

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

دانشگاه یزد

دانشکده فیزیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

فیزیک اتمی و مولکولی

تقویت پالس‌های فوق کوتاه در فیبرهای نوری غیرخطی

استاد راهنما: دکتر محسن حاتمی

استاد مشاور: دکتر محمد کاظم توسلی

پژوهش و نگارش: زهرا طهماسبی

اسفند ۱۳۸۸

تقدیم به پدر و مادرم

که راستی را در انحنای قامتشان آموختم

و

کرمای وجودشان را انگیزه تلاشم یافتم

تقدیر

هرچند سپاس رمزی است که در تار و پود عالم پرهیاهوی امروز اندک اندک محو می شود! و رازی است که شعله های غفلت آدمیان، در طول تاریخ آن را سوخته و خواهد سوزاند! ولی برای لحظاتی می تواند خستگی را از جان کسانی که در این راه همراهان بوده اند برهاند.

تشکر صمیمانه ی خود را از استادم جناب آقای دکتر محسن حاتمی که در انجام این رساله همیشه گره گشای مشکلاتم بوده اند و همواره با به چالش کشان دن ذهنم چگونه اندیشیدن را به من آموختند، ابراز می دارم.

از جناب آقای دکتر محمدکاظم توسلی ، که در امر مشاوره این پایان نامه مساعدت نمودند و آموخته های خود را در اختیارم قرار دادند نهایت سپاسگذاری را دارم.

از جناب آقای دکتر علیرضا کشاورز که زحمت داوری خارجی این پایان نامه را به عهده گرفتند صمیمانه تشکر می کنم.

از جناب آقای دکتر عباس بهجت که زحمت داوری داخلی این پایان نامه را به عهده گرفتند صمیمانه تشکر می کنم.

چکیده

با توجه به حجم زیاد اطلاعات و نیاز به افزایش سرعت در محاسبات و انتقال اطلاعات، تحولاتی در سال‌های گذشته صورت گرفته است که اهم آن انتقال اطلاعات توسط فیبرهای نوری است. با استفاده از فیبرهای نوری، سرعت و دقت انتقال اطلاعات افزایش یافته است.

حوزه‌ی جدید کاربرد فیبرهای نوری استفاده از آنها به عنوان تقویت کننده است که با نشان دادن عناصر زمین‌خاکی در فیبر می‌توان این خصوصیت را به دست آورد. فیبرهای آلاینده به اربوم به علت اینکه در طول موج مخابراتی $1/55\mu\text{m}$ عمل می‌کنند دارای جاذبه‌های زیادی هستند. چنین تقویت کننده‌هایی برای جبران افت در فی‌بهای نوری مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پایان نامه انتشار پالس‌های کوتاه با انرژی بسیار ضعیفی نسبت به انرژی اشباع بهره و همچنین انتشار پالس‌هایی با انرژی نزدیک به انرژی اشباع را در فیبر تقویت کننده با دو حل تقریبی و دقیق شبیه‌سازی و اثر اشباع بهره را بر انتشار این پالس‌ها بررسی کرده‌ایم.

گسترش سریع سیستم‌های مخابراتی نوری با نرخ بالای انتقال اطلاعات و نیاز به پردازشگرها و حسابگرهای اپتیکی با سرعت فوق سریع، طراحی سویچ‌ها و عناصر حافظه اپتیکی را گریزناپذیر می‌کند. مزدوج موازی غیرخطی^۱ یکی از عناصر مهم اپتیکی است که به عنوان یک سویچ تمام نوری از زمان اختراع آن توسط ینسن تاکنون تحقیقات زیادی بر روی آن صورت گرفته و می‌گیرد. موادی مانند سیلیکا در محدوده‌ای از طول موج مخابراتی دارای پاشندگی منفی است و قابلیت انتشار سالیتون روشن را دارد. ما نیز به بررسی امکان کلیدزنی سالیتونی روشن در این مواد پرداخته و با شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان داده ایم که تحت تاثیر اشباع بهره شکل پالس سالیتونی در سویچ‌های مزدوج موازی غیر خطی دچار اعوجاج نمی‌شود. نمودار انرژی خروجی نشان می‌دهد که می‌توان به یک سویچ راهیاب دست یافت.

۱. Nonlinear Directional Coupler

شیشه‌های چالکوجناید با ضریب شکست غیرخطی زیاد و پاشندگی مثبت که اخیراً مورد توجه قرار گرفته‌اند کاندیدای خوبی برای ساخت ابزارهای نوری غیرخطی و ب ه خصوص سویچ‌ها هستند. با توجه به پاشندگی مثبت این نوع شیشه و انتشار سالیتون تاریک در ناحیه ی پاشندگی مثبت، انتشار سالیتون تاریک را در تقویت‌کننده‌ی چلکوجناید آلاینده به اربوم شبیه‌سازی و یک سویچ تمام نوری بر این اساس طراحی کرده‌ایم.

فهرست مطالب

فصل اول: روش‌های تولید پالس فوقِ کوتاه.....	۱
مقدمه.....	۲
۱-۱ نظریه‌ی کلیدزنی Q.....	۲
۱-۱-۱ کلیدزنی Q آینه‌های چرخان.....	۴
۱-۱-۲ کلیدزنی Q سلول الکترواپتیک.....	۵
۱-۱-۳ کلیدزنی Q اکوستواپتیک.....	۸
۲-۱ قفل‌شدگی مدها.....	۹
۱-۲-۱ نظریه‌ی قفل‌شدگی مدها.....	۹
۲-۲-۱ قفل‌شدگی فعال.....	۱۲
۱-۲-۲-۱ مدولاسیون AM.....	۱۲
۲-۲-۲-۱ مدولاسیون FM.....	۱۴
۳-۲-۱ قفل‌شدگی غیرفعال.....	۱۶
۱-۳-۲-۱ قفل‌شدگی عدسی کر (KLM).....	۱۶
۲-۳-۲-۱ جاذب اشباع پذیر.....	۱۷
فصل دوم: اپتیک غیرخطی.....	۱۹
مقدمه.....	۲۰

۲۰.....	۱-۲ قطبش غیرخطی.....
۲۲.....	۲-۲ پذیرفتاری خطی و غیرخطی.....
۲۳.....	۱-۲-۲ اندازه‌ی پذیرفتاری غیرخطی مواد.....
۲۴.....	۳-۲ اثر غیرخطی کر و جذب دوفوتونی.....
۲۷.....	۴-۲ اثر خودفازی.....
۲۸.....	۵-۲ اثر پاشندگی سرعت گروه.....
۳۰.....	فصل سوم: فیبرهای نوری و سالیتون‌های اپتیکی.....
۳۱.....	مقدمه.....
۳۲.....	۱-۳ انتشار مدها در فیبر نوری.....
۳۶.....	۲-۳ فیبرهای تک مد.....
۳۷.....	۳-۳ انتشار پالس در فیبرهای غیرخطی.....
۴۲.....	۱-۳-۳ اثر پاشندگی برانتشار پالس در فیبر.....
۴۴.....	۲-۳-۳ اثر غیرخطی بر انتشار پالس در فیبر.....
۴۶.....	۳-۳-۳ بررسی همزمان اثر پاشندگی و اثر غیرخطی کر بر انتشار پالس در فیبر.....
۴۸.....	۴-۳ تشکیل سالیتون‌های زمانی.....
۴۹.....	۱-۴-۳ سالیتون‌های روشن.....
۵۱.....	۲-۴-۳ سالیتون‌های تاریک.....
۵۳.....	فصل چهارم: بررسی اثر اشباع بهره بر تقویت‌کننده‌های فیبر آلایده به اربوم.....

مقدمه.....	۵۴
۴-۱ معادلات انتشار پالس در فیبرهای آلاییده.....	۵۵
۴-۱-۱ تقویت پالس بدون اشباع بهره.....	۵۸
۴-۱-۲ تقویت پالس با اشباع بهره.....	۶۱
۴-۲ بررسی اثر اشباع بهره بر تقویت سالیتون بدون استفاده از بسط.....	63
۴-۳ بررسی اثر پهنای بهره بر فرآیند تقویت پالس.....	۶۶
۴-۴ مقایسه‌ی بین نتایج حل دقیق و استفاده از بسط تیلور.....	۶۸
فصل پنجم: کلیدزنی سالیتونی در تقویت‌کننده‌های آلاییده به اربیموم با در نظر گرفتن اثر	
اشباع بهره.....	۷۰
مقدمه.....	۷۱
۵-۱ معادلات پالسی حاکم بر مزدوج موازی غیرخطی.....	۷۱
۵-۲ بررسی سالیتون روشن در سویچ‌های غیرخطی مزدوج موازی با اشباع بهره.....	۷۵
۵-۳ کلیدزنی سالیتون تاریک با در نظر گرفتن اشباع بهره.....	۷۹
نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....	۸۰
پیوست.....	۸۱
کتاب‌نامه.....	۸۳
چکیده انگلیسی.....	۱۰۱

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: نمایش تشکیل پالس کوتاه به روش کلیدزنی Q با نشان دادن تناسب بین تغییرات در جمعیت معکوس، اتلاف در کاواک و تغییر شار فوتون. ۴
- شکل ۱-۲: در شکل بالا سلول الکترواپتیک بین پلاروید صفر درجه و آینه ی عقبی کاواک قرار گرفته است که تاخیر $\lambda/4$ تولید می کند. در آرایش پایین، سلول الکترواپتیک بین دو پلاروید با محورهای قطبش عمود بر هم قرار گرفته است و تاخیر $\lambda/2$ تولید می کند. ۶
- شکل ۱-۳: طیف فرکانسی با تاثیر مدولاسیون دامنه و تشکیل باندهای کناری در دو طرف فرکانس حامل. ۱۳
- شکل ۱-۴: طیف فرکانسی با تاثیر مدولاسیون فرکانس و تشکیل باندهای کناری در دو طرف فرکانس حامل. ۱۶
- شکل ۱-۳: مقطع عرضی فیبر پله‌ای و چگونگی تغییر ضریب شکست در این فیبرها. ۳۲
- شکل ۲-۳: (a) شکل و (b) طیف پالس گاوسی که در ناحیه ی پاشندگی عادی فیبر ($\beta > 0$) با پارامتر $N=1$ منتشر می شود. ۴۷
- شکل ۳-۳: (a) شکل و (b) طیف پالس گاوسی که در ناحیه ی پاشندگی عادی فیبر ($\beta < 0$) با پارامتر $N=1$ منتشر می شود. ۴۸
- شکل ۳-۴: شکل پالس سالیتون مرتبه ی اول که با انتشار در فیبر تغییر شکل نمی دهد. ۵۱
- شکل ۳-۵: انتشار سالیتون بنیادی تاریک در طول فیبر که شکل پالس در حین انتشار تغییر نمی کند. ۵۲
- شکل ۱-۴: انتشار پالس بدون در نظر گرفتن اشباع بهره در ناحیه ی پاشندگی غیر عادی با $T_0=1ps$, $\mu=2.3$, $d=.092$ که با انتشار در فیبر تقویت کننده ی آلاییده به اربوم پالس با تقارن زمانی به پالس های کوچکتر شکافته می شود. ۶۰

شکل ۴-۲: بررسی اثر تقویت‌کنندگی خطی و پاشندگی بهره بر سالیتون تاریک در تقویت‌کننده-
ی فیبر چلکوجناید $\text{Ga}_\delta\text{Ge}_\gamma\text{.Sb}_{1-\delta-\gamma}\text{.S}_{\delta+\gamma}$ آلاینده به اربیموم در (a) $\xi=0.5$, (b) $\xi=1$, (c) $\xi=1.5$.
۶۱.....

شکل ۴-۳: (a) انتشار پالس و (b) نمودار انرژی با اشباع بهره در ناحیه‌ی پاشندگی غیر عادی با
 $T_0=1\text{ps}$, $\mu=2.3$, $d=0.92$
۶۳.....

شکل ۴-۴: بررسی اثر تقویت‌کنندگی خطی و پاشندگی بهره در حضور اشباع بهره بر سالیتون
تاریک در تقویت‌کننده‌ی فیبر چلکوجناید $\text{Ga}_\delta\text{Ge}_\gamma\text{.Sb}_{1-\delta-\gamma}\text{.S}_{\delta+\gamma}$ آلاینده به اربیموم در (a) $\xi=1.5$, (b) $\xi=1$,
(c) $\xi=0.5$
۶۳.....

شکل ۴-۵: شبیه‌سازی انتشار سالیتون روشن در تقویت‌کننده‌های آلاینده به اربیموم تحت تاثیر
اثر اشباع بهره و بدون در نظرگرفتن بسط تیلور $\chi_a(\omega)$ برای $\Delta\omega_a=12\text{ps}^{-1}$ ، (a) شکل پالس تقویت
شده که در $\xi=0.85$ به بیشینه شدت می‌رسد، (b) طیف پالس.....
۶۶.....

شکل ۴-۶: شبیه‌سازی انتشار سالیتون روشن در حوزه‌ی زمان در تقویت‌کننده‌های آلاینده به
اربیموم تحت تاثیر اثر اشباع بهره و بدون در نظرگرفتن بسط تیلور $\chi_a(\omega)$ برای $\Delta\omega_a=5\text{ps}^{-1}$ که
پالس تقویت شده در $\xi=0.9$ به بیشینه شدت می‌رسد.....
۶۷.....

شکل ۴-۷: شبیه‌سازی انتشار سالیتون روشن در حوزه‌ی زمان در تقویت‌کننده‌های آلاینده به
اربیموم تحت تاثیر اثر اشباع بهره و بدون در نظرگرفتن بسط تیلور $\chi_a(\omega)$ برای $\Delta\omega_a=3\text{ps}^{-1}$ که
پالس تقویت شده در $\xi=0.95$ به بیشینه شدت می‌رسد.....
۶۸.....

شکل ۴-۸: شبیه‌سازی انتشار سالیتون روشن در تقویت‌کننده‌های آلاینده به اربیموم تحت تاثیر
اثر اشباع بهره و با در نظرگرفتن بسط تیلور $\chi_a(\omega)$ برای $\xi=1$ و پهنای ۴۰۰ فمتوثانیه، (a) شکل
پالس، (b) طیف پالس.....
۶۸.....

شکل ۵-۱: طرحی کلی از یک سویچ مزدوج موازی غیرخطی که از دو موجبر که به موازات هم
تشکیل شده است. امواج از سمت چپ وارد شده، امواج با دامنه کم از موجبر پایین خارج شده و
دامنه‌های بزرگ از موجبر بالا خارج می‌شوند.....
۷۱.....

شکل ۵-۲: (a) شبیه‌سازی پالس خروجی از دو فیبر که پالس سمت چپ مربوط به فیبر بالایی و
پالس سمت راست مربوط به فیبر پایینی است، (b) انرژی، (c) نسبت انرژی‌های خروجی به
ورودی بر حسب توان ورودی با ضریب جفت شدگی $\chi=\pi/2$ و طول $\xi=1$
۷۷.....

شکل ۵-۳: (a) انرژی‌های خروجی در موجبر بالا، موجبر پایین و انرژی کل در $\xi=0/8$ ، (b)

انرژی‌های خروجی در موجبر بالا، موجبر پایین و انرژی کل در $\xi=0/7$ ، (c) انرژی‌های خروجی در
موجبر بالا، موجبر پایین و انرژی کل در $\xi=0/77$ بر حسب توان ورودی با $\chi=\pi/2$ ۷۸

شکل ۴-۵: (a) شبیه‌سازی پالس خروجی از دو فیبر که پالس سمت چپ مربوط به فیبر بالایی و
پالس سمت راست مربوط به فیبر پایینی است، (b) انرژی، (c) نسبت انرژی‌های خروجی به ورودی
بر حسب توان ورودی با ضریب جفت شدگی $\chi=\pi/2$ و طول..... ۸۰

شکل ۵-۵: (a) انرژی‌های خروجی در موجبر بالا، موجبر پایین و انرژی کل در $\xi=0/8$ ، (b)
انرژی‌های خروجی در موجبر بالا، موجبر پایین و انرژی کل در $\xi=0/7$ ، (c) انرژی‌های خروجی در
موجبر بالا، موجبر پایین و انرژی کل در $\xi=0/77$ بر حسب توان ورودی با $\chi=\pi/2$ برای سالیتون
تاریک..... ۸۱

فهرست جدول‌ها

جدول (۵-۱): نتایج بررسی اثر کاهش طول برعمل کلیدزنی (کلیدزنی) سالیتون روشن در سویچ

سیلیکون آلیایده به اربوم.....۷۹

جدول (۵-۲) - نتایج بررسی اثر کاهش طول برعمل کلیدزنی (کلیدزنی) سالیتون تاریک در

سویچ چلکوجناید $Ga_8Ge_7.Sb_1.S_{68}$ آلیایده به اربوم.....۸۲

فصل اول

روش‌های تولید پالس فوق‌کوتاه

مقدمه

پالس‌های فوق کوتاه در حوزه‌ی مخابرات دیجیتالی، عیب‌یابی فرآیندهای فوق‌سریع و برش مواد بدون ایجاد گرمای زیاد، به صورت وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تاکنون تلاش‌های زیادی در جهت تولید پالس‌های کوتاه انجام شده است. روش کلیدزنی Q پالس‌های کوتاهی با شدت زیاد تولید می‌کند ولی کوتاهی این پالس‌ها به چند نانو ثانیه محدود می‌شود. روش دیگری که منجر به تولید پالس‌های کوتاه در حد چند فمتو ثانیه^۱ می‌شود روش قفل‌شدگی مدها است. برای پالس‌های مرئی با این پهنای کم، میدان اپتیکی فقط چند دوره نوسان می‌کند [۲].

۱-۱ نظریه‌ی کلیدزنی Q

برخی از ویژگی‌های مهم پالس کوتاه در روش کلیدزنی Q مانند انرژی پالس، پهنای پالس، افت و خیز زمانی و زمان تشکیل پالس را می‌توان با استفاده از معادلات آهنگ زمانی به دست آورد. در تمام موارد مذکور پهنای پالس به قدری کوچک است که می‌توان از گسیل خودبخودی و پمپ اپتیکی در معادلات آهنگ صرف‌نظر کرد [۲ و ۳]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\gamma n \phi c \quad (1-1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \phi \left(c \sigma n \frac{e}{L} - \frac{\varepsilon}{t_r} \right) \quad (2-1)$$

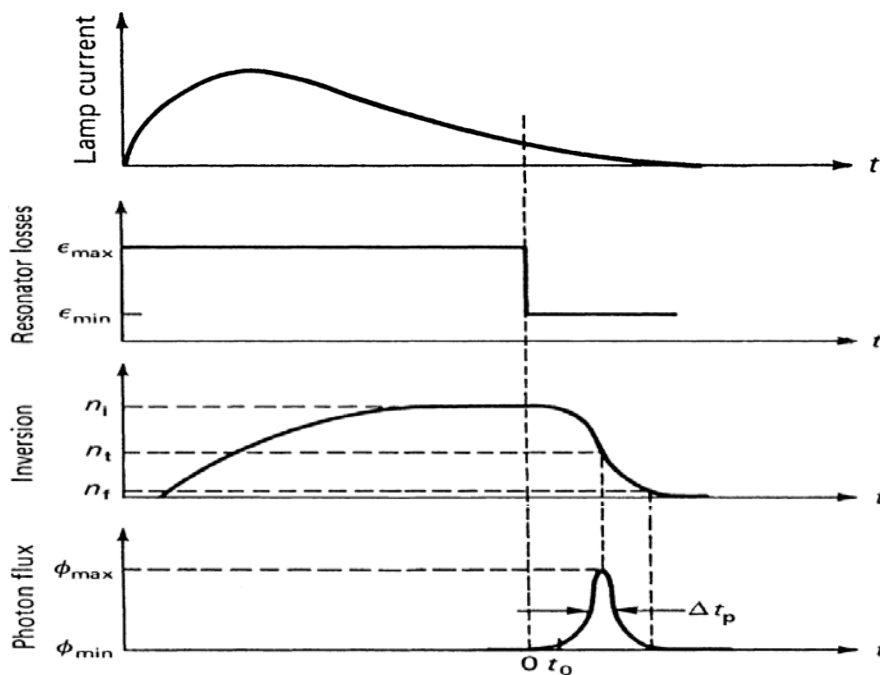
که $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ آهنگ چگالی شار فوتون و $\frac{\partial n}{\partial t}$ آهنگ چگالی جمعیت معکوس می‌باشد و ε ، t_r ، L ، l و σ به ترتیب طول محیط تقویت‌کننده، طول کاواک، زمان رفت و برگشت و اتلاف درون کاواک می‌باشند. اتلاف کاواک به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\varepsilon = -\ln |R| + \delta + \xi(t) \quad (3-1)$$

^۱ ۱۰^{-۱۵} s

که در آن جمله‌ی اول اتلاف خروجی ناشی از انعکاس آینه، جمله‌ی دوم شامل همه‌ی اتلاف‌های جزئی مانند پراکندگی، پراش و جذب و $\xi(t)$ اتلاف کاوک ناشی از کلیدزنی Q است.

در حالت ایده‌آل که گذار از Q ی کم به Q ی زیاد به صورت لحظه‌ای صورت می‌گیرد حل معادلات آهنگ به سادگی انجام شده و فرض می‌شود که در $t=0$ جمعیت معکوس اولیه n_i و چگالی فوتون به میزان محدودی وجود دارد و اتلاف کاوک در بیشینه مقدار خود به صورت $\varepsilon_{\max} = -\ln R + \delta + \xi_{\max}(t)$ در می‌آید. اتلاف را می‌توان یکباره به مقدار $\varepsilon_{\min} = -\ln R + \delta + \xi_{\min}(t)$ کاهش داد، به این ترتیب چگالی فوتون از ϕ_i به ϕ_{\max} که چند برابر ϕ_i است افزایش و سپس به صفر کاهش می‌یابد. جمعیت معکوس نسبت به زمان تابع نزولی یکنواختی است که از مقدار اولیه n_i به مقدار n_t جمعیت معکوس حالت آستانه‌ی عمل لیزر و سپس به کمینه‌ی مقدار خود n_f می‌رسد. در n_t شار فوتون بیشینه است و آهنگ تغییر جمعیت معکوس dn/dt همچنان بزرگ و منفی است. به همین خاطر جمعیت معکوس همچنان کاهش می‌یابد و به مقدار n_f می‌رسد. اگر n_i خیلی بزرگتر از n_t نباشد یعنی وقتی که بهره‌ی اولیه نزدیک به بهره‌ی آستانه باشد، جمعیت معکوس نهایی n_f به همان اندازه‌ی n_i در زیر n_t قرار می‌گیرد و پالس خروجی متقارنی را می‌سازد.



شکل (۱-۱) - نمایش تشکیل پالس کوتاه به روش کلیدزنی Q با نشان دادن تناسب بین تغییی یوات در جمعیت معکوس، اتلاف در کاواک و تغییر شار فوتون .

در ادامه چند روش برای تولید پالس‌های کوتاه به شیوه‌ی کلیدزنی Q را توضیح می‌دهیم.

۱-۱-۱ کلیدزنی Q آینه‌های چرخان

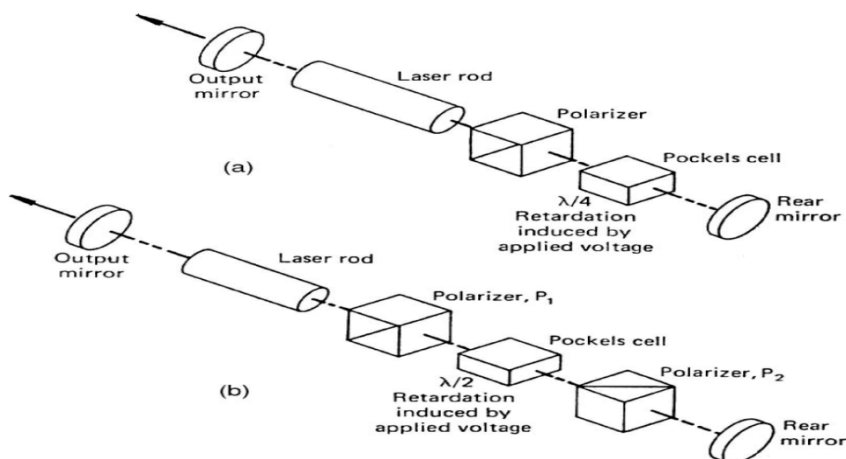
این روش شامل نصب منشور روی یک میله‌ی چرخان است. توسط موتوری با سرعت زیادی حول میله می‌چرخد. مثلاً برای لیزر Ruby این سرعت مقداری برابر با ۳,۳۳۳ دور بر دقیقه است [۲] که هر دور، زمان بسیار کوتاهی را به خود اختصاص می‌دهد. به این ترتیب در هر دور چرخش در لحظه‌ی کوتاهی منشور با کاواک لیزر موازی می‌شود و در همین زمان شرط آینه‌های موازی در کاواک برای گسیل لیزر فراهم می‌شود. در نتیجه پالسی با پهنایی از مرتبه‌ی نانوثانیه گسیل می‌شود. در این روش سرعت چرخش و به دنبال آن ارتعاشات بسیار زیاد است. به این ترتیب ابعاد منشور چرخان باید بسیار کوچک در نظر گرفته شود. اگر عنصر چرخنده‌ی کاواک آینه‌ی تخت انتخاب شود محور چرخش باید با دقتی از مرتبه‌ی میلی‌رادیان عمل موازی‌سازی آینه‌ها را انجام دهد که بسیار مشکل است و گزینش منشور به عنوان عنصر چرخان کاواک به جای آینه‌ی عقبی مشکل را حل می‌کند. ابزار مورد استفاده در روش آینه‌های چرخان ساده و ارزان هستند. همچنین نسبت به قطبش و در نتیجه اثرات دوشکستی حساس نیستند به همی ن خاطر در مقایسه با کلیدزنی Qهای الکترواپتیک که در ادامه توضیح داده می‌شود تحت شرایط مشخصی انرژی بیشتری می‌توانند گسیل کنند. البته ابزار فوق بخاطر طول عمر کوتاه یا طاقان‌ها استهلاک زیادی دارند و به طور دائم باید تعمیر شوند. به همین خاطر در لیزرهای با دمش پیوسته، کلیدزنی Q منشور چرخان در ناحیه‌ی نور مرئی و مادون قرمز با کلیدزنی Q آکوستوآپتیک و در لیزرهای پالسی با کلیدزنی Q غیرفعال یا الکترواپتیکی جایگزین می‌شوند. ولی با این وجود این روش هنوز برای لیزرهای مادون قرمز میانی^۱ مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان مثال لیزرهای اربیم $3\mu\text{m}$ با منشورهای چرخان کلیدزنی Q می‌شوند.

۱. Mid-infrared

۱-۱-۲ کلیدزنی Q سلول الکترواپتیک

با استفاده از اثر الکترواپتیکی در بلورها و مایعات می توان دیافراگم های اپتیکی خیلی سریعی را طراحی کرد که به صورت الکترونیکی کنترل می شوند. جزء کلیدی در این دیافراگم ها عنصر الکترواپتیک است که تحت تأثیر میدان خارجی دوشکستی می شود. خاصیت دوشکستی با ضریب شکست های متفاوت در دو راستای عمود بر هم قابل توصیف است که یکی از این راستاهای محور کند و دیگری محور تند نامیده می شود. باریکه ی نور در ابتدای ورود به محیط الکترواپتیک با قطبش خطی ۴۵ درجه نسبت به این محورها، بهطور عمود بر صفحه ی آن ها فرود می آید. به این ترتیب باریکه در محیط الکترواپتیک به دو مؤلفه ی عمود بر هم شکافته می شود که این دو مؤلفه با سرعت های متفاوت حرکت می کنند. بنابراین اثر الکترواپتیک بین دو مؤلفه اختلاف فازی ایجاد می کند که متناسب با ولتاژ اعمال شده به سلول الکترواپتیک، ترکیب دو مؤلفه در خروجی به صورت قطبیده ی دایره ای، بیضوی و یا خطی درمی آید.

در روش کلیدزنی Q سلول الکترواپتیک فقط دو ولتاژ خاص مطلوب است ، به گونه ای که یکی تأخیری به اندازه ی یک چهارم طول موج و دیگری تأخیری به اندازه ی نصف طول موج بین مؤلفه های میدان تولید می کنند. در حالت اول نور خروجی قطبیده ی خطی است ولی صفحه ی قطبش به اندازه ی ۹۰ درجه نسبت به صفحه ی قطبش اولیه می چرخد. دو آرایش معمول از این دو ولتاژ برای کلیدزنی Q کردن در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۱-۲) - در شکل بالا سلول الکترواپتیک بین پلاروید صفر درجه و آینه‌ی عقبی کاواک قرار گرفته است که تاخیر $\lambda/4$ تولید می‌کند. در آرایش پایین، سلول الکترواپتیک بین دو پلاروید با محورهای قطبش عمود بر هم قرار گرفته است و تاخیر $\lambda/2$ تولید می‌کند.

در شکل اول سلول الکترواپتیک بین پلاروید صفر درجه و آینه‌ی عقبی کاواک قرار گرفته است. با اعمال ولتاژ با تأخیر $\lambda/4$ ، نور قطبیده‌ی خطی بعد از عبور از سلول به صورت قطبیده‌ی دایره‌ای خارج می‌شود. از آینه‌ی عقبی انعکاس یافته و دوباره از سلول عبور می‌کند در این عبور باز هم تأخیری به اندازه‌ی $\lambda/4$ را تحمل می‌کند و نور قطبیده‌ی خطی از سلول خارج می‌شود ولی صفحه‌ی قطبش به اندازه‌ی ۹۰ درجه چرخیده است به این خاطر نور قطبیده‌ی خطی خروجی از سلول پلاروید صفر درجه عبور نمی‌کند و به خارج از کاواک رانده می‌شود و پلاروید مانع از تغذیه‌ی اپتیکی می‌شود. در نزدیکی انتهای پالس پمپ، ولتاژ اعمال شده به سلول را برای لحظه‌ی کوتاهی خاموش می‌کنیم. به این ترتیب آرایش پلاروید-سلول به نور قطبیده‌ی خطی اجازه‌ی عبوری بدون اتلاف را می‌دهد. نوسان در کاواک رشد کرده و پالس کوتاهی از کاواک خارج می‌شود. در آرایش دوم، سلول الکترواپتیک بین دو پلاروید با محورهای قطبش عمود بر هم قرار گرفته است که وجود پلاروید اول، بین میله‌ی لیزر و سلول در صورتی که نور خروجی از محیط فعال، قطبیده باشد ضروری نیست. همانطور که کاواک لیزر پمپ می‌شود هیچ ولتاژی بر سلول الکترواپتیک اعمال نمی‌شود و در این صورت به خاطر وجود دو پلاروید عمود بر هم عامل کیفیت کاواک کمینه است. در انتهای پالس پمپ، ولتاژی متناظر با تأخیر $\lambda/2$ به سلول الکترواپتیک اعمال می‌شود که باریکه‌ی ورودی را به اندازه‌ی ۹۰ درجه می‌چرخاند. به این ترتیب پالس خروجی از سلول، از پلاروید دوم عبور می‌کند و بعد از انعکاس از سطح آینه، از پلاروید و سلول با چرخش دوباره‌ی ۹۰ درجه عبور می‌کند. در این صورت توانایی عبور از پلاروید صفر درجه را دارد. در واقع در این آرایش نور خارج شده از پلاروید صفر درجه در یک رفت و برگشت به اندازه‌ی ۱۸۰ درجه می‌چرخد.

دو نوع سلول الکترواپتیک برای کلیدزنی Q کردن لیزرها به کار می‌رود: الف) سلول پاکلز که شامل بلورهای است که تقارن مرکزی ندارند و ب) سلول کِر که شامل مایعات خاصی هستند که به ولتاژی ۵ تا ۱۰ بار بزرگتر از ولتاژ سلول‌های پاکلز نیاز دارند. سلول پاکلز از بلورهای ساخته می-

شود که با اعمال میدان خارجی روی آنها اثر الکترواپتیک حاصل می شود. در این بلورها اعمال میدان خارجی، ضریب شکست محیط را تغییر می دهد.

تغییر در ضریب شکست توسط میدان اعمالی بوسیله ی ماتریسی شامل ضرایب الکترواپتیک نشان داده می شود. تعداد ضرایب غیر صفر با ویژگی های ساختاری بلورها کاهش می یابد. عمده ترین مواد الکترواپتیکی مورد استفاده فقط تعداد کمی ضریب غیر صفر دارند. جای ضرایب در آرایش ماتریس به چرخش بلور، راستای میدان اعمالی و قطبش در راستای محور اپتیکی بستگی دارد. بزرگی هر ضریب، شدت اثر الکترواپتیک را برای هر هندسه ای تعیین می کند.

۱-۱-۳ کلیدزنی Q اکوستوایتیک

در این روش، یک مبدل پیزوالکتریک به سلول اکوستوایتیک که شامل بلور کوارتز است، وصل می شود. موج فراصوتی از مبدل به سلول اکوستوایتیک وارد شده و سلول با سیگنال Rf فعالیت خود را شروع می کند. با اعمال این سیگنال به سلول یک موج صوتی تشکیل و چگالی محیط را به صورت سینوسی تغییر می دهد. با در نظر گرفتن حرکت موج صوتی در راستای y ، ضریب شکست محیط به صورت زیر تغییر می کند

$$n(y,t) = n_0 + \Delta n_0 \sin(\omega_s t - k_s y) \quad (۴-۱)$$

که در آن n ضریب شکست میانگین محیط، Δn دامنه ی تغییرات، $\omega_s = 2\pi\nu_s$ و $k_s = 2\pi/\lambda_s$ فرکانس زاویه ای و عدد موج هستند. تغییر ضریب شکست، بلور کوارتز را به صورت یک توری پراش با دوره ی تناوبی به اندازه ی طول موج و دامنه ای متناسب با دامنه ی موج صوتی در می آورد. هنگامی که نور از ناحیه ای که موج صوتی در آن وجود دارد عبور می کند بخشی از آن توسط توری ایجاد شده پراشیده می شود. به این ترتیب مکانیسم اتلاف تولید شده در کاواک مانع از عمل لیزر می شود و تنها با خاموش شدن میدان صوتی، باریکه ی نور بطور کامل از سلول اکوستوایتیک عبور می کند و پالس لیزری تشکیل می شود. سلول های اکوستوایتیکی با موج فراصوتی از مرتبه ی ده ها