

اندازه گیری و آنالیز نویز شدت و فاز در لیزرهای مخابراتی چند مد

وحید احمدی

دانشیار

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

ابراهیم مرتاضی

پژوهشگر

مرکز تحقیقات مخابرات ایران

محمد کاظم مروج فرشی

استاد

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

عباس ظریفکار

استادیار

مرکز تحقیقات مخابرات ایران

چکیده

با توجه به اهمیت اندازه گیری نویز در سیستمهای مخابرات نوری، در این مقاله ابتدا نویزهای موجود در یک لیزر نیمه هادی چند مد با در نظر گرفتن گین غیرخطی و اشباع متقابل بین مدها مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. سپس با روشی جدید و با استفاده از یک اسپکتروم آنالیز نوری، نویزهای شدت و فاز یک نمونه خاص لیزر مخابراتی اندازه گیری و آنالیز می گردد. وقتی یک لیزر نیمه هادی در دو مد تابش می کند، دارای بیشترین مقدار نویز تفکیک مد می باشد. در نتایج حاصل از آنالیز، کمتر بودن نویز شدت نسبی کل از نویز شدت نسبی تک تک مدها و همچنین کاهش نویز شدت کل با افزایش تعداد مدها که یساتگر نویز تفکیک مد می باشد، مشهود است. اندازه گیری نویز شدت لیزرهای نیمه هادی چند مد، شامل اندازه گیری نویز تفکیک مد، نویز پرش مد و نویز شدت نسبی بوده و در مورد نویز فاز شامل اندازه گیری پهنای خط لیزر و چگالی طیفی نویز فاز یا فرکانس می باشد. در روش اندازه گیری ارائه شده در این مقاله، نویز شدت و چگالی طیفی نویز فاز با توجه به پهنای خط، توان نور خروجی لیزر در مد اصلی و مدهای جانبی و همچنین طول موج مد اصلی، محاسبه می گردند که تطابق خوبی بین نتایج حاصل از آنالیز و اندازه گیری مشاهده می گردد.

کلمات کلیدی

لیزر نیمه هادی، نویز شدت، نویز فاز، پرش مد، تفکیک مد، پهنای خط

Analysis and Measurement of Intensity and Phase Noise in Multi-Mode Semiconductor Lasers

V. Ahmadi

Associate professor
Tarbiat Modarres University

E. Mortazy

Researcher
Tarbiat Modarres University

M. K. Moravvej-Farshi

Professor
Tarbiat Modarres University

Zarifkar

Assistant professor
Iran Telecommunication Research Center

Abstract

Noise measurement in the optical communication systems is of great importance. In this paper, we analyze noises in a multi-mode semiconductor lasers considering the nonlinear gain and cross-saturation effect. Then, we measure relative intensity noise (RIN) and frequency noise spectrum (FNS) of a typical communication laser diode with special method using an optical spectrum analyzer. In two-mode semiconductor laser, mode partition noise is dominant. The results of analysis shows is observed that the total RIN is less than RIN of each mode, and also is decreased with higher mode numbers: Intensity noise measurement of multi-mode semiconductor laser includes mode partition, mode hopping and relative intensity noises. Phase noise measurement includes line width and phase/frequency noise spectrum. Experimental and analysis results are in good agreement.

Key words

Semiconductor laser, intensity noise, phase noise, mode hopping, mode partition, line width.

مقدمه

ابعاد کوچک، توان مصرفی کم و قابلیت مدوله شدن به طور مستقیم، از مهمترین عوامل استفاده از لیزرهای نیمه هادی در مخابرات نوری می باشد.

وقتی به یک لیزر نیمه هادی جریانی اعمال می شود، در نور خروجی لیزر نوساناتی در شدت و فاز مشاهده می شود. عامل این نوسانات که باعث تغییرات زمانی چگالی حاملها و فوتونها می شود، مربوط به فرایندهای تصادفی تولید و ترکیب حاملها و فوتونها می باشد.

تأثیرات مخرب نویز شدت که با تغییر تعداد مدها و پرش مد بین مد اصلی و قویترین مد مجاور، ظاهر می شود، به عنوان نمونه در تلویزیونهای کابلی و اثر نویز فاز که با پهنای خط نور خروجی لیزر مرتبط است در سیستم های مخابرات نوری قابل مشاهده است [۱].

هدف این مقاله ابتدا آنالیز نویز در لیزرهای نیمه هادی چند مد می باشد که در بخش (۲) به آن پرداخته می شود و روابط کلی برای محاسبه نویز این لیزرها بدست آمده و نویزهای شدت نسبی و فاز مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. در بخش (۳) نتایج حاصل از اندازه گیری مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج آنالیز مقایسه می گردد.

بررسی و آنالیز نویز در لیزرهای نیمه هادی چند مد

با اضافه نمودن منابع نویز لنجوبین به معادلات نرخ می توان به آنالیز نویزهای موجود در یک لیزر نیمه هادی پرداخت. نویزهای مورد آنالیز شامل نویز شدت و نویز فاز می باشند. معادلات نرخ برای لیزرهای نیمه هادی چند مد به صورت زیر نوشته می شوند [۲]:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{I}{q} - \frac{n}{\tau_s} - \sum_j g_j s_j + f_n(t) \quad (۱ - الف)$$

$$\frac{ds_k}{dt} = g_k s_k + \beta \frac{n}{\tau_s} - \frac{s_k}{\tau_{ph}} + f_{s_k}(t) \quad (۱ - ب)$$

$$\frac{d\phi_k}{dt} = -(\omega_k - \omega_m) + \frac{1}{2} \beta_c (g_k - 1/\tau_{ph}) + f_{\phi_k}(t) \quad (۱ - ج)$$

در روابط فوق $f_n(t)$ ، $f_{s_k}(t)$ و $f_{\phi_k}(t)$ منابع نویز لنجیون مربوط به حاملها، فوتونها و فاز میدان الکتریکی بوده و $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ می باشد [۲]:
 با در نظر گرفتن گین غیرخطی همراه با اشباع متقابل بین مدها داریم:

$$g_k = g_{0k} - \beta_k \sum_j s_j \quad (2)$$

در رابطه فوق β_k ضریب اشباع بوده و به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\beta_k = \frac{g_{0k}}{S_p} \quad (3)$$

که در آن g_{0k} قسمت خطی گین و S_p که نشان دهنده اشباع گین می باشد، عبارتند از [۳]:

$$S_p = \frac{Vol}{\epsilon \Gamma} \quad (4)$$

$$g_{0k} = A(n - n_{nom}) [1 - (k/M)^2] \quad (5)$$

در روابط بالا n_{nom} تعداد حاملهای شفاف و $2M + 1$ بیانگر تعداد مدها می باشد.
 برای تجزیه و تحلیل نویز، نوسانات کوچک Δn ، Δs و $\Delta \phi$ را حول مقادیر متوسط حالت پایدار $\langle n \rangle$ ، $\langle s_k \rangle$ و $\langle \phi_k \rangle$ در معادلات نرخ (۱) در نظر می گیریم. سپس از معادلات حاصل تبدیل فوریه گرفته و با صرف نظر کردن از مقادیر کوچک، نوسانات حاملها، فوتونها و فاز میدان الکتریکی از روابط زیر بدست می آیند:

$$\Delta N(\omega) = \frac{1}{D(\omega)} \left\{ \prod_j (i\omega + \Gamma_j) F_N(\omega) - \sum_k \left[G_{kk} \prod_{j \neq k} (i\omega + \Gamma_j) F_{S_k}(\omega) \right] \right\} \quad (6)$$

$$\Delta S_k(\omega) = \frac{1}{D(\omega)} \left\{ \left[A \langle s_k \rangle \prod_{j \neq k} (i\omega + \Gamma_j) \right] F_N(\omega) + \left[(i\omega + \Gamma_n) \prod_{j \neq k} (i\omega + \Gamma_j) + A \sum_{z \neq j \neq k} G_{jj} \langle s_j \rangle (i\omega + \Gamma_z) \right] F_{S_k}(\omega) - A \langle s_k \rangle \sum_{z \neq j \neq k} G_{jj} (i\omega + \Gamma_z) F_{S_j}(\omega) \right\} \quad (7)$$

$$D(\omega) = \Gamma_n \prod_j (i\omega + \Gamma_j) \sum_k \left[A \langle s_k \rangle G_{kk} \prod_{j \neq k} (i\omega + \Gamma_j) \right] \quad (8)$$

$$\Delta \phi_k = \frac{1}{i\omega} \left[A \beta_c \frac{\langle g_k \rangle}{2 \langle g_{0k} \rangle} \Delta N - \frac{1}{2} \beta_c \beta_k \sum_j \Delta S_j + F_{\phi_k}(\omega) \right] \quad (9)$$

($z, j, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)

که $F_{\phi_k}(\omega)$ ، $F_{S_k}(\omega)$ و $F_N(\omega)$ تبدیل فوریه منابع نویز لنجیون می باشند و همچنین داریم:

$$\Gamma_n = \frac{1}{\tau_s} + \sum_k A \langle s_k \rangle \frac{\langle g_k \rangle}{\langle g_{0k} \rangle} [1 - (k/M)^2] \quad (10)$$

$$G_{kk} = \langle g_k \rangle - \sum_j \beta_j \langle s_j \rangle \quad (11)$$

$$\Gamma_k = \frac{R_{sp}}{\langle s_k \rangle} + \beta_k \langle s_k \rangle \quad (12)$$

نویز شدت نسبی برای تک تک مدها و نویز شدت کل طبق روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$RIN_k(\omega) = \frac{\langle \Delta S_k^2(\omega) \rangle}{\langle S_k \rangle^2} \quad (13)$$

$$RIN_{total}(\omega) = \frac{\left(\sum_j \langle \Delta S_j(\omega) \rangle \right)^2}{\sum_j \langle S_j \rangle^2} \quad (14)$$

و تعداد فوتونها برای هر یک از مدهای جانبی از رابطه زیر بدست می‌آید [۳]:

$$\langle S_j \rangle = R_{sp} \cdot \tau_{ph} \left[\frac{R_{sp} \cdot \tau_{ph}}{\langle S_0 \rangle} + \left(\frac{j}{M} \right)^2 \right]^{-1} \quad (15)$$

برای محاسبه چگالی طیفی نویز فاز برای هر مد، ابتدا با جایگذاری روابط (۶) و (۷) در رابطه (۹) تغییرات فاز را محاسبه نموده و سپس داریم [۲]:

$$S_{\phi_k}(\omega) = \omega^2 \langle \Delta \phi_k^2(\omega) \rangle \quad (16)$$

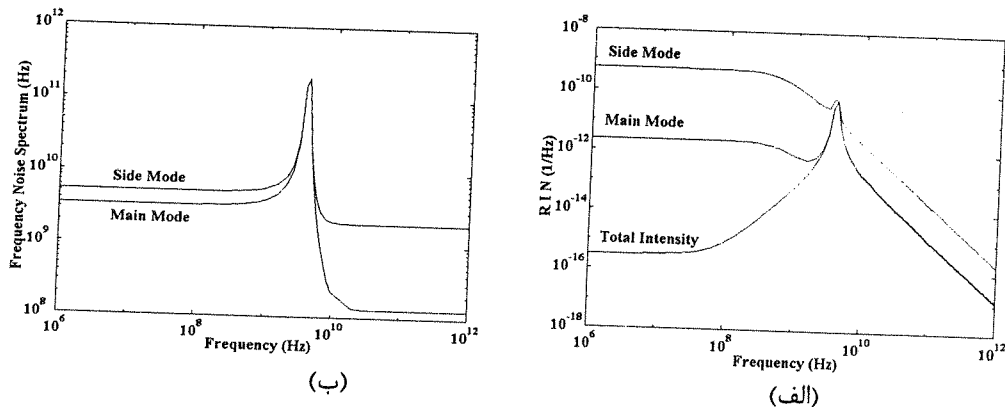
با استفاده از روابط (۱۳) تا (۱۶) و پارامترهای جدول (۱) طیف نویز شدت نسبی و نویز فاز در یک لیزر با دو مد جانبی محاسبه و آنالیز می‌گردد.

در شکل (۱-الف) نویز شدت نسبی برای مد اصلی، مدهای جانبی و شدت کل به ازاء توان $2mW$ برای مد اصلی رسم شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، در یک لیزر با دو مد جانبی، نویز شدت کل در فرکانسهای پایین دارای مقدار کوچکی بوده و در فرکانسی به نام فرکانس نوسانات میرایی به بیشترین مقدار خود می‌رسد و به ازاء فرکانسهای بزرگتر از فرکانس نوسانات میرایی به سرعت کاهش می‌یابد. در حالیکه نویز شدت نسبی مد اصلی و مدهای کناری به مقدار قابل ملاحظه‌ای از نویز شدت کل بیشتر می‌باشند. بیشتر بودن نویز شدت نسبی مدهای جانبی به مد اصلی به علت کاهش تعداد فوتونها در مدهای جانبی به مد اصلی می‌باشد.

افزایش نویز شدت نسبی در مد اصلی نسبت به نویز شدت نسبی کل تحت عنوان نویز تفکیک مد شناخته می‌شود و علت آن اینست که توزیع توان بین مدهای طولی لیزر نیمه هادی، با زمان نوسان می‌کنند و با وجود اینکه مد کناری فقط کسر

کوچکی از توان کل را دارا می باشد، اما ممکن است برای مدت زمان کوتاهی قسمت اعظم توان را به خود اختصاص دهد که باعث افت شدید توان در مد اصلی می گردد [۹].

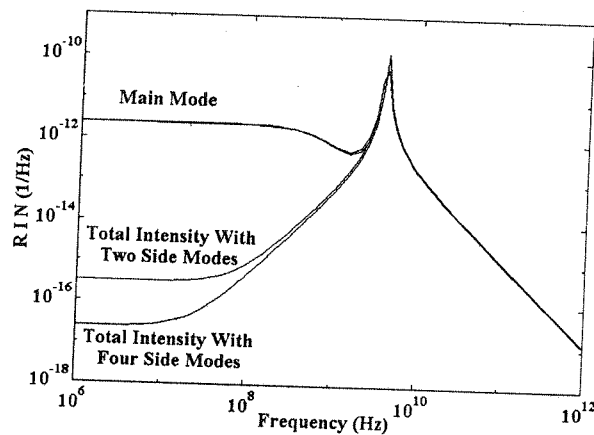
شکل (۱-ب) چگالی طیفی نویز فاز لیزر مورد نظر را نشان می دهد. این منحنی در فرکانسهای پایین نسبتاً تخت بوده و در فرکانس نوسانات میرایی همانند نویز شدت به بیشترین مقدار خود می رسد و پس از آن کاهش شدیدی دارد.



شکل (۱-الف) طیف نویز شدت نسبی و (ب) طیف نویز فاز با توان خروجی $2mW$ در مد اصلی.

در شکل (۲) مقایسه‌های بین نویز شدت نسبی کل در یک لیزر با چهار مد جانبی و لیزر دیگری با دو مد جانبی انجام شده است. همانطور که مشاهده می شود نویز شدت کل در حالتیکه $m = 0, \pm 1$ می باشد نسبت به وقتیکه $m = 0, \pm 1, \pm 2$ است مقدار بیشتری را نشان می دهد و نویز شدت مد اصلی نیز در هر دو حالت مقدار ثابتی است.

به طور کلی می توان گفت که با افزایش تعداد مدها در یک لیزر نیمه هادی چند مد، نویز شدت کل به علت اثر متقابل منفی مدهای جانبی لحاظ شده کاهش می یابد.



شکل (۲) اثر نویز تفکیک مد با افزایش مدهای جانبی.

علاوه بر نویز تفکیک مد که در مورد نویز شدت مورد بررسی قرار گرفت گونه دیگری از نویز شدت، نویز پرش مد می باشد که در نتیجه پرش مد اصلی بین مدهای مجاور هم بوجود می آید.

پرش مد اصلی بین مدهای مجاور هم، حاصل تغییرات دمایی یا تغییرات جریان تزریقی می باشد.

حال به بررسی تغییرات دمایی و اثر آن در نویز شدت و فاز یک لیزر نیمه هادی چند مد می پردازیم. نرخ گسیل خودبخودی که منشاء اصلی نویز در لیزرها می باشد از روابط زیر حاصل می شود [۲]:

جدول (۱) مقادیر نوعی پارامترها برای لیزر InGaAsP با طول موج $1.3 \mu\text{m}$ [۳ و ۲].

مقادیر	نماد	نام پارامتر
0.3	Γ	ضریب محدودیت
$1.56 \times 10^{-19} \text{ j}$	E_f	اختلاف ترازهای شبه فرمی
$100 \mu\text{m}^3$	V	حجم کاواک
$6.63 \times 10^{-34} \text{ j.sec}$	h	ثابت پلانک
$1.38 \times 10^{-23} \text{ V} / ^\circ \text{ k}$	K	ثابت بولتزمن
300° k	T	دمای محیط
$2.2 \times 10^{-9} \text{ sec}$	τ_s	طول عمر حاملها
10^{-4}	β	ضریب بازتابش خودبخودی
$1.6 \times 10^{-12} \text{ sec}$	τ_{ph}	طول عمر فوتونها
5625	A	شیب گین خطی
$2.14 \times 10^8 \text{ cm}^{-1}$	n_{nom}	تعداد حاملهای شفاف
15.8 mA	I_{th}	جریان آستانه
$1.28 \times 10^{12} \text{ sec}^{-1}$	R_{sp}	نرخ گسیل خودبخودی
1×10^{-25}	ε	ضریب فشردگی بهره
5	β_c	ضریب افزایش پهنای خط
4800 m^{-1}	α_m	تلفات دیواره

$$R_{sp} = \beta \frac{\langle n \rangle}{\tau_s}, \quad R_{sp} = A \cdot n_{sp} (\langle n \rangle - n_{nom}) \quad (17)$$

و داریم:

$$n_{sp} = \left[1 - \exp\left(\frac{hf_0 - E_f}{kT}\right) \right]^{-1} \quad (18)$$

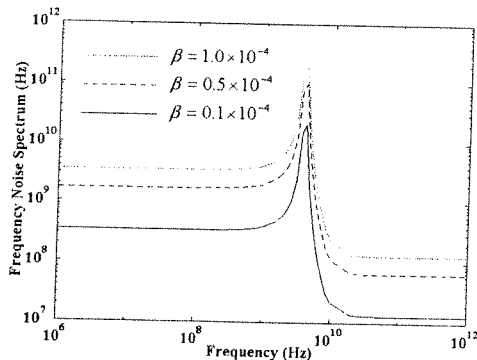
که β ضریب تابش خودبخودی، f_0 فرکانس مد اصلی و E_f اختلاف بین سطوح انرژی ترازهای شبه فرمی در لیزر می‌باشد. با توجه به روابط (۱۷) و (۱۸) داریم:

$$\beta = \frac{\alpha k A (\langle n \rangle - n_{nom}) \tau_s T}{\langle n \rangle (E_f - hf_0)} \quad (19)$$

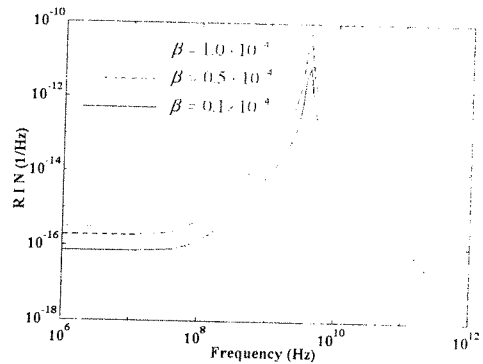
که α ضریب تناسب و در حدود 1.4 می‌باشد.

رابطه (۱۹) تناسب بین دما و ضریب تابش خودبخودی را نشان می‌دهد.

در شکل (۳) نویز شدت نسبی و چگالی طیفی نویز فاز برای ضرایب تابش خودبخودی مختلف رسم شده است. آنچه از این شکل مشخص می‌شود اینست که با افزایش β ، نرخ گسیل خودبخودی افزایش یافته و نویز لیزر که بیانگر گسیل خودبخودی می‌باشد، افزایش می‌یابد.



(ب)



(الف)

شکل (۳- الف) نویز شدت نسبی و (ب) چگالی طیفی نویز فاز برای ضرایب تابش خودبخودی مختلف با توان خروجی $2mW$ در مد اصلی.

از آنجا که طبق رابطه (۱۸) ضریب تابش خودبخودی با دما متناسب می‌باشد، بنابراین با افزایش دما، نویز شدت نسبی و چگالی طیفی نویز فاز لیزر افزایش می‌یابد.

اندازه گیری نویز در لیزرهای مخبراتی چند مد

همانگونه که در بخش قبلی بررسی شد، نویز شدت لیزرهای نیمه هادی شامل نویز تفکیک مد، نویز پرش مد و نویز شدت نسبی بوده و نویز فاز یا فرکانس توسط چگالی طیفی نویز فاز بیان می‌گردد. RIN به کمیت‌های زیادی وابسته است که مهمترین آنها شامل توان خروجی، دما و فرکانس نوسانات میرایی می‌باشد [۵]. در این مقاله تنها با استفاده از یک اسپکتروم آنالیزر نوری نویز شدت نسبی و نویز فاز لیزر مخبراتی چند مد FLD3C5LK اندازه‌گیری و آنالیز می‌شود.

در این قسمت ابتدا به اندازه گیری نویز تفکیک مد می‌پردازیم. با توجه به همبستگی متقابل منفی بین مد اصلی و مدهای کناری، نویز تفکیک مد در لیزرهای چند مد، برای هر مد طولی بزرگتر از نویز تفکیک مد برای تمامی مدها در یک توان خروجی ثابت می‌باشد. بنابراین اگر فقط مد غالب لیزر آشکار شود، یک نویز شدت خیلی بزرگ، در مقایسه با وقتی که نور خروجی کل لیزر آشکار شود، خواهیم داشت. برای محاسبه نویز شدت لیزر مورد آزمایش با توجه به مشخص بودن مقادیر توان خروجی هر مد، پهنای خط لیزر و طول موج مد اصلی، تعداد فوتونها در هر مد به صورت زیر تعیین می‌شود [۲]:

$$\langle s_i \rangle = \frac{2P_i^{out}}{hf_0 v_g \alpha_m} \quad (20)$$

که v_g سرعت گروه بوده و α_m تلفات دیواره ها در لیزر می‌باشد. با فرض تک مد بودن لیزر نیمه‌هادی و با حل حالت پایدار معادلات نرخ می‌توان رابطه بین تعداد حاملها و فوتونها را بدست آورد و داریم [۶و۷]:

$$\langle n \rangle = \frac{\langle s_0 \rangle (\tau_s / \tau_{ph} + A \tau_s n_{nom})}{\beta + A \tau_s \langle s_0 \rangle} \quad (21)$$

با استفاده از روابط (۲۰) و (۲۱) و مقادیر جدول (۱) نویز شدت نسبی برای مد اصلی و نویز شدت نسبی کل برای مقادیر اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شوند.

در شکل (۴) که حاصل از اندازه‌گیری نویز شدت لیزر مخابراتی چند مد می‌باشد، نویز شدت نسبی کل و نویز شدت نسبی مد اصلی رسم شده است. لازم به ذکر است که در محاسبه نویز شدت نسبی کل تنها مد اصلی به همراه چهار مد جانبی آن در نظر گرفته شده و از بقیه مدها به علت دارا بودن کم صرف‌نظر شده است.

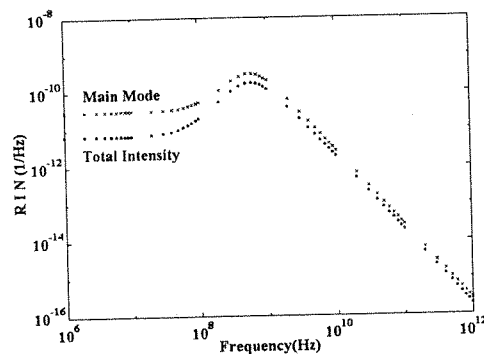
با توجه به اینکه لیزر مورد آزمایش دارای توان کمی می‌باشد (در حدود 0.07 mW برای مد اصلی)، نویز شدت نسبی آن زیاد بوده (در حدود 10^{-11} Hz^{-1}) و همچنین کمتر بودن نویز شدت نسبی کل در مقابل نویز شدت نسبی مد اصلی که بیانگر پدیده تفکیک مد می‌باشد، کاملاً مشهود است.

پس از بررسی نویز تفکیک مد به آثار نویز پرش مد می‌پردازیم. نویز پرش مد که در اثر تغییر دما یا تغییرات جریان تزریقی بوجود می‌آید برای لیزر مخابراتی چند مد FLD3C5LK اندازه‌گیری و در شکل (۵) نشان داده شده است.

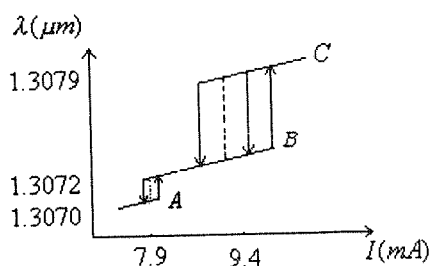
در شکل (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش جریان تزریقی، طول موج مد اصلی لیزر افزایش می‌یابد. در محدوده دو جریان خاص ($7/9 \text{ mA}$ و $9/4 \text{ mA}$) این لیزر دارای طول موج‌های مختلف می‌باشد و به صورت هیستریزیس عمل می‌کند. با تغییرات جریان تزریقی لیزر، طول موج مد اصلی بین حالات A ، B و C به صورت رفت و برگشتی عمل می‌کند و در نتیجه نویز پرش مد خواهیم داشت [۸].

نویز پرش مد رابطه معکوس با عرض منحنی هیستریزیس دارد. وقتی عرض منحنی هیستریزیس افزایش می‌یابد، در آنصورت نویز پرش مد کاهش یافته و به عبارت دیگر تداوم مد اصلی لیزر در مقابل تغییرات جریان تزریقی بیشتر می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که وقتی جریان تزریقی کوچک است (نزدیک جریان آستانه)، منحنی هیستریزیس دارای عرض کم می‌باشد و بنابراین نویز پرش مد زیاد می‌شود. در جریان تزریقی بالاتر، منحنی هیستریزیس پهن‌تر شده و نویز پرش مد کاهش می‌یابد.

از آنجا که نویز پرش مد یکی از انواع نویز شدت می‌باشد، تطابق خوبی بین نتایج حاصل از اندازه‌گیری و نتایج حاصل از مدل‌سازی مداری نویز شدت لیزر در مرجع [۵] وجود دارد.



شکل (۴) نویز شدت نسبی مد اصلی و نویز شدت نسبی کل حاصل از اندازه‌گیری لیزر مخابراتی FLD3C5LK.



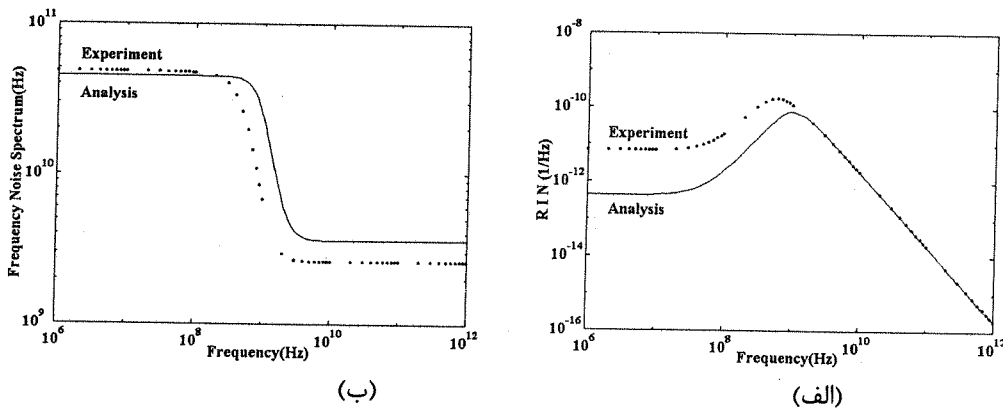
شکل (۵) نتیجه اندازه‌گیری نویز پرش مد لیزر FLD3C5LK.

کمیت مهم دیگر در اندازه‌گیری نویز شدت لیزر نسبت فرو نشانی مد می‌باشد که برای لیزر مورد آزمایش در جدول زیر آمده است:

جدول (۲) MSR اندازه‌گیری شده توسط لیزر FLD3C5LK

پارامترها زمان	P_0 (dB)	P_1 (dB)	MSR
t_1	-11.4	-15	2.2909
t_2	-10.6	-12.4	1.5136

در شکل (۶-الف) با در نظر گرفتن اینکه لیزر مخابراتی مورد آزمایش دارای چهار مد جانبی می‌باشد، RIN حاصل از اندازه‌گیری و آنالیز رسم شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود نویز شدت نسبی در فرکانسهای پایین دارای مقدار بزرگی می‌باشد که این مسئله به علت توان پایین نور خروجی لیزر مخابراتی می‌باشد. در شکل (۶-ب) نتایج حاصل از آزمایش و آنالیز طیف نویز فاز مقایسه شده است. اختلاف موجود بین نتایج حاصل از آنالیز و اندازه‌گیری در فرکانسهای پایینتر از فرکانس نوسانات میرایی، به علت تفاوت موجود در پارامترهای لیزر مخابراتی مورد آزمایش با پارامترهای استفاده شده از جدول (۱) جهت آنالیز می‌باشد.



شکل (۶) نتیجه حاصل از آنالیز و اندازه‌گیری (الف) نویز شدت نسبی و (ب) طیف نویز فاز.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، معادلات نرخ لنجوین برای یک لیزر نیمه‌هادی چند مد، حل شده و نویز شدت و فاز آن مورد بررسی قرار گرفته است. آنالیز انجام شده در این مقاله برای لیزرهای با حداکثر چهار مد جانبی با در نظر گرفتن اثر گین غیرخطی، که توسط ضرایب اشباع وارد می‌شوند، صورت گرفته و با در نظر گرفتن تقریب‌های مناسب، آنالیز لازم برای لیزرهای با مدهای جانبی بیشتر نیز ارائه شده است.

در لیزرهای نیمه‌هادی چند مد، نویز تفکیک مد باعث می‌گردد که نویز شدت کل از نویز تک تک مدها کمتر شود و همچنین در لیزرهای نیمه‌هادی با افزایش تعداد مدها، نویز شدت نسبی کل کاهش می‌یابد. تأثیر دما بر نویز شدت نسبی و چگالی طیفی نویز فاز نیز با در نظر گرفتن تناسب بین ضریب تابش خودبخودی و دما، بررسی شده است.

در پایان نتایج حاصل از اندازه‌گیری با نتایج حاصل از آنالیز مقایسه شده‌اند.

- 1- Mode Partition Noise
- 2- Mode Hopping Noise
- 3- Relative Intensity Noise
- 4-Relaxation Oscillations
- 5- 1-Mode Suppression Ratio: MSR

مراجع

- [1] L. A. Coldren, S. W. Corzine, Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [2] Govind P. Agrawal and Niloy K. Dutta, Semiconductor Lasers , 2nd ed., New York: Van Nostrand, 1993.
- [3] Tran Thi Bich-Ha and Jean-Claude Mollier, "Noise Equivalent Circuit of a Two-Mode Semiconductor Laser with the Contribution of Both the Linear and the Nonlinear Gain," IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 3, NO. 2, April 1997.
- [4] L. A. Coldren and S. W. Corzine, Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [5] Gregory E. Obarski and Pual D.Hale , "How to Measure Relative Intensity Noise in Lasers," Laser Focus World, May 1992.
- [6] C. Harder, J. Katz, S. Margalit, J. Shacham and A. Yariv, "Noise Equivalent Circuit of Semiconductor Laser Diode," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-18, pp. 333-337, Mar. 1982.
- [7] David E. Dodds and J. Sieben, "Fabry-Perot Laser Diode modeling," IEEE Photonics Technology Letters, VOL. 7, NO. 3, March 1995.
- [8] K. Petermann , Laser Diode Modulation and Noise, Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic , 1988.
- [9] محمد کاظم مروج فرشی، عباس ظریفکار و وحید احمدی، "تجزیه و تحلیل نویز شدت در لیزرهای نیمه هادی تک مد"، مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ج. ۱، صص. ۴۲-۳۴، ۱۳۷۸.