٣٤٨٠١

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تاریخ ثبت ۱۳۸۱/۶/۲۰

دانشگاه تبریز

دانشکده فیزیک

گروه اتمی و مولکولی

پایان نامه :

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشتهٔ فیزیک

عنوان :

تقویت امواج الکترومغناطیسی در پلاسمای با چگالی بالا با هدف کاربرد در لیزرهای الکترون- آزاد

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر صمد سبحانیان

استاد مشاور:

جناب آقای مهندس سیروس خرم

پژوهشگر:

حسن علی‌نژاد هریکندئی

۲۴۸۰۸

تیرماه ۱۳۸۱

شماره

تقدیم به

خانواده‌ام

پدر و مادر بزرگوارم

و همسر مهربانم

تقدیر و تشکر :

اوست نخستین اندیشه‌گری که با نور خود افلاک را روشن ساخت

حمد وسپاس، خداوند مهربان را که علم ودانش را عطیه‌ای برای انسان قرار داد. تا درپرتو آن گامی درجهت تکامل و شناخت حقایق بردارد و خداوند را شاکرم که در این مسیر ، به من توفیق اتمام این پایان‌نامه را ارزانی کرد .

در این میان لازم وشایسته است از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر صمد سبحانیان که در تمام مراحل انجام این پایان‌نامه با مساعدتها و راهنمایی‌های بی‌دریغ خود مرا یاری کردند تقدیر و تشکر کنم. همچنین از جناب آقای مهندس سیروس خرم کمال تشکر را دارم بخاطر اینکه از راهنمایی‌های ارزنده ایشان بعنوان استاد مشاور در طول انجام اینکار بهره‌مند گردیده‌ام.

از اساتید محترم گروه اتمی و مولکولی و همچنین از تمام دوستانی که به نوعی درانجام این کار مرا یاری کردند تقدیر و تشکر می‌کنم.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول :مقدمه

۱-۱-خصوصیات محیط پلاسما..... ٤

۱-۲-انتشار امواج الکترومغناطیسی در پلاسماهای سرد..... ٥

۱-۳- اندرکنش لیزر- پلاسما..... ۷

۱-۳-۱- تولید هارمونیک‌ها..... ۹

۱-۳-۲- فرآیند شتابدهی ذرات در پلاسما..... ۱۰

فصل دوم : تعیین معادله پاشندگی امواج الکترومغناطیسی در پلاسما

۲-۱- مقدمه..... ۱۳

۲-۲- معادلاتی برای امواج در پلاسما..... ۱٤

۲-۳- معادله پاشندگی..... ۱۸

فصل سوم : بررسی تحولات امواج الکترومغناطیسی در پلاسما

۳-۱- ناپایداریهای پارامتریک..... ۲۲

۳-۱-۳- مدل نوسانگر هارمونیک مدوله شده ۲۳

۳-۱-۲- انواع ناپایداریهای پارامتریک در پلاسما..... ۲٥

۳-۲- پراکندگی رامان القائی..... ۲٦

۳-۲-۱- بررسی SRFS در پلاسماهای rarefied..... ۲۸

۳-۲-۲- تحول فضا – زمانی ناپایداریهای پلاسما..... ۳۲

۳-۳- تحلیل ناپایداری در پلاسمای Overdense ۳٤

۳-۳-۱- ناپایداری در پلاسمای سرد..... ۳٥

۳-۳-۲- ناپایداری در پلاسمای گرم ٥۱

فصل چهارم : شفافیت القای الکترومغناطیسی

٤-۱- مقدمه..... ٥۷

٤-۲- شفافیت القای الکترومغناطیسی درپلاسما..... ٦۰

٤-۲-۱- بررسی شفافیت دو موج ٦٤

٤-۲-۲- بررسی شفافیت سه موج ۷۰

٤-۳- بررسی شفافیت بر حسب فرکانس موج استوکس..... ۷۲

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل پنجم: بحث و نتایج

۵-۱- عملکرد لیزر الکترون ـ آزاد ۷٤

۵-۱-۱- مقدمه ۷٤

۵-۱-۲- پایستگی تکانه و انرژی در لیزر الکترون ـ آزاد ۷٦

۵-۱-۳- سینماتیک برهم‌کنش الکترون و فوتون ۷۸

۵-۱-٤- شرط همگام بودن ۸۲

۵-۲- بحث و نتیجه‌گیری ۸۷

۵-۳- پیشنهادات ۹۱

منابع ۹۲

Abstract ۹٦

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

نام خانوادگی دانشجو: علی‌نژاد هریکندئی **نام:**حسن

عنوان پایان‌نامه: تقویت امواج الکترومغناطیسی در پلاسمای یا چگالی بالا با هدف کاربرد درلیزرهای الکترون ـ آزاد

استاد راهنما: جناب آقای دکتر صمد سبحانیان

استاد مشاور: جناب آقای مهندس سیروس خرم

مقطع تحصیلی:کارشناسی ارشد **رشته:** فیزیک **گرایش:** اتمی و مولکولی **دانشگاه:** تبریز

دانشکده: فیزیک **تاریخ فارغ‌التحصیلی:** تیرماه ۱۳۸۱ **تعداد صفحات:** ۹۶

کلید واژه‌ها: پلاسمای چگالی بالا،امواج **EM** ، لیزر الکترون ـ آزاد

چکیده:

انتشار یک موج الکترومغناطیسی با دامنه بزرگ در پلاسما و پدیده های متعاقب آن نظیر پراکندگی رامان ، ناپایداریهای گوناگون و خودکانونی شوندگی در سالهای اخیر موضوع تحقیقات زیادی بوده است و اغلب این تحقیقات به صورت برهم کنشهای موج الکترومغناطیسی با پلاسما در پلاسماهای کم چگال انجام گرفته‌اند.

در این پایان نامه , مدل یک بعدی برهم کنش امواج الکترومغناطیسی با دامنه بزرگ با پلاسماهای چگالی بالا بررسی می شود. با تعیین معادلات پاشندگی امواج الکترومغناطیسی در پلاسماهای گرم و سرد، ناپایداریهای ایجاد شده در پلاسماهای Overdense مطالعه می شود.

همچنین به بحث در مورد شفافیت القای الکترومغناطیسی بعنوان نتیجه ای از برهم کنش امواج الکترومغناطیسی با پلاسما خواهیم پرداخت و در پایان کاربرد این موضوع برای تولید لیزر الکترون – آزاد بررسی می شود.

فصل اول

مقدمه

برهم کنش پالسهای لیزری با شدت بالا با مواد گازی، باعث فتویونیزاسیون سریع اتمهائی که در معرض این پالس‌ها قرار دارند می‌شوند و این فرآیند منجر به تشکیل پلاسما در امتداد انتشار پالس می‌گردد. بنابراین محیط برای پالس‌های بعدی به جای محیط گازی، پلاسما است[۱]. بدین خاطر مطالعات برهمکنش‌لیزربا پلاسما و پدیده‌های‌وابسته به آن از اهمیت بسزایی برخوردار است . تا کنون اندرکنش لیزر با پلاسما برای چگالیهای مختلف پلاسمایی در حالت یکنواخت و غیریکنواخت و همچنین درمحدوده‌های نسبیتی بالا و ضعیف بررسی شده است و نتایج جالب توجهی حاصل شده است.

انتشار امواج الکترومغناطیسی با دامنه بزرگ از میان پلاسما بوسیله اثرات غیرخطی متفاوتی نظیر پراکندگی رامان، ناپایداری مدولاسیون، خودکانونی شوندگی و ناپایداریهای پارامتریک شناخته می‌شوند[۲، ۳و٤]. این اثرات غیرخطی اهمیت زیادی درشاخه‌های مختلف فیزیک مانند همجوشی، شتابدهنده‌های پلاسمائی، تولید هارمونیک‌های میدان الکترومغناطیسی و ... دارند که بطور خاص

می‌توان به کاربرد پراکندگی کامپتون و پراکندگی رامان در لیزرالکترون - آزاد اشاره کرد[۵، ٦ و ۷]. تاکنون اندرکنش امواج الکترومغناطیسی با پلاسماهای چگالی پایین بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است. در نظر گرفتن محیط پلاسمائی با چگالی بالا و برهم کنش آن با امواج الکترومغناطیسی موضوع بسیار جالبی است که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است بخاطر اینکه این حالت می‌تواند به افزایش اثرات غیرخطی در پلاسما منجر شود پایه و اساس انتظاراتمان، افزایش دامنه نوسان غیرخطی پلاسما با افزایش چگالی پلاسما است که بوسیله نیروی اثرگذار تحریک می‌شود با توجه به چگالی بالای پلاسما بنظر می‌رسد که مانع اصلی استفاده از نوسانات پلاسما عدم انتشار امواج ضعیف الکترومغناطیسی با فرکانسهای کمتر از فرکانس لانگمیر است. با این وجود حضور یک میدان قوی الکترومغناطیسی می‌تواند خواص پلاسما را تغییر دهد[۷].

اخیراً چندین نوع اثر همدوسی هم در پلاسما مشابه اثرات همدوسی در سیستم‌های اتمی از برهم کنش امواج الکترومغناطیسی با پلاسما مشاهده شده است که برای مثال می‌توان به شفافیت القای الکترومغناطیسی در پلاسماهای سرد اشاره کرد[۸-۱۱].

بنابراین با توجه به مطالب فوق، اهمیت تحقیقات در مورد اندرکنش امواج الکترومغناطیسی با دامنه بزرگ با پلاسماهای چگالی بالا روشن می‌شود.

در این رساله، در ادامه فصل اول ابتدا کلیاتی در مورد محیط پلاسما خواهیم گفت و سپس با تعریف فرکانس نوسانی پلاسما که بعنوان مهمترین پارامتر در اندرکنش امواج الکترومغناطیسی با پلاسما است رابطه پاشندگی امواج الکترومغناطیسی را در شرایط غیر نسبیتی تعیین خواهیم کرد و با استفاده از آن تعریفی از محیط پلاسما از نظر چگالی ارائه خواهیم داد و در ادامه مباحثی در زمینه اندرکنش لیزر - پلاسما مطرح خواهد شد و بطور خاص در مورد تولید هارمونیکهای امواج الکترومغناطیسی و مکانیسمهای شتاب‌گیری ذرات در پلاسما به اختصار بحث خواهیم کرد.

در فصل دوم: انتشار امواج الکترومغناطیسی را دریک پلاسمای سرد و یکنواخت با چگالی بالا در نظر گرفته می‌شود و با فرض اینکه پتانسیل برداری موج الکترومغناطیسی در منطقه برهمکنش مشخص باشد رابطه پاشندگی امواج الکترومغناطیسی را در حضور میدان موج فرودی، استوکس و آنتی استوکس تعیین خواهیم کرد. رابطه پاشندگی حاصله مربوط به پراکندگی رامان است و تحت شرایطی بدست آمده است که شدت موج استوکس و آنتی استوکس از شدت موج حامل کوچکتر باشد.

در فصل سوم: تحولات امواج الکترومغناطیسی منتشره در پلاسما بررسی خواهد شد. بدین صورت که ابتدا با استفاده از مدل شبیه سازی شده نوسانگر هارمونیک، ناپایداریهای ایجاد شده در پلاسما ناشی از برهم کنش امواج الکترومغناطیسی با آن طبقه بندی شده است و سپس ناپایداری پس پراکندگی پارامتریک (رامان القائی) به تفصیل در پلاسماهای چگالی بالا و رقیق بررسی شده است. در این بخش علاوه بر مرور کارهای صورت گرفته تاکنون ، برای اولین‌بار محدودهٔ ناپایداری‌های مختلف ایجاد شده در پلاسما برحسب چگالی پلاسما و شدت موج فرودی رسم شده است.

با توجه به اهمیت پدیده شفافیت القای الکترومغناطیسی در پلاسما فصل چهارم این رساله به این موضوع اختصاص یافته است. بدین ترتیب که ابتدا شفافیت در پلاسماهای یکنواخت و غیریکنواخت مطرح شده است و سپس به تفصیل دلایل ایجاد این اثر برای امواج الکترومغناطیسی با شدت پایین در حضور موج فرودی در پلاسمای یکنواخت بررسی شده است. در این فصل نیز برای اولین‌بار ، با بررسی جوابهای معادله پاشندگی برای دو شدت مختلف نشان دادیم که افزایش شدت موج فرودی باعث ایجاد محدودهٔ جدیدی از شفافیت ، برای موج الکترونی می‌گردد.

در فصل آخر: کاربرد اندرکنش امواج الکترومغناطیسی با پلاسما را در لیزر الکترون – آزاد مطرح خواهیم کرد برای این کار ابتدا به اختصار در شروع فصل، عملکرد لیزرالکترون – آزاد را شرح

خواهیم داد و سپس کاربرد مباحث مطرح شده در فصول قبلی را در آن بحث و نتیجه گیری خواهیم کرد و پیشنهاداتی برای ادامه کار ارائه خواهد شد تا فتح بابی برای ادامه تحقیقات در زمینه برهم کنش لیزر – پلاسما باشد.

۱-۱ خصوصیات محیط پلاسما

پلاسما گاز شبه خنثی‌ئی از ذرات باردار و خنثی است که رفتار جمعی از خود نشان میدهد. در پلاسما که مشتمل بر ذرات باردار است حرکت بارها توده‌های متمرکزی از بارهای مثبت یا منفی را به طور موضعی به وجود می‌آورد و بدین ترتیب سبب پیدایش میدانهای الکتریکی می‌شود با حرکت بارها، جریان و در نتیجه میدان مغناطیسی هم تولید می‌شود این میدانها بر حرکت سایر ذرات باردار که دورتر واقع شده‌اند اثر می‌گذارند [۱۲]. محیط پلاسما را نمی‌توان با یک فرمولبندی مطلقاً ماکروسکوپیکی بررسی کرد. با وجود این سه نوع فرمولبندی تقریبی وجود دارد که به کمک آنها می‌توان بینش زیادی درباره آنچه در داخل پلاسما اتفاق می‌افتد پیدا کرد.

اولین روش عبارتست از نظریه مدار، که حرکت ذرات باردار را در میدانهای الکتریکی و مغناطیسی مشخص شده از قبل، بررسی می‌کند این میدانها می‌توانند هم تابع مکان و هم تابع زمان باشند. هنگامی که برخوردهای بین ذرات نقش عمده ندارند نظریه مدار تقریب خوبی برای حرکت ذره در پلاسما است.

دومین روش تقریبی نظریه مگنتوهیدرودینامیک است که در آن از معادلات الکترومغناطیسی کلاسیک (معادلات ماکسول) همراه با معادلات کلاسیک حرکت سیالات استفاده می‌شود و در آن از رفتار یک ذره تنها صرفنظر شده و فقط حرکت عناصر سیال بررسی می‌شود.

روش سوم: بررسی محیط پلاسما از دیدگاه نظریه جنبشی است. این روش مبتنی بر این فرض

است که برخوردهای بین ذرات باردار برای برقراری توزیع سرعت ماکسولی، در داخل پلاسما کافی است بنابراین خواص انتقال و خواص جنبشی رامی‌توان برحسب این توزیع سرعت محاسبه کرد [۱۳].

امواج در داخل پلاسما اختلالات کمیات فیزیکی نظیر چگالی، فشار، درجه حرارت، میدانهای الکتریکی و مغناطیسی و ... است که بصورت ایستاده هستند و یا اینکه منتشر میشوند به طور کلی امواج در داخل پلاسما اتلافی هستند یعنی انرژی‌شان در نهایت بصورت گرما تلف می‌شود. اگر موج اتلافی نباشد دامنه موج رشد میکند و باعث ایجاد ناپایداری در پلاسما می‌شود.

اگر در یک پلاسما الکترونها از زمینه یکنواخت یونها جابجا شوند میدانهای الکتریکی در چنان جهتی بوجود می‌آیند که با برگرداندن الکترونها به مکان اولیه‌شان بتوانند خنثی بودن پلاسما را مجدداً اعاده کنند. الکترونها در اثر لختی‌شان از وضعیت اولیه خود خارج شده و با فرکانس مشخصه‌شان که به عنوان فرکانس پلاسما شناخته شده است نوسان می‌کنند. تحت شرایط خاص فرکانس نوسانی پلاسما برابر است با $\omega_p = (\frac{4\pi n_0 e^2}{m})^{\frac{1}{2}}$ [۱۲]. فرکانس نوسانی پلاسما یکی از پارامترهای مهم بررسی برهم کنش لیزر با پلاسما به شمار می‌آید که می‌تواند توصیف کننده محیط پلاسما از نظر چگالی باشد.

۱-۲ انتشار امواج الکترومغناطیسی در پلاسماهای سرد

بررسی انتشار امواج الکترومغناطیسی در پلاسما با استفاده از مدل مداری ،کاری بسیار پیچیده است بخاطر اینکه میدانهای الکتریکی و مغناطیسی از قبل معلوم نیست و بایستی از روی مکان و حرکت خود بارها تعیین شوند برای این کار ، مسئله را باید به صورت خودسازگار حل کرد یعنی بایستی آن چنان مجموعه‌ای از مسیرهای ذرات و طرحهای میدان را پیدا کرد که ذرات هنگام حرکت بر روی آن مدارات همان میدانها را تولید کنند و این میدانها نیز سبب حرکت الکترونها بر روی آن

مـدارات گـردند بررسـی مسـیر تـک تک الکترون‌ها در داخل پلاسما کار پیچیده و دشواری است به همیـن خاطـر از مـدل سیالی استفاده می‌کنیم. در مدل سیالی از معادلات سیالی برای توصیف حرکت ذرات باردار و از معادلات ماکسول برای توصیف میدانهای به دست آمده استفاده می‌کنیم.

در یـک حالـت خـاص انتشـار امـواج الکترومغناطیسـی را در یک پلاسمای سرد و یکنواخت غیرمغناطیسـی بـا صرفنظر از برخوردها بررسی می‌کنیم همچنین فرض می‌کنیم بسامد امواج به اندازه کافـی بـالا اسـت کـه در اینصـورت مـی‌توانـیم از حرکـت یونهـا چشـم پوشـی کنـیم. پاسخ میدان الکترومغناطیسـی بـه جریانـهائـی کـه در پلاسـما بـرقـرارند توسـط معادلات ماکسول زیر تعیین می‌شوند [١٢و١٤].

$$c^2\nabla\times\vec{B}=\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}+\frac{\vec{j}}{\varepsilon_0} \qquad (۱-۱-الف)$$

$$\nabla\times\vec{E}=\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \qquad (۱-۱-ب)$$

از روابط فوق با فرض عرضی بودن امواج الکترومغناطیسی رابطه زیر نتیجه می‌شود.

$$(\omega^2-c^2k^2)E=-i\omega\frac{j}{\varepsilon_0} \qquad (۱-۲)$$

بـا استفاده از معادله حرکت خطی شده الکتـرون در غیـاب اثـرات حرارتی و استفاده از معادله (۱-۲)، رابطه پاشندگی برای امواج الکترومغناطیسی بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\omega^2=\omega_p{}^2+c^2k^2 \qquad (۱-۳)$$

که ωفرکانس موج فرودی ω_p فرکانس نوسانی پلاسما، $\mathbf{k}$ ثابت انتشار موج الکترومغناطیسی و $\mathbf{c}$ سرعت نور در خلاء است. با توجه به فرکانس پرتو فرودی یا لیزر بکار رفته می‌توان یک چگالی بحرانـی بـرای پلاسما تعریف کرد و آن عبارتست از مقدار چگالی که در آن فرکانس نوسانی پلاسما برابر با فرکانس موج فرودی است یعنی:

$$\omega_p = \omega \Rightarrow (\frac{4\pi n_0 e^2}{m_e})^{1/2} = \omega \Rightarrow n_{cr} = \frac{m_e \omega^2}{4\pi e^2}$$

که n_{cr} چگالی بحرانی است. پس به ازای فرکانس موج فرودی بالاتر از فرکانس نوسانی پلاسما، موج در داخل محیط منتشر می‌شود و به ازای مقادیر کمتر از آن موج نمی‌تواند در پلاسما انتشار یابد. فرکانس موج فرودی که در شرط حدی، $\omega = \omega_p$ ، صدق کند فرکانس بحرانی نامیده می‌شود و همچنین سطحی را که در آن چگالی برابر چگالی بحرانی باشد سطح بحرانی می‌نامند.

با توجه به رابطه بین فرکانس نوسانی پلاسما و فرکانس موج فرودی، پلاسماها را برحسب چگالی‌شان نسبت به چگالی بحرانی به سه دسته تقسیم می‌کنند.

۱) پلاسماهای رقیق[۱] : $n << n_{cr} \rightarrow \omega_p << \omega$

۲) پلاسماهای کم چگال[۲]: $n < n_{cr} \rightarrow \omega_p < \omega$

۳) پلاسماهای چگال بالا[۳]: $n \approx n_{cr} \rightarrow \omega_p \approx \omega$

۱-۳ اندرکنش لیزر – پلاسما

پیشرفت تکنولوژی ساخت لیزرها، دریچهٔ تازه‌ای برای تحقیقات و مطالعات بنیادی و کاربردی در زمینه برهم کنش لیزر – پلاسما گشوده است. امروزه پالسهائی با توانهای تراوات تولید شدند که شدت این لیزرها در محدودهٔ $10^{18} \frac{W}{cm^2}$ الی $10^{21} \frac{W}{cm^2}$ قرار دارد. همچنین لیزرهای پتاواتی ساخته شده‌اند که شدت آنها در محدوده $I > 10^{21} \frac{W}{cm^2}$ قرار می‌گیرد. در این شدت‌ها یونها را نمی‌توان ساکن در نظر گرفت. در نتیجه شرایط حاکم بر مسئله متفاوت خواهد بود[۱۵]. پالس لیزری با شدتهای $I \geq 10^{18} \frac{W}{cm^2}$ محدوده مطالعات برهم کنش امواج الکترومغناطیسی با پلاسما را از محدوده

۱- rarefied

۲- underdense

۳- overdense

خطی به سوی محدوده‌های غیر خطی سوق می‌دهد. علاوه بر ایجاد غیر خطیت در محیط پلاسما، شدتهای بالای لیزرها باعث بوجود آمدن اثرات نسبیتی در پلاسما نیز شده است. موقعی که با میدانهای خیلی بزرگ ($E_0 = 3\times10^{16}\frac{V}{cm}$ یا $I = 10^{30}W/cm^2$) سروکار داریم اثرات الکترودینامیک کوانتمی مانند تولید زوج الکترون – پوزیترون هم بایستی در نظر گرفته شود [۱]. در اندرکنش لیزر با پلاسما یکی از کمیاتی که باید مورد مطالعه قرار گیرد فشار امواج الکترومغناطیسی است وقتی فشار امواج الکترومغناطیسی در دینامیک پلاسما به چشم می‌آید که گرادیان فشار اثرگذار[۱] قابل مقایسه با فشار حرارتی پلاسما باشد.

یکی از پارامترهای مهم در بحث اندرکنش لیزر – پلاسما پارامتر بی‌بعد قدرت لیزری، $a_0 = \frac{eA_0}{m_e c^2}$ است که دامنه نرمالیزه شده پتانسیل برداری لیزر می‌باشد. a_0 معیاری برای اهمیت پدیده‌های نسبیتی است توان لیزر از طریق رابطه $P_0 = [GW] = 25(\frac{a_0 r_0}{\lambda_0})^2$ به پارامتر a_0 مربوط می‌شود که r_0 اندازه لکهٔ نمایهٔ گوسی لیزر و λ_0 طول موج لیزر فرودی است و توان P_0 ، برحسب (GW) می‌باشد. دامنه میدان الکتریکی لیزر هم بوسیله رابطه زیر به پارامتر لیزری a_0 مربوط است[۱۵].

$$E_0[\frac{MeV}{m}] \cong 3\times10^6 \frac{a_0}{\lambda_0[\mu m]}$$

که به ازای $\lambda_0 = 1\mu m$ و $a_0 \geq 1$ ، میدان الکتریکی لیزر از میدان کولمبی وابسته به اتم هیدروژن بیشتر خواهد شد که این حالت منجر به تجزیه سریع اتم هیدروژن در این میدان می‌شود. با توجه به رابطه شدت و توان لیزر، پارامتر a_0 رامی‌توان بر حسب شدت لیزر بصورت زیر نوشت.

$$a_0 = 0/86\times10^{-9}\lambda_0[\mu m]I_0^{1/2}[\frac{W}{cm^2}]$$

[۱]- ponderomotive pressure