بسم الله الرحمن الرحيم

مواد الخلايا الشمسية
تقنيات التطوير

تحرير

Gavin J. Conibeer, Arthur Willoughby

ترجمة

الدكتور ناصر محمد عبدالسلام عمر

أستاذ الكيمياء المساعد

قسم العلوم الطبيعية -كلية المجتمع بالرياض

جامعة الملك سعود

الدكتور خليل عبدالرازق خليل

أستاذ هندسة المواد

قسم الهندسة الميكانيكية- كلية الهندسة

جامعة الشارقة –الإمارات العربية المتحدة

دار جامعة الملك سعود للنشر
KING SAUD UNIVERSITY PRESS

ص.ب ٦٨٩٥٣ - الرياض ١١٥٣٧ المملكة العربية السعودية

ح جامعة الملك سعود، ١٤٣٨هـ (٢٠١٧م)

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

كانبيير، غافن ج.

مواد الخلايا الشمسية : تقنيات التطوير ./ غافن ج. كانبيير؛ آرثر ويلوبي، ناصر محمد عبدالسلام عمر؛ خليل عبدالرازق خليل - الرياض، ١٤٣٨هـ

٧٦٧ص؛ ١٧×٢٤سم

ردمك: ٥-٥٨٥-٥٠٧-٦٠٣-٩٧٨

١- الخلايا الشمسية أ - ويلوبي، ارثر (مؤلف مشارك) ب. عمر، ناصر محمد عبدالسلام (مترجم) ج. خليل، خليل عبدالرازق (مترجم) د. العنوان

ديوي ٤٧٥, ٦٢١ ١٤٣٨/٨٨٠٠

رقم الإيداع: ١٤٣٨/٨٨٠٠

ردمك: ٥-٥٨٥-٥٠٧-٦٠٣-٩٧٨

هذه ترجمة عربية محكمة صادرة عن مركز الترجمة بالجامعة لكتاب:

Solar Cell Materials, Developing Technologies
By: Gavin J. Conibeer, Arthur Willoughby
©2014 John Wiley & Sons, Ltd
وقد وافق المجلس العلمي على نشرها في اجتماعه الثامن للعام الدراسي ١٤٣٧/١٤٣٨هـ المعقود بتاريخ ٢٧/ ٣/ ١٤٣٨هـ الموافق ٢٦/ ١٢/ 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

تُعدَّ الكهرباء إحدى أهم صور الطاقة، التي أصبح مجتمعنا البشري يعتمد عليها، ولا غنى لنا عنها في كافة نواحي حياتنا اليومية، فهي تستخدم في الأغراض المنزلية كالإنارة والتدفئة، والأجهزة الكهربائية المنزلية، كما تستخدم في الصناعة، والزراعة، والاتصالات، ووسائل النقل، والمجالات العلمية. ويعتمد إنتاج الطاقة الكهربائية في العالم حالياً على الوقود الحفوري كمصدر رئيس، إلّا أن الوقود الأحفوري لا يعد مورداً متجدداً، ولا يمكن الاعتماد عليه في توفير احتياجات الدول المستقبلية من الطاقة الكهربائية، بالإضافة إلى آثاره السلبية على البيئة.

نظراً لتنامي الوعي البيئي في الآونة الأخيرة، أصبح الناس يدركون ضرورة التوجه إلى مصادر الطاقة النظيفة والصديقة للبيئة والدائمة لتوليد الطاقة الكهربائية، مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية وغيرها من أنواع الطاقة المختلفة. وأصبح العديد من الناس يسمعون في الآونة الأخيرة عن الخلايا الشمسية، التي تولد الطاقة الكهربائية باستخدام الطاقة الشمسية، وقد تزايد التوجه نحو هذا النوع من الطاقة في العديد من المناطق حول العالم، بإقامة حقول كاملة من الخلايا الشمسية، وذلك من أجل توفير جزء كبيرة من الطاقة الكهربائية، ونتيجة لهذا التوجه المتزايد، فمن المهم معرفة طريقة عمل مثل هذه الخلايا الشمسية، وكيفية تصنيعها.

إن الخلايا الشمسية تعد من أهم الاختراعات التي ظهرت في العصر الحديث، حيث تمكن الأمريكي روسل أوهل (**Russell Ohl**) من إنتاج أول خلية شمسية مصنوعة من السليكون في عام ١٦٤٦م. كما تسهم الخلايا الشمسية في تأمين جزء لا بأس به من الطاقة للاحتياجات اليومية سواء بتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية بشكل مباشر أو غير مباشر. ويُبذل الكثير من الجهود البحثية حالياً لزيادة كفاءة التحويل للخلايا الشمسية، وذلك من أجل خفض حجم هذه الخلايا، وزيادة الطاقة الكهربائية الناتجة منها، ومن ثم خفض تكلفة إنتاجها، مما سيؤدي إلى الحد من التلوث البيئي وظاهرة الاحتباس الحراري الناجم عن استخدام الوقود الأحفوري، الذي يمثل الخطر الأول الذي يهدد البيئة الإنسانية في الوقت الراهن.

وهذا الكتاب– الذي قمنا بتوفيق الله بترجمته– يوفر تقنيات تطوير مواد الخلايا الشمسية، التي تتناول بعمق مختلف جوانب إنتاج الطاقة الكهربائية من الخلايا الشمسية. إن فصول الكتاب تعد منظمة ومترابطة، في وحدة مسلسلة مترتبة، ويغطي هذا الكتاب بشكل أساسي تطوير المواد الإلكترونية والإلكتروضوئية الجديدة المعتمد على هندسة المواد على المستوى العملي، وكذلك الفهم الواضح لخواص المواد، والعلوم الأساسية التي ترتكز عليها هذه الخواص. وينقسم هذا الكتاب إلى تسعة فصول، الفصل الأول عبارة عن مقدمة يعطي نظرة عامة عن الظاهرة الكهروضوئية، وتحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية. ويتناول الفصل الثاني الحدود الفيزيائية الأساسية للتحويل الكهروضوئي، والحدود الأساسية لبعض مفاهيم الكفاءة العالية، أما الفصل الثالث فيغطي التوصيف الفيزيائي للمواد الكهروضوئية والتقنيات المختلفة المستخدمة في ذلك. أما الفصلان الرابع والخامس فيتناولان التطورات في الخلايا الشمسية السليكونية البلورية والخلايا الشمسية السليكونية اللا بلورية

والبلورية الدقيقة، كما يغطي الفصل السادس خلايا المجموعة الثالثة والخامسة الشمسية، بالإضافة إلى الخلايا الشمسية متعددة الوصلات بأنواعها المختلفة. ويتناول الفصل السابع الخلايا الشمسية الكالكوجينيدية رقيقة الغشاء مع استخدام طرق الترسيب والركائز المختلفة؛ كما يغطي الفصل الثامن الخلايا الشمسية العضوية المطبوعة بالإضافة إلى المواد والمورفولوجيا. أما الفصل التاسع فيتناول خلايا الجيل الثالث الشمسية.

ويعد هذا الكتاب مرجعاً قيّماً، لطلاب الدراسات العليا، والباحثين والتقنيين، والعاملين في مجال بحوث وتطوير دراسة المواد في مجالات الإلكترونيات والفوتونيات الكيميائية، وكذلك العلماء في مجال صناعة وتطوير المواد، والأجهزة، والدوائر الجديدة للصناعات الإلكترونية، والإلكتروضوئية، والاتصالات؛ ونظراً لافتقار المكتبة العربية إلى وجود مثل هذه النوعية المتخصصة فقد رأينا أن من الواجب علينا ترجمة هذا الكتاب المهم إلى اللغة العربية.

والله من وراء القصد، وهو الهادي إلى سواء السبيل

المترجمان

مقدمة السلسلة

سلسلة وايلي في المواد للتطبيقات الإلكترونية والإلكتروضوئية

تنتمي السلسلة من الكتب إلى الفئة سريعة النمو من المواد المستخدمة في التطبيقات الإلكترونية والإلكتروضوئية، حيث إنها مصممة لتوفير المعلومات المطلوبة بشدة عن المبادئ العلمية الأساسية لتلك المواد، بالإضافة إلى كيفية استخدام تلك المواد في التطبيقات التقنية. وهذه الكتب موجهة إلى الطلاب (طلاب الدراسات العليا)، والباحثين، والتقنيين، والعاملين في مجال البحوث والتطوير، ودراسة المواد في مجال الإلكترونيات والفوتونيات، وعلماء الصناعة الذين يطورون المواد، والأجهزة، والدوائر الجديدة للصناعات الإلكترونية، والإلكتروضوئية، والإتصالات.

لا يعتمد تطوير المواد الإلكترونية والإلكتروضوئية الجديدة على هندسة المواد عند المستوى العملي فحسب، بل يعتمد أيضاً على الفهم الواضح لخواص المواد، والعلوم الأساسية وراء هذه الخواص. إنها خواص المواد التي تحدد في نهاية المطاف مدى فائدتها في التطبيق. ولذا تتضمن السلسلة أيضاً عناوين مثل: التوصيل الكهربائي في المواد الصلبة، والخواص البصرية، والخواص الحرارية، .....إلخ، مع كل تطبيقات المواد والأمثلة في مجال الإلكترونيات والإلكترونيات الضوئية. كما يُغطى أيضاً توصيف المواد ضمن السلسلة وصولاً إلى استنتاج أنه من المستحيل تطوير المواد

الجديدة بدون التوصيف الصحيح لتركيبها وخواصها. وكانت العلاقات بين التركيب والخاصية دائماً ذات أهمية أساسية وجوهرية لعلم وهندسة المواد.

إن علم المواد معروف جيداً، كونه أحد أكثر العلوم متعددة التخصصات. لقد أدى هذا الجانب متعدد التخصصات لعلم المواد إلى العديد من الإكتشافات المثيرة، والمواد والتطبيقات الجديدة. وليس غريباً أن تجد العلماء ذوي الخلفية الهندسية الكيميائية يعملون على مشاريع المواد مع تطبيقات في مجال الإلكترونيات.وباختيار العناوين لهذه السلسلة، حاولنا الحفاظ على الجانب متعدد التخصصات في هذا المجال، ومن ثم إثارته للباحثين في هذا المجال.

آرثر ويلوبي
باير كابر
صفا كساب

قائمة المشاركين

List of Contributors

Tayebeh Ameri, Konarka Technologies Austria GmbH, Austria
Hamed Azimi, Konarka Technologies Austria GmbH, Austria
Daniel Bellet, Laboratorie des Matériaux et du G´enie Physique, CNRS, France
Edith Bellet-Amalric, CEA-CNRS-UJF group 'Nanophysique et Semiconducteurs', CEA/INAC/SP2M, France
Christoph J. Brabec, Konarka Technologies Austria GmbH, Austria and Konarka Technologies Germany GmbH, Germany
Gavin Conibeer, School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering, University of New South Wales, Australia
S. Delbos, Institut de Recherche et Développement sur l'Energie Photovoltaïque (IRDEP), France
N. J. Ekins-Daukes, Department of Physics, Imperial College, London, UK
Martin A. Green, School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering, University of New South Wales, Australia
J. F. Guillemoles, Institut de Recherche et Développement sur l'Energie Photovoltaïque (IRDEP), France
Claudia Hoth, Konarka Technologies Germany GmbH, Germany
N. Naghavi, Institut de Recherche et Développement sur l'Energie Photovolta¨ıque (IRDEP), France
M. Paire, Institut de Recherche et Développement sur l'Energie Photovolta¨ıque (IRDEP), France
R. E. I. Schropp, Energy research Center of the Netherlands (ECN), Solar Energy, The Netherlands and Department of Applied Physics, Eindhoven University of Technology, The Netherlands
Andrea Seemann, Konarka Technologies Germany GmbH, Germany
Roland Steim, Konarka Technologies Germany GmbH, Germany
J. Vidal, Institut de Recherche et Développement sur l'Energie Photovoltaïque (IRDEP), France
ArthurWilloughby, Faculty of Engineering and the Environment, University of Southampton, UK

المحتويات

مقدمة المترجمين ..... هـ
مقدمة السلسلة ..... ط
قائمة المشاركين ..... ك

الفصل الأول: المقدمة ١
(١ , ١) المقدمة ١
(٢ , ١) الشمس ٢
(٣ , ١) عرض موجز للكتاب ٥
المراجع ٨

الفصل الثاني: الحدود الفيزيائية الأساسية للتحويل الكهروضوئي ٩
(١ , ٢) المقدمة ٩
(٢ , ٢) الحدود الديناميكية الحرارية (الثرموديناميكية) ١٧
(١ , ٢ , ٢) الشمس هي الحد ١٧

(٢ , ٢ . ٢)التحليل الديناميكي الحراري الكلاسيكي لتحويل الطاقة الشمسية ١٩
(٢ , ٣) قيود الأجهزة الكلاسيكية ٢٤
(١ , ٣ , ٢) التوازن المفصل والافتراضات الرئيسة ٢٦
(٢ , ٣ , ٢) وصلة النوع p-n ٢٨
(٣ , ٣ , ٢) نموذج النظام ثنائي المستوى ٣٥
(٤ , ٣ , ٢) الوصلات المتعددة.....٣٩
(٤ , ٢) الحدود الأساسية لبعض مفاهيم الكفاءة العالية ٤٤
(١ , ٤ , ٢) ما بعد كفاءة وحدة الكم ٤٧
(١ , ١ , ٤ , ٢) التأين بالتصادم وتوليد الأكسيتون المتعدد ٥٠
(٢ , ١ , ٤ , ٢) الحالات والنطاقات الوسيطة ٥٣
(٢ , ٤ , ٢) ما بعد التحويل ثابت درجة الحرارة: خلايا الحاملات الساخنة الشمسية ٥٧
(٣ , ٤ , ٢) ما بعد العملية الوحيدة والفوتون: تحويل الفوتون.....٦٣
(٥ , ٢) الخلاصة.....٦٥
ملاحظة ٦٦
المراجع ٦٦

الفصل الثالث: التوصيف الفيزيائي للمواد الكهروضوئية ٦٩
(١ , ٣) المقدمة.....٦٩
(٢ , ٣) المواءمة بين متطلبات توصيف المواد الكهروضوئية والتقنيات الفيزيائية ..٧٠

(٣,٣) تقنيات الأشعة السينية ٧٢
(١,٣,٣) حيود الأشعة السينية..... ٧٤
(٢,٣,٣) حيود الأشعة السينية سافة السقوط..... ٨١
(٣,٣,٣) انعكاسية الأشعة السينية ٨٦
(٤,٣,٣) تقنيات الأشعة السينية الأخرى..... ٨٩
(٤,٣) الطرق المجهرية الإلكترونية ٩٤
(١,٤,٣) تفاعلات الإلكترون والعينة والمجهر الإلكتروني الماسح ٩٨
(٢,٤,٣) حيود التشتت الخلفي للإلكترون ١٠٢
(٣,٤,٣) المجهر الإلكتروني النفاذ ١٠٦
(٤,٤,٣) مطيافية فقدان طاقة الإلكترون ١١٠
(٥,٣) الطرق المطيافية ١١٣
(١,٥,٣) مطيافية الإلكترون الضوئي للأشعة السينية ١١٣
(٢,٥,٣) مطيافية كتلة الأيون الثانوي ١١٧
(٣,٥,٣) مطيافية التشتت الخلفي لرذرفورد ١١٩
(٤,٥,٣) مطيافية رامان ١٢٠
(٥,٥,٣) مطيافية الأشعة فوق البنفسجية والمرئية وتحت الحمراء القريبة..... ١٢٣
(٦,٣) الملاحظات الختامية والتوقعات..... ١٢٦
شكر وتقدير..... ١٢٩
المراجع ١٢٩

الفصل الرابع: التطورات في الخلايا الشمسية السليكونية البلورية ١٣٥
(١ , ٤) المقدمة ١٣٥
(٢ , ٤) استعراض عام للسوق الحالي ١٣٨
(٣ , ٤) الرقاقات السليكونية ١٤٠
(١ , ٣ , ٤) العملية القياسية ١٤٠
(٢ , ٣ , ٤) السبائك السليكونية متعددة البلورات ١٤٦
(٣ , ٣ , ٤) السيلكون الشريطي ١٤٨
(٤ , ٤) معالجة الخلايا ١٥١
(١ , ٤ , ٤) الخلايا المطبوعة بالشاشة ١٥١
(٢ , ٤ , ٤) الخلايا الشمسية انتقائية الباعث، المطعمة بالليزر ومطمورة الملامس ١٥٨
(٣ , ٤ , ٤) خلية الوصلة غير المتجانسة بالطبقات الذاتية الرقيقة ١٦٠
(٤ , ٤ , ٤) خلية الملامس الخلفي ١٦٣
(٥ , ٤ , ٤) خلية الانتشار الموضعي الخلفي مخمدة الباعث الشمسية ... ١٦٥
(٥ , ٤) الخلاصة ١٧٠
شكر وتقدير ١٧١
المراجع ١٧١

الفصل الخامس: الخلايا الشمسية السليكونية اللا بلورية والبلورية الدقيقة ١٧٥
(١ , ٥) المقدمة ١٧٥
(٢ , ٥) طرق الترسيب ١٨٠

(١ , ٢ , ٥) تعديلات على تقنيات ترسيب البخار الكيميائي معزز البلازما المباشرة ١٨٤
(٢ , ٢ , ٥) تقنيات ترسيب البخار الكيميائي معزز البلازما عن بعد..... ١٨٧
(٣ , ٢ , ٥) ترسيب البخار الكيميائي ذي السلك الساخن الخطي ١٩١
(٣ , ٥) خواص المادة ١٩٢
(١ , ٣ , ٥) السليكون البلوري الأولي..... ١٩٣
(٢ , ٣ , ٥) السليكون البلوري الدقيق أو البلوري النانوي ١٩٥
(٤ , ٥) الخلية أحادية الوصلة ٢٠٢
(١ , ٤ , ٥) الخلايا السليكونية (البلورية الأولية) اللابلورية..... ٢٠٧
(٢ , ٤ , ٥) الخلايا السليكونية البلورية الدقيقة..... ٢١٠
(٣ , ٤ , ٥) معدل الترسيب الأعلى..... ٢١٣
(٥ , ٥) الخلايات متعددة الوصلات ٢١٦
(٦ , ٥) الوحدات والإنتاج..... ٢٢٠
شكر وتقدير ٢٢٨
المراجع ٢٢٨

الفصل السادس: خلايا المجموعة الثالثة والخامسة الشمسية ٢٣٥
(١ , ٦) المقدمة..... ٢٣٥
(٢ , ٦) خلايا المجموعة الثالثة والخامسة متجانسة وغير متجانسة الوصلة الشمسية..... ٢٤٠
(١ , ٢ , ٦) خلايا أرسنيد الجاليوم الشمسية ٢٤٥

(٦,٢,٢) خلايا فوسفيد الإنديوم الشمسية ٢٥٢
(٦,٢,٣) فوسفيد أرسنيد الجاليوم الإنديوم ٢٥٤
(٦,٢,٤) نيتريد الجاليوم ٢٥٤
(٦,٣) الخلايا الشمسية متعددة الوصلات ٢٥٥
(٦,٣,١) الخلايا الشمسية متعددة الوصلات المتواحدة ٢٥٧
(٦,٣,١,١) الخلايا الشمسية متعددة الوصلات متوافقة الشبكية ٢٥٩
(٦,٣,١,٢) الخلايا الشمسية متعددة الوصلات غير متوافقة الشبكية ٢٦٦
(٦,٣,٢) الخلايا الشمسية متعددة الوصلات المكدسة ميكانيكياً ٢٧١
(٦,٤) التطبيقات ٢٧٥
(٦,٤,١) الأنظمة الكهروضوئية الفضائية للمجموعة الثالثة والخامسة ٢٧٥
(٦,٤,٢) أنظمة المُركزات الكهروضوئية من المجموعة الثالثة والخامسة ٢٧٨
(٦,٥) الخلاصة ٢٨٢
المراجع ٢٨٣

الفصل السابع: الخلايا الشمسية الكالكوجينيدية رقيقة الغشاء ٢٩٥
(٧,١) المقدمة..... ٢٩٥
(٧,٢) ثنائي سيلينيد الجاليوم الإنديوم النحاس ٣٠٣
(٧,٢,١) تصنيع الجهاز ٣٠٤

(١, ١, ٢, ٧) تقنية الخلية والوحدة ٣٠٤
(٢, ١, ٢, ٧) الركيزة ٣٠٦
(١, ٢, ١, ٢, ٧) الركيزة الزجاجية ٣٠٦
(٢, ٢, ١, ٢, ٧) الركيزة المرنة..... ٣٠٨
(١, ٢, ٢, ١, ٢, ٧) الركائز المعدنية ٣٠٨
(٢, ٢, ٢, ١, ٢, ٧) ركائز البوليمرات ٣٠٩
(٣, ١, ٢, ٧) ملامس الموليبدينوم الخلفي ٣٠٩
(١, ٣, ١, ٢, ٧) طبقة ثنائي سيلينيد الموليبدينوم ٣١٢
(٢, ٣, ١, ٢, ٧) الملامسات الخلفية البديلة ٣١٤
(٤, ١, ٢, ٧) ماص ثنائي سيلينيد الجاليوم الإنديوم النحاس ٣١٥
(١, ٤, ١, ٢, ٧) عمليات التبخير المختلط ٣١٧
(١, ١, ٤, ١, ٢, ٧) عملية الطبقة الوحيدة والثنائية ٣١٧
(٢, ١, ٤, ١, ٢, ٧) العملية ثلاثية المراحل..... ٣١٨
(٢, ٤, ١, ٢, ٧) طرق الترسيب الأخرى المستندة على العملية ثنائية الخطوة ٣٢٠
(١, ٢, ٤, ١, ٢, ٧) الترسيب بالتفريغ ٣٢٢
(٢, ٢, ٤, ١, ٢, ٧) التقنيات اللا تفريغية ٣٢٣
(٥, ١, ٢, ٧) الطبقة الصادة..... ٣٢٨
(١, ٥, ١, ٢, ٧) طبقات كبريتيد الكادميوم الصادة ٣٢٨
(٢, ٥, ١, ٢, ٧) الطبقات الصادة الخالية من كبريتيد الكادميوم ٣٢٩

(٦ ,١ ,٢ ,٧) نافذة أكسيد الزنك-الذاتية/ أكسيد الزنك: ألمونيوم وشبكة الألمونيوم- النيكل ٣٣٢
(٢ ,٢ ,٧) خواص المادة ٣٣٥
(١ ,٢ ,٢ ,٧) وصف كالكوبيريت النحاس ٣٣٥
(٢ ,٢ ,٢ ,٧) التركيب والتكوين ٣٣٦
(١ ,٢ ,٢ ,٢ ,٧) التركيب البلوري ٣٤١
(٢ ,٢ ,٢ ,٢ ,٧) مخطط الطور، وعدم انضباط نسب الذرات والعيوب النقطية..... ٣٤٣
(٣ ,٢ ,٢ ,٧) الخواص الإلكتروضوئية ٣٥١
(٤ ,٢ ,٢ ,٧) الحدود الحبيبية لثنائي سيلينيد الجاليوم الإنديوم النحاس..... ٣٥٤
(٥ ,٢ ,٢ ,٧) السطح الخالي من ثنائي سيلينيد الجاليوم الإنديوم النحاس ٣٥٧
(٣ ,٢ ,٧) خواص الجهاز ٣٥٨
(١ ,٣ ,٢ ,٧) تشغيل وأداء الأجهزة ٣٥٨
(٢ ,٣ ,٢ ,٧) وصف وصلة ثنائي سيلينيد الجاليوم الإنديوم النحاس غير المتجانسة: نماذج مختلفة ٣٦٢
(١ ,٢ ,٣ ,٢ ,٧) مخطط النطاق العام (سكابس) ٣٦٢
(٢ ,٢ ,٣ ,٢ ,٧) ماص ثنائي سيلينيد الجاليوم الإنديوم النحاس ٣٦٣
(٣ ,٢ ,٣ ,٢ ,٧) السطح البيني كبريتيد الكادميوم/ ثنائي سيلينيد الجاليوم الإنديوم النحاس..... ٣٦٤

(٤, ٢, ٣, ٢, ٧) الملامس *الخلفي*..... ٣٦٨
(٥, ٢, ٣, ٢, ٧) *آليات* إعادة *الاتحاد* ٣٧٠
(١, ٥, ٢, ٣, ٢, ٧) *السطح البيني* ٣٧٤
(٢, ٥, ٢, ٣, ٢, ٧) *منطقة الشحنة الحيزية* ٣٧٥
(٣, ٥, ٢, ٣, ٢, ٧) *المنطقة شبه المتعادلة*..... ٣٧٦
(٤, ٥, ٢, ٣, ٢, ٧) *الملامس الخلفي* ٣٧٦
(٤, ٢, ٧) *التوقعات* المستقبلية..... ٣٧٧
(١, ٤, ٢, ٧) سيلينيد الجاليوم الإنديوم النحاس فائق الرقة..... ٣٧٧
(٢, ٤, ٢, ٧) التركيز على ثنائي سيلينيد الجاليوم الإنديوم النحاس.... ٣٨٠
(١, ٢, ٤, ٢, ٧) مبدأ التركيز على الخلايا الشمسية ٣٨١
(٢, ٢, ٤, ٢, ٧) تجارب التركيز على ثنائي سيلينيد الجاليوم الإنديوم النحاس ٣٨٢
(٣, ٢, ٤, ٢, ٧) التركيز على خلايا الجاليوم الإنديوم النحاس الميكروية (الدقيقة) ٣٨٤
(٣, ٧) الكستريتات ٣٨٦
(١, ٣, ٧) مزايا كبريتيد سيلينيد القصديرالزنك النحاس..... ٣٨٧
(٢, ٣, ٧) الخواص البلورية والإلكتروضوئية ٣٨٩
(١, ٢, ٣, ٧) التركيب البلوري..... ٣٩٠
(٢, ٢, ٣, ٧) تشكيل العيب النقطي الذاتي..... ٣٩٣
(٣, ٢, ٣, ٧) تركيب المعدن ٣٩٤
(٤, ٢, ٣, ٧) قياس فجوة النطاق..... ٣٩٦

(٣,٣,٧) استراتيجيات الاصطناع ٣٩٦
(١,٣,٣,٧) العمليات أحادية الخطوة أو ثنائية الخطوة للأغشية الرقيقة ٣٩٦
(٢,٣,٣,٧) تشكيل كبريتيد السيلينيد القصدير الزنك النحاس ٣٩٨
(٣,٣,٣,٧) التحكم في جو التفاعل ٤٠٠
(٤,٣,٣,٧) تدرج التركيب المعدني ٤٠٣
(٥,٣,٣,٧) تدرج التركيب الكالكوجيني ٤٠٤
(٦,٣,٣,٧) الصوديوم ٤٠٥
(٧,٣,٣,٧) خواص الجهاز ٤٠٥
شكر وتقدير ٤١٣
المراجع ٤١٣

الفصل الثامن: الخلايا الشمسية العضوية المطبوعة ٤٣٧
(١,٨) المقدمة ٤٣٧
(٢,٨) المواد والمورفولوجيا ٤٤٠
(١,٢,٨) أشباه الموصلات العضوية ٤٤٢
(١,١,٢,٨) المواد المانحة الواعدة ٤٤٥
(١,١,١,٢,٨) البوليمرات المشتركة المستندة على الفلورين ٤٤٥
(٢,١,١,٢,٨) البوليمرات المشتركة المستندة على الكربازول ٤٤٨
(٣,١,١,٢,٨) البوليمرات المشتركة المستندة على السيكلوبنتا داي ثيوفين ٤٤٨

(٨,٢,١,١,٤) البوليمرات المترافقة المعدنية ٤٥٢
(٨,٢,١,٢) المواد المستقبلة الواعدة..... ٤٥٢
(٨,٢,٢) التحكم في مورفولوجيا خلايا الوصلة غير المتجانسة العضوية الجسيمة الشمسية ٤٥٤
(٨,٢,٢,١) الوزن الجزيئي وعدم التماثلية ٤٥٥
(٨,٢,٢,٢) تأثير المذيب..... ٤٥٩
(٨,٢,٢,٣) التلدين الحراري ٤٦٢
(٨,٢,٢,٤) الاعتماد التركيبي(التبعية التركيبية) للمورفولوجيا..... ٤٦٩
(٨,٢,٣) رصد المورفولوجيا..... ٤٧٥
(٨,٢,٣,١) تقنيات المسح ٤٧٥
(٨,٢,٣,٢) التخطيط ثلاثي الأبعاد للمورفولوجيا الجسيمة ٤٧٨
(٨,٢,٤) المحاكاة العددية للمورفولوجيا..... ٤٨٠
(٨,٢,٥) الأساليب البديلة للتحكم في المورفولوجيا ٤٨٢
(٨,٣) السطوح البينية في الخلايا الكهروضوئية العضوية ٤٨٥
(٨,٣,١) أصل فولطية الدائرة المفتوحة..... ٤٨٦
(٨,٣,٢) تحديد التركيب معكوس القطبية وغير المعكوس ٤٨٨
(٨,٣,٣) الفاصل البصري ٤٩٠
(٨,٣,٤) طبقة الحماية بين الإلكترود والبوليمر ٤٩٢
(٨,٣,٥) االملامس الانتقائي ٤٩٢
(٨,٣,٦) استعراض مادة السطح البيني للخلايا الكهروضوئية العضوية ٤٩٢

(٨,٣,٦,١) البوليمرات المطعمة من النوع-p ٤٩٣
(٨,٣,٦,٢) الأكاسيد المعدنية شبيهة النوع–p..... ٤٩٤
(٨,٣,٦,٣) طبقات تطعيم النوع -n ٤٩٤
(٨,٣,٦,٤) الطبقات الأحادية ذاتية التجميع ٤٩٥
(٨,٤) التقنية الترادفية ٤٩٨
(٨,٤,١) الاعتبارات النظرية ٤٩٩
(٨,٤,١,١) الخلية الشمسية أحادية الوصلة ٤٩٩
(٨,٤,١,٢) حالة محددة من الخلايا الشمسية العضوية..... ٥٠٠
(٨,٤,١,٣) الخلايا الشمسية الترادفية ٥٠٢
(٨,٤,٢) استعراض النتائج التجريبية ٥٠٨
(٨,٤,٢,١) الخلايا الشمسية العضوية الترادفية المستندة على الجزيء الصغير المبخر ٥٠٩
(٨,٤,٢,٢) الخلايا الشمسية العضوية الترادفية المعالجة بالمحلول بالكامل والهجينة ٥١٣
(٨,٤,٢,٣) الهندسة الخاصة للخلايا الشمسية الترادفية العضوية ٥١٩
(٨,٤,٣) قواعد التصميم للمانحات في خلايا الوصلة غير المتجانسة الجسيمة الترادفية الشمسية ٥٢٢
(٨,٥) متطلبات الإلكترود للخلايا الشمسية العضوية..... ٥٢٧
(٨,٥,١) المواد للإلكترودات الشفافة ٥٢٩
(٨,٥,١,١) أكسيد القصدير الإنديوم ٥٣٠
(٨,٥,١,٢) أنظمة الأكاسيد الموصلة الشفافة الأخرى ٥٣١

(٨,٥,١,٣) أنظمة الإلكترود المستندة على الشبكة ٥٣٤
(٨,٥,١,٤) البولي (٣، ٤-إثيلين داي أوكسي- ثيوفين): البولي (ستايرين سلفونات) والبوليمرات فائقة التوصيل الأخرى ٥٣٩
(٨,٥,١,٥) الجسيمات والأنابيب النانوية ٥٤١
(٨,٥,٢) المواد للإلكترودات غير الشفافة ٥٤٢
(٨,٥,٢,١) المواد المبخرة (فلوريد الليثيوم/ فضة، كالسيوم/ فضة، فضة، ذهب، .... الخ) ٥٤٣
(٨,٥,٢,٢) المواد القابلة للطباعة (معاجين الفضة، والمواد العضومعدنية،.... الخ) ٥٤٤
(٨,٦) إنتاج الخلايا الشمسية العضوية ٥٤٥
(٨,٧) الملخص والنظرة المستقبلية ٥٦٤
المراجع ٥٦٥

الفصل التاسع: خلايا الجيل الثالث الشمسية ٥٧٩
(٩,١) المقدمة ٥٧٩
(٩,٢) أساليب مستويات الطاقة المتعددة ٥٨٣
(٩,٢,١) الخلايا الترادفية ٥٨٤
(٩,٢,١,١) مترادفات المجموعة الثالثة والخامسة ٥٨٤
(٩,٢,١,٢) أنظمة المُركزات ٥٨٨
(٩,٢,١,٣) مترادفات الأغشية الرقيقة ٥٩٠

(٩,١,٣,١,٢,٩) السـليكون اللابلـوري و المترادفـات البلوريـة الدقيقـة واللابلورية ٥٩٠
(٩,٢,١,٣,٢,٩) مترادفات التراكيب النانوية السليكونية ٥٩١
(٩,٢,٢,٩) توليد الأكسيتون المتعدد..... ٥٩٨
(٩,٢,٣,٩) خلايا النطاق الوسيط الشمسية ٦٠١
(٩,٣) تعديل الطيف الشمسي..... ٦٠٣
(٩,٣,١,٩) التحويل الأدنى، الكفاءة الكمية > ١ ..... ٦٠٥
(٩,٣,١,١,٩) التحويل الأدنى المستند على اللانثانيد..... ٦٠٦
(٩,٣,١,٢,٩) توليد أوجيه العكسي ٦٠٧
(٩,٣,٢,٩) التحويـل الأعـلى لفوتونـات دون فجـوة النطـاق ٦٠٩
(٩,٣,٢,١,٩) الاقتران الأحادي-الثلاثي في الجزيئات العضوية ٦١١
(٩,٣,٢,٢,٩) اللانثانيدات لأجهزة التحويل الأعلى ٦١٥
(٩,٤) الأساليب الحرارية ٦٢٢
(٩,٤,١,٩) الخلايا الكهروضوئية الحرارية..... ٦٢٣
(٩,٤,٢,٩) الفوتونيات الحرارية ٦٢٤
(٩,٤,٣,٩) خلايا الحاملات الساخنة ٦٢٥
(٩,٥) الأساليب الأخرى..... ٦٣٤
(٩,٥,١,٩) الأجهزة اللا تبادلية..... ٦٣٤
(٩,٥,٢,٩) الضوء – الهوائيات الكمية كموجة ٦٣٥
(٩,٦) الاستنتاجات ٦٣٦
شكر وتقدير..... ٦٣٧

المراجع ٦٣٨
الملاحظات الختامية ٦٤٥
ثبت المصطلحات ٦٥١
أولاً: عربي-إنجليزي ٦٥١
ثانياً: إنجليزي-عربي ٧٠٦
كشاف الموضوعات ٧٦١