

وتحسين أداء مسوق ثنائي الليزر عند (1Gb/s) في منظومة الاتصالات الضوئية

تعدّ دائرة مُسَوِّق ثنائي الليزر (LDD) Laser Diode Driver جزءاً مهماً في نظم الاتصالات الضوئية ، حيث تمثل حلقة الوصل بين مصدر البيانات المراد إرسالها والمصدر الضوئي (الليزر)، وان تصميم هذه الدائرة باستخدام تقنية (CMOS) التي تمتاز بتوصيلية (g_m) أقل من التي تمتلكها تقنية (Bipolar)، يعدّ من التحديات التي تواجه مصممي الدوائر الإلكترونية التي تعمل عند سرعة نقل عالية للبيانات (1Gb/s) الليزر يجب أن تُوفّر تياراً عالياً للحصول على قدرة إخراج ضوئية عالية. في هذا البحث تمت دراسة أداء (LDD) من تقنية (0.18 μ m CMOS) تعمل عند معدل نقل للبيانات (1Gb/s) (PSPICE) (2006) (Jitter_{p-p}) هو (110ps)، فضلاً عن تحليل دائرة سيطرة على قدرة إخراج الليزر الضوئية فقد تمت السيطرة على مقدار التغير في تيار الليزر حيث أصبح أقصى تغير هو (5mA) فقط عند تغير درجة (0 – 80°C) وتم تحسين استقرارية دائرة فولتية المرجع المستخدمة في دائرة السيطرة، إذ تم الحصول على فولتية مستقرة مقدارها (819mV) عند تغير فولتية المصدر من (2.15-6V).

الكلمات الدالة: مُسَوِّق ثنائي الليزر ،

Studying and improvement of Laser Diode Driver performance at 1Gb/s in optical communication system

D. Luqman Sufer Ali

Marwan Abdulkhaliq Thannon

ABSTRACT

The Laser Diode Driver (LDD) is an important part in optical communication system; it acts as an interface between the data source and the optical source (Laser). The design of this circuit using CMOS technology which has low conductivity (g_m), (less than from bipolar technology), is a challenge for designers especially at high data rate (>1 GB/s) because LDD must provide high current swing to obtain large optical output power.

In this research a simulation software using Personal Simulation Program with IC Emphasis PSPICE (2006) is used to study the performance of the LDD circuit using (0.18 μ m CMOS technology) at (1 GB/s), the peak to peak jitter is (110ps). In addition analyzing an automatic power control circuit, so that when changing the temperature from (0 – 80°C) the Laser current changing is (5mA), and an improvement of reference voltage circuit has been added, since a constant voltage (319mV) achieved when the power supply voltage changes from (2.15-6V).

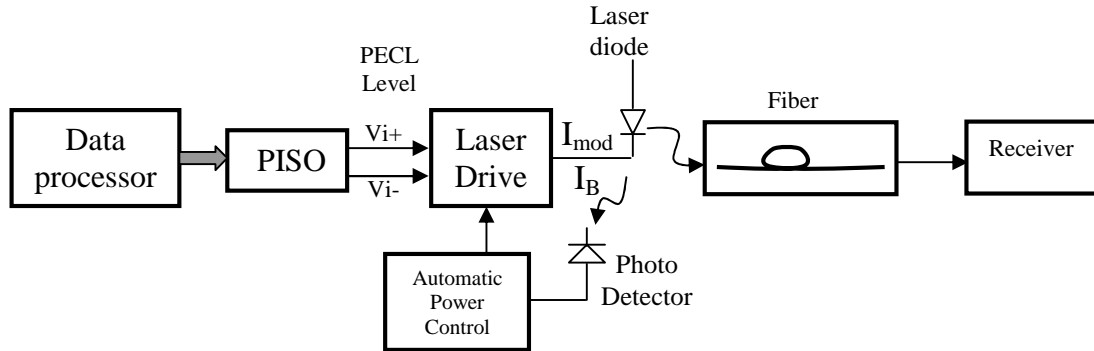
Keywords: Laser Diode Driver , pre-driver , Extinction Ratio.

: 1

أصبحت الشبكات الضوئية (Optical networks) هي الدوائر الأساسية في اتصالات البيانات ذات المسافات البعيدة، وذلك لتفوقها من ناحية الفقد والتداخل القليلين ولأن أداءها الفعال يكون في عرض حزمة واسع. إن الدوائر التناظرية في نهايات المرسلات الضوئية التقليدية تُنفَّذ باستخدام تقنيات مكلفة مثل (GaAs) أو (Bipolar). وقد تم استخدام تقنية CMOS لما تمتلكه من ميزات، مثل كلفة تصنيعها تكون قليلة واستهلاكها القليل. ويمكن بناء دوائر متكاملة ICs عالية وذات أحجام صغيرة [1-3].

تستخدم نظم الاتصالات الضوئية مصادر للضوء من أشباه الموصلات، مثل الليزر (Laser) والثنائي الباعث للضوء (LED)، وكلاهما يمتلك الميزة الجيدة حيث يمكن تطبيق التضمين الرقمي (Digital modulation) مباشرة على تيار الانحياز الذي يؤدي إلى تغير قدرة إخراجها [4].

يبين الشكل (1) المعمارية التطبيقية لمرسلة ضوئية وكيفية الربط بين مراحل دائرة الإرسال، حيث يقوم (PISO) بتحويل البتات الداخلة المتوازية إلى سيل من البتات المتوالية لغرض الإرسال المتتابع. إن سيل البتات المتتابع والتي تكون ذات سرعة عالية وبمسئولية الفولتية Positive Emitter Couple Logic (PECL) وتساوي (300mV_{pp})، تحول إلى نبضات ضوئية خلال عملية التضمين للمصدر الضوئي مثل الليزر، ثم بعد ذلك ترسل إلى الليف الضوئي عن طريق إقران الليف الضوئي مع الليزر. ويتم التمييز بين المستويين "1" و "0" عن طريق نسبة الانطفاء (ER) Exinction Ratio للليزر التي تكون ذات علاقة مع تيار التضمين (I_{mod}) في دائرة مسوق الليزر، ولتقليل زمن تأخير الاشتغال (Turn-On Delay (TOD) للليزر فإن دائرة المُسَوِّق يجب أن تزود بتيار انحياز مستمر إضافي (I_B)، الذي تكون قيمته أكبر من تيار العتبة (I_{th}) للليزر. إن تيار العتبة للليزر يتغير بتقدم عمر الليزر وأيضاً بزيادة درجة الحرارة، ولهذا السبب يُرفق مع الليزر ثنائي للضوء لكي يتحسس بالقدرة الضوئية المنبعثة من الليزر، وينتج تياراً يمر في الثنائي الكاشف للضوء (I_{PD})، يستخدم للسيطرة على قدرة الإخراج عن طريق دائرة (APC) Automatic Power Control [5].



(1) منظومة الاتصال الضوئية

2 تمثيل الليزر بدائرة كهربائية مكافئة [6]:

إن الغرض من تمثيل الليزر بدائرة كهربائية مكافئة هو لإثبات أنه يمتلك خطأ طيفياً حاداً (sharp spectral line) أي أن طاقة الضوء الخارجة تكون متمركزة حول تردد (طول موجي) واحد. يوضح الشكل (a-2) الدائرة المكافئة لليزر.

تمثل عناصر الدائرة كما في المعادلات (1) (2) (3) (4) بتردد الرنين للشكل (a-2) يُعطى (5)، وبحسب هذه المعادلة يمكن زيادة تردد الرنين عن طريق تقليل (C_i L_i). يوضح الشكل (b-2) حزمة الليزر (spectral line width).

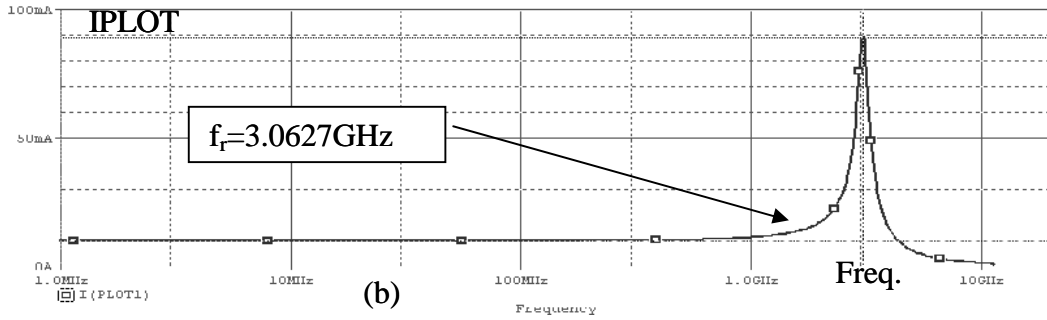
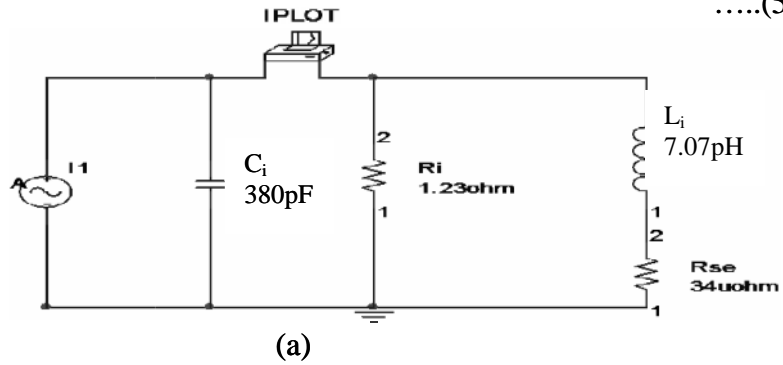
$$R_i = R_d / (n_{ph} + 1) \quad \dots(1)$$

$$L_i \approx R_d \tau_p / n_{ph} \quad \dots(2)$$

$$C_i = \tau_n / R_d \quad \dots(3)$$

$$R_{se} \approx \beta' R_d \frac{n_e}{(n_{ph})^2} \quad \dots(4)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}} \quad \dots(5)$$



(2): (a) تمثيل الليزر بدائرة كهربائية

(b) استجابة الليزر تيار (10mA)

يوضح الجدول (1) عناصر دائرة الليزر الكهربائية المكافئة لليزر. عند تعويض قيم (L_i, C_i) (5) يكون تردد الرنين كما يأتي:

$$f_r = \frac{1}{2 \times 3.14} \frac{1}{\sqrt{7.07 \text{ pH} \times 380 \text{ pF}}} = 3.07 \text{ GHz}$$

تعتمد قيم (C_i, L_i) على معاملات الليزر ويمكن زيادة تردد الرنين بالطرائق الآتية:

1. تقليل فترة ديمومة الفوتونات (p) .

2. زيادة كثافة الفوتونات (n_{ph}) .

3. زيادة عامل الكسب (g_0) الذي يرفع كثافة الإلكترونات.

وبتعويض المعادلات (2) (3) (5)

(6) لليزر التي تكون بدلالة معاملات

الليزر.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_{ph}}{\tau_n \tau_p}} \quad \dots(6)$$

(1)

Parameter	Description
R_d	مقاومة الليزر التفاضلية
n_{ph}	$S(t)$
n_e	$N(t)$
R_{se}	تمثيل الاضمحلال الناتج من الانبعاث التلقائي ^(a)
R_i	تتضمن مقاومة الليزر التفاضلية
C_i	
L_i	تظهر من تحليل الإشارة الصغيرة للمعادلات النسبية وتمثل ظاهرة الرنين مع C_i

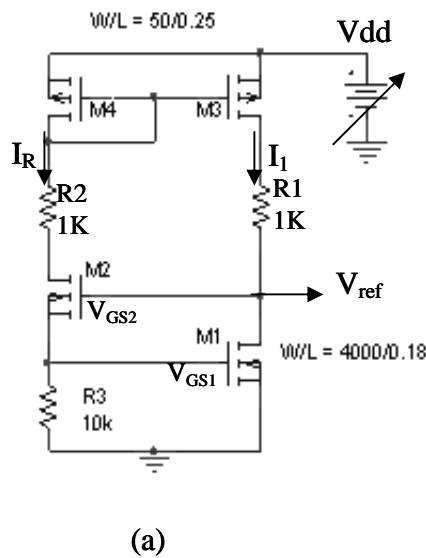
3 دائرة فولتية المرجع لدائرة السيطرة (APC) [7]:

إن تغير فولتية المرجع (V_{ref}) لدائرة السيطرة يؤثر تأثيراً كبيراً في استقرارية عمل دائرة السيطرة (APC) على قدرة إخراج الليزر الضوئية، وهذه الدائرة موضحة في (a-3).

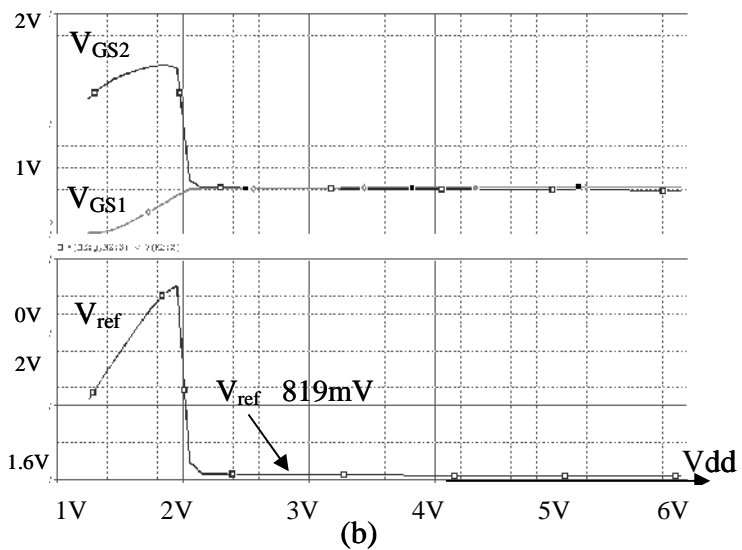
إن مبدأ عمل هذه الدائرة يكون بـ التيار (I_1, I_R) في الشكل ثابتين، ومن ثم فإن الفولتية (V_{ref}) يمكن إيجادها حسب المعادلة ($V_{ref} = V_{GS1} + V_{GS2}$)، وعندما تزداد الفولتية (V_{dd}) يزداد التيار (I_1) (7) (V_{GS1}) . وعلى أية حال فإن زيادة الفولتية (V_{GS1}) يعني زيادة الفولتية عبر المقاومة (R_3)، ويؤدي إلى انخفاض الفولتية (V_{GS2}) ومن ثم انخفاض التيار (I_R) ويؤدي إلى انخفاض (V_{GS1}) ومن ثم انخفاض التيار (I_1)

$$I_1 = \frac{1}{2} K_n \times \frac{W_1}{L_1} \times (V_{GS1} - V_{TH})^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

وبهذا يـ التياران (I_1, I_R) ثابتين والفولتية (V_{ref}) ثابتة وهذا واضح في (b-3).



(a)



(b)

(3) : (a) دائرة فولتية المرجع ($V_{ref1} 819mV$)
(b) الشكل الموجي للفولتيات ($V_{GS1}, V_{GS2}, V_{ref}$)

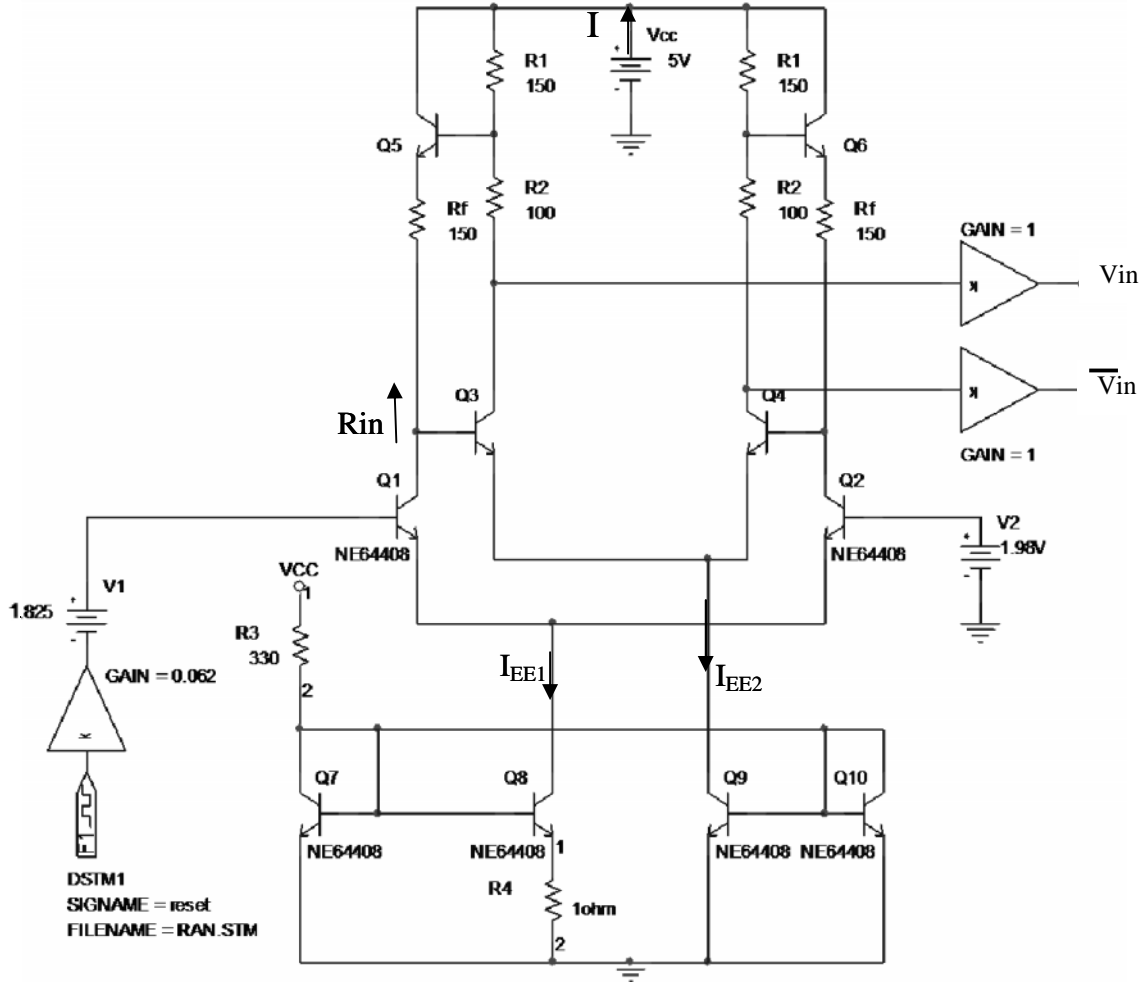
:Laser Driver Circuit

4- دائرة مسوق الليزر [8]

تتكون دائرة مُسوق الليزر من دائرة المُسوّق الابتدائي (pre-driver) كما في الشكل (4) يكون عمل دائرة المُسوّق الابتدائي (CHHA) زيادة مقدار تَارجح فولتية الإدخال لزيادة تَارجح تيار الليزر، ومن ثم الحصول على نسبة انطفاء عالية (ER)، وعملها كما يأتي:

التيار الذيلي (Tail current) وهو تيار الباعث المشترك لـ (Q3 , Q4) وهو (I_{EE2}) يحدد تَارجح فولتية الإخراج. إنَّ اختيار المقاومات ($R1, R2, R_f$) سيحدد الكسب وعرض الحزمة. وقد تم اختيار المقاومة ($R1$) أولاً للحصول على التَارجح المطلوب للفولتية، ومن ثم يتم تغيير كل من (R_f , $R2$) يكون ($I_{EE1} < I_{EE2}$).

الترانزستوران (Q5 , Q6) الموصولان بهيئة تابع الباعث يعملان على تجنب حدوث هبوط في الكسب، وذلك عن طريق زيادة مقاومة إخراج المرحلة الأولى وهي مقاومة الإدخال (R_{in}) التي تكون كبيرة في حالة ربط تابع الباعث، كما هي موضحة في الشكل (4).



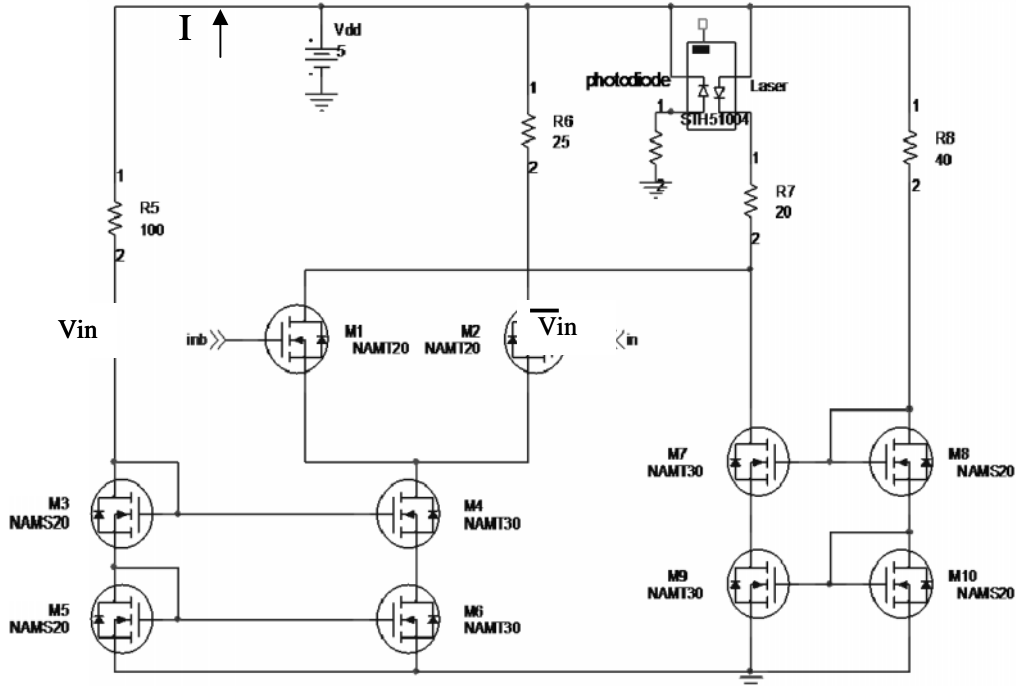
(Bipolar) باستخدام تقنية (pre-driver)

: (4)

أمّا دائرة المُسوق فتتكون من مصدرين للتيار من نوع (Cascode current source) (5) ويتكون المصدر الأول من (M3 , M4 , M5 , M6) والثاني يتكون من (M7 , M8 , M9 , M10)، ويقوم مصدر التيار الأول بتجهيز تيار التضمين (I_{mod})، ويكون التحكم به عن طريق ($R5$)، أما بالنسبة للتيار (I_B) فيكون تجهيزه من مصدر التيار الثاني، ويكون التحكم به عن طريق المقاومة ($R8$).

تتكون الدائرة أيضاً من زو للتيار (current switch).

"1" يكون (M1) في حالة توصيل و (M2) في حالة قطع، وبذلك يكون التيار المار في الليزر هو $(I_{L,on} = I_B + I_{mod})$ وقدرة إخراج الليزر هي (P_1) ، أما عند إرسال البت "0" فإن (M2) يكون في حالة توصيل، أما (M1) فيكون في حالة قطع ويكون تيار الليزر $(I_{L,on} = I_B)$ وقدرة إخراج الليزر هي (P_0) .



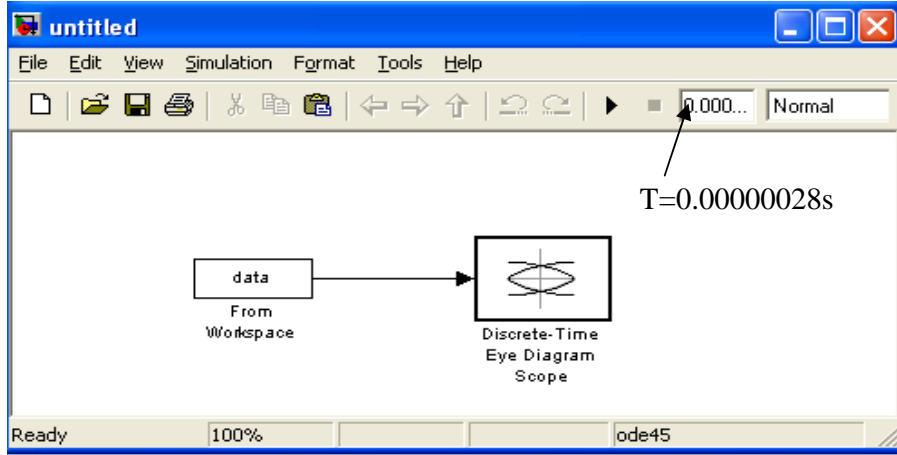
(5) دائرة مُسوِّق الليزر

: -5

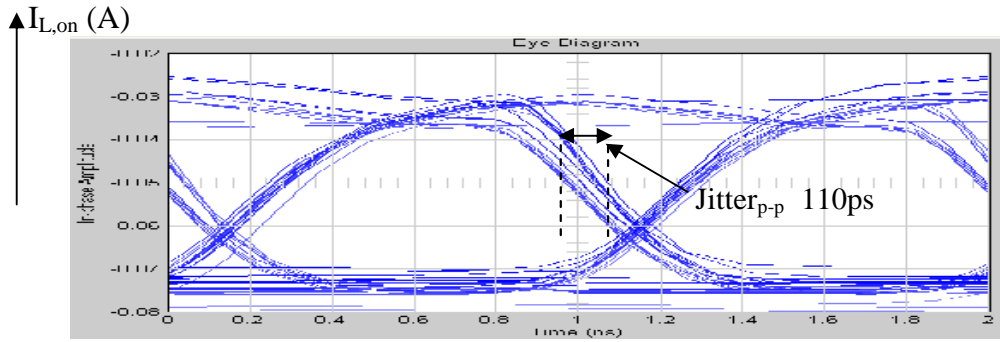
(a-6) يوضح الطريقة المستخدمة لرسم مخطط العين لتيار الليزر عند إشارة تضمين (1Gb/s) بزمن تقطيع (sample time = 0.01ns). (b-6) هو مخطط العين الناتج، وقد تم استخدام (Discrete-Time eye diagram scope) (a-6)

تم توظيف تقنية التحويل (single-ended to differential technique) في دائرة مُسوِّق الليزر، وذلك باستخدام مرشح الترددات الواطئة (R1 و C1) كما موضح في الشكل (a-7)، حيث يعمل على استخراج المستوى المستمر (dc level) من إشارة الإدخال ويقوم بتسليط الناتج على بوابة (M68)، وبذلك يكون إخراج الزوج التفاضلي (M68, M69) متناظراً. والشكل (b-7) يوضح إشارة الإدخال وتيار الليزر، ونلاحظ أن مقدار التآرجح لتيار الليزر هو (5.5mA) وهو قليل نسبياً، وذلك بسبب عدم استخدام (pre-driver). (c-7) (40mA)

: دراسة وتحسين أداء مسوق ثنائي الليزر عند (1Gb/s) في منظومة الاتصالات الضوئية



(a)



(b)

(6) : طريقة رسم مخطط العين باستخدام برنامج MATLAB
(b) مخطط العين لتيار الليزر

مقدار القدرة الساكنة المستهلكة في دائرة المُسَوِّق الابتدائي وحدها هي
($P_{diss} = V_{dd} \times I = 5 \times 48mA = 240mW$.)

ولغرض حساب نسبة الانطفاء (ER)، عند قيمة تيار الليزر ($I_{L,on}=75mA$) من الشكل (6)، ومن نتائج المحاكاة باستخدام برنامج (MATLAB) كان مقدار كثافة الفوتونات ($S(t) = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)، وباستخدام المعادلة التالية [9] (P_1) كما يأتي:

$$P_f = \frac{S(t) \cdot V_{act} \cdot \eta \cdot h \cdot c}{\Gamma \cdot \tau_p \cdot \lambda_o} = S(t) \times Gain \quad 4 \quad \dots(8)$$

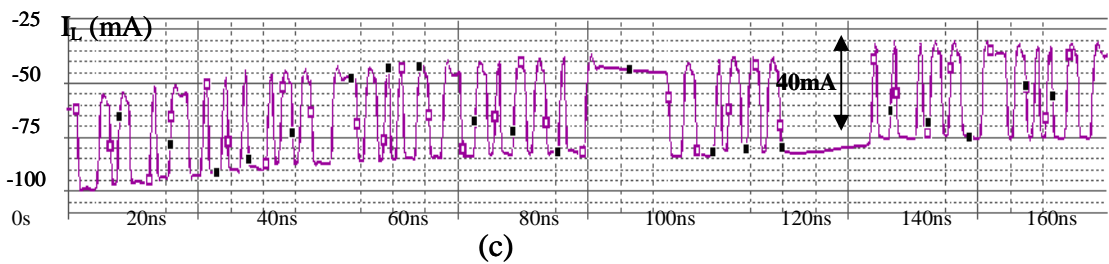
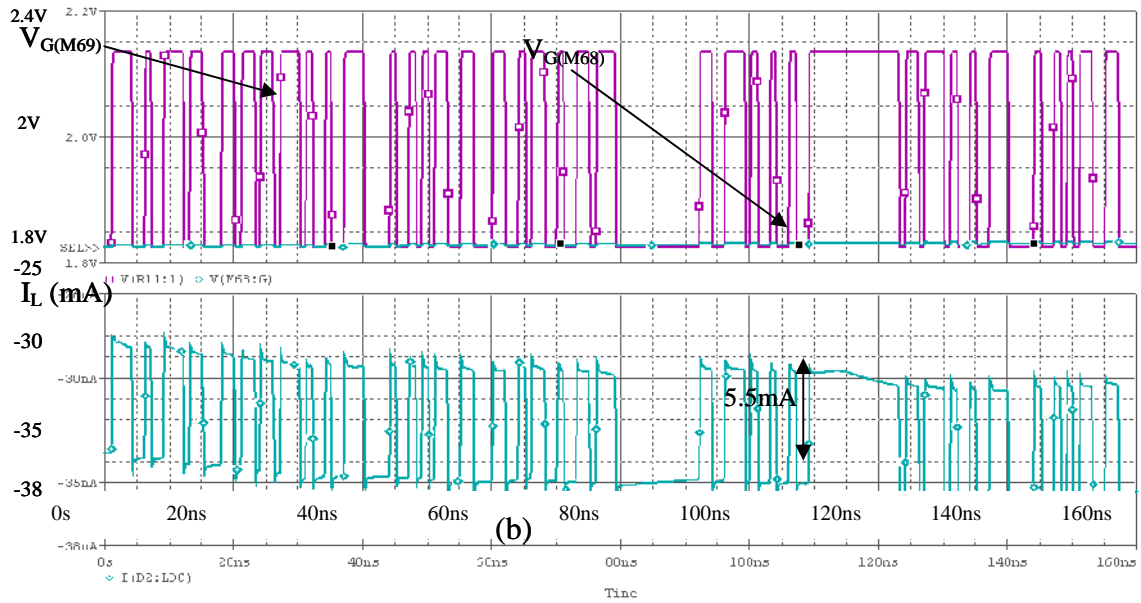
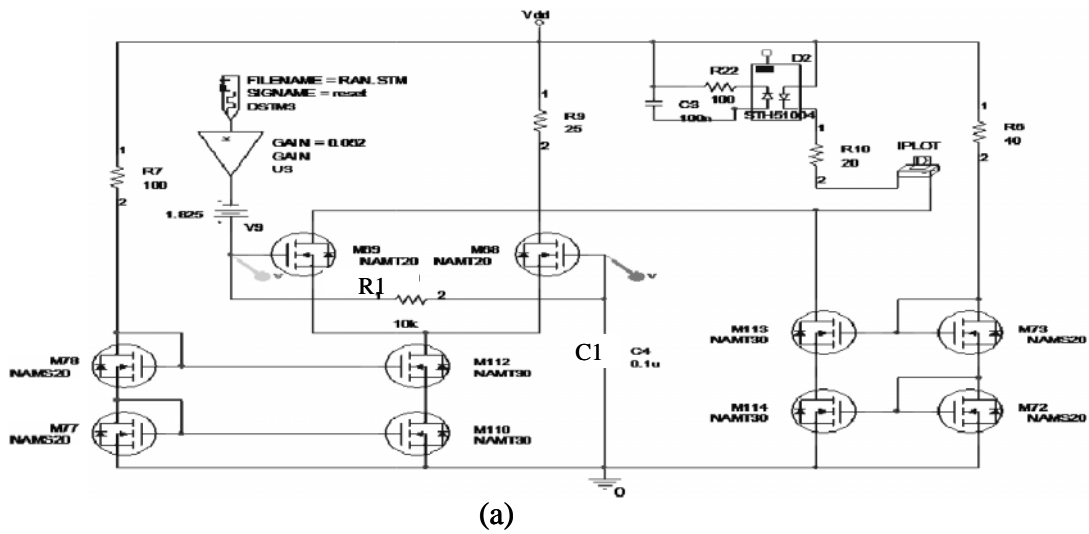
$$P_1 = S(t) \cdot Gain \quad 4 = 2 \times 10^{15} \times 3.126 \times 10^{-18} = 6.252 \text{ mW}$$

في حين تكون قدرة الإخراج (P_o) بدون تيار التضمين ($I_L=I_B=35mA$) وعند كثافة فوتونات ($S(t) = 7.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) كما يأتي:

$$P_o = S(t) \cdot Gain \quad 4 = 7.8 \times 10^{14} \times 3.126 \times 10^{-18} = 2.4 \text{ mW}$$

(ER) كما يأتي:

$$ER = \frac{P_1}{P_o} = \frac{6.252 \text{ mW}}{2.4 \text{ mW}} = 2.6 = 4.15 \text{ dB}$$



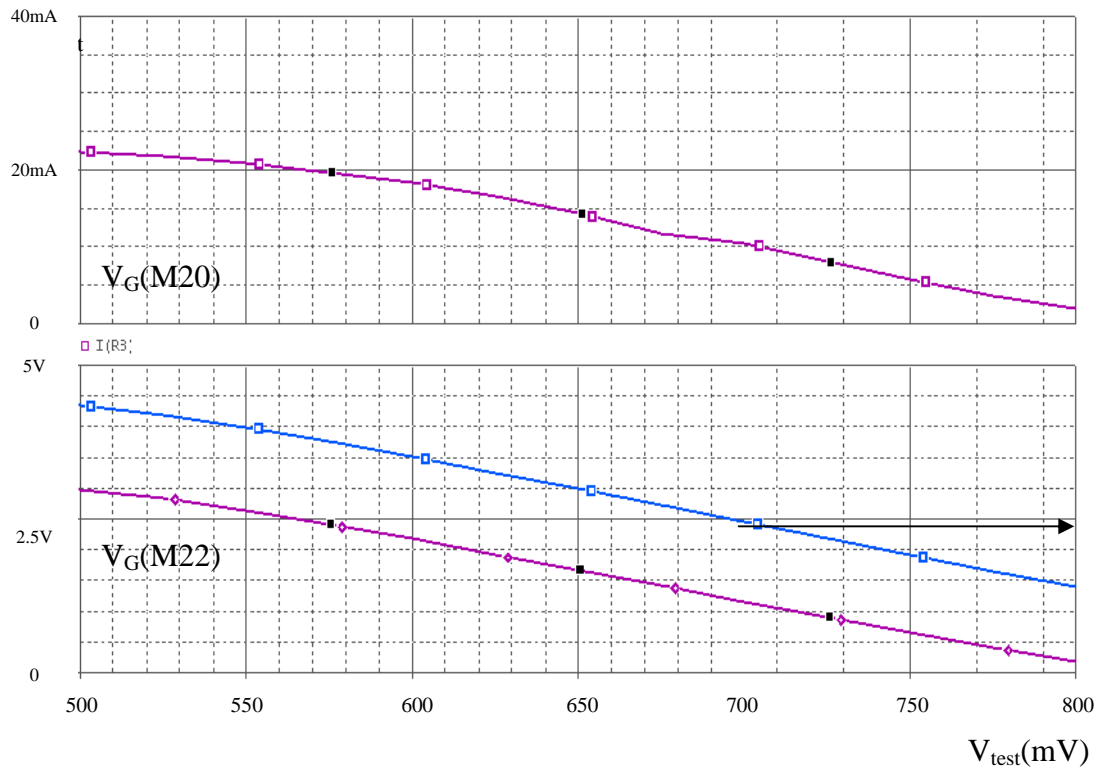
(a) : (7)
 (b) الرسم الأول يمثل الفولتية لكل من $(V_{G(M68)}, V_{G(M69)})$ ، والرسم الثاني يمثل تيار الليزر (pre-driver)

(c) تيار الليزر في حالة استخدام دائرة مُ

$$I_L = I_B + I_{mod} + I_{cont}$$

ويجب أن يعمل الترانزستور (M22) في منطقة الـ (Triode region) دائماً، وهي المنطقة التي تكون فيها الفولتية (M22)، حيث يكون تغير الفولتية (V_{DS}) خطياً مع التيار ($I_{D(M22)}$) الذي هو (I_{cont}) ($V_{DS} < (V_{GS} - V_{TH})$).

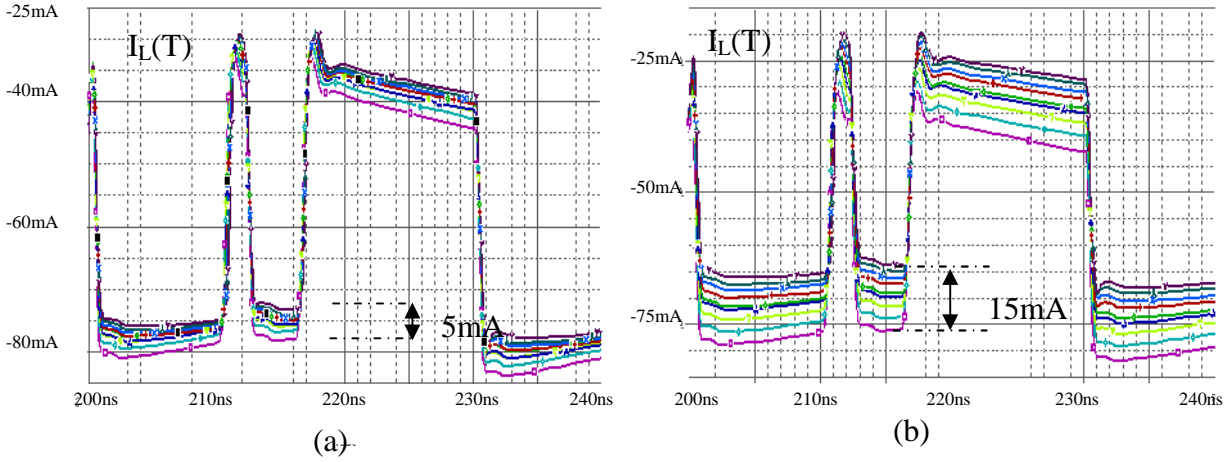
تم فحص دائرة السيطرة عن طريق معرفة قيمة الفولتيات المتكونة على مرشح الترددات الواطئة المتكون من (C_1 R_9)، الناتجة من تغير تيار الكاشف الضوئي بسبب تغير قدرة الإخراج الضوئية المنبعثة من الليزر، فكانت قيمة الفولتيات تتراوح بين ($V_{GS(M12)} = 500-800mV$) عند تغير درجة الحرارة بين ($0-80^\circ C$)، بعدها تم فصل دائرة السيطرة عن الكاشف الضوئي المرفق مع الليزر (الفرع المشار إليه بـ I_{pd}) (8)، وتم ربط مصدر فولتية متغير (V_{test}) إلى بوابة ترانزستور (M12) بدلاً من المرشح (C_1 R_9)، وتم تغييرها مثل مدى تغير الفولتية السابقة ($V_{GS(M12)}$) ($25mV$) لمعرفة مقدار تغير الفولتية على بوابة كل من الترانزستورين (M22, M20).



(9): الرسم الأول يوضح تيار الفرع الإضافي (I_{cont}) لليزر،
الرسم الثاني هو فولتية البوابة لترانزستورات (M22, M20) على الترتيب.

تم تغيير فولتية المرجع (V_{ref1}) وذلك للحصول على تغير خطي بشكل تقريبي على بوابة كل من الترانزستورين (M22, M20) وكما موضح في الشكل (9)، ومن ثم يتم الحصول على تغير خطي في التيار (I_{cont}) (R_{10}) وهو الفرع المضاف إلى الليزر للسيطرة على القدرة الضوئية الخارجة، وكما موضح في (8).

(a-10) نلاحظ أن مقدار التغير في تيار الليزر بوجود دائرة السيطرة يكون (5mA) تقريباً، وكما . أما في حالة عدم استخدام دائرة السيطرة فإن التغير في تيار الليزر يكون (15mA) تقريباً كما في (b-10).



(10) : (a) يوضح تغير تيار الليزر مع تغير الحرارة (0 – 80°C) دائرة السيطرة
(b) يوضح تغير تيار الليزر مع تغير الحرارة (0– 80°C) بدون دائرة السيطرة

: -7

من البحث يمكن تلخيص أهم الاستنتاجات:

1. بعدد دائرة مسوق الليزر أكثر استهلاكاً للقدرة لأن تشغيل الليزر يحتاج إلى تيار عالٍ، حيث إن مقدار القدرة المستهلكة فيها هو (345mW) في حين مقدار القدرة المستهلكة في دائرة المسوق الابتدائي هي (240mW).
2. تكون التيارات المارة في الليزر ثلاثة تيارات (I_B و I_{mod} و I_{cont})، ويُستخدم (I_B) لتقليل (TOD)، ويُستخدم (I_{mod}) وهو تيار التضمين لتغيير قدرة إخراج الليزر بين المستويين "1" و "0"، في حين يُستخدم التيار (I_{cont}) لزيادة تيار الانحياز لكي يعوض عن الزيادة في (I_{th}) بسبب زيادة الحرارة.
3. (ER) عالية يجب أن يسبق مرحلة مسوق الليزر مرحلة مسوق ابتدائية (pre-driver) وذلك لزيادة قيمة تأرجح الفولتية عند إدخال مرحلة المسوق ومن ثم زيادة مقدار تأرجح التيار في الإخراج مما يجعل عملية كشف الإشارة أسهل. ومن خلال نتائج المحاكاة كان مقدار التأرجح في تيار الليزر بدون مرحلة المسوق (5.5mA)، في حين أصبح التأرجح (40mA).
4. يمكن لدائرة السيطرة على قدرة إخراج الليزر الضوئية أن تتدبّع السرعة العالية للتضمين، لذلك يتم أخذ معدل التغير للإشارة الناتج من تغير درجة الحرارة عن طريق توصيل الثنائي الباعث للضوء بمرشح للترددات الواطئة.
5. إن خصائص الليزر تتغير مع الحرارة لذلك يُرفق مع معظم الليزر ثنائي ضوئي وذلك لغرض السيطرة على قدرة الليزر عن طريق (APC).

[1] : Sungyong Jung (2004) "Parasitic Modeling and Analysis for a 1-Gb/s CMOS Laser Driver" IEEE. Volume 51, Issue 10, Oct. 2004 Page(s):517 - 522

[2] : Jafar Savoj ,Behzad Razavi (2000) "A 10-Gb/s CMOS Clock and Data Recovery Circuit" IEEE .VLSI Circuit Digest of Technical Papers. 15-17 June 2000 Page(s):136 - 139

[3] :Cheng-Ta Chan (2001) "A 2.5Gb/s Low-Power CMOS Optoelectronic Transceiver for Optical Communication" IEEE Volume 1, 14-17 Aug. 2001 Page(s):381 - 384 vol.1

[4] :Joe Ciancio, (2005) "1Gb/s Fiber Optic Transmitter design using Intersil Digitally Controlled Potentiometer (XDCCP) ICs" www.intersil.com/data/an/an140.pdf

[5] :Guo-Cheng Chen (2002) "A 2.5 Gbps CMOS Laser Diode Driver with Preemphasis Technique" IEEE. 6-8 Aug. 2002 Page(s):65 - 68

[6]:: M. S. Ozyazici* (2004) " THE COMPLETE ELECTRICAL EQUIVALENT CIRCUIT OF A DOUBLE HETEROJUNCTION LASER DIODE USING

SCATTERING PARAMETERS" Journal of Optoelectronics and Advanced Materials
Vol. 6, No. 4, December 2004, p. 1243 – 1253

[7]: AMIR M. SODAGAR^{1,2} AND KHALIL NAJAFI² (2006) " Extremely-Wide-
Range Supply-Independent CMOS Voltage References for Telemetry-Powering
Applications" Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 46, 253–261,
deepblue.lib.umich.edu/bitstream/2027.42/44083/1/10470_2006_Article_1644.pdf

[8]:Chris D. Holdenried (2003) " Modified CMOS Cherry-Hooper Amplifiers with
Source Follower Feedback in 0.35 μm Technology" IEEE 16-18 Sept. 2003 Page(s):553
- 556

[9]: M.Deaghan (2008) "A Novel Dynamic Analysis and Simulation for Quantum-Well
Distributed Feedback Laser (QW-DFB)" .Progress in Electromagnetic Research B,
vol.3, 105 114. ceta.mit.edu/PIERB/pierb03/08.07120704.pdf

[10]: P. Zivojinovic, M. Lescure, and H. Tap-B eteille (2004) " Design and Stability
Analysis of a CMOS Feedback Laser Driver" IEEE transactions on instrumentation and
measurement, vol. 53, no. 1, February 2004