مجله علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی، (JSIAU) سال ۲۰ ، شماره ۷۵ ، بهار ۱۳۸۹

> شبیه سازی تابش اشعه ایکس از پلاسماهای لیزری و تاثیر استفاده از پیش پالس لیزری بر میزان تابش

رضا فاضلی* گروه فیزیک، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران حنیف هادی پور دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۸۸/۸/۲۸

تاریخ دریافت: ۸۸/۲/۱۱

چکیدہ

مقدمه: در اثر برهمکنش پالسهای لیزری پرتوان با اهداف فلزی، پلاسمایی با دمای بسیار بالا (چند صد ev تا چندین kev) تولید می شود که منبع بسیار مناسبی برای تابش اشعه ایکس است. اشعه ایکس تولید شده از پلاسما در بخشهای مهمی نظیر لیتوگرافی، پزشکی، بیولوژی،(Inertial Confinement Fusion) ICF و علوم فضائی اهمیت ویژه ای دارد. در تمام این کاربردها هرچه شدت اشعه ایکس تولید شده بیشتر باشد یا به طور دقیقتر هر چه میزان تبدیل انرژی پالس لیزر به اشعه ایکس بیشتر باشد از نظر عملی مطلوب تر خواهد بود. به همین دلیل در سالهای اخیر تولید اشعه ایکس از پلاسما و بررسی روشهای افزایش تولید آن بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

هدف: شبیه سازی تابش اشعه ایکس از پلاسمای لیزری و بررسی تاثیر استفاده از پیش پالس لیزری بر میزان تابش.

روش بررسی: روش انجام تحقیق بر پایه شبیه سازیهای اتمی است. ابتدا پلاسمای حاصل از برهمکنش پالس لیزری پرتوان با یک هدف فلزی شبیه سازی می شود. آنگاه پس از به دست آمدن مشخصات پلاسما به خصوص دما و دانسیته الکترونی، تابش اشعه ایکس با استفاده از معادلات مربوط به مکانیزم های مختلف شبیه

^{*} عهده دار مکاتبات: rfazeli@iust.ac.ir ، تلفن: ۷۷۲٤۰۵٤۰ ، فکس: ۷۷۲٤۰٤۹۷ – ۲۱۰

سازی می شود. در نهایت تاثیر استفاده از یک پیش پالس لیزری با اصلاح برنامه ههای کهامپیوتری مورد استفاده بررسی خواهد شد.

نتایج: مشاهده گردید که لایه های عمیق تر هدف، در زمان های بزرگتر، تحت تاثیر برهم کنش لیزر قرار گرفته، دماو دانسیته الکترونی آنها افزایش می یابد. برای یک پالس لیزری به طول g 05 و شدت W/cm² دما از مرتبه چند صد ev و دانسیته الکترونی از مرتبه ⁵⁰ cm³ دا²⁰ در عرض هدف حاصل شد. در لایه هایی که دانسیته الکترونی و به خصوص دما مقادیر قابل توجهی دارند، تولید اشعه ایکس بیشتر است. همچنین، پهنای پالس (FWHM)اشعه ایکس تولید شده در حدود همان پالس لیزر استفاده شده یعنی g 05 است. مشاهده شد که به هنگام استفاده از پیش پالس لیزری، یک مقدار بهینه برای تاخیر زمانی (فاصله زمانی بین پیش پالس و پالس اصلی) وجود دارد که در آن بیشترین مقدار اشعه ایکس تولید می شود. این مقدار بهینه هنگامیکه نسبت شدت پیش پالس به پالس اصلی برابر 0.00 و 0.000 باشد به ترتیب حدود g 400 و g 400 بدست آمد. همچنین محاسبات نشان دادند که میزان افزایش اشعه ایکس با کاهش شدت پیش پالس، بیشترمی شود.

نتیجه گیری: پهنای پالس اشعه ایکس گسیل شده از پلاسمای لیزری در حدود همان پالس لیزر استفاده شده است. سپس نشان داده شد که استفاده از یک پیش پالس لیزری با شدت و فاصله زمانی مناسب نسبت به پالس اصلی می تواند گسیل اشعه ایکس را به میزان قابل توجهی تقویت کند. مشاهده شد که یک مقدار بهینه برای تاخیر زمانی وجود دارد که در آن بیشترین مقدار اشعه ایکس تولید می شود. این مقدار بهینه به شدت پیش پالس استفاده شده بستگی دارد.

واژه های کلیدی: برهمکنش لیزر – پلاسما، پلاسمای لیزری، تابش اشعه ایکس، پیش پالس لیزری.

مقدمه

از زمانیکه اولین آزمایشات در زمینه برهمکنش لیزر با ماده انجام شد (اوایل دهه ۸۰)، مشخص شد که پلاسماهای تولید شده به وسیله لیزر منابع بسیار خوبی برای تابش الکترومغناطیسی در ناحیه طیف اشعه ایکس هستند. پالسهای اشعه ایکس تولید شده از این طریق می توانند دارای انرژی تا حدود چند ژول و توانی به بزرگی چندین TW باشند. مشخصات این پالسها از جمله شدت و طول پالس را می توان با استفاده از پارامترهای لیزر و هدف کنترل نمود. چنین خواصی سبب شد که این منابع به طور گسترده در بخشهای پیشرفته علمی و فنی نظیر لیتوگرافی، *TCF لیزرهای X-ray میب شد که این منابع به طور گسترده در بخشهای پیشرفته علمی و فنی نظیر کار آمدن لیزرهای سریع و پرتوان بر اهمیت این موضوع افزوده شده است. افزایش میزان تبدیل انرژی لیزر به اشعه ایکس در کاربردهای عملی بسیار مطلوب و ضروری است. به همین دلیل تحقیق در مورد روشهای افزایش میزان تابش اشعه ایکس از پلاسما و تاثیر شرایط مختلف لیزر و هدف اهمیت خاصی پیدا کرده است. تاثیر ساختار سطحی هدفهای تحت تابش و استفاده از پیش پالس لیزری از روشهایی هستند که بسیار مورد توجه قرار گرفته اند.^(ه-۸) در این مقاله ابتدا برهمکنش لیزر – فلز و تشکیل پلاسما به وسیله یک کد هیدرودینامیکی شبیه سازی

^{*} Inertial Confinement Fusion.

مجله علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی، (JSIAU)، سال ۲۰، شماره ۷۵، بهار ۸۹

شده و سپس از اطلاعات به دست آمده برای محاسبه میزان تابش اشعه ایکس از پلاسما استفاده شده است. سپس تاثیر استفاده از یک پیش پالس لیزری با شرایط مختلف بر میزان تابش ایکس بررسی شده است. **مواد و روشها**

تئوري و محاسبات

برهمكنش ليزر-هدف

متمرکز کردن لیزرهای پرتوان بر روی سطح مواد یکی از روشهایی است که از آن برای تولید پلاسما استفاده می شود. این پلاسما با استفاده از لیزرهای پالس کوتاه یا لیزرهای پالس بلند قابل تولید می باشد. در فلزات مورد تابش لیزرهای پالس بلند، به دلیل وجود الکترونهای آزاد ، فرایند جذب لیزر عمدتا با مکانیزم جذب برخوردی (Collisional Absorption) صورت می گیرد. با جذب پرتو لیزر در سطح ماده، دمای سطحی ماده افزایش یافته و شرایط ایجاد پلاسما فراهم می گردد. معمولا ایجاد پلاسما به همراه تبخیر و جابجایی مواد از سطح ماده می باشد. خصوصیت این پلاسما با پارامتر های وابسته به لیزر نظیر شدت قابل کنترل می باشد. پلاسمای ایجاد شده به همراه گسیل های مختلفی نظیر: ذرات یونی، ذرات الکترونی، تابش الکترومغناطیس (در ناحیه مادون قرمز، قابل رویت، ماورائ بنفش و X-ray) و همچنین ذرات خنثی می باشد. تولید اشعه X توسط برهمکنش لیزر و پلاسما از نظر میزان درخشش، نرخ تکرار و قابلیت اعتماد نسبت به سایر روشها مزیت دارد و پهنای پالس آن نیز کمتر است.

قبل از وقوع هر نوع بر همنکشی میان پرتو لیزر و هدف، شرایط کاملا مشخص است: یک پرتو پرانرژی و یک نمونه جامد در اختیار داریم. پس از وقوع بر همنکش و پایان آن نیز همه چیز مشخص است: درصدی از پرتو فرودی منعکس شده و بخش دیگر آن توسط هدف جذب و منتقل می شود. ماده هدف نیز کم و بیش تخریب شده و بخشی از آن، به شکل ذرات خنثی یا باردار به طرف خارج گسیل می شود. به منظور توصیف فیزیکی پدیده و پیش بینی نتایج حاصل از آن، باید دید که بین حالات اولیه و نهایی چه رویدادهایی اتفاق می افتد.



در این مقاله شبیه سازی برهمکنش لیزر با هدف بوسیله کد هیدرودینامیکیEHYBRID^(۹) انجام شده است. این کد مجموعه ای کامل از معادلات حاکم بر پلاسما شامل معادلات ماکسول، حرکت سیال، پیوستگی و معادله حالت را با توجه به شرایط مرزی به صورت یک بعدی حل نموده و پارامترهای پلاسما را بر حسب زمان بدست میدهد. در این کد صد لایه موازی برای ماده هدف در نظر گرفته می شود که لیزر از لایه صدم به صورت عمود بر سطح لایه وارد ماده هدف می شود طوریکه پلاسما نخست در لایه صدم تشکیل می شود. شکل (۱) طرحی شماتیک از شرایط لیزر و هدف را نمایش می دهد.

تابش اشعه ایکس از پلاسما از طریق مکانیزم های مختلفی صورت می گیرد که مهمترین آنها تابش ترمزی (Line Emission)،تابش بازتركيب(Recombination emission)وتابش خط (Bremsstrahlung Emission) می باشند^(۱۰). طیف الکترومغناطیسی تابشهای ترمزی و بازترکیب که بیشترین سهم را در اشعه ایکس گسیل شده از پلاسما دارند، به صورت پیوسته و طیف تابش خط به صورت گسسته است. در این مقاله اشعه ایکس حاصل از مکانیزم های پیوسته ترمزی و بازترکیب مورد مطالعه قرار گرفته است. تابش ترمزی در اثر پراکندگی الکترونهای آزاد پلاسما در میدان الکتریکی یونهای پلاسما حاصل می شود. انرژی جنبشی الکترون هنگام عبور از کنار یک یون كاهش مي يابد و اين كاهش انرژي بصورت اشعه ايكس نمايان مي شود. مولفه ديگر اشعه ايكس، تابش بازتركيب مي باشد. هنگامي كه يك الكترون توسط يك يون تسخير مي شود، انرژي جنبشي الكترون بصورت تابش گسيل مي شود. این نوع تابش از آنجا که از ترکیب الکترون با یون حاصل می شود، تابش باز ترکیب نامیده می شود. از آنجا که پلاسمای تولید شده در امتداد محور تابش غیر یکنواخت می باشد و پارامترهای توصیف کننده آن، از جمله دما و دانسیته الکترونی (n_e, T_e) در این راستا متفاوت هستند، در نتیجه می توان پلاسما را به صورت چندلایه در نظر گرفت. در چنین شرایطی می توان فرض کرد که در هر لایه از پلاسما شرایط تعادلی موضعی (Local Thermal Equlibrium) برقرار بوده و در نتیجه پارامترهای پلاسما در هر لایه ثابت فرض می شوند. با در نظر گرفتن یک توزیع ماکسولی برای الکترونها و یونها، مقدار تابشهای Bremsstrahlung و Recombination در بازه فرکانسی v₁ و v₂ برای یک لایه پلاسما به ضخامت dz و سطح مقطع da که در شرایط تعادلی است عبارت خواهد بود از (۱۱،۱۲):

$$dj_{(B-R)} = \int_{v_1}^{v_2} 4\pi \times 5.4 \times 10^{-40} \frac{n_e \sum_{i=1}^{Z} n_i Z_i^2}{\sqrt{T_e}} \exp\left(-\frac{hv}{kT_e}\right)$$

$$\left[1 + G_n \frac{\xi}{n^3} \frac{X_i}{kT_e} \exp\left(\frac{X_i}{kT_e}\right) + \sum_{m=n+1}^{\infty} G_m \frac{2 Z_i^2 R_y}{m^3 kT_e} \exp\left(\frac{Z_i^2 R_y}{m^2 kT_e}\right)\right] dv da dz$$
(1)

که بر حسب ¹-erg s بدست » آید. در این معادله جمله اول نشان دهنده تابش Bremsstrahlung و جملات سوم و چهارم نشان دهنده تابش Recombination هستند. این روابط در مراجع (۱۱) و (۱۲) به تفصیل بدست آمده و

تابش اشعه ایکس از یلاسما

توصیف شده اند. پارامترهای T_e , n_e , m_e , m_e , m_e و n_e , m_e , m_e الکترون می باشند. همچنین I_e n_i , n_i ,

پارامتر بسیار مهم و نهائی که در روابط فوق باید تعیین شود چگالی عددی یونها با یونیزاسیون مشخص Z_i در هر تراز است. این مشخصه را می توان با فرض تعادل گرمایی موضعی (LTE) و در نتیجه حل معادله ساها (Saha equation) در هر لحظه از زمان محاسبه نمود.^(۱۳) این روش در مورد پلاسماهایی با چگالی بالای الکترونی فرض درستی است و در نتیجه در محاسبات حاضر که چگالی الکترونی پلاسما از مرتبه ³⁻² m²³ بدست آمده است معتبر خواهد بود. مقدار کل تابش ترمزی و بازترکیب در بازه فرکانسی *IV* و 20 برای تمام لایه های پلاسما با انتگرال گیری از رابطه (۱) به صورت زیر بدست می آید:

$$j_{t} = \int_{S} \int_{z_{i}}^{z_{f}} \int_{v_{1}}^{v_{2}} 4\pi \times 5.4 \times 10^{-40} \frac{n_{e} \sum_{i=1}^{Z} n_{i} Z_{i}^{2}}{\sqrt{T_{e}}} \exp\left(-\frac{hv}{kT_{e}}\right)$$

$$\left[1 + G_{n} \frac{\xi}{n^{3}} \frac{X_{i}}{kT_{e}} \exp\left(\frac{X_{i}}{kT_{e}}\right) + \sum_{m=n+1}^{\infty} G_{m} \frac{2Z_{i}^{2}R_{y}}{m^{3}kT_{e}} \exp\left(\frac{Z_{i}^{2}R_{y}}{m^{2}kT_{e}}\right)\right] dv da dz$$
(Y)

در این مطالعه اشعه ایکس در محدوده فرکانسی یا به عبارت دیگر محدوده طول موجی μm 12.6-14.6 nm و به عنوان شده است که به طور خاص در کاربرد لیتوگرافی بسیار حائز اهمیت است. فلز مس با ضخامت μμ و به عنوان هدف انتخاب شده و پالس لیزر اصلی در محاسبات دارای پهنای 50 psec, شدت W/cm² و طول موج 1.06 μm است. پیش پالس لیزری نیز با فواصل زمانی مختلف نسبت به پالس اصلی و نیز با شدتهای مختلف قبل از پالس اصلی به سطح هدف تابیده می شود. نتایج حاصل از محاسبات شرایط بهینه برای تولید بیشترین مقدار اشعه ایکس را به دست خواهد داد.

نتایج و بحث دما و دانسیته پلاسما شکل (۲) نتایج حاصل از شبیه سازی پلاسما توسط کد EHYBRID را برای یک پالس لیزری بـه طـول 50 ps و شدت 10¹⁵ W/cm² به عنوان نمونه نشان می دهد. نمودار دما و دانسیته الکترونی بصورت یک بعـدی و *های* ... فاضلی و هادی پور

در طول لایه های مختلف پلاسما و هدف نمایش داده شده است. مشاهده می گردد که لایه های عمیق تر هدف، در زمان های بزرگتر، تحت تاثیر برهم کنش لیزر قرار گرفته، دما و دانسیته الکترونی آنها افزایش می یابد. در این نمودارها دما از مرتبه چند صد ev و دانسیته الکترونی از مرتبه ²³ cm³ در عرض هدف حاصل شده است.



تابش x-ray از پلاسما

با در دست داشتن دما و دانسیته الکترونی می توان جمعیت یونها در ترازها را در هر لحظه از زمان در لایه های مختلف پلاسمایی با حل معادله ساها محاسبه نمود. در نهایت میزان تابش اشعه ایکس از طریق رابطه (۲) در بازه های زمانی مختلف محاسبه می شود. شکل (۳) میزان اشعه ایکس تولید شده در لایه های مختلف را در زمان 25 ps پس از آغاز پالس لیزر نشان میدهد. مشاهده می شود در لایه هایی که دانسیته الکترونی و به خصوص دما مقادیر قابل توجهی دارند، تولید اشعه ایکس بیشتر است.



حال با انتگرال گیری روی تمام لایه ها در زمانهای مختلف میزان تابش نسبت به زمان محاسبه می شود. شکل (۴) نمودار تابش اشعه ایکس نسبت به زمان را در طول تابشدهی و پس از آن تا زمان ps 500 نشان می دهد.



34

مشاهده می شود که پهنای پالس '(FWHM) اشعه ایکس تولید شده در حدود همان پالس لیزر استفاده شده یعنی 50 ps است. در واقع آنچه که زمان صعود و سقوط پالس ایکس را تعیین می کند، گرم شدن پلاسما به هنگام افزایش شدت لیزر (در نیمه اول پالس لیزر) و سرد شدن آن به هنگام کاهش شدت لیزر (در نیمه دوم پالس لیزر) است.

تاثیر استفاده از پیش پالس لیزری

اکنون می توان تاثیر استفاده از یک پیش پالس لیزری قبل از پالس اصلی را مورد بررسی قرار داد. پیش پالس را می توان با شدتهای متفاوت و نیز فواصل زمانی مختلف نسبت به پالس اصلی اعمال کرد. در این مقاله تـاثیر ایـن دو عامل به دقت بررسی شده است.



بین پالس اصلی و پیش پالس. شدت پالس اصلی W/cm² و شدت پین پالس اصلی و پیش پالس. شدت پالس اصلی 10¹⁵ W/cm² و شدت پیش پالس 10¹³ W/cm² است.

با انتگرال گیری از منحنی تابش ایکس نسبت به زمان می توان انرژی کل تابیده شده در یک پالس را محاسبه نمود. شکل (٥) میزان افزایش انرژی کل اشعه ایکس گسیل شده را به صورت تابعی از فاصله زمانی بین پالس اصلی و پیش پالس (تاخیر زمانی) نشان می دهد. میزان افزایش انرژی، نسبت به حالت عادی (بدون استفاده از پیش پالس) انتخاب شده W/cm² منان می دهد. میزان افزایش انرژی، نسبت به حالت عادی (بدون استفاده از پیش پالس) می مشاهده می شود که یک مقدار بهینه برای تاخیر زمانی وجود دارد که در آن بیشترین مقدار اشعه ایکس تولید می رسد تولید اشعه ایکس دو برابر می شود. در واقع 400می شود. در این شرایط هنگامی که تاخیر زمانی به پیش پالس هنگامی که شدتی بالاتر از آستانه تشکیل پلاسما داشته باشد، باعث تشکیل یک پیش پلاسما روی سطح

1-Full Width at Half Maximum

هدف قبل از رسیدن پالس اصلی می شود. در نتیجه پالس لبزر اصلی به جـای یـک سـطح فلـزی، بـا یـک حجـم پلاسمایی روبرو می شود که باعث جذب بیشتر انرژی لیزر و در نهایت تولید بیشتر اشعه ایکس خواهد شد.



عامل دیگر در تاثیر پیش پالس لیزری، شدت آن (I_p) نسبت به پالس اصلی (I) است. شکل (۶) نتایج بدست آمده را برای سه شدت مختلف پیش پالس نشان می دهد. از روی شکل پیداست که مقدار بهینه تاخیر زمانی با کاهش شدت پیش پالس افزایش می یابد. این مقدار بهینه هنگامیکه نسبت شدت پیش پالس به پالس اصلی برابر 0.01 و شدت پیش پالس افزایش اسعه ایک نیز با کاهش مندت پیش پالس افزایش امی یابد. این مقدار بهینه هنگامیکه نسبت شدت پیش پالس به پالس اصلی برابر 0.01 و شدت پیش پالس به پالس اصلی برابر 0.01 و شدت پیش پالس افزایش می یابد. این مقدار بهینه هنگامیکه نسبت شدت پیش پالس به پالس اصلی برابر 0.01 و شدت پیش پالس افزایش اسعه ایک س نیز با کاهش شدت پیش پالس به یاس اصلی برابر 0.01 و مندت پیش پالس به پالس اصلی برابر 0.01 و 0.001 نشدت پیش پالس ، افزایش اسعه ایک س نیز با کاهش شده روند شدت پیش پالس، افزایش می یابد. مشاهده می شود هنگامی که نسبت شدتها برابر 0.1 باشد انرژی تابش شده روند کاهش مدت پیش پالس، افزایش می یابد. مشاهده می شود هنگامی که نسبت شدتها برابر 0.1 باشد انرژی تابش شده روند مدت پیش پالس، افزایش می یابد. مشاهده می شود هنگامی که نسبت شدتها برابر 0.1 باشد انرژی تابش شده روند کاهشی خواهد داشت. اما با کاهش این نسبت تا 0.001 می توان میزان تابش اشعه را به میزان قابل توجهی (حدود 2.5 برابر) افزایش داد. محاسبات نشان می دهند که اگر نسبت شدتها کمتر از 0.001 شود میزان افزایش تغییر چندانی نمی کند.

نتيجه گيرى

تابش اشعه ایکس از یک پلاسمای لیزری شبیه سازی شد و پس از آن تاثیر به کار گیری یک پیش پالس لیزری قبل از پالس لیزر اصلی بر میزان تابش اشعه ایکس بررسی شد. ابتدا نـشان داده شـد کـه در لایـه هـایی کـه دانسیته الکترونی و به خصوص دما مقادیر قابل توجهی دارند، تولید اشعه ایکس بیشتر است. همچنین مـشاهده شـد که پهنای پالس اشعه ایکس تولید شده در حدود همان پالس لیزر استفاده شده است. سپس نشان داده شد که استفاده

از یک پیش پالس لیزری با شدت و فاصله زمانی مناسب نسبت به پالس اصلی می تواند گسیل اشعه ایکس را به میزان قابل توجهی تقویت کند. مشاهده شد که یک مقدار بهینه برای تاخیر زمانی وجود دارد که در آن بیشترین مقدار اشعه ایکس تولید می شود. این مقدار بهینه به شدت پیش پالس استفاده شده بستگی دارد. هنگامی که نسبت شدت پیش پالس به پالس اصلی برابر 0.1 و بیشتر از آن شود، فرایند افزایش تضعیف شده و تولید اشعه ایکس کاهش می یابد.

Refrences:

- 1. Sailaja, Arora, S.V., Kumbhare, S.R., Naik, P.A., P. Gupta, D., Fedin, D.A., Rupasov, A.A., and Shikanov, A.S., *Meas. Sci. Technol.*, **9**, 1462 (1998).
- 2. Gibbon, P., Forster, E., Plasma Phys. Control. Fusion, 38, 769 (1996).
- 3. Lindl, J., Phys. Plasmas, 2, 3933 (1995).
- 4. Diado, H., Rep. Prog. Phys., 65, 1513 (2002).
- 5. Pelletier, J.F., Chaker, M., and Kieffer, J.C., *J. Appl. Phys.*, **81**, 5980 (1997); Nakano, H., Nishikawa, T., Ahn, H., and Uesugi, N., *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 2992 (1996).
- Murnane, M.M., Kapteyn, H.C., Gordon, S.P., Bokor, J., Glytsis, E.N., and Falcone, R.W., *Appl. Phys. Lett.*, 62, 1068 (1993).
- 7. Nishikawa, T., Nakano, H., Uesugi, N., Nakao, M., and Masuda, H., *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 4079 (1999).
- 8. Nishikawa, T., Nakano, H., Ahn, H., and Uesugi, N., *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 1653 (1997).
- 9. Kulcsar, G., AlMawlawi, D., Budnik, F.W., Herman, P.R., Moskovits, M., Zhao, L., and Marjoribanks, R.S., *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 5149 (2000).
- 10. Pert, J., J. Fluid Mech, 131, 401 (1983).
- 11. Turcu, I.C.F, X-Rays from Laser Plasmas, Generation and Application, John Wiley and Sons, New York (1999).
- 12. Ichimaru, S., J. Plasma Physics, 13 (1975).
- 13. Lang, K.R., Astrophysical formulae: Radiation, Gas Processes, and High Energy *Physics*, Springer, Enlarged 3rd edition (1999).
- 14. Fridman, A.A., Kennedy, L.A., *Plasma Physics and Engineering*, Taylor and Francis, New York (2004).