بسم الله الرحمن الرحيم

مقدمة في تقنية النانو

تأليف

Charles P. Poole Jr. **Frank J. Owens**

ترجمة

أ. د. عبدالله بن صالح الضويان **أ. د. محمد بن صالح الصالحي**

قسم الفيزياء والفلك – كلية العلوم – جامعة الملك سعود

دار جامعة الملك سعود للنشر
KING SAUD UNIVERSITY PRESS

ص.ب ٦٨٩٥٣ - الرياض ١١٥٣٧ المملكة العربية السعودية

ح دار جامعة الملك سعود للنشر، ١٤٣٨هـ (٢٠١٧م)

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

جونيور، تشارلز ب. بول.

مقدمة في تقنية النانو / تشارلز ب. بول جونيور؛ فرانك ج. أوينز؛ محمد بن صالح الصالحي؛ عبدالله بن صالح الضويان - الرياض، ١٤٣٧هـ.

٦١٢ ص؛ ١٧سم × ٢٤ سم

ردمك: ٥ - ٤٩٩ - ٥٠٧ - ٦٠٣ - ٩٧٨

١ - تقنية النانو ٢- النانو أ. أوينز، فرانك ج. (مؤلف مشارك) ب. الصالحي، محمد بن صالح (مترجم) ج. الضويان، عبدالله بن صالح (مترجم) د. العنوان

ديوي ٥, ٦٢٠ ١٤٣٧/٥٩٨٣

رقم الإيداع: ١٤٣٧/٥٩٨٣

ردمك: ٥ - ٤٩٩ - ٥٠٧ - ٦٠٣ - ٩٧٨

هذه ترجمة عربية محكمة صادرة عن مركز الترجمة بالجامعة لكتاب:

Introduction to Nanotechnology
By: Charles P. Poole Jr. and Frank J. Owens
© Wiley-Interscience publication, 2003

وقد وافق المجلس العلمي على نشرها في اجتماعه الثالث عشر للعام الدراسي ١٤٣٦/ ١٤٣٧هـ، المعقود بتاريخ ٦/ ٥/ ١٤٣٧هـ، الموافق ١٥/ ٢/ ٢٠١٦م.

جميع حقوق النشر محفوظة. لا يسمح بإعادة نشر أي جزء من الكتاب بأي شكل وبأي وسيلة سواء كانت إلكترونية أو آلية بما في ذلك التصوير والتسجيل أو الإدخال في أي نظام حفظ معلومات أو استعادتها بدون الحصول على موافقة كتابية من دار جامعة الملك سعود للنشر.

دار جامعة الملك سعود للنشر
KING SAUD UNIVERSITY PRESS

مقدمة المترجمين

الحمدُ لله ربِّ العالمين، والصلاة والسلام على نبينا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين، وبعد:

فقد أصبحت تقنية النانو من أكثر القضايا جاذبية سواء في مجال العلوم الأساسية كالفيزيائية، والكيميائية، وغيرها، أو التطبيقية كالهندسية، والطبية، والزراعية، وغيرها، وذلك منذ منتصف التسعينيات، ولا سيما بعد أن قام مركز التقنية العالمي الأمريكي (WTEC) بدراسة تقويمية لأبحاث النانو وأهميتها في الإبداع التقني، التي خلصت إلى أن لتقنية النانو مستقبلا عظيماً في مجالات الحياة. ومنذ ذلك الوقت فقد نُشر العشرات من الكتب وآلاف الأبحاث في هذا الموضوع.

وقياماً بواجبنا نحو الناطقين بلغة الضاد والمكتبة العربية فقد راودتنا فكرة ترجمة كتاب مناسب لإعطاء الباحث العربي المتخصص خلفية عريضة وجيدة عن تقنية النانو. وقد وقع اختيارنا لكتاب "مقدمة في تقنية النانو" لمؤلفيه الدكتور تشارلز ب. بول، والدكتور فرانك ج. أوينز ومن منشورات جون وايلي عام ٢٠٠٣، وذلك لشموليته ووضوحه ومناسبته لذوي الخلفيات العلمية المختلفة كالفيزيائيين

والكيميائيين والمهندسين الكيميائيين وغيرهم. كما تميّز الكتاب بحسن العرض وتسلسل الأفكار واحتوائه على العديد من الصور والأشكال التوضيحية وقائمة من المراجع الحديثة.

ونعتقد بأن الكتاب سيكون مرجعاً مناسباً بالدرجة الأولى لطلاب الدراسات العليا المتجهين لعمل أبحاثهم في مجالات مرتبطة بتقنية النانو، أو لبناء خلفية علمية قوية عن الموضوع لدى عموم المهتمين.

لقد اعتمدنا في هذه الترجمة على المعجم "الموحد للمصطلحات العلمية" والصادر عن المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم عام ١٩٧، والطبعات التي بعده كما استفدنا من خبرتنا في ترجمة كتبٍ علمية سابقة إلى اللغة العربية، واجتهدنا في وضع مصطلحات جديدة لما لا نجد لها مقابلاً في المعجم.

نأمل أن يجد الكتاب قبولاً لدى المهتمين، مرحبين بأي ملاحظة بنّاءة تُثري هذه الترجمة من خلال التواصل معنا عبر عناويننا المذكورة على غلاف الكتاب، أو صفحتينا على موقع جامعة الملك سعود في الشبكة العالمية. كما لا يفوتنا أن نشكر السيد حميد منصور غيثان لمراجعته أجزاء من الكتاب.

نسأل الله أن يكون هذا العمل خالصاً لوجهه، وأن يكون رصيداً باقياً لأبناء أمتنا.

وصلى الله وسلم على نبينا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين.

المترجمان

تمهيد

أصبحت تقنية النانو في السنوات الحديثة فـي طليعة أهم المجالات وأكثرها تأثيراً فـي الفيزياء، والكيمياء، والهندسة، وعلوم الحياة. تَعِد هذه التقنية فـي المستقبل القريب بحدوث اختراقات علمية تعمل على تغيير اتـجاهات التقدُّم التقني فـي مجالات واسعة من التطبيقات. ولتسهيل الاستخدام الواسع زمنياً لهذه التقنية الجديدة فمن الضـروري جدا وجود ملخَّص شامل والتعليق علـى هذا الموضوع بشكل مفصَّل لتقديم تغطية واسعة ونظرة فاحصة فـي هذا المجال، وفـي الوقت نفسه قابلاً للقراءة بما فيه الكفاية، وشاملاً، بحيث يصل إلى قطاع عريض من الدارسين الذين يحتاجون إلى معرفة طبيعة وإمكانات هذا المجال. لذا فإنه من المأمول أن يفي هذا الكتاب بهذين الهدفين.

يعود الاهتمام الواسع حالياً بتقنية النانو إلى الوراء منذ السنوات ١٩٩٦ إلى ١٩٩٨ عندما قامت لجنة برعاية الـمركز العالمي لتقييم التقنية (WTEC)، المدعوم بواسطة المؤسسة الوطنية للعلوم وجهات فدرالية أخرى، بإجراء دراسة عالمية عن البحث والتطوير فـي مـجال تقنية النانو، لأجل تقييم إمكاناتها فـي دعم الابتكار

التقني. تعتـمد تقنية النانو علـى الاعتراف بأن الجسيمـات التي حجمها أصغر من 100 nm (النانومتر يساوي واحداً من البليون من المتر) تنتقل إلى تركيبات نانوية ينشأ منها خواص وسلوك جديدان. وهذا يحدث لأن الجسيمات التي تكون أصغر من الأبعاد المميزة المصاحبة لظاهرة معينة تُبدي عادة مفاهيم كيميائية وفيزيائية جديدة، مؤدية إلى سلوك جديد يعتمد علـى الحجم. وهكذا فقد لوحظ، مثلا، أنّ التركيب الإلكتروني، التوصيلية، التفاعلية، درجة الانصهار والخواص الميكانيكية جميعها تتغير عندما تُصبح الجسيمات أصغر مـن حجم حرج. ولا شك أنّ اعتماد السلوك على حجم الجسيم سيقود إلى إمكانية تغيير خصائص تلك الجسيمات. ولقد خلص المركز العالمي لتقييم التقنية إلى أنّ هذه التقنية ذات امكانات هائلة تمكنها من المشاركة فـي إحراز تقدم كبير خلال مدى واسع ومتعدد من المجالات التقنية تتراوح من إنتاج مواد قوية وخفيفة إلـى خفض زمن إيصال الأدوية ذات الحجم النانوي إلى نظام الدورة الدموية في جسم الإنسان، وزيادة السعة التخزينية للأشرطة المغناطيسية، وتوفير مفاتيح ذات سرعة عالية لأجهزة الحاسب. ولقد أثمرت هذه التوصية وتوصيات لجان لاحقة إلى تخصيص دعم عالٍ فـي السنوات الأخيرة لهذه التقنية. إنّ مجالات البحث فـي هذه التقنية متعددة، وتغطي مدىً واسعاً من المواضيع تتراوح من كيمياء الحفز للجسيمات إلى فيزياء ليزر النقاط الكمية. وكنتيجة لذلك، فإنَّ على الباحثين فـي أي مجال محدد أن يصلوا بمعرفتهم عن هذ التقنية إلى مستوى يتجاوز خبراتهم لكي يدركوا التأثيرات الواسعة لتقنية النانو، ويتعلموا كيف يشاركون فـي هذا المجال الجديد المثير. إنّ المديرين التقنيين، والمقيِّمين، ومن يـجب عليهم اتخاذ قرار الدعم المالي يحتاجون إلى الإلمام الواسع بعددٍ كبير من التخصصات. وبالرغم من أنّ هذا الكتاب قـد صُمِّم أساساً على أنه مقدمـة عن تقنية النانو، إلا أنه نتيجة لطبيعة

المجال فقد عُدِّل ليكون مقدمة لمواضيع مختارة فـي تقنية النانو، التي يُعتقد بأنها تمثل المجال بشكل عام. وبسبب التقدم السريع في هذا الموضوع وطبيعة تعدد تخصصاته، فإنَّ التغطية الفعلية الشاملة قد لا تكون ممكنة. لقد تم اختيار المجالات المطروحة هنا على أساس الفهم الناضج للمواضيع، وإمكاناتها المحتملة في التطبيقات، أو على عدد التطبيقات الموجودة حاليا. تناقش عدد من فصول هذا الكتاب الإمكانيات الحالية والمستقبلية لهذه التقنية. لقد زوِّد الكتاب بعددٍ من المراجع العامة لمن يرغب الاستزادة في بعض المجالات المتقدمة في هذه التقنية.

لقد حاولنا إعطاء مقدمة عن موضوع تقنية النانو، التي كُتبت بأسلوب يستطيع الباحثون فـي المجالات المختلفة متابعة التطورات الحادثة خارج اهتماماتهم البحثية الحالية، كما يمكن للإداريين التقنيين والمديرين الحصول على فكرة عامة عن الموضوع. كما يمكن لمثل هذا الكتاب أن يكون مرجعاً دراسياً لمقرر دراسات عليا فـي تقنية النانو. تتضمن العديد من الفصول مقدمات لمبادئ فيزيائية وكيميائية فـي مجال التخصص محل المناقشة، وبالتالي الفصول المختلفة مستقلة بذاتها بحيث يمكن قراءتها دون الحاجة لبعضها الآخر. يبدأ الفصل الثاني بعرض عام مختصر لخصائص المواد الحجمية التي لا بدَّ من فهمها لمن يريد أن يستوعب كيف، ولماذا تحدث تغيُّرات فـي هذه المواد عندما تؤول أبعادها لواحد من البليون من المتر. لقد كان التطوُّر الحاصل فـي الأجهزة أحد القوى الدافعة التي أدت لتقدم تقنية النانو بسرعة كبيرة. كالمجهر النفقي الماسح الذي يسمح بتخيّل سطوح المواد نانوية الأبعاد. لذا يمثّل الفصل الثالث أوصاف منظومات الأجهزة المهمة، ويعطي توضيحات لقياسات على مواد نانوية. تغطي الفصول الباقية جوانب مختلفة من الموضوع.

أحدنا (ش ب ب) يود أن يشكر ابنه مايكل لرسم العديد من الأشكال التي تظهر في الكتاب، وحفيده جود جاكسون للمساعدة في العديد من هذه الأشكال. كما نُقدِّر ملاحظات البروفيسور أوستون هيوز (Austin Hughes) على فصل علم الأحياء. لقد استفدنا كثيراً من المعلومات التي وجدناها في الأجزاء الخمسة من كتاب Handbook of Nanostructures Materials and Nanotechnology لمُحرِّره H. S. Nalwa، وفي كتاب Advances catalysis and Nanostructured Materials لمؤلفه W. R. Moser، وكلاهما من دار النشر الأكاديمية (Academic Press).

المحتويات

الصفحة

مقدمة المترجمين ..... هـ
تمهيد ..... ز

الفصل الأول: مقدمة ١

الفصل الثاني: مقدمة في فيزياء الحالة الصلبة ١٥
(١ , ٢) التركيب ١٥
(١ , ١ , ٢) اعتماد الخصائص على الحجم ١٥
(٢ , ١ , ٢) التركيبات البلورية ١٧
(٣ , ١ , ٢) الجسيمات النانوية المكعبة متمركزة الوجه ٢١
(٤ , ١ , ٢) التركيبات شبه الموصلة ذات الرابطة رباعية السطوح ٢٨
(٥ , ١ , ٢) الاهتزازات الشبيكية ٣٣

(٢ , ٢) شرائط الطاقة ٣٧
(١ , ٢ , ٢) العوازل وأشباه الموصلات والموصلات ٣٧
(٢ , ٢ , ٢) الفراغ المقلوب ٤٠
(٣ , ٢ , ٢) شرائط وفجوات الطاقة لأشباه الموصلات ٤١
(٤ , ٢ , ٢) الكتل الفعالة ٥٠
(٥ , ٢ , ٢) سطوح فيرمي ٥١
(٣ , ٢) الجسيمات المتمركزة ٥٣
(١ , ٣ , ٢) المانحات والمستقبلات والمصائد العميقة ٥٣
(٢ , ٣ , ٢) الحركية ٥٥
(٣ , ٣ , ٢) الأكزتونات ٥٦

الفصل الثالث: طرق قياس الخواص ٦١
(١ , ٣) مقدمة ٦١
(٢ , ٣) التركيب ٦٢
(١ , ٢ , ٣) التركيبات الذرية ٦٢
(٢ , ٢ , ٣) علم البلورات ٦٥
(٣ , ٢ , ٣) تحديد حجم الجسيم ٧٢
(٤ , ٢ , ٣) التركيب السطحي ٧٧
(٣ , ٣) المجهرية ٧٩
(١ , ٣ , ٣) المجهر الإلكتروني النافذ TEM ٧٩
(٢ , ٣ , ٣) مجهرية المجال الأيوني ٨٧

(٣,٣,٣) المجهرية المسحية ٨٧
(٣,٤) المطيافية ٩٨
(٣,٤,١) المطيافية تحت الحمراء ومطيافية رامان ٩٨
(٣,٤,٢) مطيافية الانبعاث الفوتوني والأشعة السينية ١٠٦
(٣,٤,٣) الرنين المغناطيسي ١١٣

الفصل الرابع: خواص الجسيمات النانوية المفردة ١٢١
(٤,١) مقدمة ١٢١
(٤,٢) التكتّلات النانوية الفلزية ١٢٣
(٤,٢,١) الأعداد السحرية ١٢٣
(٤,٢,٢) النمذجة النظرية للجسيمات النانوية ١٢٦
(٤,٢,٣) التركيب الهندسي ١٣٠
(٤,٢,٤) التركيب الإلكتروني ١٣٥
(٤,٢,٥) التفاعلية ١٣٩
(٤,٢,٦) التذبذبات ١٤٢
(٤,٢,٧) التكتّلات المغناطيسية ١٤٤
(٤,٢,٨) الانتقال من المقياس الحجمي إلى النانوي ١٤٧
(٤,٣) الجسيمات النانوية شبه الموصلة ١٤٨
(٤,٣,١) الخواص الضوئية ١٤٨
(٤,٣,٢) التفتيت الضوئي ١٥٢
(٤,٣,٣) الانفجار الكولومي ١٥٣

(٤ , ٤) الغازات النادرة والتكتّلات الجزيئية ١٥٥
(١ , ٤ , ٤) تكتّلات الغاز الخامل ١٥٥
(٢ , ٤ , ٤) التكتلات فائقة السيولة ١٥٧
(٣ , ٤ , ٤) التكتّلات الجزيئية ١٥٩
(٥ , ٤) طرق التحضير ١٦١
(١ , ٥ , ٤) بلازما التردد الراديوي ١٦١
(٢ , ٥ , ٤) الطرق الكيميائية ١٦٢
(٣ , ٥ , ٤) التحلّل الحراري ١٦٣
(٤ , ٥ , ٤) طرق الليزر النبضي ١٦٦
(٦ , ٤) الخاتمة ١٦٧

الفصل الخامس: تركيبات الكربون النانوية ١٦٩
(١ , ٥) مقدمة ١٦٩
(٢ , ٥) جزيئات الكربون ١٦٩
(١ , ٢ , ٥) طبيعة الرابطة الكربونية ١٦٩
(٢ , ٢ , ٥) التركيبات الجديدة للكربون ١٧٣
(٣ , ٥) تكتّلات الكربون ١٧٤
(١ , ٣ , ٥) تكتّلات الكربون الصغيرة ١٧٤
(٢ , ٣ , ٥) اكتشاف الكربون ٦٠ ..... ١٧٦
(٣ , ٣ , ٥) تركيب الكربون ٦٠ وشكله البلوري ١٨٠
(٤ , ٣ , ٥) الكربون ٦٠ المطعّم بمادة قلوية ١٨١

(٥,٣,٥) التوصيلية الفائقة في الكربون ٦٠ ..... ١٨٢
(٥,٣,٦) فوليرينات كبيرة وصغيرة ١٨٤
(٥,٣,٧) كُرات بوكي الأخرى ١٨٥
(٥,٤) أنابيب الكربون النانوية ١٨٦
(٥,٤,١) التصنيع ١٨٧
(٥,٤,٢) التركيب ١٩١
(٥,٤,٣) الخواص الكهربية ١٩٢
(٥,٤,٤) الخواص الاهتزازية ١٩٨
(٥,٤,٥) الخواص الميكانيكية ٢٠٠
(٥,٥) تطبيقات أنابيب الكربون النانوية ٢٠٢
(٥,٥,١) الانبعاث المجالي والحجب ٢٠٣
(٥,٥,٢) الكمبيوترات ٢٠٤
(٥,٥,٣) خلايا الوقود ٢٠٨
(٥,٥,٤) المجسات الكيميائية ٢١٠
(٥,٥,٥) الحفّازات ٢١٢
(٥,٥,٦) التقوية الميكانيكية ٢١٣

الفصل السادس: المواد الحجمية ذات التركيب النانوي ٢١٧
(٦,١) التركيبات النانوية غير المرتَّبة للمواد الصلبة ٢١٨
(٦,١,١) طرق التحضير ٢١٨
(٦,١,٢) آليات فشل المواد التقليدية ذات حبيبات حجمية ٢٢٣

(٦,١,٣) الخواص الميكانيكية ٢٢٥
(٦,١,٤) الطبقات المتعددة ذات التركيب النانوي ٢٢٩
(٦,١,٥) الخواص الكهربية ٢٣١
(٦,١,٦) خواص أخرى ٢٣٧
(٦,١,٧) الزجاجيات المركَّبة من تكتلات نانوية فلزية ٢٣٩
(٦,١,٨) السليكون المسامي ٢٤٢
(٦,٢) البلُّورات ذات التركيب النانوي ٢٤٦
(٦,٢,١) البلورات النانوية الطبيعية ٢٤٦
(٦,٢,٢) التنبّؤ الحاسوبي لشبيكات التكتلات ٢٤٨
(٦,٢,٣) مصفوفات جسيمات النانو في الزيولايت ٢٤٩
(٦,٢,٤) بلورات الجسيمات النانوية الفلزية ٢٥١
(٦,٢,٥) شبيكات الجسيمات النانوية في المعلّقات الغروانية ٢٥٣
(٦,٢,٦) البلورات الفوتونية ٢٥٦

الفصل السابع: الفرومغناطيسية ذات التركيب النانوي ٢٦٥
(٧,١) أساسيات الفرومغناطيسية ٢٦٥
(٧,٢) تأثير التركيب النانوي الحجمي على الخصائص المغناطيسية ٢٧٣
(٧,٣) ديناميكا المغناطيسات النانوية ٢٧٧
(٧,٤) المسامات النانوية المحتوية على جسيمات مغناطيسية ٢٨١
(٧,٥) الفرومغناطيسات الكربونية النانوية ٢٨٣
(٧,٦) المقاومة المغناطيسية العملاقة والضخمة ٢٨٧

(٧,٧) الفروموائع ٢٩٥

الفصل الثامن: المطيافية البصرية والاهتزازية ٣٠٥
(٨,١) مقدمة ٣٠٥
(٨,٢) مدى التردد تحت الأحمر ٣٠٨
(٨,٢,١) مطيافية أشباه الموصلات، الإكزتونات ٣٠٨
(٨,٢,٢) المطيافية تحت الحمراء للسطح ٣١١
(٨,٢,٣) مطيافية رامان ٣١٨
(٨,٢,٤) مطيافية بريلوين ٣٢٨
(٨,٣) التوهج ٣٣٢
(٨,٣,١) التوهج الضوئي ٣٣٢
(٨,٣,٢) الحالات السطحية ٣٣٦
(٨,٣,٣) التوهج الحراري ٣٤٢
(٨,٤) التركيبات النانوية في أقفاص الزيولايت ٣٤٤

الفصل التاسع: الآبار والأسلاك والنقاط الكمية ٣٤٩
(٩,١) مقدمة ٣٤٩
(٩,٢) تحضير التركيبات النانوية الكمية ٣٥١
(٩,٣) تأثيرات الحجم والأبعاد ٣٥٦
(٩,٣,١) تأثيرات الحجم ٣٥٦
(٩,٣,٢) إلكترونات التوصيل والبُعدية ٣٦٠

(٣, ٣, ٩) غاز فيرمي وكثافة الحالات ٣٦١
(٤, ٣, ٩) آبار الكمون ٣٦٥
(٥, ٣, ٩) الحصر الجزئي ٣٧١
(٦, ٣, ٩) اعتماد الخصائص على كثافة الحالات ٣٧٤
(٤, ٩) الإكزتون ٣٧٥
(٥, ٩) النفقية أحادية الإلكترون ٣٧٧
(٦, ٩) تطبيقات ٣٨٢
(١, ٦, ٩) الكواشف تحت الحمراء ٣٨٢
(٢, ٦, ٩) ليزرات النقاط الكمية ٣٨٥
(٧, ٩) التوصيلية الفائقة ٣٩٠

الفصل العاشر: التجّمع الذاتي والتحفيز ٣٩٥
(١, ١٠) التجمّع الذاتي ٣٩٥
(١, ١, ١٠) عملية التجمّع الذاتي ٣٩٥
(٢, ١, ١٠) الجـُزر شبه الموصلة ٣٩٦
(٣, ١, ١٠) الطبقات الأحادية ٤٠٠
(٢, ١٠) التحفيز ٤٠٦
(١, ٢, ١٠) طبيعة التحفيز ٤٠٦
(٢, ٢, ١٠) مساحة سطح الجسيمات النانوية ٤٠٧
(٣, ٢, ١٠) المواد المسامّية ٤١٣
(٤, ٢, ١٠) الطَّفْليات ذات الأعمدة ٤٢٠

(٥ , ٢ , ١٠) الغروانيات ٤٢٦

الفصل الحادي عشر: المركبات العضوية والبوليمرات ٤٣١
(١ , ١١) مقدمة ٤٣١
(٢ , ١١) تكوين وتمييز البوليمرات ٤٣٣
(١ , ٢ , ١١) البلمرة ٤٣٣
(٢ , ٢ , ١١) أحجام البوليمرات ٤٣٥
(٣ , ١١) البلورات النانوية ٤٣٧
(١ , ٣ , ١١) أنواع الحلقة المكثفة ٤٣٧
(٢ , ٣ , ١١) أنواع الأستيلين متعدد الثنائية ٤٤٣
(٤ , ١١) البوليمرات ٤٤٥
(١ , ٤ , ١١) البوليمرات الموصلة ٤٤٥
(٢ , ٤ , ١١) كوبوليمرات بُلك ٤٤٨
(٥ , ١١) تركيب الجزيئات العملاقة ٤٥٠
(١ , ٥ , ١١) أنواع الفلزات الانتقالية المتوسطة ٤٥٠
(٢ , ٥ , ١١) الجزيئات الدندريمية ٤٥٣
(٣ , ٥ , ١١) الدندريمرات الجزيئية العملاقة ٤٥٩
(٤ , ٥ , ١١) المذيلات ٤٦٣

الفصل الثاني عشر: المواد البيولوجية ٤٦٩
(١ , ١٢) مقدمة ٤٦٩

(٢ ,١٢) الكتل البنائية البيولوجية ٤٧١
(١ ,٢ ,١٢) أحجام الكتل البنائية والهياكل النانوية ٤٧١
(٢ ,٢ ,١٢) السلك النانوي البولي ببتيدي والجسيم النانوي البروتيني..... ٤٧٦
(٣ ,١٢) الأحماض النووية ٤٨٢
(١ ,٣ ,١٢) سلك DNA النانوي المزدوج ٤٨٢
(٢ ,٣ ,١٢) الشفرة الجينية وتحضير البروتين..... ٤٨٨
(٤ ,١٢) التراكيب النانوية البيولوجية ٤٩٠
(١ ,٤ ,١٢) أمثلة على بروتينات ٤٩٠
(٢ ,٤ ,١٢) المذيلات والحويصلات ٤٩٣
(٣ ,٤ ,١٢) الأغشية متعددة الطبقات..... ٤٩٩

الفصل الثالث عشر: المكائن النانوية والأجهزة النانوية..... ٥٠٥
(١ ,١٣) الأنظمة المايكروكهروميكانيكية (مِمز) ٥٠٥
(٢ ,١٣) الأنظمة النانوكهروميكانيكية (نِمز)..... ٥١٠
(١ ,٢ ,١٣) التصنيع ٥١٠
(٢ ,٢ ,١٣) الأجهزة النانوية والمكائن النانوية ٥١٦
(٣ ,١٣) المفاتيح الجزيئية والجزيئية العملاقة ٥٢٦

الملاحق..... ٥٣٩
الملحق (أ) صيغ للبُعدية ٥٣٩
(أ,١) مقدمة ٥٣٩

(أ,٢) غير الموضعية ٥٣٩
(أ,٣) الحصر الجزئي ٥٤٠
الملحق (ب) جدولة لخصائص المواد شبه الموصلة ٥٤٣

ثبت المصطلحات ٥٥٥
أولاً: عربي - إنجليزي ٥٥٥
ثانياً: إنجليزي - عربي ٥٧٣
كشاف الموضوعات ٦٠١