

Modeling and Simulation of Carbon Nanotube Diode (CNTs Diode) and its Use in Nonlinear Electronic Applications

Nawar Daood* 

(Received 7 / 4 / 2026. Accepted 6 / 7 / 2026)

□ ABSTRACT □

This study presents the modeling and simulation of a single-walled carbon nanotube diode with a specific energy bandgap, aiming to investigate its operational characteristics and potential for use in nonlinear and high-frequency electronic applications. A numerical and computational model was developed to derive the structural and operational properties of the diode with high precision. Furthermore, normalized curves and parameter sweep methodologies were employed to analyze the impact of various variables on its performance. The results demonstrated that the energy bandgap is one of the most critical factors influencing diode performance, an increase in the bandgap leads to improved rectification efficiency and enhances the diode's capability to process and rectify high-frequency signals. The simulation also revealed that CNT diodes are capable of rectifying signals up to the megahertz range while maintaining robust performance, making them highly suitable for high-speed electronic applications. Additionally, the findings indicated that nanotubes with a larger energy bandgap achieve superior performance in rectification applications, whereas those with a smaller energy bandgap are more appropriate for frequency multiplier circuits. Moreover, a comparison with silicon diodes exhibited lower thermal sensitivity and greater operational stability for the CNT diode, rendering it a promising candidate for the development of highly efficient, low-power electronic components.

Keywords: CNT diode, carbon nanotube (CNT), energy gap.

Copyright



:Latakia University Journal (formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Researcher, Master's in condensed matter's physics, Syria. aliomran19901993@gmail.com

نمذجة ومحاكاة ديود الأنابيب الكربونية النانوية CNTs Diode واستخدامه في التطبيقات الإلكترونية اللاخطية

نوار داوود*

(تاريخ الإيداع 7 / 4 / 2026. قبل للنشر في 6 / 7 / 2026)

□ ملخص □

تتناول هذه الدراسة نمذجة و محاكاة ديود الأنابيب الكربونية النانوية أحادية الجدار ذي فجوة طاقة محددة بهدف دراسة خصائصه التشغيلية وإمكانية استخدامه في التطبيقات الإلكترونية اللاخطية و عالية التردد. تم تطوير نموذج عددي و برمجي لاستنتاج الخصائص البنيوية و التشغيلية للديود بدقة عالية ، كما استُخدمت منحنيات التنبيع (Normalized curves) و منهجية مسح البارامترات (Parameters sweep) لتحليل تأثير المتغيرات المختلفة عليه. أظهرت النتائج أن فجوة الطاقة تمثل أحد أهم العوامل المؤثرة في أداء الديود ، حيث يؤدي ازديادها إلى تحسين كفاءة التقويم و تعزيز قدرة الديود على معالجة و تقويم الإشارات عالية التردد ، كما بينت المحاكاة أن ديودات CNT قادرة على تقويم الإشارات حتى مرتبة الميغاهرتز مع الحفاظ على أداء جيد مما يجعلها مناسبة للتطبيقات الإلكترونية السريعة. أظهرت النتائج أيضاً أن الأنابيب ذات فجوة الطاقة الأكبر تحقق أداءً أفضل في تطبيقات التقويم ، في حين أن الأنابيب ذات فجوة الطاقة الأصغر تعد أكثر ملائمة لدارات مضاعفة التردد كما أظهرت المقارنة مع ديود السيليكون حساسية حرارية أقل و استقراراً تشغيلياً أفضل لديود CNT مما يجعله خياراً واعداً لتطوير عناصر الكترونية عالية الكفاءة و منخفضة الإستهلاك للطاقة.

الكلمات المفتاحية: ديود CNT، أنبوب كربوني نانوي CNT ، فجوة الطاقة.



حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - سوريا، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب

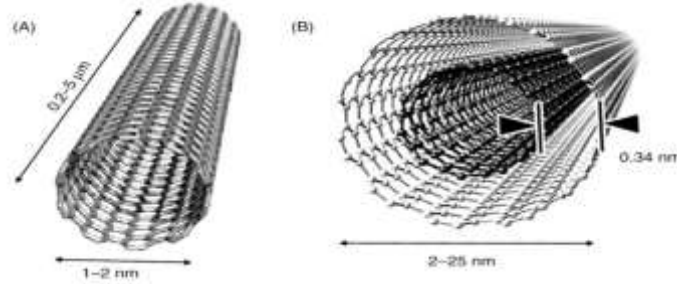
الترخيص CC BY-NC-SA 04

*باحث، حاصل على الماجستير في فيزياء المواد الكثيفة، سورية. aliomran19901993@gmail.com

مقدمة:

أنابيب الكربون النانوية Carbon nanotube هي صفائح من مادة الجرافين ملفوفة على شكل أنابيب صغيرة وطويلة، يتألف سطحها من حلقات كربونية سداسية من نوع sp^2 . إن الجرافين هو مادة ثنائية الأبعاد 2D بسماكة ذرة واحدة وهو لبنة البناء الأساسية لجميع المواد الكربونية النانوية كالفلوئيرين، الجرافيت والأنابيب الكربونية النانوية CNT. ظهرت هذه الأنابيب إلى النور في تسعينيات القرن العشرين حين اكتشف الفيزيائي الياباني Sumio Iijima وجودها أثناء دراسته لمركبات الكربون تحت مجهر الكتروني واستخدمت بعدها على نطاق واسع في مجالات الطاقة والبيئة والصناعة. تعتبر أنابيب الكربون مواداً أحادية البعد 1D لأن طول الأنبوب من مرتبة المايكرومتر بينما قطر الأنبوب من مرتبة النانومتر لذلك تمتلك هذه الأنابيب نسبة طول إلى القطر تتجاوز 1000 وهذا ما يصنفها ضمن المواد أحادية البعد. يمكن تصنيع أنابيب الكربون النانوية بعدة طرق منها طريقة

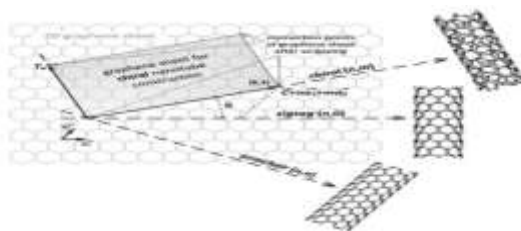
التفريغ بالقوس (Arc Discharge Method)، التبخير بالليزر النبضي (Pulsed Laser Vaporization) و ترسيب البخار الكيميائي (Chemical Vapor Deposition) وغيرها. تقسم أنابيب الكربون النانوية إلى نوعين حسب عدد الجدران وهي أنابيب الكربون أحادية الجدار SWCNTS وأنابيب الكربون متعددة الجدران MWCNTS، وتتكون الأنابيب متعددة الجدران من طبقتين أو أكثر من صفائح الجرافين الملفوفة والمتراصة بأقطار مختلفة [1,2,3].



شكل (1): أنواع أنابيب الكربون حسب عدد الجدران حيث يمثل (A) أنبوب أحادي الجدران (B) أنبوب متعدد الجدران [1,2]. تمتلك أنابيب الكربون النانوية خصائص ميكانيكية فريدة حيث تمتلك متانة عالية بفعل الروابط الكيميائية بين ذرات الكربون ويمكن التعبير عن متانة الأنابيب من خلال قوة الشد tensile strength وتبلغ (13- 52) GPa للأنابيب أحادية الجدار و (11-63) GPa للأنابيب متعددة الجدران، ويمكن تصنيف أنابيب SWCNT أيضاً إلى عدة أنواع حسب اتجاه لف طبقة الجرافين ويستخدم المتجه الكيرالي، الذي يحدد كيفية لف صفائح الجرافين، لوصف و تسمية الأنابيب الكربونية و يعبر عنه بالعلاقة [3-4-5]:

$$C = n a_1 + m a_2 \quad (1)$$

حيث n و m هي قيم تحدد كيرالية الأنابيب والتي لها تأثير على خصائصها البصرية والميكانيكية و الإلكترونية، وينتج عن ذلك ثلاثة أنواع للأنابيب هي كرسي الذراع Armchair عند $n=m$ و بزواوية $\theta = 30^\circ$ و متعرجة Zigzag عند $m=0$ و زواوية $\theta = 0^\circ$ و الأنابيب الكيرالية عند $n \neq m$ و بزواوية $0^\circ < \theta < 30^\circ$.



شكل (2): أنواع أنابيب الكربون حسب قيم الكيرالية وهي ذراع الكرسي، المتعرجة والأنابيب الكيرالية [1-3].

يمكن للأنابيب الكربونية النانوية أن تسلك سلوكاً معدنياً أو أن تكون مادة نصف ناقلة وذلك حسب القيم n و m فإذا كانت $n=m$ أو $n-m=3i$ حيث i هو عدد صحيح ستكون الأنابيب معدنية فيما عدا ذلك ستظهر خصائص شبه ناقلة و تتراوح الناقلية للأنابيب أحادية الجدار SWCNTs بين 10^2 حتى $10^{-1} \Omega^{-1}m^{-1}$ و للأنابيب متعددة الجدران MWCNTs بين 10^3 و $10^5 \Omega^{-1}m^{-1}$ و يعطى قطر الأنبوب بالعلاقة [5]:

$$d = \frac{a}{\pi} \sqrt{n^2 + m^2 + nm} \quad (2)$$

حيث a هو ثابت الشبكة البلورية للكربون ، و يمكن حساب زاوية الكيرالية (زاوية اللف) من العلاقة [6]:

$$\cos \theta = \frac{2n + m}{2\sqrt{n^2 + m^2 + nm}} \quad (3)$$

تعطى فجوة الطاقة في الأنابيب الكربونية نصف الناقلية بالعلاقة التالية [5,6]:

$$E_{gap} = \frac{cc}{k} + \frac{dd}{k^2} + \left[\frac{1}{k^2} + \frac{gg}{k^3} \right] f(n-m) \cos(3\theta) \quad (4)$$

إذا كان $n-m=1 \bmod 3$ أي إذا كان الباقي من حاصل قسمة الفرق $(n-m)$ على 3 هو العدد 1 فإن :

$$f(n-m) = aa + bae^{ca*(n-m)} \quad (5)$$

إذا كان $n-m=2 \bmod 3$ فإن:

$$f(n-m) = ab + bbe^{cb*(n-m)} \quad (6)$$

$$k = \sqrt{n^2 + m^2 + nm} \quad (7) \quad \text{حيث}$$

تظهر العلاقات السابقة ارتباط فجوة الطاقة بنصف القطر بعلاقة عكسية غير خطية حيث أن تقليل نصف قطر الأنبوب يؤدي إلى ازدياد فجوة الطاقة للأنبوب نصف الناقل وتمكننا هذه الخاصية من صناعة أنابيب بفجوات طاقة مختلفة وفق الاحتياجات التصنيعية والتقنية. إن الثوابت و المعاملات $aa, dd, gg, aa, ba, ca, ab, bb, cb$ التي ظهرت في العلاقة (4) هي معاملات ترتبط بانحناء الأنبوب و ثوابت خاصة بالحالة.

أهمية البحث و أهدافه:

تعد ديودات أنابيب الكربون النانوية CNTs من العناصر الواعدة في التطبيقات الإلكترونية عالية التردد نظراً لقدرتها على تحقيق استجابة سريعة و إمكانية التحكم بخواصها الإلكترونية من خلال تغيير البنية الهندسية للأنبوب النانوي ، ومع ذلك ما تزال العلاقة الكمية بين المعلمات البنيوية للأنبوب مثل القطر و زاوية الالتفاف و الطول و بين أداء الديود بحاجة إلى دراسة و تحليل أكثر. يهدف هذا البحث إلى تطوير نموذج محاكاة برمجي لدراسة تأثير فجوة الطاقة و المعلمات البنيوية للأنبوب على الخصائص الكهربائية و خصائص التقويم في ديودات CNTs مع التركيز على تقييم أدائها عند الترددات العالية كما يهدف إلى إجراء مقارنة كمية بين أداء ديود CNTs و ديود السليكون الحراري التقليدي من حيث كفاءة التقويم و الإستجابة للإشارات عالية التردد و ذلك لتحديد مدى إمكانية استخدام ديودات CNTs في تطبيقات الكاشف التريبيعي و دوائر مضاعفة التردد.

طرائق البحث و موادہ:

تم اعتماد قيم كيرالية معينة (n,m) لإنتاج أنبوب كربوني بفجوة طاقة 0.62 eV لاستخدامه في صناعة ديود ثم دراسة خصائصه و تطبيقاته. خلال البحث تم استنتاج النماذج الرياضية الدقيقة لفيزياء ديود CNT وإجراء محاكاة برمجية باستخدام برنامج بايثون Pydroid3 لرسم المنحنيات. استخدمنا خلال عملية المحاكاة مكتبة NumPy لبناء المصفوفات و إجراء العمليات الرياضية و بناء التوابيع 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 Random لتوليد قيم عشوائية في محاكاة مونتني كارلو و من الجدير بالذكر أن جميع الأكواد البرمجية المستخدمة في هذه الدراسة تم تطويرها و تنفيذها من قبل الباحث دون الاعتماد على أكواد جاهزة كما أن أغلب العلاقات الرياضية تم استنتاجها من قبل المؤلف. أخيراً، استخدمنا طريقة مسح البارامترات Sweep Parameters لتحليل كيفية تأثير المدخلات على سلوك الديود وتقديم تحسينات تقنية وتصنيعية على الديود لرفع كفاءته.

1-ضبط فجوة طاقة أنبوب CNT:

جرت العادة على تحديد قيم الكيرالية n و m ثم حساب فجوة الطاقة حسب العلاقة (4) و بسبب العلاقة المعقدة بين E_{gap} و n و m سيكون من الصعب اختيار قيم الكيرالية المناسبة لإنتاج فجوة طاقة محددة و لذلك استخدمنا طريقة مونتني كارلو لإعطاء قيم عشوائية ل n و m التي تؤدي إلى إنتاج أنبوب بفجوة طاقة 0.62 eV (قيمة عشوائية تم أخذها لكي ننمكّن من تشغيل الأكواد البرمجية و يمكن اختيار أي قيمة أخرى) بمقدار خطأ لا يتجاوز 0.003 eV و بعدد محاولات عشوائية 10^6 ، وتمثل طريقة مونتني كارلو عاملاً هاماً لدراسة الأنظمة التي تمتلك أكثر من درجة حرية. يتيح الكود التالي إنتاج عدد كبير جداً من القيم الصحيحة ل n و m التي تعطي فجوة الطاقة 0.62 eV كما يقوم بحساب نصف قطر الأنبوب الموافق لقيم الكيرالية ويمكن إعادة استخدامه لإنتاج قيم n و m و d الموافقة لأي فجوة طاقة مطلوبة في التجارب العلمية ، وقد تم إدخال الشروط اللازمة لجعل الأنبوب الكربوني النانوي نصف ناقل والتي ذكرناها في العلاقتين (6) و (5) ، مما يجعل الكود التالي غير مناسب للأنابيب الكربونية المعدنية.

```
import numpy as np
import random
E_gap=0.62
T=0.003    % نسبة الخطأ
samples=1000000 % عدد المحاولات العشوائية
result=[]
معاملات ترتبط بانحناء الأنبوب%
cc=14.64;dd=-25.52; gg=6.21;aa=-8.52;ba=23.3;ab=5.81
bb=11.6;ca=-0.491;cb=-0.482
توليد أرقام عشوائية%
for i in range(samples):
    n=random.randint(0,1000)
    m=random.randint(0,1000)
    k=np.sqrt(n**2 +m**2 +n*m)
    حساب نصف قطر الأنبوب d و الزاوية %  $\theta$ 
    d=2.46/np.pi *k
    teta=np.arccos((2*n+m)/(2*np.sqrt(n**(2) +m**(2) +n*m)))
```

```

الشرط الأول اللازم لكون الأنبوب نصف ناقل %
if (n>m) and ((n-m)%3==1):
    حساب فجوة الطاقة و الخطأ %
    Eg1=cc/k + dd/k**2 + (1/k**2 + gg /k**3)*(aa +ba*np.exp(ca*(n-
m)))*(4*np.cos(teta) *np.cos(teta) -3*np.cos(teta))
    error1=abs(Eg1- E-gap )
    if error1<T:
        result.append((round(n,1),round(m,1),round(Eg1,3),round(d,2)))
        for x in result:
            print(f'n:{x[0]},m:{x[1]},Eg(eV):{x[2]},d(A):{x[3]}")
الشرط الثاني لكون الأنبوب نصف ناقل %
elif (n>m) and ((n-m)%3==2):
    Eg2=cc/k + dd/k**2 + (1/k**2 + gg /k**3)*(ab +bb*np.exp(cb*(n-
m)))*(4*np.cos(teta) *np.cos(teta) -3*np.cos(teta))
    error2=abs(Eg2- E-gap )
    if error2<T:
        result.append((round(n,0),round(m,0),round(Eg2,3),round(d,2)))
        for x in result:
            print(f'n:{x[0]},m:{x[1]},Eg(eV):{x[2]},d(A):{x[3]}")

```

و ينتج عن الكود القيم التالية: $n = 18$, $m = 5$, $E_g = 0.618 \text{ eV}$, $d = 16.41 \text{ Å}$ حيث n و m قيم كيرالية الأنبوب اللازمة لبناء فجوة الطاقة المطلوبة و d هو نصف قطر الأنبوب الناتج و في حال تكبير الخطأ T في الكود سنحصل على عدد كبير من قيم n, m, d التي تنتج نفس فجوة الطاقة.

2- ديود الأنابيب الكربونية النانوية CNT Diode :

(a) تيار الانحياز الأمامي :

يعطى تيار الانحياز الأمامي في الأنابيب النانوية حسب تكامل لانداور [7-8-9]:

$$I = \frac{4e\beta}{h} \int_{E_c}^{\infty} [f_n(E) - f_p(E - eV)] dE = \frac{4e\beta}{h} \int_{E_c}^{\infty} \left[\frac{1}{1 + e^{\frac{E}{kT}}} - \frac{1}{1 + e^{\frac{(E-eV)}{nKT}}} \right] dE \quad (8)$$

حيث $f_n(E)$ و $f_p(E - eV)$ هما توابع فيرمي ديراك للإلكترونات و الثقوب وعند تقريب بولتزمان تصبح العلاقة السابقة بالشكل:

$$I = \frac{4e\beta}{h} \int_{E_c}^{\infty} \left[e^{\frac{-E}{kT}} - e^{\frac{eV - E}{nKT}} \right] dE = \frac{4e\beta}{h} \left[-kT e^{\frac{-E}{kT}} - e^{\frac{eV}{nKT}} (-KT) e^{\frac{-E}{kT}} \right]_{E_c}^{\infty}$$

لإضافة تيار الثقوب نضرب بالعدد 2 و بأخذ اتجاه اصطلاحي موجب للتيار تصبح العلاقة على الشكل :

$$I = \frac{4e\beta kT}{h} \left[e^{\frac{-E_c}{kT}} - e^{\frac{eV}{nKT}} e^{\frac{-E_c}{kT}} \right] = \frac{8e\beta kT}{h} e^{\frac{-E_g}{2kT}} \left[e^{\frac{eV}{nKT}} - 1 \right] = I_s e^{\frac{eV}{nKT}} \quad (9)$$

يجب إضافة مقاومة موصولة على التسلسل مع ديود CNT لحماية الديود من الارتفاع الكبير في شدة التيار و بناءً عليه تصبح شدة تيار الانحياز الأمامي بالشكل:

$$I = I_s e^{\frac{eV - eRI}{nKT}} \quad (10)$$

إن المعادلة (10) هي معادلة متسامية Transcendental equation و قمنا بحلها ذاتياً عن طريق دالة لامبرت من خلال إعادة ترتيب عناصر المعادلة و الاستفادة من خاصية دالة لامبرت $W(xe^x) = x$ لذلك نعيد كتابة المعادلة (10) على الشكل التالي:

$$\frac{eR}{nkT} I e^{\frac{eRI}{nkT}} = \frac{eR}{nkT} I_s e^{\frac{eV_D}{nkT}} \quad (11)$$

و بإضافة دالة لامبرت للطرفين نحصل في النهاية على تيار الانحياز الأمامي:

$$I = \frac{nkT}{eR} W\left(\frac{eRI_s}{nkT} e^{\frac{eV_D}{nkT}}\right) \quad (12)$$

(b) تيار زينر :

عند التغذية العكسية يمر تيار صغيراً جداً وعند زيادة الجهد العكسي إلى حد معين سنشاهد ارتفاع التيار الكهربائي كثيراً حيث نشهد ظاهرة زينر (ازدياد تيار الديود بشكل كبير عند جهد عكسي يُسمى بجهد زينر) وبسبب صغر منطقة الاستنزاف في ديودات CNT سيكون الحقل الكهربائي مركزاً فيها لذلك يظهر تيار زينر بسرعة حيث تعبر الإلكترونات من عصابة التكافؤ إلى عصابة الناقلية من خلال النفق الكمومي (ظاهرة في ميكانيك الكم تسمح للإلكترونات بعبور حاجز الطاقة) ويعطى تيار النفق بالعلاقة [9-10-11-12]:

$$I = \frac{4eT_{WKB}}{h} \int_0^{eV} [f_n(E - eV) - f_p(E)] dE \quad (13)$$

حيث :

$$T_{WKB} = e^{\frac{-\pi E_g^2}{4\hbar v_f e F}} \quad (14)$$

هو تقريب Wenzel-Kramer-Brillouin الذي يحدد احتمالية النفق بين نطاقين و v_f هي سرعة فيرمي و F هو الحقل الكهربائي في منطقة الاستنزاف و تصبح العلاقة (13) بعد إجراء التكامل و التعديلات اللازمة على الشكل:

$$I_T = \frac{4e^2}{h} T_{WKB} V_T \ln[0.5(1 + \cosh(\frac{V}{V_T}))] \quad (15)$$

حيث $V_T = \frac{KT}{e}$ هو الجهد الحراري ، و في حال كان $V \gg V_T$ تأخذ العلاقة (12) الشكل التالي [12-13]:

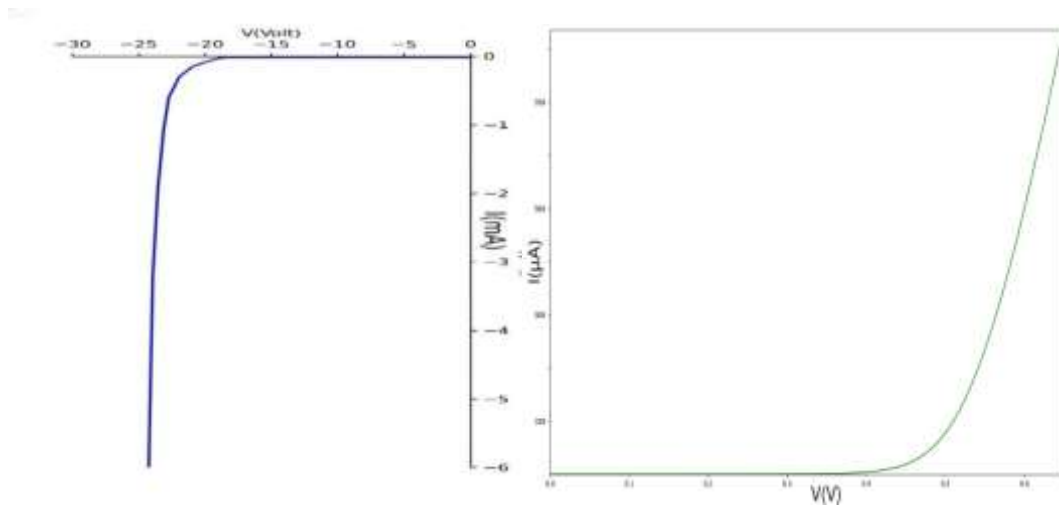
$$I_T = \frac{4e^2}{h} T_{WKB} (V - V_T \ln 4) \quad (16)$$

قمنا بمحاكاة برمجية لديود CNT ذو فجوة الطاقة 0.62eV من خلال رسم العلاقتين (12) و (16) في بايثون، والتي تعطي منحنيات الانحياز الأمامي والعكسي وجهد زينر وفق ما يلي:

```
V1=np.linspace(0,0.65) # تيار الانحياز الأمامي
I1=((n*k*T)/(e*R)) *lambertw(e*R*8*e*k*T*y0/(h) *np.exp(-Eg/(2*k*T)))/(n*k*T)
*(np.exp((e*V1)/(n*k*T))))*10**(6)
dIdV = np.gradient(I1, V1) # استنتاج جهد العتبة
d2IdV2 = np.gradient(dIdV, V1)
Vth = V1[np.argmax(d2IdV2)]
print(f" {Vth:.4f} ")
Vr=np.linspace(0,30,100) # استنتاج جهد زينر
E=(Vr)/L
TkwB=np.exp(-np.pi/(4) *Eg**(2)/(h*Vf*e*E))
```

```
I2=4*e**(2)/(h)*TkWB*(Vr-VT*np.log(4))*10**3
dIdV = np.gradient(I2, Vr)
d2IdV2 = np.gradient(dIdV, Vr)
Vth1 = Vr[np.argmax(d2IdV2)]
print(f" {Vth1:.4f} ")
```

تم كتابة جزء بسيط من الكود داخل الورقة البحثية وذلك لمحدودية عدد الصفحات ، وإن هذا الكود يتيح حساب جهد العتبة في حالة الانحياز الأمامي و هو $0.53V$ لديود CNT المدروس كما يقوم بشكل تلقائي بحساب جهد زينر و هو الجهد الذي يبدأ عنده التيار الكهربائي بالازدياد بشكل كبير جداً و هو $24.3V$ - في حالتنا و يقوم أيضاً برسم منحنيات الانحياز الأمامي و منحنى تيار زينر ، ويجدر بالذكر أنه لا يمكننا الاعتماد على الرسم مباشرة لإيجاد جهد العتبة لأن تغيير الجهد أو عدد النقاط يؤدي إلى انزياح بسيط في المنحنيات مما يجعل استنتاجه من الرسم غير دقيق و لذلك استخدمنا طريقة أخرى و هي حساب المشتق الثاني للتيار ثم استخدام الأداة $V_{th} = V1[\text{np.argmax}(d2IdV2)]$ و التي تقوم بإيجاد أكبر قيمة للمشتق الثاني و هي النقطة التي يحصل عندها الانعطاف. يشكل هذا الكود وسيلة جيدة و دقيقة للباحثين لنمذجة و محاكاة ديودات الأنابيب الكربونية النانوية وينتج الكود أيضاً الشكل التاليين:

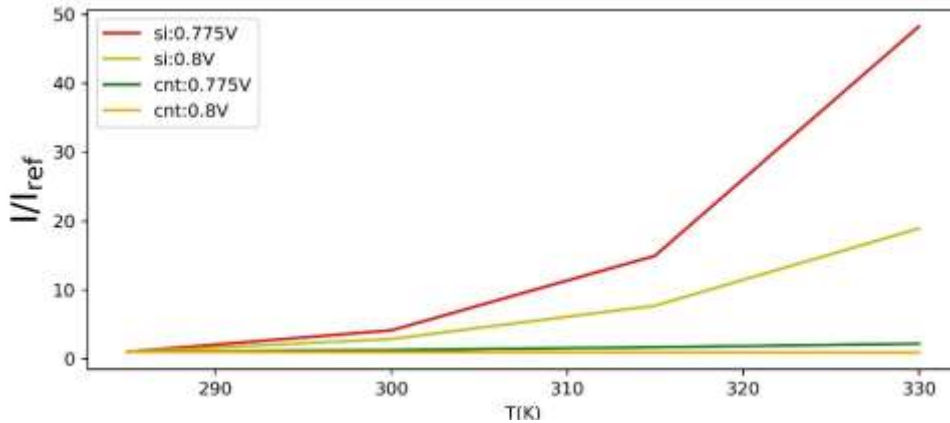


شكل(3): منحنى الانحياز الأمامي لديود CNT في حالة التغذية الأمامية للديود، ومنحنى زينر في حالة التغذية العكسية.

يظهر المنحنى في الشكل (3) ازدياد تيار الديود عند الانحياز الأمامي حيث يؤدي الجهد المطبق إلى انخفاض في حاجز كمون منطقة الاستنزاف وعند جهد العتبة الذي يبلغ $0.53 V$ يزداد التيار بشكل أسي ويتصاعد المنحنى للأعلى. وعند تطبيق جهد كهربائي عكسي يمر في البداية تيار صغير جداً هو تيار الاستنزاف وعند رفع الجهد الكهربائي إلى حد معين والمسمى بكمون زينر والذي تبلغ قيمته $24.3 V$ في الديود المذكور يزداد التيار بشكل كبير جداً بسبب مفعول النفق الكمومي ويثبت الجهد خلال عملية ازدياد التيار، ويمكن الاستفادة من هذه الظاهرة في استقرار الجهد.

3-المقارنة بين الحساسية الحرارية لدايود CNT و دايود Si :

تهدف هذه المقارنة إلى تحديد الدايود الأكثر تأثراً بدرجة الحرارة حيث أن ارتفاع درجة الحرارة قد يؤدي إلى تشوه في الإشارات و تقليل عمر الدايود أو تلفه لذلك يعتبر الدايود الأقل تأثراً بالحرارة ، أكثر كفاءة و أفضل استخداماً. قارنا في هذا البحث تأثير الحرارة على تيار الإنحياز الأمامي لدايود Si و دايود CNT ذو فجوة الطاقة 0.62 eV. إن المقارنة المباشرة بين تغيرات تيار كلا من الجهازين مع تغيرات درجة الحرارة هي مقارنة غير عادلة حتى لو تمت المقارنة في ظروف تشغيل و قيم أولية متماثلة وذلك لأن كل دايود يمتلك ثوابت فنية و هندسية خاصة به و من الصعب توحيدها لذلك يجب إلغاء تأثير بقية العوامل و جعل الحرارة هي المؤثر الوحيد من خلال استخدام طريقة منحنيات التطبيع Normalized Curves. تعتمد هذه الطريقة على حساب التيار I_{ref} عند درجة حرارة مرجعية معينة ثم رفع درجة الحرارة تدريجياً و حساب I لكلا الجهازين عند كل درجة حرارة ثم تقسيم الإستجابة المحسوبة على I_{ref} ، إن المقدار $\frac{I}{I_{ref}}$ يلغي تأثير جميع البارامترات الأخرى التي يزول تأثيرها عند إجراء عملية القسمة و بعدها رسمنا المقدار $\frac{I}{I_{ref}}$ بدلالة درجة الحرارة T و بهذه الطريقة يمكننا معرفة الحساسية الحرارية لكل جهاز ولقد أجرينا اختبار الحساسية الحرارية عند الجهود الكهربائية 0.775 V ، 0.8 V و قد حصلنا على هاتين القيمتين من المحاكاة حيث قمنا بإعادة المحاكاة العديد من المرات عند جهود كهربائية مختلفة و عند هذه القيم يحصل تشتت لحوامل الشحنة بواسطة الفونونات الصوتية الطولية ولو قمنا بتغيير فجوة طاقة أنبوب CNT لاستخدمنا جهود كهربائية مختلفة ، وبعد إجراء الاختبار حصلنا على الشكل التالي:



شكل(4): منحنيات الحساسية الحرارية الناتجة عن رسم I/I_{ref} لدايود Si و دايود CNT بدلالة درجة الحرارة.

تظهر المنحنيات في الشكل (4) أن دايود CNT يتأثر بتغيرات درجة الحرارة بشكل أقل بكثير من دايود Si فعند جهد كهربائي 0.775 V وعند زيادة درجة الحرارة من 285K إلى 330K تضاعف تيار السيليكون 21.54 مرة بينما تضاعف تيار الأنابيب الكربونية 1.005 مرة و عند جهد كهربائي 0.8 V يسلك دايود السيليكون نفس السلوك السابق بينما يصبح المقدار $\frac{I}{I_{ref}}$ لدايود الأنابيب الكربونية أقل من الواحد بقليل مما يعني أن التيار يبدأ في الإنخفاض قليلاً على الرغم من ازدياد درجة الحرارة و يُعزى الارتفاع في شدة التيار عند زيادة درجة الحرارة إلى ازدياد معدل التوليد الحراري للإلكترونات و الثقوب و إن الأنابيب الكربونية النانوية أظهرت استجابة أقل لدرجة الحرارة وذلك لأن حاملات الشحنة فيها تمتلك حركية عالية تساعد على تبديد الحرارة من خلال نقلها و توزيعها على سطح المادة إضافة

إلى حصول تشتت لحوامل الشحنة في ديود CNT بسبب الفونونات حيث أنه عند جهود كهربائية معينة سيؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى ازدياد في اهتزازات الشبكة البلورية وزيادة معدل توليد الفونونات و عند المجالات الكهربائية الضعيفة جداً يكون التشتت ناجماً بالكامل عن الفونونات الصوتية الطولية LA و عند المجالات العالية يصبح التشتت ناجماً عن الفونونات البصرية و عندها ستخضع لتشتت سريع و لن يظهر التشتت الناجم عن الفونونات البصرية في ديود CNT لأن رفع الجهد كثيراً سيؤدي إلى انهيار الديود و تلفه. تهر المنحنيات الناتجة عن المحاكاة ، أن ديود CNT يمتلك حساسية حرارية أقل بكثير من ديود السيليكون مما يسمح بصناعة دوائر الكترونية من أنابيب CNT ذو قدرة عالية على العمل في البيئات المتقلبة حرارياً.

4-تقويم الإشارات بواسطة ديود CNT:

إحدى أهم تطبيقات الديود هي تقويم التيار المتناوب و الإشارات المترددة حيث أن الديود يسمح بمرور التيار في اتجاه (الانحياز الأمامي) و لا يسمح لها بالمرور في الاتجاه المعاكس (الانحياز العكسي) و يتميز كل ديود بتردد اسمه تردد القطع و هو العتبة التي يفشل بعدها الديود في تقويم الإشارات و تكون سعة الوصلة من مرتبة 10^{-18} F في ديود CNT مما يجعل تردد القطع مرتفعاً قياساً بالديودات التقليدية و هذا يمنح الديود المذكور القدرة على تقويم الإشارات مرتفعة التردد و يعطى تردد القطع لديود الأنابيب النانوي بالعلاقة التقديرية [9-11-14-15]:

$$f_c = \frac{[1 + \frac{R_s}{R_j}]^{\frac{1}{2}}}{2\pi C_j (R_s R_j)^{\frac{1}{2}}} \quad (17)$$

حيث R_j هي مقاومة الوصلة، R_s هي المقاومة الموصولة مع الديود على التسلسل و C_j هي سعة الوصلة التي تسمى بسعة الانتشار، وتعطى كفاءة الجهاز بالعلاقة :

$$E(f)_{dev} = \frac{1}{[1 + \frac{R_s}{R_j}] [1 + (\frac{f}{f_c})^2]} \quad (18)$$

إن R_j هي حاصل جمع مقاومة الوصلة و مقاومة المادة نصف الناقل إضافة إلى مقاومة التماس وهي المقاومة الناتجة عن منطقة التماس بين المادة نصف الناقل و المعدن الخارجي الموصول مع الدارة ومنه نكتب:

$$R_j = r_a + r_b \quad (19)$$

r_b هي مقاومة التماس و r_a هي مقاومة الوصلة و تتراوح بين 0.1Ω من أجل العناصر ذات الاستطاعة العالية و قد تصل إلى 2Ω من أجل العناصر ذات الاستطاعة المنخفضة ، و تعطى مقاومة الوصلة r_a بالعلاقة [9-16]:

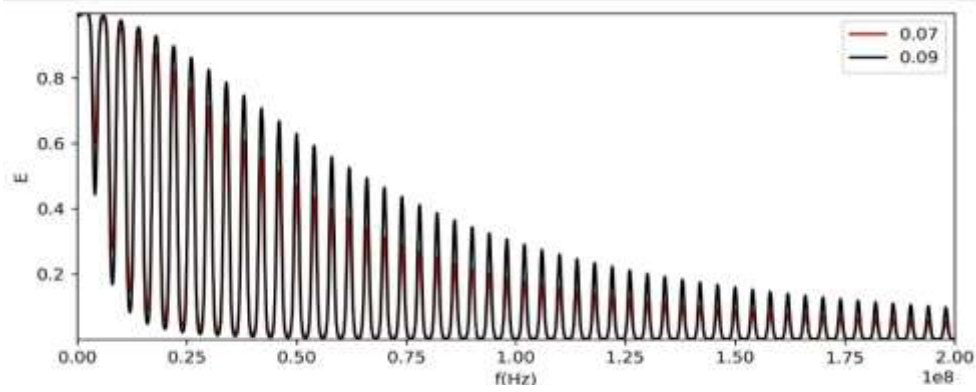
$$r_a = \frac{KT}{eI} \quad (20)$$

حيث I هي تيار الانحياز الأمامي لديود CNT الذي أوجدناه سابقاً ، و تعطى سعة الانتشار للوصلة بالعلاقة:

$$C_j = \frac{\tau I e}{nKT} \quad (21)$$

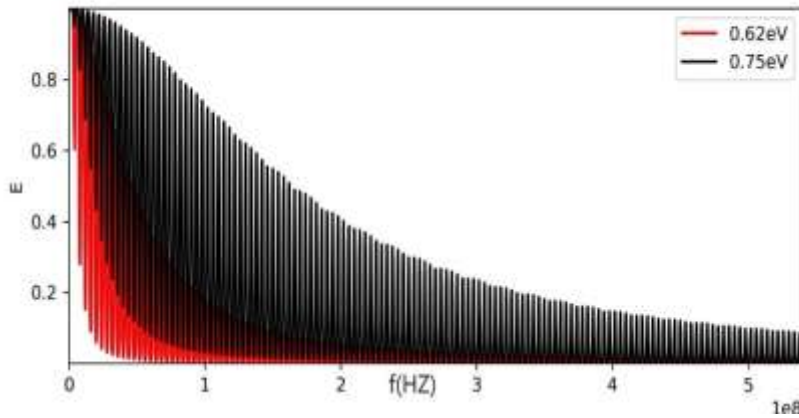
حيث τ هو متوسط عمر حاملات الشحنة.

و برسم كفاءة التقويم للديود في بايثون و المعطاة بالعلاقة (18) نحصل على الشكل التالي:



شكل(5): منحنى كفاءة التقويم E في ديود CNT بدلالة تردد الإشارة المطبقة عند شدتين مختلفتين 0.07V و 0.09V.

يظهر الشكل (5) منحنى كفاءة الجهاز بدلالة التردد المطبق و بسبب تغير تردد القطع f_c الناتج عن التغيرات المستمرة لمقاومة الوصلة R_j و سعتها C_j ، ستتنتج مجموعة من ترددات القطع مما يجعل المنحنى يظهر على شكل سلسلة قمم و قيعان ضيقة العرض. تعبر القمم عن مقدار كفاءة الجهاز E_{dev} عند تردد معين وتعتبر القيعان عن تناقص أو انعدام كفاءة الجهاز بسبب الوصول إلى تردد القطع ويحصل انخفاض للقمم مع زيادة التردد مما يعني انخفاض كفاءة الجهاز مع ازدياد التردد. عند تناقص شدة إشارة الدخل، نلاحظ مع زيادة التردد المطبق انخفاضاً في كفاءة الديود حيث تظهر المنحنيات انزياح القمم نحو الأسفل مما يعني انخفاضاً في المردود وضيقاً أكبر في الطاقة. يعزى ارتفاع كفاءة تقويم الجهاز عند زيادة الشدة إلى انخفاض مقاومة الوصلة R_j مما يرفع من قيمة تردد القطع f_c . يظهر المنحنى قدرة ديود CNT ذو فجوة الطاقة 0.62 eV على تقويم إشارات يصل ترددها حتى عدة مئات من الميغا هرتز مما يجعله خياراً واعداً للاستخدام في الدوائر الرقمية السريعة و دوائر الاتصالات ومستقبلات الراديو وعند استخدام أنابيب كربونية نانوية بفجوات طاقة مختلفة لتقويم الإشارات عالية التردد ،نحصل على الشكل التالي:



شكل(6): منحنى كفاءة التقويم E في ديود CNT بدلالة تردد الإشارة المطبقة

لأنبوبين بفجوات طاقة 0.62eV و 0.75eV.

يظهر الشكل (6) استخدام أنبوبين في دائرة تقويم ،أحدهما بفجوة طاقة 0.62eV والآخر بفجوة 0.75eV وينتج معنا أن الأنبوب ذو فجوة الطاقة الأعلى يظهر كفاءة تقويم أعلى كما يظهر أيضاً قدرة أكبر على تقويم الترددات الأعلى

فعند تردد 200MHz تبلغ كفاءة التقويم 40% لديود 0.75eV و تبلغ 7.5% لديود 0.62eV، كما يظهر الديود ذو فجوة الطاقة 0.75eV قدرة على تقويم الإشارات حتى مرتبة GHz ، وبناءً على ما سبق، و بالاستفادة من خاصية ضبط فجوة الطاقة في أنابيب CNT، فإن أنابيب الكربون النانوية ذو فجوة الطاقة الأعلى تكون أفضل للاستخدام في التطبيقات الإلكترونية عالية التردد.

5- التطبيقات اللاخطية لديود الأنابيب الكربونية النانوية CNT:

(a) نموذج الكشف التريبيعي لديود CNT:

تستخدم الكواشف في مستقبلات الإشارات الراديوية لتحسس وجود إشارة حيث تقوم بتحويل الإشارة الراديوية إلى إشارة رؤيا والكاشف الأكثر شيوعاً هو كاشف الوصلة الثنائية و سنستخدم ديود CNT أحادي الجدار ذو فجوة الطاقة 0.62eV و يمتلك هذا الكاشف منطقتا عمل هما منطقة العمل التريبيعية و منطقة العمل الخطية و في منطقة العمل التريبيعية يكون جهد الخرج متناسباً مع مربع الجهد لإشارة الدخل و بالتالي مع استطاعة إشارة الدخل و قد استخدمنا منطقة العمل التريبيعية في كاشف CNT. عند تطبيق جهد كهربي مستمر ومتناوب (ناجم عن الإشارة المرصودة) على الديود $V(t)=V_0+V_m\cos(\omega t)$ و بسبب لا خطية الديود سوف تنتج عنه مجموعة من المركبات المستمرة و المتناوبة و باستخدام متسلسلة تايلور للتابع $I=f(V)$ حول نقطة التشغيل المستمرة V_0 و إهمال الحدود من الدرجة الثالثة فما فوق بسبب صغر الإشارة نحصل على العلاقة التالية :

$$I(V) = f(V_0) + f'(V_0)(V - V_0) + \frac{1}{2!} f''(V_0)(V - V_0)^2 + \frac{1}{3!} f'''(V_0) (V - V_0)^3 \dots (22)$$

إن $V_s(t)=V-V_0$ هي الإشارة المتناوبة و بإهمال حدود الدرجة الثالثة فما فوق نحصل على ما يلي :

$$I(t) = f(V_0) + f'(V_0) V_s(t) + \frac{1}{2} f''(V_0) V_s^2(t) \quad (23)$$

إن الحد التريبيعي الأخير هو أساس عمل الكاشف و باستخدام المطابقة المثلثية :

$$\cos^2(\omega t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\omega t) \quad (24)$$

نحصل على ما يلي :

$$I(t) = f(V_0) + f'(V_0) V_m \cos(\omega t) + \frac{1}{4} f''(V_0) V_m^2 \cos(2\omega t) + \frac{1}{4} f''(V_0) V_m^2 \quad (25)$$

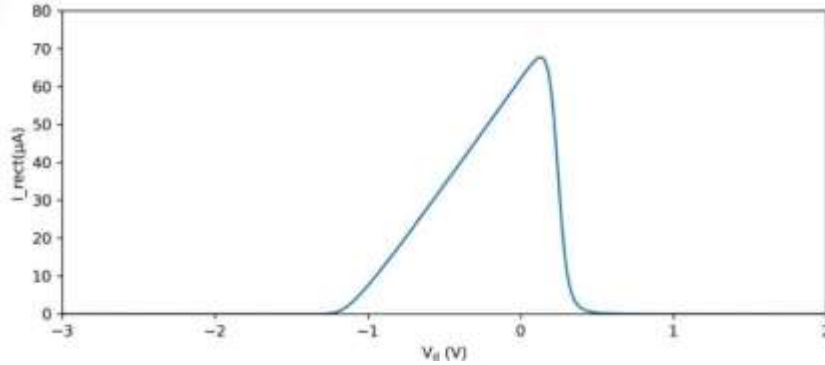
إن الحد الأول من العلاقة (22) هو الإشارة المستمرة و الحد الثاني هو الإشارة المتناوبة الأساسية بينما يعبر الحدان الثالث و الرابع عن الحدود المستمرة و المتناوبة بعد التعديل و التي نتجت عن لا خطية الديود و الحد الرابع هو الحد المستخدم في عمل الكاشف التريبيعي و الذي رمزنا له بالرمز I_{rect} و لإيجاده نوجد أولاً المقدار $f(v_0)$.

$$f(v_0) = I = I_s e^{\frac{eV_d - eRI}{nkT}} \quad (26)$$

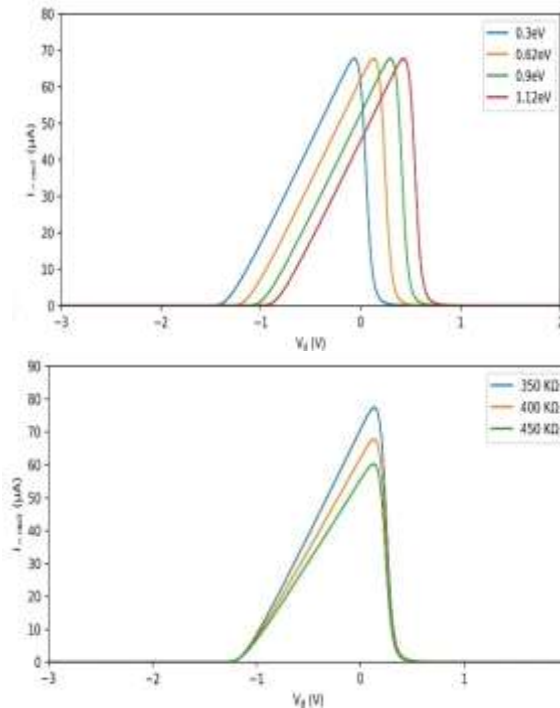
وقد وجدنا أن حل هذه المعادلة المتسامية يُعطى حسب معادلة التيار I المعطاة بالعلاقة (12) و بإيجاد المشتق الثاني للتابع I و تعويضه نحصل على المركبة المستمرة للإشارة I_{rect} والناجمة عن لا خطية الديود وفق ما يلي :

$$I_{rect} = \frac{1}{4} f''(V_0) V_m^2$$

$$= \frac{1}{4} \frac{e V_m^2}{n k T R} \frac{W \left(\frac{e R I_S}{n k T} e^{\frac{e V_d}{n k T}} \right)}{\left[1 + W \left(\frac{e R I_S}{n k T} e^{\frac{e V_d}{n k T}} \right) \right]^3} \quad (27)$$



شكل (7): المركبة المستمر للكاشف بدلالة الجهد المستمر المطبق على دارة الديود لتحسس إشارة سعته 0.3V. يظهر الشكل (7) أن أعلى قيمة للمركبة المستمرة الناتجة عن لا خطية ديود CNT ذو فجوة الطاقة 0.62eV تكون عند تطبيق جهد كهربائي قيمته 0.13V و تستخدم هذه الطريقة لتحديد نقطة العمل المثالية للديود اللازمة لالتقاط الإشارات عالية التردد منخفضة الشدة ويكون المنحني على هيئة الجرس و يبدأ الديود في التقاط الإشارات عند جهد 1.2V- و يزداد التيار الناتج ليلعب قيمة عظمى عند 0.152V ثم يتناقص بعدها بشكل كبير و تكون شدة التيار من مرتبة μA وبإجراء مسح للبارامترات parameter Sweep لمعرفة تأثير كل بارامتر على حدا نحصل على الأشكال البيانية التالية:



شكل (8): تغيرات المركبة المستمرة I_{rect} عند فجوات طاقة مختلفة لأنبوب الكربون النانوي CNT و عند مقاومات مختلفة.

تظهر منحنيات الشكل الأيمن من الشكل (8) أن زيادة فجوة طاقة أنبوب الكربون النانوي من خلال تصغير أبعاده تؤدي إلى ارتفاع في الجهد الكهربائي اللازم للحصول على أعلى إشارة ممكنة فعند فجوة طاقة 0.3eV يعمل الكاشف التريبيعي بأعلى كفاءة ممكنة عند الجهد -0.055V و عند فجوة طاقة 0.62eV يعمل الكاشف عند 0.125V و عند فجوة طاقة 0.9eV يعمل عند 0.324V و أخيراً عند فجوة طاقة 1.12eV يعمل عند جهد 0.514V. تظهر المنحنيات أيضاً أن تغيير فجوة الطاقة لا يؤثر على شدة الإشارة حيث نحصل على شدة التيار نفسه مهما تغيرت فجوة الطاقة ولذلك فإن استخدام الأنابيب الكربونية النانوية ذو فجوة الطاقة الأصغر في الكاشف التريبيعي يؤدي إلى استهلاك أقل في الطاقة. تظهر أيضاً منحنيات الشكل الأيسر من الشكل (8) أن زيادة المقاومة الكهربائية الموصولة على التسلسل مع ديود CNT تؤدي إلى انخفاض في شدة الإشارة التي يرصدها الكاشف مع ثبات الجهد الكهربائي اللازم لعمل الكاشف التريبيعي. أظهرت المنحنيات أنه عند تغيير المقاومة فإن جهد الكاشف يبقى 0.192V وتنخفض شدة التيار من 77.06 μA عند 350 K Ω إلى 60.37 μA عند 450 K Ω .

(b) مضاعفة الترددات في ديود CNT و تقييم الأداء و إجراء مسح للمتغيرات:

وجدنا حسب العلاقة (22) أن لا خطية الديود تؤدي إلى إنتاج مجموعة من المركبات المستمرة و المترددة والتي حصلنا عليها من تطبيق متسلسلة تايلور على علاقة تيار الديود ، و عندما يكون تردد إشارة الدخل في الديود f فإن المركبات المترددة تتضمن ترددات 2f , 3f , 4f ، واستخدمنا ديود CNT كمضاعف تردد ثلاثي (Frequency Triple) من خلال استخدام مرشح للإبقاء على التردد 3f و حذف جميع الترددات الأخرى ، و بأخذ الحد $(V - V_0)^3 f'''(V - V_0)^3 = \frac{1}{3!} f'''(V_0) (V_m \cos \omega t)^3 = \frac{V_m^3}{3!} f'''(V_0) \left(\frac{3}{4} \cos(\omega t) + \frac{1}{4} \cos(3\omega t) \right)$ (28) و تفكيكه بعد حذف باقي المركبات الأخرى نحصل على ما يلي [11-17-18-19-20]:

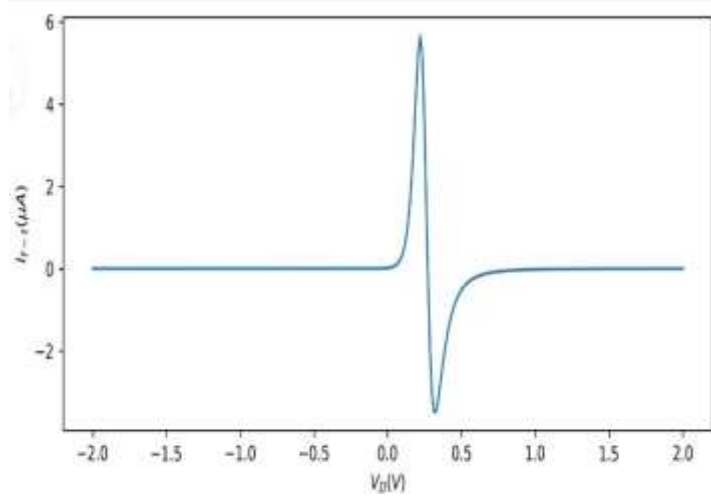
$$\frac{1}{3!} f'''(V_0) (V - V_0)^3 = \frac{1}{3!} f'''(V_0) (V_m \cos \omega t)^3 = \frac{V_m^3}{3!} f'''(V_0) \left(\frac{3}{4} \cos(\omega t) + \frac{1}{4} \cos(3\omega t) \right) \quad (28)$$

$$= \frac{1}{8} V_m^3 f'''(V_0) \cos(\omega t) + \frac{1}{24} V_m^3 f'''(V_0) \cos(3\omega t) \quad (29)$$

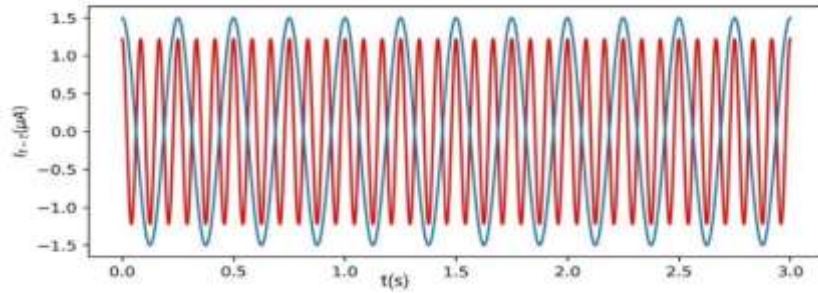
إن العلاقة (29) تنقسم إلى قسمين، بحيث يحمل القسم الأول تردد الإشارة الأساسية f ويحمل القسم الثاني التردد 3f المطلوب، ويعمل المرشح على حجب القسم الأول من الإشارة ويصبح التيار الناتج عن المضاعف الثلاثي بالشكل:

$$I_{f-t} = \frac{V_m^3 f'''(V_0) \cos(3\omega t)}{24} = V_m^3 \frac{\left(\frac{e}{nkT}\right)^3 W \left(\frac{eRI_S}{nkT} \frac{eV_D}{nkT}\right) [1 - 2W \left(\frac{eRI_S}{nkT} \frac{eV_D}{nkT}\right)]}{[1 + W \left(\frac{eRI_S}{nkT} \frac{eV_D}{nkT}\right)]^5} \cos(3\omega t) \quad (30)$$

حيث قمنا بإيجاد المشتق الثالث ل $f(V_0)$ الذي أوجدناه سابقاً بالعلاقة (12) و تعويضه في العلاقة (29) و برسم التابع I_{f-t} المعطى بالعلاقة (30) بدلالة الجهد المستمر V_D في بايثون نحصل على الشكل التالي :

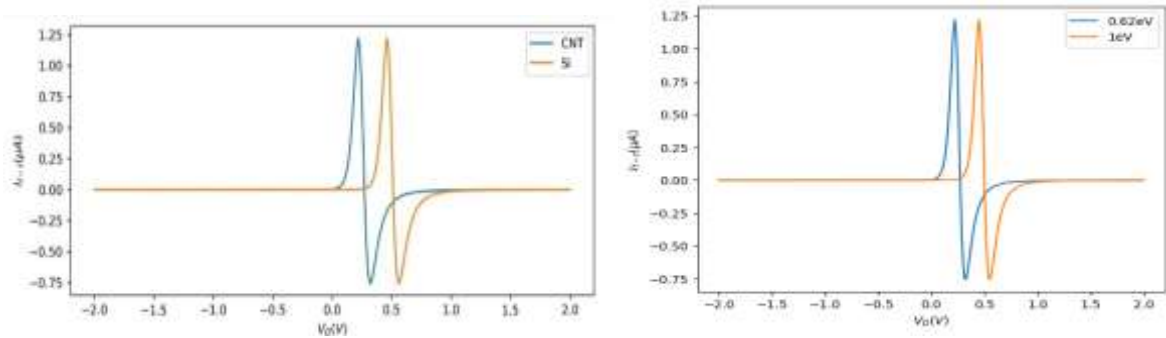


شكل (9): تغيرات المركبة المتناوبة الناتجة عن لا خطية الديود بدلالة الجهد الكهربائي المستمر المطبق على الكاشف. كما هو الحال في دارة الكاشف التريبيعي، فإن دارة مضاعف التردد تمتلك نقطة عمل مثالية عند جهد كهربائي مستمر V_D وهو الجهد اللازم لتشغيل مضاعف التردد ويظهر الشكل (9) أن المضاف يمتلك نقطتين عمل تكون الأولى عند جهد كهربائي 0.222V والثانية عند 0.319V وقد اعتمدنا نقطة العمل الأولى لتشغيل المضاعف وبرسم التيار الأصلي والتيار المتضاعف بدلالة الزمن نحصل على ما يلي:



شكل(10): منحنى اللون الأزرق إشارة الدخل لموجة متناوبة سعتها 0.6 V ومنحنى اللون الأحمر إشارة الخرج عند نقطة العمل.

يظهر الرسم (10) الناتج أن تردد الإشارة المرصودة تضاعف إلى ثلاثة أضعاف، في حين انخفضت سعة الإشارة و هو السلوك التقليدي في هذا النوع من الدارات و عند استخدام أنابيب كربونية نانوية بفجوات طاقة مختلفة و إعادة رسم العلاقة (30) و أيضاً بإجراء المقارنة مع ديود السليكون نحصل على ما يلي:



شكل(11): نقاط عمل المضاف الثلاثي عند فجوات طاقة مختلفة و نقاط العمل لمضاعفي تردد CNT و Si .

يظهر الشكل (11) أن ازدياد فجوة الطاقة يؤدي إلى ازدياد الجهد الكهربائي اللازم لتشغيل دائرة المضاعف ، حيث أن ازدياد فجوة طاقة الأنبوب من 0.62 eV حتى 1 eV أدى إلى ارتفاع الجهد الكهربائي لنقطة العمل الأولى من 0.222 V حتى 0.448 V . إن شدة التيار I_{f-t} تبقى نفسها عند تغيير فجوة الطاقة وهي من مرتبة μA و يمكن التعبير عنها بمرتبة nA . يظهر الشكل أن مضاعف التردد المصنوع من CNT يعمل عند جهد كهربائي 0.22V بينما يعمل مضاعف التردد المصنوع من Si عند جهد كهربائي 0.46 V مما يعني أن مضاعف CNT يستهلك طاقة أقل. إن المضاعفين يمتلكان نفس شدة التيار تقريباً وهذا يثبت كميّاً أن ديود CNT يستهلك طاقة كهربائية أقل من ديود Si بنسبة 50% تقريباً.

النتائج والمناقشة:

تمتلك أنابيب الكربون النانوية فجوة طاقة قابلة للضبط مما يكسبها أهمية كبيرة في الصناعات الإلكترونية و الضوئية، و قد تمكنا في هذه الورقة باستخدام طريقة مونتّي كارلو و قوانين لانداور من بناء أداة برمجية لتحديد قيم الكيرالية (n,m) اللازمة لتشكيل أي فجوة طاقة نريدها ، وكذلك لحساب جهد العتبة و جهد زينر لديود الأنابيب الكربونية النانوية مباشرة. أظهرت أنابيب الكربون النانوية تأثراً بتغيرات درجة الحرارة بشكل أقل بكثير من السيليكون، مما يعني أن العناصر الإلكترونية المصنوعة من CNT أقل ضجيج حراري وأقل تشويش وأطول عمراً. أظهر ديود CNT قدرة على تقويم الإشارات المترددة حتى عدة مئات من الميغا هرتز ، و هو ما يكسبه أهمية عالية في التطبيقات عالية التردد. أظهرت التطبيقات اللاخطية لديود CNT أن زيادة فجوة الطاقة فيه ترفع من كفاءة الديود في دارات تقويم التيارات، بينما تقلل فجوة الطاقة فيه في دارات الكاشف التريبيعي ومضاعف التردد هو من يرفع من كفاءة الديود المذكور. أخيراً، أثبتنا أن استخدام CNT في صناعة الدارات الإلكترونية اللاخطية عوضاً عن السيليكون، يجعلها أقل استهلاكاً للطاقة.

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- أثبتت الدراسة امتلاك ديود CNT للعديد من المزايا التي تؤهله ليكون خياراً واعداً في التطبيقات الإلكترونية و الضوئية.
- 2- يمكن دمج عناصر بلازمونية أو الذكاء الاصطناعي لتحسين الأداء.
- 3- يمكن إجراء دراسات للربط بين قدرة الأنبوب الكربوني على الإمتزاز (Adsorption) و فجوة طاقته لتسليط الضوء على استخدام الأنابيب الكربونية في تطبيقات فصل النظائر و تنقية المياه.

References:

- [1] V. Popov, "Carbon nanotubes: properties and application", Materials Science and Engineering: R; Reports, vol. 43, No. 3, pp. 61-102, 2004.
- [2] N. Taib, M. Rahman, M. Matin, J. Uddin, M. Bakri and A. Khan, "A Review on Carbon Nanotube (CNTs): Structure, Synthesis, Purification and Properties for Modern day Applications", Research Square, Preprint, pp.1-22, 2021.
- [3] Y.Ding and J.Z.Chen , "Estimation of the Band Gap of Carbon Nanotube Bundles" , Materials, vol.17,No.7,p.1530,2024.
- [4] Y.Matsuda,J.Kono,W.A.Goddard III, "Definitive Band Gap for Single-Wall Carbon Nanotue",The Journal of Physics Chemistry Letter,vol.1,No.20,pp.2946-2950,2010.

- [5] G. Gelao, R. Marani and A. Perri, "A Formula to Determine Energy Band Gap in Semiconducting Carbon Nanotubes", *Esc Journal of Solid State Science and Technology*, vo. 18, No. 2, pp. M19-M21, 2019.
- [6] A. Perri and R. Marani, "CNTFET Electronic: Design Principles", Editor, Bari, Italy: Progedit, 2017.
- [7] J. Lee, P. Gipp and C. Heller, "Carbon Nanotube p-n junction diodes", *Applied Physics Letters*, vol. 85, No. 1, pp. 145-147, 2004.
- [8] K. Bosnick, N. Gabor, P. McEuen, "Transport in Carbon p-i-n diodes", *Applied Physics Letters*, vol. 89, No. 16, pp. 163121, 2006.
- [9] D. Jena, T. Fang, Q. Zhang, H. Xing, "Zener tunneling in semiconducting nanotube and Graphene nanoribbon p-n junctions", *Applied Physics Letters*, vol. 93, No. 11, pp. 112106, 2008.
- [10] E. Cobas and M. S. Fuhrer, "Microwave Rectification by a Carbon Nanotube Schottky Diode", *Nano Letters*, Vol. 8, No. 3, pp. 887-890, 2008.
- [11] H. Zeng, Y. Wu, H. Qui, M. Zhu, X. Liang and D. Wang, "W-band MMIC frequency tripler based on carbon nanotube diode", *Proceedings of the 2025 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, San Francisco, California, USA, 2025.
- [12] H. S. P. Wong, S. Mitra, D. Akinwande, C. Beasley, Y. Chai and H. Y. Chen, "Carbon nanotube electronics –materials, devices, circuits, design, modeling and performance projection", *Proceedings of the 2011 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, Washington, DC, USA, 2011.
- [13] Y. Ze, Y. Liu, B. Wang, H. Yin, C. Jin and Z. Zhang, "Carbon nanotube materials for future integrated circuit applications", *Materials Today*, October 2024.
- [14] H. Y. Liu, Y. Sun, D. M. Sun and H. M. Cheng, "Carbon nanotube 3D integrated circuits :from design to applications", *Advanced Functional Materials*, vol. 35, No. 34, March 2025.
- [15] Z. Zhang, N. Zhang and Z. Zhang, "High-performance carbon nanotube electronic devices: progress and challenges", *Micromachines*, vol. 16, No. 5, pp. 554, May 2025.
- [16] L. M. Peng, Z. Zhang and S. Wang, "Carbon nanotube electronics :recent advances", *Materials Today*, November 2014.
- [17] B. Mclean and A. J. Page, "Carbon nanomaterials for advanced technology", *Inorganics*, vol. 13, No. 5, pp. 129, April 2025.
- [18] E. A. Khanmamadova, "Diodes made from carbon nanotubes", *International Scientific Journal <<Grail of Science>>*, No. 29, pp. 225-226, July 2023.
- [19] P. Poncharal, C. Berger, Y. Yi, Z. L. Wang and W. A. de Heer, "Room temperature ballistic conduction in carbon nanotubes", *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 106, No. 47, pp. 12104-12118, November 2002.
- [20] N. A. A. B. Taib, M. R. Rahman, M. M. Matin, J. Uddin, M. K. B. Bakri and A. Khan, "A review on carbon nanotubes (CNTs) : structure, synthesis, purification and properties for modern day applications", *Research Square*, Preprint, pp. 1-22, September 2021.