

عوامل موثر بر توان تابش تراهرتز تولید شده توسط برخورد دو پالس لیزری در پلاسما

مریم صابرنیا^۱، مهدی شریفیان^{۲*}، فاطمه شاهی^۳^۱دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک، m.sabernia@stu.yazd.ac.ir^۲دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک، mehdi.sharifian@yazd.ac.ir^۳دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک، f.shahi@stu.yazd.ac.ir[*mehdi.sharifian@yazd.ac.ir](mailto:mehdi.sharifian@yazd.ac.ir)

کلیدواژه: برهمکنش لیزر-پلاسما، دامنه میدان الکتریکی تراهرتز، نیروی پاندرموتیو

چکیده

برهمکنش میدان لیزری با پلاسما به ذرات آن سرعت خطی \vec{v}_j می‌دهد. از طرفی زنش دو پالس لیزر با یکدیگر و اعمال میدان مغناطیسی خارجی در محیط پلاسما، نیروی پاندرموتیو F_{px} و F_{py} را به وجود می‌آورد که در فرکانس $\omega_0 = \omega_1 - \omega_2$ و عدد موج $\vec{k}_0 = \vec{k}_1 + \vec{k}_2$ به ذرات سرعت غیر خطی \vec{v}_{nl} را خواهد داد. با استفاده از این سرعت‌ها، معادله پیوستگی آشفته‌گی چگالی و معادله پواسون به رابطه پتانسیل بار فضایی خواهیم رسید که شرط تشکیل موج تراهرتز را نشان خواهد داد. با برآورده شدن شرط $(\omega_0 > 2\omega_p)$ ، موج تراهرتز با پروفایل میدان الکتریکی \vec{E}_T تشکیل خواهد شد. برهمکنش میدان تراهرتز \vec{E}_T با موج پمپ پلاسما، نیروی پاندرموتیو در فرکانس $\omega = \omega_0 + \omega_T$ و عدد موج $k = k_0 - k_{Tx}$ به الکترون‌های پلاسما وارد خواهد شد. با به دست آوردن چگالی جریان موج تراهرتز و حل معادله موج، دامنه‌های موج تراهرتز به دست خواهد آمد و با رسیدن به یک معادله پارامتریک، نمودار k_T برحسب ω_T برای سه فرکانس سیکلوترونی مختلف، رسم خواهد شد.

Effective factors on generated terahertz radiation power by the collision of two laser beams in plasma

Maryam sabernia, Mehdi sharifian* and Fateme shahi

Physics Department, Yazd University, Yazd

* mehdi.sharifian@yazd.ac.ir

Abstract

The interaction between laser field and plasma gives the linear velocity \vec{v}_j to its particles. On the other hand, the beat of two laser beams and applying the external magnetic field in the plasma produce the ponderomotive force F_{px} and F_{py} which gives nonlinear velocity \vec{v}_{nl} to the particles at the frequency of $\omega_0 = \omega_1 - \omega_2$ and the wavenumber of $\vec{k}_0 = \vec{k}_1 + \vec{k}_2$. Using these velocities, the density perturbation equation and the Poisson equation will arrive at the charge potential equation, which will represent the condition for the generation of the terahertz wave. By satisfying the condition of $(\omega_0 > 2\omega_p)$, a terahertz wave will be generated with the electric field profile \vec{E}_T . The interaction of the terahertz field \vec{E}_T with the wave of the plasma pump, the ponderomotive force at the frequency $\omega = \omega_0 + \omega_T$ and the wave number $k = k_0 - k_{Tx}$ will enter the plasma electrons. By obtaining the terahertz wave current density and solving the wave equation, the terahertz wave amplitudes will be obtained, and by reaching a parametric equation, the k_T diagram in terms of ω_T for three different cyclotron frequencies will be plotted.

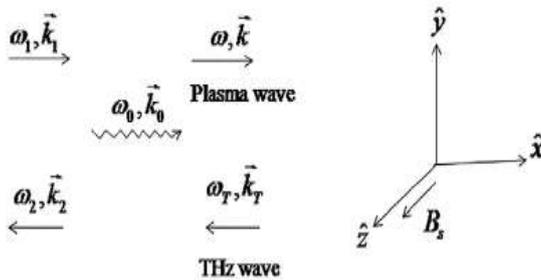
Keywords: Laser-plasma interaction, Ponderomotive force, Terahertz electric field amplitude

جمله مزیت‌های امواج تراهرتز نسبت به امواج میکروموج و پرتو ایکس می‌توان به این موارد اشاره کرد: (۱) کاملاً ایمن است، (۲) تعداد زیادی از خصوصیات طیفی، همچون گذارهای دورانی

مقدمه

تابش تراهرتز به ناحیه‌ای از طیف الکترومغناطیسی گفته می‌شود که در محدوده فرکانسی بین تابش میکروموج و فرسرخ قرار دارد. از

یک پلاسما همگن با چگالی n_0 را فرض می‌کنیم. اگر میدان مغناطیسی اعمالی $\vec{B} = B_0 \hat{z}$ باشد و دو پالس لیزر که پروفایل میدان الکتریکی آنها $\vec{E}_j = \hat{y} A_j e^{-i(\omega_j t - K_j x)}$ است، در خلاف جهت هم منتشر شوند، شماتیک برخورد موج پمپ در این پلاسما مغناطیسی به صورت شکل ۱ خواهد بود. عدد موج از رابطه $k_j = \frac{\omega_j}{c} (1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_j^2})^{\frac{1}{2}}$ بدست می‌آید، که در اینجا $j=1, 2$ و



شکل (۱) شماتیک برخورد موج پمپ در پلاسما مغناطیسی

فرکانس پلاسما $\omega_p = \sqrt{\frac{n_0 e^2}{m \epsilon_0}}$ و m, e به ترتیب بار الکتریکی و جرم الکترون است. الکترون‌های پلاسما تحت تاثیر میدان الکتریکی لیزرهای پمپ در پلاسما مغناطیسی (\vec{E}_1, \vec{E}_2) نوسان می‌کنند. سرعت الکترون‌های پلاسما را می‌توان با نوشتن معادله حرکت $m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ استفاده از رابطه $\omega_c = \frac{eB_z}{m}$ و بازنویسی آن در دو راستای X و Y به صورت $v_x = \frac{-A_{1y} e \omega_c}{m(\omega^2 - \omega_c^2)}$ ، $v_y = \frac{-i e \omega_j A_{1y}}{m(\omega^2 - \omega_c^2)}$ بدست آورد. (۴) تغییرات دامنه میدان لیزرها در جهت Y و حضور میدان مغناطیسی در جهت Z ، F_{py} را ایجاد می‌کند و زنش دو باریکه لیزر، F_{px} را ایجاد می‌کند. پس نیروی پاندرموتیو اعمالی روی الکترون‌های پلاسما به صورت $\vec{F}_p = F_{px} \hat{x} + F_{py} \hat{y}$ است. عدد موج و فرکانس این نیرو پاندرموتیو به ترتیب برابرست با $\omega_0 = \omega_1 + \omega_2$ ، $k_0 = k_1 + k_2$. می‌توانیم از تعریف پتانسیل محرکه وزنی استفاده کنیم و با جایگذاری v_1 و v_2 نیروی پاندرموتیو \vec{F}_p بدست آوریم.

$$F_{px} = \frac{e^2}{2m} \left(\frac{i(k_1 + k_2)\omega_c^2}{(\omega_1^2 - \omega_c^2)(\omega_2^2 - \omega_c^2)} - \frac{k_1 \omega_2}{i\omega_1(\omega_2^2 - \omega_c^2)} + \frac{k_2 \omega_1}{i\omega_2(\omega_1^2 - \omega_c^2)} \right) \quad (الف_۱)$$

مولکول‌ها و ... تنها با برهمکنش با تابش تراهرتز ایجاد می‌شوند نه هیچ تابش دیگری، (۳) کاربردهای امنیتی زیادی برای شناسایی اسلحه و ... دارد)، به دلیل جذب زیاد تابش تراهرتز در آب، در آشکارسازی سلول‌های سرطانی که میزان آب در آنها نسبت به بافت‌های طبیعی بدن تفاوت دارد مورد استفاده قرار می‌گیرد. (۱)

هامستر و همکارانش^۱ برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ مشاهده کردند که متمرکز کردن پالس‌های لیزر تک‌رنگ فوق کوتاه روی نمونه گازی، منجر به یونیزه شدن مولکول‌های گاز و تولید پلاسما می‌شود. از جمله طرح‌های پس از آن، می‌توان به کوک و همکارانش^۲ که از زنش دو پرتو لیزر در پلاسما استفاده کردند نام برد. آنها مشاهده کردند که سیگنال تراهرتز تولید شده در این روش با یک ضریب ۴۰۰ برابری نسبت به حالت استفاده از لیزر تک‌رنگ تقویت می‌شود. ملیک و همکارانش^۳ با استفاده از دو پالس لیزری و اعمال میدان مغناطیسی خارجی افزایش قابل توجهی در فرکانس و قدرت تراهرتز تولید شده مشاهده کردند. خوشبختانه اخیراً با پیشرفت‌های قابل توجه در توسعه منابع پر قدرت تراهرتز زمینه مناسبی برای بررسی برهمکنش پلاسما با پالس‌های تراهرتز فراهم شده است. (۲) مکانیسم طرح حاضر به این صورت است که با برخورد میدان لیزری و پلاسما الکترون‌های پلاسما به نوسان وارد می‌شوند. از طرفی با برخورد دو پرتو لیزر با فرکانس‌های ω_1 و ω_2 یک نیروی پاندرموتیو که دارای مؤلفه عرضی و طولی است، روی الکترون‌های پلاسما اعمال می‌شود. در این صورت اگر شرایط رزونانس ($\omega_0 > 2\omega_p$) فراهم شود، پتانسیل بار فضا در (ω_0, k_0) مثل یک پمپ عمل کرده و باعث به وجود آمدن موج پلاسما و تابش تراهرتز خواهد شد. با اختلاط موج تراهرتز و موج پمپ محرک بار فضا، نیروی محرکه غیر خطی \vec{Q}_{pon} روی الکترون‌های پلاسما اعمال می‌شود و نهایتاً باعث تولید چگالی جریان \vec{J}_T^{NL} خواهد شد. (۳)

محاسبات

¹ Hamster et al .

² Cook et al.

³ Malik et al.

از ترکیب اثر میدان خودسازگار و نیروی پاندرموتیو را بدست آورده، که از این قرار است:

$$V_x^{NL} = \frac{\omega_c F_{py} + i\omega_0 F_{px}}{m(\omega_0^2 - \omega_p^2)} \quad (\text{الف}_5)$$

$$V_y^{NL} = \frac{iF_{py} \left(\frac{\omega_0^2 - \omega_p^2}{\omega_0} \right) - \omega_c F_{px}}{m(\omega_0^2 - \omega_p^2)} \quad (\text{ب}_5)$$

از طرفی با داشتن میدان تراهرتز (رابطه ۵) و استفاده از معادله حرکت، مولفه‌های سرعت پرتو تراهرتز تولیدی را بدست می‌آوریم:

$$V_{Ty} = \frac{e}{m(\omega_T^2 - \omega_c^2)} (i\omega_T A_{Ty} + \omega_c A_{Tx}) \quad (\text{الف}_6)$$

$$V_{Tx} = \frac{e}{m(\omega_T^2 - \omega_c^2)} (i\omega_T A_{Tx} - \omega_c A_{Ty}) \quad (\text{ب}_6)$$

با استفاده از $\Phi_{\omega} = \frac{-m}{2e} (v_x^{NL} \cdot v_{Tx} + v_y^{NL} \cdot v_{Ty})$ ابتدا Φ_{ω} را محاسبه و با در نظر گرفتن تقریب $\omega_c \gg \omega_t$ ، Q_{px} را بدست می‌آوریم.

$$Q_{px} = \frac{-e}{2m(\omega_0^2 - \omega_c^2)} \left(\frac{-i(k_0 + k_{Tx})}{(\omega_0^2 - \omega_c^2)} (\omega_c F_{py} + i\omega_0 F_{px}) (i\omega_T A_{Tx} - \omega_c A_{Ty}) + \frac{i k_0}{(\omega_0^2 - \omega_c^2)} (iF_{py} \left(\frac{\omega_0^2 - \omega_p^2}{\omega_0} \right) - \omega_c F_{px}) (i\omega_T A_{Ty} + \omega_c A_{Tx}) + \frac{k_T A_{Ty}}{\omega_T} (iF_{py} \left(\frac{\omega_0^2 - \omega_p^2}{\omega_0} \right) - \omega_c F_{px}) \right) \quad (7)$$

به همین ترتیب Q_{py} نیز محاسبه می‌شود.

با حل معادله پواسون معادله مشخصه زیر بدست می‌آید.

$$\epsilon \Phi = \frac{-\omega_p^2}{e\vec{k}(\omega^2 - \omega_c^2)} (iQ_{px} + \frac{\omega_c}{\omega} Q_{py}) \quad (8)$$

با توجه به سرعت نوسانی ناشی از حالت بارفضا در فرکانس ω_0 ، آشفته‌گی‌های چگالی تشدید شده به صورت

$$n_{\omega}^{NL} = \frac{n_0 k_x (iQ_{px} + \frac{\omega_c}{\omega} Q_{py})}{m(\omega^2 - \omega_c^2)}, \quad n_{\omega}^L = \epsilon_0 k_x^2 X_e \Phi_{\omega} / e$$

چگالی‌ها باعث به وجود آمدن یک جریان غیر خطی در (ω_T, k_T) و رشد پلاسما می‌شوند.

$$\vec{J}_T^{NL} = -\frac{1}{2} e n_{\omega}^{NL} \vec{v}_{\omega} = J_{Tx}^{NL} \hat{x} + J_{Ty}^{NL} \hat{y} \quad (9)$$

با حل معادله ماکسول، معادله موج تراهرتز زیر بدست می‌آید: (۳)

$$\nabla^2 \vec{E} - \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) = \frac{-i\omega}{c^2 \epsilon_0} \vec{J}_T^{NL} - \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon \vec{E} \quad (10)$$

ϵ ، نشانگر تانسور مجاز پلاسماست که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_c^2} & \frac{i\omega_c \omega_p^2}{\omega(\omega^2 - \omega_c^2)} & 0 \\ -\frac{i\omega_c \omega_p^2}{\omega(\omega^2 - \omega_c^2)} & 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 - \omega_c^2)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$F_{py} = \frac{e^2}{2m} \left(\frac{\frac{-(\omega_1 k_1 - \omega_2 k_2) \omega_c}{(\omega_1^2 - \omega_c^2)(\omega_2^2 - \omega_c^2)} +}{\frac{k_1 \omega_c}{\omega_1(\omega_2^2 - \omega_c^2)} + \frac{k_2 \omega_c}{\omega_2(\omega_1^2 - \omega_c^2)}} \right) \quad (\text{ب}_1)$$

با حل معامله حرکت و خطی‌سازی روابط و استفاده رابطه ω_c و ω_p ، مولفه‌های سرعت الکترون‌های پلاسما ناشی از نیروی پاندرموتیو و پتانسیل خود سازگار Φ_{ω_0} ، به صورت زیر بدست می‌آید.

$$v_y = \frac{\omega_0}{m(\omega_0^2 - \omega_c^2)} \left(\frac{-ie\omega_c k_0 \Phi_{\omega_0}}{\omega_0} - \frac{\omega_c}{\omega_0} F_{px} + iF_{py} \right) \quad (\text{الف}_2)$$

$$v_x = \frac{\omega_0}{m(\omega_0^2 - \omega_c^2)} \left(-ek_0 \Phi_{\omega_0} + iF_{px} + \frac{\omega_c}{\omega_0} F_{py} \right) \quad (\text{ب}_2)$$

با حل معامله پیوستگی و تعریف $-X_e = \frac{\omega_p^2}{(\omega_0^2 - \omega_c^2)}$ به عنوان پذیرفتاری پلاسما، چگالی حاصل از سرعت نوسان در (ω_0, \vec{k}_0) محاسبه می‌شوند. این چگالی از دو بخش خطی و غیرخطی تشکیل شده است، که بخش خطی آن $n^L = \frac{\epsilon X_e k_0^2 \Phi}{e}$ ناشی از بخش پتانسیل بار فضا سرعت است و بخش غیرخطی آن پاندرموتیو سرعت است.

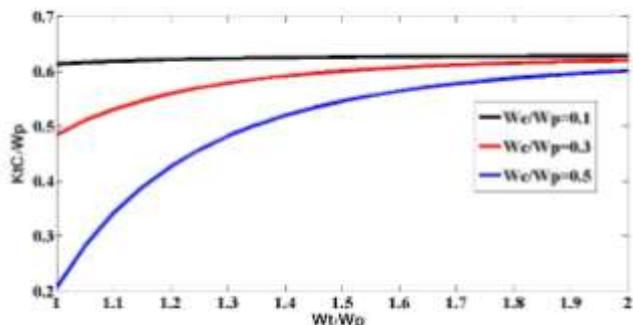
اکنون با حل معادله پواسون $(\nabla^2 \Phi = 4\pi en_{\omega_0})$ ، خطی‌سازی $\nabla^2 \Phi$ و جایگذاری $\epsilon_{\omega_0} = 1 + X_e$ ، پتانسیل بار فضا بدست خواهد آمد.

$$\Phi = \frac{-\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_c^2} \cdot \frac{1}{ek_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega_c^2} \right)} (iF_{px} + \frac{\omega_c}{\omega_0} F_{py}) \quad (3)$$

در رابطه ۳ اگر $(2\omega_p < \omega_0)$ باشد، پتانسیل بار فضا در (ω_0, \vec{k}_0) مثل یک پمپ عمل کرده و موج پلاسما را به وجود می‌آورد و میدان الکتریکی امواج تراهرتز زیر را ساطع خواهد کرد.

$$\vec{E}_T = (A_{Tx}(x)\hat{x} + A_{Ty}(x)\hat{y}) e^{-i(\omega_T t - \vec{k}_T x)} \quad (4)$$

این موج الکترومغناطیسی در (ω_T, \vec{k}_T) باعث سرعت بخشیدن به الکترون‌ها خواهد شد. این موج به طور غیرخطی به موج پمپ محرک بار فضا در (ω_0, \vec{k}_0) می‌پیوندد تا در $(\omega = \omega_0 + \omega_t, \vec{k}_x = \vec{k}_0 + \vec{k}_{Tx})$ نیروی محرکه غیرخطی $\vec{Q}_{pond} = Q_{px} \hat{x} + Q_{py} \hat{y}$ به الکترون‌های پلاسما اعمال کند. برای بدست آوردن Q_{px} و Q_{py} ، با جایگذاری رابطه پتانسیل بار فضا Φ_{ω_0} ، از رابطه ۳ در رابطه ۲ که مربوط به سرعت الکترون‌های پلاسماست، مولفه‌های سرعت غیر خطی الکترون‌های پلاسما ناشی



شکل (۲): تغییر عدد موج نرمال شده $\left(\frac{krc}{\omega_p}\right)$ موج تراهرتز بر حسب تابعی از فرکانس تراهرتز نرمال شده $\left(\frac{\omega_T}{\omega_p}\right)$ برای سه فرکانس سیکلترونی نرمال شده مختلف

نتیجه گیری

همانطور که در شکل (۲) مشخص است، برای $\left(\frac{\omega_T}{\omega_p}\right) > 1/3\text{THZ}$ مقدار عدد موج تراهرتز، یک مقدار واقعی است و با افزایش فرکانس نرمال شده در بازه $(1/3 - 2\text{THZ})$ ، عدد موج نرمال شده نیز افزایش میابد.

مرجع ها

- [1] Singh, R. K., Singh, M., Rajouria, S. K., & Sharma, R. (2017). High power terahertz radiation generation by optical rectification of a shaped pulse laser in axially magnetized plasma. *Physics of Plasmas*, 24(10), 103103.
- [2] Ponomareva, E. A., Ismagilov, A. O., Putilin, S. E., Tsyarkin, A. N., Kozlov, S. A., & Zhang, X.-C. (2021). Varying pre-plasma properties to boost terahertz wave generation in liquids. *Communications Physics*, 4(1), 1-7.
- [3] Chen, F. F. (1984). *Introduction to plasma physics and controlled fusion* (Vol. 1): Springer
- [4] Mann, K. L., Sajal, V., Panwar, A., & Sharma, N. K. (2019). Excitation of terahertz radiation by parametric coupling of a laser beam and its frequency shifted second harmonic in a corrugated magnetized plasma. *Optik*, 179, 401-407.

با جایگذاری $J_{Ty}^{NL}, J_{Tx}^{NL}, E_T$ در رابطه ۱۰ و جداسازی مولفه‌ها و خطی سازی و حذف جملات نمایی از دو طرف تساوی به معاملات زیر برای دامنه میدان تراهرتز خواهیم رسید.

$$A_{Ty} = \frac{-i}{\varepsilon_0 \omega} \left(\frac{J_x - \frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{yx}} J_y}{\left(\varepsilon_{xy} - \frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{yx}} (\varepsilon_{yy} + \frac{c^2 k^2}{\omega^2}) \right)} \right) \quad (۱۲-الف)$$

$$A_{Tx} = \frac{-i}{\omega \varepsilon_0} \left(\frac{J_x - \varepsilon_{xy} J_x + \frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{yx}} \varepsilon_{xy} J_y}{\left(\frac{c^2 k^2}{\omega^2} + \varepsilon_{xx} \right) \left(\frac{\varepsilon_{xy} \varepsilon_{yx} - \varepsilon_{xx} (\varepsilon_{yy} + \frac{c^2 k^2}{\omega^2})}{\varepsilon_{yx}} \right)} \right) \quad (۱۲-ب)$$

برای بدست آوردن معادله مشخصه موج تراهرتز منخرج A_{Ty} را D_T در نظر گرفته لذا خواهیم داشت:

$$D_T A_{Ty} = \frac{-i}{\omega_T \varepsilon_0} \left(J_{Tx}^{NL} - \frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{yx}} J_{Ty}^{NL} \right) \quad (۱۳)$$

بحث

با ضرب رابطه ۱۳ در رابطه ۸، ساده سازی و در نظر گرفتن $q_{Px} = \frac{Q_{Px}}{A_{Ty}}, q_{Py} = \frac{Q_{Py}}{A_{Ty}}$ معادله مشخصه فرآیند پارامتری زیر بدست می آید.

$$\varepsilon_0 \Phi D_T = \frac{-\omega_p^2}{ek(\omega^2 - \omega_c^2)} \left(iq_{Px} + \frac{\omega_c}{\omega} q_{Py} \right) \left[\frac{-i}{\omega_T \varepsilon_0} \left(J_{Tx}^{NL} - \frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{yx}} J_{Ty}^{NL} \right) \right] \quad (۱۴)$$

این معادله دو حالت خواهد داشت، حالت اول در غیاب جفت-شدگی غیرخطی ست، در این صورت $D_T(\omega) = 0, \varepsilon(\omega) = 0$ است. با جایگذاری در رابطه ۱۴ و حل معادله پاشندگی به اعداد موج نرمال شده برای مقادیر مختلف میدان مغناطیسی نرمال شده دست یافته و در شکل ۲ زسم کرده ایم که نشان دهنده رابطه پاشندگی موج پلاسما و ساطع کردن پی در پی موج در $\omega \cong \omega_{Tr}, \omega = \omega_r = \sqrt{\omega_p^2 + \omega_c^2} = \omega_h$ می باشد. حالت دوم حالتی ست که جفت شدگی غیرخطی داریم. $(V_{x0} \neq 0, V_{y0} \neq 0)$ در این حالت فرکانسها اصلاح شده و به صورت $\omega = \omega_{Tr} + i\Gamma_0$ و $\omega_h + i\Gamma_0$ است. نرخ رشد موج تراهرتز است.