٤٧٨١٤

دانشکده فیزیک

عنوان:

بررسی تجربی پلاسمای دو لایه الکتریکی به عنوان یک سیستم دینامیک غیرخطی

استاد راهنما:

دکتر محمود مصلحی‌فرد ۱۳۸۲/۷/۱۰

استاد مشاور:

مهندس سیروس خرم

از نظارت استاد مرکز محترم این
تشکر می‌کنم

ارائه دهنده:

محمدمهدی خدادی

۴۷۸۱۴

تقدیم به:

پدر و مادر
و
برادران عزیزم

با تقدیر و تشکر از:

اساتید دانشگاه تبریز بخصوص استاد راهنمای عزیزم آقای دکتر محمود مصلحی‌فرد و استاد مشاور آقای مهندس سیروس خرم و آقایان دکتر صمد سبحانیان و دکتر حسن بیدادی و دکتر محمدعلی جعفری‌زاده و دکتر حبیب تجلی، که به ثمر رسیدن این پایان‌نامه، من را یاری نموده‌اند.

فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه

فصل اول/ بررسی منابع

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- ناپایداری دو جریانی (Two stream instability) ۳

۱-۳- نیروی اثرگذار (ponderemotive force) ۶

۱-۴- معرفی شکل موج مدوله شده ۷

۱-۵- ناپایداری مدولاسیون و شرایط اولیه پلاسما ۱۰

۱-۵-۱- شرط ایجاد موج مدوله شده در پلاسما ۱۰

۱-۵-۲- ناپایداری مدولاسیون و امواج الکترونی: ۱۲

۱-۵-۳- سالیتون الکترونی از دید ناظر آزمایشگاهی ۱۷

فصل دوم/ مواد و روشها

۲-۱- شرح دستگاه تخلیه الکتریکی ۲۲

۲-۱-۱- شرح پروب لانگمیر و آنالیزور انژری ۲۳

۲-۱-۲- نمودار مشخصه (I_d-V) ۲۵

۲-۱-۳- باریکه الکترونی و یونی و امواج ناشی از آنها ۲۸

۲-۱-۴- وجود حرکت سوقی یونها و الکترونها و امواج ناشی از آنها ۲۹

۲-۱-۵- حالت شبه استاتیک پلاسما و امواج یونی و الکترونی ۳۰

۲-۱-۶- حالت شبه یونیزه بودن پلاسما وجود امواج فرکانس پایین ۳۰

۲-۲- معادله نوسانگر میرایی خطی- فضای فاز ۳۲

۲-۳- معادله و اندرپل در پلاسما و خصوصیات آن ۳۴

عنوان ..... صفحه

۱-۳-۲- پدیدهٔ غیر خطی روی‌هم افتادگی (Synchronization) ۳۷
۲-۳-۲- جابجایی فرکانسی (Pulling frequency) ۴۰
۴-۲- آشوب ۴۳
۱-۴-۲- فضای فاز و نوسانات پلاسما ۴۳
۵-۲- طرح لجستیک – Logistic map ۴۵
۱-۵-۲- تکرار مرتبه اول معادله لجستیک ۴۷
۲-۵-۲- تکرار مرتبه دوم معادله لجستیک ۴۹
۶-۲- تحلیل فوریه ۵۱
۱-۶-۲- توان متوسط سیگنال V(t) ۵۳
۲-۶-۲- تابع همبستگی ۵۳
۳-۶-۲- تابع چگالی طیف توان ۵۵

فصل سوم/ نتایج و بحث

۱-۳- نتایج ۵۸
۱-۱-۳- موج پلاسما در حالت بدون دریچه ۵۹
۲-۱-۳- امواج پلاسما در حضور دریچه با قطر ۱ cm ۶۴
۳-۱-۳- امواج پلاسما در حضور دریچه با قطر ۲ cm ۶۵
۲-۳- بحث ۹۰
پیشنهادات و کاربرد ۹۱
منابع ۹۲

نام خانوادگی دانشجو: خدادی **نام:** محمدمهدی

عنوان پایان نامه: بررسی تجربی پلاسمای دو لایه الکتریکی به عنوان یک سیستم دینامیک غیر خطی

استاد راهنما: دکتر محمود مصلحی‌فرد

استاد مشاور: مهندس سیروس خرم

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** فیزیک **گرایش:** اتم مولکولی پلاسما

دانشگاه: تبریز **دانشکده:** فیزیک **تاریخ فارغ التحصیلی: مرداد ۱۳۸۲** **تعداد صفحه:** ۹۳

کلید واژه‌ها:

جابجایی فرکانس، روی‌هم افتادگی، پلاسما، واندرپل،

چکیده:

نوسان‌گر غیرخطی واندرپل $\ddot{x}-(\alpha+\beta x^2)\dot{x}+\omega_0^2 x=0$ موج اصلی پلاسما را بیان می‌کند این موج به صورت مدوله شده و از برخورد ذرات باردار با اتمهای خنثی ایجاد می‌شود که ناپایداری مدولاسیون را پیش‌بینی می‌کند. این موج با سرعت گروه (V_g) حرکت می‌کند. برهم‌کنش این موج با امواج خارجی در صورت نزدیک بودن دامنه و فرکانس آنها به هم، توسط معادله واندرپل واداشته به صورت پدیده‌های غیرخطی جابجایی فرکانس و روی هم افتادگی طیف بیان می‌شود. در پلاسما وجود نیروی اثرگذار ناشی از موج خارجی و کاهش چگالی اطراف آن وزنش آنها با موج اصلی پلاسما و دو شاخگی آنها نیز توسط فضای فاز پیش‌بینی می‌شود.

در امتداد کارهای کوپک و تعدادی از مولفین که این پدیده‌ها را در پلاسمای مغناطیده مشاهده نموده‌اند: دستگاه تخلیه الکتریکی مورد آزمایش بدون میدان خارجی و در حضور دریچه بین ناحیه آندوکاتد امواج مدوله شده و برهم‌کنش‌های غیرخطی امواج (روی هم افتادگی و جابجایی فرکانس)و حالتهای آشوبناک و دو شاخگی پلاسما مشاهده شده است.

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

بخش اول

بررسی منابع

۱-۱- مقدمه

برای توصیف نوسان‌های غیرخطی سیستم‌های نوسان‌کننده در اثر نیروهای میرای غیرخطی از نوع خاصی از معادلات دیفرانسیل (واندرپل[1]) استفاده می‌شود [۲] و [۱]. توصیف مدارهای RLC غیرخطی و مدارهای ujt و همچنین نوسان‌های غیرخطی مکانیکی از معادله واندرپل استفاده می‌شود [۴] و [۳].

مدولاسیون امواج و جفت‌شدگی غیرخطی (Modulation)، دو شاخه شدگی (bifurcation) و آشوب (chaos) با این معادله بیان می‌شود [۵] و [۶] و [۷]. این معادله برای تحلیل برهم کنش الکترومغناطیسی و مدولاسیون آنها نیز بکار می‌رود [۵]. اولین بار در سال ۱۹۷۰ این معادله برای توصیف موج یون صوتی در پلاسما بکار برده شد [۸]. به همین ترتیب برای توصیف رفتار غیرخطی امواج الکترونی و لایه‌های دوگانه آندی پلاسما بکار رفته است [۱۰] و [۹] و [۶] و [۲]. اخیراً دامنه شکست نوسان پلاسما که بوسیله این معادله پیش‌بینی می‌شود بطور تجربی در ماشین پلاسمای سه‌گانه برای فرکانس‌های خیلی کمتر از فرکانس اصلی پلاسما بررسی شده است [۱۱].

در این آزمایش نوسان‌های ناشی از یونیزاسیون ناحیه آندی و یونیزاسیون داخل پلاسما [۱۰] و [۹] در پلاسمای دولایه در نظر گرفته شد، و معادله واندرپل مورد بررسی قرار داده شد و برهم کنش غیرخطی نوسان‌کننده ذاتی پلاسمای دولایه را با موج اعمالی خارجی به طور تجربی بررسی کردیم و نتایج تجربی حاصل با استفاده از معادله واندرپل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این آزمایش برخلاف کارهای کوپک[2] [۳] که خاصیت مدولاسیون و جابجایی و روی هم افتادگی امواج برهم کنش‌کننده در پلاسمای دولایه مغناطیده انجام داده است [۱۳] و [۱۲] و [۲] و [۱]. در

1- Vander Pol
2- Koepke

پلاسمای دولایه الکتریکی بدون میدان خارجی و با قرار دادن یک دریچه بین ناحیه آندی و کاتدی انجام شد و نتایج مشابه بدست آمد. برای بیان حالت‌های مختلف نوسان‌گر واندرپل از فضای فاز و دینامیک آشوبی استفاده شده است از جمله وجود دو شاخگی در حضور موج خارجی توسط جیرجیک[1] در سال ۱۹۹۹ با استفاده مسیر فازی بیان شده است [۱۳]. در سال ۱۹۸٦ برای نمایش حالت پریود دوگانه پلاسما در وضعیتی که دامنه موج خارجی پلاسما کنترل می‌شود از مسیر فازی استفاده شده است [۱۶ و ۵]. همچنین حالت‌های شبه پریودیک و آشوبناک پلاسما با استفاده از نمودار دوشاخگی بیان شده است [۱۵، ۱۴، ۵]. حالت‌های مختلف پلاسما از جمله حالت نوسانی، آشوبناک و دوشاخگی‌ها توسط نمودار مشخصه ولتاژ جریان پلاسما بیان شده‌اند [۲۴، ۱۷، ۱۶، ۶]. در این آزمایش با استفاده از فضای فاز و نقشه لجستیک (logestic map) و همچنین نمودار مشخصه ولتاژ جریان حالت‌های مختلف پلاسما مانند حالت شبه پریودیک و اشوب و دوشاخگی‌های طیف پلاسما بیان شده است.

۲-۱- ناپایداری دو جریانی (Two stream instability)

بنا به نظریه سیالی وقتی سرعت‌های مرتبه صفرم الکترونها و یونهای پلاسما نسبت به هم متفاوت باشند باعث ایجاد ناپایداری در پلاسما می‌شود. به طوریکه سرعت‌های مرتبه غیر صفر به سرعت‌های اولیه افزوده می‌شوند. ساده‌ترین حالت وضعیتی است که یون‌ها در پلاسما ساکن باشند و الکترونها با سرعت V_0 نسبت به یونها حرکت کنند از معادلات خطی شده سیالی داریم:

1) $\partial_t n_{e_1} + n_0 \partial_x V_{e_1} + V_0 \partial_x n_{e_1} = 0$

2) $m_e n_0 \partial_t V_{e_1} + m_e n_0 V_0 \partial_x V_{e_1} = -e n_0 E$

3) $\partial_t n_{i_1} + n_0 \partial_x V_{i_1} = 0$

4) $m_i n_0 \partial_t V_{i_1} = e n_0 E$

5) $\partial_x E = 4\pi (n_{i_1} - n_{e_1})$

1- Gyergeyek

که در آن حرکت به صورت یک بعدی، $T_i = T_e = 0$ و پلاسما بدون حرکت سوقی الکترونها دارای امواج الکترونی می‌باشد. حال با وجود این سرعت سوقی، ناپایداری در این امواج ایجاد می‌شود. اگر معادلات سیالی به شکل حرکت موجی به صورت $\exp(i\omega t)$ باشد. (ω مختلط است). به ازای $\mathrm{Im}(\omega) > 0$ موج رشد می‌کند و به ازای $\mathrm{Im}(\omega) \to 0$ هیچگونه ناپایداری در پلاسما نخواهد بود. از معادلات (۱و۲و۵) داریم:

$$6)\ (-i\omega + ikV_o)V_{e1} = \frac{-eE}{me}$$

$$7)\ (-i\omega + ikV_o)n_{e1} = \frac{-ikn_o eE}{-i\omega + ikV_o} = 0$$

$$8)\ -i\omega n_{i1} = \frac{-ikn_o eE}{-i\omega n_{i1}}$$

اگر معادلات (۸ و ۷) در معادله پواسون قرار داده شود رابطه پاشندگی پلاسما به شکل زیر بدست می‌آید:

$$\varepsilon(k,\omega) = 1 - \frac{\omega_i^2}{\omega^2} - \frac{\omega_e^2}{(\omega - kV_o)^2} = 0$$

در حالت $m_i \to \infty$ و $\omega_i \to 0$ رابطه بالا به صورت: $\omega = kV_o \pm \omega_e$ تبدیل می‌شود. وقتی $kV_o \approx \omega_e$ باشد فرکانسهای پایین بدست می‌آید یعنی $|\omega| << \omega_e$ می‌شود. و در بسیاری از ناپایداریها هم $|\omega| >> \omega_i$ در این صورت فرکانس موج در حالت وجود حرکت سوقی الکترونها در بازه $\omega_e >> |\omega| >> \omega_i$ می‌باشد بنابراین داریم:

$$0 = 1 - \frac{\omega_i^2}{\omega^2} - (1 + \frac{2\omega}{\omega_e})$$

$$0 = -\frac{\omega_i^{-2}}{\omega^2} - \frac{2\omega}{\omega_e}$$

$$\frac{\omega}{\omega_e} = (\frac{-1}{2})^{1/3}(\frac{m_e}{m_i})^{1/3}$$

روش دیگری برای بدست آوردن ناپایداری موجی رسم تابع $F(k, \omega)$ می‌باشد.

$$F(k,\omega) = \frac{\omega_i^2}{\omega^2} + \frac{\omega_e^2}{(\omega - kV_o)^2}$$

F را با k ثابت و برحسب ω رسم می‌کنند و با تابع F=1 قطع می‌دهند، نقاط تقاطع به عنوان فرکانس‌های پایدار و ناپایدار پلاسما بدست می‌آید. به ازای $F_{min}(k,\omega) < 1$ پلاسما دارای چهار جواب موجی پایدار است و در صورتیکه $F_{min}(k,\omega) > 1$ باشد دارای دو جواب حقیقی برای فرکانس است ولی در بازه $\omega \geq |kV_o|$ دارای مدهای ناپایداری از امواج است.

$$F_{min} = \frac{\omega_i^2}{(\frac{m_e}{m_i})^{\frac{1}{3}} k^2 V_o^2} + \frac{\omega_e^2}{k^2 V_o^2}$$

$$\omega_{min} \approx (\frac{m_e}{m_i})^{\frac{1}{3}} kV_o$$

ناپایداری دوجریانی پیش‌بینی می‌کند اگر ذرات دارای سرعت سوقی V_o $(-\frac{\omega}{k} \leq V_o \leq \frac{\omega}{k})$ باشند می‌توانند با امواج ذاتی پلاسما که دارای سرعت $V = \frac{\omega}{k}$ هستند برهم کنش کرده و موج رامیرا یا رشد دهند. اما این ناپایداری بیان می‌کند که هر چه انرژی سوقی ذرات کمتر باشد بهتر می‌تواند باعث ناپایداری امواج پلاسما شود در حالی که به نظر می‌رسد که هر چه انرژی آزاد ذرات بیشتر باشد باید موجب ناپایداری بیشتری شود. البته این مطلب با در نظر گرفتن حرکت حرارتی ذرات و معادلات پلاسما و امواج بوسیله نظریه جنبشی و میرای لاندائو قابل اصلاح می‌باشد.

در پلاسمای بالا چگالی باریکه بسیار کم در نظر گرفته شده است و همان چگالی پلاسما تعریف می‌شود به عبارتی فقط یک سری حرکت سوقی برای ذرات پلاسما تعریف شده است. اما در صورتی که در پلاسما باریکه‌ای از ذرات وجود داشته باشد که دارای چگالی n_b جدا از چگالی پلاسما باشد (n_b در مقابل چگالی پلاسما قابل اغماض نباشد) در این صورت یک سری ناپایداریهای ناشی از باریکه هر نوع ذره در پلاسما ایجاد می‌شود و امواج با فرکانسهای جدیدی بوجود می‌آیند که می‌توان روابط پاشندگی را در حضور باریکه‌ها و پلاسماهای

مختلف مشابه ناپایداری دو جریانی بدست آورد. همچنین شکل موج نیز به صورت غیرخطی بدست می‌آید اما آنچه بدیهی است فرکانس موجهای پیش‌بینی شده توسط روابط پاشندگی مختلف ذکر شده خیلی زیادتر از فرکانس موج پلاسما آزمایشگاه می‌باشد و بیانگر موج مورد بررسی در دستگاه تخلیه نمی‌باشند.

۳-۱- **نیروی اثرگذار** (ponderemotive force)

وقتی دامنه موج ثابت نبوده و تغییرات آرام مکانی داشته باشد و معادله موج به صورت $E(x,t)= E_0(x)Cos(\omega t)$ و سمت راست آن قوی‌تر از سمت چپ آن باشد. ذرات تحت نوسان، وقتی به ناحیه میدانهای قوی می‌روند، موج یک فشار به سمت چپ احساس می‌کند و وقتی به سمت چپ هل داده شوند خود موج فشاری به سمت راست مشاهده می‌کند که کمتر از فشار سمت چپ می‌باشد به عبارتی موج، علاوه بر انتشار در راستای حرکت به سمت دامنه ضعیف‌تر سوق پیدا می‌کند اگر معادله ذرات تحت نوسان به صورت زیر نوشته شود:

$$m_s\ddot{x} = q_sE = q_sE_0(x)Cos(\omega t)$$

حرکت ذره به دو قسمت کند (جابجای مرکز نوسانE_0) و تند تغییر (x_1) تقسیم می‌شود که $x_o = \overline{x}$ است و متوسط‌گیری در یک دوره تناوب موج $(T = \frac{2\pi}{\omega})$ می‌باشد. اگر $E_0(x)$ بسط داده شود:

$$m_s(\ddot{x}_o + \ddot{x}_1) = q_s(E_o + x_1\frac{d}{dx}E_o)Cos(\omega t)$$

$$m_s\ddot{x}_o = q_s\frac{d}{dx}E_o\Big|_{x0}\left(\overline{x_1Cos(\omega t)}\right)$$

برای محاسبه معادله x_1 با توجه به انیکه $\ddot{x}_1 >> \ddot{x}_o$، اگر x_1 دارای فرکانس بالایی باشد:

$$E_o >> x_1(\frac{d}{dx}E_o)$$

$$m_s\ddot{x}_1 = q_sE_oCos(\omega t)$$

$$\ddot{x}_o = -\frac{q_s^2E_o}{2m_s^2\omega^2}\frac{d}{dx}E_o$$

بنابراین نیروی اثرگذار به صورت: $F_p = -\frac{q_s^2}{4m_s\omega^2}\frac{d}{dx}(E_o^2)$ است.

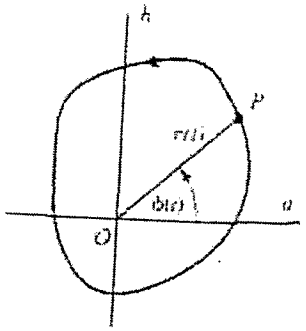
که باعث جابجایی خود موج یا ذرات اطراف موج می‌شود.

۴-۱- معرفی شکل موج مدوله شده

چون علاوه بر موج طبیعی سیالی، موج دیگری از خارج به آن اعمال شده است. این دو موج با یکدیگر برهم کنش نموده و موج تداخلی یا همان مدوله شده را ایجاد می‌کنند در اینجا انواع مدولاسیون موجود و نتایج حاصل نشان داده می‌شود. کلی‌ترین شکل موج تداخلی به صورت:

$x(t)=a(t)\ Cos(\omega_i t+\phi(t))$

که در آن موج پلاسما دارای فاز $(\phi(t))$ دامنه $(a(t))$ وابسته زمان است. در اینجا موج پلاسما را موج حامل (موجی که شکل آن توسط مشخصه‌های موج دیگر تغییر می‌کند) و موج خارجی را موج مدوله‌کننده در نظر می‌گیرند. اگر شکل فازی موج مدوله شده به صورت زیر باشد:



شکل ۱-۱

که برداری به طول $a(t)$ است و با سرعت زاویه‌ای $\omega_i t-\phi(t)$ چرخش می‌کند. $x(t)$ به صورت کلی زیر تجزیه می‌شود:

$$x(t)= a_1(t)\ Cos(\omega_i t) - a_2(t)\ Sin(\omega_i t)$$

که در آن دامنه‌ها نیز تناوبی هستند.

$$a_1(t) = a(t)Cos\phi(t)$$
$$a_2(t) = a(t)Sin\phi(t)$$

الف- مدولاسیون دامنه Amplitude Modulation

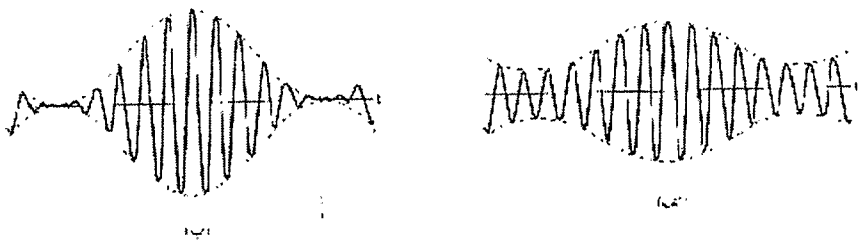
اگر موج پلاسما موج مدوله‌شونده که در پلاسما با فاز معین عبور می‌کند و موج خارجی، موج مدوله‌کننده باشد که فاز آن ثابت است در این صورت ترکیب دو موج برهم کنش‌کننده به صورت زیر می‌باشد.

$$x_m(t) = E\cos(\omega_i t) + \mu E x_{p_i}(t)\cos(\omega_i t)$$

E دامنه موج خارجی و ثابت است. μ ضریب مدولاسیون و مقداری مثبت است. x_{p_i} موج نرمالیزه شده پلاسما است که قسمت دوم عبارت بالا بیانگر برهم کنش دو موج است. اگر دامنه $a(t)$ را به صورت زیر تعریف کنیم.

$$a(t) = E(1 + \mu x_{p_i}(t))$$

موج مدوله به شکل $x_M(t)= a(t)\cos(\omega_i t)$ است. توجه داریم دو موج حامل و پیام را مستقل از هم در نظر گرفته‌ایم چرا که منابع متفاوت و مستقلی دارند. در این صورت این دو موج باید اختلاف فاز معینی داشته باشند که مبداء فاز را موج خارجی فرض کرده و اختلاف فاز در $x(t)$ پنهان است. با توجه به معادله بالا موج مدوله شده دارای فرکانس ω_i بوده و دامنه آن وابسته به زمان است اگر فرکانس $x_{p_i}(t)$ (موج پلاسما) با فرکانس ω_i (موج خارجی) متفاوت باشند، شاهد پوش در شکل موج خواهیم بود. که به ازای ضریب مدولاسیون (μ) متفاوت، حالت‌های مختلفی را دارا می‌باشد. اگر $\mu < 1$ باشد در این صورت دامنه پوشش صفر نمی‌شود و بین دو مقدار $A_{max} = A_c(1+\mu)$ و $A_{min} = A_c(1-\mu)$ تغییر می‌کند و در حالت $\mu = 1$ دامنه‌پوش در ناحیه $A_{max}= 2A_c$ و $A_{min}= 0$ است. ضریب مدولاسیون نشان‌دهنده نسبت دو دامنه است.



شکل ۲-۱ الف) μ< ۱ ب) μ = ۱