

## تصميم رقمي ومحاكاة كاشف شريط الجرافين النانوي (GNR) للكشف عن الأشعة تحت الحمراء المتوسطة (MIR)

بدر الأعرج\*

ناصر اسماعيل\*\*

نوار داوود\*\*\*

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٦ / ٢ / ١٠ - تاريخ النشر ٢٠٢٦ / ٤ / ١٦)

□ ملخص □

تتميز كواشف شريط الجرافين النانوية (GNR) بأنه يمكن هندسة فجوة الطاقة فيها مما يتيح صناعة أنصاف نواقل بفجوات طاقة مختلفة يمكنها العمل ضمن نطاقات أشعة FIR و THz كما أنها أقل تأثراً بتغيرات درجة الحرارة مقارنة مع الكواشف التقليدية مما يمنحها القدرة على العمل دون الحاجة إلى تبريد كبير. في هذه الورقة وباستخدام النمذجة الرياضية والبرمجة قمنا بتصميم رقمي لتقييم أداء كاشف ضوئي معتمد على أشربة الجرافين النانوية يعمل في مجال الأشعة تحت الحمراء المتوسطة (MIR) وقارنا حساسيته الحرارية بحساسية كاشف النقطة الكمومية.

**الكلمات المفتاحية:** الجرافين، شريط الجرافين النانوي (GNR)، كاشف ضوئي، الأشعة تحت الحمراء المتوسطة (MIR)، المحاكاة العددية، الإستجابة (Responsivity)، الحساسية الضوئية، التيار المظلم، فجوة الطاقة، تطبيقات الإستشعار الضوئي.

\*أستاذ في قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة اللاذقية - سوريا

\*\*أستاذ في قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة اللاذقية - سوريا

\*\*\*ماجستير في الفيزياء - كلية العلوم - جامعة اللاذقية - سوريا

## Digital Design and Simulation of a Graphene Nanoribbon (GNR) Detector for Mid-Infrared (MIR) Radiation Detection

**Badr Al-Araj\***  
**Nasser Ismael\*\***  
**Nawar Daood\*\*\***

(Received 10/2/2026.Accepted 16/4/2026)

### □ABSTRACT □

Graphene nanoribbon detectors (GNR) are distinguished by the ability to engineer their energy bandgap, enabling the fabrication of semiconductor devices with different bandgaps that can operate in the FIR and THZ frequency ranges. Moreover, they are less sensitive to temperature variations compared to conventional detectors, which allows them to operate without the need for extensive cooling. In this paper, using mathematical modeling and numerical programming, we performed a numerical design to evaluate the performance of a graphene nanoribbon based photodetector operating in the Mid-infrared region (MIR), and we compare its thermal sensitivity with that of a quantum dot detector.

**Keywords:** Graphene, Graphene nanoribbon (GNR) ,Photodetector ,Mid-Infrared (MIR), Numerical Simulation, Responsivity, Optical Sensitivity, Dark Current, Band Gap, Optical Sensing Applications.

---

\*Master's Degree in physic – Faculty of Science – University of Lattakia –Syria

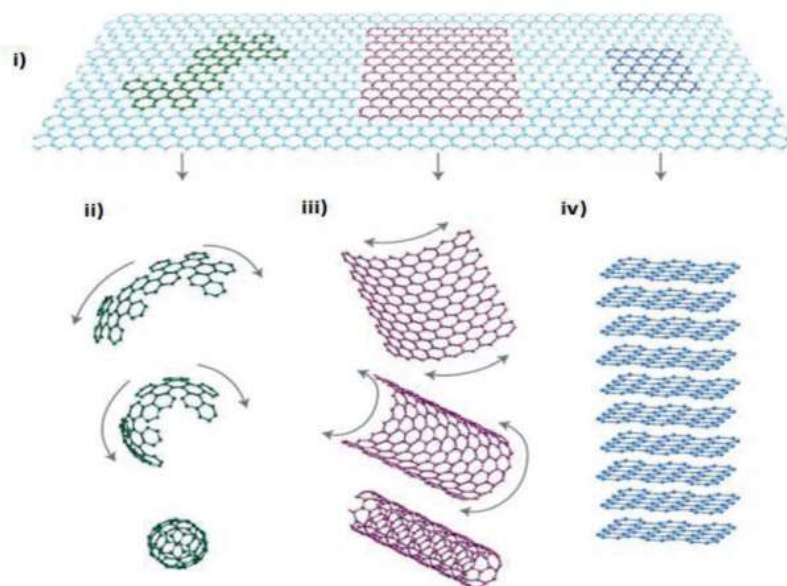
\*\*Professor at Department of Physic – Faculty of Science – University of Lattakia –Syria

\*\*\*Professor at Department of Physic – Faculty of Science – University of Lattakia –Syria

## ١ - مقدمة:

### (a) الجرافين:

تم عزل مادة الجرافين لأول مرة في التاريخ عام 2004 بواسطة كل من **Konstantin** و **Andre Geim** و **Novoselov** في جامعة مانشستر، و الجرافين هي مادة ثنائية الأبعاد (2D) بسماكة ذرة واحدة، و هي عبارة عن ذرات كربون مرتبطة ببعضها البعض بالرابطة  $sp^2$  على شكل شبكة سداسية تشبه قرص العسل. إن الجرافين هو لبنة البناء الأساسية للمواد الكربونية النانوية مثل الفوليرين (0D) والأنابيب الكربونية النانوية (1D) والجرافيت [1].



شكل 1: i)Graphene ii)Fullerene iii)Carbon nanutube iv)Graphite

يتميز الجرافين بخصائص فريدة حيث أن إجهاد الشد الأقصى لديه هو  $1.3 \times 10^{11}$  Pa مقارنة مع  $10^7$  Pa في الفولاذ و  $3.76 \times 10^8$  Pa في الأراميد مما يجعله من أقوى المواد المكتشفة على الإطلاق ، كما أنه خفيف الوزن و يمتلك خصائص مرنة تمكنه من العودة إلى وضعه الأصلي بعد زوال الضغط المطبق [2].

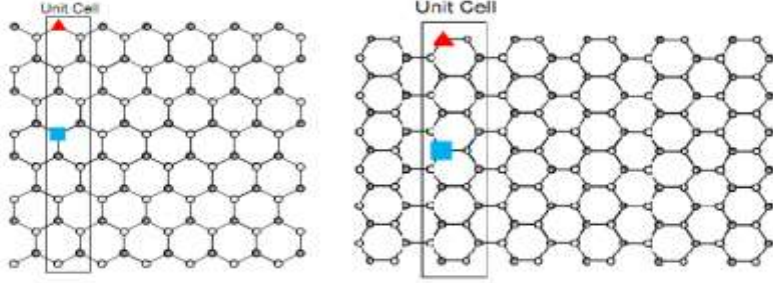
الجرافين هو شبه معدن و هو ناقل للتيار الكهربائي و الحراري و تبلغ حركية حاملات الشحنة فيه حوالي  $2 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{v}^{-1} \text{s}^{-1}$  في درجة حرارة الغرفة. يمكن الحصول على الجرافين من مادة الجرافيت و ذلك بتقشير طبقة واحدة منها حيث أن الجرافيت هي طبقات مترابطة من مادة الجرافين ومن الطرق المستخدمة في تصنيعه هي "التقشير الميكانيكي الدقيق" و "التقشير في الطور السائل LPE" و "الترسيب الكيميائي للبخار CVD" و "الترسيب بالليزر النبضي PLD" [3].

في الحالة العادية لا يمتلك الجرافين فجوة طاقة مما يجعله غير صالح للاستخدام مباشرة في الكواشف الضوئية ولكن من المزايا الفريدة في الجرافين أنه عند تصغير عرضه تبدأ فجوة طاقة بالتشكل بين عصابة التكافؤ وعصابة الناقلية ويتناسب مقدار هذه الفجوة عكسياً مع عرض الشريط.

**(b) شريط الجرافين النانوي GNR:**

هو شريط رفيع أحادي البعد مقطوع من صفيحة جرافين على اتجاه بلوري معين وله نوعان:

1-ذراع الكرسي Armchair      2- المتعرج Zigzag



شكل 2: شريط ذراع الكرسي (armchair) على اليمين والشريط المتعرج (zigzag) على اليسار.

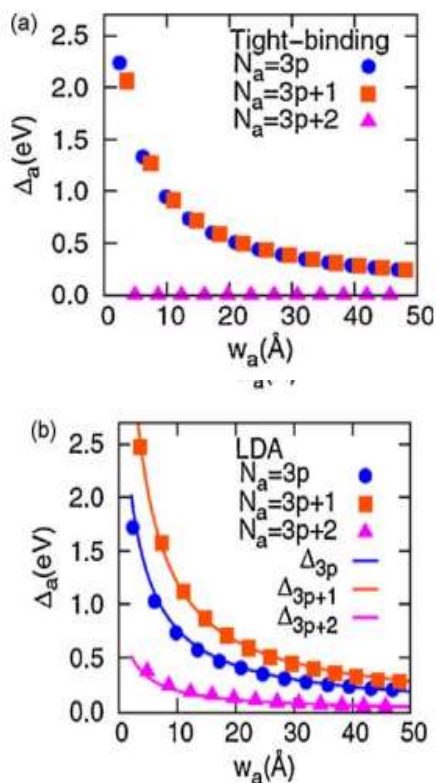
إن الشريط المستخدم في الكاشف المدروس من نوع ذراع الكرسي Armchair وترتبط قيمة فجوة الطاقة المستحدثة فيه بعرض الشريط بالعلاقة:

$$E_g = \frac{2\pi\hbar v_F}{d} \quad (1)$$

حيث أن  $v_F$  هي سرعة فيرمي و هي من مرتبة  $10^6$  m/s في الجرافين ،  $d$  هو عرض الشريط النانوي و  $\hbar$  هو ثابت بلانك المختزل [4].

تظهر هذه العلاقة أن فجوة الطاقة تتناسب عكساً مع عرض الشريط وهي تظهر فقط عند تصغير شريط الجرافين الكرسي إلى قيم محددة سنناقشها لاحقاً.

إن إنتاج فجوة طاقة في شريط جرافين يخضع لشرط آخر وهو أنه لتشكيل فجوة طاقة يجب أن يكون عدد سلاسل شريط الكرسي المقطع هو  $3p$  أو  $3p + 1$  حيث أن  $p$  هو عدد صحيح، بينما لو كان عدد السلاسل  $3p + 2$  فلن تظهر فجوة الطاقة وسيملك الشريط سلوك معدني [5].



شكل 3: (a) علاقة فجوة الطاقة  $\Delta_a$  بعرض الشريط  $w_a$  وفقاً لحسابات الترابط المحكم (b) علاقة فجوة الطاقة بعرض الشريط وفقاً للحسابات الأولية وتمثل  $N_a$  عدد سلاسل الشريط المققطع.

يمكن تصنيع أشطرة الجرافين بعدة طرق منها "طريقة الطباعة الحجرية من الأعلى إلى الأسفل" والتي تنتج أشطرة بعرض يتراوح بين عشرات النانومتر وحتى المايكرومتر، وكذلك طريقة "فك الأنابيب الكربونية CNT" ويكون عرض الأشطرة المنتجة بهذه الأشطرة مرتبط بحجم الأنابيب الابتدائية، فعلى سبيل المثال يمكن إنتاج أشطرة بعرض 10-20 nm من أنبوب قطر مقطعه 8 nm.

يوجد طرق أخرى تدمج بين طريقتي التصنيع من الأعلى للأسفل ومن الأسفل للأعلى وتستخدم لإنتاج أشطرة جرافين بعرض أقل من 10 nm [6].

يتراوح الطول الموجي للأشعة تحت الحمراء المتوسطة بين 3000 nm و 8000 nm أي بين 0.41 eV و 0.155 eV و لامتناص هذا المجال الموجي فإننا نحتاج إلى نصف ناقل ذو فجوة طاقة تعطي بالعلاقة:

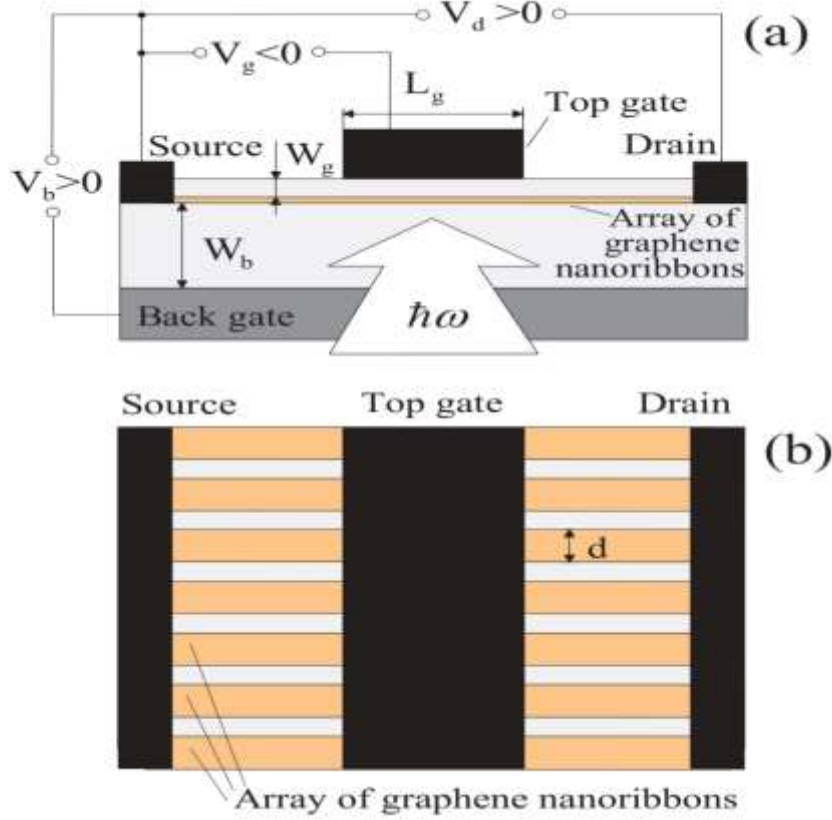
$$E_g(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})} \quad (2)$$

ومنه  $E_g = 0.155\text{eV}$  وهي فجوة الطاقة اللازمة لامتناص الأشعة تحت الحمراء المتوسطة في شريط الجرافين و يمكن حساب عرض شريط الجرافين الموافق لفجوة الطاقة هذه من خلال العلاقة (1) والتي نحصل منها على  $d = 22 \text{ nm}$ .

سيتم اعتماد قيمة  $E_g$  التي حصلنا عليها في نمذجة الكاشف الضوئي GNR-PT.

## (c) كاشف شريط الجرافين GNR-PT :

هو ترانزستور من نوع MOSFET تم إضافة شرائط جرافين نانوية بعرض ضيق قيمته 22 nm وتتوضع بشكل مواز بين المصدر source والمصرف drain [7].



شكل 4: (a) كاشف شريط الجرافين GNR-PT و يظهر الشكل (b) مصفوفة من شرائط الجرافين.

يعرف التيار المظلم بأنه التيار الذي يمر في الكاشف عند غياب الضوء و هو يرتبط بدرجة الحرارة و يعطى بالعلاقة :

$$I_{dark} = v \left( \frac{V_b}{2\pi^2 W_b} \right) \sqrt{K_B \frac{T}{E_g}} \exp\left(\frac{-E_g^{dark}}{kT}\right) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{eV_d}{kT}\right) \right] \quad (3)$$

حيث  $\alpha$  هو ثابت العزل الكهربائي لثاني أكسيد السيليكون الحراري  $SiO_2$  الذي يستخدم كعازل بؤابي في المكونات الإلكترونية ،  $V_b$  هو الجهد الكهربائي المطبق على البوابة، هو سرعة فيرمي وهي سرعة الإلكترونات عند أعلى مستوى طاقة عند درجة الصفر المطلق ،  $E_g$  فجوة الطاقة المتشكلة بين عصابة التكافؤ و عصابة الناقلية في شريط الجرافين النانوي ،  $V_d$  الجهد الكهربائي بين المنبع و المصرف ،  $W_b$  بُعد شرائط الجرافين عن البوابة الخلفية ،  $W_g$  بُعد شرائط الجرافين عن البوابة العلوية ،  $T$  هي درجة الحرارة المطلقة ،  $K_B$  ثابت بولتزمان ،  $e$  شحنة الإلكترون و  $E_g^{dark}$  هو ارتفاع الحوامل في المقطع المركزي من القناة [4].

يعطى  $E_g^{dark}$  بالعلاقة :

$$E_g^{dark} = -e \left[ \frac{W_g W_b}{W_b + W_g} \right] \left[ \frac{V_b}{W_b} + \frac{V_g}{W_g} \right] \quad (4)$$

يعرف التيار الضوئي بأنه التيار الكهربائي المتولد في الكاشف والناتج عن سقوط الأشعة بترددات مناسبة على الكاشف الضوئي وهو يمثل الإشارة التي يتم قياسها ويعطى بالعلاقة:

$$I_{photon} = \left( \frac{e^2 V_b}{kT} \right) \left[ \frac{1 - \exp\left(-\frac{eV_d}{kT}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{eV_d}{kT}\right)} \right] \left( \frac{W}{W_b} \right) l_g G_\omega \quad (5)$$

حيث  $l_g$  هو طول البوابة الخلفية للكاشف كما يُظهر الشكل (4) و  $G_\omega$  هو معدل التوليد الضوئي لحوامل الشحنة في شرائط الجرافين النانوية GNR وهو يتعلق بتردد الضوء الساقط و شدته ، و بقية العناصر الموجودة في العلاقة (5) تم شرحها في العلاقة (3).

يمكن التعبير عن العلاقة الرياضية لمعدل التوليد الضوئي  $G_\omega$  بالعلاقة التالية [8]:

$$G_\omega = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta E_g \Theta(\hbar\omega - nE_g) I_\omega}{\sqrt{\hbar^2 \omega^2 - n^2 E_g^2} \hbar \omega} \quad (6)$$

حيث  $\beta$  هي ثابت البنية الناعمة،  $E_g$  هي فجوة طاقة شرائط الجرافين النانوية GNR ،  $\hbar\omega$  هي طاقة الفوتون الساقط ،  $I_\omega$  هي شدة التيار الضوئي الساقط على الكاشف وهي تتعلق بكثافة فوتونات التيار الضوئي الساقط ،  $n$  هو عدد صحيح و  $\Theta(\hbar\omega - nE_g)$  هو تابع Heaviside بمتغير  $\hbar\omega - nE_g$ . يمكن تعريف التابع  $\Theta(\hbar\omega - nE_g)$  وفق الشكل:

$$\Theta(\hbar\omega - nE_g) = \begin{cases} 0 & : \hbar\omega - nE_g < 0 \\ 1 & : \hbar\omega - nE_g > 0 \\ \frac{1}{2} & : \hbar\omega - nE_g = 0 \end{cases} \quad (7)$$

أي أنه يساوي الواحد إذا كان ما بداخله أكبر من الصفر ويساوي الصفر إذا كان ما بداخله أصغر من الصفر ويساوي

$\frac{1}{2}$  في حال كان ما بداخله يساوي الصفر.

تعطى استجابة الكاشف بالعلاقة التالية [4]:

(8)

$$R = \frac{I_{photon}}{l_g I_\omega}$$

$$R = \left( \frac{e^2 V_b}{kT} \right) \left( \frac{W}{W_b} \right) \left[ \frac{1 - \exp\left(-\frac{eV_d}{kT}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{eV_d}{kT}\right)} \right] \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta E_g \Theta(\hbar\omega - nE_g)}{\hbar\omega \sqrt{\hbar^2\omega^2 - n^2 E_g^2}} \quad (9)$$

تظهر العلاقة (9) أن الإستجابة ليست مستمرة على الطيف الكهرومغناطيسي المرصود و يكون التابع  $\Theta$  مساوياً للصفر عندما  $\omega\hbar$  أصغر من فجوة الطاقة  $E_g$  و لكن مع ازدياد العدد الصحيح  $n$  و في كل مرة تقترب كثيراً  $\omega\hbar$  من  $nE_g$ ، عندها يصبح التابع  $\Theta$  مساوياً للواحد و تزداد  $R$  بشكل كبير، ولذلك يظهر منحني  $R$  على شكل قمم ضيقة العرض عند هذه النقاط و إن جميع الرموز الواردة في العلاقتين (8) و (9) تم توضيحها في العلاقات السابقة.

### (c) كاشف النقطة الكمومية QDIP

سنقارن بين كاشف شريط الجرافين النانوي GNR – PT وكاشف النقطة الكمومية QDIP لمعرفة الأداء الأفضل و الأقل تكلفة تحت نفس ظروف التشغيل ولإجراء المقارنة سنقوم أولاً بإجراء محاكاة لتابع الإستجابة لكاشف النقطة الكمومية ، ويعطى تابع الإستجابة الضوئية لكاشف النقطة الكمومية حسب نظرية النقطة الكمومية بالعلاقة التالية [9]:

$$R = \frac{e \sigma \sum_m}{\alpha \hbar\omega} \exp\left(\frac{w_e}{w_e + w_c} \frac{eV}{kT}\right) \quad (10)$$

حيث  $\sigma$  هي سطح مقطع الإمتصاص في مادة الكاشف،  $\alpha$  هي معامل الإمتصاص ،  $w_e$ ،  $w_c$  هي سماكة كل من الباعث و المجمع في كاشف النقطة الكمومية ،  $e$  شحنة الإلكترون ،  $k$  ثابت بولتزمان،  $T$  درجة الحرارة المطلقة،  $\hbar\omega$  طاقة الفوتون الساقط على الكاشف،  $V$  هو الجهد الكهربائي المطبق على الكاشف و  $\sum_m$  هو متوسط الحد الأقصى لكثافة الإلكترونات السطحية في الكاشف.

### 2- أهمية البحث و أهدافه:

شهدت أشرطة الجرافين النانوية GNR اهتماماً متزايداً في السنوات الأخيرة في مجال كشف الأشعة تحت الحمراء وذلك بسبب امتلاكها فجوة قابلة للضبط تعتمد على عرض الشريط و قد أظهرت الكثير من الأبحاث أن التحكم في أبعاد هذه الأشرطة النانوية يمكن أن يؤدي إلى تحسن كبير في امتصاص الأشعة تحت الحمراء MIR و أشعة التيراهرتز THz [4] [8] ، و قد بينت بعض الأبحاث أن استخدام مصفوفات من أشرطة الجرافين النانوية يمكن أن يرفع من كفاءة الكاشف من خلال التأثيرات البلازمونية [10] ، كما تم اقتراح تصاميم لكواشف GNR-PT ذاتية التشغيل تعمل بدون مصدر طاقة خارجي [11] و إضافة إلى ذلك تم إجراء أبحاث لتطوير بنى هجينة تجمع بين GNR و مواد كربونية نانوية أخرى لزيادة الجودة و تقليل التيار المظلم فيها [12] ، ومع ذلك، فإن الدراسات التي تتناول أداء كاشف GNR لرصد الأشعة تحت الحمراء المتوسطة لا تزال محدودة.

يهدف هذا البحث إلى إجراء محاكاة برمجية و رقمية لسلوك كاشف شريط الجرافين و رسم منحنيات توابع التيار الضوئي و المظلم و الإستجابة عند ظروف تشغيل متباينة ثم تقييم قدرته على امتصاص الأشعة تحت الحمراء المتوسطة ثم مقارنة أداءه مع كاشف النقطة الكمومية QDIP.

### 3- طرائق البحث ومواده:

حسبنا فجوة الطاقة اللازمة لامتناس الأشعة تحت الحمراء المتوسطة بواسطة العلاقة (2) و التي حصلنا منها على  $E_g = 0.155 \text{ eV}$  وبواسطة العلاقة (1) تم حساب عرض شريط الجرافين النانوي الذي يمتلك فجوة الطاقة  $E_g$  وهو  $d = 22 \text{ nm}$ . قمنا باستخدام لغة بايثون لإجراء محاكاة عددية لدراسة سلوك كاشف أشعة الجرافين ذو فجوة الطاقة  $0.155 \text{ eV}$  و عرض شريط يبلغ  $22 \text{ nm}$  و الذي قمنا بتصميمه لامتناس طيف الأشعة تحت الحمراء المتوسطة MIR و استخدمنا خلال عملية المحاكاة مكتبة NumPy لبناء المصفوفات و إجراء العمليات الرياضية و بناء التوابع وعند استخدام هذه المكتبة نضيف الرمز np كلاحقة اختصار لكل تابع نقوم بكتابته داخل الكود و استخدمنا أيضاً مكتبة Matplotlib لرسم المنحنيات البيانية و تسمية المحاور الإحداثية كما استخدمنا مكتبة SciPy لإظهار قمم المنحنيات على الرسم و من الجدير بالذكر أن جميع الأكواد البرمجية المستخدمة في هذه الدراسة تم تطويرها و تنفيذها من قبل المؤلفين دون الإعتماد على أكواد جاهزة.

بإجراء المحاكاة العددية لتابع التيار المظلم المعطى بالعلاقة (3) و (4) لرسم منحنى التيار المظلم بدلالة الجهد  $V_d$  عند جهود كهربائية مختلفة لبوابة الكاشف  $V_b$  نحصل على ما يلي:

استدعاء المكتبات %

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

الثوابت بالوحدات الدولية %

```
v=10**(8)
a=3.9
Wb=15*10**(-8)
k=1.38*10**(-23)
T=300
Eg=0.155*1.6*10**(-19)
e=1.6*10**(-19)
Wg=10**(-8)
Vg=-1
```

تم إعطاء قيم مختلفة لجهد البوابة %

```
Vb=[1,1.2,1.4]
for i in Vb:
Eg_dark=-e*(Wb*Wg/(Wb+Wg))*(i/Wb + Vg/Wg)
```

المتغير هو جهد المنبع- المصرف %

```
Vd=np.linspace(0,0.5) % V
```

np هي اختصار لمكتبة NumPY وتوضع كلاحقة لجميع الدوال في كود بايثون %

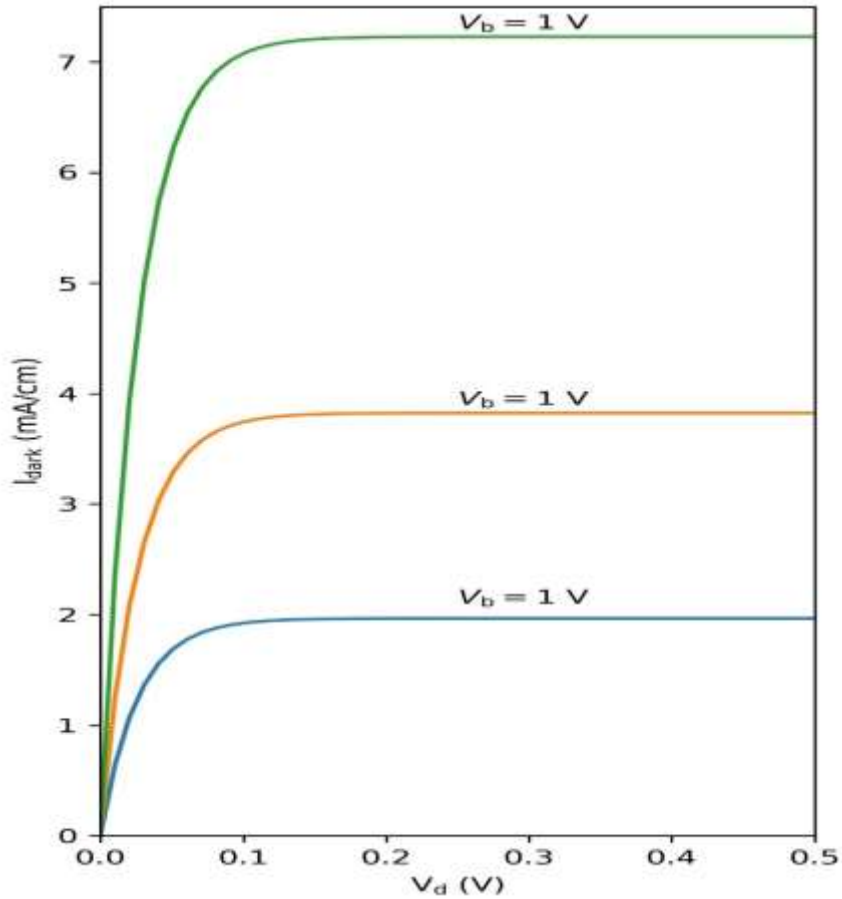
```
Idark=v*(a*i/(2*np.pi**(1.5)*Wb))*np.sqrt(k*T/Eg)*np.exp(-Eg_dark/(k*T))*(1-
np.exp(-e*Vd/(k*T)))*10
```

تم الضرب بالعدد عشرة لتحويل الوحدة من  $\frac{A}{m}$  إلى  $\frac{mA}{cm}$

أمر الرسم و تسمية المحاور الإحداثية %

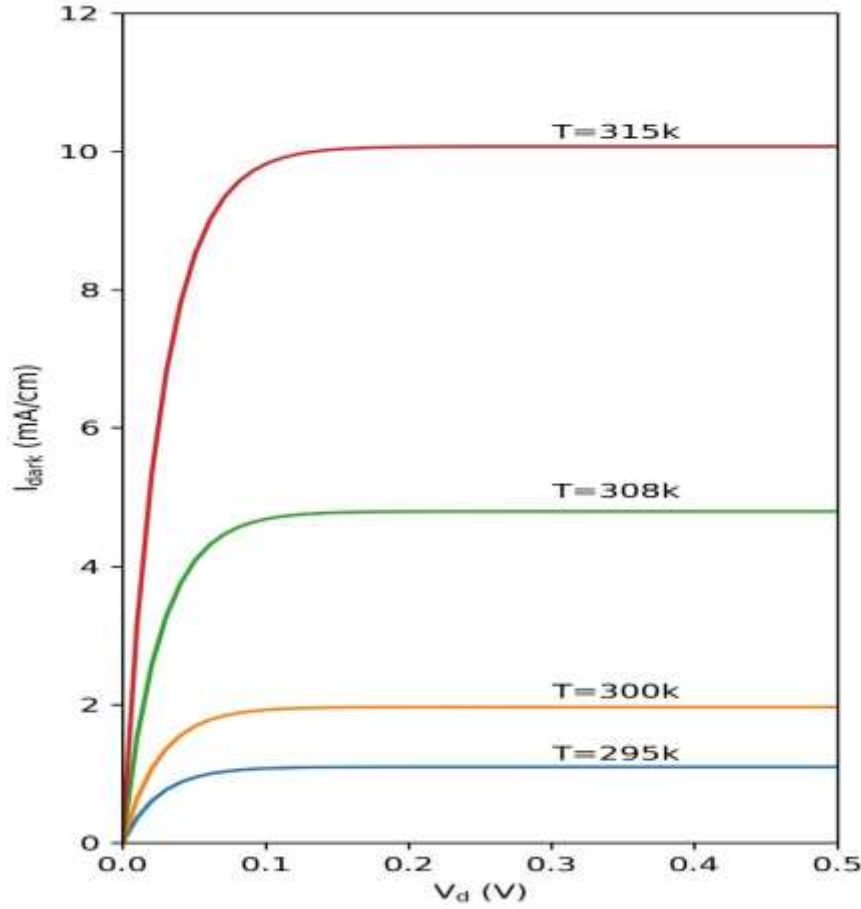
```
plt.plot(Vd, Idark)
plt.margins(x=0, y=0)
plt.xlabel("Vd(V)")
plt.ylabel("I(mA/cm)")
plt.xlim(0, 0.5)
plt.ylim(0, 7.5)
plt.text(0.25, 2.1, "Vb=1V")
plt.text(0.25, 3.9, "Vb=1.2V")
plt.text(0.25, 7.3, "Vb=1.4V")
plt.show()
```

ومنه نحصل على الشكل التالي:



شكل 5: تغيرات شدة التيار المظلم بدلالة الجهد بين المنبع والمصرف من أجل قيم مختلفة لجهد البوابة  $V_b$  عند درجة حرارة  $T=300K$ .

وبتغيير درجة حرارة كاشف شريط الجرافين نحصل على الشكل التالي:

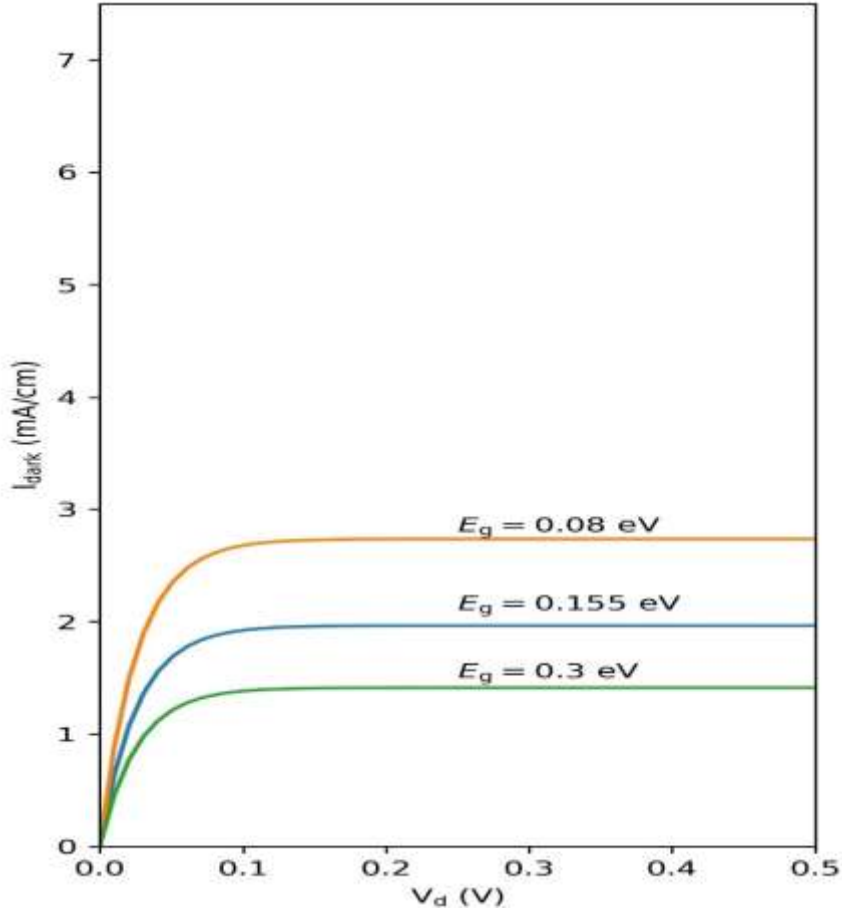


شكل 6: تغيرات كثافة التيار المظلم بدلالة الجهد بين المنبع و المصرف من أجل قيم مختلفة لدرجة الحرارة عند جهد بوابة  $V_b = 1V$ .

يظهر الشكل (5) أن ازدياد جهد البوابة سيزيد من شدة التيار وذلك بسبب انخفاض الحاجز الكهربائي مما يسمح لمزيد من حوامل الشحنة بالعبور كما يظهر الشكل (6) أن ازدياد درجة الحرارة يزيد من التيار المظلم وذلك بسبب زيادة معدل التوليد الحراري للإلكترونات و الثقوب و إن التيار المظلم المار في شرائح الجرافين أحادية البعد من مرتبة الميلي أمبير .

برسم التيار المظلم للكاشف عند فجوات طاقة مختلفة لشرائط الجرافين النانوية GNR نحصل على الشكل

التالي:



شكل 7: تغيرات كثافة التيار المظلم بدلالة الجهد بين المنبع و المصرف من أجل قيم مختلفة لفجوة الطاقة عند جهد بوابة  $V_b = 1V$ .

يظهر الشكل (7) أن شرائط الجرافين النانوية ذو فجوة الطاقة الأعلى تمتلك تياراً مظلماً أقل، ويعود السبب في ذلك إلى انخفاض معدل التوليد الحراري لأزواج الإلكترونات والثقوب، حيث تحتاج فجوات الطاقة الأكبر إلى طاقة حرارية أعلى لتوليد الأزواج، وبما أن فجوة الطاقة قابلة للضبط فإنه يمكننا التحكم في التيار المظلم.

بإجراء المحاكاة لتابع التيار الضوئي المعطى بالعلاقة (5) و(6) نكتب الكود التالي:

```
Import numpy as np
```

```
hω = np.linspace(0.1, 2, 100)
```

```
% كتابة الجزء الأول من تابع التيار الضوئي %
```

```
prefactor = (e**2 * Vb / (K * T)) * ( (1 - np.exp(-e * Vd / (K * T))) /  
(1 + np.exp(-e * Vd / (K * T))) ) * W / (Wb) * Ig
```

```
% أدخلنا مصفوفة صفرية أبعادها من أبعاد المتغير hω %
```

```
sum_terms = np.zeros_like(hω)
```

افتراضنا أن المقدار الموجود في المقام تحت الجذر أكبر تماماً من الصفر لتجنب الأعداد السالبة تحت %  
الجذر و توليد أعداد عقدية و كذلك تجنباً لانعدام المقام و الوصول إلى حالة عدم تعيين

```
for n in range(1, 10):
    inside = h*omega**2 - n**2 * delta**2
    valid = inside > 0
    term = np.zeros_like(h*omega)
```

كتابة المقدار الموجود تحت الجذر %

```
denom = np.sqrt(inside[valid]) * h*omega [valid]
```

كتابة المقدار داخل إشارة الجمع  $\sum$  %

```
term[valid] = Beta * delta * np.heaviside(h*omega [valid] - n*delta, 1) * I_omega / denom
```

كتابة الجزء الثاني من تابع التيار الضوئي و هو الجزء المتعلق بمعدل التوليد الضوئي %

```
sum_terms += term
```

كتابة تابع التيار الضوئي للكاشف و قد قمنا بتقسيم تابع التيار الضوئي على شحنة الإلكترون e لتحويل  $h\omega$

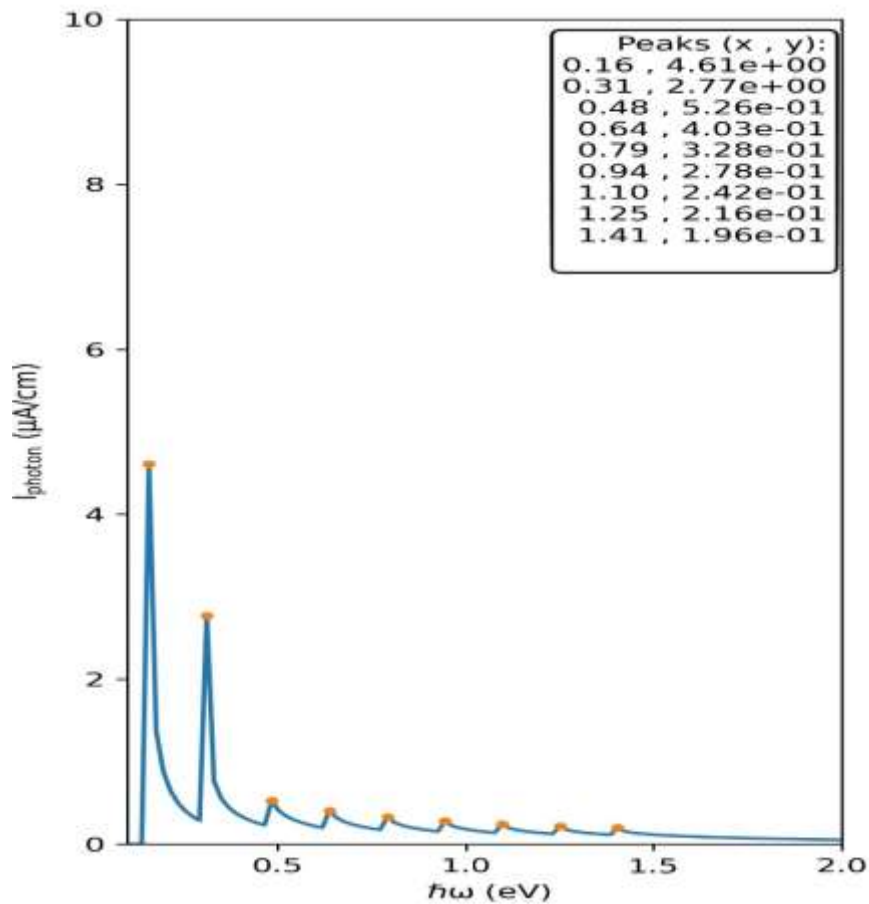
التي ظهرت في مقام الكسر إلى جول وذلك لتجانس الوحدات %

```
I_photon = 1/(e) * prefactor*sum_terms * 10**(4)
```

حيث قمنا بكتابة جزء فقط من الكود وهو الجزء المتعلق بإيجاد التابع الضوئي  $I_{photon}$  و قد ضربنا ب  $10^4$

لتحويل واحدة التيار الضوئي من  $\frac{A}{m}$  إلى  $\frac{\mu A}{cm}$ .

ومنه نحصل على الشكل التالي:

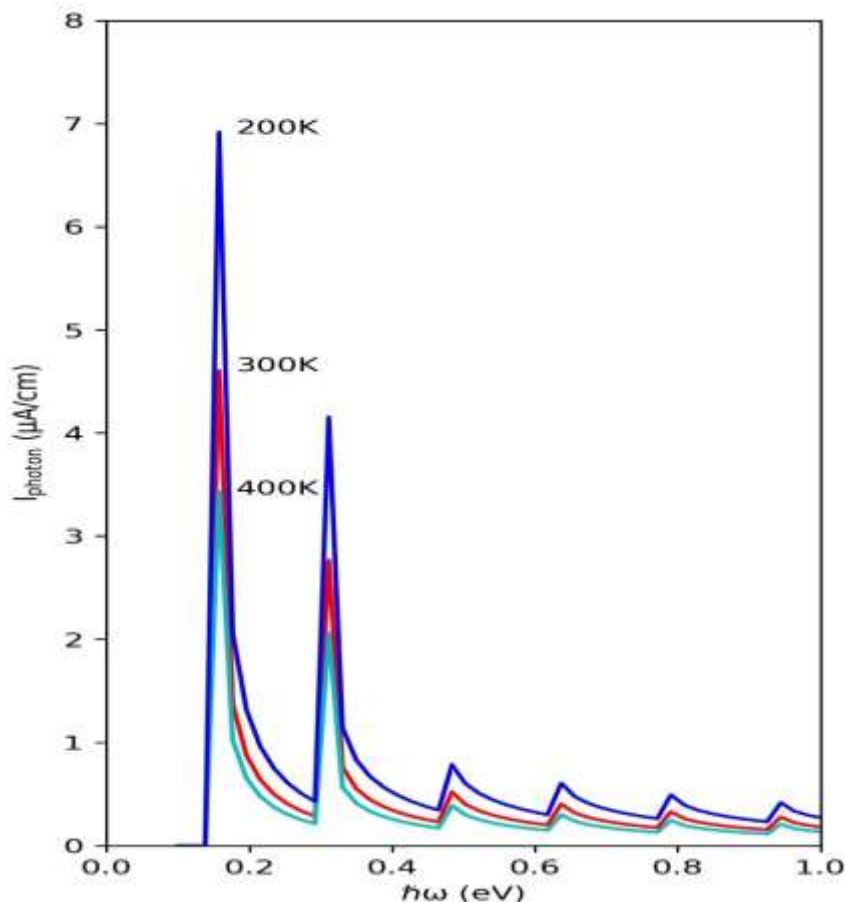


شكل 8: منحنى التيار الضوئي بدلالة تردد الضوء الساقط لكاشف شريط الجرافين بعرض 22 nm .

يظهر منحنى التيار الضوئي قمماً رنينية عند ترددات محددة ضمن مجال الأشعة تحت الحمراء المتوسطة وهي  $4.61 \mu\text{A}/\text{cm}$  عند طول موجة 7750 nm و  $2.77 \mu\text{A}/\text{cm}$  عند طول موجة 4000 nm كما يظهر قيماً أخرى غير معدومة على باقي مجال الأشعة تحت الحمراء المتوسطة وهذا يثبت تجريبياً أن فجوة الطاقة المستحدثة في شرائط الجرافين النانوية ملائمة تماماً لامتصاص الأشعة تحت الحمراء المتوسطة. إن القيم الرنينية للمنحنى التجريبي للتيار الضوئي تظهر أن الإمتصاص الرنيني يحدث عندما تقترب كثيراً قيمة طاقة الفوتون الساقط  $\omega\hbar$  من قيمة فجوة الطاقة  $E_g$  أو من  $E_{gn}$  وهذا ما يتطابق تماماً مع العلاقة الرياضية (5).

إن التيار الضوئي المتولد في شرائط الجرافين أحادية البعد من مرتبة  $\mu\text{A}$ .

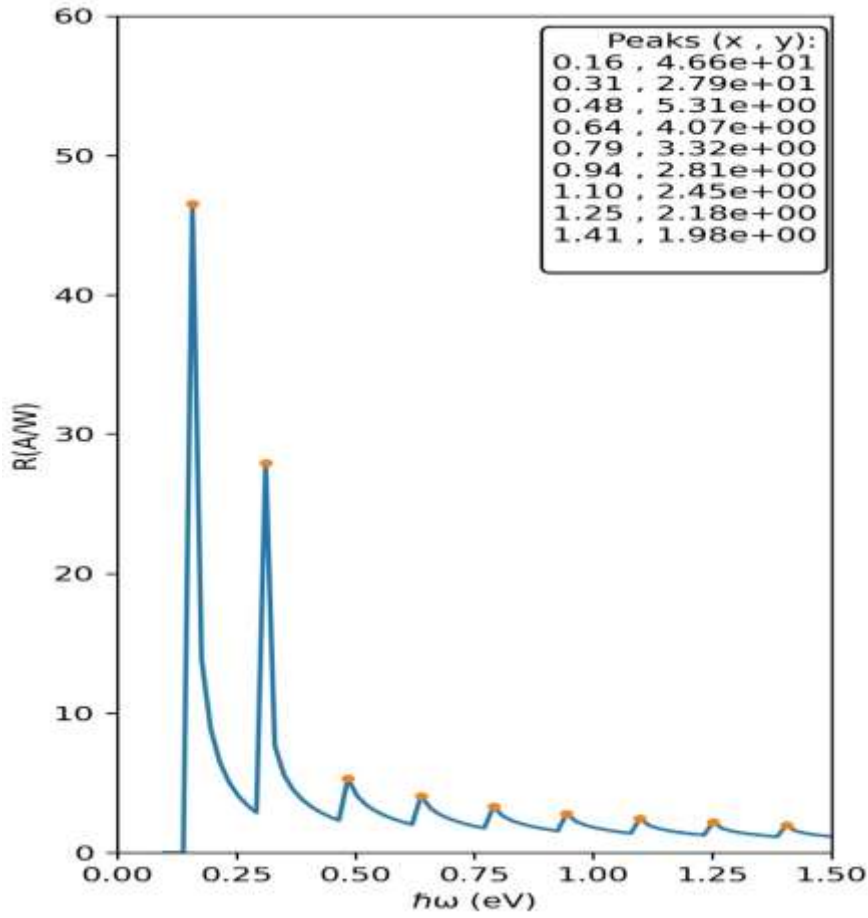
بإجراء المحاكاة لتابع التيار الضوئي عند درجات حرارة مختلفة نحصل على الشكل التالي:



شكل 9: تغيرات التيار الضوئي بدلالة تردد الإشعاع الساقط عند درجات حرارة مختلفة.

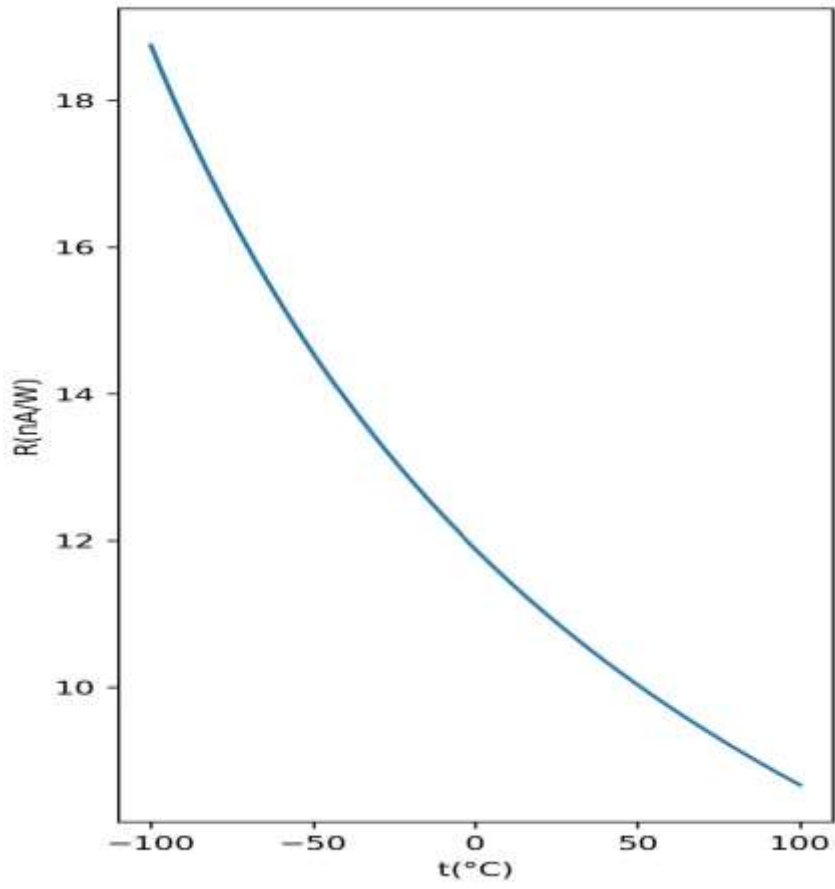
نلاحظ أن التيار الضوئي يزداد بانخفاض درجة الحرارة حيث نحكي كثافة التيار الضوئي عند ثلاثة قيم مختلفة لدرجة الحرارة ونلاحظ انخفاض القمم عند زيادة درجة الحرارة مع عدم حصول أي انزياح جانبي لها وهذا يعني أن الأطوال الموجية للامتصاص تبقى ثابتة مهما تغيرت درجة الحرارة ويُعزى ارتفاع التيار الضوئي إلى انخفاض التيار المظلم وكذلك انخفاض الضجيج الحراري عند تناقص درجات الحرارة.

تعرف استجابة الكاشف الضوئي  $R$  بأنها النسبة بين المخرجات الكهربائية والمدخلات الضوئية و واحدتها الدولية  $A/W$  و هي مقياس لحساسية الكاشف للضوء وتعتمد على طول موجة الضوء الساقط على الكاشف وتعطى بالعلاقة (9) و بإجراء المحاكاة لتابع الاستجابة  $R$  ، مع العلم أن تابع الاستجابة  $R$  مشتق رياضياً من تابع التيار الضوئي  $I_{\text{photon}}$  و لذلك فهما يمتلكان تقريباً نفس الخطوات المستخدمة في كتابة الكود والتي كتبناها سابقاً عند رسم الشكل (7) ، و منه نحصل على الشكل التالي:

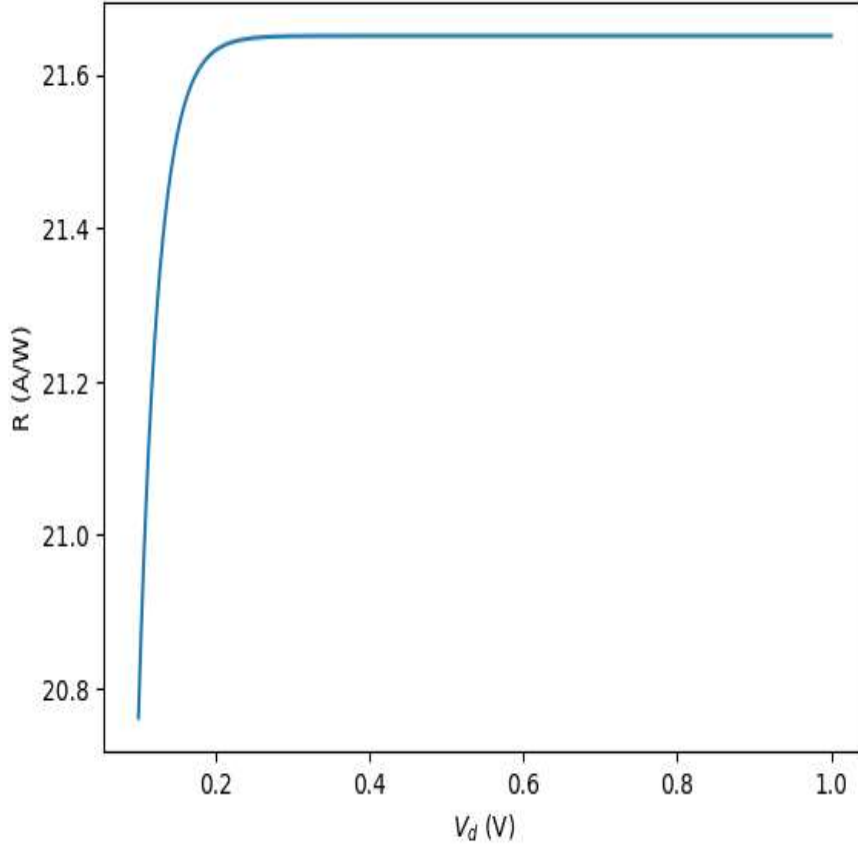


شكل 10: تغيرات الإستجابة الضوئية بدلالة تردد الشعاع الساقط .

إن منحنى الإستجابة مشابه لمنحنى التيار الضوئي كونه مشتقاً عنه ويظهر قيماً عالية عند الترددات التي تقترب فيها قيمة طاقة الفوتون الساقط  $\omega\hbar$  من قيمة فجوة الطاقة  $E_g$  أو من  $E_g n$  في أشربة الجرافين النانوية و يظهر الشكل أن منحنى الإستجابة ملائم جداً لامتصاص الأشعة تحت الحمراء المتوسطة المتوسطة. بإجراء المحاكاة على تابع الإستجابة عند تغيير كلاً من درجة الحرارة والجهد الكهربائي المطبق على الكاشف وذلك لمعرفة مقدار تأثيرهما على استجابة الكاشف، نحصل على الشكلين التاليين:

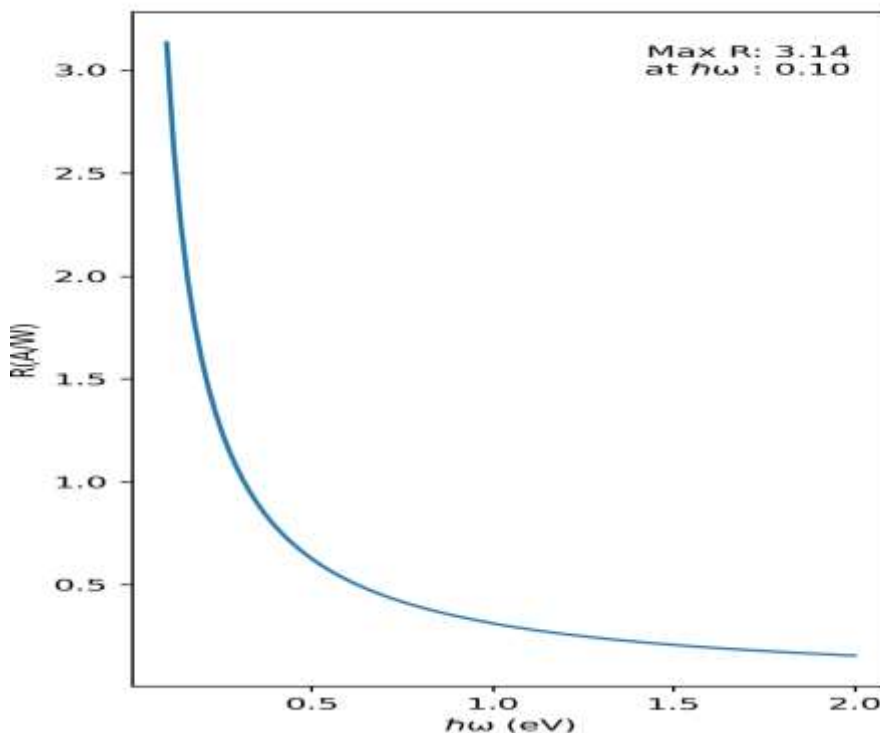


شكل 11: تغيرات الإستجابة بدلالة درجة الحرارة .



شكل 12: تغيرات الإستجابة مع جهد المنبع-المصرف المطبق على الكاشف.

يظهر المنحني في الشكل (9) أن استجابة كاشف شريط الجرافين تتناقص من 18.75 A/W إلى 8.67 A/W عند ارتفاع درجة الحرارة من (-100 °C) حتى (100 °C) و هذا يعادل انخفاضاً بنسبة % 53.24 من استجابة الكاشف كما يظهر المنحني في الشكل (10) أن الإستجابة تزداد بشكل سريع مع زيادة جهد المنبع - المصرف ثم تصل إلى قيمتها العظمى عند جهود كهربائية منخفضة و تصبح ثابتة. بإجراء المحاكاة للعلاقة (10) و باستخدام بارامترات حقيقية تم أخذها من مقالات علمية [9]، لجعل كاشف النقطة الكمومية QDIP يعمل في نطاق الأشعة تحت الحمراء المتوسطة ، نحصل على الشكل التالي:



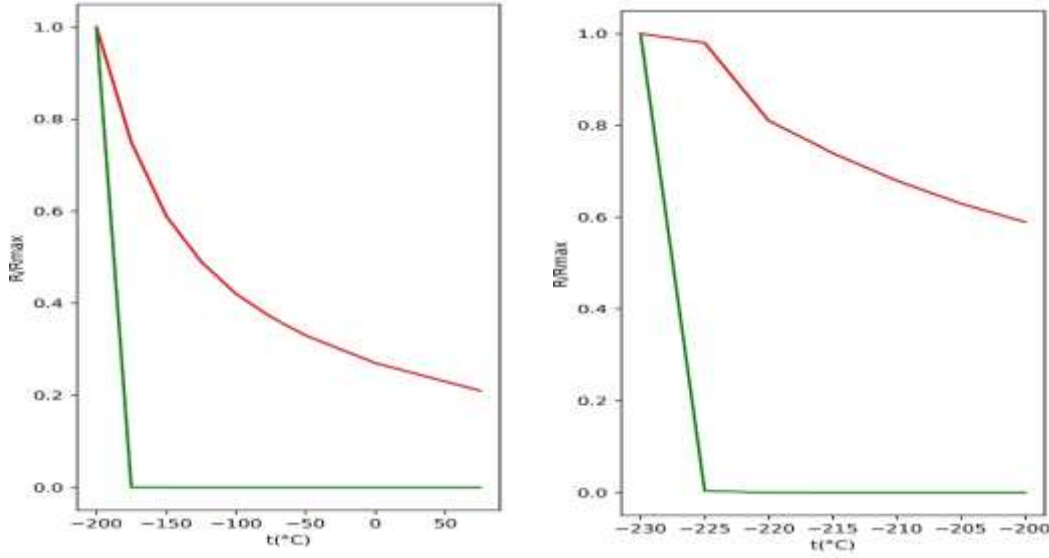
شكل 13: منحنى الإستجابة بدلالة التردد الضوئي في كاشف النقطة الكمومية.

يظهر المنحنى امتصاصاً جيداً للأشعة تحت الحمراء المتوسطة كما أن الإستجابة مستمرة على المجال الطيفي وليست متقطعة كما هو الحال في كاشف شريط الجرافين.

إن المقارنة المباشرة لتغير قيم الإستجابة بين كاشف شريط الجرافين النانوي وكاشف النقطة الكمومية عند تغيرات درجة الحرارة هي مقارنة غير عادلة حتى لو تمت المقارنة تحت نفس ظروف التشغيل من تطابق في الجهد المطبق وتردد الضوء الساقط وغيرها من العوامل، وذلك لأن كل جهاز يمتلك ثوابت هندسية وفنية خاصة به ومن الصعب جداً توحيدها لذلك سنستخدم طريقة منحنيات التطبيع (Normalized Curves) لرسم منحنيات الحساسية الحرارية لكلا الكاشفين لإظهار الجهاز الأقل تأثراً بدرجة الحرارة. تعتمد هذه الطريقة على حساب الإستجابة  $R_{max}$  عند درجة حرارة مرجعية معينة ثم رفع درجة الحرارة تدريجياً و حساب  $R$  للجهاز عند كل درجة حرارة ثم تقسيم الإستجابة المحسوبة على  $R_{max}$  ، إن المقدار  $\frac{R}{R_{max}}$  يلغي تأثير جميع البارامترات الأخرى التي يزول تأثيرها عند إجراء عملية القسمة و بهذه الطريقة يمكننا معرفة الحساسية الحرارية لكل جهاز .

أولاً، حسبنا  $R_{max}$  لكلا الكاشفين عند درجة حرارة مرجعية هي  $73K$  ( $-200^{\circ}C$ ) في المجال الطيفي [0.1,2 eV] وعند جهد كهربائي  $0.4 V$  ، ثم رفعنا درجة الحرارة بشكل تدريجي و بخطوات ثابتة تقريباً و حسبنا الإستجابة  $R$  عند كل درجة حرارة ، وبعدها حسبنا  $\frac{R}{R_{max}}$  عند كل درجة حرارة ، و أخيراً رسمنا المقدار  $\frac{R}{R_{max}}$  لكلا الكاشفين بدلالة درجة الحرارة

( $t^{\circ}C$ ) ثم قمنا بمقارنة المنحنيين مع بعضهما البعض ، و نحصل بتطبيق هذه الخطوات على الأشكال التالية:



شكل 14: منحنيات الحساسية الحرارية للكاشفين المدروسين وذلك برسم  $R/R_{max}$  بدلالة درجة الحرارة  $t(^{\circ}C)$  حيث يمثل الخط الأحمر كاشف شريط الجرافين بينما يمثل الخط الأخضر كاشف النقطة الكمومية.

تظهر هذه المنحنيات نتيجة هامة جداً وهي أن كاشف النقطة الكمومية يتأثر بشدة بدرجة الحرارة في حين أن كاشف شريط الجرافين يتأثر بشكل أقل بكثير منه فعند ازدياد درجة الحرارة من  $200^{\circ}C$  حتى  $175^{\circ}C$  كما يظهر في الشكل الأيمن تتخفض استجابة كاشف النقطة الكمومية بشدة لتصل إلى قيم قريبة من الصفر بنسبة انخفاض تبلغ % 99.97 مما يستلزم تبريد الكاشف لاستمرار عمله، في حين يظهر كاشف شريط الجرافين حمولة حرارية ضئيلة بنسبة انخفاض تبلغ % 25 لا تتطلب تبريداً فعالاً مما يجعل تكلفة التبريد أقل بكثير.

عند درجات الحرارة الأكثر انخفاضاً تظهر هذه المنحنيات أنه عند ازدياد درجة الحرارة من  $230^{\circ}C$  وحتى  $225^{\circ}C$  كما يظهر في الشكل الأيسر تتخفض استجابة كاشف GNR-PT بنسبة % 2 فقط بينما تتخفض استجابة QDIP بنسبة % 99.62. إن الأرقام المذكورة في أكواد الحساسية الحرارية تم الحصول عليها من توابع الإستجابة لكل من GNR-PT و QDIP.

#### 4-النتائج والمناقشة:

أثبتت النتائج المذكورة في الورقة قدرة كاشف GNR-PT، الذي يبلغ عرض شريطه المفترض  $22\text{ nm}$ ، على امتصاص الأشعة تحت الحمراء المتوسطة حيث أظهر قمتي امتصاص رنيني عند أطوال موجية  $4000\text{ nm}$  و  $7750\text{ nm}$  في هذا المجال، مما يؤكد على صحة الطريقة المذكورة في الورقة لاختيار الأبعاد المناسبة لهندسة فجوة الطاقة في GNR كما أظهر الكاشف المدروس تياراً مظلماً منخفضاً نسبياً مقارنة بكواشف الأشعة تحت الحمراء التقليدية التي تمتلك فجوة طاقة صغيرة وبالتالي تياراً مظلماً كبيراً و يُعزى ذلك إلى جهد البوابة الذي يمنع الحوامل المتولدة حرارياً من التدفق.

إن الحساسية الحرارية لكاشف GNR-PT منخفضة نسبياً مقارنة مع كاشف QDIP مما يقلل الحاجة إلى التبريد.

## 5-الاستنتاجات و التوصيات:

- أثبت هذا البحث انخفاض الحساسية الحرارية لكاشف GNR-PT مما يجعله خياراً واعداً للعمل في البيئات المتقلبة حرارياً.
- يحتاج كاشف GNR-PT إلى تبريد أقل بكثير من الكواشف التقليدية مما يؤدي إلى انخفاض تكلفة التبريد ويجعل استخدام الكاشف ذو جدوى اقتصادية عالية.
- يمكن التحكم في فجوة الطاقة في أشربة الجرافين عند تغيير عرضها وبالتالي يمكننا بواسطة هذه الأشربة صناعة كواشف لرصد وامتصاص أشربة FIR و THZ.
- يمكن القيام بتصنيع تجريبي للكاشف و الإعتماد على الأكواد المستخدمة في الورقة لإجراء المحاكاة المطلوبة.
- يمكن دمج عناصر بلازمونية أو الذكاء الإصطناعي لتحسين الأداء.

شرح الرموز المستخدمة:

Abbreviations	Symbol
Far Infrared radiation	FIR
Terahertz radiation	THz
Carbon nanotube	CNT
Zero-dimensional system	0D
One-dimensional system	1D

## Reference:

- [1] R. Ramesh, "Graphene: Fabrication Methods, Properties and Applications in Modern industries", Graphene production and Application, 9, 2022.
- [2] R. Tarun, "A Properties of Graphene", European Journal of Material Sciences, 2, 2015.
- [3] A. Adeniji, R. Damilola, "Synthesis and Fabrication of graphene and graphene oxide: A Review". Scientific Research Publishing, 2019.
- [4] R. Victor, M. Vladimir, R. Maxim, R. Nadezhda and O. Taiichi, "Device Model for Graphene Nanoribbon Phototransistor", Applied physics Express, 1, 2008.
- [5] S. Young, C. Marvin and L. Steven, "Energy Gaps in Graphene Nanoribbon", 2024.
- [6] B. Jingwei, H. Yu, "Fabrication and electrical properties of graphene nanoribbons", Materials science and Engineering, 70, 2010.
- [7] L. Sanna, B. Anil, A. P. Amit, G. Sumeet and M. Shubham, "A review of graphene nanoribbon field-effect transistor structures", Journal of electronic Materials, 50, 2021.
- [8] R. Victor, et al.: arXiv:cond-mat/0801.1543.
- [9] R. Victor, K. Irina, R. Maxim and M. Vladimir, "comparison of dark current, responsivity and detectivity in different intersubband infrared photodetectors", Semiconductor Science And Technology, 2003.
- [10] F. Karimi and I. Knezevic, "Plasmons in graphene nanoribbons", Physical Review B, 2017.
- [11] Z. Wu, T. Cheng and Z. L. Wang, "Self-powered Sensors and Systems Based on Nanogenerators", Sensors, 2020.
- [12] T. Dutta, I. L. Garro, J. S. Velázquez-conzález, J. Bas, R. Dubey and S. K. Mishra, "A New Generation of Satellite Sensors Based on Graphene and Carbon Nanotubes: A Review", IEEE Sensors Journal, 2024.