

Design of ZnO Nanowire Laser Single Mode and Study Its Properties

Ahmed A. Ahmed

Physics Dept., Education College
University of Mosul, Mosul, Iraq
ahmedalnajary30@gmail.com

Rafid A. Abdulla

Biophysics Dept., Science College
University of Mosul, Mosul, Iraq

Received Accepted
05/04/2018 04/07/2018

Abstract

Designing of single-mode ZnO nanowire laser has been achieved. Studying its properties has also been considered. Analysis of single-mode rate equations indicates that the laser has threshold current of 53 mA, the output power of 30 mW at bias current of 70 mA and the slope efficiency around 1.77 mW/mA for the output power from both mirrors. The critical diameter for nanowire has been calculated and it is found to be 128 nm. The number of nanowire rods through designed area of dimensions ($21\mu\text{m}\times 21\mu\text{m}$) has also been calculated. The cavity of nanowire laser is (F-P). The results are compared with some experimental work of ZnO nanowire lasers and good agreement is found.

Keywords: ZnO nanowire laser , Ultraviolet (UV) , Threshold current , power output , Fabry-Perot (F-P) micro cavity , waveguide .

تصميم ودراسة خواص ليزر نانو واير ZnO احادي النمط

رافد احمد عبد الله
كلية العلوم ، قسم الفيزياء الحياتية
جامعة الموصل
1234@uomosul.edu.iq

احمد علي احمد
كلية التربية للعلوم الصرفة ، قسم الفيزياء
جامعة الموصل
ahmedalnajary30@gmail.com

تاريخ القبول
2018/07/04

تاريخ الاستلام
2018/04/05

الخلاصة

تم في هذا البحث تصميم ليزر نانو واير ZnO يعمل بنمط منفرد وتم دراسة خواصه ايضاً. من تحليل معادلات المعدل للنمط المنفرد لهذا الليزر، وجد أن له تيار عتبة بحدود 53 mA ، وقدرة خرج ليزر بحدود 30 mW عند تيار انحياز 70 mA وذو كفاءة ميل بحدود 1.77mW/mA عند قدرة الخرج الكلية من كلتا المرأتين ، وقد تم حساب القطر الحرج وهو قل قطر لازم ليعمل النانو واير ZnO بنمط منفرد وقد وجد انه بحدود 128 nm. كما تم حساب عدد أعمدة النانو واير الموجودة خلال مساحة مصممة بأبعاد (21µm×21µm) وأن تجويف النانو واير ZnO يعمل كتجويف فابري-بيروت (F-P) ، وقد تم مقارنة النتائج النظرية مع النتائج العملية لبعض ليزرات نانو واير ZnO ووجد تطابق جيد بينهما.

الكلمات الدالة: ليزر نانو واير ZnO ، الأشعة فوق البنفسجية (UV) ، تيار حد العتبة ، القدرة الخارجة، تجويف فابري-بيروت (F-P) Fabry-Perot ، دليل الموجة .

المقدمة

إن ليزر شبه موصل نانو واير يعد كدليل موجة فريد من نوعه الذي ينشأ عن قابليته لإظهار الصفات الفوتونية أو الحصر الالكتروني في بعدين [1]. يعتبر اوكسيد الزنك ZnO هو احد اهم مواد اشباه الموصلات الواعدة في منطقة الفوق البنفسجية (UV) بسبب امتلاكه فجوة طاقة كبيرة نسبياً (3.37 eV) وعند درجة حرارة الغرفة وبطاقة ربط إكسيتون وهي طاقة ربط (الالكترن- فجوة) بحدود 60 meV [2]. ليزرات اشباه الموصلات التي تعمل في مدى الأشعة فوق البنفسجية (UV) هي واسعة الاستعمال في التطبيقات الفوتونية ، نقل المعلومات ، خزن المعلومات، علوم الحياة ، العلاجات الطبية ومعالج الإشارة كما وان هذه التطبيقات في تزايد مستمر بالتوازي مع التحسن في المواصفات المرغوبة [3,4] . من خصائص النانو واير بصورة عامة انه في بعد واحد (1D) وذو فجوة طاقة مباشرة ، وكذلك ذو معامل انكسار عالٍ مما يسمح بتكوين دليل موجة ذاتي إذ هناك فرق

كبير بين معامل انكساره ومعامل انكسار الوسط المحيط به (الهواء عادة) , وكذلك ذو طيف واسع من الأطوال الموجية التي يمكن الحصول عليهما بسبب الاختلاف في فجوات الطاقة بحسب المادة المستعملة في صنع النانو واير [5]. من المعروف بأن الليزر التي تعمل بضخ كهربائي تكون افضل اداءً وتفضل في اغلب تطبيقات الليزر عن تلك التي تعمل بضخ ضوئي , وبالنسبة لليزر اشباه الموصلات فإن اغلب تطبيقاته تتطلب ضخ كهربائي لليزر المستعمل. ومن هنا جاءت اهمية تصميم وتصنيع ليزرات نانو واير تعمل بالضخ الكهربائي [6].

هناك كثير من المجاميع البحثية ذكرت طريقة الضخ الضوئي لليزر نانو واير ZnO [6,7]. لكن على العكس هناك عدد قليل من الابحاث التي تصف [8]. الضخ الكهربائي لليزر نانو واير. بلورة كبريتيد الكاديوم (CdS) النقية نانو واير ١ سليكون متعدد الوصلات قد استعملت لتصنيع ليزر نانو واير بطريقة الضخ الكهربائي وتم ذلك بواسطة Duan واخرون [8] . فتم الحصول على ليزر بطول موجي بحدود 509 nm وبتيار عتبة $200 \mu A$ [8]. ان طريقة الضخ الكهربائي في منطقة الاشعة فوق البنفسجية لسلوك الليزر المكون من تركيب شبه موصل متعدد الوصلات عند درجة حرارة الغرفة قد وصف من قبل العالم Zhang [9] . إذ اثبت عملياً صفة احادية اللون لليزر الخارج من هذه التراكيب بتسليط تيار انحياز امامي قليل نسبياً بحدود 24 mA وقد تم الحصول على انبعاث ليزري عشوائي بثلاث قمم عند الأطوال الموجية على التوالي هي 390.4 nm و 386.8 nm و 394.0 nm [9] . Chu. S . واخرون [4]. إذ حصل على انبعاث ليزري من نانو واير ZnO في مدى الاشعة فوق البنفسجية القريبة وبطول موجي 385 nm وبتيار حد عتبة 50 mA وقدرة خرج ليزري عند تيار انحياز 40 mA كما وضح هؤلاء الباحثون اساس عمل الليزر النانوي بضخ كهربائي بانبعاث ليزري ذو اتجاهية عالية وليست عشوائية إذ اوضحوا ان الليزر ذات الانبعاث العشوائي تكون غير كفوءة وذلك لانه من الصعب السيطرة على عملية الضخ الضوئي لهذا النوع من الليزر باستخدام مرنان فابري- بيروت (F- Fabry-Perot P) عند درجة حرارة الغرفة وبأسلوب الضخ المستمر [4].

إن نوعية النمط الذي يعمل به الليزر عامة و ليزرات اشباه الموصلات خاصة مثل ليزر نانو واير ZnO يعد واحداً من اهم خواص الليزر والتي تحدد نوعية تطبيقاته مثلاً في الاتصالات الضوئية , المتحسسات ومعالجات الإشارة , لذلك فإن الحصول على ليزر نانو واير يعمل بنمط منفرد , اضافة إلى الضخ الكهربائي وبصيغة مستمرة , يمثل الخطوة الاولى باتجاه معظم التطبيقات المميزة والمرغوبة مما يؤدي إلى فتح ابواب لبحوث عديدة ومتنوعة في مختلف نواحي ومجالات النانو واير ليزر [10].

إن تصغير النبائط الفوتونية ومن ضمنها الليزر النانوية يعد من الامور المهمة التي قد حظيت بعناية كبيرة من قبل العديد من الباحثين , وذلك لخواصها الفريدة من المرونة العالية في التعامل والاداء الافضل , اضافة إلى الكثافة العالية في التكامل في الدوائر الالكترونية [10] . إن تصغير الليزر إلى اقل حد ممكن , في حدود النانو متر حالياً , يمكن ان يجلب العديد من المنافع للتطبيقات التقنية المتنوعة , مثل قلة القدرة المستهلكة نتيجة لقلة تيار الانحياز مما قد يزيد من سرعة التضمين والكثافة العالية للتكامل في الدوائر المتكاملة [11,12] .

في هذا البحث سيتم تناول كيفية تصميم ليزر نانو واير ZnO يعمل بنمط منفرد وتحديد الشروط اللازمة لذلك من طول وقطر نانو واير مناسب ودراسة خواصه.

1- تصميم ليزر نانو واير ZnO :

ان شكل النانو واير ZnO من حيث المقطع العرضي , الذي هو في الواقع سداسي مضلع , يمكن اعتباره على انه اسطواني الشكل تقريباً، وهذه المقاربة مقبولة ومعتمدة من قبل عدد كبير من الباحثين [1] . ان هذه الليزرات تعزز عملية الحصر الضوئي وكسب العتبة في مثل هذه الليزرات [3] .

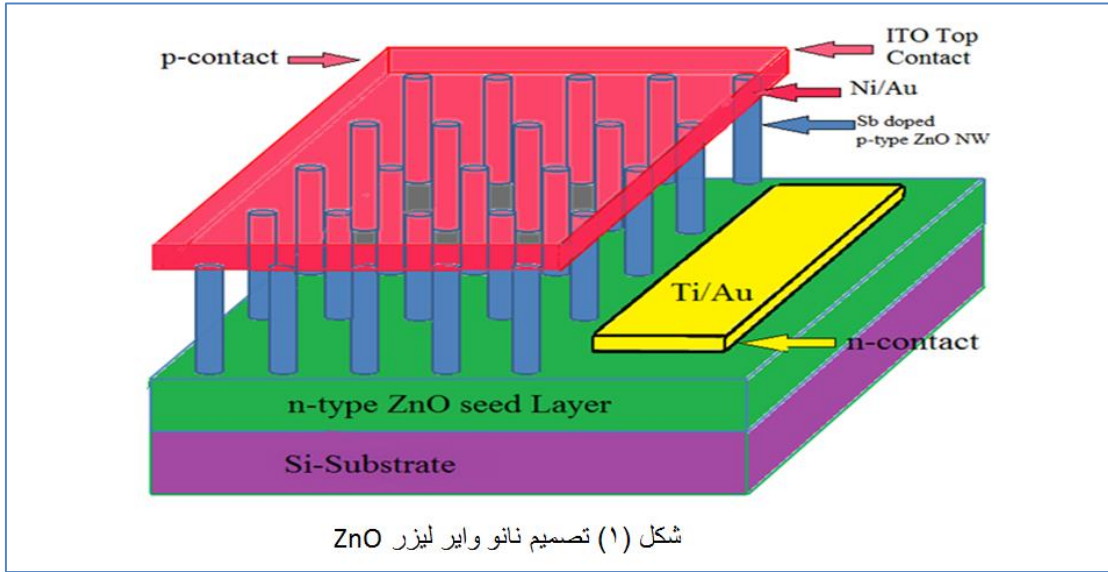
إن تصميم ليزر نانو واير ZnO قيد الدراسة هو يشابه في بعض جوانبه من حيث التركيب لليزر المقدم من قبل Chu.S [4] . الانعكاسات من نهاية سطح النانو واير يعد واحداً من المعلمات الكبيرة الاهمية بالنسبة لليزر النانو واير التي تعتمد على مرنان فابري- بيروت (FP) والتي من شأنها تحديد نوعية الفجوة وبالتالي تيار عتبة الليزر [4] . ان ليزر اشباه الموصلات ZnO ذو الطول الموجي 385 nm الواقع ضمن منطقة الاشعة فوق البنفسجية UV والذي يعمل بالصيغة المستمرة وبدرجة حرارة الغرفة يكون منتظم ذاتياً وطبيعياً اثناء عملية الانماء بطريقة البخار الكيميائي المنتقل والمنتكاف (CVTD) Chemical Vapour Transparent and Deposition) وباقطار تتراوح من (20-150 nm). ان الليزر المنبعث من نانو واير ZnO يشاهد على انه ينتج من انماط متشاكهة بسبب نهائي السلك التي تشبه الى حد ما الشكل الكروي وان هذه الانماط تتناسب عكسياً مع طول السلك الذي يعتبر على انه تجويف فابري- بيرت [5,6,7]. ان الضخ الكهربائي لليزر نانو واير ZnO بتيار حد عتبة قليل نسبياً هو ضروري للعديد من التطبيقات المستقبلية والذي يعد كمصدر ضوء ليزر مثالي مكون من مواد نانوية تحصر الليزر بعيد واحد المصنع وبنفس طريقة الانماء السابقة واثاء عملية الترسيب ويتكون بذلك تركيب متعدد الوصلات من مركب نوع p-ZnO نانو واير/ طبقة من نوع n-ZnO كغشاء رقيق إذ اظهرت ليزر بصفة احادية اللون بنقاوة طيفية عالية [9,10] . إن دليل موجه الموجة للنانو واير في الاساس يحاكي دليل او الليف الضوئي السليكوني الاعتيادي [10]. إذ ان تصغير المنطقة الفعالة يمكن ان يؤدي إلى زيادة تيار العتبة بالنسبة لليزر النانوية , لكن من ناحية اخرى يمكن ان يساعد ذلك في جعل مثل هذه الليزرات تعمل بنمط منفرد بشكل افضل مع وجود طريقة ضخ ملائمة [10] . بشكل عام إعداد وتركيب نانو واير يتطلب اضافة مواد خلال عملية النمو لتقييد النانو واير باتجاه طولي واحد ويتم ذلك بالاستفادة من عملية تدعى بطريقة (بخار - السائل - الصلب) VLC وهي انماء بطريقة ترسيب كيميائية تسمى ايضاً بطريقة (اسفل - اعلى) [11,12] . لذا فإن النانو واير المصمم ZnO في هذا البحث يماثل التركيب المنتج عملياً في المختبرات الذي يكون ذو تجانس وانتظام ونقاوة عالية , مما يساعد في تكوين دليل موجه مثالي لتوجيه ضوء الليزر داخله [13] . وكما هو موضح في الشكل (1) .

أن الاطراف الانبعث التي تنتج من نهاية اوجه النانو واير كانت اكثر قوة من الاوجه الجانبية للنانو واير هذه النتيجة تدل على ان النانو واير يعمل عن طريقة الاعتماد على انبعث الموجات القصيرة لتحسين التغذية الاسترجاعية في التجويف البصري , ان النانو واير اقل من قطر معين (القطر الحرج) يكون غير قادر على توليد الليزر بسبب ان النانو واير الذي يعمل كدليل موجي غير قادر على حصر الانماط بداخل النانو واير . بالاضافة الى ان هناك علاقة خطية بين الفاصلة بين الانماط وطول النانو واير الذي يتصرف على انه تجويف فابري - بيروت (F-P) [15,16] .

إن شبه موصل نانو واير ZnO هو ذو قلب يمتاز بمعامل انعكاس عالي على النقيض منه الوسط المحيط (الهواء) الذي يمتلك معامل انكسار قليل نسبياً الذي يساوي تقريباً واحد لذا يعمل كتجويف فابري - بيروت F-(P) [17].

إن منطقة الاتصال العليا للنانو واير هي من نوع (p-type) صممت بطريقة هندسية ومن مواد خاصة بحيث تكون شفافة للضوء بصورة جيدة وبمقاومة كهربائية واطئة لليزر الخارج [4]. وإن طول التجويف (المسافة بين نهايتي المرأتين) بين النهاية العليا لبلورة نانو واير ZnO النقية وأسفل غشاء ZnO \ طبقة من الياقوت التي تشكل السطح الفاصل [4].

تجريبياً، ان الارتفاع بين نهايتي الوجهين للنانو واير لا يعد طولاً ضرورياً في تراكيب ليزر نانو واير، لذا فإن الانعكاسات المتعددة لا يمكن حدوثها على العمود المقام مع مراعاة الالوجه الجانبية ، التي تؤدي إلى امكانية تصميم انواع عديدة من التجاويف (المرنانات) [18] . لذلك مثل هذه الظاهرة تمكن هكذا نوع من ليزرات نانو واير لا نتاج كسب عالٍ [18] .



الحسابات الاولية لهذا التصميم أخذت من ارتباطها بالعمل التجريبي [1,4] ، وقد تمت الحسابات النظرية الاخرى باستعمال معادلات ليزر اشباه موصلات مناسبة مع الاخذ بالاعتبار التأثيرات النانوية .

إذ افترضت المساحة المهيئة للتصميم هي $(21 \mu\text{m} \times 21 \mu\text{m})$ وعند تحويل وحدة الطول إلى النانو متر نحصل على :

$$21 \mu\text{m} = 21 \times 10^3 \text{ nm}$$

وان عدد النانو واير لكل $21 \times 10^3 \text{ nm}$ هي :

$$\frac{21 \times 10^3 \text{ nm}}{120 \text{ nm}} = 175$$

عدد النانو واير على المنطقة الفعالة في بعد واحد بطول $21 \mu\text{m}$ هي :

$$\frac{175}{3} = 58.33$$

عدد النانو واير في بعدين أي كثافة النانو واير في المنطقة الفعالة على مساحة التصميم هي :

$$N=58.33 \times 58.33=3402 \text{ nanowires}$$

المسافة بين اثنين من النانو واير المتتاليين في المنطقة الفعالة لليزر هي 240 nm أي ضعف قطر النانو واير . وهذا التركيب يحاكي النانو واير المنتج عملياً [4].

حجم النانو واير الواحد:

Volume of nanowire= Length of active region (L_{ar}) \times cross sectional area (A)

$$V_n=L_{ac} \times A \quad (1)$$

$$V_n=2.60 \times 10^{-14} \text{ cm}^3$$

الحجم الكلي لجميع النانو واير تم حسابه باستعمال العلاقة الآتية :

The total equivalent volume= volume of one nanowire \times number of nanowire per unite area

$$V_T=2.60 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \times 3402=8845 \times 10^{-14} \text{ cm}^3$$

حيث كثافة الحاملات عند العتبة [4] هي: $N_{th}=1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

إن تركيز الحاملات عند العتبة n_{th} يعطى بالعلاقة الآتية :

$$n_{th}= V_T \times N_{th} \quad (2)$$

$$n_{th}=8845 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \times 1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} =9.729 \times 10^7$$

2- الحسابات النظرية:

إن انماط دليل الموجة لهذا النوع من النانو واير يمكن معالجتها بمساعدة نظريات دليل الموجة الضوئي الكلاسيكي [1] . قدرة النمط الجزئي (الكسري) في داخل دليل الموجة بنصف قطر (r) الذي يعطى بالعلاقة التالية [19] :

$$\eta_{mo} = 1 - \left[2.405 \exp\left(\frac{1}{V}\right) \right]^2 V^{-3} \quad (3)$$

$$V = kr(n^2 - 1)^{0.5}$$

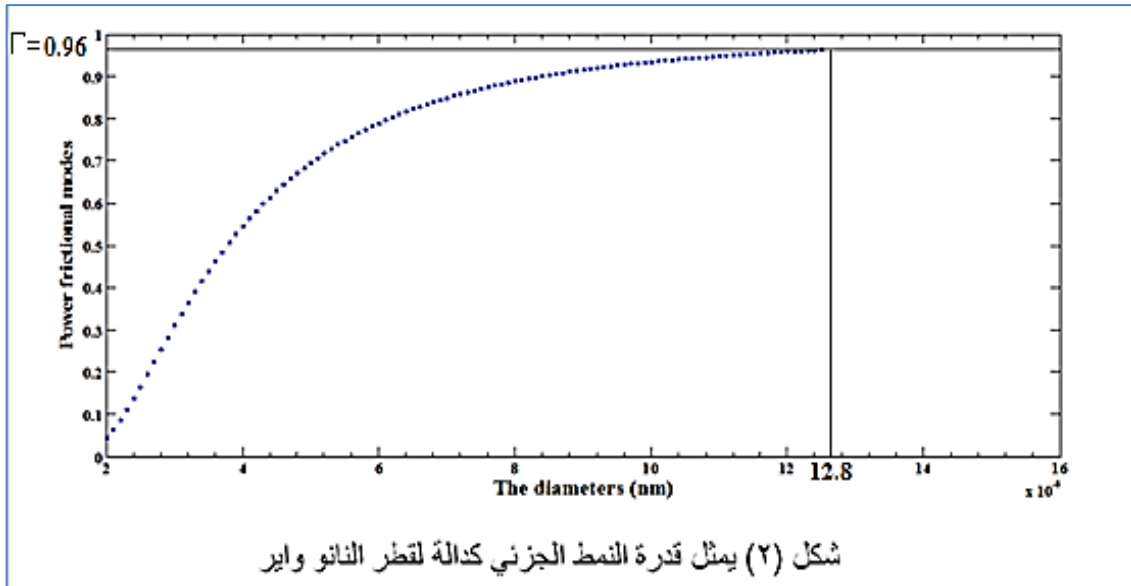
$$V = (2\pi r/\lambda)(n^2 - 1)^{0.5}$$

إذ أن k : متجه الموجة $k=2\pi/\lambda$ λ : هو الطول الموجي والذي يساوي 385 nm .

n : هو معامل انكسار قلب النانو واير والذي يساوي 2.5 وعند التعويض في المعادلة عن مدى من الاقطار للنانو واير من (D=50-150)nm تم الحصول على الشكل رقم (2) .

ومن خلال الرسم تم الحصول على عامل الحصر الضوئي $\Gamma=0.96$ وكان ذلك عند القطر $D=128$ nm والذي يحصل عنده الطول الموجي القاطع ($\lambda_{cut\ off}$) , وهو اكبر قطر للنانو واير ZnO لكي يعمل بنمط منفرد وعند اكبر تلك القيمة يعمل النانو واير ZnO بنمط متعدد والتي هي غير مرغوبة في العديد من التطبيقات وبخاصة في الاتصالات الضوئية .

وبزيادة نصف قطر دليل موجة نانو واير عن القيمة الحرجة لهذا التصميم فإن انماط مستعرضة يمكن ان تتواجد داخل النانو واير والذي يعمل على نانو واير ذو نمط منفرد.



هناك قيم حرجة لنصف قطر دليل موجة نانو واير ليعمل بنمط منفرد , كما هو ملاحظ من التمثيل الرياضي للمعادلة (4) المتضمن في الشكل (2) . عموماً إن النانو واير سوف يعمل كدليل موجة ضوئي يعمل بنمط منفرد عندما يتحقق الشرط التالي [20].

$$1 \approx \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) (n^2 - n_0^2)^{0.5} < 2.4 \quad (4)$$

إذ أن 1: هو الحد الأدنى العملي. إن قيمة الحد $\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) (n^2 - n_0^2)^{0.5}$ هو بين الواحد و 2.4

D : قطر النانو واير, n و n_0 هي معاملات انكسار لنانو واير ZnO والوسط المحيط (الهواء) على التوالي .

في حالة نانو واير ZnO فإن اقل واعظم قطر نحتاجه لغرض الحصول على النمط المنفرد هو بحدود (50-130) nm.

إن الضوء المنتج من ليزر نانو واير ZnO هو بالأصل منبعث في موقع إعادة التحام الناقلات (حاملات الشحنة) التي هي في ملتقى p-n لدليل موجة نانو واير, تتم كذلك من خلال الانتشار الكامل على طول نوع p و n طول دليل موجة ليزر نانو نانو واير الحقيقي هو نسبي التجويف الليزري هو لا يساوي في الغالب طول صافي منطقة الكسب وبالتالي , طول انتشار حاملات الاقلية لانواع p و n يجب ان تأخذ بالحسبان عند حساب منطقة صافي الكسب .

الكسب الشكلي $\langle g \rangle$ (Gain modal) والذي يعرف على انه :

$$\langle g \rangle = \frac{\int E^* g E dV_a}{\int E^* E dV_a} \quad (5)$$

إذ g : هو الكسب المادي للوسط الفعال (الكسب الشكلي) , E هو المجال الكهربائي و V_a هو حجم المنطقة الفعالة لنانو واير , على فرض ان الكسب هو ثابت في داخل نانو واير (المنطقة الفعالة) وصفر في مكان آخر . ثم

$$\langle g \rangle = \Gamma g = \Gamma_z \Gamma_{xy} g \quad (6)$$

إذ Γ هو عامل الحصر , طول تجويف لنانو واير ZnO هو اكبر بكثير من الطول الموجي الفعال للنمط الموجه هو $\Gamma_z = 1$ من التوزيع المجال المقدم في:

$$\Gamma_{xy} = \Gamma = 0.96 \quad (7)$$

ومن الصعوبة بمكان تحديد قيمة معامل الكسب (g) لليزر نانو واير المنفرد لأن الطرائق التقليدية لحسابها تتطلب طول التجويف (L) مع بقاء مساحة المقطع العرضي (A) ثابتة [21]. وفضلا عن ذلك فإن انعكاسات نهاية الوجه (انعكاسية المرآتين R_1, R_2) تكون واطئة , اي أن النمط الطولي الذي يحدث هو بالتزامن مع قمة كسب المادة , كذلك فإن خسارة التجويف لهذه النوع من النانو واير كبيرة [22] . لتصميم ليزر نانو واير جيد, لذا يجب ان تكون طول منطقة الكسب مناسبة مع الاخذ بنظر الاعتبار ان في اشباه الموصلات فان الالكترونات والفجوات تتواجد بكثرة في منطقة التلاقي فهناك يحدث إعادة التحام ونتاج الليزر في النانو واير [22]. في نانو واير ZnO طول انتشار حاملات الاقلية هي بحدود $2.1 \mu m$ لنانو واير نوع p.

بالاضافة إلى عرض منطقة فراغ الشحنة . انه قد وجد بأن طول انتشار حاملات الاقلية تعتمد على درجة الحرارة , إذ بدرجة حرارة الغرفة ولأجل غشاء ZnO نوع n هو حوالي 200 nm أي $0.2 \mu m$ [22,23,24] . منطقة فراغ الشحنة هي تقريباً 100 nm أي تقريباً $0.1 \mu m$, لذا فإن صافي الكسب الليزري في بلورة ZnO النقية [4] هو:

$$L_{ar} = L_n + L_p + L_s = 2 \mu m + 0.2 \mu m + 0.1 \mu m = 2.3 \mu m \quad (8)$$

حيث L_n : طول طبقة n-type L_p : طول الطبقة P-type L_s : عرض منطقة فراغ الشحنة L_{ar} : عرض منطقة الكسب .

ان تذبذب الليزر يحدث عندما يكون الكسب الحاصل في الذهاب وإلياب يساوي او اكبر من خسارات الذهاب وإلياب لكل دورة , في تركيب اشباه الموصلات النانو واير , الخسارات تتكون من خسارة الانتشار وخسارة المرايا المسيطرة [25] . التغذية الاسترجاعية الضوئية يتم توفيرها من قبل المرآتين العاكستين [4] . حيث: R_1 و R_2 هي انعكاسية لكلا نهايتي تجويف نانو واير قيد الدراسة ($R_1=0.04$ للياقوت الازرق و ZnO و $R_2=0.09$ لـ $ZnO \setminus ITO \setminus ZnO$ زجاج).

متوسط التباعد بين الأنماط الطولية $\Delta\lambda$ لتجويف F-P يعطى بواسطة [11] .

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda})} \quad (9)$$

L: طول التجويف الكلي والذي يختلف عن طول المنطقة الفعالة L_{ar} في ليزر نانو واير ZnO والذي يساوي $4.5 \mu m$ إما طول المنطقة الفعالة L_{ar} هي ($2.3 \mu m$) .

$$= 1.993 \text{ nm} \Delta\lambda$$

ومن المعادلة (9) يتبين ان متوسط التباعد بين الانماط الطولية تقريباً 2 nm $\Delta\lambda \approx$

ومن المعادلة (10) تبين ان عامل النوعية (Quality factor) Q يساوي:

$$Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\nu}{\Delta\nu} \quad (10)$$

وقد تم حسابه على أنه يساوي:

$$Q = \frac{385 \times 10^{-9}}{1.993 \times 10^{-9}} \quad Q = 193.17$$

إن هذه القيمة مقارنة للقيم التي حصل عليها باحثون عديدون عملياً [25,26,27,28] .

إن قيمة عامل النوعية (Q) هذه قليلة نسبياً لكنها شائعة ومعروفة بالنسبة لليزرات النانو واير [35 , 25-28] . بالرغم من ان هذه القيمة صغيرة الا انه بالامكان الحصول على ليزر بسبب قيمة الكسب العالي لهذه الانواع من الليزرات .

إن انخفاض عامل النوعية لليزر نانو واير ZnO قيد الدراسة والذي يمكن تفسيره على أن النانو واير هو في طبيعة الحال تجويف (F-P) بنهايتي وجهين يتصرفان على انهما وجهان عاكسان بانعكاسية قليلة اضافة إلى أن التجويف طويل نسبياً , بحدود بعض المايكرومتر كطول , لذلك قيمة Q لشبه الموصل نانو واير ZnO تجويف (F-P) يمكن أن يكون بحدود عدة مئات.

من العوامل التي يعتمد عليها الكسب في ليزر اشباه الموصلات عمر الفوتون (τ_p). الذي يعتمد بالأساس على الخسارة الداخلية (α_i) , وخسارة المرآتين (α_m) , وكما هو موضح في المعادلة التالية:

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{c}{n} \left(\alpha_i + \frac{1}{2L_{ar}} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (11)$$

$$\tau_p = 6.8 \times 10^{-15} \text{ s} = 6.8 \text{ fs}$$

إن الخسارات الكلية (α_t) في ليزر نانو واير تحسب بالطريقة نفسها التي يتم حسابها في ليزر اشباه الموصلات التقليدي [1].

إن خسارة المرآة هي المهيمنة في ليزر نانو واير بسبب انعكاسيتها القليلة. التشتت يعتمد على الطول الموجي ومعامل الانكسار ويعبر عنه:

$$[4] \quad dn/d\lambda = -0.015 \text{ nm}^{-1}$$

لمركب الليزر قيد الدراسة . التشتت في معامل الانكسار في نانو واير ZnO هو ناتج من مجموع التشتت المادي وتشتت دليل الموجة [29] . التشتت هو من المفترض كونه ثابت على طول دليل موجة للنانو واير , ZnO يكافئ الخسارة الداخلية , وإن كسب العتبة (g_{th}) يساوي الخسارة الكلية.

ان قيمة التشتت واطئة بشدة عند مقارنتها بخسارة المرآة , لذلك يمكن اهمالها وبالنتيجة فإن $g_{th} \approx \alpha_m$ لليزر نانو واير قيد الدراسة , إذ (g_{th}) هو الكسب عند العتبة .

إن كسب العتبة لوحدة الطول (g_{th}) يحسب من العلاقة التالية :

$$g_{th} = \alpha_T = \alpha_i + \alpha_m \quad (12)$$

$$g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{2L_{ar}} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (13)$$

$$\alpha_i = 0$$

$$g_{th} = \alpha_m = \frac{1}{2L_{ar}} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (14)$$

إذ L_{ar} : طول منطقة الكسب لليزر نانو واير ZnO قيد الدراسة : $L_{ar} = 2.3 \mu\text{m}$

$$g_{th} = \frac{1}{2 \times 2.3 \times 10^{-4}} \ln \frac{1}{0.04 \times 0.09}$$

$$g_{th} = 1.223 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$$

إن هذه القيمة العالية ل g_{th} تقترب من القيمة التقريبية للكسب المقاسة تجريبياً والتي تؤخذ بوحدة cm^{-1} في العديد من البحوث [4,5] . لذا تصمم ليزر نانو واير ZnO ذي النمط المنفرد يجب أن يكون الكسب على الأقل يساوي هذه القيمة لبدء الفعل الليزري . ويمكن تأكيد ذلك باستعمال معادلات المعدل ذي النمط المنفرد لليزر نانو واير .

إن الكسب لوحدة الطول (cm^{-1}) ويمكن أن يُحول إلى كسب العتبة لوحدة الزمن (s^{-1}) كالتالي [30].

$$(15) \quad g_o = V_g g_{th}$$

حيث V_g : هي سرعة المجموعة $V_g = \frac{c}{n}$, و g_o الكسب لوحدة الزمن:

$$V_g = \frac{3 \times 10^8}{2.5}$$

$$V_g = 1.2 \times 10^8 \text{ m/s}$$

وبذلك يمكن حساب الكسب لوحدة الزمن بالنسبة للنانو واير ليزر ZnO كالآتي :

$$g_o = 1.2 \times 10^{10} \times 1.22 \times 10^4$$

$$g_o = 1.46 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

3- تحليل معادلات المعدل لليزر نانو واير ZnO للنمط المنفرد :

ان معادلات المعدل لليزر نانو واير ذي النمط المنفرد هي تقريباً مشابهة لمعادلات المعدل لليزر اشباه الموصلات التقليدية , في الحالات المستقرة ومن خلال معادلات المعدل يمكن إيجاد معدل تغير عدد الفوتونات (S) , وعدد الالكترونات (N) مع الزمن, في ليزرات النمط المنفرد وتحت شرط الضخ الكهربائي وباستعمال التحليل العددي لمعادلات المعدل [30] .

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I(t)}{q} - \frac{N}{\tau_n} - \Gamma g S \quad (16)$$

$$\frac{dS}{dt} = \beta \frac{N}{\tau_n} + \Gamma g S - \frac{S}{\tau_p} \quad (17)$$

كسب الوسط الفعال يمكن ان يعبر عنه على انه :

$$g = \alpha(N - N_o) \quad (18)$$

حيث N_o : هي عدد الحاملات الشفافة , α : هو ثابت الكسب , $(\tau_p$ و $\tau_n)$ عمر الحاملات وعمر الفوتون على التوالي . β هو معامل الانبعاث التلقائي , و $I(t)/q$ هو معدل الضخ الكهربائي . ويتطبيق شرط الحالة المستقرة :

$$\frac{dN}{dt} = \frac{dS}{dt} = 0 \quad (19)$$

وباهمال معامل الانبعاث التلقائي β عند الحالة المستقرة , ومن المعادلة (17) نحصل على :

$$\Gamma g \approx \frac{1}{\tau_p} \quad (20)$$

ويتطبيق شروط الحالة المستقرة , ومن معادلة (16) و(17) و(19) و(20) وبتعويض القيم التي تم حسابها في فقرة الحسابات وتعويض بعض الثوابت نحصل على عدد الفوتونات كدالة لتيار الانحياز :

$$S = \frac{\left(\frac{I}{q}\right) - \left(\frac{n_{th}}{\tau_n}\right)}{\Gamma g_o} \quad (21)$$

إذ τ_n : عمر الحاملات والتي تساوي $\tau_n = 300 \text{ ps}$ كما في [4] .

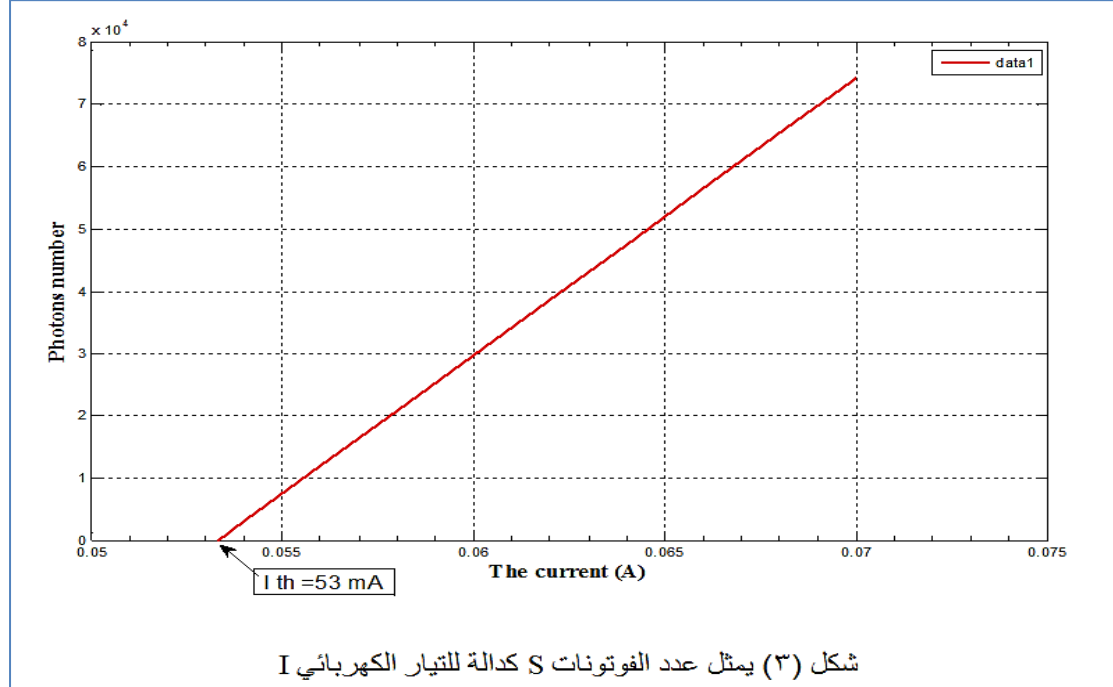
إذ n_{th} : عدد الحاملات عند العتبة .

ومن خلال استخدام برنامج ماتلاب (Matlab) تم الحصول على الشكل (3) وايضاً من خلال نفس البرنامج تم حساب عدد الفوتونات S .

وإن هذه النتيجة لتيار حد العتبة هي قريبة جداً من النتائج العملية للنانو واير ZnO والمقدمة من قبل [4] .

إن العلاقة (21) تمثل عدد الفوتونات كدالة للتيار الكهربائي (تيار الانحياز) , وهذه العلاقة يمكن تمثيلها بالشكل (3) . ومن خلال الرسم البياني وتعويض القيم السابقة تم الحصول على تيار حد العتبة (I_{th}) والذي يساوي

$$I_{th} = 53 \text{ mA}$$



وكما نلاحظ بأن هناك تناسب خطي بين S, I وهذا واضح من العلاقة من حيث بقية المعلمات في العلاقة تبقى ثابتة ($\Gamma, g_0, n_{th}, \tau_n, q$) [36]. كما نلاحظ من العلاقة ايضاً (أو من خلال الشكل 3) يتبين أن عدد الفوتونات التي تم الحصول عليها هي بحدود بضعة الاف , وهذا العدد يتناسب مع تيار الانحياز القليل بحدود (عشرات الملي امبير) وهو يتطابق مع عدد الفوتونات المنبعثة لليزر اشباه الموصلات الاخرى التي تعمل ضمن هذا القيمة من تيار الانحياز [31] .

في ليزر نانو واير ZnO هو تقريباً يمتلك خصائص مشابهة لتركيب الليزر قيد الدراسة حيث هذه المعلمات السابقة هي مهم جداً لقياس طيف Photoluminescence (PL) (القدرة الضوئية وشدة الاضاءة) [32,33,34] . أن الكفاءة الكمية الداخلية Internal Quantum efficiency (IQE) قيست تجريبياً لليزر نانو واير ZnO , التي هي بحدود 0.55 [37] .

إن الكفاءة الكمية الداخلية يمكن حسابها من خلال المعادلة الاتية :

$$\eta_i = \frac{\text{number of photons generated internally per unit second}}{\text{umber of injected electrons in to diodes per unit second}} \quad (23)$$

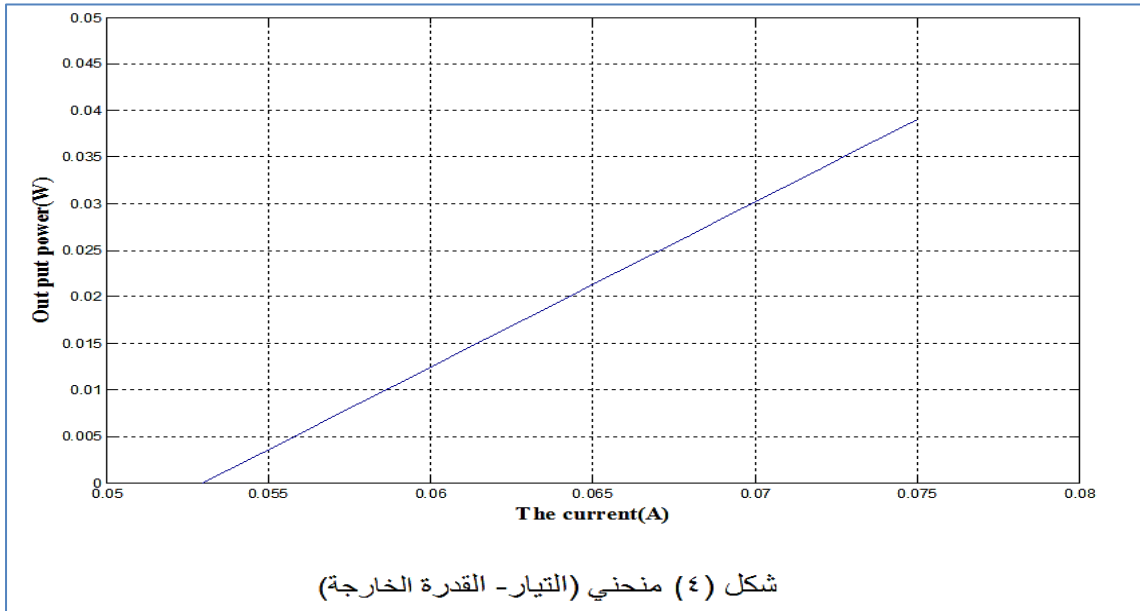
القدرة المنبعثة من ليزر اشباه الموصلات بعد حد العتبة (عند تجاوز حد العتبة لليزر) هي :

$$P_{out} = \eta_d \frac{hv}{q} (I - I_{th}) \quad (24)$$

حيث hv : هي طاقة الفوتون الواحد و η_d : هي الكفاءة التفاضلية الكمية الخارجية External Differential Quantum Efficiency (EDQE). والتي تعرف على انها النسبة بين عدد الفوتونات الخارجة من التجويف الليزري إلى عدد الالكترونات المحقونة بداخله . ويمكن كتابتها على انها :

$$\eta_d = \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \quad (25)$$

ومن خلال برنامج (Matlab) تم الحصول على الشكل (4) وايضاً من خلال نفس البرنامج تم حساب القدرة الخارجة من تجويف نانو واير ZnO .



في تركيب ليزر نانو واير ZnO قيد الدراسة $\eta_d \approx \eta_i$, بسبب أن $\alpha_i \approx 0$.

من المعادلة (24) تبين بأن القدرة الخارجة عند تجاوز حد العتبة ستكون دالة خطية للتيار. الكفاءة الداخلية (η_i) , وعامل الحصر (Γ) , وخسائر التجويف $(\alpha_m$ و $\alpha_i)$ جميعها تبقى ثابتة. كما في الشكل (4) .

ومن خلال برنامج (Matlab 2015a) حصلنا على الرسم في الشكل (4) كما ويمكن حساب كفاءة الميل (Slope efficiency) من الرسم البياني والتي تساوي:

$$\text{Slope efficiency} = \frac{\Delta P}{\Delta I} = 1.77$$

كما ويمكن حسابها من المعادلة الآتية [38]:

$$\eta_d = \frac{\Delta P}{\Delta I} \left(\frac{q\lambda}{hc} \right) \quad (26)$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta I} = \frac{\eta_d hc}{q\lambda} \quad (28)$$

إذ: ثابت بلانك والذي يساوي $6.63 \times 10^{-34} \text{J.s}$, و q : شحنة الالكترون والتي تساوي $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ من المعادلة (28) يمكن أيضاً حساب كفاءة الميل والتي أيضاً تساوي 1.77

4- الخلاصة :

يتبين من خلال هذا البحث ان لليزر نانو واير ZnO تيار حد عتبة قليلاً نسبياً وكفاءة كمية داخلية وميل جيدان مع استمرارية التشغيل بنمط منفرد وبدرجة حرارة الغرفة مقارنة بالليزرات التقليدية، لذلك يُتوقع بأن يكون لهذا الليزر شأن كبير في المستقبل لامكانية استعماله في مدى واسع من التطبيقات وذلك لصغر حجمه وسهولة تصنيعه ولتكامله مع الدوائر الالكترونية وبكفاءة عالية .

أن المعالم (البارامترات) المستعملة في البحث مدونة في الجدول رقم (1) : والتي تم حسابها باستعمال معادلات المعدل للنمط المنفرد ومعادلات ليزر اشباه الموصلات .

النتيجة	الصيغة	المعنى
$\Gamma = 0.96$	$\eta_{mo} = 1 - \left[2.405 \exp\left(\frac{1}{V}\right) \right]^2 V^{-3}$	η_{mo} : قدرة النمط الكسري بداخل قلب النانو واير بنصف قطر r $V = kr(n^2 - 1)^{0.5}$ $k = 2\pi/\lambda$ $\lambda = 385 \text{ nm}$ $n = 2.5$ $r > 100$
ومنها تم الحصول على القطر الحرج وهو اقل قطر ليعمل النانو واير بنمط منفرد $D = 128 \text{ nm}$	$1 \approx \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) (n^2 - n_0^2)^{0.5} < 2.4$	شرط النمط المنفرد حيث D : قطر النانو واير n : معامل انكسار قلب النانو واير $n = 2.5$ $n_0 = 1$ للهواء على فرض λ : الطول الموجي لليزر المصمم $\lambda = 385 \text{ nm}$
$= 2 \text{ nm} \Delta \lambda$	$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{2L(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda})} \Delta \lambda$	$\lambda \Delta$: معدل الفاصلة بين الانماط الطولية $dn/d\lambda = -0.015 \text{ cm}^{-1}$ التشتت على طول محور الكسب L_a : كسب المنطقة الفعالة وهولا يساوي طول التجويف وحسب على انه يساوي $3.2 \mu\text{m}$
$Q = 192$	$Q = \frac{v}{\Delta v} \frac{\lambda}{\Delta \lambda}$	عامل النوعية لليزر نانو واير
$\tau_p = 1.33 \text{ ps}$	$\frac{1}{\tau_p} = \frac{c}{n} \left(\alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right)$	τ_p : العمر الزمني للفوتون c : سرعة الضوء في الفراغ وتساوي $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ L : طول التجويف النانوي

ان بعض البارامترات (المقاييس) قد تم تبنيها استناداً إلى مصادر ذات علاقة وطيدة بالبحث [1],[4],[26],[28],[36] وهي مدونة بالجدول الآتي, جدول رقم (2) :

المعنى	الصيغة
g _{th} : الكسب عند العتبة α _t : الكسب الكلي α _i : الخسائر الداخلية α _m : خسائر المرايا L _{ac} : طول المنطقة الفعالة R ₁ , R ₂ : انعكاسية المرآة الامامية والخلفية على التوالي R ₁ =0.04 , R ₂ =0.09	$g_{th} = \alpha_t = \alpha_i + \alpha_m$ $g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{2L_{ac}} \ln \frac{1}{R_1 R_2}$ تهمل لصغرها α _i
طول المنطقة الفعالة في النانو واير ZnO	$L_{ac} = L_p + L_n + L_c$ $L_{ac} = 2.1\mu m + 0.2\mu m + 0.1\mu m$ $= 2.3 \mu m$
عمر حاملات الشحنة	$\tau_n = 300 ps$
تركيز الحاملات عند حد العتبة	$N_{th} = 1.1 \times 10^{18} cm^{-3}$
الكفاءة الكمية التفاضلية الداخلية	$\eta_d = 0.85$
معامل انكسار قلب النانو واير قيد الدراسة	$n = 2.5$
الطول الموجي للنانو واير قيد الدراسة	$\lambda = 385 nm$
المسافة بين اثنين من النانو واير المتتاليين للنانو واير قيد الدراسة	$d = 240 nm$

المصادر:

1. Johnson J. C., Yan, H. Q., Yang, P. D. & Saykally, R. J. Optical cavity effects in ZnO nanowire lasers and waveguides. *J. Phys. Chem. B* 107, 8816–8828 (2003).
2. Okazaki K., Kubo K., Shimogaki T., Nakamura D., Higashihata M., and Okada T. Lasing characteristics of ZnO nanosheets excited by ultraviolet laser beam. *Adv. Mat. Lett.*, Vol. 2, 354-357 (2011).
3. Sattar Z. A., and Shore K. A. Analysis of the direct modulation response of nanowire lasers. *J. Lightwave Technol.*, Vol. 33, 3028, (2015).
4. Chu S., Wang G., Zhou W., Lin Y., Chernyak L., Zhao J., Kong J., Li L., Ren J. and Liu J. Electrically pumped waveguide lasing from ZnO nanowire *Nature Nanotechnology*, Vol. 6, 506-510, (2011).
5. Huang M. H., Mao S., Feick H., Yan H. Q., Wu Y. Y., Kind H., Weber E., Russo R., and Yang P. D. Room-temperature ultraviolet nanowire nanolasers *Science*, Vol. 292, 1897-1899, (2001).
6. Vugt L. K., Rühle S., and Vanmaekelbergh D. Phase-correlated nanodirectional laser emission from the end facets of a ZnO nanowire *Nano Lett.*, Vol. 6, 2707-2711, (2006).
7. Zhou H., Wissinger M., Fallert J., Hauschild R., Stelzl F., Klingshirn C., and Kalt H. Uniform-sized ZnO nanolasers arrays *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 91, 181112, (2007).

8. Duan X. F., Huang Y., Agarwal R., and Lieber C. M. Single-nanowire electrically driven lasers. *Nature*, Vol. 421 , 241-245, (2003).
9. Zhang J. Y., Zhang Q. F., Deng T. S., and Wu J. L. Electrically driven ultraviolet lasing behavior from phosphorus-doped p-ZnO nanowire array/n-Si heterojunction. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 95, 211107, (2009).
10. Yaoguang Ma et al. Semiconductor nanowire lasers. *Advances in optics and photonics* 5, 216-273 (2013).
11. Lieber C. M. Nanoscale Science and technology: building a big future from small things. *MRS Bull.* 28, 486-491, (2003).
12. Lieber C. M. and Wang Z. I. Functional nanowires. *MRS Bull.* 32, 99-108 (2007).
13. Ma, Yaoguang, and Limin Tong. "Optically pumped semiconductor nanowire lasers." *Frontiers of Optoelectronics*, Vol. 5, 239-247, (2012).
14. Johnson J. C., Knutsen K. P., Yan H., Law M., Zhang Y., Yang P., and Saykally R. J. Ultrafast carrier dynamics in single ZnO nanowire and nanoribbon lasers. *Nano Lett.*, Vol. 4, 197-204, (2004).
15. Couteau C., Larrue A., Wilhelm C., and Soci C. Nanowire lasers. *Nanophotonics*, Vol. 4, 90-107, (2015).
16. Ma Y., Guo X., Wu X., Dai L., and Tong L. Semiconductor nanowire lasers. *Advances in Optics and photonics*, Vol. 5, 216-373, (2013).
17. Larrue A., Wilhelm C., Vest G., Combrié S., de Rossi A., and Soci C. Monolithic integration of III-V nanowire with photonic crystal microcavity for vertical light emission. *Opt. Express*, Vol. 20, 7758, (2012).
18. Johnson J. C., Yan H., Choi H.-J., Knutsen K. P., Petersen P. B., Law M., Yang P., and Saykally R. J. Single nanowire waveguides and lasers. *Proc. of SPIE*, Vol. 5223, 187-196, (2003).
19. Snyder A. W. and Love D. Optical waveguide theory. *Kluwer*, Boston (1983).
20. Chen C. -L. Elements of optoelectronics and fiber optics. *Chicago*, (1966).
21. Johnson J. C., Choi H.-J., Knutsen K. P., Schaller R. D., Yang P., F., and Saykally R. J. Single gallium nitride nanowire lasers. *Nature Materials*, Vol. 1, 106, (2002). <https://www.researchgate.net/publication/10871741>.
22. Chen L. and Toweb E. Coupled optoelectronic modeling and simulation of nanowire lasers. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 84, 1067, (2004).
23. Lopatiuk-Tirpak O., Cernyak L., Xiu F. X., Liu J. L., Jang S., Ren F., Pearton S. J., Gartsman K., Feldman Y., Osinsky A., and Chow P. Studies of minority carrier diffusion length increase in p-type ZnO:Sb. *J. Appl. Phys.*, Vol. 100, 086101, (2006).
24. A. Soudi, P. Dhakal and Y. Gu, "Diameter dependence of the minority carrier diffusion length in individual ZnO nanowire," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 96, pp. 253115, (2010).
25. Zimmler M. A., Capasso F., Müller S., and Ronning C. Optically pumped nanowire lasers: invited review *Semiconductor Science and Technology*., Vol. 25, 024001, (2010).
26. Gradecak S., Qian F., Li Y., Park H.-G., and Lieber C. M. GaN nanowire lasers with low lasing thresholds. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, 173111, (2005).
27. Maslov A. V. and Ning C. Z. Reflection of guided modes in a semiconductor nanowire laser. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, 1237, (2003).

28. Wang M. Q., Huang Y. Z., Chen Q., and Cai Z. P. Analysis of mode quality factors and mode reflectivities for nanowire cavity by FDTD technique. *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 42, 146-151, (2006).
29. Chang S.-W., Lin T.-R., and Chuang S. L. Theory of plasmonic F-P nanolasers. *Opt. Express*, Vol. 18, 15039-15053, (2010).
30. Ma R.-M., Oulton R. F., Sorger V. J. and Zhang X. Plassmon lasers: coherent light source at molecular scales. *Laser Photonics Rev.*, Nol. 7, 1-21, (2013).
31. Abdullah R. A., Khallel E. A. Threshold gain dynamic of blue InGaN laser diode with optical feedback. *Optic.*, 124, 2740-2742 (2013). <https://www.researchgate.net/publication/267918178>.
32. Zhang Y., Russo R. E. and Mao S. S. Quantum efficiency of ZnO nanowire lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 87, 043106 (2003).
33. http://nanowire,Berkeley.edu/wp-content/uploads/2013/01/207_SI.pdf.
<http://apl.aip.org/apl/copyright.jsp>.
34. Reshchikov M. A., Gu X., Nemeth B., Nause J., and Morkoç H. High quantum efficiency of photoluminescence in GaN and ZnO. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 892, pp. 0892-FF23-11.1-11.15, (2006).
<https://www.researchgate.net/publication/267918178>.
35. Yang Q., Jiang X., Guo X., Chen Y., and Tong L. Hybrid structure laser based on semiconductor nanowires and a silica microfiber knot cavity. *Appl. Phys. Lett.* 94, 101108-1, (2009).
<http://apl.aip.org/apl/copyright.jsp>.
36. D. J. Sirbuly, M. Law, H. Yan, and P. Yang, "Semiconductor Nanowires for Subwavelength Photonics Integration," *J. Phys. Chem. B*, Vol. 109, pp. 15190-15213, 2005.
37. Foreman J. V., Everitt H. O., Yang J. and Liu J. Influence of temperature and photoexcitation density on the quantum efficiency of defect emission in ZnO powders. *Appl. Phys. Lett.* 91, 011902-2, (2007).
<https://doi.org/10.1063/1.2753540>.
38. Mobarhan K. S., Ph.D. Test and Characterization of Laser Diodes: Determination of Principal Parameters. *Appl. Fiber Optics & Photonics*, 1-4, (2007). www.newport.com.