مدل‌سازي مداري و اندازه‌گيري نويز در ليزرهاي نيمه‌هادي

ابراهيم مرتاضی — مربی گروه سيستمها و فناوری نوری، مرکز تحقيقات مخابرات ايران
وحيد احمدی — دانشيار گروه الکترونيک، دانشکدة فنی، دانشگاه تربيت مدرس
محمد كاظم مروج فرشی — استاد گروه الكترونيك، دانشكده فني، دانشگاه تربيت مدرس

چكيده
در اين مقاله، مدار معادل نويز شدت نسبي و طيف نويز فاز يا فركانس براي ليزرهاي نيمه‌هادي تك مد ارائه مي‌شود. مدل مداري نويز فاز ليزرهاي تك مد در اين مقاله براي اولين بار ارائه شده‌است. مدل مداري، با استفاده از منابع نويز لنجوين، از معادلات آهنگ استنتاج شده و نويزهای شدت نسبي و فاز به‌صورت پارامترهاي الكتريكي محاسبه مي‌شود. نويز شدت نسبي و طيف نويز فركانس براي يك نمونه خاص ليزر مخابراتي، با روشي غيرمستقيم اندازه‌گيري مي‌شود. در پايان نشان داده مي‌شود كه نتايج بهدست آمده از اندازه‌گيري غيرمستقيم با نتايج حاصل از مدل مداري مطابقت دارد.

كلمات كليدی: نويز شدت نسبي، طيف نويز فركانس، مدل مداري، ليزر نيمه‌هادي، پرش مد.

Circuit Modeling and Measurement of Noise for a Semiconductor Laser Diode

E. Mortazy — Optical Systems and Technology Group, Iran Telecommunication Research Center (ITRC), Tehran, Iran.
V. Ahmadi — Electronic Department, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran
M. K. Moravvej-Farshi — Electronic Department, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran

Abstract
This paper presents equivalent circuit models for both relative intensity noise (RIN) and phase/frequency noise spectrum (FNS) in a single semiconductor laser diode. The model for the electrical phase noise of a single mode laser is proposed for the first time. These equivalent circuit models are derived from the rate equations including the Langevin noise sources. Then, RIN and FNS are calculated in terms of electrical parameters. Finally, we explain an indirect experimental method used to measure RIN and FNS of a typical optical communication laser diode. Behavior of the experimental results is in agreement with those calculated by circuit models.

Key words: Relative intensity noise (RIN), Frequency/ phase noise spectrum (FNS), Equivalent circuit modeling, Semiconductor laser, Mode-Hopping.

۱- مقدمه

بازده سیستم‌هاي مخابرات نوري با نحوه عملكرد هر يك از اجزاي تشكيل دهنده سيستم ارتباط مستقيم دارد. نويز شدت نسبي (RIN)[۱] و طيف نويز فاز يا فركانس (FNS)[۲] یک ليزر نيمه‌هادی، به‌عنوان منبع نوري، عملكرد كل سيستم را تحت تأثير قرار مي‌دهد. تاثير RIN در تغيير تعداد مدها و پرش مد[۳] بين مد اصلي و قويترين مد كناري مشاهده مي‌شود. تغيير تعداد مدها مي‌تواند آهنگ خطاي بيت را در يك سيستم افزايش دهد. همچنيـن وجـود FNS در يك سيستم باعث افزايش پهناي خط سيگنال نـوري و در نتيجـه كاهش كارايي كل سيستم مـي‌شود [۱].

با استفاده از مدل مدار معادل نويز مي‌توان نويز قطعات و در نهايت نويز كل سيستم را مطالعه و بررسی كرد. مدل مداري نويز براي RIN در ليزر نيمه‌هادي تك مد با بهره خطي و براي ليزر نيمه‌هادي دو مد با بهره غيرخطي قبلا ارائه شده است [۲] و [۳]. دراين مقاله، مدل مداري RIN همراه با مدل FNS براي ليزرهاي نيمه‌هادي تك مد با در نظر گرفتن بهره غيرخطي ارائه شده است.

براي تأئيد نتايج حاصل از مدل مداري نويز، مي‌توان آن را با نتايج حاصل از اندازه‌گيري مطابقت داد. براي اندازه‌گيري نويز، توان نوري توسط فتوديودی با پهناي باند وسيع به‌جريان نوري تبديل شده و نويز اين جريان توسط اسپكتروم آناليزر RF اندازه‌گيري مي‌شود [٤].

اندازه‌گيري RIN و FNS با روش يادشده قبلا انجام و گزارش شده است [٥-٨]. دراين مقاله از يك روش غيرمستقيم براي اندازه‌گيري RIN و FNS يك ليزر مخابراتي خاص استفاده شده است، به‌طوريكه درآن به فتوديود با پهناي باند وسيع نيازی نيست و تنها وجود يك اسپكتروم آناليزر نوري كفايت مي‌كند.

۲-معادلات آهنگ لنجوين[۴]

با اضافه كردن منابع نويز لنجوين به معادلات آهنگ نتيجه مي‌گيريم [۹]:

$$\frac{dN}{dt}=\frac{I}{q}-\gamma_e N-GP+F_N(t) \qquad \text{(۱-الف)}$$

$$\frac{dP}{dt}=(G-\gamma)P+R_{sp}+F_P(t) \qquad \text{(۱-ب)}$$

$$\frac{d\phi}{dt}=-(\omega-\omega_{th})+\frac{1}{2}\beta_c(G-\gamma)+F_\phi(t) \qquad \text{(۱-ج)}$$

كه N، P، ϕ، I و q به‌ترتيب تعداد كل الكترونها، تعداد كل فوتونها، فاز، جريان تزريقي و بار الكتريكي‌اند. R_{SP} آهنگ تابش خودبخودي است و براي تمام مدها يكسان فرض شده است.

ω فركانس كاركرد ليزر، ω_{th} متناظر با مقدار آستانه انديس مد و β_c ضريب افزايش پهناي خط است. $F_N(t)$، $F_P(t)$ و $F_\phi(t)$ به‌ترتيب منابع نويز الكترون، فوتون و فاز ميدان الكتريكي‌اند. $\gamma=1/\tau_p$ و $\gamma_e=1/\tau_e$ بوده، به‌طوريكه τ_p و τ_e به‌ترتيب طول عمر فوتون و الكترون‌اند. G كه بيانگر بهره است، به‌صورت زير تعريف مي‌شود:

$$G = A\,(N-N_0)\left(1-P/S_p\right) \qquad \text{(۲)}$$

كه در آن A شيب بهره تفاضلي، N_0 تعداد حامل‌ها درحالت شفاف و S_p تعداد فوتون‌هاي حالت اشباع است. براي بهدست آوردن مقادير حالت پايدار داريم:

$$\frac{\bar{I}}{q}-\gamma_e\,\bar{N}-\bar{G}\,\bar{P}=0 \qquad \text{(۳-الف)}$$

$$(\bar{G}-\gamma)\,\bar{P}+R_{sp}=0 \qquad \text{(۳-ب)}$$

كه $\bar{N}$، $\bar{P}$، $\bar{I}$ و $\bar{G}$ متناظر با مقادير متوسط پارامترهاي مربوطاند درحاليكه مقدار متوسط منابع نويز لنجوين برابر صفر است. يعنی، درمعادله (۱) براي منابع نويز لنجوين قرار مي‌دهيم:

$$\langle F_j(t)\rangle=0 \qquad \text{(۴-الف)}$$

و

$$\langle F_k(t)F_j(t')\rangle=2D_{kj}\,\delta(t-t') \qquad \text{(۴-ب)}$$

1- Relative Intensity Noise
2- Frequency Noise Spectrum
3- Mode Hopping
4- Langevin rate equations

كه D_{kj} ضريب مربوط به منابع نويز عبارت است از:

$$D_{NN}=R_{sp}\overline{P}+\gamma_e\overline{N};\qquad D_{PP}=R_{sp}\overline{P};$$
$$D_{\phi\phi}=\frac{R_{sp}}{4\overline{P}};\quad D_{NP}=-R_{sp}\overline{P};\quad D_{N\phi}=D_{P\phi}=0 \tag{۵}$$

در معادلات فوق $\overline{N}$ و $\overline{P}$ از حل حالت پايدار معادلات آهنگ بدست مي‌آيند [۱۰].

۳- مدار معادل الكتريكي

براي آناليز نويز و استخراج مدل مداري بايد نوسانات مربوط بهتعداد الكترونها، δN، تعداد فوتونها، δP، فاز ميدان الكتريكي و $\delta\phi$ درنظر گرفته شود. با اعمال اين نوسانات داريم:

$$\frac{d\,\delta N(t)}{dt}=\frac{\delta I(t)}{q}-\Gamma_N\,\delta N(t)-G_l\,\delta P(t)+F_N(t) \tag{۶-الف}$$

$$\frac{d\,\delta P(t)}{dt}=A\overline{P}\,\delta N(t)-\Gamma_P\,\delta P(t)+F_P(t) \tag{۶-ب}$$

$$\frac{d\,\delta\phi(t)}{dt}=\frac{1}{2}A\beta_c\,\delta N(t)-\frac{1}{2}\beta_c\frac{\overline{G}_{nl}}{\overline{P}}\delta P(t)+F_\phi(t) \tag{۶-ج}$$

كه درآن

$$\Gamma_N=\gamma_e+A\overline{P} \tag{۷-الف}$$

و
$$\Gamma_P=R_{sp}/\overline{P}+2\overline{G}_{nl} \tag{۷-ب}$$

پس از حل دستگاه معادلات خطي (۶) در حوزه فركانس داريم:

$$\delta\widetilde{N}=[(j\omega+\Gamma_P)\widetilde{F}_N-\overline{G}_l\widetilde{F}_P]/D \tag{۸-الف}$$

$$\delta\widetilde{P}=[A\overline{P}\widetilde{F}_N+(j\omega+\Gamma_N)\widetilde{F}_P]/D \tag{۸-ب}$$

$$\delta\widetilde{\phi}=\left[\frac{1}{2}A\beta_c\,\delta\widetilde{N}+\widetilde{F}_\phi\right]\Big/ j\omega \tag{۸-ج}$$

$$D=-\omega^2+j\omega(\Gamma_N+\Gamma_P)+\Gamma_N\Gamma_P+A\overline{P}\overline{G}_l \tag{۸-د}$$

ولتاژ سيگنال كوچك δV به‌عنوان ولتاژ مدلاسيون تعريف مي‌شود [۲]:

$$\delta V=mV_T\frac{\delta N}{\overline{N}}; \tag{۹-الف}$$

كه در آن $V_T=kT/q$ و

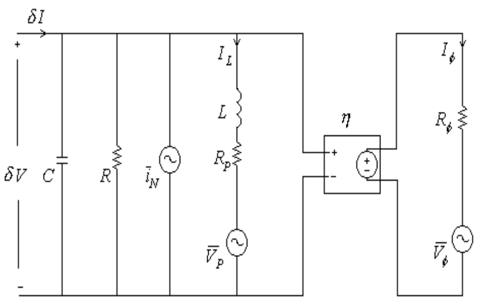
$$m=2+\frac{\overline{N}}{\mathrm{Vol}2\sqrt{2}}\left[\frac{1}{N_v}+\frac{1}{N_c}\right] \tag{۹-ب}$$

N_v و N_c چگالي مؤثر باند ظرفيت و هدايت، V_T ولتاژ حرارتي و Vol حجم لايه فعال است. نوسانات تعداد فوتونها و فاز را مي‌توان برحسب المانهاي الكتريكي، به‌صورت زير نوشت:

$$i_L=q\,G_l\,\delta P \tag{۱۰}$$

$$i_\phi=\omega\,\delta\phi \tag{۱۱}$$

در شكل (۱) مدل مداري نويز شدت و فاز ليزر نيمه‌هادي تك مد نشان داده شده است. در اين مدل براي نشان دادن FNS، شاخه‌اي كه شامل منبع نويز ولتاژ و يك مقاومت است، به مدل‌هاي قبلي RIN كه در مراجع [۲] و [۳] ارائه شده‌اند، اضافه شده است.



شكل ۱- مدل مداري نويز شدت‌نسبي و نويز فاز در ليزر نيمه‌هادي‌تك‌مد

با درنظر گرفتن مدل مدار معادل شکل (۱) مي‌توان نوشت:

$$C\frac{d\,\delta V}{d\,t}=\delta I-\frac{\delta V}{R}-i_L+i_N \qquad \text{(۱۲-الف)}$$

$$L\frac{d\,i_L}{d\,t}=\delta V-R_P\,i_L-V_P \qquad \text{(۱۲-ب)}$$

$$R_\phi\,i_\phi=\eta\,\delta V-V_\phi \qquad \text{(۱۲-ج)}$$

به‌طوريكه بارهاي الكتريكي ذخيره شده در لايه فعال توسط خازن نفوذي C، مقاومت تفاضلي ديود توسط مقاومت R و نوسانات فوتونها و فاز به‌ترتيب توسط جريانهاي القايي i_L و I_ϕ مدل شده‌اند. R_P مقاومت ميرايي است. با مقايسه معادلات (۶) و (۱۲) پارامترهاي مدار معادل نويز بهدست مي‌آيند:

$$C=\frac{q\overline{N}}{mV_T};\quad R=\frac{1}{C\Gamma_N};\quad L=\frac{1}{CA\overline{G}_l\,\overline{P}};$$
$$R_P=L\Gamma_P;\quad R_\phi=\frac{2q\eta}{AC\beta_c};\quad \eta=A^3 \qquad \text{(۱۳)}$$

و براي چگالي طيفي منابع نويز جريان و ولتاژ داريم:

$$S_N=\frac{\overline{i}_N^{\,2}}{\Delta f}=2q^2\left(\gamma_e\,\overline{N}+R_{sp}\,\overline{P}\right) \qquad \text{(۱۴- الف)}$$

$$S_P=\frac{\overline{V}_P^{\,2}}{\Delta f}=2\left(q\,L\,\overline{G}_l\right)^2R_{sp}\,\overline{P} \qquad \text{(۱۴- ب)}$$

$$S_\phi=\frac{\overline{V}_\phi^{\,2}}{\Delta f}=R_\phi^2\,\frac{R_{sp}}{2\,\overline{P}} \qquad \text{(۱۴- ج)}$$

مقادير نوعي پارامترهاي مدل در آناليز سيگنال كوچك، در جدول (۱) ليست شده است. براي بهدست آوردن نويز شدت نسبي با توجه بهمدل مداري داريم:

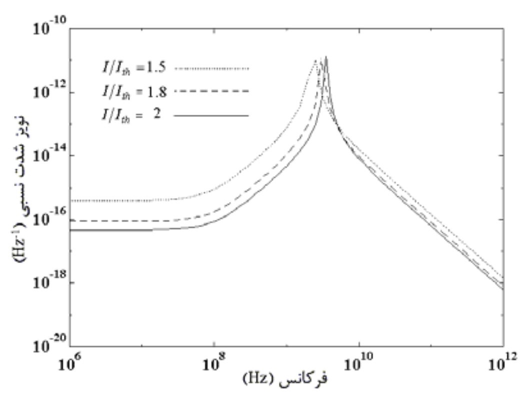
$$\mathrm{RIN}\,(\omega)=\frac{S_P\,(\omega)}{\overline{P}^{\,2}}=\frac{\overline{i}_L^{\,2}\,(\omega)}{\left(I-I_{th}\right)^2} \qquad \text{(۱۵)}$$

كه در رابطه فوق، $S_p(\omega)$ طيف نويز فوتون است.

در شكل (۲) طيف نويز شدت نسبي برحسب جريان تزريقي نشان داده شده است. به‌ازاي يك جريان مشخص، هنگاميكه $f<<f_r$ است، نويز نسبتاً كم و به‌ازاي فركانس نوسانات ميرايي، f_r، بهبيشترين مقدار خود مي‌رسد. مطابق اين منحني، RIN با افزايش جريان تزريقي، كاهش مي‌يابد.

جدول۱- پارامترهاي ليزر نيمه هادي

مقدار	نماد	پارامتر
1.3 μm	λ	طول موج ليزر
250 μm	L	طول كاواك
2 μm	W	عرض ناحيه فعال
0.2 μm	d	ضخامت لايه فعال
0.1 ps	τ	زمان ميرايي
10^8	N_0	تعداد الكترون‌هاي حالت شفاف
3.3×10^9	S_P	تعداد فوتون‌هاي حالت اشباع
$1.7\times10^{12}\ s^{-1}$	R_{sp}	آهنگ تابش خودبخودي
1.6 ps	τ_p	طول عمر فوتون
2.2 ns	τ_e	طول عمر حامل
$5625\ s^{-1}$	A	شيب بهره
5	β_c	ضريب افزايش پهناي خط

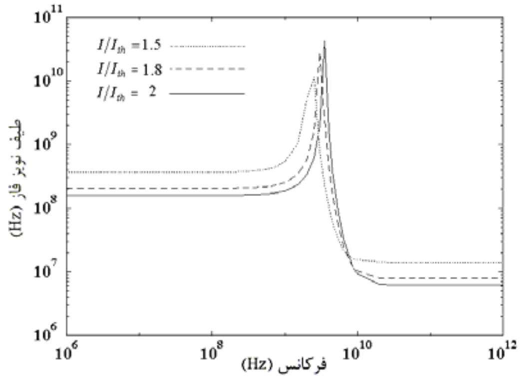


شكل ۲- نويز شدت نسبي ليزر نيمه‌هادي تك مد بر حسب فركانس به‌ازاي ۳ جريان تزريقي مختلف

چگالي طيفي نويز فاز شبيه RIN بوده و بهصورت زير از روي مدل مداري بهدست مي‌آيد:

$$S_{\dot{\phi}}(\omega) = \left\langle \left| \omega \delta \tilde{\phi}(\omega) \right|^2 \right\rangle = \bar{i}_{\phi}^2 \qquad (۱۶)$$

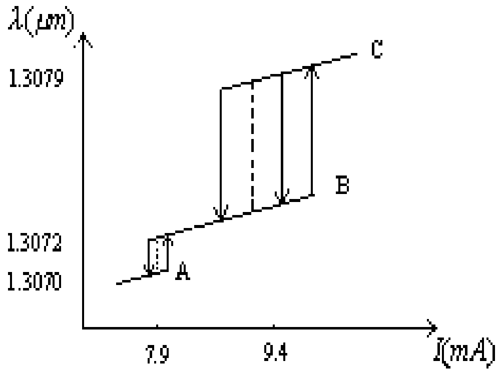
در شكل (۳)، FNS برحسب فركانس براي جريانهاي تزريقي مختلف رسم شده است. رفتار كيفي FNS شبيه RIN بوده و در فركانس‌هاي كمتر از فركانس نوسانات ميرايي نسبتاً تخت است.



شكل ۳- طيف نويز فاز ليزر نيمه‌هادي تك مد بر حسب فركانس به‌ازای ۳ جريان تزريقي مختلف.

۴-نتايج تجربي

در ايـن بخش، نتايج حـاصل از اندازه‌گيـری غيرمستقيم نويز پرش مـد (MHN)[1]، RIN و FNS، براي يك ليزر مخابراتـي (FLD3C5LK) با استفاده از يك اسپكتروم آناليزر ارائـه شده است. ايـن ليزر از نـوع فابـري پرو با جريان آستانه ۷/۳ mA است. MHN زماني مشاهده مي‌شود كه مد اصلي ميان دو مد مجاور در حال پرش است [۱] و [۱۱]. اثر نويز پرش مد با تغيير دما يا تغييرجريان تزريقي اجتناب ناپذير خواهد بود [۱۲]. در شكل (۴)، نتايج حاصل از اندازه‌گيري MHN براي ليزر FLD3C5LK با جريانهاي تزريقي مختلف در دماي اتاق نشان داده شده است. مطابق اين شكل، فركانس مد مركزي با افزايش جريان تزريقي افزايش مي‌يابد و پديده هيسترزيس در حوالی دو جريان ۷/۹ mA (حالت A) و ۹/۴ mA (حالت‌های B و C) مشاهده مي‌شود. در حوالی جريان ۹/۴ mA، به‌دليل اينكه مد تابشي ليزر بين حالت‌هاي B و C رفت و بازگشت مي‌كند، MHN چشم‌گير است.



شكل ٤- نويز پرش مد اندازه‌گيري شده در ليزر نيمه‌هادي FLD3C5LK.

همانطور كه در اين شكل مشاهده مي‌شود، در جريانهاي تزريقي بزرگتر از آستانه (حالت‌هاي B و C)، طول موج نسبت بهجريان نزديك به آستانه (حالت A) پايدارتر است. بنابراين، مي‌توان گفت كه MHN اندازه‌گيري شده با پهنای منحني هيسترزيس رابطه معكوس دارد.

پس از اندازه‌گيري MHN، به‌طور غيرمستقيم، RIN و FNS در ليزر مخابراتي ياد شده اندازه‌گيري مي‌شود. براي اندازه‌گيري با اين روش بهپارامترهاي A ، β_c و N_0 از ليزر نياز داريم. با توجه به اينكه پارامترهاي اشاره شده براي اين ليزر در دست نمي‌باشد، بنابراين براي مقادير اوليه آنها، از جدول (۱) استفاده مي‌كنيم.

با استفاده از يك اسپكتروم آناليزر، مقادير پهناي خط Δf ، توان خروجي P_{out} و فركانس مد اصلي f_0 ، بهدست مي‌آيد. با داشتن اين مقادير مراحل زير را براي اندازه‌گيري RIN و FNS دنبال مي‌كنيم:

مرحله ۱- به‌ازای $\omega = 0$ ، نويز فاز برابر پهناي خط است [۹] و بنابراين داريم:

$$\overline{P} = \frac{R_{sp}}{4\pi\Delta f}(1+\beta_c^2) \qquad (۱۷)$$

1- Mode Hopping Noise

در ابتدا، براي R_{sp} يك مقدار اوليه در نظر مي‌گيريم و $\overline{P}$ را در يك فرايند تكراري بهدست مي‌آوريم.

مرحله ۲- با در نظر گرفتن رابطه (۳) براي به‌دست آوردن تعداد حامل‌ها با فرض يك مقدار اوليه براي γ_e داريم:

$$\overline{N} = \frac{I/q + AN_0 \overline{P}}{\gamma_e + A\overline{P}} \tag{۱۸}$$

سپس مقدار به‌دست آمده را در رابطه زير قرار مي‌دهيم [۹]:

$$\gamma_e = I_{th} / q\overline{N} \tag{۱۹}$$

رابطه فوق مقدار جديدي براي γ_e به‌دست مي‌دهد. اين مقدار را در رابطه (۱۸) قرار مي‌دهيم تا براي $\overline{N}$ مقدار جديدي به‌دست آيد. اين مرحله را تا هنگاميكه مقادير λ_e و $\overline{N}$ كاملاً همگرا شوند، ادامه مي‌دهيم.

مرحله ۳- با توجه به مقادير مرحله قبل، R_{sp} توسط رابطه زير بهدست مي‌آيد [۹]:

$$R_{sp} = \beta\overline{N}/\tau_e = \beta\overline{N}\gamma_e \tag{۲۰-الف}$$

كه در آن

$$\beta = \frac{\zeta\, k\, A\left(\overline{N} - N_0\right)}{\gamma_e \overline{N}\left(E_f - h f_0\right)} T \tag{۲۰-ب}$$

كه براي مقادير $10-3 > \beta > 10-5$، $\zeta \sim 1.4$ و E_f فاصله ترازهاي شبه‌فرمي ناحيه فعال ليزر است.
R_{sp} بهدست آمده از اين مرحله را در رابطه (۱۷) قرار داده و مراحل (۱) تا (۳) را تا زماني كه مقادير R_{sp}، $\overline{P}$، $\overline{N}$ و γ_e ثابت شوند، تكرار مي‌كنيم.

مرحله ۴- درانتها براي محاسبه RIN و FNS، به مقادير فركانس نوسانات ميرايي و آهنگ كاهش نوسانات ميرايي نياز داريم، كه طبق روابط زير بهدست مي‌آيند [۹]:

$$f_r = \omega_r / 2\pi\,; \qquad \omega_r = \left(\frac{A\left(I - I_{th}\right)}{q}\right)^{1/2} \tag{۲۱}$$

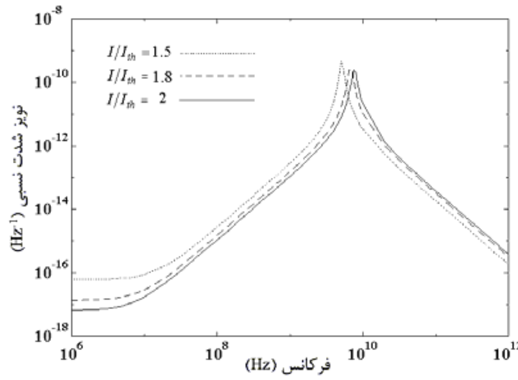
$$\Gamma_R = \frac{1}{2}\left(\Gamma_N + \Gamma_P\right), \tag{۲۲}$$

كه Γ_N و Γ_P با روابط (۷-الف) و (۷-ب) بهدست مي‌آيند. پارامترهاي به‌دست‌آمده را در روابط زير كه از روابط (۸)، (۱۵) و (۱۶) حاصل شده‌اند، قرار مي‌دهيم.

$$RIN = 2R_{sp} \times \left\{\frac{(\Gamma_N^2 + \omega^2) + A^2\,\overline{P}^2\,(1 + \gamma_e\,\overline{N}/R_{sp}\,\overline{P}) - 2A\Gamma_N\,\overline{P}}{\overline{P}[(\omega_r - \omega)^2 + \Gamma_R^2]\,[(\omega_r + \omega)^2 + \Gamma_R^2]}\right\} \tag{۲۳}$$

$$S_{\dot\phi}(\omega) \cong \frac{R_{sp}}{2\overline{P}} \times \left\{1 + \{\beta_c^2 \omega_r^4 / [(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + (2\omega\Gamma_R)^2]\}\right\} \tag{۲۴}$$

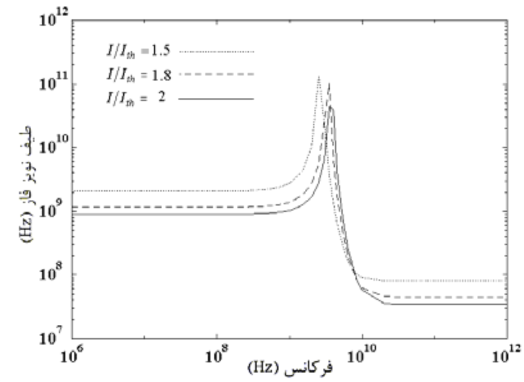
شكل‌هاي (۵) و (۶)، RIN و FNS اندازه‌گيری را برحسب فركانس به ازای ۳ جريان تزريقی متفاوت نشان می‌دهند.



شكل ۵- نويز شدت نسبي اندازه‌گيري شده برحسب فركانس براي ليزر FLD3C5LK به ازای ۳ جريان تزريقي مختلف.

نويز بهازای فركانس نوسانات ميرايي بهبيشترين مقدار خود مي‌رسد و افزايش جريان تزريقي باعث افزايش اختلاف توان بين مد اصلي و مدهاي جانبي مي‌شود، و هر دو نويز RIN و FNS كاهش مي‌يابند.

با مقايسه منحنيهاي (۲) و (۳) بهترتيب با منحنيهاي (۵) و (۶)، مشاهده ميشود كه رفتار كيفي نتايج حاصل از مدل مداري و اندازهگيري با يكديگر مطابقت دارند.



شكل ٦- طيف نويز فاز اندازهگيري شده برحسب فركانس براي ليزر FLD3C5LK بهازای ۳ جريان تزريقي مختلف

۵-نتيجهگيري

دراين مقاله، RIN و FNS يك ليزر نيمههادي تك مد با استفاده از روش مداري بهدست آمدهاست. اين مدل با استفاده از معادلات آهنگ با در نظر گرفتن منابع نويز لنجوين استخراج شدهاست. همچنين دراين مقاله RIN و FNS براي ليزر نيمههادي مخابراتي FLD3C5LK با روش غير مستقيم و توسط اسپكتروم آناليزر نوري اندازهگيري شده است. نتايج بهدست آمده از مدل مداري و اندازهگيري با نتايج حاصل از مراجع [۱] تا [۳] و [۹] مطابقت دارند.

مراجع

[1] K. Petermann, Laser Diode Modulation and Noise, Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic, 1988.

[2] C. Harder, J. Katz, S. Margalit, J. Shacham, and A. Yariv, "Noise equivalent Circuit of a Semiconductor Laser Diode," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-18, No. 3, pp. 333-337, 1982.

[3] T. T. Bich-Ha and J. 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, pp. 304-308, 1997.

[4] G. E. Obarski, and P. D. Hale, "How to Measure Relative Intensity Noise in Lasers," Laser Focus World, May 1992.

[5] Yuh-Jen Cheng, Paul L. ,and E. Siegman, "Measurement of Laser Quantum Frequency Fluctuations Using a Pound-Driver Stabilization System," IEEE J. Quantum Electron., vol. 30, No. 6, pp. 1498-1504, 1994.

[6] Y. Yamamoto, T. Mukai, and S. Saito, "Quantum Phase Noise and Line width of a semiconductor Laser," Electronic Letters, vol. 17, No. 9, pp. 327-329, 1981.

[7] B. Daino, P. Spano, M. Tamburrini, and S. Piazzolla, "Phase Noise and Spectral Line shape in semiconductor Lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-19, No. 3, pp. 266-270, 1983.

[8] Ady Arie and Moshe Tur., "Noise Measurement in Two-Beam Interferometers Excited by Semiconductor lasers with Non-Lorentzian Line Shapes," IEEE J. Quantum Electron., vol. 26, No. 11, pp. 1999-2005, 1990.

[9] G. P. Agrawal and N. K. Dutta, Semiconductor Lasers, 2nd ed., New York: Van Nostrand Reinhold, 1993.

[10] D. E. Dodds, and M. J. Sieben, "Fabry-Perot Laser Diode Modeling," IEEE Photonics Technology letters, vol. 7, No. 3, pp. 254-257, 1995.

[11] M. Ohtsu, and Y. Teramachi, "Analyses of Mode Partition and Mode Hopping in Semiconductor Lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 25, No. 1, pp. 31-38, 1989.

[12] M. R. Alalusi, and R. B. Darling, "Effects of Nonlinear Gain on Mode-Hopping in Semiconductor Laser Diodes," IEEE J. Quantum Electron., vol. 31, No. 7, pp. 1181-1192, 1995.