

تحليل خصائص أداء الثنائي الضوئي الإنهياري نوع المفرق الهجين *InP-InGaAs*

إلهام كاظم أونيس

قسم الكهرباء - المعهد الفني/أربيل - إقليم كردستان العراق - [email:ardo_h@yahoo.com](mailto:ardo_h@yahoo.com)

الخلاصة:

في هذه الدراسة، جرى تقديم نموذج تحليلي معتمد على نتائج تجريبية لأداء الثنائي الضوئي الإنهياري نوع *InP-InGaAs* عند الانحياز الواطئ وتحديد خصائص الريح للثنائي الضوئي بشكل مباشر من خلال الاستجابة النبضية. تم اعتماد النموذج المقدم على بيان تأثير أهم الآليات التي تساهم في التيار الضوئي وهي الاقتناص والتولد الضوئي في المنطقة غير المستنزفة وسرعة حاملات الشحن بفعل المجال الكهربائي الداخلي. كما جرى تحديد عرض الحزمة كدالة للريح الإجمالي للثنائي الضوئي وتبين أنه يتحدد بشكل رئيسي بعملية الانتشار والاقتناص عند القيم الواطئة للريح استناداً إلى التركيب متعدد الطبقات المعتمد في هذه الدراسة.

Analytical Performance Modeling of InP-InGaAs Hetero-junction Avalanche Photodiode

ABSTRACT:

In this study, an analytical model depending on experimental results for *InP-InGaAs* avalanche photodiode at low bias was presented and the characteristics of gain for this photodiode were determined directly by the impulse response. The model have considered the most important mechanisms contributing the photocurrent, they are trapping, photogeneration in the undepleted region and charge-carriers velocity due to the built-in electrical field. Also, the bandwidth was determined as a function to the total gain of photodiode and it was mainly determined by diffusion and trapping processes at low gain regarding to the multi-layer structure considered in this study.

المقدمة:

تكتسب طاقة كافية عندما تتعجل بواسطة المجال الكهربائي في منطقة الاستنزاف (Depletion Region) وتؤدي بالتالي إلى توليد أزواج إلكترون-فجوة أكثر من خلال تصادمها مع ذرات المادة شبه الموصلة التي يتم تكوين ثنائي الوصلة منها. تعرف هذه الحالة بالانهيار (Avalanche Breakdown) [1].

يظهر ثنائي الوصلة (Diode Junction) في حالة الانحياز العكسي خصائص تماثل خصائص العازل الكهربائي، إلا أن استمرار زيادة الفولتية المساطة عليه بشكل مستقر يجعل ثنائي الوصلة يبدأ بالتوصيل عند نقطة معينة وبشكل مفاجئ، إن ذلك يحدث بسبب حاملات الشحن المتولدة حرارياً والتي

حامل الشحنة مساوياً لنصف زمن التضمين [4].

نتيجة لذلك، تم اللجوء إلى تكوين منطقة شبه موصلة ذاتية (Intrinsic) ذات مقاومة عالية ما بين المنطقتين الموجبة (p-type) والسالبة (n-type) من الوصلة، حيث أن معظم الهبوط الذي يحصل في الجهد يحدث في هذه المنطقة والتي يمكن جعلها طويلة إلى الحد الذي يضمن امتصاص غالبية الفوتونات الساقطة داخلها وبالتالي كفاءة كمية أعلى، وكذلك فإن مثل هذه التركيب تمتلك استجابة ترددية مثلى. تعرف هذه التركيب من الثنائيات الضوئية بثنائيات p-i-n أو PIN [5][4].

خلال العقد الأخير من القرن العشرين، شاع استخدام الثنائيات الضوئية الإنهيارية نوع InP-InGaAs في المستلزمات البصرية المستخدمة في منظومات الاتصالات التي توظف الألياف البصرية للمسافات الطويلة والمعدلات العالية لنقل المعلومات عند الأطوال الموجية $1.3\mu\text{m}$ و $1.55\mu\text{m}$. تعد الثنائيات الضوئية الإنهيارية الأكثر تميزاً في صناعة الكواشف الضوئية نوع p-i-n والتي تستخدم في منظومات الاتصالات نفسها وذلك لعدة أسباب رئيسة أهمها الريح العالي والتحسسية الأفضل لها [4]. وقد جرت محاولات عديدة سابقاً على تركيب الثنائيات الضوئية الإنهيارية من أجل تحسين أدائها، وقد تضمنت تلك المحاولات الثنائيات الضوئية الإنهيارية ذات المناطق المتميزة للامتصاص (Absorption) والانحدار أو التدرج (Grading) وتجميع الشحنات (Charge Collection) والتضاعف (Multiplication)، وكذلك الثنائيات الضوئية الإنهيارية ذات الشبكة الفائقة

تستخدم ثنائيات الوصلة المصنعة من أشباه الموصلات بشكل واسع جداً في منظومات الكشف عن الأشعة البصرية وهي تعتمد في عملها على عدة آليات فيزيائية. إحدى أهم هذه الآليات هي عملية امتصاص الفوتونات الساقطة من قبل الجزء الموجب (p-type) من ثنائي الوصلة حيث تتولد أزواج إلكترون-فجوة. وهذا العملية تحدث خلال طول الانتشار (Diffusion Length) في منطقة الاستنزاف وهو يمثل المسافة التي يقل عندها تركيز حاملات الشحنة الأقلية المتولدة ضوئياً إلى حوالي 0.37 تقريباً من قيمتها القصوى وهي تمثل معدل المسافة التي تقطعها حاملات الشحنة الأقلية داخل الوصلة (Junction) قبل أن يتم إعادة اتحادها (Recombination) مع حامل في الجانب المقابل. يمكن أن يتم امتصاص الفوتون الساقط من قبل منطقة الاستنزاف وبالتالي فإن كل من الإلكترونات والفجوات المتولدة سوف تتجرف باتجاهين متعاكسين تحت تأثير المجال الكهربائي داخل هذه المنطقة إلى أن يصل كل منهما إلى الجانب المقابل.

من الناحية العملية، يكون هذا الأمر غير مرغوب تماماً إذ أنه على الرغم من مساهمة كل مزدوج إلكترون-فجوة في قيمة التيار الناتج إلا أنه يجب منع حدوث تأخير في استجابة (Response) ثنائي الوصلة للأشعة الساقطة والذي ينجم عن محدودية زمن الانتشار [2,3]. إن أهم العوامل التي تحدد سرعة استجابة ثنائي الوصلة للفوتونات الساقطة هي معدل انتشار الحاملات وزمن الانجراف في منطقة الاستنزاف وسعة متسعة هذه المنطقة. يكمن الحل الأمثل لذلك في زيادة عرض منطقة الاستنزاف إلى الحد الذي يكون معه زمن عبور هذه المنطقة من قبل

اعتماداً على معاملات تحليلية [14]. هذه الدراسة تساعد على التعرف على أداء الثنائي الضوئي الإنهاري عبر مدى كامل للريح اعتماداً على شكل نبضة الاستجابة فقط وعليه فإن هذه الدراسة يمكن أن تتضمن صفة كامنة من أجل تحسين خصائص الثنائيات الضوئية الإنهارية.

إن أهم الاعتبارات اللازمة لبناء نموذج تحليلي في مدى الزمن في حالة الانحياز الواطئ لثنائي ضوئي إنهاري يعتمد التركيب InP-InGaAs هي:

1. انبعاث الفجوات المقتصة عند الحد الفاصل InGaAs/InP من حزمة التكافؤ

2. التأخير الزمني الحاصل في انتشار الفجوات المتولدة ضوئياً من المنطقة غير المستنزفة (Undepleted) إلى المنطقة المستنزفة (Depleted) لطبقة الامتصاص من التركيب

3. سرعة حاملات الشحن في مناطق المجال الكهربائي الواطئ

بالنظر إلى الشكل (1) الذي يمثل مخططاً لتركيب ثنائي ضوئي إنهاري يتضمن مناطق متميزة للامتصاص والتدرج أو الانحدار وتجميع الشحنات والتضاعف وعلى فرض غياب طبقة InGaAsP، فإن الفجوات المتولدة ضمن طبقة الامتصاص (InGaAs) تحاول الحركة باتجاه طبقة InP ذات فجوة الطاقة الأكبر بسبب جهد الانحياز المسلط. ولكن بسبب عدم استمرارية حزمة التكافؤ عند منطقة الحد الفاصل فإن الفجوات تبقى قيد الاقتصاص (Trapped) في منطقة InGaAs من الحد الفاصل نفسه. يؤدي إنشاء طبقة متدرجة من InGaAsP إلى تقليل حالة عدم الاستمرارية وتقليل الارتفاع

(Super-lattice) والثنائيات الضوئية ذات حبرات الرنين وغيرها [6-8]. وعليه فقد ازدادت الحاجة إلى نماذج جيدة لاستقراء سلوك الثنائيات الضوئية الإنهارية بشكل دقيق.

يعد عرض الحزمة (Bandwidth) عند قيمة الريح 3dB واحداً من أهم المعاملات للثنائي الضوئي الإنهاري ذي الأداء العالي وهذه القيمة لعرض الحزمة تكون دالة للريح الإجمالي للثنائي. تم تقديم وصفاً تحليلياً في الدراسات المبكرة لكيفية تحديد عرض الحزمة للثنائي الضوئي الإنهاري [9-11] وقد تضمنت تلك الدراسات بشكل أساسي التحليل عند شرط الحالة المستقرة (Steady State) والتقريب في مدى التردد (Frequency Domain) وفرضية التآين الموضعي (Local Ionization) للتركيب متعدد الطبقات. ولكن من أجل تحديد قيمة عرض الحزمة بشكل دقيق فإن التحليل يجب أن يتضمن الاستجابة (Response) الزمنية وأن يأخذ بنظر الاعتبار حالة التآين اللا موضعي للتركيب المتعدد والذي يعني بناء النموذج في مدى الزمن (Time Domain) بما في ذلك تأثير المنطقة غير الفعالة أو الميتة من التركيب متعدد الطبقات، وقد جرى تقديم دراسات تناولت تلك التأثيرات [12-13].

التحليل:

لقد أولت جميع الدراسات السابقة اهتماماً خاصاً بسلوك الثنائيات الضوئية الإنهارية عند مناطق الريح المتوسط والريح العالي، أما في منطقة الريح الواطئ فإن عرض الحزمة عند قيمة الريح 3dB يتم تحديدها في الغالب

في حالة تشيع الثنائي الضوئي بنبضة ضوء فإن وجود الحد J_p يجعل حل المعادلة صعباً، وقد جرى في دراسة سابقة تقديم علاقة ترابط زمني لحساب عدد الفجوات المنبعثة [13]. ومع ذلك فقد تم إجراء محاولة لحل معادلة استمرارية التيار أعلاه ما بين لحظتين زمنيتين متتاليتين. تم التركيز على المنطقة المركزية للثنائي الضوئي الإنهياري وافترض سريان التيار في بعد واحد (1-Dimension) على طول اتجاه المجال المسلط. إذا جرى تقسيم الطول الكلي إلى عدد (i) من الأطوال الجزئية مقدار كل منها Δx وكانت مقدار الفاصلة الزمنية Δt وعدد هذه الفواصل (j)، فإن كثافة الفجوات لغاية آخر جزء من الطول (i^{th}) ولغاية الزمن (j^{th}) يمكن حسابها من خلال تكامل $p(i,j)$. كذلك يمكن الإشارة إلى كثافة تيار الفجوات وعددها لوحدة المساحة بالحددين $J_p(i,j)$ و $p_t(i,j)$ على التوالي. من أجل الحصول على حل لمعادلة p_t نفترض ما يلي:

1. أن قيمتي A_{trap} و R لا تتغيرا خلال الفترة

الزمنية ما بين t و $t+\Delta t$ ، أي ما بين

الفاصلتين الزمنيتين j و $j+1$.

2. أن عدد الفجوات الداخلة عند كل طول (i)

في مركز الاقتناص يكون ثابتاً خلال الفترة

الزمنية Δt ، أي ما بين الفاصلتين

الزمنيتين j و $j+1$.

يكون الافتراض الأول مقبولاً تماماً بسبب عدم

ارتباط A_{trap} و R مع الزمن بشكل مباشر. وسيتم

لاحقاً مناقشة ضرورة وصحة الافتراض الثاني. من

الممكن أن يكون هنالك عدد ضئيل من وحدات

الطول الجزئية الصغيرة (i) ما بين الفاصلتين

الزمنيتين j و $j+1$ وهذه الوحدات يمكن معاملتها

على أنها مواضع منفصلة لمركز الاقتناص ويمكن

التعامل مع الانبعاث الناتج عن أي من هذه

الوحدات الصغيرة بشكل مستقل عن البقية.

لنفترض أن الفجوات تتحرك بالاتجاه السالب

الفعال لحاجز الجهد لمركز الاقتناص (Trap). وهذا الأمر يتحدد بسمك الطبقة المتدرجة التي يتم إنشاؤها وكذلك فولتية الانحياز للثنائي الضوئي الإنهياري. وفي حالة التركيب متعدد الطبقات قيد الدراسة، فإن الشكل (2) يبين نمط جهد حزمة التكافؤ المحسوب وكذلك الارتفاعات الفعالة لحاجز الجهد التي تمثل الفرق ما بين أقصى قيمة وأدنى قيمة على المنحني. يمكن ملاحظة أن المسافة من القمة إلى القعر تتغير أيضاً مع تغير فولتية الانحياز. وقد جرى حساب التأخير الزمني الحاصل عند تجاوز الجهد من خلال السرعة الموجية (Wave Velocity) للانبعاثات.

إن الفجوات المقتنصة تعاني عملية انبعاث من مركز الاقتناص بفعل التأثير الحراري-الأيوني (Thermoionic Effetc) بمعدل انبعاث يعطى كالآتي [15]:

$$A_{trap} = B \exp\left(-\frac{E_{vd}}{KT}\right) \quad (1)$$

حيث B ثابت خاص بالفجوات و T

درجة الحرارة المطلقة و K ثابت بولتزمان.

يمكن حساب عدد الفجوات المقتنصة

لوحدة المساحة (p_t) من خلال حل معادلة

الاستمرارية وكالآتي:

$$\frac{dp_t}{dt} = \frac{J_p}{q} - (A_{trap} + R) p_t \quad (2)$$

حيث J_p كثافة التيار الناتج عن الفجوات

الداخلة إلى مركز الاقتناص عند أي زمن t

و q شحنة الإلكترون و R معدل إعادة

الاتحاد (Recombination Rate).

العدد الكلي للفجوات المتراكمة لتلك الفترة الزمنية يبقى ثابتاً. يمكن حساب كثافة التيار كالاتي [4]:

$$J_p = qp \frac{D_p}{L_p} \left[\sinh\left(\frac{W}{L_p}\right) \right]^{-1} \quad (3)$$

حيث W عرض منطقة الاستنزاف و D_p معامل انتشار الفجوات و L_p طول انتشار الفجوات. فيما تعطى كثافة التيار عند الموضع (i) واللحظة (j) والناجم عن دخول الفجوات إلى مركز الاقتران كالاتي:

$$J_p(i, j) = qp(i, j)v_h(i) \quad (4)$$

حيث $v_h(i)$ معدل السرعة التي تدخل بها الفجوات عند الموضع (i) ويمكن افتراضها ثابتة. بموجب الافتراض الثاني فإن قيمة $p(i, j)$ في الفترة الزمنية Δt تكون ثابتة، لذا تكون قيمة $J_p(i, j)$ ثابتة أيضاً في نفس الفترة الزمنية ويمكن حل المعادلة (2) ما بين لحظتين زمنييتين متتاليتين، وهنا تكمن أهمية الافتراض الثاني الذي يستوجب اختبار صحته الآن. من أجل الأخذ بنظر الاعتبار حقيقة أن حركة الفجوات من الموضع b_1 إلى الموضع c_1 يمكن أن تستغرق أجزاء من Δt للوصول إلى الموضع a_1 ، فإنه يجب الأخذ بالحسبان التأخير الحاصل للفجوات المنبعثة من مواضع مختلفة في مركز الاقتران. إضافة إلى ذلك، فإن هذه المنطقة هي منطقة المجال الواطئ للثنائي الضوئي الإنهاري وإن عدد المواضع الجزئية ما بين z و $z+1$ يكون قليلاً جداً من الناحية العملية وحقيقة أن سرعة الفجوة تكون واطئة عند المجالات الكهربائية الواطئة. على سبيل المثال، يتم استخدام موضع جزئي واحد أو اثنين فقط لقيم معلومة من Δx و Δt للبقاء داخل مركز

للمحور السيني (x-axis) بسبب الانحياز المسلط وأنه عند اللحظة الأخيرة من الزمن الكلي (j^{th}) تكون هنالك ثلاث نقاط فقط من الطول (i) هي a_1 و b_1 و c_1 على المحور السيني مشغولة من قبل الفجوات في مركز الاقتران. بعد فترة زمنية مقدارها Δt ، أي عند الفاصلة الزمنية $(j+1)$ ، تتحرك الفجوات من النقاط a_2 و b_2 و c_2 على اليمين (خارج مركز الاقتران) إلى اليسار لتشغل المواضع a_1 و b_1 و c_1 على التوالي. وهنا يكون عدد الفجوات المتحركة بهذه الطريقة عند أي لحظة خلال الفترة الزمنية Δt ثابتاً ومساوياً للحد $p(i, j)$ حتى اللحظة التالية $(j+1)$. وكما هو الحال مع باقي مناطق التركيب متعدد الطبقات، فإن الخطأ البسيط الناجم عن تقسيم الزمن الكلي إلى فواصل متعددة يمكن تقليله أكثر من خلال حساب معدل أعداد الحاملات المحسوبة ما بين لحظتين متتاليتين، وكذلك معدل القيم العملية الدنيا (Minima) لكل من Δx و Δt .

يمكن القول أنه حالما تتحرك الفجوات إلى داخل مركز الاقتران فإنها سوف لن تتحرك من الموضع (i) إلى موضع آخر داخل مركز الاقتران. مثال ذلك أن الفجوة الداخلة عند الموضع a_1 هي بسبب الحركة من الموضع a_1 إلى الموضع a_2 فقط وهذا يمنع طبعاً احتمالات الانتقال من الموضع b_1 إلى الموضع a_1 ومن الموضع c_1 إلى الموضع a_1 وهكذا. وهذه الفجوات في الغالب سوف تنبعث أو تعيد اتحادها من مواضعها الخاصة بها (a_1, b_1, c_1) وإن التأثير الكلي لانبعاث الفجوات على كثافة التيار في الفترة الزمنية Δt يبقى ثابتاً في الغالب أيضاً. لذا فإن عدد الفجوات $p(i, j)$ عند أي لحظة ما بين z و $z+1$ وعند قيمة $J_p(i, j)$ يكون ثابتاً، وهذه هي النقطة الأساسية للافتراض الثاني الذي يعني أن الفجوات لا تتراكم عند مواضع (i) مختلفة في مركز الاقتران في الفترة الزمنية Δt ومع ذلك فإن

الموضع معين (i) من مركز الاقتران يمكن إيجاده من خلال إجراء التكامل للمعادلة (2) بدلالة $p_i(j-1)$ و $p_e(j-1)$. وبعد ذلك يمكن حساب عدد الفجوات المنبعثة لوحدة المساحة من خلال ضرب قيمة $p_e(j)$ بمعدل الانبعاث (A_{trap}). يتم الحصول على عدد الفجوات المنبعثة لوحدة الحجم في $p_e(j)$ في الفترة الزمنية (j) من خلال قسمة المقدار الناتج على المقدار ($v_{th} \Delta t$) وكالآتي:

$$p_e(j) = p_e(j-1) \exp\{-(A_{trap} + R)\Delta t\} + \frac{A_{trap}}{A_{trap} + R} \frac{p_i(j-1)}{p_i(j-1)} \exp\{-(A_{trap} + R)\Delta t\} \quad (5)$$

المنطقة المستنزفة قبل أن يتم ابتلاعها من قبل المجال الكهربائي. يكون تيار الانتشار صغيراً نسبياً بالمقارنة مع تيار الانجراف وهذا قد لا يؤثر بشكل كافٍ على الريح الإجمالي للثنائي، ولكن الفجوات المتولدة من مناطق مختلفة من طبقة الامتصاص غير المستنزفة سوف تصل المنطقة المستنزفة بقيم مختلفة للتأخير الزمني، وهذا يؤدي إلى تكوين ذيل (Tail) في شكل نبضة الاستجابة. من الناحية الفعلية يصبح انتشار الفجوات دالة للموضع والزمن ومن الممكن إيجاد هذه الدالة من خلال حل معادلات الاستمرارية الملائمة بوجود الشروط الحدودية والابتدائية المناسبة.

لأجل إيجاد دالة انتشار الفجوات فإنه يتطلب حل معادلة استمرارية التيار الملائمة عند الشروط الحدودية والابتدائية المناسبة، ولكن لغرض التبسيط وكذلك الأخذ بنظر الاعتبار أن تيار الانتشار له تأثير قليل على الريح الإجمالي للثنائي الضوئي، فإنه يتم فقط اعتماد الزمن الذي تستغرقه الفجوات المتولدة ضوئياً في المنطقة غير المستنزفة إلى المنطقة المستنزفة في تحديد الاستجابة

الاقتران عند القيم الواطنة والمتوسطة للانحياز. وعليه فإن الافتراض الثاني كذلك يكون مقبولاً تماماً.

بما أن المعادلة (4) تكون صحيحة لجميع

المواضع الجزيئية ما بين j و $j+1$ فإن تركيز الفجوات المقتنصة $p_i(j)$ في الفترة الزمنية

حيث $p(j)$ كثافة الفجوات الداخلة إلى مركز الاقتران عند زمن (j). يتم استخدام العلاقة لكل موضع جزئي (i) على حدة.

يتم حساب معدل إعادة الاتحاد (R) من مقلوب زمن إعادة الاتحاد للفجوات ويعطى بالمقدار (D_p/L_p^2) . تعتمد قيمة معدل إعادة الاتحاد (R) قليلاً على تركيز الفجوات الإضافية (Δp) إذ تعطى قيمته كالاتي [14]:

$$R = \frac{D_p}{L_p^2} \left(1 + \frac{\Delta p}{N}\right) \quad (6)$$

حيث N كثافة الإشابة في طبقة الامتصاص. عند القيم الواطنة جداً للانحياز يكون هنالك تراكم في الفجوات عند مركز الاقتران وبالتالي فإن معدل إعادة الاتحاد يمكن أن يزداد.

عندما يعمل الثنائي الضوئي الإنهياري عند قيم واطئة للانحياز فإن طبقة الامتصاص يمكن ألا يتم استنزافها بالكامل، لذلك فإن الفجوات المتولدة ضوئياً في المنطقة غير المستنزفة يجب أن تنتشر إلى

(Integers) المرتبطة بها لن تكون ثابتة وإنما دوال للموضع. في هذا التحليل، تم إجراء ملائمة رياضية (Fitting) لبعض المعاملات للحصول على زيادة أسية للسرعة والتي تطابق البيانات المتوفرة فيما يخص مناطق المجال الواطئ والمجال العالي [17].

النتائج والمناقشة:

جرى اعتماد الثنائي الضوئي الإنهياري المتضمن مناطق متميزة للامتصاص والتدرج أو الانحدار وتجميع الشحنات والتضاعف والمقدم في المصدر [13] لإجراء التحليل عند درجة حرارة الغرفة (300K) وقد امتلك هذا الثنائي فولتية انهيار حوالي 32V في منطقة الانحياز الواطئ، تم اختيار المعاملات المختلفة المشاركة في ثوابت التأين للإلكترونات والفجوات في مادة InP من المصدر [18] فيما تم اختيارها لمادة InGaAs من المصدر [8] وقد ثبت تجريبياً أنها تقارب جداً نفس القيم لمادة InGaAsP. لقد لوحظ أن معدل فقدان الطاقة بواسطة الفجوات لكل فوتون عند درجة حرارة 300K يكون 0.0183eV وهذه القيمة تحقق أفضل توافق مع البيانات التجريبية. إن معدل فقدان الطاقة بواسطة الفجوات يتم حسابه من خلال قياس طيف الانبعاث الناجم عن استتارة الفوتون الساقط من قبل الفجوة في الجزء الموجب من الثنائي [14]. جرى حساب قيمة معامل الانتشار (D_p) باستخدام قيمة تحريكية الفجوات من معادلة أينشتين الآتية:

$$D = \frac{KT}{q} \cdot \mu \quad , \quad L = \sqrt{D \cdot \tau} \quad (8)$$

النبضية. وعليه، فإن الزمن (t_d) اللازم لقطع مسافة (x) يعطى كالاتي [16]:

$$t_d = \frac{x^2}{2D_p} \quad (7)$$

لذا فإن الفجوات عند مواضع مختلفة في المنطقة غير المستنزفة سوف تصل المنطقة المستنزفة بقيم مختلفة للتأخير الزمني.

يتحدد زمن عبور حاملات الشحن بسرعتها ويعد مقياساً عملياً لبلوغ حد الإشباع (Saturation) في سرعة الحاملات خلال التركيب متعدد الطبقات [10][13]. ورغم أن الافتراض يكون مقبول في معظم الحالات إلا أنه لا يكون صحيحاً عند يكون المجال واطئاً. هذا الأمر يكون ضرورياً بشكل خاص لطبقة الامتصاص حيث يكون المجال الكهربائي واطئاً جداً بالمقارنة مع قيمته في الطبقات الأخرى التي فوقها. ومع أن ذلك يساهم في قيمة كثافة التيار إلا أن تأثيره يمكن ألا يكون واضحاً على قيمة الريح للثنائي الضوئي الإنهياري، والسبب هو أن الريح يتم حسابه على أنه نسبة الحاملات الكلية الناتجة عن التأين التصادمي إلى تلك الحاملات المتولدة بدون تأين. وفي حالة جهد الانحياز الواطئ فإن التأين يحدث أساساً في منطقة التضاعف. ولكن التأثير يمكن أن يظهر على عرض الحزمة في منطقة الانحياز الواطئ حيث لا يمتلك التأخير الناجم عن الانتشار أي تأثير. عند مناطق المجالات الكهربائية الواطئة جداً، تتحرك حاملات الشحن بسرعة واطئة جداً بينما في مناطق المجالات الكهربائية العالية جداً تحدث حالة الإشباع في سرعة الحاملات. وعليه فإن قيم السرعة والثوابت الصحيحة

المجال كبيراً جداً ليسبب حالة الإشباع في سرعة الحاملات، كما أنه لا يكون صغيراً جداً ليسبب استنزاف غير تام لطبقة الامتصاص. وهذا الأمر يصبح أكثر وضوحاً عندما تكون كثافة الإشابة لطبقة الامتصاص واطئة جداً وهذا هو الإجراء المطلوب لتجنب التضاعف في منطقة InGaAs وعليه يتم تجنب تأثير النفقية (Tunneling) غير المرغوب فيه. والشكل (6) يوضح تأثير الانتشار والاقتناص كل على حدة على الاستجابة النبضية للتثائي الضوئي الإنهياي. يظهر من الشكل أن كل من عملية الاقتناص وعملية الانتشار تسيطران على اضمحلال نبضة الاستجابة عند الانحياز الواطئ، ومع ذلك فإن عملية الانتشار تكون الأكثر سيادة عند قيمة الانحياز المبينة وإن وجود ذيل طويل لنبضة الاستجابة يوضح أن عرض الحزمة يقل بشكل كبير عند تلك القيمة من الانحياز.

من المهم القول هنا أنه بسبب نمط الجهد المتدرج لمنطقة InGaAsP فإنه يوجد مجال كهربي داخلي (Built-in) يمكن أن يعمل مع جهد الانحياز المسلط على تحفيز التأيّن التصادمي. وإن ذلك يمكن أن يحدث بالطرق التالية: أن الإلكترونات المتحركة أدنى حاجز الجهد يمكن أن تكتسب طاقة إضافية بسبب ذلك المجال الداخلي وبالتالي تسبب احتمالية التأيّن التصادمي. إن الفجوات الثانوية المتولدة في هذه المنطقة سوف تتحرك أيضاً بنفس الاتجاه الذي تتحرك به الإلكترونات بسبب أن المجال يمثلك شدة عالية واتجاهه يكون معاكساً للمجال الناجم عن الانحياز المسلط، لذلك فإن هذه الفجوات سوف تتصادم وتؤين داخل مركز الاقتناص. كذلك يمكن أن تظهر الفجوات الابتدائية في بعض

حيث μ تحريكية حاملات الشحن و τ فترة حياة تلك الحاملات. وقد تم انتخاب قيمة معقولة لطول الانتشار (L_p) مقدارها $(1\mu m)$.

يوضح الشكل (3) مخطط الانحياز - الريح والذي يبين توافقاً جيداً ما بين القيم النظرية والقيم التجريبية. يتم حساب عرض الحزمة عند قيمة ربح 3dB وبشكل مباشر من خلال إجراء تحويل فوريير السريع (Fast Fourier Transformation) والذي يرمز له (FFT) لمنحني الاستجابة النبضية مع تصحيح ضئيل لثابت الزمن (RC). يمكن القول هنا أنه عند الانحياز الواطئ فإن مساهمة ثابت الزمن (RC) في القيمة الإجمالية لعرض الحزمة تكون طفيفة نسبياً. يوضح الشكل (4) عرض الحزمة عند قيمة ربح 3dB كدالة للريح الإجمالي للتثائي الضوئي.

يبين الشكل (5) تأثير الآليات المختلفة المسؤولة عن علاقة عرض الحزمة بالريح عند الانحياز الواطئ. يتضح من الشكل أن إهمال انتشار الفجوات المتولدة ضوئياً من المنطقة غير المستنزفة إلى المنطقة المستنزفة من طبقة الامتصاص يعطي زيادة للتقدير الكبير لعرض الحزمة عند ربح 3dB عند القيم الواطئة جداً للريح الإجمالي. توضح الزحزحة (Shift) القليلة لهذا المنحني نحو اليمين أنه بدون عملية الاقتناص يكون من الممكن المبالغة في تقدير قيمة الريح الإجمالي أيضاً.

يؤدي الافتراض بأن حاملات الشحن تنتقل عند سرعة الإشباع إلى فرق في تقدير عرض الحزمة في المنطقة ما بين الريح الإجمالي الواطئ والريح المتوسط والسبب هو أنه في هذه المنطقة من الانحياز لا يكون

الاستنتاجات:

جرى تقديم نموذج تحليلي معتمد على نتائج تجريبية للثنائي الضوئي الإنهاري عند حالة الانحياز الواطئ يهدف للتعرف إلى أداء الثنائي مباشرة من نبضة الاستجابة. النموذج المقدم يتعامل مع الآليات الثلاث الضرورية المسؤولة عن التيار المتولد ضوئياً وهي انبعاث الفجوات المقتنصة وانتشار حاملات الفجوات المتولدة ضوئياً من المنطقة غير المستنزفة في طبقة الامتصاص وسرعة حاملات الشحن الأقلية. ولأجل تحديد الاستجابة النبضية فقد تم الأخذ بنظر الاعتبار التأخير الحاصل في انتشار الفجوات المتولدة ضوئياً من مواضع مختلفة من المنطقة غير المستنزفة لأجل الوصول إلى حدود المنطقة المستنزفة، وقد اقترن بذلك أن سرعة حاملات الشحن تكون واطئة عند المجال الواطئ. تبين قيمة عرض الحزمة المحسوبة مباشرة باستخدام تحويل فوريير السريع (FFT) للاستجابة النبضية أن عمليتي الانتشار والاقتران تسيطران على عرض الحزمة عند القيم الواطئة جداً للريح الإجمالي بينما يكون تأثير سرعة حاملات هو السائد في المنطقة ما بين الريح الواطئ والريح المتوسط. جرت مناقشة تأثير المجال الكهربائي الداخلي على التأين التصادمي عند مركز الاقتران بسبب الطبقة المتدرجة ولكنه يمكن أن يكون مهماً.

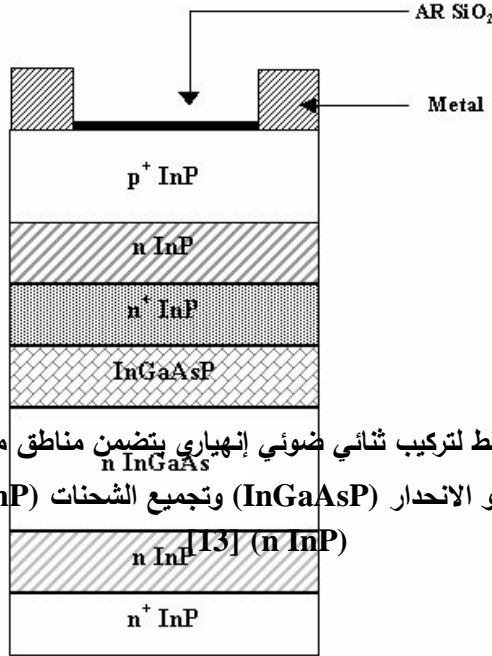
المناطق من الطبقة المتدرجة عند لحظة توليد أزواج إلكترون-فجوة بواسطة نبضة الضوء الساقطة ويمكن أن تبدأ تأيناً مماثلاً. وعليه فإن عدد الفجوات المنبعثة بفعل التأثير الحراري الأيوني من مركز الاقتران سوف يزداد أيضاً مسبباً تيار أكبر وتأخير محتمل. في الحالة الأولى، يتم الافتراض أنه تحت شرط الانحياز الواطئ فإن المجال الداخلي الناجم عن الطبقة المتدرجة مع الانحياز المسلط لا يكون كبيراً إلى حد كافٍ لتحفيز التأين التصادمي بواسطة الإلكترونات. كذلك يتناقص الارتفاع الفعال لحاجز الجهد مع زيادة جهد الانحياز وبالتالي يقل المجال الداخلي.

في الحالة الثانية، وفي جزء صغير فقط من طبقة InGaAsP قريب من منطقة InGaAs تتولد أزواج إلكترون-فجوة، لذا فإن هنالك احتمالية قليلة جداً للفجوات لتتصادم وتؤين. ومع ذلك فقد تم افتراض أن الفجوات المتولدة ضوئياً من هذه المنطقة سوق تسقط أدنى حاجز الجهد بسرعة تتحدد بالمجال الكهربائي من أجل أن تتراكم في مركز الاقتران. إن احتمالية التأين التصادمي بسبب الحالة الأولى يمكن أن تزداد اعتماداً على جهد الانحياز المسلط وعرض الطبقة المتدرجة.

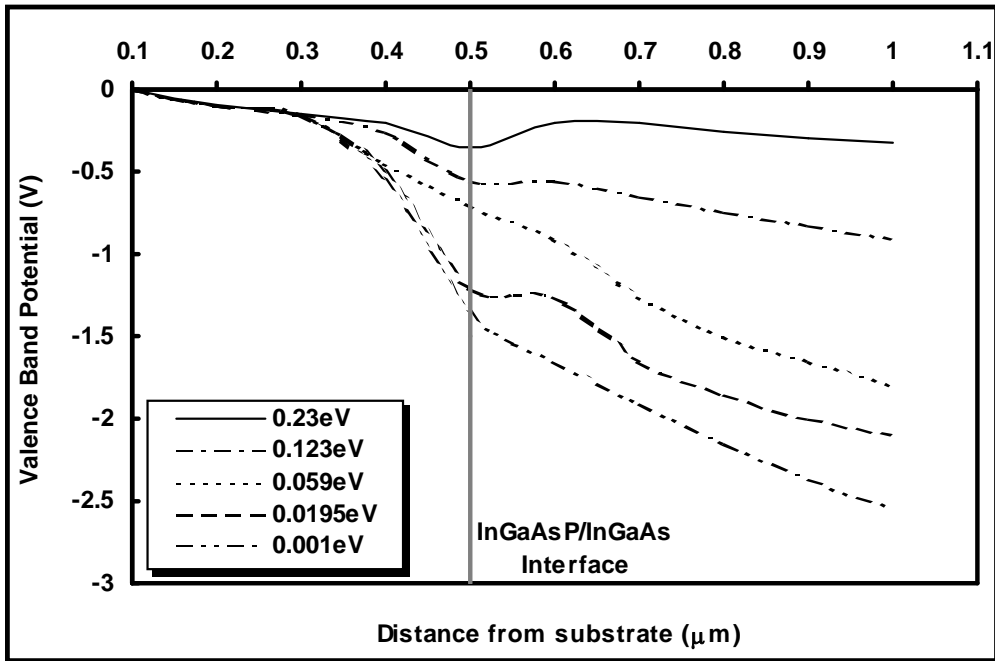
REFERENCES:

1. Jones, M. H., "A practical introduction to electronic circuits", 2nd ed., Cambridge (1985), 7-8.
2. Riesz, R., "Characterization and Modeling of InP Avalanche Photodiodes", *Rev. Sci. Instrum.*, 33(1962), 994.
3. Lee, C. et al., "Ionization Rates of Holes and Electrons in Silicon," *Phys. Rev. A*, 134(3)(1964), 761-773.

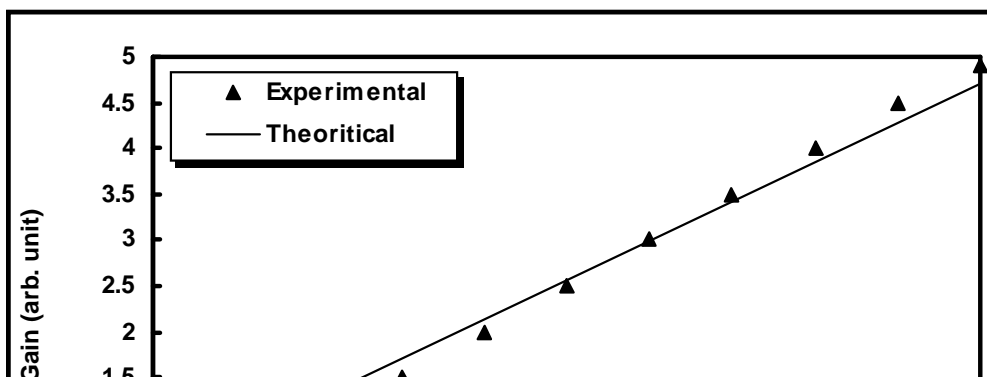
4. Sze, S. M., "Semiconductor Devices Physics and Technology", Murray Hill, New Jersey (1981), 384-385, 385, 389, 64-67.
5. Yariv, A., "Optical Electronics in Modern Communications", 5th ed., Oxford (1997), 436-437.
6. Tarof, L. et al., "High frequency performance of separate absorption grading, charge and multiplication InP/InGaAs avalanche photodiodes", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 5(1993), 672-674.
7. Watanabe, I. et al., "High speed and low dark current InAlAs/InAlGaAs APD's", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 5(1993), 675-677.
8. Lenox, C. et al., "Resonant cavity InGaAs-InAlAs avalanche photodiodes", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 11(1999), 1162-1164.
9. Campbell, J. et al., "Frequency response of InP/InGaAsP/InGaAs APD's with separate absorption grading and multiplication regions", *IEEE Quantum Electron.*, QE-21(1985), 1743-1749.
10. Shiba, T. et al., "New approach to the frequency response analysis of an InGaAs avalanche photodiode", *J. Lightwave Technol.*, 6(1988), 1502-1505.
11. Hollenhorst, J., "Frequency response theory for multilayer photodiodes", *J. Lightwave Technol.*, 8(1990), 531-537.
12. Campbell, J. et al., "Frequency response of InP/InGaAs/InGaAs APD's", *J. Lightwave Technol.*, 7(1989), 778-784.
13. Hayat, M. and Saleh, E., "Statistics properties of the impulse response function of double-carrier multiplication avalanche photodiodes", *J. Lightwave Technol.*, 10(1992), 1415-1425.
14. Bandyopadhyay, A. et al., "A simplified approach to time-domain modeling of avalanche photodiodes", *IEEE Quantum Electron.*, 34(1998), 691-699.
15. Xiao, Y. and Deen, M., "Modeling of two-dimensional gain profiles for InP/InGaAs avalanche photodiodes", *IEEE Quantum Electron.*, 35(1999), 1853-1862.
16. Forrest, S., Kim, O. and Smith, R., "Analysis of the dark current and photoresponse of In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP avalanche photodiode", *Solid-State Electron.*, 26(1983), 951-968.
17. Taguchi, K. et al., "Temperature dependence of impact ionization coefficients in InP", *J. Appl. Phys.*, 59(1986), 476-481.
18. Chau, H. and Pavlidis, D., "A physics-based fitting and extrapolation method for measured impact ionization coefficients in III-V semiconductors", *J. Appl. Phys.*, 72(1992), 531-538.



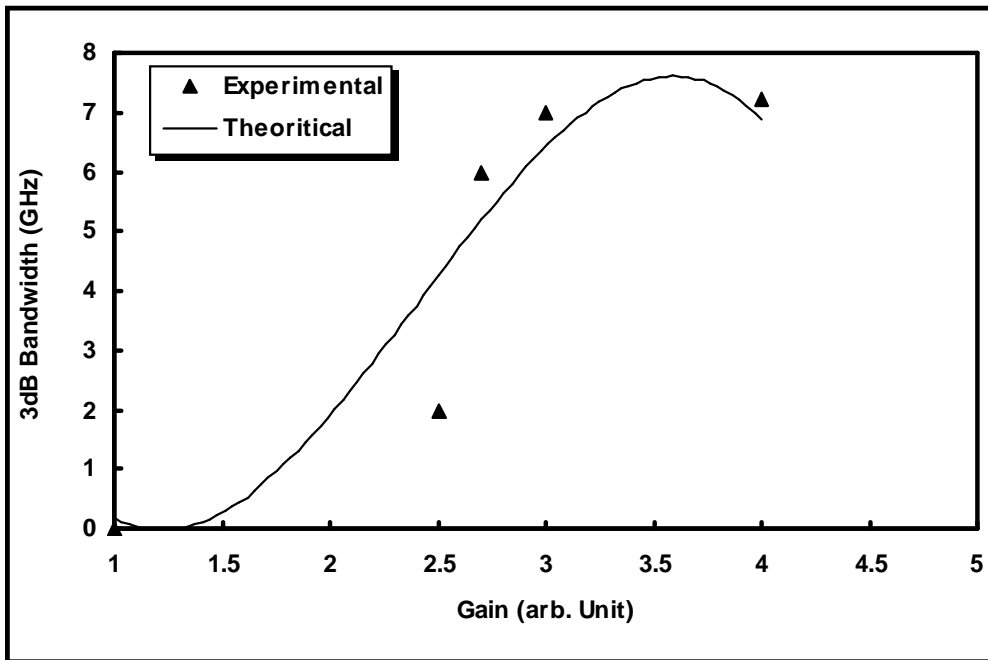
شكل (1) يوضح مخطط لتركييب ثنائي ضوئي إنهباري يتضمن مناطق متميزة لامتصاص (InGaAs) والتدرج أو الانحدار (InGaAsP) وتجميع الشحنات ($n^+ \text{InP}$) والتضاعف ($n \text{InP}$) [13] ($n \text{InP}$)



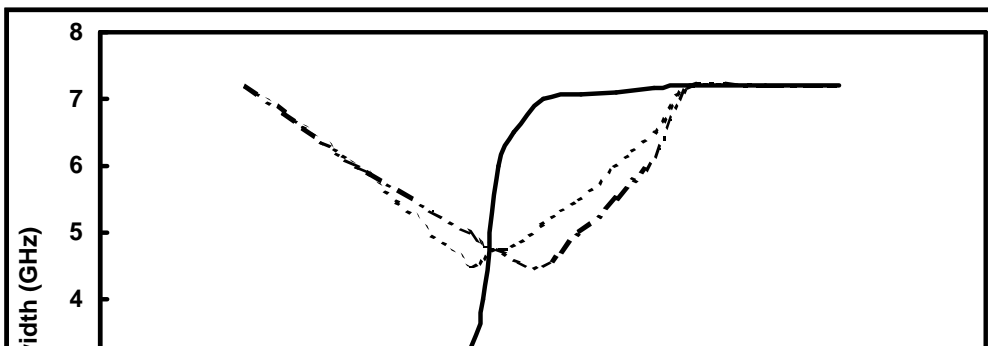
شكل (2): يوضح نمط جهد حزمة التكافؤ المحسوب وكذلك الارتفاعات الفعالة لحاجز الجهد اعتماداً على النتائج المقدمة في المصدر [13]



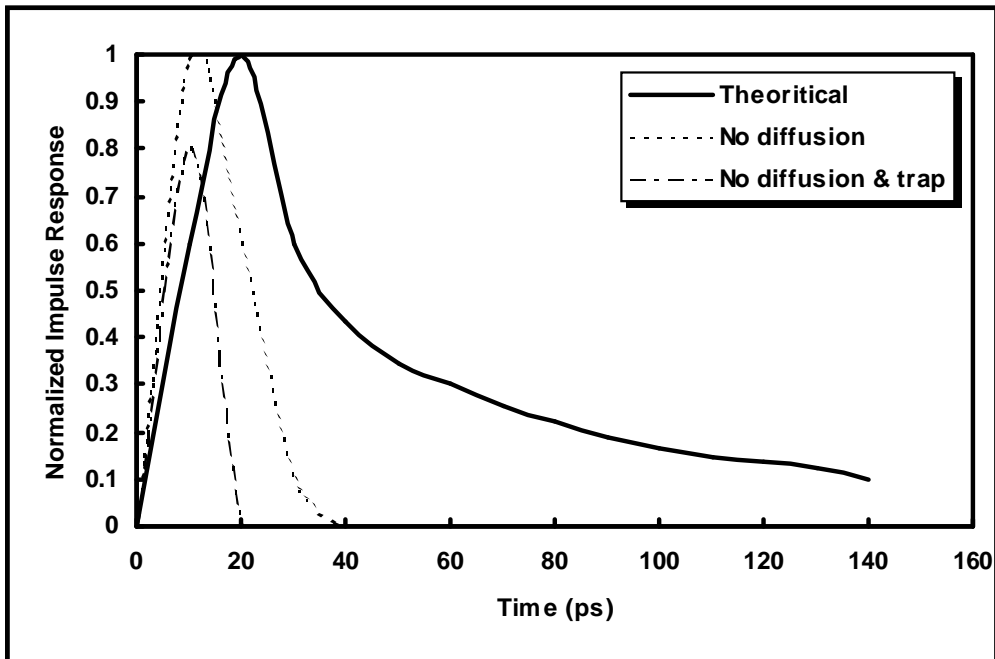
شكل (3): يوضح مخطط الانحياز-الريح المحسوب نظرياً وعملياً



شكل (4): يوضح عرض الحزمة عند قيمة ربح 3dB كدالة للربح الإجمالي للثنائي الضوئي نظرياً وعملياً



شكل (5): يوضح تأثير الآليات المختلفة المسؤولة عن علاقة عرض الحزمة بالريح عند الانحياز الواطئ



شكل (6): يوضح تأثير الانتشار والاقتناص على شكل نبضة الاستجابة للتثاني الضوئي الإنهاري