

## تاثیر بکارگیری MPC در مدار تحریک لیزر پالسی بخار مس

لیلا مقرر<sup>۱</sup>، رسول صدیقی بناب<sup>۲</sup>، شهریار رحمت الله پور<sup>۱</sup>، زهرا مقرر<sup>۳</sup>

۱- پژوهشکده لیزر و اپتیک (مجتمع پژوهشی بناب)

۲- دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳- دانشکده صدا و سیما، تهران

E-mail: et.know@yahoo.com

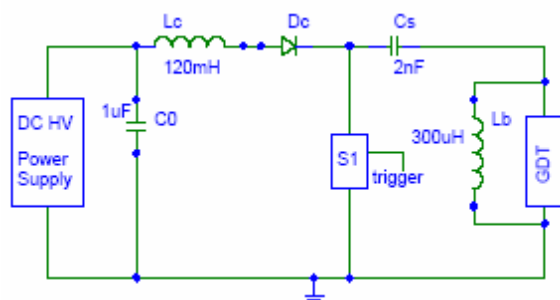
چکیده - این مقاله با شروع از ساده ترین مدار تحریک لیزر بخار مس، به بررسی چگونگی بهبود مدارات تحریک لیزر بخار مس با افزودن MPC می پردازد، و تاثیر MPC را بر عملکرد تایروترون بیان می کند. با توجه به اینکه برای عملکرد بهتر لیزر، نیاز به پالسهای تحریک سریعتر با زمان صعود کمتر از 100 ns، ولتاژ بالا و سرعت تکرار زیاد است، هدف بکارگیری تایروترون را بیان کرده و با توجه به نتایج تجربی، بهینه ترین آرایش را پیشنهاد می دهد.

کلید واژه- تایروترون، MPC فشرده سازی مغناطیسی پالس، گام، CVL لیزر بخار مس

### ۱- مدارات تحریک CVL:

#### ۱-۱- مدارات خازنی با شارژینگ

تشدید (resonant-charging circuits):



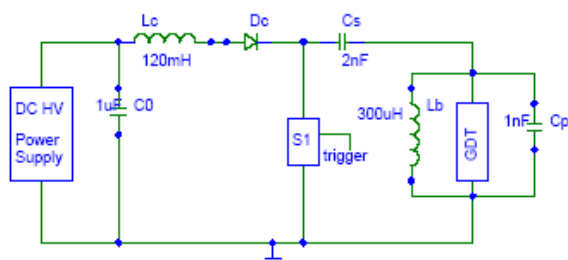
شکل ۱- مدار تحریک پایه لیزر بخار مس [۲].

در این مدار، خازن ( $C_s$ ) به وسیله منبع DC شارژ می شود و دشارژ آن، مستقیماً به وسیله عملکرد سوئیچ صورت می گیرد. با اضافه کردن خازن دیگری ( $C_p$ ) موازی با تیوب لیزر و  $L_b$  به مدار فوق، مدار تحریک استاندارد انتقال شارژ (charge-transfer) برای CVL ها بدست می آید [۲ و ۴].

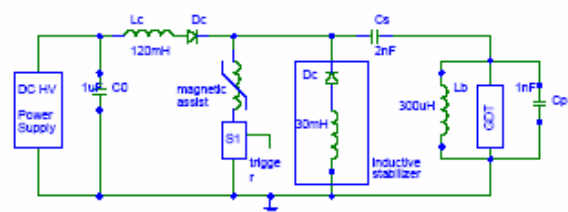
#### مقدمه:

لیزر بخار مس یا CVL (copper vapour laser)، رایجترین لیزر از گروه لیزرهای بخار فلز است که نور حاصل از آن در نواحی سبز (510.6 nm) و زرد (578.2 nm) بوده و جزء لیزرهای پالسی به شمار می رود. در زمینه های بسیاری از قبیل جداسازی ایزوتوپها، برشکاری ظریف فلزات، عکاسی های سریع و کاربردهای پزشکی مورد استفاده قرار می گیرد [۱].

CVL ها سیستمهای گرمایش دشارژی هستند که در آنها انرژی پالس تحریک برای گرم کردن تیوب لیزر به کار می رود. برای عملکرد بهتر لیزر، نیاز به پالسهای تحریک سریعتر با زمان صعود کمتر از 100 ns، ولتاژ بالا و سرعت تکرار زیاد است [۱]. طراحی مدولاتور (مدار تحریک و تغذیه ولتاژ بالا) روی عملکرد و بازده CVL بسیار موثر است. وظیفه مدولاتور تولید پالس های انرژی است، برای تولید بهینه لیزر باید PRF (pulse recurrence frequency) و زمان صعود پالسها ( $t_r$ ) به صورت مناسبی انتخاب شود.



شکل ۲-آ



شکل ۲-ب

شکل ۲: مدارات انتقال شارژ [۴و۲]

## ۲- لزوم استفاده از MPC

### (Magnetic Pulse Compression)

مدارات تحریک پیش گفته، نیاز به سریعترین و کارآمدترین و قابل اعتمادترین سویچها دارند که قابلیت حفظ ولتاژهای ۲۰KV الی ۳۰ KV ، با پیک جریان کموتاسیون تا حدود ۱ KA ، در فرکانس تکرار دهها کیلوهرتز، و با متوسط جریان بیشتر یا مساوی ۱A دارند. همچنین، این سویچها باید در تعامل با امپدانس غیرخطی تیوب لیزر به خوبی عمل کنند. تایروترون (Thyratron) هیدروژن سوییچی است که تقریباً دسترسی به تمام این پارامترها را ممکن می سازد. از سوییچهای حالت جامد ( که چندان تحمل تنش را ندارند و باید به خوبی محافظت شوند و پرهزینه اند) اغلب در آزمایشگاههای پیشرفته CVL استفاده می شود.

برای رسیدن به تعدادی از ویژگیهای مورد نظر در طراحی که اساساً برای حفاظت تایروترون هستند باید مدارات تحریک استاندارد CVL را بهبود بخشید، این ویژگیها عبارتند از کاهش زمان صعود جریان تایروترون، افزایش زمان دیونیزاسیون و کاهش اندازه ولتاژ معکوس.

مؤقتترین ابزار کاهنده تنشهای تایروترون، مغناطیسهایی غیر خطی می باشند که MPC یا فشرده سازی مغناطیسی پالس از آن جمله است.

انتقال انرژی به تیوب لیزر معمولاً به صورت دشارژ جزیی یک خازن بزرگ و یا گاه با شبکه خازنی انجام می گیرد. مزیت چنین روشی این است که ولتاژ روی تیوب لیزر در طول پریود تحریک پالسی، افت چندانی ندارد و نیز امکان کنترل طول پریود پالس اعمالی را می دهد.

## ۱-۱- نحوه عملکرد مدار :

خازن Cs از طریق سلف Lc و دیود DC بطور تشدیدی شارژ می شود. این دیود باعث می شود که بدون نیاز به تغییر اجزاء مدار، شارژ تشدیدی در بازه وسیعی از PRF ها صورت گیرد و نیز مانع از دشارژ شدن Cs قبل از تریگر شدن تایروترون می شود. برای عملکرد صحیح مدار زمان شارژ Cs باید از پریود پالس داخلی مورد نظر، کمتر باشد. سلف بایپس Lb، با ارائه یک مسیر جریان در طول شارژ شدن Cs - که امپدانس این مسیر در مقایسه با تیوب لیزر پایین است - به تیوب لیزر اجازه بازیابی بین پالسهایی دشارژ را می دهد. لازم به ذکر است که در طول سوییچینگ، برای اطمینان از برقراری جریان ماکزیمم از طریق لیزر، امپدانس Lb باید بسیار بیشتر از تیوب لیزر باشد. استفاده از سلف بایپس، ساده ترین راه حل ارائه امپدانس به طریق مذکور برای تیوب لیزر می باشد.

## ۱-۲- مدارات انتقال شارژ (Charge-transfer circuits)

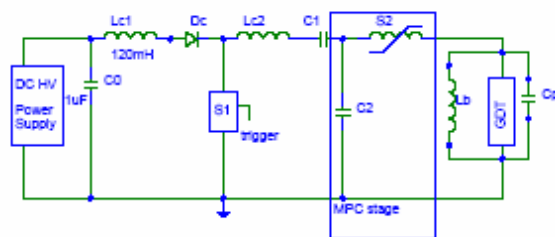
ویژگیهای CVL با اضافه کردن خازن اضافی Cp به مدار تحریک پایه (شکل ۱) به طور چشمگیری بهبود می یابند. مدارات انتقال شارژ حاصل در (شکلهای ۲-آ و ۲-ب) آمده اند. با بسته شدن سوییچ، شارژ روی Cs به Cp انتقال می یابد، یک ولتاژ روی الکترودهای لیزر ظاهر می شود و انرژی پس از رخداد شکست، به تیوب لیزر انتقال می یابد.

با اعمال تغییراتی به مدار انتقال شارژ، در جهت بهبود مدار، برای کاهش تلفات در سوییچ و برای تولید شکل موجهای تحریک مناسبتر، مدارات تحریک دیگری بدست می آیند که از توصیف آنها صرف نظر می کنیم.

### ۳- مدارات فشرده سازی مغناطیسی پالس :

فشرده سازی مغناطیسی پالس (MPC) را می توان برای کاهش دامنه پالس جاری و افزایش زمان صعود پالس در تایروترون (که جریان با پیک بالا را به صورت پالسهای کوتاه مدت برای تیوب لیزر فراهم می کند) به کاربرد . گامهای MPC (MPC stages) به عنوان بافر حفاظتی بین تیوب لیزر و سویچ عمل می کند . در بیشتر مدارات ، استفاده از سه گام MPC نتیجه بهینه را در بر دارد [۱] که هریک از این گامها شکل موج تحریک را بطور فزاینده ای فشرده می کنند تا انرژی مستقیماً به لیزر منتقل شود. معمولاً بین گامهای دوم و سوم، از یک ترانسفورمر step-up (که امکان سویچ شدن تایروترون را در ولتاژ پایین می دهد) استفاده می شود که موجب کاهش انعکاس ولتاژ از بار شده و نیازمندیهای مربوط به عملکرد سویچ را کاهش می دهد [۳] .

#### ۳-۱- تشریح مدار :



شکل ۳: مدار تحریک دارای یک گام MPC [۲ و ۱]

MPC کوپل شده با ترانسفورمر خطی پالس، به صورت تشدید سری، جریان و ولتاژ را کاهش می دهد و شکل موجها را در سویچ کندتر می کند ، و بطور همزمان پالسهای سریع با جریان بالا و ولتاژ بالا را برای تیوب لیزر تامین می کند و بنابراین MPC این امکان را برای سویچ فراهم می کند که در تمام ناحیه عملکرد بهینه اش ، به خوبی عمل کند.

پالسهای تحریک حاصل از این مدار می توانند بازده لیزر و توان خروجی را دو برابر کنند [۲] . در مدار فوق ، خازن  $C_1$  بصورت تشدید از طریق  $L_{c1}$ ،  $S_2$ ،  $D_C$ ،  $L_{c2}$ ،  $S_1$  شارژ می شود ، در طول شارژ شدن خازن  $C_1$ ،

اندوکتانسی بسیار بیشتر از  $L_{c1}$  دارد . اندوکتانس  $L_{c2}$  یک المان مغناطیسی خطی است که موجب کند شدن پالس جریان تایروترون ( $S_1$ ) می شود . سویچ  $S_2$  طوری طراحی شده است که بلافاصله پس از شارژ شدن  $C_2$  سویچ کند . عمل سویچ کردن زمانی اتفاق می افتد که مواد مغناطیسی در  $S_2$  ، در نتیجه جریان نشستی از طریق آن ، اشباع می شوند . میزان فشرده سازی پالس با نسبت بدست می آید که برای راحتی آنرا ضریب فشردگی می نامیم :

$$R_{com} = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{i_2}{i_1} \quad (1)$$

که در آن جریان  $i_1$  در مدت  $\tau_1$  در حلقه ۱ ( $S_1$ - $L_{c2}$ - $C_2$ ) به جریان بزرگتر  $i_2$  در مدت  $\tau_2$  در حلقه ۲ ( $C_1$ - $C_2$ - $C_3$ ) فشرده می شود . می توان نشان داد که ضریب فشردگی حاصل از نسبت اندوکتانس  $L_{c2}$  از حلقه ۱ به اندوکتانس اشباع شده  $L_{sat}$  ( $S_2$ ) از حلقه ۲ بدست می آید .

زمان لازم برای انتقال انرژی از  $C_1$  به  $C_2$  عبارتست از :

$$\tau_1 = \tau_2 = \pi \sqrt{L_{c2} C_{T1}} \quad (2)$$

$$C_{T1} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (3)$$

برای ماکزیمم انتقال انرژی ،  $C_1 = C_2$  است .

می توان برای تعیین زمان لازم برای اشباع  $S_2$  ، معادله زیر را بکار برد (فرمول فارادی):

$$\tau_{sat} = \frac{NA\Delta B}{V_2} \quad (4)$$

سپس برای اینکه شارژ انتقالی به  $C_2$  ماکزیمم گردد باید رابطه زیر برقرار باشد :

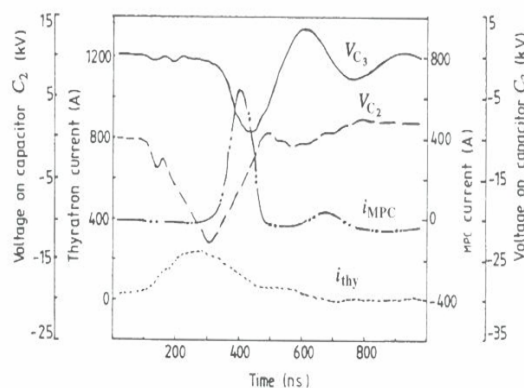
$$\frac{2NA\Delta B}{V_2} = \pi \sqrt{\frac{L_{c2} C_1}{2}} \quad (5)$$

پس از اشباع  $S_2$  ، شارژ روی  $C_2$  در زمان  $\tau_2$  به  $C_3 = C_P$  انتقال می یابد :

$$\tau_2 = \tau_{c2discharge} = \tau_{c2charge} = \pi \sqrt{L_{sat} C_{T2}} \quad (6)$$

$$C_{T2} = \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3} \quad (7)$$

با استفاده از قانون بقا بار ، مربع ضریب فشردگی حاصل از معادله ۱ ، از رابطه زیر حاصل می شود :



شکل ۴: وابستگی ولتاژ تیوب لیزر، ولتاژ روی  $C_2$ ، جریان تایروترون و جریان در حلقه MPC و جریان لیزر اندازه گیری شده در CVL دارای یک گام MPC را نشان می دهد [۲ و ۴].

ضریب بهره تاثیر شدیدی دارد.

### ۳-۳- بهبود مدار:

مقادیر قابل قبول ضریب فشردگی برای هر گام در بازه ۳ تا ۱۰ است که به مواد مغناطیسی انتخابی وابسته است [۳]. تلفات هسته نیز که با حجم نسبت مستقیم دارد شدیداً روی ضریب فشردگی تاثیر می گذارد. برای افزایش بازده MPC، باید تلفات را به ازای واحد حجم هسته های مغناطیسی کاهش داد. از طرف دیگر می توان با افزایش حجم هسته های مغناطیسی قابلیت کنترل توان خروجی مدار را افزایش داد. بنابر این بین کنترل توان خروجی و بازده مدار تعامل به وجود خواهد آمد.

از آنجاییکه زمان اشباع هر گام به ولتاژ وابسته است، در صورت عدم تنظیم مناسب ولتاژ، مقادیر جیتر زمانی در یک سیستم چند گامه MPC ممکن است به جای ns از مرتبه 10s باشد. برای داشتن تنظیم مناسب ولتاژ، و کاهش نوسانات ولتاژ روی تایروترون، می توان از snubber ها و پایدارسازها استفاده کرد [۵].

### نتیجه گیری:

در مدارات تحریک لیزرهای پالسی از قبیل لیزر بخار مس، برای افزایش بازده مدار و توان خروجی و نیز کاهش تنشهای تایروترون و افزایش عمر آن، استفاده از المانهای مغناطیسی غیر خطی از قبیل MPC و MA و غیره بسیار مؤثر است. با توجه به نتایج تجربی حاصل از مدارات

$$R_{com}^2 = \frac{i_2/\tau_2}{i_1/\tau_1} = \frac{di_2/dt}{di_1/dt} \quad (8)$$

که این ضریب با نسبت اندوکتانسها در حلقه های ۱ و ۲ در زمان سوییچینگ متناسب است.

انتخاب ضریب فشردگی کوچک  $R_{com} \cong 3$ ، زمان صعود جریان را در تایروترون تقریباً ده برابر، کاهش می دهد. این نسبت به آسانی با هسته های فریت قابل اشباع که به صورت تجاری در دسترس اند، بدست می آید.

برای ماکزیمم کردن  $\Delta B$  باید هسته های سلفهای قابل اشباع، با شرایط اولیه  $B = -B_r$  و  $H = 0$  تنظیم شوند. می توان با استفاده از یک مدار خارجی ثانویه ولتاژ منفی به مدار اعمال کرده و به تنظیمات مورد نظر دست یافت. با این حال، در اکثر مدارات CVL که دارای تنها یک گام MPC هستند، این تنظیمات به موجب پالس منفی ای که از تیوب لیزر به  $S_2$  باز می گردد (اگرچه این ولتاژ به علت بهبود تطبیق توسط MPC کاهش یافته است) می توانند بطور اتوماتیک صورت گیرند. تنظیمات اتوماتیک هسته های  $S_2$  با مدار شکل ۳ تحقق می یابند.

### ۳-۲- تاثیر بکار گیری MPC در مدار تحریک:

مزیت استفاده از گامهای MPC این است که می توان انرژی انعکاسی به عقب را به صورت مجازی حذف کرد و ضرر آن این است که تنظیمات اتوماتیک هسته ممکن است بهم بخورد. برای حذف جریانهای نوسانی ای که ممکن است با تنظیمات هسته تداخل کنند، می توان از یک snubber استفاده کرد [۵].

شکل ۴ وابستگی ولتاژ تیوب لیزر، ولتاژ روی  $C_2$ ، جریان تایروترون و جریان در حلقه MPC و جریان لیزر اندازه گیری شده در CVL دارای یک گام MPC را نشان می دهد.

گام MPC موجب می شود که توان خروجی افزایش یابد و پایداری لیزر (با حذف latch های تایروترون) بهبود پیدا کند. همچنین موجب کاهش ولتاژ منفی در آند تایروترون و در نتیجه کاهش هر چه بیشتر تنشهای تایروترون و افزایش عمر متوسط تایروترون می گردد [۱ و ۴].

استفاده از تعداد بیشتر گام MPC، پالس تحریک نهایی سریعتر، اما بهره کمتر منبع تغذیه را در پی دارد [۲ و ۳]. تلفات هسته بطور مستقیم با حجم متناسب است و روی

گوناگون ، استفاده از سه گام MPC بهینه ترین نتیجه را در بر دارد .

#### سپاسگذاری :

در نهایت از جناب آقای دکتر محمد حسین رحمتی منتظر به دلیل راهنماییها و کمکهای بی دریغشان و جناب آقای مهندس ریاضی و جناب آقای مهندس توحیدی و همه کسانی که مرا در تهیه این مقاله همراهی کرده اند قدردانی می کنم .

#### منابع و مراجع :

- [1] S V Nakhe et al, 2003 Energy deposition studies in a copper vapour laser under different pulse excitation schemes: Institute of PHYSICS PUBLISHING
- [2] Little C E 1999 *Metal Vapour Lasers* (New York: Wiley)
- [3] E. G. Cook et al, *High average power magnetic modulator for copper lasers*: Lawrence Livermore National Laboratory
- [4] M. Nehmadi, Z. Kramer, Y Ifrah and E. Miron 1989 *Magnetic pulse compression for a copper vapour laser*, J. Phys. D: Appl. Phys.
- [5] D. R. Jones, A. Maitland and C. E. Little 1994 A high-efficiency 200w average power copper Hy Br ID laser : IEEE J. Quantum Electron