروری است.

در سال‌های بعد، استفاده از لیزرهای اشعه X نرم در کاربردها به عنوان نتیجه‌ای از پیشرفت سریع در منابع compact pump افزایش یافت. توسعه منابع پمپ، شامل توسعه سیستم‌های لیزر نوری بر اساس تقویت پالسی است و تخلیه سریع در لوله مویین قادر به تولید ستون پلاسمایی با یونش و یکنواختی بالا و نسبت طول به قطر نزدیک به 1000:1 است که خود منجر به کاهش بزرگی در انرژی پمپ مورد نیاز لیزر به کمتر از یک ژول می‌شود [11] و [12].

اخیراً یک لیزر تخلیه در لوله مویین که در طول موج $46.9nm$ کار می‌کند، پالس‌های لیزری را در سطح میلی ژول با نرخ تکرار چندین هرتز به دست می‌دهد.

حالت‌های ارائه شده از محرک‌های رومیزی

بسیاری از پیشرفت‌های اخیر در لیزرهای اشعه X نرم و با اندازه رومیزی، با توسعه محرک‌های توان بالا و فشرده ممکن شده است، به خصوص پس از دهه 1980 تمام آزمایش‌های تقویت اشعه X نرم با استفاده از محرک‌های لیزر نوری انرژی بالا که پالس‌هایی را با مدت زمان استمرار نانوثانیه‌ای تولید می‌کنند، انجام شد.

همچنین مولدهای توان پالسی بزرگ در تلاش برای دستیابی به تقویت اشعه X نرم استفاده شدند، اما بهره مشاهده شده موفقیت آمیز نبود.

همان طوری که تحقیقات به سمت توسعه لیزرهای اشعه X رومیزی براساس محرک‌های لیزر پالسی نانوثانیه‌ای ادامه می‌یابد، بیشتر تلاش‌ها به سمت استفاده از محرک‌های لیزری طول موج کوتاه و توان بالا و با مقیاس کوچک متمایل است. تخلیه‌های سریع و فشرده در لوله به طور موفقیت آمیزی، مقادیر بزرگی از انرژی الکتریکی ذخیره شده در ستون‌های پلاسما را با نسبت طول به قطر 1000:1 و یکنواختی محوری عالی نشان می‌دهند [13].

لیزرهای پالسی طول موج کوتاه و توان بالا

محرک‌های پالسی کوتاه و توان بالا در تحقیقات لیزر اشعه X رومیزی که معمولاً بر اساس ماده تقویت کننده حالت جامد هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. محرک‌های پالس کوتاه بر اساس سیستم‌هایی هستند که از سال 1980 در اختیار محققان قرار گرفته‌اند و به عنوان مثال پالس‌هایی را با مدت زمان استمرار $0.5ps - 0.3$ و انرژی بالاتر از چند صد میلی ژول تولید می‌کنند [14].

تخلیه سریع در لوله

برانگیختگی مستقیم یک ستون پلاسما با یک تخلیه الکتریکی مزیت بالقوه‌ای را در تولید لیزرهای اشعه X نرم بهینه و فشرده دارد. به هر حال، ناهمگنی‌های محوری در پلاسماهای با تخلیه توان بالا که به وسیله فشردگی‌های نامتقارن و ناپایداری‌ها ایجاد می‌شود، برای سال‌های زیادی توسعه لیزرهای اشعه X نرم را با محرک تخلیه به تعویق انداخته است.

اخیراً این وضعیت با توسعه لیزرهای رومیزی اشباع که به وسیله تخلیه در لوله موبین تحریک می‌شوند، تغییر کرده است. برانگیختگی تخلیه سریع از کانال‌های لوله به قطر $4mm - 1.5$ که از