



بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی



بررسی عددی تاثیر مشخصات لیزر دمش در رفتار لیزر رامان الماس

مجتبی قاسمی^۱، محمد حسین مهدیه^۱

^۱دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران

چکیده - در این مقاله، لیزر رامان کاواک خارجی، بصورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. معادلات حاکم بر لیزر رامان شامل پرتو استوکس تا مرتبه سوم و پس پراکندگی رامان می‌باشند که با استفاده از روش‌های عددی برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی عملکرد لیزر حل شده‌اند. از بلور الماس به عنوان ماده فعال رامان در لیزر استفاده شده است. تغییرات زمانی پرتو دمش و پرتوهای استوکس محاسبه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که بازده تبدیل پرتوهای استوکس به طول زمانی ضربان لیزر دمش و شدت بیشینه لیزر دمش وابسته است.

کلید واژه- اپتیک غیرخطی، لیزر رامان، بلور الماس، بررسی عددی

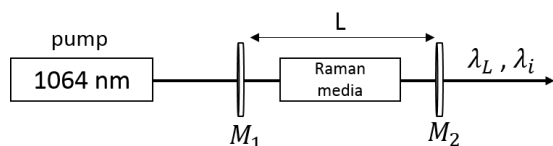
Numerical investigation of diamond Raman laser and the influence of pumping laser characteristics

Mojtaba Ghasemi, M. H. Mahdih

Department of physic, Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran

Abstract- In this paper, we numerically investigated the behavior of an extra-cavity Raman laser. Rate equations (including first, second and third Stokes transitions and also backward Raman scattering terms) were solved numerically to investigate the performance of the laser. In these investigations the effects of pumping laser characteristics were considered. The results show that the conversion efficiency for Stokes transitions strongly depends on the pumping laser intensity and its pulse duration.

Keywords: Raman laser, Diamond , Nonlinear optics, Numerical investigation



شکل ۱: یک چیدمان نمونه از لیزر رامان کاواک خارجی

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر بلور الماس به عنوان ماده فعال لیزر رامان، بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱]. در مقایسه با بلورهای دیگر چون $Ba(NO_3)_2$ ، $SrWO_4$ ، $BaWO_4$ ، بلور الماس دارای ویژگی‌های منحصر به فردی چون ضریب بهره بالا ($13.5 \text{ cm}^2/\text{GW}$)، رسانایی گرمایی بسیار خوب و آستانه آسیب بالا می‌باشد که منجر به تولید لیزر رامان با بازده بیشتر، ابعاد کوچکتر و توان خروجی بالاتر شده است [۲]. معادلات آهنگ حاکم بر لیزر رامان، ابزاری قدرتمند برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد این نوع لیزر می‌باشد. این معادلات برای لیزر رامان الماس به صورت عددی حل و نحوه تغییرات پرتو پمپ دمش، پرتوهای استوکس خروجی و بازده تبدیل استوکس، ارائه و مورد بحث قرار گرفته است.

۲- مبانی نظری لیزر رامان

اساس کار لیزرهای رامان، پراکندگی رامان القایی می‌باشد. پراکندگی رامان یک فرآیند پراکندگی غیرکشسان است، که در آن پرتو با بسامد مشخص با ماده دارای خصوصیات غیرخطی، برهمکنش کرده و به وسیله تحریک حالت درونی ماده و از دست دادن و یا بدست آوردن انرژی، به پرتو با بسامد پایین‌تر (استوکس) و یا بسامد بالاتر (پاد-استوکس)، تبدیل می‌شود. در چیدمان لیزر پراکندگی رامان القایی در ۲ حالت زمانی، حالت مانا (steady state) و حالت گذرا (transient state) مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حالت زمانی مانا که در این مقاله مد نظر قرار گرفته، طول زمانی ضربان لیزر دمش، بسیار بزرگتر از زمان تغییر فاز ماده رامان می‌باشد ($t_p \gg T_2$). در لیزرهای رامان معمولاً از یک لیزر دمش برای تحریک ماده فعال رامان استفاده می‌شود. به علاوه برای فرآیند تشدید، یک آینه مناسب نیز بکار گرفته می‌شود. شکل ۱، یک چیدمان نمونه لیزر رامان با ساختار کاواک خارجی را نشان می‌دهد. در حالت زمانی گذرا و ساختار کاواک خارجی برای پراکندگی رامان القایی، تغییرات زمانی- مکانی شدت پرتو دمش و استوکس اول در داخل کاواک، با استفاده از نظریه شبه کلاسیک توسط معادلات ۱-۳ توصیف می‌گردند [۳].

$$\frac{1}{v} \frac{\partial I_P}{\partial t} + \frac{\partial I_P}{\partial z} = -(g_0 I_P I_1 + g_0^- I_P I_1^-) \frac{\lambda_P}{\lambda_i} \quad (1)$$

$$\frac{1}{v} \frac{\partial I_1^+}{\partial t} + \frac{\partial I_1^+}{\partial z} = g_0 I_P I_1 \quad (2)$$

$$\frac{1}{v} \frac{\partial I_1^-}{\partial t} - \frac{\partial I_1^-}{\partial z} = g_0^- I_P I_1^- \quad (3)$$

در معادلات ۱-۳، فرض شده است که حرکت پرتوها فقط در راستای محور z و به صورت رفت و برگشتی می‌باشد. پرتوهای پیش‌رونده با علامت + و پرتوهای پس‌رونده با علامت - نشان داده شده است. I_P شدت لیزر دمش و I_1 شدت استوکس اول می‌باشند. λ_P و λ_i به ترتیب، طول موج پرتو دمش و طول موج استوکس اول، v سرعت نور درون ماده، g_0 ضریب بهره رامان برای طول موج دمش و g_1 ضریب بهره رامان برای استوکس اول می‌باشند. با در نظر گرفتن $g_i^+ = g_i^-$ و با وارد کردن استوکس مراتب بالاتر، ضریب جذب پراکندگی ماده رامان (α) و فاکتور پراکندگی رامان خودبه‌خودی (κ_{sp})، می‌توان معادلات ۱-۳ را بصورت دقیق‌تر و جامع‌تر نوشت [۴].

$$\frac{n}{c} \frac{\partial I_P^\pm}{\partial t} \pm \frac{\partial I_P^\pm}{\partial z} = -g_0 I_P^\pm (I_1^+ + I_1^-) - \alpha I_P^\pm \quad (4)$$

$$\frac{n}{c} \frac{\partial I_1^\pm}{\partial t} \pm \frac{\partial I_1^\pm}{\partial z} = -g_1 I_1^\pm [(I_P^+ + I_P^-) - (I_2^+ + I_2^-)] - \alpha I_1^\pm + \kappa_{sp} (I_P^+ + I_P^-) \quad (5)$$

$$\frac{n}{c} \frac{\partial I_2^\pm}{\partial t} \pm \frac{\partial I_2^\pm}{\partial z} = -g_2 I_2^\pm [(I_1^+ + I_1^-) - (I_3^+ + I_3^-)] - \alpha I_2^\pm + \kappa_{sp} (I_1^+ + I_1^-) \quad (6)$$

$$\frac{n}{c} \frac{\partial I_3^\pm}{\partial t} \pm \frac{\partial I_3^\pm}{\partial z} = -g_3 I_3^\pm [(I_2^+ + I_2^-) - (I_4^+ + I_4^-)] - \alpha I_3^\pm + \kappa_{sp} (I_2^+ + I_2^-) \quad (7)$$

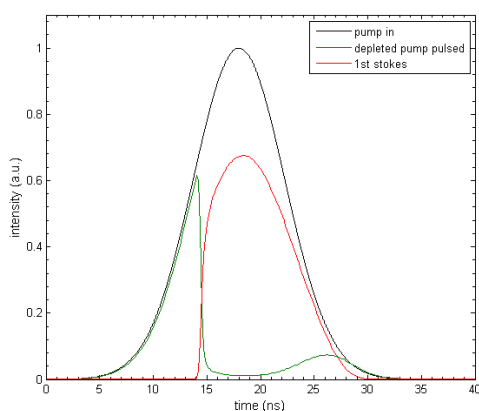
$$g_i = g_0 \frac{\lambda_P}{\lambda_i} \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

جدول ۱: برخی اطلاعات و ضرایب مورد نیاز در محاسبات

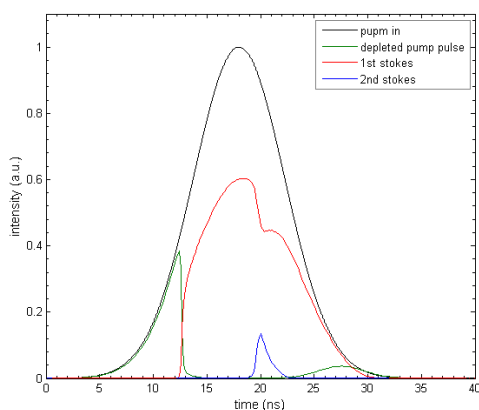
λ_L	طول موج پرتو دمش	1064 nm
λ_1	طول موج استوکس اول	1240 nm
λ_2	طول موج استوکس دوم	1485 nm
t_p	طول زمانی ضربان لیزر دمش	10 ns
ω_R	بسامد تغییر رامان	1332 cm^{-1}
g_0	ضریب بهره در ۱۰۶۴ (nm)	13.5 cm/GW
n	ضریب شکست الماس در ۱۰۶۴ (nm)	2.41

۳- نتایج

شکل ۲، تغییرات زمانی پرتو دمش ورودی، پرتو دمش تضعیف شده خروجی و استوکس اول را در حالتی که بیشینه شدت دمش برابر با $220 MW/cm^2$ باشد، نشان می‌دهد. با گذر زمان، هنگامی که شدت پرتو دمش ورودی برابر با شدت آستانه برای ایجاد استوکس اول شود، در این زمان شدت دمش به سرعت تضعیف و همزمان به استوکس اول تبدیل می‌شود. شدت استوکس اول ایجاد شده در درون کاواک به اندازه‌ای نیست که بتواند باعث ایجاد استوکس دوم در درون کاواک شود.



شکل ۲: تغییرات زمانی پرتو دمش ورودی، استوکس اول، پرتو دمش تضعیف شده. بیشینه شدت دمش برابر با $220 MW/cm^2$ و طول زمانی ضربان دمش ۱۰ ns می‌باشد.



شکل ۳: تغییرات زمانی پرتو دمش ورودی، استوکس اول، پرتو دمش تضعیف شده. بیشینه شدت دمش برابر با $420 MW/cm^2$ و طول زمانی ضربان دمش ۱۰ ns می‌باشد.

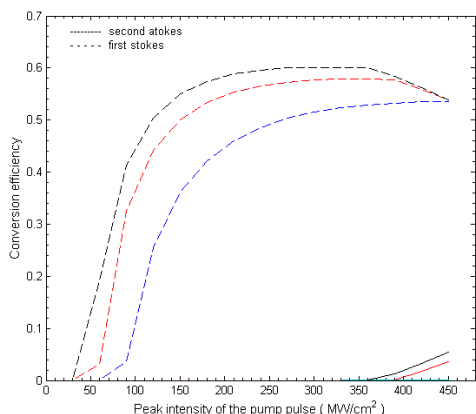
در شکل ۳، تغییرات زمانی پرتو دمش، استوکس اول و استوکس دوم به ازای بیشینه شدت دمش $420 MW/cm^2$ رسم شده است. در ابتدای فرآیند، استوکس اول فقط از

I_i ($i=1,2,3$) شدت پرتو استوکس اول، دوم و سوم، n ضریب شکست ماده رامان، c سرعت نور در خلاء می‌باشد. ضریب بهره رامان برای استوکس اول، دوم و سوم توسط معادله ۸ بدست می‌آید که وابسته به طول موج دمش، طول موج استوکس و ضریب بهره رامان در طول موج دمش (g_0) می‌باشد. شرایط مرزی حاکم بر کاواک نیز بصورت زیر می‌باشد.

$$I_i^+(0,t) = R_{i1} I_i^-(0,t) \quad (i=1,2,3) \quad (9)$$

$$I_i^-(L,t) = R_{i2} I_i^+(L,t) \quad (i=p,1,2,3) \quad (10)$$

که در آن R_{i1} ضریب بازتاب آینه‌ی ورودی M_1 ، R_{i2} ضریب بازتاب آینه‌ی خروجی M_2 برای پرتو دمش و استوکس و L طول کاواک می‌باشد. معادلات ۴-۷، معادلات دیفرانسیل جزئی مرتبه اول می‌باشند که با استفاده از روش کاراکترها و روش رانگ-کوتا حل شده اند [۵]. در محاسبات شکل زمانی پرتو دمش بصورت گوسی در نظر گرفته شده است. برخی ضرایب مربوط به بلور الماس که در محاسبات به کار رفته در جدول ۱ خلاصه شده است. ضرایب بازتاب آینه ورودی و خروجی به شکلی انتخاب شده است که خروجی لیزر، تنها از نوع استوکس اول و دوم باشد. برای این منظور آینه‌ی ورودی برای پرتو دمش کاملاً عبوردهنده و برای استوکس اول و دوم کاملاً بازتابنده ($R \gg 99\%$) در نظر گرفته شده است. ضریب بازتاب آینه خروجی برای دمش و استوکس اول و دوم به ترتیب برابر ۹۹٪، ۵۰٪ و ۱٪ انتخاب شده است. بطور نمونه طول کاواک لیزر برابر با ۳۵ mm و طول بلور الماس هم برابر با ۷ mm در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: تغییرات بازده تبدیل استوکس اول و استوکس دوم برحسب بیشینه شدت دمش ورودی برای طول زمانی ضربان لیزر دمش ۵ ns (خطوط آبی رنگ)، ۱۰ ns (خطوط قرمز)، ۱۵ ns (خطوط مشکی)

شکل ۵ نحوه‌ی وابستگی بازده تبدیل استوکس اول و دوم به بیشینه شدت لیزر دمش و طول زمانی ضربان لیزر دمش را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، با افزایش طول زمانی ضربان دمش، شرایط آستانه برای استوکس اول و دوم در داخل کاواک سریع‌تر مهیا می‌شود. همچنین در یک شدت بیشینه‌ی مشخص، پرتو دمش با طول زمانی ضربان بزرگتر، دارای بازده تبدیل بیشتری نسبت به دو طول زمانی دیگر می‌باشد.

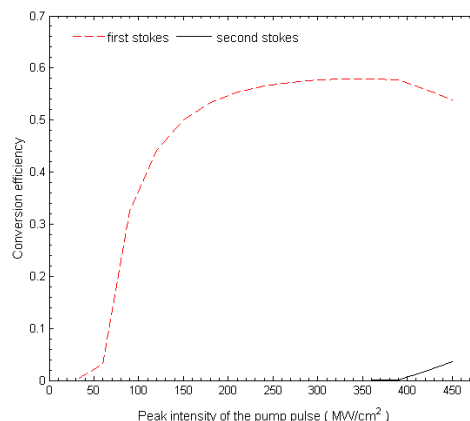
۴- نتیجه‌گیری

تابع زمانی پرتو دمش ورودی، خروجی، استوکس اول و دوم با استفاده از حل معادلات آهنگ برای یک لیزر رامان الماس مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند با بیشتر شدن طول زمانی ضربان لیزر دمش، هم بازده تبدیل استوکس اول و دوم افزایش پیدا کرده و هم شرایط آستانه برای ایجاد استوکس اول و دوم زودتر فراهم می‌شود.

مراجع

- [1]Mildren R., Sabella A., *Highly efficient diamond Raman Lasers*, **Opt.lett.** 34 (2009) 2811-2813
- [2]Feve et al., *High average power diamond Raman laser*, **Opt. Soc. Am.** 19 (2011) 913-922
- [3]Penzkofer A., Laubereau A., Kaiser W, *High intensity raman interactions*, **prog.quant.electr.** 6 (1979) 55-140
- [4]Ding et al., *Numerical optimization of the extracavity Raman laser with barium nitrate crystal*, **Opt.Commun.** 267 (2006) 480-486
- [5]Garcia A., *Numerical Methods for Physics*, Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ, (2000).

طریق پراکندگی رامان خودبه‌خودی شروع به رشد کرده و هیچ‌گونه تغییری در پرتو دمش ورودی ایجاد نخواهد شد. در نتیجه تابع زمانی پرتو دمش جذب شده دقیقاً مطابق با پرتو دمش ورودی خواهد بود. با گذر زمان و افزایش شدت دمش ورودی، شرایط آستانه برای استوکس اول مهیا و در نتیجه پرتو دمش ورودی دچار تضعیف و به استوکس اول تبدیل خواهد شد. انرژی استوکس اول در اثر تشدید در داخل کاواک به سرعت و تا اندازه‌ای که شرایط آستانه برای استوکس دوم مهیا شود، افزایش پیدا می‌کند. در این زمان استوکس اول دچار تضعیف و همزمان تبدیل به استوکس دوم خواهد شد. همچنین به دلیل وجود اثر دو سوپه ما بین پرتو دمش ورودی و استوکس اول، با تضعیف شدن استوکس اول، افزایش جزئی در پرتو دمش ایجاد خواهد شد.



شکل ۴: نمودار تغییرات بازده تبدیل استوکس اول برحسب بیشینه شدت دمش. طول زمانی ضربان دمش ۱۰ ns می‌باشد.

شکل ۴، نحوه‌ی تغییر بازده تبدیل استوکس اول و دوم برحسب بیشینه شدت دمش ورودی هنگامی که طول زمانی ضربان دمش برابر با ۱۰ ns باشد را نشان می‌دهد. بازده تبدیل برای استوکس به صورت، نسبت انرژی استوکس خروجی به انرژی دمش ورودی تعریف می‌شود. با افزایش شدت دمش، بازده تبدیل استوکس اول افزایش پیدا کرده و پس از رسیدن به مقداری مشخص، دیگر تغییری در مقدار آن ایجاد نخواهد شد. با افزایش شدت دمش ورودی و ایجاد شرایط آستانه استوکس دوم در داخل کاواک، به تدریج از بازده تبدیل استوکس اول کاسته و به بازده تبدیل استوکس دوم افزوده خواهد شد.