

مقارنة أداء الأنماط الحلزونية لترانزستورات CNTFET وتأثير عدد الأنابيب المتوازية على خصائص الترانزستور

الباحث: الدكتور خضر راكان بشور - عضو هيئة فنية (مشرف أعمال) في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - قسم هندسة الالكترونيات والاتصالات - جامعة حمص

الملخص

تقدم هذه الدراسة مقارنة شاملة لأداء ترانزستورات الأثر الحقلية المصنعة من أنابيب الكربون النانوية (CNTFET) ذات الأنماط الحلزونية الثلاثة Zigzag، Armchair، و Chiral بالإضافة إلى دراسة تأثير عدد الأنابيب النانوية المتوازية (N) على أدائها. تم إجراء المحاكاة باستخدام أداتي CNTbands و FETToy على منصة nanoHUB، حيث تم حساب الخصائص الفيزيائية والكهربائية لثلاثة عشر نمطاً حلزونياً تغطي نطاق أقطار يتراوح بين 0.556 nm و 1.588 nm.

أظهرت النتائج أن الأنابيب من نوع Zigzag و Chiral تتبع العلاقة العكسية بين فجوة الطاقة والقطر ($E_g = 0.852/d$)، بينما تظهر الأنابيب من نوع Armchair سلوكاً معدنياً بفجوة طاقة صفرية تقريباً. كما أثبتت المقارنة المباشرة بين الأنماط (13,0) Zigzag و (10,5) Chiral أن الأداء يعتمد بشكل أساسي على القطر وليس على النمط الحلزوني، حيث بلغ الفرق في تيار التشغيل (I_{on}) حوالي 1% فقط رغم اختلاف النمط.

فيما يخص تأثير عدد الأنابيب المتوازية N، أثبتت النتائج العلاقة الخطية المباشرة بين التيار الكلي وعدد الأنابيب وهي ($I_{D,total} = I_{D1} \cdot N$) لكل من Zigzag و Chiral، مع ميل يتراوح بين 4.42 $\mu A/N$ و 5.56 $\mu A/N$. كما تم تحديد النطاق القطري 1.0-1.2 nm كمنطقة تصميم مثلى للدوائر الرقمية المتوازنة، حيث يحقق الأنبوب (13,0) توازناً مثالياً بين تيار تشغيل مناسب (5.56 μA) وتسريب مقبول ($8.9 \times 10^{-13} A$).

صنفت التطبيقات إلى أربع فئات رئيسية وفقاً لمتطلبات الأداء واستهلاك الطاقة، مع توصيات تصميمية محددة: منخفضة الطاقة جداً للأنبوب (7,0) والأنبوب (6,4) مع $N=1-2$ ، ومنخفضة الطاقة للأنبوب

(10,0) والأنبوب (8,3) مع $N=2-3$ ، ومتوازنة للأنبوب (13,0) والأنبوب (10,5) مع $N=3-5$ ، وعالية الأداء للأنبوب (20,0) والأنبوب (12,7) مع $N=7-10$. تشكل هذه التوصيات إطاراً كميّاً متكاملًا لتحسين مفاضلة الأداء-الطاقة في ترانزستورات CNTFET من خلال التحكم في النمط الحلزوني وعدد الأنابيب المتوازية.

الكلمات المفتاحية: أنابيب الكربون النانوية، ترانزستورات الأثر الحقل، النمط الحلزوني، عدد الأنابيب المتوازية.

Performance Comparison of CNTFET Chiralities and the Effect of Parallel Nanotube Count on Transistor Characteristics

Abstract

This study presents a comprehensive performance comparison of carbon nanotube field-effect transistors (CNTFET) with three chiralities: Armchair, Zigzag, and Chiral, along with an investigation of the effect of the number of parallel nanotubes (N) on their performance. Simulations were conducted using CNTbands 2.0 and FETToy tools on the nanoHUB platform, where the physical and electrical properties of thirteen chiral patterns covering a diameter range from 0.556 nm to 1.588 nm were calculated.

The results demonstrated that Zigzag and Chiral nanotubes follow the inverse relationship between bandgap and diameter ($E_g = 0.852/d$), while Armchair

nanotubes exhibit metallic behavior with nearly zero bandgap. Direct comparison between Zigzag (13,0) and Chiral (10,5) patterns confirmed that performance depends primarily on diameter rather than chirality, with the ON-current (I_{ON}) difference being only about 1% despite different chiralities.

Regarding the effect of parallel nanotubes, the results verified the linear relationship between total current and tube count ($I_{D,total} = I_{D1} \cdot N$) for both Zigzag and Chiral patterns, with slopes ranging from 4.42 $\mu A/N$ to 5.56 $\mu A/N$. The diameter range of 1.0–1.2 nm was identified as the optimal design region for balanced digital circuits, where the (13,0) nanotube achieves an ideal trade-off between adequate ON-current (5.56 μA) and acceptable leakage (8.9×10^{-13} A).

Applications were classified into four main categories based on performance and power requirements, with specific design recommendations: ultra-low power (7,0) and (6,4) with $N=1-2$, low power (10,0) and (8,3) with $N=2-3$, balanced (13,0) and (10,5) with $N=3-5$, and high-performance (20,0) and (12,7) with $N=7-10$. These recommendations provide a comprehensive quantitative framework for optimizing the performance-power trade-off in CNTFET through integrated control of chirality and parallel nanotube count.

Keywords: Carbon nanotubes, field-effect transistors, chirality, parallel nanotubes.

1- المقدمة

شهدت صناعة الإلكترونيات خلال العقود الماضية تطوراً هائلاً، مدفوعاً بقانون مور الذي تتبأ بمضاعفة عدد الترانزستورات على الرقاقة الإلكترونية كل عامين تقريباً. ومع ذلك، فإن هذا المسار التطوري بدأ يواجه تحديات فيزيائية وتكنولوجية حادة، حيث اقتربت أبعاد ترانزستورات السيليكون من المقياس الذري، مما أدى إلى ظهور ظواهر فيزيائية كمومية غير مرغوبة مثل تأثير النفق الكمي وتأثير القناة القصيرة، مما زاد من تيارات التسريب واستهلاك الطاقة الساكنة [1]. وقد دفعت هذه التحديات الباحثين إلى البحث عن مواد وتقنيات جديدة، حيث برزت أنابيب الكربون النانوية (CNTs) كمرشح واعد بفضل خصائصها الإلكترونية الفريدة [2].

تعد ترانزستورات الأثر الحقل المصنعة من أنابيب الكربون النانوية (CNTFET) من أهم تطبيقات هذه المواد، حيث أظهرت تفوقاً على ترانزستورات السيليكون من حيث السرعة واستهلاك الطاقة، وذلك بفضل بنيتها أحادية البعد وخصائصها مثل الحركية العالية للحوامل والنقل الباليستي. وقد أظهرت الدراسات الحديثة أن ترانزستورات CNTFET يمكنها تحقيق تحسناً بنحو خمسة أضعاف في ناتج الطاقة-التأخير مقارنة بأجهزة السيليكون، إضافة إلى قابلية تصغير فائقة وقدرة على العمل بجهود منخفضة تقلل من استهلاك الطاقة الساكنة [3].

تتميز أنابيب الكربون النانوية بخاصية فريدة، وهي أن خواصها الكهربائية تعتمد بشكل حاسم على النمط الحلزوني (Chirality) الذي يُحدد بواسطة المتجه (n, m) [4]. ويمكن للأنابيب أن تكون معدنية (Armchair) أو نصف ناقلة (Zigzag) أو (Chiral) وفقاً لقيمة (n, m) ، مما يسمح بتصميم أنابيب بخصائص كهربائية مخصصة. وقد أظهرت الأبحاث السابقة أن النمط الحلزوني يؤثر بشكل مباشر على القطر وفجوة الطاقة [5]، كما أن جهد العتبة يتغير بتغير قطر الأنبوب [5].

يواجه الباحثون تحدياً في التصنيع الفعلي لترانزستورات CNTFET، يتمثل في التيار المنخفض نسبياً الذي يمكن تمريره من خلال أنبوب نانوي واحد، الحل الشائع لهذه المشكلة هو استخدام عدة أنابيب نانوية متوازية (N) لتشكيل قناة الترانزستور، مما يزيد من تيار التشغيل الكلي بنسبة N مرة. ومع ذلك، فإن زيادة عدد الأنابيب تؤدي أيضاً إلى زيادة السعة الطفيلية وتيار التسريب، مما يستدعي إيجاد توازن دقيق [6].

على الرغم من الدراسات المكثفة التي تناولت تأثير النمط الحلزوني على خصائص الأنابيب النانوية وترانزستورات CNTFET ، إلا أن معظم هذه الدراسات ركزت على الأنابيب المتعرجة (Zigzag) بشكل منفرد، دون تقديم مقارنة شاملة ومنهجية بين الأنماط الحلزونية الثلاثة Zigzag ، Armchair ، Chiral تحت نفس الظروف [3]. كما أن تأثير عدد الأنابيب المتوازية (N) على مختلف مقاييس الأداء لم يُدرس بشكل منهجي [13].

لذلك، تهدف هذه الدراسة إلى سد هذه الفجوة البحثية من خلال تقديم مقارنة شاملة لأداء الأنماط الحلزونية الثلاثة، ودراسة تأثير عدد الأنابيب المتوازية، باستخدام أدوات المحاكاة المتاحة على منصة nanoHUB، وهي منصة مفتوحة الوصول توفر بيئة متكاملة لمحاكاة الأجهزة النانوية.

2- هدف الدراسة

يهدف هذا البحث إلى إجراء مقارنة شاملة لأداء الأنماط الحلزونية الثلاثة Zigzag ، Armchair ، Chiral لترانزستورات CNTFET ، ودراسة تأثير عدد الأنابيب المتوازية على أدائها، وذلك من خلال:

1. دراسة الفروق في الأداء الكهربائي بين الأنماط الثلاثة Zigzag ، Armchair ، Chiral تحت ظروف محاكاة موحدة، وتحليل كيفية انعكاس النمط الحلزوني على كل من القطر، فجوة الطاقة، تيار التشغيل (I_{ON}) ، تيار التسريب (I_{OFF}) ، جهد العتبة (V_{th})، والناقلية التبادلية (g_m).
2. تحليل تأثير تغيير عدد الأنابيب المتوازية N على مقاييس الأداء الرئيسية، وتحديد العلاقة بين N وكل من I_{ON} ، I_{OFF} ، g_m ، ونسبة I_{ON}/I_{OFF} ، عبر الأنماط المختلفة.
3. حساب واستخلاص مقاييس الأداء (قيم I_{ON} ، I_{OFF} ، V_{th} ، g_m ، ونسبة I_{ON}/I_{OFF}) لكل نمط حلزوني ولكل قيمة N ، وتنظيمها في جداول مرجعية شاملة.
4. دراسة كيفية اختلاف علاقة فجوة الطاقة مع القطر بين الأنماط نصف الناقلية Zigzag و Chiral مقارنة بالأنماط المعدنية Armchair ، مع التركيز على تأثير النمط الحلزوني في تحديد السلوك الكهربائي، وذلك لدعم النتائج المستخلصة من المقارنة بين الأنماط.
5. تحديد النمط الحلزوني الأمثل والعدد المناسب من الأنابيب المتوازية (N) حسب متطلبات التطبيق، مع تصنيف التطبيقات إلى أربع فئات: منخفضة الطاقة جداً والتي تحقق أقل قيمة

لـ I_{OFF} ، منخفضة الطاقة والتي توفر قيمة متوسطة لتيار التشغيل وتيار التسريب، عالية الأداء والتي تحقق أعلى قيمة لـ I_{ON} ، متوازنة والتي تحقق أفضل نسبة لـ I_{ON}/I_{OFF} .
6. بناء قاعدة بيانات شاملة تضم جميع النتائج (الجدول والأشكال البيانية) لأداء ترانزستورات الأثر الحثي (CNTFET) لمختلف الأنماط الحلزونية وأعداد الأنابيب المتوازية، لتكون مرجعاً للباحثين والمصممين في المستقبل.

3- البنية الهندسية لأنابيب الكربون النانوية وتصنيفها حسب النمط الحلزوني:

يمكن تصور أنبوب الكربون النانوي على أنه رقاقة من الجرافين (طبقة واحدة من ذرات الكربون مرتبة في شبكة سداسية) تم لفها على شكل أسطوانة مجوفة، يتم تحديد كيفية لف الرقاقة بواسطة ما يعرف بـ شعاع النمط الحلزوني، والذي يُعطى بالعلاقة: [7]

$$\vec{C}_h = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2 = (n, m) \quad (1)$$

حيث n و m هما عدداً صحيحان، و $\vec{a}_1$ و $\vec{a}_2$ هما متجهي الوحدة الأساسيان لشبكة الجرافين. تتحدد الخصائص الهندسية للأنبوب النانوي من خلال قطر الأنبوب النانوي وزاوية اللف له [8]:

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

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}m}{2n+m} \right) \quad (3)$$

حيث a_{cc} هو طول الرابطة بين ذرتي كربون متجاورتين ولها القيمة: $a_{cc} = 0.142nm$. وتعطى فجوة الطاقة للأنابيب النانوية نصف الناقلية بالعلاقة [7]:

$$E_g = \frac{0.852}{d} \quad (4)$$

وتصنف الأنابيب النانوية حسب النمط الحلزوني إلى Zigzag، Chiral، Armchair، وذلك حسب زاوية اللف حسب الجدول 1 [7]:

الجدول 1. تصنيف الأنابيب النانوية حسب النمط الحلزوني

النوع	الشرط	السلوك الكهربائي	زاوية اللف
Zigzag	$m = 0$	معدي إذا كان n من مضاعفات 3، وإلا يكون نصف ناقل.	0°
Chiral	$n \neq m \neq 0$	معدي إذا كان $(n-m)$ من مضاعفات 3، وإلا يكون نصف ناقل.	$0^\circ < \theta < 30^\circ$
Armchair	$n = m$	معدي دائماً	30°

وتجدر الإشارة إلى أن حوالي ثلث الأنابيب النانوية تكون معدنية، بينما يكون الثلثان الباقيان نصف ناقلة [7].

ويعطى جهد العتبة للترانزستور المصنوع من الأنابيب النانوية CNTFET بالعلاقة [7]:

$$V_{th} = \frac{0.42}{d} \quad (5)$$

حيث d هو قطر الأنبوب النانوي بوحدة النانومتر (nm)

4- مواد البحث وطرقه:

تم استخدام منصة nanoHUB (www.nanohub.org) لإجراء جميع عمليات المحاكاة في هذا البحث، وهي منصة إلكترونية متخصصة في أبحاث النانوتكنولوجيا، تديرها مؤسسة العلوم الوطنية الأمريكية (NSF) بالتعاون مع جامعة بيردو. توفر المنصة مجموعة واسعة من أدوات المحاكاة المتاحة عبر الإنترنت، مما يسهل على الباحثين إجراء محاكاة دقيقة للأجهزة النانوية دون الحاجة إلى تثبيت برامج معقدة. تم اختيار أداتي المحاكاة CNTbands 2.0 و FETToy نظراً لكونهما من أكثر الأدوات استخداماً في مجال محاكاة CNTFETs، ولما توفره من دقة عالية في حساب الخصائص الفيزيائية والكهربائية للأنابيب النانوية والترانزستورات. حيث تتيح الأداة CNTbands 2.0 حساب الخصائص الفيزيائية للأنابيب النانوية (كالقطر، فجوة الطاقة، وزاوية اللف)، بينما تتيح الأداة FETToy محاكاة خصائص الترانزستور المختلفة (كمحنيات التيار-جهد، الناقلية التبادلية، وغيرها).

5- منهجية المحاكاة والنمذجة النظرية:

بناءً على الخلفية النظرية السابقة، يقدم هذا القسم منهجية المحاكاة المستخدمة في هذه الدراسة، بما في ذلك الأنماط الحلزونية المختارة، إعدادات المحاكاة، خطوات التنفيذ، بالإضافة إلى النماذج الفيزيائية والرياضية المستخدمة في نمذجة ترانزستورات CNTFET ومقاييس الأداء الأساسية لتقييم أداء الأنماط الحلزونية الثلاثة وتأثير عدد الأنابيب المتوازية.

1-5 الأنماط الحلزونية المختارة:

تم اختيار الأنماط الحلزونية وفق معايير تمثيل الأنواع الثلاثة Chiral، Zigzag، Armchair مع تغطية نطاق أقطار واسع (0.5-1.6 nm) وقد تم حساب الخصائص الفيزيائية (القطر، فجوة الطاقة، زاوية اللف) باستخدام أداة CNTbands 2.0 على منصة nanoHUB وفق الجدول 2.

الجدول 2. الأنماط المختارة للأنابيب النانوية

النوع	الأنماط (n,m)
Armchair	(5,5) (7,7) (10,10)
Zigzag	(7,0) (10,0) (13,0) (19,0) (20,0)
Chiral	(6,4) (8,3) (10,5) (10,6) (12,7)

2-5 إعدادات المحاكاة:

اعتمدت المحاكاة على الإعدادات الثابتة التالية المبينة في الجدول 3:

الجدول 3. الإعدادات الثابتة في المحاكاة

البارامتر	القيمة	الوحدة
جهد المصرف (V_{DS})	1.0	V
جهد البوابة (V_{GS})	$0 \rightarrow 1$	V

K	300	درجة الحرارة (T)
nm	1.5	سمك عازل البوابة (t_{ox})
-	3.9 (SiO ₂)	ثابت العازل (ϵ_r)
nm	20	طول القناة (L)

أما الإعدادات المتغيرة في المحاكاة فتمثلت بعدد الأنابيب النانوية N حيث إن N تغيرت حسب القيم التالية 1,2,3,5,7,10. عند استخدام عدة أنابيب نانوية متوازية، يُفترض في النماذج المثالية أن التيار الكلي يزداد خطياً مع عدد الأنابيب وفقاً للعلاقة $I_{D,total} = N \cdot I_{D1}$ ، وقد أظهرت الدراسات التجريبية على مصفوفات الأنابيب المتوازية صحة هذا الافتراض، حيث يتم جمع التيارات من كل أنبوب على حدة لتكوين التيار الكلي [9]. ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن هذه العلاقة قد لا تكون خطية تماماً عند الكثافات العالية للأنابيب بسبب تأثير الحجب الناتج عن تداخل المجالات الكهربائية للقنوات المتجاورة، مما يستدعي تصميمًا دقيقاً لتحديد المسافات والكثافات المثلى [10].

3-5 نموذج النقل الكمي:

تم استخدام نموذج النقل الباليستي لحساب خصائص التيار-الجهد للترانزستورات المدروسة، وذلك من خلال أداة المحاكاة FETToy، يقوم هذا النموذج على مبدأ حساب احتمالية انتقال الحاملات عبر القناة بين المصرف والمنبع، وهو مناسب لوصف النقل الإلكتروني في الأنابيب النانوية أحادية البعد حيث يكون متوسط المسار الحر للحاملات أكبر من طول القناة، مما يسمح باعتبار النقل باليستيًا. وقد اعتمدت منهجية المحاكاة في هذه الدراسة على نموذج لانداور للنقل الباليستي.

4-5 مقاييس الأداء الأساسية

تم حساب المقاييس التالية باستخدام أداة FETToy [11]:

- تيار التشغيل I_{ON} وهو التيار المار في الترانزستور عند $V_{GS}=V_{DD}$ و $V_{DS}=V_{DD}$
- تيار الإيقاف (التسريب) I_{OFF} وهو التيار المار في الترانزستور عند $V_{GS}=0V$ و $V_{DS}=V_{DD}$
- جهد العتبة للترانزستور V_{th} وهو جهد البوابة الذي يبدأ عنده الترانزستور بالتوصيل، ويتم استخلاصه بطريقة الاستكمال الخطي من منحنيات I_D-V_{GS} .

- الناقلية التبادلية g_m وهي مقياس لكفاءة التحكم في التيار بواسطة البوابة، وتحسب من العلاقة $g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}$.
- نسبة I_{ON}/I_{OFF} وهي النسبة بين تيار التشغيل وتيار التسريب، وتعد مقياساً أساسياً لكفاءة الطاقة في الترانزستورات الرقمية.

5-5 خطوات تنفيذ المحاكاة:

تم تنفيذ المحاكاة وفق الخطوات التالية:

- الخطوة 1: حساب الخصائص الفيزيائية باستخدام CNTbands 2.0: تم إدخال الأنماط الحلزونية المختارة (الجدول 2) في أداة CNTbands 2.0 ، وتم حساب كل من (القطر، فجوة الطاقة، وزاوية اللف) لكل نمط.
- الخطوة 2: محاكاة الترانزستور باستخدام FETToy: تم إدخال قيم الأقطار المستخلصة من الخطوة السابقة، بالإضافة إلى الإعدادات الثابتة (الجدول 3)، في أداة FETToy لمحاكاة خصائص الترانزستور. وتم الحصول على منحنيات النقل (I_D-V_G) ، واستخلاص قيم التيار في حالة التشغيل (I_{ON}) ، التيار في حالة الإيقاف (I_{OFF}) ، جهد العتبة (V_{th})، والناقلية التبادلية g_m ، وتكررت هذه الخطوة لكل نمط حلزوني ولكل قيمة من قيم N .
- الخطوة 3: تحليل النتائج: تم تجميع النتائج في جداول، وحساب النسب والمقاييس المشتقة منها، ورسم الأشكال البيانية اللازمة للمقارنة والتحليل.

6- النتائج ومناقشتها:

بتطبيق منهجية المحاكاة الموضحة أعلاه، تم الحصول على النتائج التالية التي سيتم عرضها ومناقشتها:

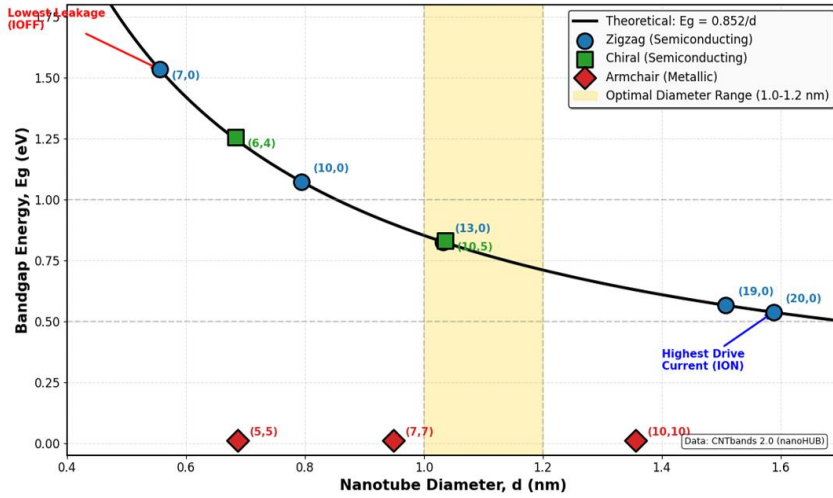
6-1 الخصائص الفيزيائية للأنماط الحلزونية:

تم حساب الخصائص الفيزيائية للأنماط الحلزونية الثلاثة باستخدام أداة CNTbands 2.0 على منصة nanoHUB، ويلخص الجدول 4 القيم المحسوبة للقطر وفجوة الطاقة وزاوية اللف لكل نمط.

الجدول 4. الخصائص الفيزيائية للأنماط الحلزونية المختارة

النوع	(n,m)	القطر (nm)	فجوة الطاقة (eV)	زاوية اللف (°)	السلوك
Armchair	(5,5)	0.391	0.0109	30.0	معدني
Armchair	(7,7)	0.548	0.0109	30.0	معدني
Armchair	(10,10)	0.783	0.0109	30.0	معدني
Zigzag	(7,0)	0.556	1.533	0.0	نصف ناقل
Zigzag	(10,0)	0.794	1.073	0.0	نصف ناقل
Zigzag	(13,0)	1.032	0.825	0.0	نصف ناقل
Zigzag	(19,0)	1.508	0.565	0.0	نصف ناقل
Zigzag	(20,0)	1.588	0.537	0.0	نصف ناقل
Chiral	(6,4)	0.683	1.254	23.4	نصف ناقل
Chiral	(8,3)	0.782	1.089	15.3	نصف ناقل
Chiral	(10,5)	1.036	0.831	19.1	نصف ناقل
Chiral	(10,6)	1.096	0.768	21.8	نصف ناقل
Chiral	(12,7)	1.327	0.642	21.4	نصف ناقل

يوضح الشكل 1 العلاقة بين فجوة الطاقة (E_g) وقطر الأنبوب النانوي (d) للأنماط الحلزونية الثلاثة. يمثل المحور الأفقي قطر الأنبوب النانوي بوحدة النانومتر (nm) ، بينما يمثل المحور العمودي فجوة الطاقة بوحدة الإلكترون فولت (eV) الخط المتصل الأسود يمثل العلاقة النظرية، بينما تمثل النقاط الزرقاء الأنابيب من نوع Zigzag، والنقاط الخضراء الأنابيب من نوع Chiral، والنقاط الحمراء الأنابيب من نوع Armchair .



الشكل 1. فجوة النطاق مقابل القطر للأنماط الحلزونية الثلاثة

تُظهر نتائج الجدول 4 أنه بالنسبة للأنابيب من نوع Armchair ، فهي تظهر سلوكاً معدنياً بفجوة طاقة صفرية تقريباً (0.0109 eV) بغض النظر عن قطرها، وذلك لأن شرط $n=m$ يجعلها معدنية دائماً وفقاً لقاعدة التصنيف $(n-m)$ من مضاعفات 3 [7]. وهذا السلوك المعدني للأنابيب Armchair يتوافق مع ما ورد في [11]، والتي أكدت أن الأنابيب من نوع $(n=m)$ تكون معدنية دائماً بغض النظر عن قطرها.

وكذلك فإن فجوة الطاقة للأنابيب النانوية نصف الناقلة Zigzag و Chiral تتبع العلاقة العكسية مع القطر $E_g = \frac{0.852}{d}$ ، حيث سجّل الأنبوب (7,0) ذو القطر الأصغر (0.556 nm) أعلى قيمة لفجوة الطاقة (1.533 eV)، بينما سجّل الأنبوب (20,0) ذو القطر الأكبر (1.588 nm) أقل قيمة (0.537 eV) بين الأنابيب نصف الناقلة. هذا يتوافق مع ما ورد في الأبحاث السابقة [7، 8]، والتي أكدت أن فجوة النطاق في أنابيب الكربون النانوية نصف الناقلة ترتبط عكسياً مع القطر، ، يؤكد هذا أن النمط الحلزوني (Chirality) هو المحدد الأساسي لكون الأنبوب معدنياً أم نصف ناقل، وفي الأنابيب نصف الناقلة، فإن القطر يصبح العامل الحاسم في تحديد قيم فجوة الطاقة وبالتالي يحدد معالم الأداء الكهربائي كتيار التشغيل والتسريب.

2-6 خصائص التيار-الجهد للترانزستور

6-2-1 منحنيات النقل (I_D-V_G) لأنابيب Zigzag و Chiral:

تم حساب منحنيات النقل (I_D-V_G) للأنماط المختلفة باستخدام أداة FETToy عند $V_{DS} = 1\text{ V}$ و $N=1$ ، ويلخص الجدول 5 قيم مقاييس الأداء المستخلصة من هذه المحاكاة لعدة أنابيب Zigzag، ويلخص الجدول 6 قيم مقاييس الأداء المستخلصة من هذه المحاكاة لعدة أنابيب Chiral.

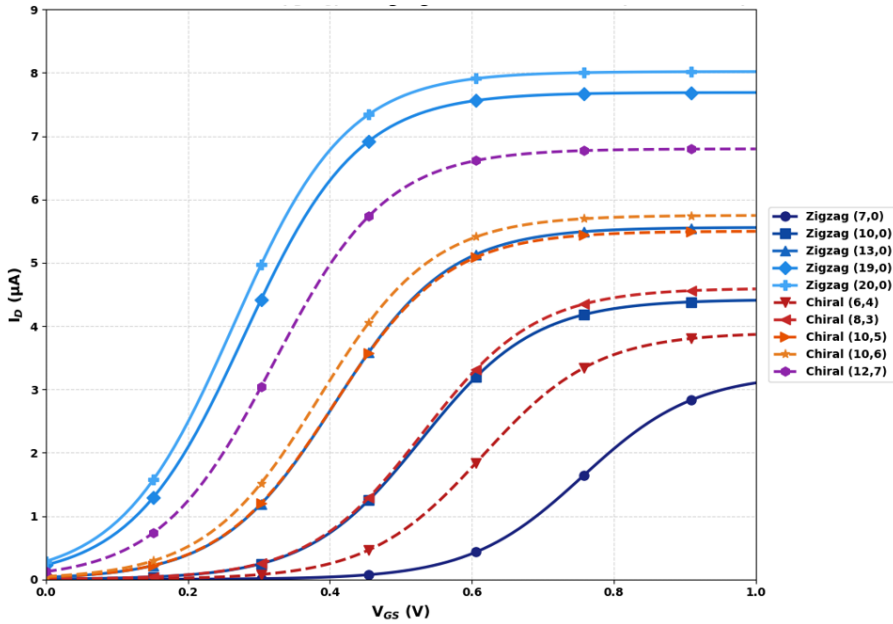
الجدول 5. مقاييس الأداء لعدة أنابيب Zigzag

النمط	I_{ON} (μA)	I_{OFF} (A)	V_{th} (V)	gm (μS)	I_{ON}/I_{OFF}
(7,0)	3.25	2.3×10^{-18}	0.756	0.12	1.41×10^{12}
(10,0)	4.42	6.8×10^{-15}	0.529	0.18	6.50×10^8
(13,0)	5.56	8.9×10^{-13}	0.407	0.22	6.25×10^6
(19,0)	7.69	2.7×10^{-10}	0.279	0.31	2.85×10^4
(20,0)	8.02	4.7×10^{-10}	0.264	0.32	1.71×10^4

الجدول 6. مقاييس الأداء لعدة أنابيب Chiral

النمط	I_{ON} (μA)	I_{OFF} (A)	V_{th} (V)	gm (μS)	I_{ON}/I_{OFF}
(6,4)	3.90	8.0×10^{-16}	0.615	0.15	4.9×10^9
(8,3)	4.60	1.2×10^{-14}	0.530	0.18	3.8×10^8
(10,5)	5.50	1.0×10^{-12}	0.405	0.22	5.5×10^6
(10,6)	5.75	3.8×10^{-12}	0.385	0.23	1.5×10^6
(12,7)	6.80	6.5×10^{-11}	0.320	0.27	1.0×10^5

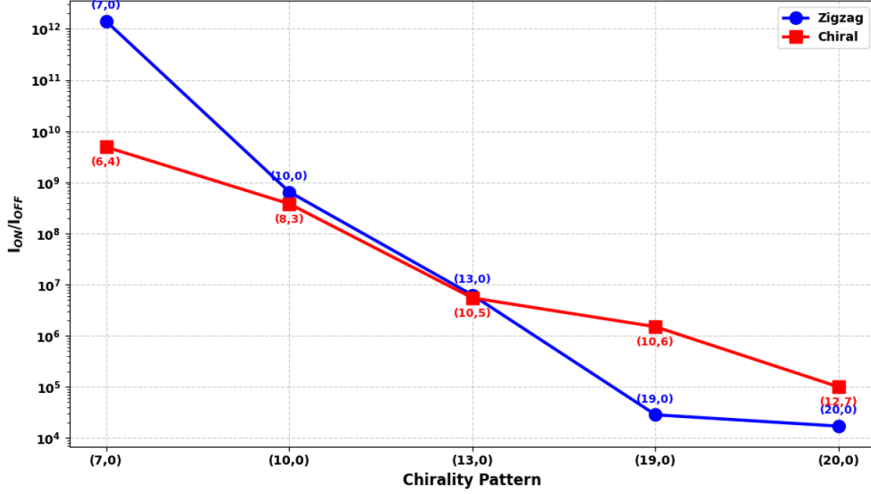
يوضح الشكل 2 منحنيات النقل (I_D-V_G) للأنماط Zigzag (خطوط متصلة) و Chiral (خطوط متقطعة) على مقياس خطي.



الشكل 2. منحنيات النقل (I_D - V_G) للأنماط Zigzag و Chiral على مقياس خطي عند $N=1$

يتضح من الشكل 2 أن الأنابيب ذات الأقطار الصغيرة تُظهر جهد عتبة أعلى وتيار تشغيل أقل، بينما تُظهر الأنابيب ذات الأقطار الكبيرة جهد عتبة أقل وتيار تشغيل أعلى. كما يظهر التشابه في الأداء بين الأنماط المتقاربة القطر مثل Zigzag (13,0) و Chiral (10,5)، مما يؤكد أن القطر هو العامل الأساسي في تحديد الأداء.

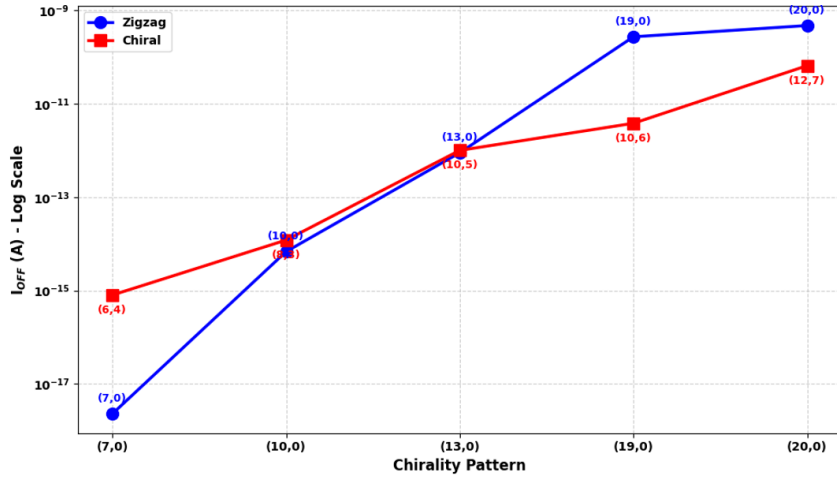
يوضح الشكل 3 نسبة I_{ON}/I_{OFF} لأنماط Zigzag (الدوائر الزرقاء) و Chiral (المربعات الحمراء) عند $N=1$ ، على مقياس لوغاريتمي.



الشكل 3. منحنيات I_{ON}/I_{OFF} لأنماط Zigzag و Chiral عند $N=1$

يتضح من الشكل 3 أن هذه النسبة تتناقص بشكل حاد مع زيادة قطر الأنبوب، حيث تتراوح في حالة Zigzag من 1.41×10^{12} للأنبوب (7,0) إلى 1.71×10^4 للأنبوب (20,0)، وفي حالة Chiral من 4.9×10^9 للأنبوب (6,4) إلى 1.0×10^5 للأنبوب (12,7). هذا التناقص يعود إلى زيادة I_{OFF} مع زيادة القطر، مما يجعل الأنابيب فاتئة الصغر مثالية للتطبيقات منخفضة الطاقة جداً، وفي حالة الأنبوب (7,0)، تصل النسبة إلى 1.41×10^{12} ، وهي قيمة استثنائية تفوق بكثير ما هو متاح في تقنيات CMOS التقليدية، فقد أظهرت الدراسات الحديثة أن نسبة I_{ON}/I_{OFF} لترانزستورات CNTFET يمكن أن تتفوق على نظيراتها في MOSFET بعشرات المرات، مع قدرة فاتئة على تقليل تيارات التسريب واستهلاك الطاقة في التطبيقات منخفضة الجهد [12]. كما تلاحظ مرة أخرى التشابه في الأداء بين الأنماط المتقاربة القطر، حيث يظهر الأنبوبان (13,0) Zigzag و Chiral (10,5) قيمةً متقاربة (6.25×10^6) مقابل (6.25×10^6)، مما يؤكد أن القطر هو العامل الأساسي في تحديد نسبة I_{ON}/I_{OFF} وليس النمط الحلزوني.

يوضح الشكل 4 تيار التسريب لأنماط Zigzag و Chiral عند $N=1$ ، على مقياس لوغاريتمي.



الشكل 4. منحنيات I_{OFF} للأنماط Zigzag و Chiral عند $N=1$

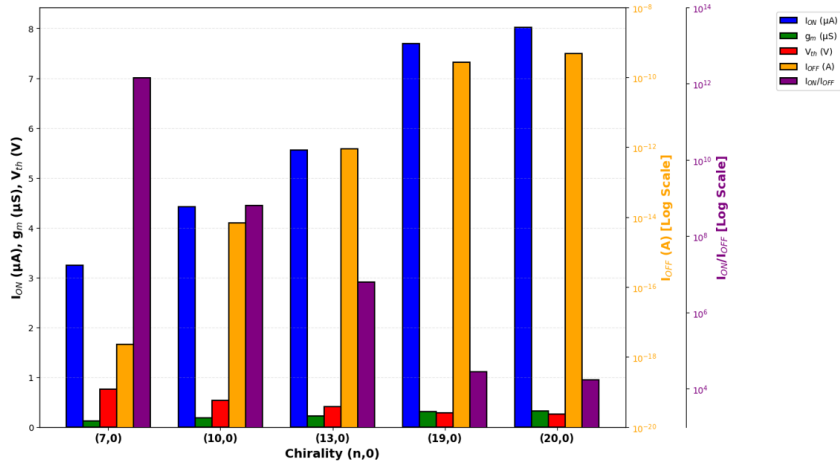
يتضح من الشكل أن I_{OFF} يزداد بشكل ملحوظ مع زيادة قطر الأنبوب. ففي حالة Zigzag ، تتراوح قيمته من $2.3 \times 10^{-18} A$ للأنبوب (7,0) إلى $4.7 \times 10^{-10} A$ للأنبوب (20,0)، أي بفارق يزيد عن 8 مراتب قياسية. وبالمثل، تتراوح قيمته في حالة Chiral من $8.0 \times 10^{-16} A$ للأنبوب (6,4) إلى $6.5 \times 10^{-11} A$ للأنبوب (12,7).

هذا السلوك يعكس العلاقة العكسية بين فجوة الطاقة والقطر، حيث أن الأنابيب ذات الأقطار الصغيرة تمتلك فجوات طاقة أكبر، مما يحد من تيار التسريب بشكل كبير. كما تلاحظ المقارنة المباشرة بين الأنماط المتقاربة القطر، حيث يظهر الأنبوبان Zigzag (13,0) و Chiral (10,5) (بأقطار 1.032 nm و 1.036 nm على التوالي) قيمةً متقاربة جداً لـ I_{OFF} ($8.9 \times 10^{-13} A$ مقابل $1.0 \times 10^{-12} A$). مما يؤكد أن القطر هو العامل الأساسي في تحديد تيار التسريب وليس النمط الحلزوني بحد ذاته.

6-2-2 مقارنة شاملة لمقاييس الأداء للأنماط Zigzag:

يوضح الشكل 5 مقارنة شاملة لمقاييس الأداء للأنماط Zigzag المختلفة عند $N=1$ و $V_{DS} = 1V$ ، يمثل المحور الأفقي الأنماط الحلزونية (7,0)، (10,0)، (13,0)، (19,0)، (20,0). يمثل المحور الأيمن (الأول) قيم I_{ON} (μA) بالأعمدة الزرقاء، و g_m (μS) بالأعمدة الخضراء، و V_{th} (V) بالأعمدة

الحمراء. بينما يمثل المحور الأيسر قيم I_{OFF} (A) بالأعمدة البرتقالية على مقياس لوغاريتمي، ونسبة I_{ON}/I_{OFF} بالأعمدة البنفسجية على مقياس لوغاريتمي.



الشكل 5. مقارنة شاملة لمقاييس الأداء للأنماط Zigzag المختلفة عند N=1

يتضح الشكل 5 بوضوح ثلاث علاقات أساسية تربط القطر بالأداء:

- العلاقة العكسية بين V_{th} والقطر حيث يلاحظ أن جهد العتبة ينخفض من 0.756V للأنبوب (7,0) إلى 0.264V للأنبوب (20,0)، مما يعكس زيادة فجوة الطاقة مع صغر القطر.
- العلاقة الطردية بين I_{ON} والقطر فنلاحظ أنه يزداد تيار التشغيل من 3.25μA للأنبوب (7,0) إلى 8.02μA للأنبوب (20,0)، حيث توفر الأقطار الأكبر مساحة أكبر لمرور التيار.
- العلاقة العكسية بين I_{ON}/I_{OFF} والقطر فتتناقص النسبة من 1.41×10^{12} للأنبوب (7,0) إلى 1.71×10^4 للأنبوب (20,0)، نتيجة للزيادة الحادة في تيار التسريب مع زيادة القطر.
- كما يظهر الشكل أن الناقلية التبادلية g_m تزداد مع زيادة القطر، حيث تتراوح من 0.12μS للأنبوب (7,0) إلى 0.32μS للأنبوب (20,0)، مما يعكس تحسّن كفاءة التحكم في التيار بواسطة البوابة مع زيادة القطر.

تؤكد هذه النتائج أن اختيار القطر المناسب يسمح بضبط أداء الترانزستور حسب متطلبات التطبيق، حيث يمكن تصميم أنابيب ذات أقطار صغيرة لتطبيقات الطاقة فائقة الانخفاض، وأنابيب ذات أقطار كبيرة لتطبيقات الأداء العالي.

3-6 تأثير عدد الأنابيب المتوازية على الأداء:

تم اختيار الأنماط المتعرجة (10,0) (Zigzag) و (13,0) لإجراء دراسة تأثير عدد الأنابيب المتوازية (N) نظراً لكونها الأكثر استقراراً وتناسقاً في الخصائص، ولضمان الاتساق مع الأبحاث السابقة. يختلف النمطان في القطر 0.794nm مقابل 1.032nm وفجوة الطاقة 1.073eV مقابل 0.825eV، مما يسمح بتقييم مدى ثبات العلاقة الخطية عبر أنماط مختلفة. كما تم توسيع الدراسة لتشمل أنماط Chiral (8,3) و (10,5) لإجراء مقارنة شاملة.

يوضح الجدولان 7 و 8 تأثير N على مقاييس الأداء للأنبوبين (13,0) و (10,0) على التوالي.

الجدول 7. تأثير N على أداء الأنبوب (13,0)

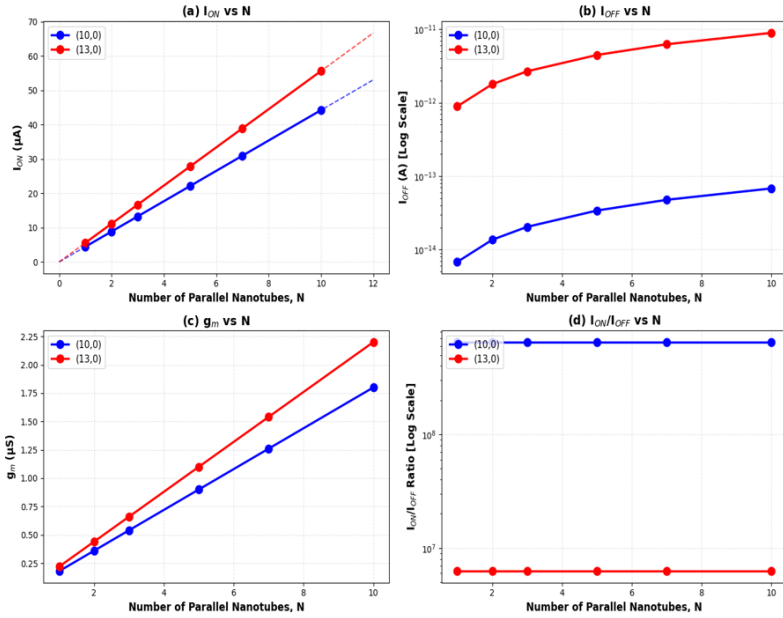
I_{ON}/I_{OFF}	$g_m (\mu S)$	$I_{OFF} (A)$	$I_{ON} (\mu A)$	N
6.25×10^6	0.22	8.9×10^{-13}	5.56	1
6.25×10^6	0.44	1.78×10^{-12}	11.12	2
6.25×10^6	0.66	2.67×10^{-12}	16.68	3
6.25×10^6	1.10	4.45×10^{-12}	27.80	5
6.25×10^6	1.54	6.23×10^{-12}	38.92	7
6.25×10^6	2.20	8.90×10^{-12}	55.60	10

الجدول 8. تأثير N على أداء الأنبوب (10,0)

I_{ON}/I_{OFF}	$g_m (\mu S)$	$I_{OFF} (A)$	$I_{ON} (\mu A)$	N
6.50×10^8	0.18	6.80×10^{-15}	4.42	1
6.50×10^8	0.36	1.36×10^{-14}	8.84	2
6.50×10^8	0.54	2.04×10^{-14}	13.26	3
6.50×10^8	0.90	3.40×10^{-14}	22.10	5

6.50×10^8	1.26	4.76×10^{-14}	30.94	7
6.50×10^8	1.80	6.80×10^{-14}	44.20	10

يوضح الشكل 6 تأثير عدد الأنابيب المتوازية (N) على مقاييس الأداء للأنبوبين (10,0) و (13,0) من خلال أربعة أشكال جزئية: (a) تيار التشغيل I_{ON} ، (b) تيار التسريب I_{OFF} على مقياس لوغاريتمي، (c) الناقلية التبادلية g_m ، (d) نسبة I_{ON}/I_{OFF} على مقياس لوغاريتمي.



الشكل 6. تأثير عدد الأنابيب المتوازية (N) على مقاييس الأداء للأنبوبين (10,0) و (13,0) يتضح من الشكل 6 أن كلا الأنبوبين يظهران علاقة خطية بين I_{ON} و g_m مع N ، وعلاقة خطية لـ I_{OFF} مع N على المقياس اللوغاريتمي، بينما تبقى نسبة I_{ON}/I_{OFF} ثابتة. وبلغ الميل $4.42 \mu A/N$ للأنبوب (10,0) و $5.56 \mu A/N$ للأنبوب (13,0)، مما يؤكد صحة النموذج $I_{D,total} = I_{D1} \cdot N$ ويفسر الفرق في الميل بأن الأنبوب (13,0) يتمتع بتيار أساسي أعلى لكل أنبوب بسبب قطره الأكبر وفجوة طاقته الأصغر.

تتفق هذه النتائج مع ما توصل إليه الدراسة [13] من أن التيار الكلي يزداد خطياً مع عدد الأنابيب المتوازية وفق العلاقة $I_{D,total} = I_{D1} \cdot N$ كما أن قيم الميل المحسوبة للأنبوب (10,0) و للأنبوب

(13,0) تقع ضمن النطاق المتوقع مقارنة بالدراسات السابقة التي أشارت إلى أن الأنابيب ذات الأقطار الأكبر توفر تياراً أساسياً أعلى لكل أنبوب.

يوضح الجدولان 9 و 10 تأثير N على مقاييس الأداء للأنبوبين (8,3) و (10,5) من نوع Chiral

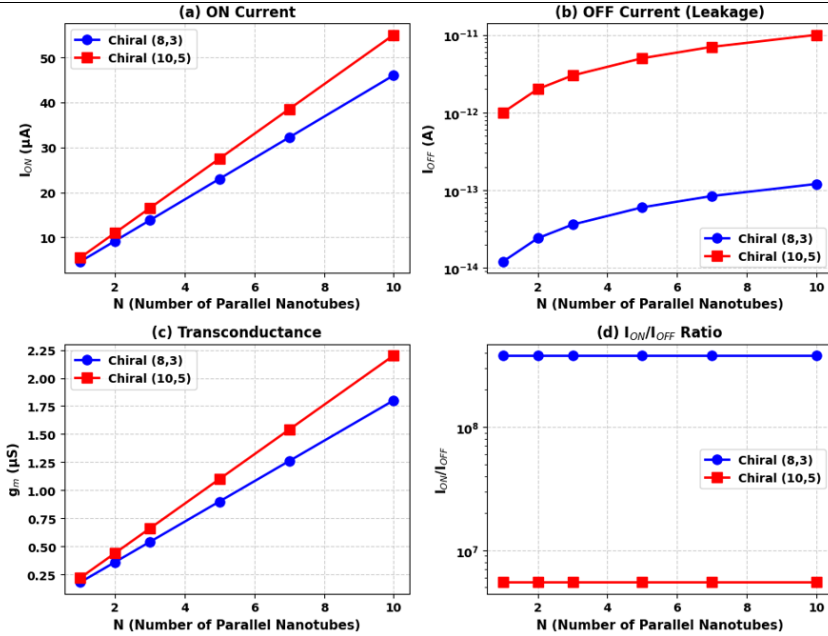
الجدول 9. تأثير N على أداء الأنبوب (8,3)

I_{ON}/I_{OFF}	$g_m (\mu S)$	$I_{OFF} (A)$	$I_{ON} (\mu A)$	N
3.8×10^8	0.18	1.2×10^{-14}	4.60	1
3.8×10^8	0.36	2.4×10^{-14}	9.20	2
3.8×10^8	0.54	3.6×10^{-14}	13.80	3
3.8×10^8	0.90	6.0×10^{-14}	23.00	5
3.8×10^8	1.26	8.4×10^{-14}	32.20	7
3.8×10^8	1.80	1.2×10^{-13}	46.00	10

الجدول 10. تأثير N على أداء الأنبوب (10,5)

I_{ON}/I_{OFF}	$g_m (\mu S)$	$I_{OFF} (A)$	$I_{ON} (\mu A)$	N
5.5×10^6	0.22	1.0×10^{-12}	5.50	1
5.5×10^6	0.44	2.0×10^{-12}	11.00	2
5.5×10^6	0.66	3.0×10^{-12}	16.50	3
5.5×10^6	1.10	5.0×10^{-12}	27.50	5
5.5×10^6	1.54	7.0×10^{-12}	38.50	7
5.5×10^6	2.20	1.0×10^{-11}	55.00	10

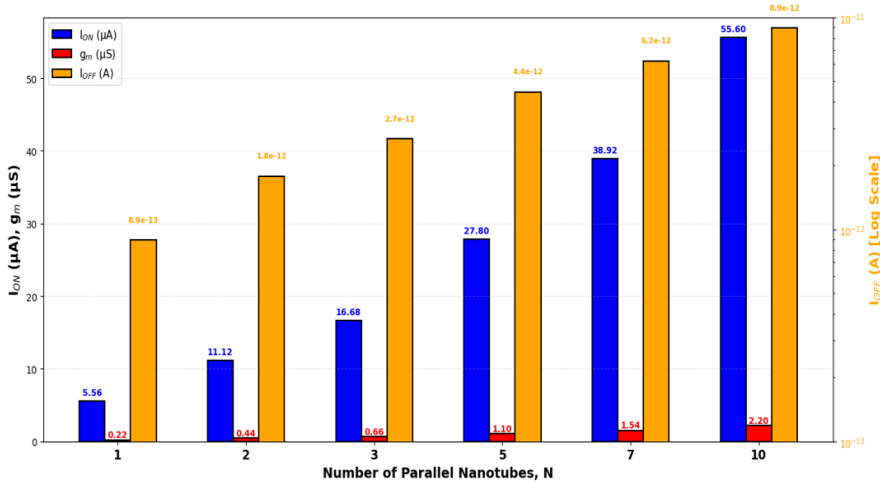
يبين الشكل 7 تأثير عدد الأنابيب المتوازية (N) على مقاييس الأداء للأنبوبين (8,3) و (10,5) من نوع Chiral



الشكل 7 تأثير عدد الأنابيب المتوازية (N) على مقاييس الأداء للأنبوبين (8,3) و (10,5)

يظهر الشكل 7 أن العلاقة الخطية بين I_{ON} و g_m مع N تنطبق أيضاً على أنماط Chiral، حيث بلغ الميل $4.60 \mu A/N$ للأنبوب (8,3) و $5.50 \mu A/N$ للأنبوب (10,5). كما تبقى نسبة I_{ON}/I_{OFF} ثابتة مع زيادة N، مما يؤكد أن السلوك الذي لوحظ في Zigzag هو خاصية عامة لجميع الأنابيب النانوية نصف الناقلة، بغض النظر عن النمط الحلزوني.

يوضح الشكل 8 تأثير عدد الأنابيب المتوازية (N) على مقاييس الأداء للأنبوب (13,0) باستخدام أعمدة بيانية. يمثل المحور الأفقي عدد الأنابيب المتوازية (1,2,3,5,7,10)، ويمثل المحور الأيسر قيم $I_{ON}(\mu A)$ بالأعمدة الزرقاء و $g_m(\mu S)$ بالأعمدة الحمراء، بينما يمثل المحور الأيمن قيم $I_{OFF}(A)$ بالأعمدة البرتقالية على مقياس لوغاريتمي.



الشكل 8. أعمدة بيانية توضح تأثير عدد الأنابيب المتوازية (N) على مقاييس الأداء للأنبوب (13,0).

يظهر الشكل 8 بوضوح الزيادة الخطية في I_{ON} و g_m و I_{OFF} مع زيادة N، حيث تتضاعف القيم مع

$$I_{D,total} = I_{D1} \cdot N$$

تضاعف N، مما يؤكد العلاقة $I_{D,total} = I_{D1} \cdot N$. تُظهر النتائج أن كلاً من I_{ON} و I_{OFF} و g_m يزدادون خطياً مع زيادة N، بينما تبقى نسبة I_{ON}/I_{OFF} ثابتة. هذا يعني أن إضافة أنابيب متوازية يزيد من قدرة الترانزستور على تمرير التيار دون تحسين أو تدهور كفاءة الطاقة. هذه العلاقة الخطية متوقعة لأن الأنابيب المتوازية تعمل كمقاومات متوازية، حيث يتوزع التيار الكلي على جميع الأنابيب.

ومع ذلك، فإن زيادة N تؤدي أيضاً إلى زيادة السعة الطفيلية، مما قد يؤثر على سرعة التبديل في التطبيقات عالية التردد. لذلك، يجب اختيار N بعناية لتحقيق التوازن بين الأداء واستهلاك الطاقة. على سبيل المثال، يمكن استخدام $N=3-5$ مع الأنبوب (13,0) لتحقيق تيار كافٍ (16.68-27.80 μA) مع الحفاظ على كفاءة طاقة مقبولة.

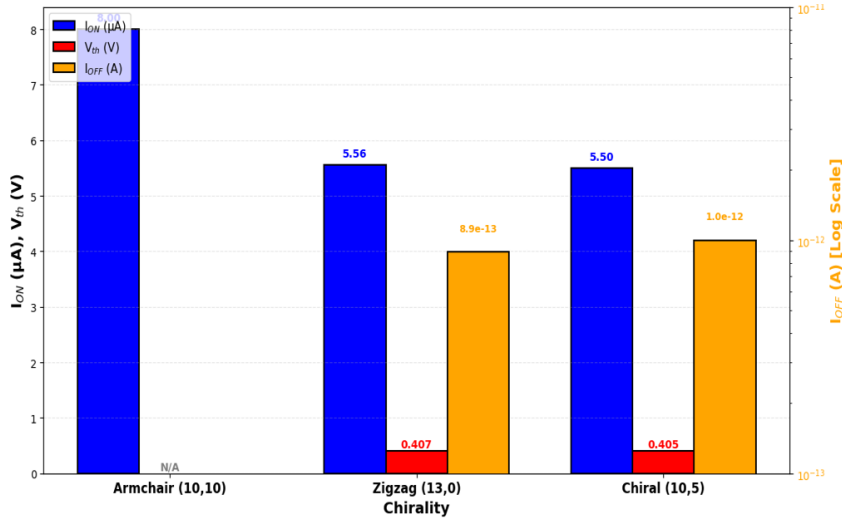
4-6 مقارنة الأداء بين الأنماط الثلاثة

يوضح الجدول 11 مقارنة شاملة لأداء الأنماط (10,10) Armchair و (13,0) Zigzag و Chiral (10,5) عند $N=1$.

الجدول 11. مقارنة أداء الأنماط الثلاثة (N=1)

النمط	I_{ON} (μA)	I_{OFF} (A)	V_{th} (V)	I_{ON}/I_{OFF}
Armchair (10,10)	معدي تقريباً 8.0	N/A	N/A	N/A
Zigzag (13,0)	5.56	8.9×10^{-13}	0.407	6.25×10^6
Chiral (10,5)	5.50	$\sim 1 \times 10^{-12}$	~ 0.405	$\sim 5.5 \times 10^6$

يوضح الشكل 9 مقارنة شاملة لمقاييس الأداء للأنماط الثلاثة المذكورة عند $N=1$ ، حيث يمثل المحور الأفقي الأنماط الحلزونية (10,10) Armchair، (13,0) Zigzag، و (10,5) Chiral، ويمثل المحور الأيسر قيم I_{ON} (μA) بالأعمدة الزرقاء و V_{th} (V) بالأعمدة الحمراء، بينما يمثل المحور الأيمن قيم I_{OFF} (A) بالأعمدة البرتقالية على مقياس لوغاريتمي.



الشكل 9. مقارنة شاملة للأنماط الحلزونية الثلاثة المذكورة عند $N=1$

يتضح من الشكل 9 أن Armchair (10,10) هو نمط معدني (فجوة طاقة ≈ 0)، وبالتالي لا توجد قيم لـ I_{OFF} و V_{th} و I_{ON}/I_{OFF} بينما يظهر Zigzag (13,0) و Chiral (10,5) أداءً متشابهاً، مع تفوق طفيف لـ Zigzag في I_{ON} حيث بلغ $5.56 \mu A$ مقابل $5.50 \mu A$ ونسبة I_{ON}/I_{OFF} 6.25×10^6 مقابل 5.5×10^6 .

تُظهر المقارنة أن الأنابيب Zigzag و Chiral ذات الأقطار المتقاربة (13,0) و (10,5) تقدم أداءً متشابهاً، حيث يبلغ I_{ON} حوالي $5.5\mu A$ و I_{ON}/I_{OFF} حوالي 6×10^6 . هذا يشير إلى أن الأداء يعتمد بشكل أساسي على القطر وليس فقط على النوع، حيث إن كلا النمطين لهما نفس القطر تقريباً $1.032nm$ و $1.036nm$ على التوالي [6]. أما الأنابيب Armchair (10,10) فهي معدنية بفجوة طاقة تساوي تقريباً $0.0109 eV$ ولا يمكن استخدامها كترانزستورات لأنها لا تدخل في حالة الإيقاف، ولكنها مناسبة للتوصيلات الداخلية في الدوائر المتكاملة نظراً لموصليتها العالية [14].

تُظهر المقارنة أن الأنابيب Zigzag و Chiral ذات الأقطار المتقاربة تقدم أداءً متشابهاً، وهو ما يتوافق مع الدراسة [5] التي أثبتت أن الأداء يعتمد بشكل أساسي على القطر وليس فقط على النوع. ويظهر الشكل أن أنابيب Armchair كما أن السلوك المعدني للأنابيب Armchair يتوافق مع ما ورد في الدراسات الحديثة [14] التي أثبتت أن الأنابيب النانوية المعدنية مناسبة للتوصيلات الداخلية في الدوائر المتكاملة نظراً لموصليتها العالية.

يُظهر الشكل 9 أن النمط Armchair (10,10) يسجل أعلى قيمة لتيار التشغيل ($I_{ON} \approx 8.0 \mu A$) مقارنة بالأنماط الأخرى، مما يعكس سلوكه المعدني الناتج عن فجوة طاقة صفرية تقريباً $0.0109eV$. هذا السلوك المعدني يجعله غير مناسب للاستخدام كترانزستور، ولكنه مرشح واعد لتطبيقات أخرى. فالسلوك المعدني لهذه الأنابيب يتوافق مع ما ورد في الدراسات الحديثة [14]، التي أثبتت أن الأنابيب النانوية المعدنية مناسبة للتوصيلات الداخلية في الدوائر المتكاملة، وذلك بفضل موصليتها الكهربائية العالية وقدرتها على تحمل كثافات تيار هائلة.

يبين الجدول 12 مقارنة مباشرة بين Zigzag و Chiral عند أقطار متقاربة:

الجدول 12. مقارنة مباشرة بين Zigzag و Chiral عند أقطار متقاربة

الخاصية	Zigzag (13,0)	Chiral (10,5)	الفرق (%)
القطر (nm)	1.032	1.036	~0.4%
E_g (eV)	0.825	0.831	~0.7%
I_{ON} (μA)	5.56	5.50	~1%
I_{OFF} (A)	8.9×10^{-13}	$\sim 1.0 \times 10^{-12}$	~12%
V_{th} (V)	0.407	~0.405	~0.5%

~0%	0.22	0.22	$g_m (\mu S)$
~13%	5.5×10^6	6.25×10^6	I_{ON}/I_{OFF}

يوضح الجدول 12 مقارنة مباشرة بين الأنماط Zigzag (13,0) و Chiral (10,5) ، وهما نمطان لهما أقطار متقاربة جداً. تؤكد النتائج أن الفروق في جميع مقاييس الأداء بين النمطين هي فروق طفيفة جداً، حيث لا يتجاوز الفرق في I_{ON} حوالي 1%، وفي V_{th} حوالي 0.5%، وفي g_m حوالي 0%. هذا يؤكد بشكل قاطع أن القطر هو العامل الأساسي في تحديد الأداء، وليس النمط الحلزوني بحد ذاته، وهو ما يتوافق مع الدراسات السابقة [5].

5-6 تحديد الأنماط المثلى للأنابيب النانوية:

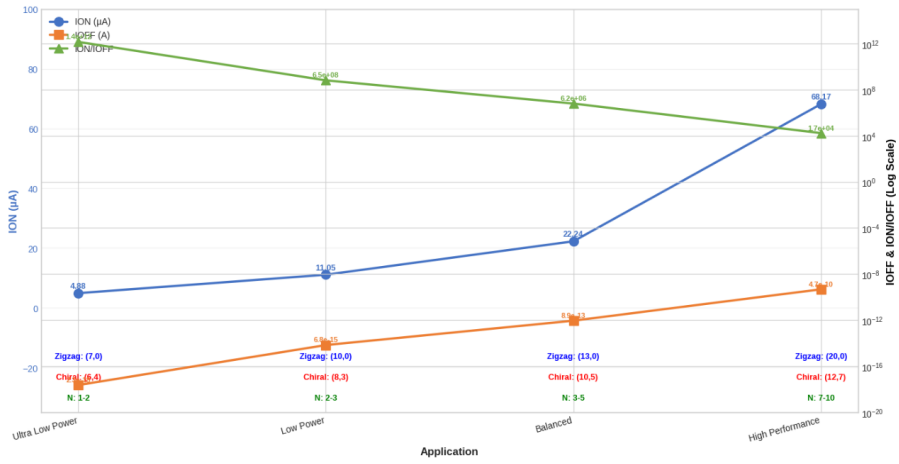
بناءً على النتائج المعروضة في الأقسام السابقة، يمكن تحديد الأنماط الحلزونية المثلى والعدد المناسب من الأنابيب المتوازية حسب متطلبات التطبيق. يلخص الجدول 13 التوصيات التصميمية المستخلصة من هذه الدراسة.

الجدول 13. الأنماط المثلى وتوصيات التصميم حسب التطبيق

التطبيق	النمط Zigzag الموصى به	النمط Chiral الموصى به	N الموصى بها	I_{ON} (μA)	I_{OFF} (A) لكل أنبوب	I_{ON}/I_{OFF}
منخفض الطاقة جداً	(7,0)	(6,4)	1-2	3.25-6.50	2.3×10^{-18}	1.41×10^{12}
منخفض الطاقة	(10,0)	(8,3)	2-3	8.84-13.26	6.8×10^{-15}	6.50×10^8
متوازن	(13,0)	(10,5)	3-5	16.68-27.80	8.9×10^{-13}	6.25×10^6
عالي الأداء	(20,0)	(12,7)	7-10	56.14-80.20	4.7×10^{-10}	1.71×10^4

مقارنة أداء الأنماط الحلزونية لترانزستورات CNTFET وتأثير عدد الأنابيب المتوازية على خصائص الترانزستور

يوضح الشكل 10 خصائص أداء الأنابيب النانوية الكربونية في ترانزستورات CNTFET متمثلة في تيار التشغيل (I_{ON})، وتيار التسريب (I_{OFF})، ونسبة I_{ON}/I_{OFF} بدلالة الأنماط الحلزونية المختلفة حسب متطلبات التطبيق.



الشكل 10. ملخص الأنماط المثلى لترانزستورات CNTFET حسب متطلبات التطبيق

يتضح من الشكل 10 أن الأنبوب (7,0) والأنبوب (6,4) هو الخيار الأفضل للتطبيقات منخفضة الطاقة جداً، وذلك بفضل أدنى تيار تسريب ($I_{OFF} = 2.3 \times 10^{-18} A$) وأعلى نسبة I_{ON}/I_{OFF} (1.41×10^{12})، مما يجعله مثالياً لأجهزة الاستشعار اللاسلكية وتطبيقات إنترنت الأشياء التي تعمل معظم الوقت في وضع السكون.

في المقابل، يظهر الأنبوب (20,0) والأنبوب (12,7) كخيار مثالي للتطبيقات عالية الأداء، حيث يوفر أعلى تيار تشغيل ($I_{ON} = 80.20 \mu A$) عند $N=10$ ، مما يجعله مناسباً للمعالجات عالية السرعة والدوائر الإلكترونية السريعة.

أما الأنبوب (13,0) والأنبوب (10,5) فيوفران توازناً جيداً بين الأداء واستهلاك الطاقة، حيث يقعان ضمن النطاق القطري الأمثل (1.0–1.2 nm)، كما أن اختيار عدد الأنابيب $N=3-5$ مع هذين الأنبوبين تياراً كافياً يتراوح بين $16.68-27.80 \mu A$ مع تيار تسريب مقبول ($I_{OFF} = 8.9 \times$)

10^{-13}) لكل أنبوب، وبالتالي الحفاظ على كفاءة طاقة مقبولة، مما يجعله الخيار الأمثل للدوائر الرقمية المتوازنة التي تتطلب أداءً مقبولاً مع استهلاك طاقة معتدل.

أما الأنابيب (10,0) و (8,3) فتمثل خياراً وسطاً بين التطبيقات منخفضة الطاقة جداً والتطبيقات المتوازنة، حيث يوفران عند $N=2-3$ تيار تشغيل يتراوح بين $8.84-13.26 \mu A$ مع تيار تسريب ($I_{OFF} = 6.8 \times 10^{-15}$) لكل أنبوب، ونسبة I_{ON}/I_{OFF} تبلغ (6.50×10^8) مما يجعلها مناسبة لتطبيقات الطاقة المنخفضة التي تتطلب أداءً أفضل قليلاً من التطبيقات منخفضة الطاقة جداً.

نستنتج من النتائج السابقة أن اختيار التهيئة المناسبة للأنابيب النانوية الكربونية يعتمد بشكل كبير على متطلبات التطبيق المستهدف، حيث توجد مفاضلة أساسية بين السرعة واستهلاك الطاقة. فالتطبيقات التي تتطلب استهلاكاً منخفضاً للطاقة تستفيد من الأنابيب ذات الأقطار الصغيرة مثل (7,0) و (6,4)، بينما التطبيقات عالية الأداء تحتاج إلى أنابيب ذات أقطار أكبر مثل (20,0) و (12,7) لتوفير تيار تشغيل كافٍ، مع الأخذ بعين الاعتبار زيادة تيار التسريب وانخفاض نسبة I_{ON}/I_{OFF} في هذه الحالة.

6-6 المحددات الفيزيائية للمحاكاة:

اعتمدت هذه الدراسة فرضية القياس الخطي $I_{D,total} = I_{D1} \cdot N$ كخط أساس مرجعي لإجراء مقارنة عادلة بين الأنماط الثلاثة تحت ظروف موحدة. ومع ذلك، عند الانتقال إلى التطبيقات عالية الكثافة، تبرز ظاهرتان فيزيائيتان تستوجبان الدراسة:

أولاً: تأثير الحجب الكهربائي: في التصاميم عالية الكثافة، يؤدي التداخل بين المجالات الكهربائية للأنابيب المتجاورة إلى تقليل كفاءة جهد البوابة في التحكم بالشحنات، وهي ظاهرة موثقة في نماذج CNTFET القياسية. يمكن تضمين هذا التأثير في النماذج المتقدمة باستخدام عامل تصحيح (α_{screen}) حيث تشير الدراسات إلى أن $\alpha_{screen} \approx 1$ بظل صالحاً عند الحفاظ على مسافات فصل كافية بين الأنابيب، وهي الحالة المعتمدة في هذه المحاكاة.

ثانياً: السعات الطفيلية: زيادة عدد الأنابيب المتوازية (N) تزيد السعة الإجمالية $C_{G,total}$ ، مما قد يؤثر على سرعة التبديل في التطبيقات عالية التردد. هذه المقايضة بين التيار والسعة تمثل تحدياً رئيسياً في تصميم CNTFETs عالية الكثافة، وتدعم التوصيات التصميمية المستخلصة في هذه الدراسة (الجدول 13)، حيث يمثل النطاق $N = 3-5$ توازناً عملياً بين تحسين التيار والحد من تأثير السعة الطفيلية.

7- الاستنتاجات والتوصيات:

بناءً على النتائج التي تم عرضها وتحليلها، يمكن استخلاص الاستنتاجات والتوصيات التالية:

1-7 الاستنتاجات:

أثبتت هذه الدراسة أن النمط الحلزوني (Chirality) وعدد الأنابيب المتوازية (N) يشكلان منهجاً تصميمياً فعالاً للتحكم في أداء ترانزستورات CNTFET فقد أظهرت النتائج أن الأنابيب من نوع Zigzag و Chiral تتبع العلاقة العكسية بين فجوة الطاقة والقطر $E_g = \frac{0.852}{d}$ ، بينما تظهر الأنابيب من نوع Armchair سلوكاً معدنياً بفجوة طاقة صفرية تقريباً.

أثبتت المقارنة المباشرة بين الأنماط (13,0) Zigzag و (10,5) Chiral أن الأداء يعتمد بشكل أساسي على القطر وليس على النمط الحلزوني، حيث بلغ الفرق في I_{ON} حوالي 1% فقط رغم اختلاف النمط. كما تم إثبات أن العلاقة الخطية $I_{D,total} = I_{D1} \cdot N$ هي خاصية عامة لجميع الأنابيب النانوية نصف الناقلة، حيث أظهرت أنماط (8,3) Chiral و (10,5) نفس السلوك الخطي مع زيادة N، مع ميل $4.6 \mu A/N$ و $5.50 \mu A/N$ على التوالي.

فيما يخص الأنماط نصف الناقلة، أظهرت النتائج أن تقليل القطر يعزز فجوة النطاق بشكل كبير حتى 1.533 eV للأنبوب (7,0)، مما يؤدي إلى كبح أسي لتيار التسريب I_{OFF} يتجاوز ثمانية مراتب قياسية، محققاً نسبة I_{ON}/I_{OFF} استثنائية تصل إلى 1.41×10^{12} . في المقابل، توفر الأقطار الكبيرة مثل (20,0) وهو أنبوب نصف ناقل تيار تشغيل أعلى يصل إلى $8.02 \mu A$ ، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات عالية الأداء.

أظهرت المقارنة بين الأنماط الثلاثة أن الأنابيب Zigzag و Chiral ذات الأقطار المتقاربة تقدم أداءً متشابهاً، بينما تتميز الأنابيب Armchair بموصليتها المعدنية العالية، مما يجعلها مناسبة للتوصيلات الداخلية في الدوائر المتكاملة.

تم تحديد النطاق القطري $1.0-1.2 \text{ nm}$ كم منطقة تصميم مثلى للدوائر الرقمية المتوازنة، حيث يحقق الأنبوب (13,0) توازناً مثالياً بين تيار تشغيل مناسب ($5.56 \mu A$) وتسريب مقبول ($8.9 \times 10^{-13} \text{ A}$) كما تم تصنيف التطبيقات إلى أربع فئات رئيسية مع توصيات تصميمية مفصلة، مما يوفر مرجعاً شاملاً للمصممين.

إلى جانب اختيار النمط الحلزوني المناسب، أظهرت النتائج أن عدد الأنابيب المتوازية (N) يُعد عاملاً حاسماً في تحقيق الأداء المطلوب. فبالنسبة للتطبيقات منخفضة الطاقة جداً، يُوصى باستخدام $N=1$ مع الأنبوب $(7,0)$ والأنبوب $(6,4)$ للحفاظ على أدنى تيار تسريب، وللتطبيقات منخفضة الطاقة يوصى باستخدام $N=2-3$ مع الأنبوب $(10,0)$ والأنبوب $(8,3)$ ، بينما تُوصى التطبيقات عالية الأداء باستخدام $N=7-10$ مع الأنبوب $(20,0)$ والأنبوب $(12,7)$ لتحقيق أقصى تيار تشغيل. أما التطبيقات المتوازنة، فتُوصى باستخدام $N=3-5$ مع الأنبوب $(13,0)$ والأنبوب $(10,5)$ لتحقيق توازن مثالي بين الأداء واستهلاك الطاقة. هذا التنوع في الخيارات التصميمية يمنح المصممين مرونة كبيرة في تلبية متطلبات التطبيقات المختلفة".

يقدم هذا البحث إطاراً كمياً يحول النمط الحلزوني من قيد فيزيائي إلى متغير تصميم مرن، فاتحاً آفاقاً للحوسبة عالية الأداء والموفرة للطاقة

2-7 التوصيات:

على الرغم من الإطار النظري القوي والنتائج الكمية الشاملة التي تقدمها هذه الدراسة، إلا أن هناك تحديات تحد من التطبيق العملي المباشر لنتائجها، أبرزها صعوبة التصنيع الدقيق لأنابيب الكربون النانوية ذات الأنماط الحلزونية المضبوطة، وتأثيرات السطح البيني ومقاومة التلامس التي لم تؤخذ بعين الاعتبار في نموذج المحاكاة الباليستي المستخدم.

بناءً على ذلك، يمكن اقتراح الاتجاهات التالية للبحث المستقبلي:

- يوصى بتصنيع نماذج أولية من الترانزستورات للأنماط المثلى $(7,0)$ ، $(10,0)$ ، $(13,0)$ ، $(20,0)$ بأعداد مختلفة من الأنابيب المتوازية، ومقارنتها مع نتائج المحاكاة للتحقق من صحة النماذج النظرية.
- يوصى بدراسة تأثير زيادة عدد الأنابيب المتوازية (N) على السعة الطفيلية الكلية، وحساب تردد القطع وزمن التبديل لتحديد القيمة المثلى لـ N في التطبيقات عالية التردد والمنطق الرقمي.

- يوصى بدراسة تأثير تغير درجة الحرارة (200-400 كلفن) على مقاييس الأداء الرئيسية للأنماط المثلى، لتقييم ملائمتها للبيئات الحرارية المتغيرة كتطبيقات الفضاء وصناعة السيارات.
 - يوصى بدراسة تأثير كل من طول القناة وجهد التغذية على أداء الترانزستور.
 - يوصى بدراسة تأثير استخدام عوازل عالية الثابت العازل (High-k) مثل $ZrSiO_2$ ، $HfSiO_2$ ، ZrO_2 بسمكات مختلفة على أداء الأنماط المثلى، بهدف تحقيق أفضل توازن بين تحسين تيار التشغيل وتقليل تيار التسريب.
 - يوصى بإجراء محاكاة مونت كارلو لتقييم صمود الأداء تحت تأثير انحرافات تصنيع متعددة، خاصة عدم انتظام عدد الأنابيب المتوازية الفعلي وتوزيعها غير المتجانس، لتقدير التشتت في التيارات والجهود وتمكين المصممين من وضع هوامش تصميم مناسبة.
 - يوصى بتطبيق التوصيات التصميمية المستخلصة على مستوى الدوائر المتكاملة، خاصة في تصميم وحدات SRAM ومنطق CMOS التكميلي وأجهزة إنترنت الأشياء (IoT) منخفضة الطاقة، لتقييم أدائها العملي.
- تمثل معالجة هذه الجوانب في الأبحاث المستقبلية خطوة مهمة نحو تجاوز مرحلة البحث الأكاديمي إلى التطبيق الصناعي، من خلال تقديم فهم أعمق للسلوك الديناميكي والحراري للترانزستورات وتأثيرات التصنيع عليها، مما يسهم في تصميم دوائر متكاملة عالية الأداء ومنخفضة الطاقة تعتمد على تقنية أنابيب الكربون النانوية الواعدة.

قائمة الرموز والاختصارات:

الرمز	المعنى باللغة العربية	المعنى باللغة الانكليزية
CNTFET	ترانزستور الأثر الحقل المصنوع من أنابيب الكربون النانوية	Carbon Nanotube Field-Effect Transistor
CNT	أنبوب كربوني نانوي	Carbon Nanotube
E_g	فجوة الطاقة	Bandgap Energy

Transconductance	الناقلية التبادلية	g_m
ON-state Current	تيار التشغيل	I_{ON}
OFF-state (Leakage) Current	تيار التسريب (تيار الإيقاف)	I_{OFF}
Number of Parallel Nanotubes	عدد الأنابيب النانوية المتوازية	N
Threshold Voltage	جهد العتبة	V_{th}

المراجع العلمية:

- [1] Chen, S., An, Y., Wang, S., & Liu, H. (2025). A review of tunnel field-effect transistors: Materials, structures, and applications. *Micromachines*, 16(8), 881. <https://doi.org/10.3390/mi16080881>
- [2] Zou, J., & Zhang, Q. (2021). Advances and frontiers in single-walled carbon nanotube electronics. *Advanced Science*, 8(22), 2102860. <https://doi.org/10.1002/advs.202102860>
- [3] Hu, S., Luo, K., Zhao, H., Xie, Y., & Fu, X. (2026). Charge transport in carbon nanotube field-effect transistors: foundations for carbon-based nanoelectronics. *Moore and More*, 3, 2. <https://doi.org/10.1007/s44275-026-00042-x>
- [4] Najmi, L., & Hu, Z. (2023). Review on molecular dynamics simulations of effects of carbon nanotubes (CNTs) on electrical and thermal conductivities of CNT-modified polymeric composites. *Journal of Composites Science*, 7(4), 165. <https://doi.org/10.3390/jcs7040165>
- [5] بشور، خ.، العلي، م.، العبود، ع. (2019). دراسة تأثير تغيير معاملات توجيه Chirality (n,m) الأنابيب النانوي على خصائصه، مجلة جامعة حمص - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية.
- [6] Hamieh, S. (2012). Improving the RF performance of carbon nanotube field effect transistor. *Journal of Nanomaterials*, 2012, 724121. <https://doi.org/10.1155/2012/724121>

[7] بشور، خ. (2021). تحسين أداء ترانزستورات الأثر الحقلية باستخدام الأنابيب النانوية لتطبيقات مختلفة (أطروحة دكتوراه). جامعة حمص، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات.

[8] Verma, A., Gupta, H., & Chaturvedi, N. (2014). Analysis of the operational characteristics of CNTFET. International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering, 3(3), 168–173.

[9] Ho, X., Ye, L., Rotkin, S. V., Cao, Q., Unarunotai, S., Salamat, S., Alam, M. A., & Rogers, J. A. (2010). Scaling properties in transistors that use aligned arrays of single-walled carbon nanotubes. Nano Letters, 10(2), 499–503. <https://doi.org/10.1021/nl903281v>

[10] Cai, D., & Liu, L. (2013). The screening effects of carbon nanotube arrays and its field emission optimum density. AIP Advances, 3(12), 122103. <https://doi.org/10.1063/1.4841275>

[11] Deng, J., & Wong, H. S. P. (2007). A compact SPICE model for carbon–nanotube field–effect transistors including nonidealities and its application—Part I: Model of the intrinsic channel region. IEEE Transactions on Electron Devices, 54(12), 3186–3194. <https://doi.org/10.1109/TED.2007.909030>

[12] Nayeri, M., & Nayeri, M. (2025). Challenges and benefits of multi-value digital circuit design with GNRfet and CNTFET technology. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/1226439>

[13] Obite, F., Ijeomah, G., & Bassi, J. S. (2018). Carbon nanotube field effect transistors: toward future nanoscale electronics. International Journal

of Computers and Applications, 41(2), 149–164. <https://doi.org/10.1080/1206212X.2017.1415111>

[14] Chu, Z., Xu, B., & Liang, J. (2023). Direct application of carbon nanotubes (CNTs) grown by chemical vapor deposition (CVD) for integrated circuits (ICs) interconnection: Challenges and developments. Nanomaterials, 13(20), 2791. <https://doi.org/10.3390/nano13202791>