



جمهورية العراق
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الأنبار- كلية التربية للعلوم الصرفة
قسم الفيزياء

دراسة تأثير الحجم الحبيبي النانوي على نفاذية بعض انواع الطلاءات في المنطقة الطيفية فوق البنفسجية

بحث مقدم إلى

قسم الفيزياء/كلية التربية للعلوم الصرفة /جامعة الأنبار
كجزء من متطلبات نيل درجة البكالوريوس تربية في علوم الفيزياء

من قبل

هدى حميد خليفة

بإشراف

أ. د. سعيد نايف تركي الراشد

2018 م

Republic of Iraq
Ministry of Higher Education
and Scientific Research
University Of Anbar
College of Education for pure sciences
Physics Department



Effect of Nano particle Size on Transmitted of Some Coatings in Ultra-Violet Region

**A paper submitted to Physics department - College of Education for
pure Sciences University of Anbar in partial fulfillment of the
requirements for the degree of BSc. in Science Physics.**

By

Huda Hamed Khalifia

Supervised by

Prof.Dr.Saeed Naif Turki

2018 A.D .

الفصل الاول : مقدمة عامة

(1-1) المقدمة - Introduction

لقد كان التنبؤ بوجود الموجات الكهرومغناطيسية من اهم انجازات النظرية الكهرومغناطيسية الكلاسيكية عام (1864م) للعالم جيمس كلارك ماكسويل (J. C. Maxwell) والتي توقعت ان الضوء بما في ذلك اشكال اخرى من الطاقة المشعة هو اضطراب كهرومغناطيسي على شكل موجات, وفي عام (1887م) قدم الفيزيائي الالماني هاينريش هيرتز (Heinrich Rudolf Hertz) تأكيداً تجريبياً من خلال إنتاج أول موجات كهرومغناطيسية من صنع الإنسان, وقد أسفرت الدراسات اللاحقة في فهم أوسع لطبيعة الطاقة المشعة واصلها.

تتبعث الموجات الكهرومغناطيسية نتيجة لاهتزاز الشحنات الكهربائية, فالشحنة الكهربائية المهتزة ينتج عنها تغير جيبي في المجال الكهربائي الذي يستحث مجالا مغناطيسيا يتغير هو الآخر جيبياً ويستحث هذا المجال بدوره مجالا كهربائيا يتغير جيبياً وهكذا, ويكون تذبذب مركبة كل من المجالين عمودية على الاخرى وعلى خط انتشار الموجة. وتمتاز الموجات الكهرومغناطيسية بكونها موجات مستعرضة تنتشر في الفراغ بسرعة الضوء (3×10^8 m/sec) اما في الاوساط الاخرى فتقل سرعتها اعتمادا على طبيعة الوسط الذي تنتشر فيه ونوعه [1]. تدخل الموجات الكهرومغناطيسية في مختلف المجالات كالصناعة والطب والفلك والاتصالات, وتعتبر اساسا في الكثير من التطبيقات ولعل ابرزها هو انتاج الطاقة النظيفة من خلال الواح الخلايا الشمسية, اذ تعد الشمس مصدر مجاني للطاقة الكهرومغناطيسية.

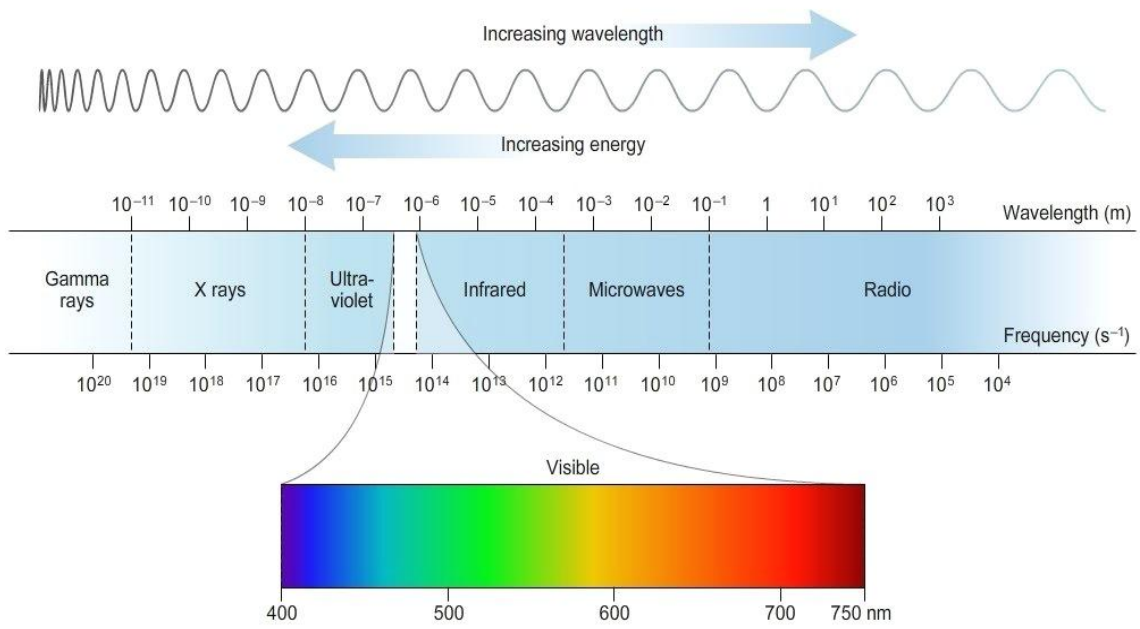
تستخدم تقنية الطلاءات البصرية (Optical Coatings Technology) لتعديل الخصائص البصرية للسطوح كزيادة انعكاسيتها للموجات الكهرومغناطيسية او تقليلها كما في المرايا والعدسات مثلا , وتستخدم كمرشحات طيفية ومستقطبات بصرية, ولم تستخدم هذه التقنية في التطبيقات الصناعية حتى القرن العشرين, باستثناء صناعة المرايا التي انتجها أول مرة عمال

الزجاج في البندقية باستخدام مزيج من القصدير والزئبق على الزجاج، واستمرت هذه الطريقة حتى القرن التاسع عشر عندما استخدمت طبقة رقيقة من الفضة على الزجاج في انتاج المرايا. لقد ادى ظهور تقنية التبخير في الفراغ (Vacuum evaporation) وتطويرها وادخالها في صناعة الطلاءات البصرية عام (1935م) بوصفها طريقة يمكن السيطرة عليها الى ادخال العديد من المواد الى النظم البصرية لتصنيع الطلاءات البصرية. اما اليوم فتستخدم تقنية الطلاءات البصرية في العديد من التطبيقات في مجال البصريات الدقيقة والالياف البصرية والاتصالات اللاسلكية والخلايا الشمسية والاجهزة الإلكترونية المتطورة، ويتم استخدام عدد كبير من المواد الكهروبصرية والبصرية واشباه الموصلات والعوازل والموصلات الفائقة في صناعة الطلاءات البصرية وهو ما يتطلب تقنيات دقيقة ومتطورة وخوارزميات لتصنيع تلك المواد كطلاءات بصرية [1,2].

ان ظهور التقانة النانوية التي تهتم بالمواد والبنى والنظم التي تبدي مكوناتها خواص فيزيائية وكيميائية وحيوية جديدة ومتغيرة عند حجمها نانوية الابعاد فتح المجال للحصول على مواد تمتلك خواص بصرية جديدة لا يمكن ان توجد مجتمعة في المواد التقليدية ويمكن استثمار هذه الخصائص في تصميم الطلاءات البصرية وتحسينها واستخدامها في التطبيقات العلمية [2].

(2-1) الاشعة فوق البنفسجية - Ultraviolet (UV)

تصنف الموجات الكهرومغناطيسية اعتمادا على ترددتها، اذ يشمل الطيف الكهرومغناطيسي مدى واسع من الترددات ويقسم الى عدة مناطق ابتداءً من اقصر طول موجي الى اطول طول موجي وهي اشعة كاما والاشعة السينية والاشعة فوق البنفسجية والضوء المرئي والموجات الدقيقة والموجات الراديوية كما في الشكل (1-1) [3].



الشكل (1-1) مناطق الطيف الكهرومغناطيسي [3].

تمتلك الأشعة فوق البنفسجية (UV) طولاً موجياً أطول من الأشعة السينية وأقصر من الأشعة المرئية بمدى من (10 nm) إلى (400 nm)، وتقع ضمن النطاق الترددي (3×10^{16} Hz - 0.75×10^{14} Hz)، وتقسم الأشعة فوق البنفسجية إلى منطقتين رئيسيتين وذلك اعتماداً على الطول الموجي وهي:

1. الأشعة فوق البنفسجية الفراغية (Vacuum Ultraviolet (VUV))

يقع مداها ضمن (10nm-200nm) وتضم الأشعة فوق البنفسجية القصوى (Extreme Ultraviolet (EUV)) والأشعة فوق البنفسجية البعيدة (Far Ultraviolet (FUV))، وسميت بالأشعة فوق البنفسجية الفراغية لأن الأوكسجين الموجود في الغلاف الجوي يمتصها بشدة لذا فالعمليات الصناعية التي تحتاج لتلك الموجات يجب أن تتم في جو خالٍ تماماً من الأوكسجين.

2. الأشعة فوق البنفسجية القريبة (Near Ultraviolet (NUV)):

يقع مداها ضمن (200 nm-400 nm) ويمكن تقسيمها إلى ثلاث مناطق فرعية وهي:

- الأشعة فوق البنفسجية A - (Ultraviolet A (UVA)) ويقع مداها ضمن (320nm-400nm).
- الأشعة فوق البنفسجية B - (Ultraviolet B (UVB)) ويقع مداها ضمن (290nm-320nm).
- الأشعة فوق البنفسجية C - (Ultraviolet C (UVC)) ويقع مداها ضمن الأشعة فوق البنفسجية الفراغية والأشعة فوق البنفسجية القريبة ويتراوح مداها في الأشعة فوق البنفسجية القريبة بين (200nm-290nm).

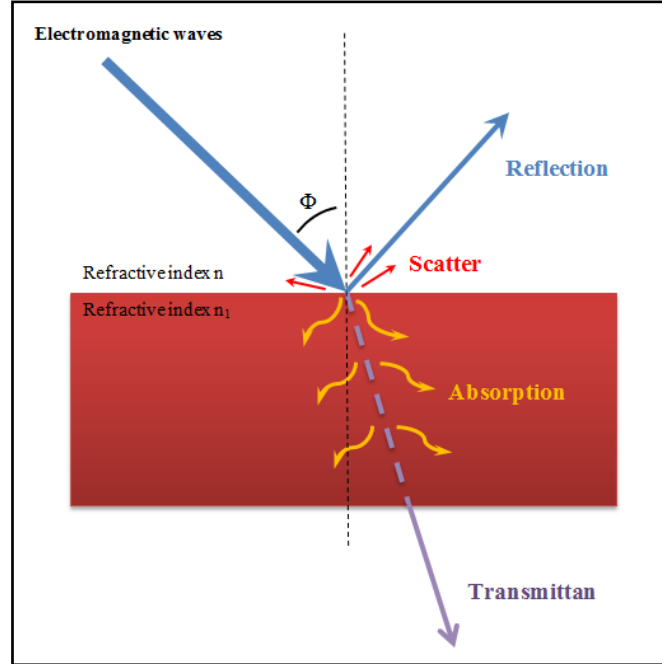
تبعث الشمس الأشعة فوق البنفسجية بجميع أطوالها الموجية وهي تشكل نسبة 8.73% تقريبا من طيف الإشعاع الشمسي المنتشرة في الفضاء, إلا أننا لا نتلقى على سطح الأرض سوى الأطول الموجية بين (290nm-400nm) منها وهي الأشعة فوق البنفسجية (UVA) و (UVB) التي تشكل 3% تقريبا من طيف الأشعة الشمسية الواصل إلينا, إذ يمتص الغلاف الجوي معظم الأشعة الكهرومغناطيسية ذات الأطوال الموجية الأقل من (290nm) [3].

للأشعة فوق البنفسجية تطبيقات في مختلف المجالات كالتصوير الفوتوغرافي والطباعة الضوئية (Photolithography) وصناعة أشباه الموصلات وتنقية المياه والطب الشرعي.

(3-1) السلوك البصري للمواد - Materials Optical Behavior

تُحدد الخصائص البصرية للمادة طبيعة السلوك البصري لها فهي تخبرنا عن كيفية تعامل المادة مع الشعاع الكهرومغناطيسي الواقع عليها. إن معرفة الثوابت البصرية للمادة كفجوة الطاقة البصرية (Optical Energy gap) ومعامل الخمود (Extinction coefficient) ومعامل الانكسار (Refractive index) هو أمر ضروري لدراسة المواد المستخدمة في التطبيقات البصرية, وعلاوة على ذلك فإن الخصائص البصرية ترتبط ارتباطا وثيقا بالتركيب الذري والجزيئي للمادة [1].

يُعرف السلوك البصري للمادة من خلال تعيين نسب كل من انعكاسية واستطارة وامتصاصية ونفاذية المادة للشعاع الكهرومغناطيسي الساقط عليها، فعند سقوط موجة كهرومغناطيسية بزاوية معينة Φ على سطح يفصل بين وسطين معامل انكسارهما (n_1, n) فإن الموجة الكهرومغناطيسية تعاني إما انعكاس (Reflection) أو استطارة (Scatter) أو امتصاص (Absorption) أو نفاذ (Transmittance) كما في الشكل (2-1) [2]:



الشكل (2-1) الانعكاس والاستطارة والامتصاص والنفاذ للموجات الكهرومغناطيسية الساقطة على المادة [2].
تعرف الانعكاسية R على أنها النسبة بين شدة الضوء المنعكس I_R وشدة الضوء الساقط I_E إذ [3]:

$$R = I_R / I_E \quad \dots\dots\dots (1-2)$$

وتعرف النفاذية T بأنها النسبة بين شدة الضوء النافذ I_T وشدة الضوء الساقط I_E حيث [14]:

$$T = I_T / I_E \quad \dots\dots\dots (1-3)$$

أما الاستطارة البصرية S فتعرف على أنها النسبة بين شدة الضوء المشارك في عملية

التشتت I_S والشدة الضوء الساقط I_E :

$$S = I_S / I_E \quad \dots\dots\dots (1-4)$$

ويمكن تعريف الامتصاصية A على أنها نسبة الشدة الممتصة I_A والشدة الساقطة I_E :

$$A = I_A / I_E \quad \dots\dots\dots (1-5)$$

نتيجة لقانون حفظ الطاقة فإنه سيكون مجموع كل من الانعكاسية R والنفاذية T والتشتت

S والامتصاص A مساوية لقيمة الواحد، وعلى فإن قانون حفظ الطاقة يكون الآتي:

$$T + R + A + S = 1 \quad \text{..... (1-6)}$$

ان هذه الكميات الأربع A, T, R, S غير مستقلة عن بعضها البعض فتحديد قيم ثلاثة

منها بدقة يمكننا من تحديد قيمة الكمية الرابعة, ومع ذلك فهي من حيث المبدأ تقاس بشكل

مستقل بعضها عن بعض. ان المجموع الجبري للامتصاص والاستطارة غالبا ما تسمى الخسارة

البصرية L:

$$L = S + A = 1 - T - R \quad \text{..... (1-7)}$$

وفي حالة كون المواد متجانسة والسطوح مستوية فإن التشتت لا يحدث وتصبح المعادلة

(1-7) كالآتي :

$$T + R + A = 1 \quad \text{..... (1-8)}$$

وعند استعمال الأغشية الرقيقة فإن الامتصاصية تهمل لأنها قليلة وذلك بسبب كون سمك

الغشاء قليل جدا. فتصبح المعادلة (1-8) كالآتي [3]:

$$T + R = 1 \quad \text{..... (1-9)}$$

(4-1) الطلاءات البصرية - Optical Coatings

للطلاءات البصرية مكانة متميزة في ميادين العلوم والتكنولوجيا فهي مهمة في

كثير من التطبيقات في علم البصريات الدقيقة والألياف البصرية والاتصالات

السلكية واللاسلكية, وتدخل أيضا في صناعة الأجهزة الالكترونية وتعد أساسا في

تصنيع الخلايا الشمسية والكواشف الكهرو بصرية.

وتستخدم الطلاءات البصرية لغرض السيطرة على مدى واسع من الشعاع

الكهرومغناطيسي وهي عبارة عن غشاء او مجموعة من الأغشية الرقيقة

(Thin Films) لمواد ذات معاملات انكسار مختلفة مرسبه على مادة أساس لغرض

التحكم في مقدار الضوء الساقط عليها وهذه السطوح البصرية

(Optical Surfaces) لها خصائص انعكاسية أو نفاذية محددة وهي تعمل على

أساس أنها مرشحات بصرية (Optical Filters), وأنواعها [4]:

- الطلاءات ذات الانعكاسية العالية (High-Reflectance Coatings).
- الطلاءات ذات الانعكاسية الجزئية (Partially Reflectance Coatings).
- مجزئة حزمة (Beam Splitter).
- الطلاءات المضادة للانعكاس (Anti-Reflection Coatings).
- مرشحات الحزمة الضيقة (Narrow Band Pass Filters).
- مرشحات الحزمة الواسعة (Wide Band Pass Filters).

يعتمد عمل الطلاءات البصرية على ظاهرة تداخل الموجات (Interference) التي تحدث بصورة عامة عندما تتلاقى موجات بنفس الطول الموجي صادرة من مصادر مختلفة في منطقة ما، وهي من الخصائص العامة للموجات وتعتمد على مبدأ تراكب الموجات (Principle of Superposition) والذي ينص على أن محصلة الاضطراب عند نقطة معينة هي مجموع الاضطرابات الناتجة عن الموجات المتلاقية، وتحدث ظاهرة التداخل في الأغشية الرقيقة نتيجة للانعكاسات المتعددة عن السطحين العلوي والسفلي للغشاء الرقيق، وتعتمد محصلة التداخل على سعة وطور الموجات المتداخلة، فإذا كان هناك فرق طور بينها بمقدار 180 درجة فإن التداخل سوف يكون تداخلاً هداماً (Destructive Interference) إذا تحقق الشرط الاتي [4]:

$$2nd \cos\theta = m\lambda$$

$$(m=1, 2, 3, \dots)$$

اذ ان: d سمك الغشاء, n معامل انكسار الغشاء, λ الطول الموجي لأشعة الساقطة, m رتبة التداخل, θ زاوية الانكسار.

وعندما تكون الموجات بنفس الطور فإن التداخل يكون بناءً

(Interference Constructive) إذا تحقق الشرط الاتي :

(7-1) الدراسات السابقة - Literature Survey

- قام الباحثان A. Ebadi و Changiz V. (2013) بدراسة تأثير الحجم الكمي (Quantum Size) على فجوة الطاقة في أشباه الموصلات, وشمل البحث حساب فجوة الطاقة لجسيمات نانو كبريتيد الزنك (ZnS) وقد اظهرت النتائج زيادة فجوة الطاقة مع نقصان الحجم [5].
- قامت الباحثة S. Khawla (2013) بتحضير جسيمات نانوية من كبريتيد الكاديوم (CdS) بطريقة كيميائية وقد استخدم تقريب الكتلة الفعالة (EMA) لحساب حجم الجسيمات والتي كانت بحجم (2.3 nm), وقد بينت نتائج حساب حجم الجسيمات توافق جيد مع النتائج المحددة من اتساع (X-Ray Diffraction) XRD [6].
- قام الباحث Brandon Giatti (2014) بمحاكاة اضافة طبقة لا عاكسة من مادة (Nanostructured ZnO) على قواعد من السيلكون, وقد اظهرت النتائج انخفاضاً في الانعكاسية بمقدار (50%) تقريباً مقارنة مع الانعكاسية عن سطح السيلكون بدون غشاء [7].
- قام الباحث Mohamed M. واخرون (2016) بتصميم وتصنيع طلاءات مضادة للانعكاس على اساس من السيلكون, وقد اظهرت النتائج النظرية انخفاض في متوسط الانعكاس الكلي من (30.4%) إلى (7.5%) للتصميم (Air/SiO/Si) للطول الموجي من (400-1100 nm), وقد اعتمد التصميم على نظرية المصفوفة المميزة [8].

(8-1) الهدف من البحث - The Aim of the Work

يهدف البحث الى دراسة التغير في الخصائص البصرية (الانعكاسية, معامل الانكسار, فجوة الطاقة) مع التغير في حجم الجسيمات النانوية للمواد

السيلكون Si واوكسيد الزنك ZnO

Introduction - المقدمة (1-2)

يتضمن الفصل أهم الأسس النظرية لتصميم طلاء مضاد للانعكاس ابتداء من معادلات ماكسويل للموجات الكهرومغناطيسية ومعادلات فيرنل للاستقطاب البصري وصولاً إلى تمثيل الغشاء الرقيق بمصفوفة مربعة ثنائية، ومن ثم شروط الطلاءات المضادة للانعكاس وحساب الانعكاسية والنفاذية لطبقة مفردة ومتعددة الطبقات بالاعتماد على حل معادلات ماكسويل للأغشية الرقيقة المتجانسة والموحدة الخواص المهمة الامتصاص. ويتضمن الفصل أيضاً دراسة للخصائص البصرية للمواد شبه الموصلة ذات التركيب النانوي تحت تأثير الحجز الكمي، ونموذج تقريب الكتلة الفعالة، وعلاقة فجوة الطاقة بمعامل الانكسار وما يرتبط به من خصائص بصرية أخرى.

Maxwell's equations - معادلات ماكسويل (2-2)

توصف المجالات الكهربائية والمغناطيسية المتغيرة مع الزمن بواسطة مجموعة من المعادلات للعالم ماكسويل عام (1873م)، والتي وضعها بناءً على مجموعة من التجارب والاشتقاقات النظرية لعدد من الباحثين، وتصف هذه المعادلات العلاقة بين المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي وتفاعل المجالين مع المادة، وتعطى المعادلات بصيغتها التفاضلية على الشكل الآتي [9]:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad \dots \dots \dots (2 - 3)$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

اذ ان:

E شدة المجال الكهربائي (Electric Field) بوحدة (V/m)

H شدة المجال المغناطيسي (Magnetic Field) بوحدة (A/m)

B كثافة الفيض المغناطيسي (Magnetic Flux Density) بوحدة تسلا (T)

ρ كثافة شحنة الفراغ (Space Charge Density) بوحدة (C/m^3)

D الإزاحة الكهربائية (Electric Displacement) بوحدة (C/m^2)

J كثافة التيار الكهربائي (Electric Current Density) بوحدة (A/m^2) .

تمثل العلاقة (2-1) معادلة ماكسويل المشتقة من قانون الحث لفراداي والذي يبين العلاقة

بين معدل تغير الفيض المغناطيسي والقوة الدافعة الكهربائية خلال مسار مغلق، وتمثل المعادلة

(2-2) قانون أمبير بعد إضافة ماكسويل لحد تيار الإزاحة إلى المعادلة، ويصف قانون أمبير

العلاقة بين المجال المغناطيسي والتيارات المنشئة له، وتمثل المعادلة (2-3) معادلة ماكسويل

المشتقة من قانون جاوس، وتمثل المعادلة (2-4) قانون جاوس للمغناطيسية والتي تعبر عن

حقيقة عدم وجود قطب مغناطيسي منفرد [9].

بالإضافة إلى المعادلات السابقة، تعطى العلاقة بين D و E ، B و H ، J و E بالشكل

الآتي [52]:

$$D = \epsilon E$$

$$B = \mu H$$

$$J = \sigma E$$

تمثل σ معامل التوصيلية الكهربائية (Electric Conductivity) بوحدة (S/m) ،

وتمثل ϵ السماحية الكهربائية وتساوي حاصل ضرب السماحية النسبية للمادة ϵ_r في سماحية

الفراغ ϵ_0 [9]:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

وتمثل μ النفاذية المغناطيسية وتساوي حاصل ضرب النفاذية النسبية للمادة μ_r في نفاذية

الفراغ μ_0 :

$$\mu = \mu_r \mu_o$$

$$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$$

كما افترض ماكسويل ان السماحية والنفاذية للفراغ ترتبط بسرعة الضوء في الفراغ من

خلال العلاقة الاتية:

$$c^2 = 1/\epsilon_o \mu_o$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

من اجل الحصول على حل معادلات ماكسويل للموجة المستوية تصبح المعادلة (2-1)

بالشكل الاتي:

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \dots$$

باستخدام الصيغة الرياضية $(\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E)$ والتعويض

بالمعادلات السابقة نحصل على المعادلة الاتية:

$$\nabla^2 E = \mu_o \sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \dots$$

بنفس الطريقة ومن خلال المعادلة (2-2) يمكن الحصول على الصيغة الاتية:

$$\nabla^2 H = \mu_o \sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \dots$$

بحل المعادلات (2-12) و(2-13) وكتابتها بصيغة تفاضلية نحصل على:

$$E(x, t) = E_o e^{i\omega t}$$

$$H(x, t) = H_o e^{i\omega t}$$

المعادلتان اعلاه تمثل موجه مستوية ذات تردد زاوي ω تنتشر على طول المحور x

بسرعة v , وتمثل E_o و H_o سعة مركبة المجال الكهربائي والمغناطيسي. بتعويض المعادلة

(2-14) بالمعادلة (2-12) يتحقق الشرط الاتي:

$$\frac{\omega^2}{v^2} = \omega^2 \epsilon \mu - i \omega \mu \sigma \dots \dots \dots (2-16)$$

في الفراغ تكون $(\sigma = 0)$ و $(c = v)$, وهذا يحقق المعادلة (2-10) وعند ضربها

بطرفي المعادلة (2-16) نحصل على الصيغة الآتية:

$$\frac{c^2}{v^2} = \frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0} - i \frac{\mu\sigma}{\omega\epsilon_0}$$

$$N^2 = \epsilon_r \mu_r - i \frac{\mu_r \sigma}{\omega \epsilon_0} \quad \dots \dots \dots (2-18)$$

$$N = \frac{c}{v} = n - ik \quad \dots \dots \dots (2-19)$$

اذ إن N معامل الانكسار المعقد (Complex Refractive Index), و n معامل

الانكسار الحقيقي (Real Refractive Index) k معامل التوهين

(Extinction Coefficient) [50].

$$N^2 = (n - ik)^2$$

من المعادلة (2-18):

$$n^2 - k^2 = \epsilon_r \mu_r$$

$$2nk = \frac{\mu_r \sigma}{\omega \epsilon_0}$$

باستخدام العلاقات $(c = \lambda f)$, $(f = \frac{\omega}{2\pi})$, $(\omega = \frac{2\pi}{\lambda} c)$, $(N = \frac{c}{v})$ تصبح المعادلة

(2-14) بالشكل الآتي:

$$E(x, t) = E_0 e^{i\omega t}$$

تمثل المعادلة (2-23) موجة خطية تنتشر على امتداد المحور x , ويمكن التعبير عن

اتجاه انتشار الموجة بدلالة وحدة المتجه \hat{u} [50]:

$$\hat{u} = \alpha \hat{i} + \beta \hat{j} + \gamma \hat{k}$$

اذ ان (α, β, γ) معاملات الجيب تمام بالاتجاهات الثلاثة, و $(\hat{i}, \hat{j}, \hat{k})$ هي وحدة المتجه

على طول المحاور (x, y, z) على التوالي.

$$E(u, t) = E_0 e^{i\omega t}$$

تمثل معادلة (2-24) انتشار الموجة وباشتقاقها بالنسبة للزمن t يمكن الحصول على

الصيغة الآتية:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = i\omega E \quad \dots$$

ومن المعادلات (2-2) و (2-5) و (2-7) و (2-25) نحصل على:

$$\nabla \times H = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

$$\nabla \times H = (\sigma + i\omega\epsilon) \vec{E}$$

في الفراغ والمواد العازلة ($\sigma = 0$) اذا:

$$\nabla \times H = i \frac{\omega N^2}{c^2 \mu} \vec{E}$$

اذ ان:

$$\nabla \times = \left[\frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \right] \times$$

حيث \times تمثل علامة الضرب الاتجاهي (Vector Product). عندما:

$$\frac{\partial}{\partial x} = -i \frac{2\pi N}{\lambda} \alpha$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = -i \frac{\omega N}{c} \beta$$

$$\frac{\partial}{\partial z} = -i \frac{\omega N}{c} \gamma$$

وهذا يؤدي الى:

$$\nabla \times H = -i \frac{\omega N}{c} \vec{E}$$

بالتعويض في المعادلة (2-26) نحصل على:

$$\hat{u} \times H = -\frac{N}{c\mu} \vec{E}$$

$$H = \frac{N}{c\mu} (\hat{u} \times \vec{E})$$

تعرف القيمة $N/c\mu$ بالسماحية البصرية المميزة للوسط
(Characteristic Optical Admittance), ويعبر عنها بالحرف y , ويمكن كتابتها بالشكل
الآتي:

$$y = \frac{N}{c\mu} = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$$

$$y = \sqrt{\epsilon_0 / \mu_r} \frac{N}{\mu_r}$$

يمكن اهمال قيمة μ_r كون التفاعلات المغناطيسية في الترددات البصرية تزول بسرعة,
وان :

$$\vartheta = \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} = 2$$

اذ ان: ϑ السماحية للفضاء الحر (Admittance of free space).

$$y = N\vartheta$$

وبذلك تصبح المعادلة (2-28) بالشكل الآتي:

$$H = y(\hat{u} \times E) = N\vartheta(\hat{u} \times E) \quad \dots \dots \dots (2 - 29)$$

(3-2) الاستقطاب - Polarization

من خصائص الموجة الكهرومغناطيسية أنها موجة مستعرضة تنتشر نتيجة تغيرات
دورية لمجالين احدهما كهربائي والاخر مغناطيسي, يتذبذبان عموديا احدهما على الاخر وعلى
اتجاه انتشار الموجة, ويتغير متجه المجال الكهربائي ومتجه المجال المغناطيسي جيّبا مع الزمن
بطور واحد, واذا تحدد اتجاه تذبذب المجال الكهربائي فقد تحدد اتجاه تذبذب المجال
المغناطيسي. عندما يكون اتجاه تذبذب المجال الكهربائي مقتصرًا على اتجاه او مستوي واحد
يقال ان الضوء مستقطب خطيا او استوائيا [10].

تعد طريقة توليد الضوء المستقطب بالانعكاس عن سطوح المواد من الطرائق الشائعة
للحصول على ضوء مستقطب, فعند سقوط حزمة موجات كهرومغناطيسية مستوية غير مستقطبة

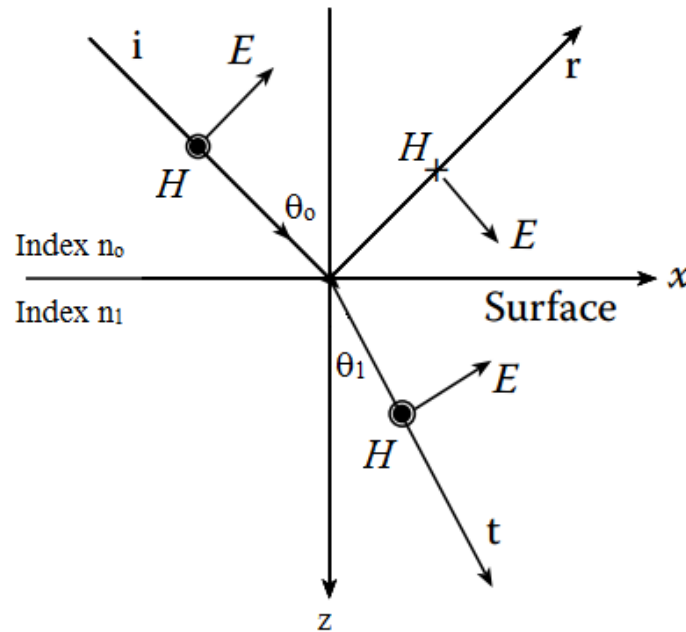
بصورة مائلة على سطح مادة متجانسة بصرياً (Optical homogeneous) وموحدة الخواص (Isotropic)، وبإهمال الامتصاص فإن جزءاً من الموجات يعاني انعكاساً والآخر ينفذ، ونتيجة للسقوط المائل فسوف يتولد نوعان من الاستقطاب هما الاستقطاب الموازي (P-Polarized Light) والاستقطاب العمودي (S-Polarized Light)، ويمكن التعبير رياضياً عن سلوك الموجة في الاستقطاب الموازي والاستقطاب العامودي من خلال معادلات فيرنل (Fresnel's Equations) والتي تعتمد في صياغتها على حلول معادلات ماكسويل للموجة المستوية، وبموجب هذه المعادلات تتحدد كمية الضوء المنعكس والنافذ من سطح المادة العازلة أو المعدن [10,9].

(1-3-2) الاستقطاب الموازي

P-Polarization or TM (Transfer Magnetic)

يكون فيه المتجه الكهربائي واقعاً في مستوى السقوط (Plane of Incidence)، كما في

الشكل (1-2):



الشكل (1-2) الاتجاهات الموجية للمتجهين الكهربائي والمغناطيسي

يعبر عن سعة مركبة المجال الكهربائي في هذا النوع من الاستقطاب بالصيغة الآتية [9]:

$$E_i \cos \theta_0 + E_r \cos \theta_1$$

أما سعة مركبة المجال المغناطيسي فيعبر عنها بالشكل الآتي، إذ أن $(H = yE)$:

$$y_0 E_i - y_0 E_r = y_t E_t$$

إذ أن: θ_0 و θ_1 زاوية السقوط وزاوية الانكسار على التوالي.

y_0 و y_t السماحية البصرية المميزة لوسط السقوط ووسط النفاذ على التوالي.

يمكن إيجاد معامل الانعكاس r_p (Reflection Coefficient) ومعامل النفاذ τ_p

(Transmission Coefficient) من خلال التعويض عن E_r ثم E_t من المعادلتين أعلاه

وبإجراء تبسيطات رياضية نحصل على [9]:

$$r_p = \frac{E_r}{E_i} = \frac{y_0 \cos \theta_1}{y_t \cos \theta_0}$$

$$\tau_p = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2 y_0 \cos \theta_1}{y_t \cos \theta_0 + y_0 \cos \theta_1}$$

وتعطى الانعكاسية بالعلاقة الآتية:

$$R_p = r_p r_p^* = \left[\frac{y_0 \cos \theta_1}{y_t \cos \theta_0 + y_0 \cos \theta_1} \right]^2$$

إذ أن r_p^* المرافق العقدي (Complex Conjugate) لمعامل الانعكاسية [10].

والنفاذية تعطى بالعلاقة الآتية:

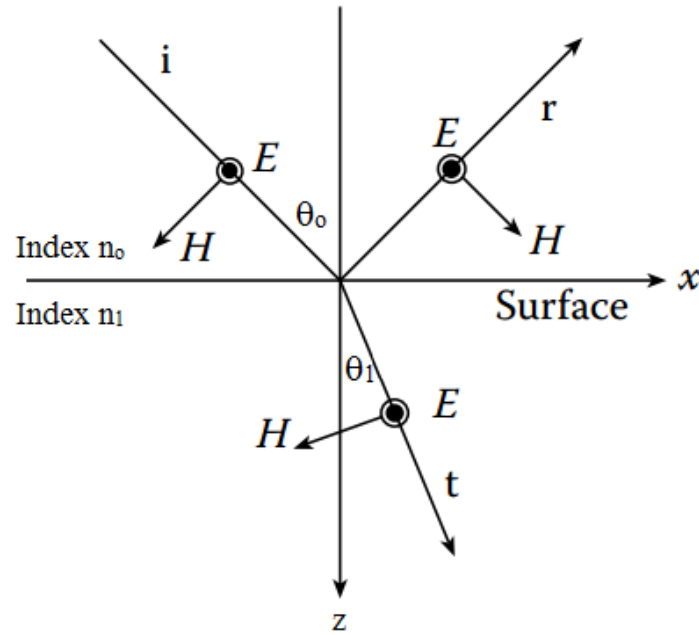
$$T_p = \left[\frac{y_t \cos \theta_0}{y_0 \cos \theta_1 + y_t \cos \theta_0} \right]^2$$

$$T_p = \left[\frac{4 y_0 y_t \cos \theta_0 \cos \theta_1}{(y_0 \cos \theta_1 + y_t \cos \theta_0)^2} \right]$$

(2-3-2) الاستقطاب العمودي

S-Polarization or TE (Transfer Electric)

يكون فيه المتجه الكهربائي عموديا على مستوى السقوط, الشكل (2-2):



الشكل (2-2) الاتجاهات الموجية للمتجهين الكهربائي والمغناطيسي

في الاستقطاب-S [9].

يعبر عن سعة مركبة المجال الكهربائي في هذا النوع من الاستقطاب بالصيغة الاتية [9]:

$$E_i + E_r = E_t$$

اما سعة مركبة المجال المغناطيسي فيعبر عنها بالشكل الاتي [9]:

$$H_i \cos \theta_0 - H_r \cos \theta_r = H_t \cos \theta_t$$

من العلاقة ($H = yE$):

$$\left. \begin{aligned} H_i &= y_o E_i \\ H_r &= y_o E_r \\ H_t &= y_t E_t \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2-38)$$

بتعويض المعادلات (2-38) بالمعادلة (2-37) نحصل على:

$$y_o E_i \cos \theta_o - y_o E_r \cos \theta_o = y_t E_t \cos \theta_t$$

وايضا يمكن إيجاد معامل الانعكاس r_s (Reflection Coefficient) ومعامل النفاذ τ_s

(Transmission Coefficient) من خلال التعويض عن E_t ثم E_r من المعادلتين

(2-36) و (2-39) وبأجراء تبسيطات رياضية نحصل على:

$$r_s = \frac{E_r}{E_i} = \frac{y_o \cos \theta_o}{y_o \cos \theta_o - y_t \cos \theta_t}$$

$$\tau_s = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2 y_o \cos \theta_o}{y_o \cos \theta_o + y_t \cos \theta_t}$$

وتعطى الانعكاسية بالعلاقة الآتية:

$$R_s = r_s r_s^* = \left[\frac{y_o \cos \theta_o}{y_o \cos \theta_o + y_t \cos \theta_t} \right]^2$$

والنفاذية تعطى بالعلاقة الآتية:

$$T_s = \frac{4 y_o \cos \theta_o}{(y_o \cos \theta_o + y_t \cos \theta_t)^2}$$

تمثل المعادلات (2-32) و (2-33) و (2-40) و (2-41) معادلات فيرنل

(Fresnel's Equations) في المواد العازلة بدلالة السماحية البصرية وزاويتي السقوط

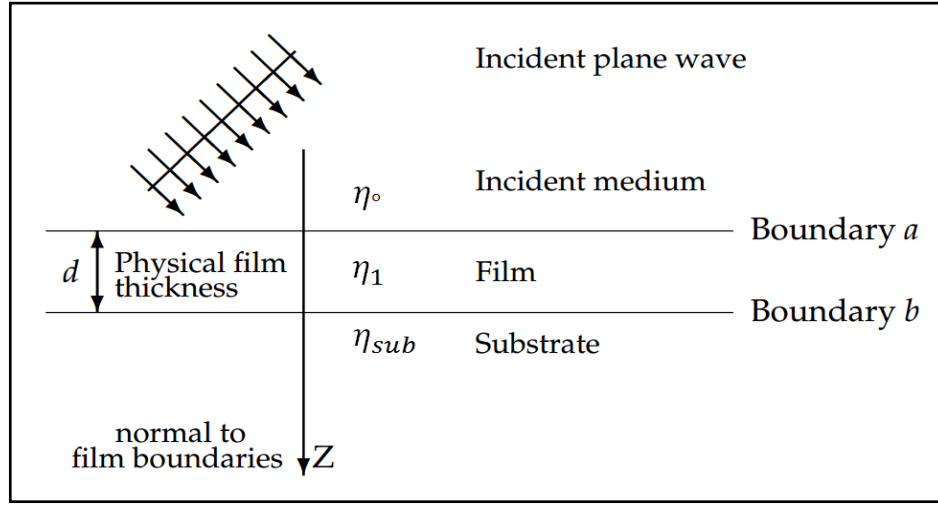
والانكسار , وتوضح هذه المعادلات العلاقة بين سعة الموجة النافذة والمنعكسة إلى سعة الموجة

الساقطة بزاوية سقوط معينة.

(4-2) المصفوفة المميزة لغشاء رقيق مفرد

The Characteristic Matrix of Single Thin Film

من خلال المصفوفة المميزة يتم تحديد السماحية البصرية لمنظومة مكونة من طبقة واحدة من غشاء رقيق مرسب على سطح مادة اساس, حيث يعد الغشاء الرقيق المفرد المكون من حدين فاصلين توسيعاً لحالة الحد الفاصل، حسب ما موضح في الشكل (3-2):



الشكل (3-2) موجة مستوية ساقطة على غشاء رقيق [10]

سنفترض هنا ان الخسارة البصرية تساوي صفر كون الاغشية الرقيقة ذات سمك قليل جدا ومتجانسة بصريا. من الشكل (3-2) عند سقوط طيف كهرومغناطيسي على الغشاء الرقيق فان جزءا منه سوف ينعكس عند الحد الفاصل (a)، والجزء المتبقي ينفذ فينعكس جزء منه ايضا عند الحد الفاصل (b)، وجزء ينفذ. وسوف نرمز لاتجاه الموجات الساقطة بالرمز (+)، واتجاه الموجات المنعكسة بالرمز (-).

يمكن تمثيل المركبات المماسية للمجالين الكهربائي والمغناطيسي عند الحد b وبإهمال معاملات الطور بالشكل الاتي [9]:

$$E_b = E_{b+} + E_{b-}$$

$$H_b = H_{b+} - H_{b-}$$

ومن خلال ($H = \eta E$) تصبح المعادلة (2-60) بالشكل الاتي:

$$H_b = \eta_1 E_{b+} - \eta_1 E_{b-} \dots \dots \dots (2-61)$$

اذ ان: E_b و H_b تمثل محصلة المركبات المماسية للمجالين الكهربائي والمغناطيسي. من المعادلتين (2-59) و (2-61) نجد ان:

$$E_{b+} = \frac{1}{2} \left(\frac{H_b}{\eta_1} + \right.$$

$$E_{b-} = \frac{1}{2} \left(-\frac{H_b}{\eta_1} + \right.$$

$$H_{b+} = \eta_1 E_{b+} =$$

$$H_{b-} = -\eta_1 E_{b-}$$

لإيجاد مركبات المجالات عند الحد الفاصل a نقوم بضرب مركبات المجالات عند الحد

الفاصل b بعامل الطور (Phase factor) قدره $(e^{i\delta})$ بالنسبة للموجات الساقطة و $(e^{-i\delta})$

للموجات المنعكسة. اذ إن δ زاوية الطور (Phase angle) وتعطى بالعلاقة الآتية:

$$\delta = 2\pi n_1 d_1 \cos\theta_1 / \lambda$$

$$E_{a+} = E_{b+} e^{i\delta} =$$

$$E_{a-} = E_{b-} e^{-i\delta} =$$

$$H_{a+} = H_{b+} e^{i\delta} =$$

$$H_{a-} = H_{b-} e^{i\delta} =$$

فتكون المحصلة مركبات المجال الكهربائي عند الحد الفاصل a بالشكل الآتي:

$$E_a = E_{a+} + E_{a-}$$

$$E_a = E_b \left(\frac{e^{i\delta} + e^{-i\delta}}{2} \right)$$

$$E_a = E_b \cos\delta$$

والمحصلة مركبات المجال المغناطيسي عند الحد الفاصل a:

$$H_a = H_{a+} + H_{a-}$$

$$H_a = E_b \eta_1 \left(\frac{e^{i\delta} - e^{-i\delta}}{2} \right)$$

$$H_a = E_b i \eta_1 \sin\delta$$

يمكن كتابة المعادلتين (2-70) و (2-71) بشكل مصفوفة بالصيغة الآتية:

$$\begin{bmatrix} E_a \\ H_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta \\ i\eta_1 \sin\delta \end{bmatrix}$$

تربط المعادلة (2-72) بين المركبات المماسية (Tangential Components) المستمرة

للمجاليين الكهربائي والمغناطيسي الساقطة على المنظومة والخارجة منها، وتعرف المصفوفة

(2×2) في الطرف الأيمن من المعادلة بالمصفوفة المميزة (Characteristic Matrix) [9].

تعطى السماحية البصرية الداخلة (Input Optical Admittance) بالشكل الآتي:

$$Y = \frac{H_a}{E_a}$$

والسماحية البصرية للقاعدة (substrate):

$$\eta_{sub} = \frac{H_b}{E_b}$$

إذا يمكن تحديد معامل الانعكاس (r) والانعكاسية (R) بدلالة السماحية البصرية على

النحو الآتي:

$$r = \frac{(\eta_0 - Y)}{(\eta_0 + Y)}$$

$$R = rr^* = \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right) \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right)^*$$

بقسمة طرفي المعادلة (2-72) على E_b نحصل على الصيغة الآتية:

$$\begin{bmatrix} E_a/E_b \\ H_a/E_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta \\ i\eta_1 \sin\delta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} E_a \\ H_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta \\ i\eta_1 \sin\delta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta \\ i\eta_1 \sin\delta \end{bmatrix}$$

ويمكن كتابتها بالصيغة الآتية:

$$Y = \frac{H_a}{E_a} = \frac{C}{B} =$$

من خلال المعادلة (2-77) او (2-78) يمكن توفير كل المعلومات المطلوبة لإيجاد قيمة الانعكاسية لنظام يتكون من غشاء رقيق مفرد مرسب على سطح مادة اساس من خلال المعادلة (2-74).

(7-2) فيزياء أشباه الموصلات ذات التركيب النانوي

Physics of semiconductor nanostructures

مازالت المواد شبه الموصلة تحظى باهتمام بالغ وذلك لاستخدامها في العديد من المجالات العلمية والصناعية, ومع التطور في تقنية دراسة وتصنيع المواد ذات البنى النانوية (Nanotechnology) فان اشباه الموصلات قد اخذت دورا رائدا في هذا المجال. تظهر أشباه الموصلات ذات البنى النانوية مجموعة متنوعة وفريدة من الخصائص البصرية والإلكترونية تختلف عن الخصائص الموجودة في المواد ذات البنى الطبيعية (Bulk Materials) [11], وان هذا التغير في الخصائص يظهر بالدرجة الاساس نتيجة لتكميم مستويات الطاقة للإلكترونات ضمن حجم محدد وهو ما يعرف بالحجز الكمي (Quantum confinement).

(1-7-2) الحجز الكمي - Quantum confinement

يمكن تعريف النقاط الكمومية (Quantum Dot) على انها نظام مادي تكون فيه الإلكترونات حبيسة في الاتجاهات الثلاثة, ويعرف هذا الحبس الإلكتروني بالحجز الكمي (Quantum confinement) وهو احد الآثار المباشرة لتقليل حجم المواد الى الحجم النانوي, اذ تصبح مستويات الطاقة للمادة منفصلة, ويظهر تأثيره من خلال تغير كثافة الحالات (Density of states) وفجوة الطاقة (Energy gap) للمادة, وبالتالي تصبح الخصائص البصرية والإلكترونية للمواد تعتمد على حجمها, ويحدث الحجز الكمي عندما تكون ابعاد بنية جسيمات المادة (Particle Structure) مساوية او اصغر من طول موجة دي برولي

(De Broglie wavelength) للإلكترون أو الفجوة [12]. كمثال على الحجز الكمي نأخذ

جسيمة شبه موصلة كروية ذات قطر $(D=2r_{ps})$, ولكي تكون نقطة كمومية

(Quantum Dot) يجب ان يكون قطرها (D) اصغر من طول موجة دي برولي (λ)

لالإلكترون أو الفجوة والتي تعطى بالعلاقة الآتية:

$$\lambda = h/p$$

اذ ان: h ثابت بلانك $(6.62 \times 10^{-34} \text{ J.s})$, و p الزخم (Momentum) ويساوي

$$p = \hbar k_B / 2\pi$$

تعطى معادلة الطاقة الحركية للإلكترون بالصيغة الآتية:

$$E = \left(\frac{2}{3}\right) k_B T =$$

اذ ان: E الطاقة الحركية للإلكترون, k_B ثابت بولتزمان $(1.38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1})$,

T درجة الحرارة, $m_{e,h}$ كتلة الإلكترون أو الفجوة.

من خلال المعادلة (2-105) وعند اعتبار ان الكتلة الفعالة للإلكترون (m) تساوي كتلته

في الفضاء الحر $(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})$ نجد ان $(\lambda \approx 6 \text{ nm})$ عند درجة حرارة الغرفة

(300K) , وهذا يعني ان جسيمات المادة الكروية التي يكون قطرها D اقل من (6 nm) تضغط

حزم موجة الالكترونات أو الفجوات في حيز اصغر مما يجب ان تكون فيه عادة, لذلك فان

الالكترون سوف يحتاج الى طاقة اكبر لإثارته, ان المثال اعلاه لا يأخذ بالحسبان ان كتلة

الإلكترون m_e وكتلة الفجوة m_h ليستا في الحقيقة الكتلتين في الفضاء الحر التي نعرفهما, انما

هي الكتلتان الفعالتان.

يمكن ان يكون الحجز الكمي في بعد واحد (One dimension) اي يسمح للإلكترونات

أو الفجوات بالانتشار في بعد واحد فقط وتقيد حركتها في البعدين الآخرين وتعرف بالأسلاك

الكمومية (Quantum wires), ويمكن ان يكون ثنائي البعد (Two dimensions) اي

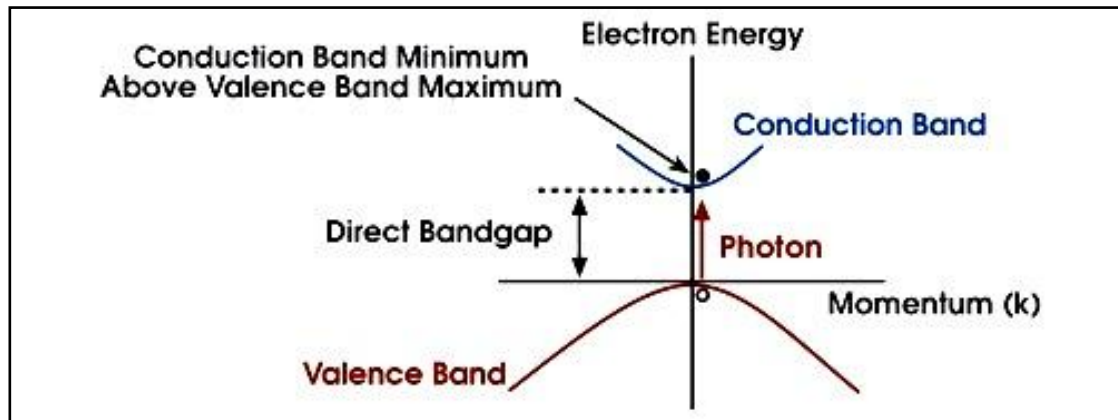
يسمح للإلكترونات أو الفجوات بالانتشار في بعدين وتقيد حركتها في البعد الثالث وتعرف ببئر

الطاقة الكمومية (Quantum wells), اما في حالة النقاط الكمومية (Quantum dots)

فيوصف النظام بانه صفري الأبعاد (Zero dimensional) [12].

(2-7-2) فجوة الطاقة - Energy gap

تمتلك الذرة شبه الموصلة عدد من الكترونات في الغلاف الخارجي والتي تتوزع في مستويات طاقة متقاربة نتيجة لمبدأ باولي للاستثناء (Pauli exclusion principle) الذي ينص على ان كل مستوى من مستويات الطاقة يمكن ان يستوعب الكترينين فقط يكونان مختلفين في اتجاه البرم (Spin) [66], ونتيجة لتقارب الذرات تشكل المستويات الفردية لذرات المادة مجموعة مستمرة من مستويات الطاقة تعرف بحزم الطاقة والتي تمثل النظام بأكمله, عندما تكون درجة الحرارة تساوي صفر ($T=0^{\circ}k$) تكون هذه الحزم اما مملوءة تماما بالإلكترونات وتعرف بحزمة التكافؤ (Valence band) او تكون فارغة تماما وتعرف بحزمة التوصيل (Conduction band), ويفصل بين حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل فجوة الطاقة (Energy gap), وتمثل الفرق في الطاقة بين اعلى حزمة التكافؤ واسفل حزمة التوصيل [13]. تكون فجوة الطاقة في المواد شبه الموصلة اما مباشرة (Direct Energy gap) او غير مباشرة (Indirect Energy gap), ففي أشباه الموصلات ذات فجوة الطاقة المباشرة تكون الالكترونات في اعلى حزمة التكافؤ بنفس الزخم (k) للفجوات في ادنى حزمة التوصيل كما في الشكل (5-2) حيث يكون احتمال انتقال الالكترون بين الحزمتين مرتفع ويكون الزخم محفوظ ($\Delta k = 0$).



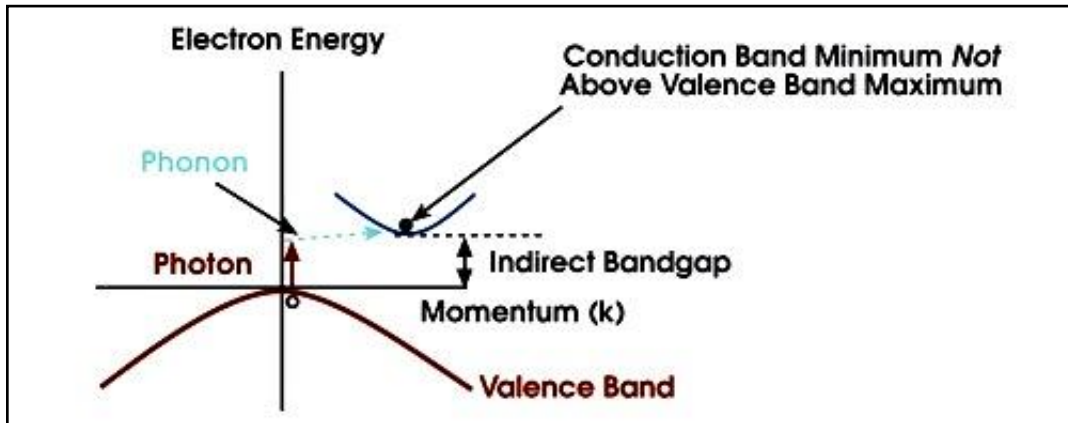
الشكل (5-2) فجوة الطاقة المباشرة في المادة شبه الموصلة [13].

ان انتقال الالكترون من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل وتكوين زوج الكترون-فجوة يتطلب الحصول على طاقة, ويمكن توفير هذه الطاقة من فوتون الاشعة الكهرومغناطيسية والذي يمتلك طاقة تساوي (hv) يمكن التعبير عنها بالشكل الاتي [13]:

$$hv(eV) = \frac{hc}{\lambda} =$$

اذ ان: h هو ثابت بلانك, ν تردد الاشعة الكهرومغناطيسية, c سرعة الضوء في لفرغ, λ الطول الموجي للأشعة الكهرومغناطيسية.

عندما تكون طاقة الفوتون (hv) اكبر من فجوة الطاقة (E_g) فانه يمكن لإلكترون من حزمة التكافؤ ان يمتص طاقة مساوية لفجوة الطاقة وينقل الى حزمة التوصيل مولد زوج الكترون-فجوة وتتبدد الطاقة الزائدة على شكل حرارة, اما اذا كانت طاقة الفوتون (hv) اصغر من فجوة الطاقة (E_g) فانه لا يحدث امتصاص وبالتالي عدم توليد زوج الإلكترون-فجوة. اما في أشباه الموصلات ذات فجوة الطاقة غير المباشرة فان زخم الالكترونات في اعلى حزمة التكافؤ و زخم الفجوات في ادنى حزمة التوصيل يكونان مختلفين كما في الشكل (2-6), اي ان الالكترون يجب ان يغير زخمه ليكون انتقاله ممكنا .



الشكل (6-2) فجوة الطاقة غير المباشرة في المادة شبه الموصلة [13].

وهذا يعني ان الالكترون يجب ان يمتلك طاقة اكبر من فجوة الطاقة $(E_g = hv)$ لحدوث الانتقال, ومن الممكن الحصول على الطاقة الاضافية والازمة لتغيير زخم الالكترون من خلال

الاهتزازات الحرارية للشبيكة البلورية اي ال Phonon, والذي يمتلك طاقة منخفضة مقارنة بطاقة الفوتون العالية, ان مشاركة ال Phonon في عملية انتقال الإلكترونات في أشباه الموصلات الغير مباشرة يقلل من احتمال حدوث الانتقال, وبالتالي تقليل احتمال امتصاص الفوتونات.

عندما يصبح نصف القطر (r_{ps}) لجسيمات المادة شبه الموصلة مساويا او اصغر من نصف قطر بور الطبيعي للـ Exciton (مستوى طاقة المقيد للإلكترون أو فجوة) يبدأ تأثير الحجز الكمي (Quantum confinement), اذ تصبح مستويات الطاقة منفصلة وتزداد فجوة الطاقة مع تناقص حجم جسيمات المادة (Particle size). وهذا يفسر سبب الارتباط الوثيق للخصائص البصرية والالكترونية بحجم الجسيم في أشباه الموصلات ذات الابعاد النانوية.

(3-7-2) نموذج تقريب الكتلة الفعالة - Effective Mass Approximation (EMA)

هناك عدد من النماذج النظرية التي تستخدم لفهم اعتماد قيمة فجوة الطاقة في النقاط الكمومية لأشباه الموصلات على حجم الجسيم (Particle size), واكثر هذه النماذج استخداما هو (Brus model) او ما يعرف بنموذج تقريب الكتلة الفعالة (EMA), وهذا النموذج يأخذ بنظر الاعتبار قيمتي كل من الكتلة الفعالة للإلكترون والفجوة والتي تتغير من مادة الى اخرى, ووفق هذا النموذج فان قيمة التغير في فجوة الطاقة للنقاط الكمومية (ΔE_g) يعطى وفق معادلة (Brus) بالصيغة الاتية [14]:

$$\Delta E_g = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2r_{ps}^2} \left[\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right]$$

حيث ان: r_{ps} نصف قطر الجسيمة بوصفها نقطة كمومية كروية الشكل, m_e^* الكتلة الفعالة (Effective mass) للإلكترون, m_h^* الكتلة الفعالة للفجوة, ϵ السماحية النسبية او ما يعرف بثابت العزل الكهربائي.

$$\Delta E_g = E_g^{nano}(r_{ps}) - E_g^{bulk} \quad \text{وايضا:}$$

تمثل E_g^{bulk} فجوة الطاقة للمادة بالحجم الطبيعي (Bulk Energy gap).

$E_g^{nano}(r_{ps})$ فجوة الطاقة للمادة في النقاط الكمومية (Quantum dots) وتعرف بفجوة الطاقة

الفعالة (Effective Energy gap). وبالتالي تصبح المعادلة (2-107) بالصيغة الآتية :

$$E_g^{nano}(r_{ps}) = E_g^{bu}$$

نلاحظ من الحد الثاني في الطرف الايمن للمعادلة (2-108) ان فجوة الطاقة تتناسب

عكسياً مع r_{ps}^2 اي ان فجوة الطاقة تزداد بنقصان حجم الجسيم للمادة، ومن الحد الثالث نلاحظ

ان فجوة الطاقة تتناقص مع تناقص r_{ps} وذلك بسبب زيادة قوة التفاعل الكولومي

(Columbic interaction)، ويمثل الحد الاخير الارتباط بين جزيئتين. ان الحدين الثالث

والاخير صغيران جداً مقارنة بالحد الثاني لذلك يمكن ان تهمل، فتصبح المعادلة (2-108)

بالشكل الآتي:

$$E_g^{nano}(r_{ps}) = E$$

وبالتالي نتوقع ازدياد فجوة الطاقة مع تناقص حجم الجسيم نتيجة لتأثير الحجز الكمي

الذي يكون كبيراً خصوصاً عندما يصبح نصف قطر الجسيمات المادة r_{ps} مساوياً او اصغر

من نصف قطر بور الطبيعي للـ Exciton (α_0)، والذي يعطى بالعلاقة الآتية [14]:

$$\alpha_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_r\hbar^2}{e^2}$$

حيث ان: ϵ_0 و ϵ_r السماحية الكهربائية للفراغ والمادة الشبه موصلة على التوالي، e شحنة

الالكترون.

(4-7-2) معامل الانكسار (n) - Refractive index

يتم تحديد الخصائص البصرية للمادة من خلال معامل الانكسار الخاص بها، ويعطى

لوسط ما من خلال العلاقة الآتية:

$$n = \frac{c}{v} \quad \dots \dots$$

تمثل c سرعة الضوء في الفراغ ($3 \times 10^8 \text{ m/sec}$), v سرعة الضوء في الوسط.

في الوسط المتجانس موحد الخواص تكون قيمة معامل الانكسار واحدة لأي نقطة في

جميع الاتجاهات وللاستقطابين العمودي والموازي [14].

تتغير قيمة معامل الانكسار المادة بتغير الطول الموجي للضوء الساقط, الا ان هذا التغير

يكون قليل جدا, وينتج بسبب تغير سرعة الموجات في المادة نتيجة اختلاف تفاعل المادة مع

الاشعة تبعا لترددتها. وان تغير درجة الحرارة يسبب ايضا تغير طفيف جدا في معامل الانكسار.

يرتبط معامل الانكسار ارتباطا وثيقا بفجوة الطاقة E_g للمادة, وقد بذلت محاولات عديدة

لإيجاد صيغ رياضية تربط معامل الانكسار بفجوة الطاقة, كالعلاقات البسيطة الآتية:

$$n = \alpha + \beta E_g$$

اذ ان: ($\alpha = 4.048$) و ($\beta = -0.62 \text{ eV}^{-1}$).

تعد هذه المعادلة مستقلة عن درجة الحرارة, ونلاحظ من خلالها ان قيمة معامل الانكسار

تقل بزيادة فجوة الطاقة, وبالرجوع الى المعادلة (109-2) يمكننا القول ان معامل الانكسار للنقاط

الكمومية يتناقص مع تناقص الحجم.

كما جرى اقتراح العلاقة التجريبية الآتية [14]:

$$n = \sqrt{1 + \left(\frac{A}{E_g} \right)^2}$$

اذ ان: ($A = 13.6 \text{ eV}$), ($B = 3.4 \text{ eV}$).

ويمكن ايضا ربط معامل الانكسار بفجوة الطاقة من خلال الصيغة الرياضية الآتية [79]:

$$n^2 - 1 = \frac{A}{(E_g + B)}$$

اذ ان: ($A = 25E_g + 212$), ($B = 0.21E_g + 4.25$).

الفصل الثالث : الجزء العملي

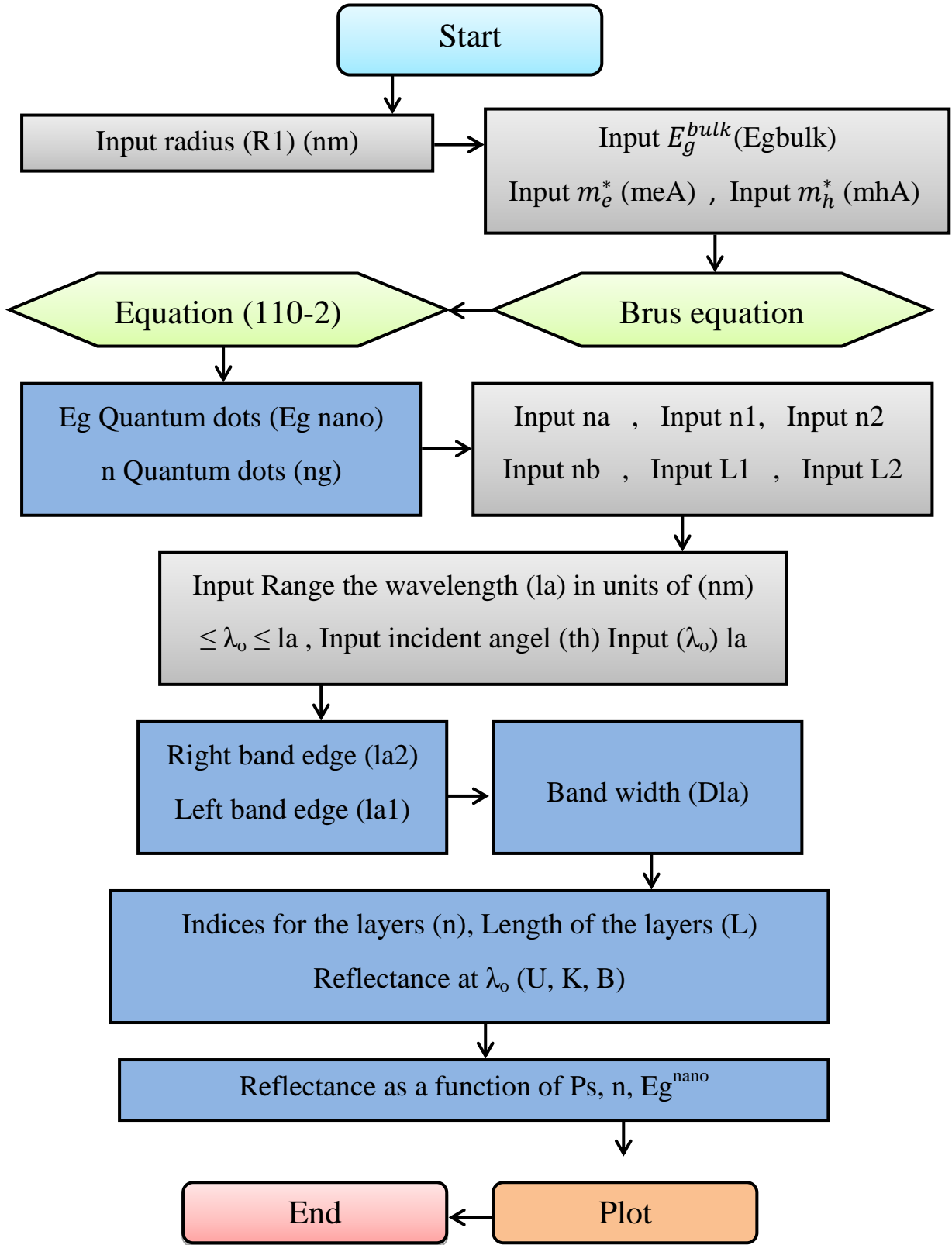
Introduction – المقدمة (1-3)

يتضمن الفصل دراسة لتغير الخصائص البصرية بوصفها دالة لتغير حجم الجسيم (Particle size) لمادة السيلكون (Si) واوكسيد الزنك (ZnO) ، ضمن المدى (300-400 nm) من الطول الموجي للأشعة فوق البنفسجية، وذلك من خلال تصميم برامج حاسوبية بلغة ماتلاب النسخة (10) الموضح لاحقا .

Simulation Program – المحاكاة (2-3)

اصبح استخدام المحاكاة الحاسوبية امرا ضروريا في تصميم وتحليل الانظمة البصرية كالخلايا الشمسية والكواشف البصرية وغيرها وذلك بسبب الاليات الفيزيائية المعقدة التي تتحكم بالأجهزة البصرية ، كما وان تحسين كفاءة هذه الانظمة يكون في كثير من الاحيان مكلفا ويتطلب بذل مزيد من الجهود في مجال التصنيع [15], لذلك اصبحت برامج المحاكاة اداة فعالة في قياس الخسار البصرية وتقليلها من خلال تصميم وتحسين اداء الطلاءات لمختلف الانظمة البصرية.

يعد برنامج المحاكاة الحاسوبية (MATLAB) لشركة Mathworks من البرامج الرائدة في التطبيقات الهندسية والرياضية، اذ يسمح هذا البرنامج بالتلاعب حسابياً بالمصفوفات، كما ويمكنه رسم التوابع الرياضية بيانياً، وتنفيذ الخوارزميات المختلفة، وإنشاء واجهات المستخدم الرسومية، والتواصل مع البرامج المكتوبة بلغات أخرى، بما في ذلك C، ++C، جافا، وفورتران. وفي هذه الدراسة تصميم عدد من البرامج الحاسوبية بلغة (MATLAB) النسخة 10، حيث تم تصميم برنامج حاسوبي لقياس قيم الانعكاسية ومعامل الانكسار وفجوة الطاقة كدالة لتغير حجم الجسيم، وكما موضح في المخطط (1) :



Flow chart (1). A schematically station of the different part of the program to calculate the reflectivity, refractive index and Energy gap as a function of particle size at λ_0 .

(3-3) انعكاسية المواد البصرية المستخدمة دالة للتغير في حجم الجسيم

في هذا البند تم دراسة انعكاسية المواد شبه الموصلة (Si, ZnO) الغير مطلية كدالة

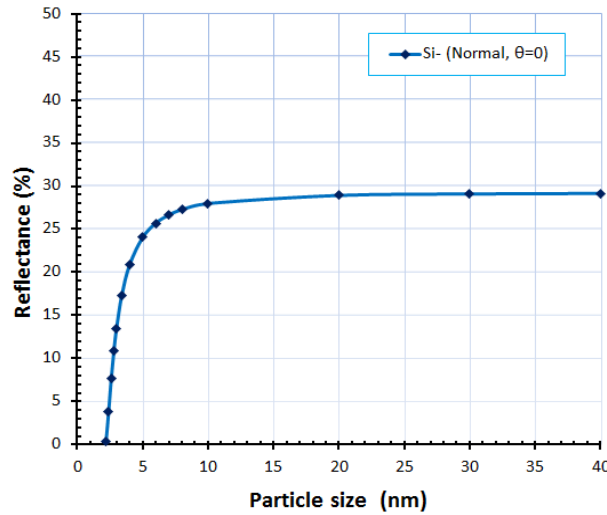
لحجم الجسيم (Particle size (Ps))

والجدول (2-3) يوضح الخصائص المطلوب توفرها لإجراء هذه الدراسة.

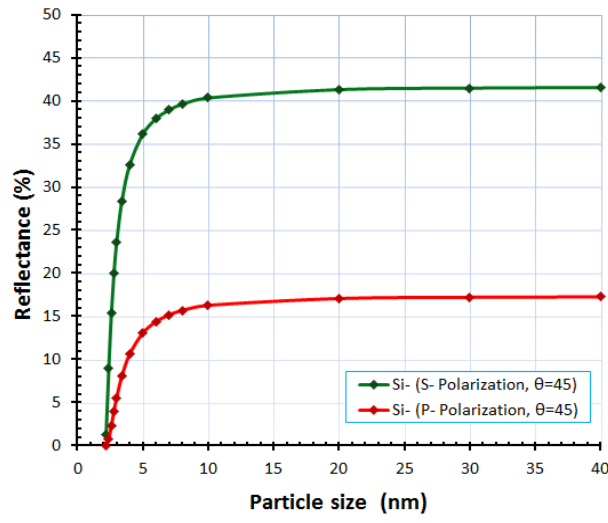
الجدول (1-3) بعض الخصائص الفيزيائية للمواد البصرية المستخدمة [15].

المادة Material	معامل الانكسار Refractive Index	فجوة الطاقة E_g^{bulk} (eV)
Si	3.44	1.12
ZnO	2	3.3

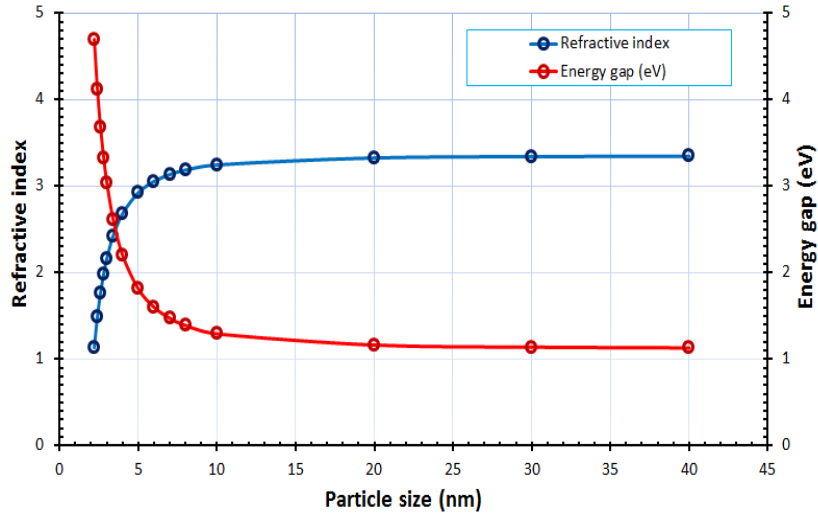
1. انعكاسية السيلكون (Si) دالة للتغير في حجم الجسيم (Particle size):



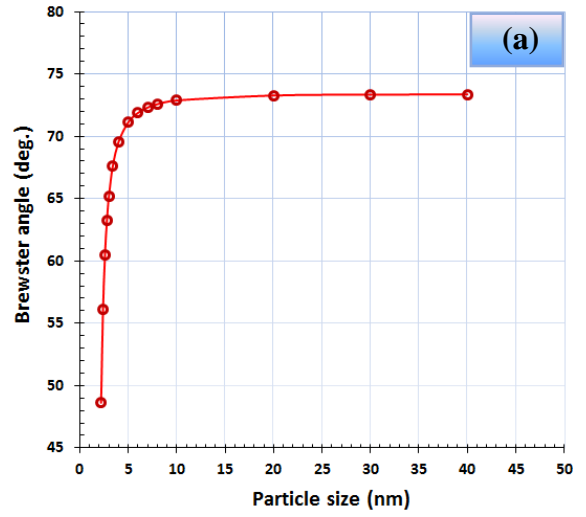
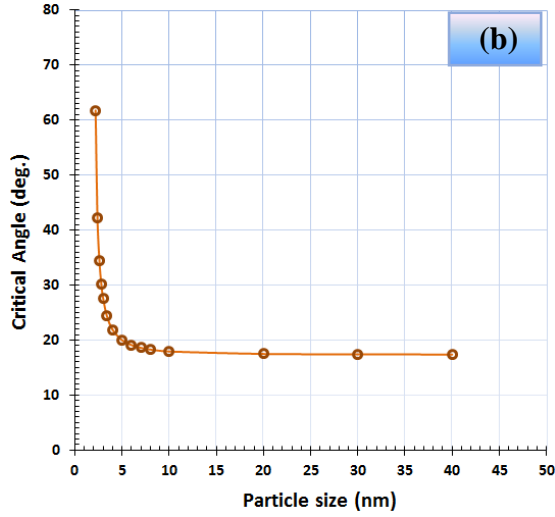
شكل (1-3) تغير انعكاسية Si دالة للتغير في حجم الجسيم في حالة السقوط العمودي.



شكل (2-3) تغير انعكاسية Si دالة للتغير في حجم الجسيم عند زاوية سقوط 45° .

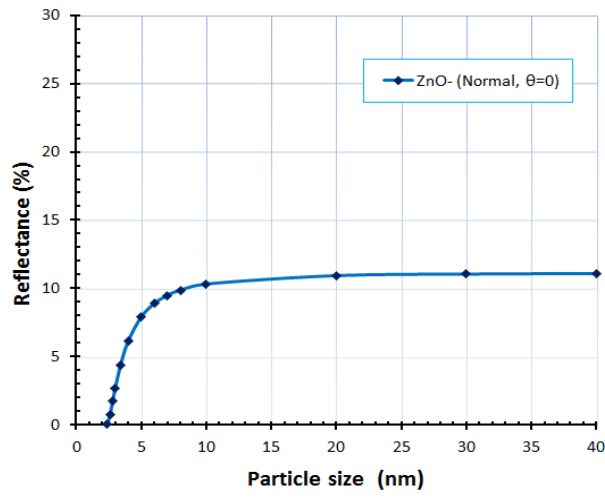


شكل (3-3) تغير معامل انكسار وفجوة طاقة Si دالة للتغير في حجم الجسيم.

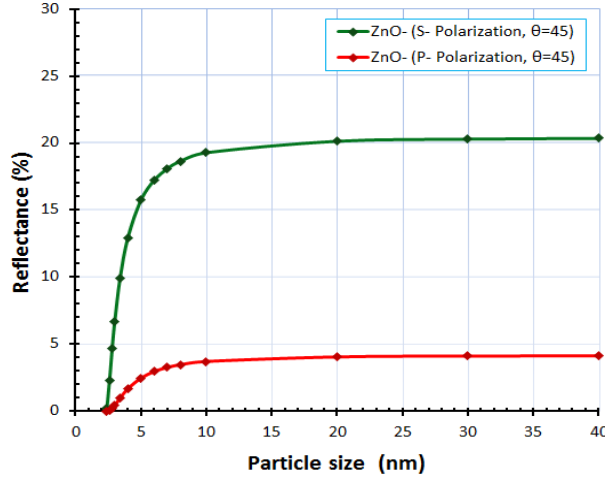


شكل (4-3) (a) تغير زاوية بروستر Si دالة لتغير حجم الجسيم.
(b) تغير الزاوية الحرجة Si دالة لتغير حجم الجسيم.

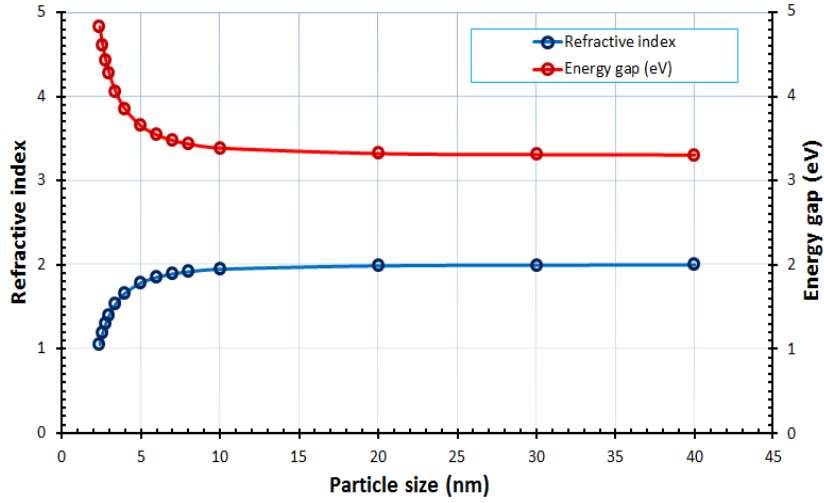
2. انعكاسية اوكسيد الزنك (ZnO) دالة للتغير في حجم الجسيم:



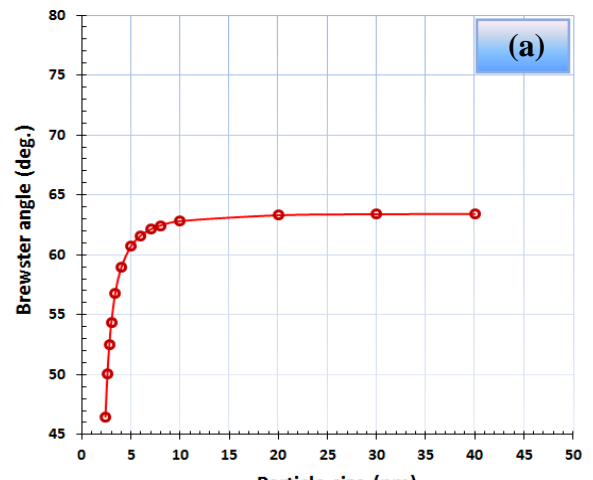
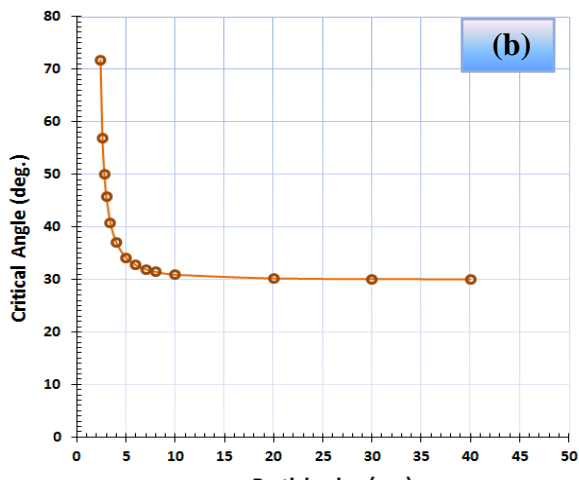
شكل (5-3) تغير انعكاسية ZnO دالة للتغير في حجم الجسيم في حالة السقوط العمودي.



شكل (6-3) تغير انعكاسية ZnO دالة للتغير في حجم الجسيم عند زاوية سقوط 45° .



شكل (7-3) تغير معامل انكسار وفجوة طاقة ZnO دالة للتغير في حجم الجسيم.



شكل (8-3) (a) تغير زاوية بروسر ZnO دالة لتغير حجم الجسيم.
(b) تغير الزاوية الحرجة ZnO دالة لتغير حجم الجسيم.

(4-3) المناقشة :

تم اختيار حجم جسيمات المادة ضمن المدى (2.2-50nm) حيث تسلك معظم المواد شبه الموصلة سلوكاً بصرياً مشابهاً عند تناقص حجم جسيمات المادة عن الحجم الطبيعي (Bulk Size), ويحدث التغير في قيمتي فجوة الطاقة ومعامل انكسار المادة, حيث تزداد قيمة فجوة الطاقة للمادة وتتناقص قيمة معامل الانكسار لها, ويكون هذا التغير قليلاً جداً حتى يصبح نصف قطر الجسيم للمادة r_{ps} مساوي أو أصغر من نصف قطر بور للـ Exciton (α_0), فتبدأ عندها قيمة التغير في هذه الخصائص بالازدياد بشكل ملحوظ مع تناقص حجم الجسيم وذلك نتيجة لازدياد تأثير الحجز الكمي (Quantum confinement). ان تناقص معامل الانكسار بتناقص حجم الجسيم يؤدي الى التغير في قيم الخصائص البصرية الأخرى فمثلاً تقل انعكاسية المادة للشعاع الكهرومغناطيسي

ان تناقص معامل الانكسار بتناقص حجم الجسيم يؤدي الى التغير في قيم الخصائص البصرية الأخرى فمثلاً تقل انعكاسية المادة للشعاع الكهرومغناطيسي.

(5-3) الاستنتاجات والمشاريع المستقبلية

Conclusions and Future Projects

(1-5-3) الاستنتاجات – Conclusions

يمكن تلخيص أهم الاستنتاجات لهذه الدراسة بما يأتي:

1. ان الخصائص البصرية للمواد شبه الموصلة تكون شديدة الارتباط بحجم الجسيم (Particle size) عندما يصبح نصف قطر جسيم المادة مساوياً أو أصغر من نصف قطر بور للـ Exciton وذلك بسبب تأثير الحجز الكمي, اذ تزداد فجوة الطاقة للمادة

وينخفض معامل انكسارها بانخفاض حجم الجسيم، وهذا يؤدي الى انخفاض انعكاسية

المواد مع انخفاض حجم الجسيم لها.

2. تعد الطلاءات المضادة للانعكاس ذات الطبقة المفردة اقل كفاءة من الطلاءات ذات

الطبقتين أو أكثر وذلك لصعوبة الحصول على مواد تحقق شروط الحصول على

الانعكاسية الصفريّة للطبقة المفردة، وان استخدام مواد ذات حجوم نانوية كطلاءات بصرية

مضادة للانعكاس تخطت هذا النقص في كفاءة الطلاءات ذات الطبقة المفردة.

3. في حالة السقوط المائل تحدث ازاحة جانبية في الطول الموجي المركزي لحزم الانعكاس

للاستقطاب العمودي S والموازي P نحو الاطوال الموجية القصيرة ويمكن تفسير ذلك

بسبب تناقص السمك البصري للطلاء عند زيادة زاوية السقوط والذي يعتمد على معامل

الانكسار الفعال والذي بدوره يعتمد على زاوية السقوط. كما انه في حالة السقوط المائل

فان قيمة الانعكاسية للاستقطاب العمودي R_s والانعكاسية للاستقطاب الموازي R_p تتغير

بقيم مختلفة بتغير زاوية السقوط والطول الموجي ويكون هذا الاختلاف ناتج عن تعريف

السمحية البصرية للمنظومة والتي تؤثر في قيم انعكاسية التصميم المحسوبة للاستقطابين.

(2-5-3) المشاريع المستقبلية – Future Projects

1. دراسة تأثير الحجم الحبيبي النانوي لمواد اخرى على الانعكاسية ضمن المنطقة الطيفية

تحت الحمراء القريبة.

2. دراسة تأثير الحجم الحبيبي النانوي على الانعكاسية والنفذية في مناطق مختلفة للطيف

الكهرومغناطيسي.

المصادر

- [1] سلوان كمال جميل, بتول درعم بلاوه "مبادئ البصريات" دار الحكمة, جامعة بغداد, (1991).
- [2] علي سكاف, "المدخل الى الالكترونيات النانوية علم وهندسة وتطبيقات" (ISBN:139789953824437), سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة, المنظمة العربية للترجمة, (2011).
- [3] O. Stenzel, "The Physics of Thin Film Optical Spectra" ISBN: 09315195, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, (2005).
- [4] H.G. Rasheed, "Design and Optimization of Thin Film Optical Filters with Applications in Visible and Infrared Regions", Ph.D. Thesis, Al-Mustansiriyah University, (1996).
- [5] Changiz Vatankhah and Ali Ebadi, "Quantum Size Effects on Effective Mass and Band gap of Semiconductor Quantum Dots" Research Journal of Recent Sciences, Vol. 2, No. 1, pp.21-24, (2013).
- [6] Khawla S. khashan, "Synthetic, Structural and Optical Properties of CdS Nanoparticles Prepared by Chemical Method" Engineering & Technology Journal, Vol. 31, No. 1, pp. 39-48, (2013).
- [7] Brandon Giatti, "Optical Properties of Nanostructured Dielectric Coatings" M.Sc. Thesis, Portland State University, USA, (2014).
- [8] Mohamed Medhat, El-Sayed El-zaiat, Samy Farag, Gamal Youssef, Reda Alkhadry, "Enhancing silicon solar cell efficiency with double layer antireflection coating" Turkish Journal of Physics, No. 40, pp. 30-39, (2016).
- [9] حسن محمد جواد الشربتي, بتول حميد فرج الخياط, صبحي كمال حسون, "البصريات الفيزيائية", جامعة بغداد, رقم التسجيل لدى دار الكتب والوثائق العراقية (545717), (1982).
- [10] Michael Bass, "Handbook of Optics: Fundamentals, techniques, and design" Second Edition, ISBN: 9780070477407, McGraw-Hill Education, (1995).
- [11] Ulrike Woggon, "Optical Properties of Semiconductor Quantum Dots" ISBN: 9783540609063, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, (1997).
- [12] Guozhong Cao, "Nanostructures and Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Applications" ISBN: 9781783260881, Imperial College Press, (2004).
- [13] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, "Fundamentals of photonics" ISBN: 9780471839651, John Wiley & Sons, Inc, (1991).
- [15] Wisam J. Aziz, "Simulation, Fabrication and Characterization of multilayer coating solar cells" Ph.D. Thesis, Universiti Sains Malaysia, (2011).