

الباب الثاني عشر

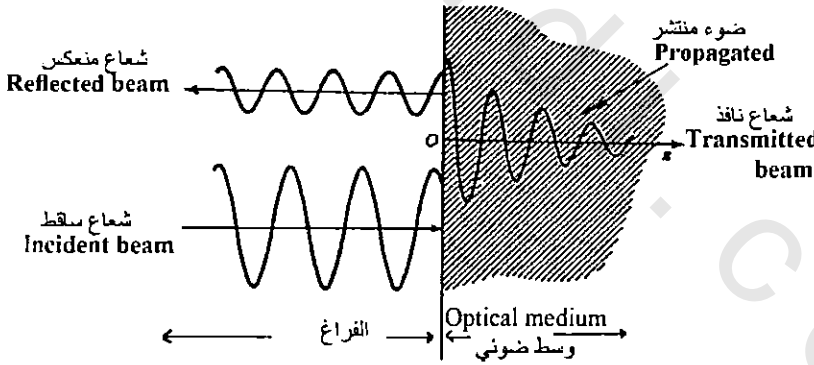
الخصائص الضوئية للجوامد

Optical properties of solids

الظواهر والمعاملات الضوئية

Optical phenomena and coefficients

يصاحب سقوط الضوء على الوسط الضوئي عدد من الظواهر الضوئية تشمل الانعكاس (Reflection)، الانكسار (Refraction)، الامتصاص (Absorption)، النفاذية (Transmission). شكل (12-1) يعطي تصورا لهذه الظواهر، حيث عند سقوط الضوء على الوسط ينعكس جزء من سطحه الأمامي ويتغلغل الجزء الباقي وينتشر خلال الجسم متعاملا مع مكوناته، فإذا وصل إلى سطحه الخلفي ينعكس أو ينفذ جزئياً أو كلياً، الأمر الذي يعتمد على طبيعة المادة وخصائصها الضوئية.



شكل (12-1): الظواهر الضوئية المصاحبة لسقوط الضوء على الوسط.

وتقاس هذه الظواهر بواسطة بعض البارامترات (المعاملات) التي تحدد الخصائص الضوئية للوسط، فمثلاً:

يتصف الانعكاس بمعامل يسمى معامل الانعكاس (Reflection Coefficient)

أو الانعكاسية (Reflectivity) ويرمز لها عادة بالرمز \mathcal{R} . ويعرف معامل الانعكاس بأنه النسبة بين الطاقة الضوئية المنعكسة إلى الطاقة الساقطة. وتتصف النفاذية (Transmission) بمعامل النفاذية (Transmission Coefficient) أو الإنفاذية (Transmissivity) ويرمز لها بالرمز T . وتعرف بأنها النسبة بين الطاقة الضوئية النافذة إلى الطاقة الضوئية الساقطة. فإذا لم يوجد امتصاص، فإنه طبقاً لمبدأ حفظ الطاقة يكون مجموع العاملين T & \mathcal{R} مساوياً للوحدة.

$$\text{i.e.} \quad \mathcal{R} + T = 1 \quad (12-1)$$

أما التغلغل (Propagation) للشعاع الضوئي في الوسط الشفاف أو المنفذ (Transparent) فإنه يتصف بمعامل الانكسار (Refractive index)، حيث يعرف بأنه النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ إلى سرعته في الوسط.

$$\text{i.e.} \quad n = \frac{c}{v} \quad (12-2)$$

وتعتمد قيمة n على تردد الشعاع الضوئي، ويعرف هذا التأثير بالتشتت (Dispersion).

وامتصاص الضوء (optical absorption) يتصف بما يسمى معامل الامتصاص (absorption Coefficient) ويرمز له بالرمز (α) ، ويعرف بأنه جزء الطاقة الضوئية الممتص في وحدة الأطوال من الوسط، فإذا تغلغل الشعاع الضوئي في اتجاه محور z ، وكانت شدة الضوء (Light Intensity) - وهي القدرة الضوئية لوحدة المساحات - عند البعد z من السطح هي $I(z)$ ، فإن النقص الحادث في الشدة الضوئية نتيجة اختراق الضوء شريحة سمكها dz يعطى من العلاقة الآتية:

$$dI = -\alpha dz.I(z) \quad (12-3)$$

وبإجراء التكامل كالتالي:

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\alpha \int_0^z dz$$

أى أن:

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (12-4)$$

حيث I_0 - شدة الضوء عندما $z = 0$ ، وتعرف العلاقة (12-4) بقانون بيير Beer's Law. ويعتمد معامل الامتصاص (α) بشدة على تردد الضوء، وبذلك تتغير امتصاصية المواد للألوان بسبب تغير تردداتها. وكما سيأتى، فإن الامتصاصية والانكسار يمكن ربطهما بكمية واحدة تسمى معامل الانكسار المركب (Complex refractive index)،

و بمعرفة هذه الكمية يمكننا حساب المعامل \mathcal{R} ومن ثم يمكن إيجاد معامل النفاذية T للوسط ذي السمك ℓ بالعلاقة التالية :

$$T = (1-\mathcal{R}_1)e^{-\alpha\ell} (1-\mathcal{R}_2) \quad (12-5)$$

حيث \mathcal{R}_1 ، \mathcal{R}_2 هما معامل الانعكاس عند سطحى المادة الأمامى والخلفى على الترتيب. وإذا كان السطحان لهما نفس الانعكاسية \mathcal{R} ، فإن العلاقة (12-5) تصبح بالصورة التالية :

$$T = (1-\mathcal{R}_1)^2 e^{-\alpha\ell} \quad (12-6)$$

كذلك، يمكن وصف الامتصاص لوسط بدلالة الكثافة الضوئية (O.D) Optical density والتي تسمى أحيانا بالامتصاصية Absorbance كالآتى :

$$O.D = -\log_{10} \frac{I(\ell)}{I_0} \quad (12-7)$$

وباستخدام العلاقة (12-4) فإنه يمكن ربط الكثافة الضوئية بمعامل الامتصاص مباشرة من خلال العلاقة الآتية :

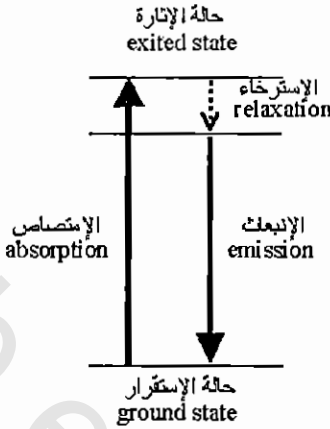
$$O.D = \frac{\alpha\ell}{\log_e 10} = 0.434 \alpha \ell \quad (12-8)$$

ويفضل فى الدراسات البحثية عادة استخدام α بدلا من O.D لعدم اعتمادها على طول العينة.

وتعامل الضوء مع المادة يمكن أن يكون مصحوبا بظواهر هامة أخرى مثل ظاهرتى الإشعاع والتبعثر:

ظاهرة الإشعاع Luminescence

العالم ستوكس هو أول من قام بدراسة هذه الظاهرة فى القرن التاسع عشر قبل ظهور النظرية الكمية. شكل (12-2) يبين أبسط تتابع لأحداث هذه الظاهرة، حيث تقفز الذرة إلى حالة الإثارة بسبب امتصاصها لفوتون، بعد ذلك يحدث لها عملية استرخاء فى حالة بينية، وفى النهاية تعود إلى حالة استقرارها الأصلية (ground state) بعد إشعاعها لفوتون بطاقة اقل (أى بتردد أقل). هذا النقص فى التردد يعرف بإزاحة ستوكس (Stokes shift).



شكل (2-12): ظاهرة الإشعاع Luminescence

ظاهرة التبعثر Scattering phenomenon

وهى الظاهرة التى يغير فيها الضوء اتجاهه، ويحتمل أن يغير تردده أيضا بعد التفاعل مع المادة، ورغم أن العدد الكلى للفوتونات لا يتغير، إلا أن العدد المرتد للأمام يقل بسبب تبعثر الفوتونات المرتدة فى اتجاهات مختلفة، ويكون التبعثر مرنا إذا لم يتغير تردد الفوتونات المبعثرة بعد عملية التفاعل عنه قبلها، ويكون غير مرنا إذا تغير التردد بالزيادة (تؤخذ الزيادة فى طاقة الفوتون من المادة) أو بالنقصان (تمتص طاقة الفوتون فى المادة). وتحدث هذه الظاهرة بسبب تغير معامل الانكسار فى مدى طولى أقل من الطول الموجى للضوء الساقط نتيجة لوجود شوائب أو عيوب بللورية أو حتى نتيجة لعدم التجانس فى تركيب المادة، ويصاحب هذه الظاهرة اضمحلال فى شدة الموجة الضوئية بشكل يشبه ما يحدث فى حالة الامتصاص، حيث تعطى شدة الضوء بدالة أسية كالتالى:

$$I(z) = I_0 e^{-(N\sigma_s)z} \quad (12-9)$$

حيث N هى عدد مراكز التبعثر scattering centers فى وحدة الحجم، σ_s مساحة مقطع التبعثر scattering cross-section. والعلاقة (12-9) تطابق حالة الامتصاص المعطاة بالعلاقة (12-4) إذا كانت $\alpha = N\sigma_s$

إذا كان حجم مركز التبعثر أصغر كثيرا من الطول الموجى للضوء، حيث يكون التبعثر سائدا بواسطة عدم تجانس التركيب inhomogeneity، فإن هذا التبعثر يعرف بتبعثر رابلى Rayleigh scattering ويكون له:

$$\sigma_s(\lambda) \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad (12-10)$$

معامل الانكسار المركب والخصائص الضوئية

Refractive index and optical properties

ذكرنا من قبل أنه بواسطة كمية واحدة تسمى معامل الانكسار المركب Complex refractive index \bar{n} يمكن وصف الانكسار والامتصاص للوسط كالاتي:

$$\bar{n} = n + iK = \quad (12-11)$$

الجزء الحقيقي n هو معامل الانكسار العادي المعروف بالعلاقة (12-2)، أما الجزء التخيلي K يسمى معامل الانقراض extinction coefficient ويرتبط مباشرة بمعامل امتصاص الوسط α .

العلاقة بين معاملي الامتصاص والانقراض للوسط

يمكن إيجاد العلاقة بين K ، α إذا اخذنا في الاعتبار تغلغل الموجات الكهرومغناطيسية المستوية خلال الوسط ذي معامل الانكسار المركب. فإذا انتشرت الموجة في اتجاه محور z فإن المجال الكهربائي كدالة في المكان والزمان يمكن كتابته بالصورة التالية:

$$\varepsilon(z, t) = \varepsilon_0 e^{i(Kz - \omega t)} \quad (12-12)$$

حيث k هو المتجه الموجي للضوء، التردد الزاوي، سعة الموجة عند $z=0$ ، فإذا كان الوسط عديم الامتصاص non-absorbing، فإن تقلل بالعامل n مقارنة بالفراغ، ولذلك فإن:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda/n} = \frac{n\omega}{c} \quad (12-13)$$

وبتعميم هذه العلاقة على الوسط الممتص للضوء absorbing medium نحصل على:

$$k = \bar{n} \frac{\omega}{c} = (n + iK) \frac{\omega}{c} \quad (12-14)$$

وبالتعويض من (12-14) في (12-12) نجد أن:

$$\begin{aligned} \varepsilon(z, t) &= \varepsilon_0 e^{i[(n+iK)\frac{\omega}{c}z - \omega t]} \\ &= \varepsilon_0 e^{-\left(\frac{K\omega}{c}\right)z} e^{i\left[\frac{\omega n}{c}z - \omega t\right]} \\ &= \varepsilon_0 e^{-\left(\frac{K\omega}{c}\right)z} e^{i(kz - \omega t)} \end{aligned} \quad (12-15)$$

تبين هذه العلاقة أن وجود قيمة لمعامل الانقراض K لا تساوي الصفر يؤدي إلى اضمحلال في الموجة بدالة أسية، وفي نفس الوقت يظل الجزء الحقيقي (n) في معامل

الانكسار محددًا للسرعة الطورية للموجة. وحيث أن شدة الموجة الضوئية تتناسب مع مربع السعة للمجال الكهربى، فإنه يمكن من المعادلة (15-12) استنتاج أن شدة الموجة الضوئية تقل أسيا في الوسط بمعامل إضمحلال يساوى $\frac{2K\omega}{c}$ ، بمقارنة ذلك بقانون بيبير المعطى بالعلاقة (12-12) نجد أن:

$$\alpha = \frac{2K\omega}{c} = \frac{4\pi K}{\lambda} \quad (12-16)$$

حيث λ الطول الموجى للضوء فى الفراغ. وهكذا، فإن العلاقة (12-16) تبين أن معامل الامتصاص α يتناسب طرديا مع معامل الانقراض K .

العلاقة بين معامل الانكسار وثابت العزل للوسط

يمكن أيضا ربط معامل الانكسار مع ثابت العزل النسبى للوسط من خلال العلاقة المشتقة من معادلات ماكسويل الآتية:

$$n^2 = \epsilon_r \quad (12-17)$$

فإذا كان معامل الانكسار يأخذ الصورة المركبة المعطاة بالعلاقة (11-12)، فإن ثابت العزل لابد أن يأخذ الصورة المركبة أيضا، كالتالى:

$$\bar{\epsilon}_r = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (12-18)$$

$$\therefore \bar{n}^2 = \bar{\epsilon}_r \quad (12-19)$$

$$\therefore (n + iK)^2 = \epsilon_1 + i\epsilon_2$$

$$(n^2 - K^2) + i(2nK) = \epsilon_1 + i\epsilon_2$$

وبالتالى فإن:

$$\epsilon_1 = n^2 - K^2 \quad (12-20)$$

$$\& \quad \epsilon_2 = 2nK \quad (12-21)$$

أى أن القيم الحقيقية والتخيلية لمعامل الانكسار وثابت العزل ترتبط معا بالعلاقات المباشرة (12-20)، (12-21) على الترتيب، حيث يمكن إثبات أن:

$$n = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\epsilon_1 + (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12-22)$$

$$\therefore K = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[-\epsilon_1 + (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12-23)$$

مما سبق يتضح أن المتغيرين \bar{n} ، $\bar{\epsilon}_r$ ليسا مستقلين، فإذا علمنا ϵ_1 ، ϵ_2 يمكن إيجاد

n ، K والعكس بالعكس. ولو كان الوسط ضعيف الامتصاص للضوء، حيث يفترض أن قيمة K صغيرة جدا، فإنه يمكن استخدام العلاقتين البسيطتين الآتيتين:

$$n^2 = \epsilon_1 \quad (12-24)$$

$$K = \frac{\epsilon_2}{2n} \quad (12-25)$$

وتبين هاتان العلاقتان أن معامل الانكسار يحدد أساسا بواسطة الجزء الحقيقي لثابت العزل، بينما يتحدد الامتصاص بواسطة الجزء التخيلي. هذا التعميم لا يكون صحيحا بالطبع عندما يمتلك الوسط قيما عالية لمعامل الامتصاص.

العلاقة بين الانعكاسية ومعامل الانكسار والانقراض

كذلك، فإنه يمكن بيان أن الانعكاسية تعتمد على كل من n ، K ، لذلك دعنا نفترض أن شعاعا ضوئيا مستقطبا في اتجاه x وينتشر في اتجاه z في وسط ذي معامل انكسار \bar{n} . ومن الشروط الحدية عند الحد الفاصل بين الوسطين العازلين تكون كميات المركبات المماسية tangential components للمجالين الكهربى والمغناطيسى محفوظة، لذا فإنه باستخدام شكل (12-3) يكون:

$$\epsilon_x^i + \epsilon_x^r = \epsilon_x^t \quad (12-26)$$

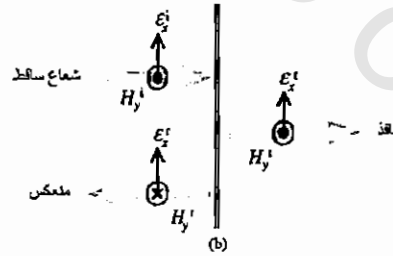
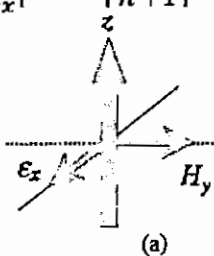
$$H_y^i - H_y^r = H_y^t \quad (12-27)$$

وطبقا لمعادلات ماكسويل فإن ϵ_x ، H_y ترتبطان بالعلاقة $\frac{H_y}{\epsilon_x} = \bar{n}$ ، وعليه، يمكن إعادة كتابة العلاقة (12-27) بالصورة التالية:

$$\epsilon_x^i - \epsilon_x^r = \bar{n} \epsilon_x^t \quad (12-28)$$

حيث افترضنا أن الموجة ساقطة من الهواء ($\bar{n} = 1$). بحل المعادلتين (12-26)، (12-28) معا نحصل على العلاقة الآتية:

$$\left| \frac{\epsilon_x^r}{\epsilon_x^i} \right| = \left| \frac{\bar{n} - 1}{\bar{n} + 1} \right| \quad (12-29)$$



شكل (12-3): الشروط الحدية بين الوسطين العازلين. شعاع مستقطب في اتجاه وينتشر في اتجاه z ، (a) المركبات المماسية للمجالين الكهربى والمغناطيسى (b)

وتعطي الانعكاسية \mathcal{R} بخارج قسمة مربع قيمة الاشعاع المنعكس على مربع قيمة الاشعاع الساقط، أى أن:

$$\mathcal{R} = \left| \frac{\varepsilon_x^r}{\varepsilon_x^i} \right|^2 = \left| \frac{\bar{n}-1}{\bar{n}+1} \right|^2 = \frac{(n-1)^2 + \square^2}{(n+1)^2 + \square^2} \quad (12-30)$$

وهي تعطي قيمة الانعكاسية بين الوسط والهواء في حالة سقوط الإشعاع عموديا (normal incidence) على السطح الفاصل.

الخواص الضوئية لبعض المواد

سنحاول هنا إلقاء الضوء على الخصائص الضوئية لبعض المواد مثل بللورات أشباه الموصلات والعازلات، الزجاجيات والمعادن.

الخصائص الضوئية لأشباه الموصلات والعازلات البلورية

طيف النفاذية الضوئية لبللورة الياقوت Crystalline sapphire Al_2O_3 في مدى يتراوح من منطقة الأشعة تحت الحمراء حتى المنطقة فوق البنفسجية (UV) والذي يعبر عن الشكل العام لكل المواد العازلة مبين في شكل (12-4.a)، حيث يمكن أن نلخص الخصائص الأساسية فيما يلي:

١- يمتلك الياقوت Al_2O_3 نفاذية عالية في المدى $0.2 - 6 \mu\text{m}$ الذي يشمل كل المدى المرئي، ولذلك يبدو شفافا بدون لون للعين المجردة. معامل الامتصاص له في هذا المدى صغير جدا، وبالتالي يكون معامل الانكسار ناتجا من المركبة الحقيقية ($n = n$)، ويكون تقريبا ثابت القيمة ويساوى حوالى 1.77.

٢- يمكن تعيين معامل النفاذية في هذا المدى للنفاذية العالية للياقوت بدلالة الانعكاسية \mathcal{R} من العلاقة (12-6) حيث:

$$T = (1-\mathcal{R})^2 e^{-\alpha l} = (1-\mathcal{R})^2 = 0.85$$

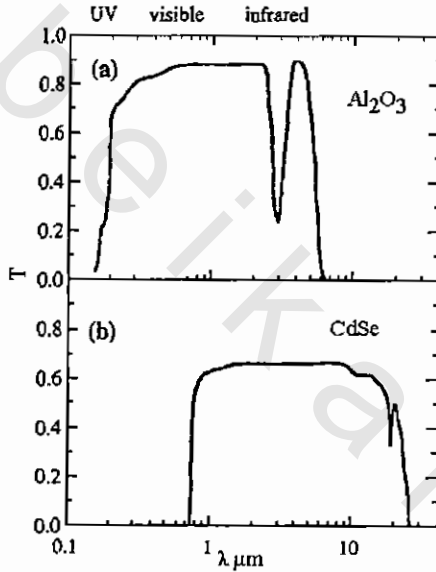
وحسبت $\mathcal{R} = 0.077$ من العلاقة (12-30).

٣- الانخفاض الحاد في المنطقة تحت الحمراء عند $\lambda = 3 \mu\text{m}$ وكذلك الهبوط الحاد للنفاذية لقيم $\lambda > 6 \mu\text{m}$ يرجع إلى الامتصاص الاهتزازي (vibrational absorption) بسبب اهتزازات الشبكية ويسمى عادة بالامتصاص الفونوني (phonon absorption) أو بامتصاص الشبكية (Lattice absorption).

٤- أما الانخفاض الحاد في المنطقة UV عندما $\lambda < 0.2 \mu\text{m}$ فإنه يعود إلى الامتصاص بواسطة إلكترونات التكافؤ ويعرف بحافة الامتصاص الأساسية (Fundamental)

(absorption edge). وبواسطة قيمة الطول الموجي المقابلة لهذا الانخفاض يمكن تحديد اتساع المنطقة المحرمة للمواد العازلة.

وعموما، فإن العازلات تكون عديمة اللون وشفافة (منفذة) للضوء. فإذا ظهرت المادة العازلة بلون معين، فهذا يرجع غالبا إلى وجود شوائب. كما تتميز العازلات بامتصاصية عالية في منطقتي الأشعة فوق البنفسجية وتحت الحمراء. لذلك تستخدم هذه المواد في صناعة النوافذ والعدسات.



شكل (12-4): طيف النفاذية الضوئية لبلورة العازلة Al_2O_3 (a) وشبه الموصل $CdSe$ (b).

جدول (12-1) يعطى معامل الانكسار لبعض البلورات العازلة الشائعة والمدى الذى تكون فيه هذه البلورات شفافة (Transparent).

جدول (1-12): معامل الانكسار ومدى الشفافية الضوئية لبعض البلورات العازلة

البلورة	مدى النفاذية (μm)	n	البلورة	مدى النفاذية (μm)	n
Diamond	80 - 0.25	2.42	NaC	20 - 0.21	1.55
KBr	30 - 0.3	1.56	NaF	15 - 0.19	1.32
KC	25 - 0.21	1.49	SiO_2	3 - 0.2	1.54
KI	0.3 - 40	1.67	TiO_2	5 - 0.45	2.62

هـ- الخواص الضوئية لأشباه الموصلات شبيهة بمثيلاتها للمواد العازلة، عدا أن الانتقالات الإلكترونية والاهتزازية تحدث عند أطوال موجية أكثر طولاً. وكما يتضح من شكل (12-4.b) أن شبه الموصل CdSe يعتبر منفذاً للضوء للأطوال الموجية الأكبر من 700 nm، أى خارج المنطقة المرئية ولذلك يبدو معتماً للعين المجردة.

جدول (12-2) يعطى مدى النفاذية ومعامل الانكسار n والطول الموجى λ المحدد لاتساع الفجوة الطاقية (المنطقة المحرمة) لعدد من أشباه الموصلات. وكما هو مبين، فإن الحد الأدنى لمدى النفاذية ينطبق تقريباً مع الطول الموجى λ ، الذى يقابل أقل طاقة يحدث عندها انتقال

جدول (12-2) : بعض الخصائص الضوئية لعدد من أشباه الموصلات

البلورة	مدى النفاذية (μm)	(μm)	n
Ge	23 - 1.8	1.8	4.00
Si	15 - 1.2	1.1	3.42
GaAs	20 - 1.0	0.87	3.16
CdTe	14 - 0.9	0.83	2.67
CdSe	24 - 0.75	0.71	2.50
ZnSe	20 - 0.45	0.44	2.41
ZnS	14 - 0.4	0.33	2.20

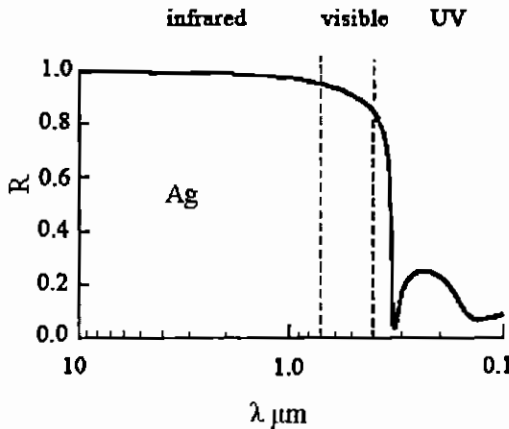
إلكترونى بين منطقتى التكافؤ والتوصيل. كما نلاحظ أيضاً أن معامل الانكسار يزداد بزيادة λ . ويتحدد الحد الأقصى لمدى النفاذية بواسطة الامتصاص الفونونى (امتصاص الشبكية) وكذلك امتصاص حوامل الشحنة الحرة (free carrier absorption) والتي توجد فى أشباه الموصلات نتيجة الإثارة الحرارية أو بسبب الشوائب حيث تسبب امتصاصاً للأشعة تحت الحمراء.

الخصائص الضوئية للمواد الزجاجية glasses

تعتبر الزجاجيات مواد ضوئية هامة لتعدد استخداماتها التكنولوجية، فهي تستخدم في المنشور الزجاجي، العدسات، الأجهزة الضوئية، النوافذ glassware، كما أصبحت مؤخرا أساسية في تكنولوجيا الألياف الصناعية Optical Fiber glasses. وهذه المواد تصنع بحيث تكون شفافة (منفذة) للضوء المرئي، ولأنها مواد غير بلورية فهي لاتسبب اختلافًا في الخواص الضوئية مع تغيير اتجاه سقوط الضوء Optical anisotropy. وتصنع معظم أنواع الزجاجيات من الرمل (السيليكا SiO_2) مع بعض المواد الكيماوية. وتعتبر السيليكا مادة عازلة، وبالتالي تتميز بكل الخصائص الضوئية للمادة العازلة، فهي شفافة للضوء المرئي، وتبدي امتصاصية في المنطقة UV بسبب الانتقال الإلكتروني لجزيئات SiO_2 وفي المنطقة IR بسبب اهتزازات الشبكية. يتراوح مدى النفاذية من 200~ nm في المنطقة UV حتى 2000 nm في المنطقة IR. ويمكن تصنيع زجاجيات ملونة أو زجاجيات ذوات خصائص ضوئية معينة بإضافة مواد شبة موصلة أو مواد كيميائية أخرى أثناء التحضير حسبما تتطلبه الحاجة.

الخصائص الضوئية للمعادن

تتميز المعادن بالانعكاسية العالية جدا للضوء بسبب تفاعل الضوء الساقط مع الإلكترونات الحرة في المعدن. شكل (5-12) يبين أن انعكاسية الفضة قريبة من 100% في منطقة الأشعة تحت الحمراء وتظل فوق 80% على كل المدى المرئي، وتهبط قيمتها بحدة في منطقة الأشعة فوق البنفسجية. وهذا التصرف هو تصرف عام لكل المعادن.



شكل (5-12): طيف الانعكاسية الضوئية لمعدن الفضة

الانعكاس الكبير الذى نلاحظه لكل قيم التردد الأقل من تردد الانقطاع (Cut-off frequency) أو تردد البلازما (plasma frequency) وهو التردد الواقع فى المنطقة UV، يؤكد أن المعدن يعكس كل الأشعة تحت الحمراء، وينفذ الأشعة فوق البنفسجية، ويسمى هذا التأثير «نفاذية الأشعة فوق البنفسجية للمعادن» (Metal UV transmission).

انتشار الضوء فى الوسط الضوئى

light Propagation in a dense medium

خلال هذه المعالجة لانتشار الضوء (تفاعل الضوء) فى الأوساط الضوئية سوف نستخدم النموذج الكلاسيكى الذى يعتبر أن الضوء عبارة عن موجات كهرومغناطيسية، وأن الذرات (الجزئيات) عبارة عن ثنائيات أقطاب متذبذبة، كما يفترض وجود عدة أنواع من هذه المتذبذبات خلال الوسط لكل منها تردد رنينى مميز Resonance frequency وأهمها: المتذبذبات الذرية Atomic Oscillators الناشئة عن الإلكترونات المربوطة Bound electrons فى الذرة، المتذبذبات الاهتزازية Vibrational Oscillators الحادثة عند الترددات المنخفضة فى المنطقة IR، ومتذبذبات الإلكترونات الحرة Free electrons Oscillators المسئولة عن الخصائص الضوئية الأساسية فى المعادن. ويعد هذا النموذج كافيا للحصول على معلومات هامة عن الخصائص الضوئية، كما يجعلنا قادرين على حساب اعتماد كل من ثابت العزل المركب، معامل الامتصاص، ومعامل الانكسار على التردد، بالإضافة إلى إمكانية الحصول على إطار من المعلومات عن التأثيرات الناتجة بسبب عدم التماثل الضوئى Optical anisotropy فى البلورات. وكما سنرى من خلال دراسة المتذبذبات فى الوسط، فإن انتشار الضوء فى الأوساط الضوئية يرتبط بعاملين مؤثرين هما معامل الانكسار ومعامل الامتصاص.

المهتزازات الذرية Atomic Oscillators

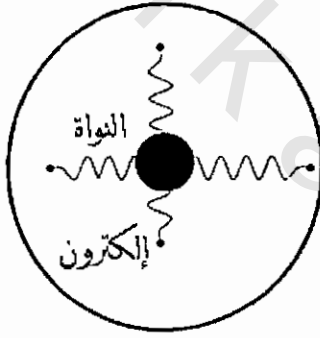
أقترح لورنس عام 1878 نمودجا يفترض فيه أن «الذرات عبارة عن ثنائيات أقطاب مهتزة»، حيث أمكن باستخدام هذا النموذج وبدلالة معطيات النظرية الكهرومغناطيسية تفسير حقيقة أن «الذرة تشع وتمتص الطاقة عند ترددات منفصلة». شكل (6-12) يوضح هذا النموذج، حيث يفترض أن الإلكترون يتواجد فى مدار مستقر حول النواة ومربوط إليها بزنبك يمثل القوة الرادة للإزاحات الصغيرة عن وضع الاتزان.

ويتكون ثنائى القطب من شحنتى الإلكترون السالبة والنواة الموجبة، وقيمته تتناسب مع المسافة بينهما، ومن الطريف أن لورنس أفترض وجود ثنائى القطب دون أن يعرف مصدرا لشحنتى قطبيه، وذلك لأن الإلكترونات والنواة لم يتم اكتشافهما إلا بعد طومسون (عام 1897) ورذرفورد (عام 1911).

التردد الرنينى الطبيعى (ω_0) لثنائى القطب الذرى يحدد بواسطة الكتلة والقوة الرادة، حيث تعطى الكتلة للإلكترون والنواة معا (reduced mass) من العلاقة الآتية:

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{m_0} + \frac{1}{m_N} \quad (12-31)$$

حيث m_N ، m_0 هما كتلتا الإلكترون والنواة على الترتيب، وبما أن $m_N \gg m_0$ ، فإنه يكون صحيحا لدرجة كبيرة اعتبار أن $u = m_0$.



شكل (12-6): نموذج لورنس (الذرات عبارة عن ثنائيات أقطاب مهتزة)

وتحدد القوة الرادة بدلالة ثابت الزنبرك، ويختار بحيث تتطابق مع أحد الترددات الطبيعية للذرات، وذلك لوجود العديد من ثنائيات الأقطاب فى الذرة ذات الترددات الانتقالية المختلفة التى أمكن ملاحظتها من طيفى الانبعاث والامتصاص فى مدى الإشعاعات الطيفية NIR، Vis، UV أى فى المدى $10^{14} - 10^{15} \text{ Hz}$.

$$i.e \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k_s}{u}} \quad (12-32)$$

ولفهم الارتباط بين ثنائى القطب الذرى وطيف الانبعاث (emission spectrum) دعنا نعتبر الاهتزازات الناشئة من ثنائى القطب المبين فى شكل (١٢-٧)، حيث يتكون من شحنة موجبة (+q) عند الموضع (r_+) وشحنة سالبة (-q) عند الموضع (r_-)، لذا يكون العزم هو:

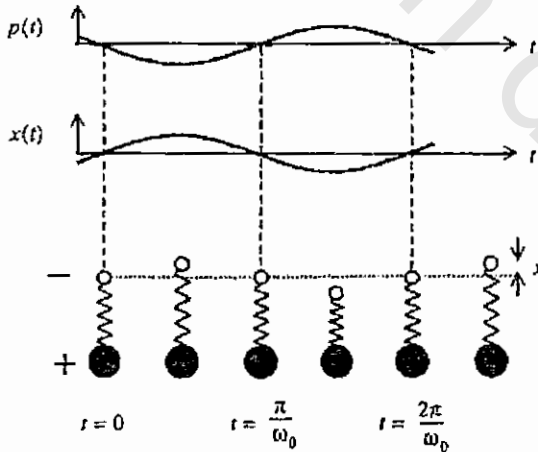
$$P = q(r_+ - r_-) \quad (12-33)$$

وفى حالتنا هذه يتكون ثنائى القطب من نواة موجبة وإلكترون سالب وتكون قيمة عزمه $|r_+ - r_-| e$. وأثناء الاهتزاز يمكن اعتبار النواة ثابتة فى مكانها لثقل كتلتها، بينما يتذبذب الإلكترون جيئةً وذهاباً بتردد ω_0 ، وبالتالي ينتج ثنائى قطب قيمة عزمه تعتمد على الزمن وتعطى من العلاقة الآتية:

$$P(t) = -ex(t) \quad (12-34)$$

حيث $x(t)$ هى إزاحة الإلكترون عن موضع استقراره عند أى لحظة زمنية t (شكل ١٢-٧). ثنائى القطب المتذبذب ينتج موجات كهرومغناطيسية بتردد ω_0 ، وبالتالي نتوقع أن تقوم الذرة بإشعاع ضوء عند التردد الرنينى إذا امتصت طاقة كافية لإثارة هذه الاهتزازات.

دعنا باستخدام هذا النموذج نحاول فهم كيفية تعامل الذرة مع الموجة الكهرومغناطيسية الخارجية عند تردد ω . المجال الكهربى المتردد للموجة يؤثر بقوة على كل من الإلكترون والنواة، وبالتالي يقود الحركة الاهتزازية للنظام عند هذا التردد، وعندما تتطابق ω مع أحد الترددات الطبيعية للذرة ω_0 يحدث ما يسمى بظاهرة الرنين، حيث تصبح سعة الاهتزازة كبيرة جداً ويحدث امتصاص للطاقة الخارجية



شكل (12-7): تغير كل من عزم ثنائى القطب وإزاحة الإلكترون مع الزمن فى الاهتزازة الذرية

بواسطة الذرة والتي قيمته تحدد بمعامل الامتصاص α . ويؤدى ذلك إلى اضمحلال شدة الموجة طبقاً لقانون بيير. وهذا هو ما نعرفه الآن من النظرية الكمية، حيث تقفز الذرة إلى حالة إثارة بامتصاصها لفوتون، وهذا لا يحدث إلا إذا كانت $E_2 - E_1 = \hbar\omega$ ، حيث

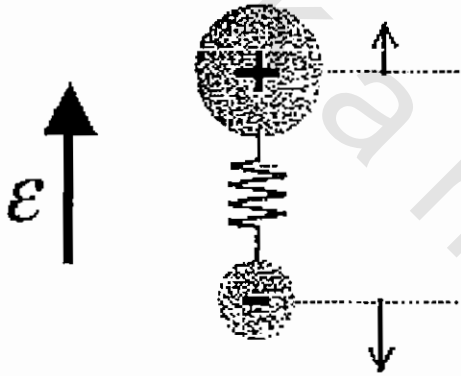
E_2 ، E_1 ما الطاقتان الكميتان للحالات الابتدائية (حالة الاستقرار ground state) والنهائية (حالة الإثارة excited state) على الترتيب. وبمجرد حدوث الإثارة، يمكن للذرة أن تعود إلى حالتها المستقرة بعدد من الانتقالات التي لا يصدر عنها إشعاع كهرومغناطيسي، حيث تتحول الطاقة المفقودة من الفوتون الممتص إلى حرارة، وبعد فترة ما من الزمن (relaxation time) تعود الذرة إلى حالتها المستقرة مع حدوث عملية إشعاع لفوتون (Luminescence). هذه الفوتونات المنبعثة لا تكون ملتصقة مع بعضها البعض بل تنبعث في جميع الاتجاهات بما فيها اتجاه الموجة الساقطة، وبالتالي يكون هناك نقص في الطاقة المناسبة في اتجاه الشعاع تكافئ الطاقة الممتصة.

أما إذا كانت ω لا تنطبق مع الترددات الرنينية، فإن الذرات لا تمتص الطاقة، ويكون الوسط شفافا للضوء (optical transparent). في هذه الحالة فإن الموجات الضوئية تقود الاهتزازات غيرالرنينية للذرة عند ترددها ω ، وتنصاع الاهتزازات الذرية لهذه الموجة الموجهة لكن مع وجود تأخر طوري (phase Lag) يؤدي إلى إعاقتها (damping) لتصبح اهتزازات مخمدة. وتقوم كل الذرات المهتزة بإعادة الإشعاع في نفس اللحظة، ويتجمع التأخر الطوري المكتسب خلال الوسط ليعوق انتشار مقدمة الموجة. وهذا يفسر سبب صغر سرعة الانتشار في الوسط عنها في الفراغ. هذا النقص في السرعة بين الوسطين يعتبر صفة مميزة لمعامل الانكسار. ببطء الموجة بسبب التفاعل اللارينيني يمكن اعتباره تكرارا لعملية التبعثر (repeated scattering) وتتصرف الذرة كأنها مصدر نقطى لهيجنز (Huygen's point source). الضوء المبعثر يتداخل تداخلا بناءً في الاتجاه الأمامي، وتداخل هداما في كل الاتجاهات الأخرى بحيث لا يتغير اتجاه الشعاع الساقط، إلا أن كل واقعة تبعثر تضيف تأخرا طوريا ينشأ عنه إبطاء لانتشار مقدمة الموجة خلال الوسط.

المتذبذبات الاهتزازية الأيونية Ionic Vibrational Oscillators

الوسط الضوئي يمكن أن يحتوي أنواعا أخرى من ثنائيات الأقطاب المتذبذبة بالإضافة إلى تلك الناتجة عن الإلكترونات المربوطة للذرة، فإذا كان الوسط أيونيا، فإنه يحتوي على أيونات مختلفة الشحنة. اهتزازات هذه الذرات المشحونة (الأيونات) حول مواضع استقرارها خلال الشبكية البلورية ينتج عنها عزوم ثنائيات أقطاب، لذلك لا بد أن يؤخذ في الاعتبار التأثيرات الناتجة عن هذه المتذبذبات الاهتزازية عند دراسة تفاعل

الضوء مع الأوساط الضوئية المتأينة. شكل (8-12) يبين مخططا لجزء قطبي (Polar molecule)، حيث يتكون من ذرتين مشحونتين ومربوطتين معا في وضع مستقر بواسطة زنبرك يمثل الرابطة بينهما. هذه الذرات المشحونة يمكنها الاهتزاز حول مواضع استقرارها مكونة ثنائيات أقطاب كهربائية متذبذبة بطريقة تشبه الإلكترونات المربوطة في الذرات. وبالرجوع إلى العلاقة (32-12) يمكن ملاحظة أن الاهتزازات الناتجة تحدث عند ترددات أقل لأن الكتلة (reduced mass) أكبر. لذلك، تحدث الاهتزازة الجزيئية في المنطقة IR بتردد $10^{12} - 10^{13}$ Hz، وتكون مصحوبة بخطوط امتصاص قوية. وفي البلورات الصلبة المكونة من جزيئات قطبية كثيفة تترتب الذرات في تتابع تبادلي من الأيونات الموجبة والسالبة، حيث تهتز حول مواضع اتزانها مؤدية إلى ظهور موجات في الوسط. هذه الاهتزازات تنتمي لاهتزازات الشبكية (lattice vibration) وتحدث في مدى الأشعة تحت الحمراء.



شكل (8-12): الاهتزازة الأيونية لجزء قطبي

متهزات الإلكترونات الحرة Free electron Oscillators

تعتبر ثنائيات الأقطاب الاهتزازية والإلكترونية سابقة الذكر أمثلة للمتذبذبات المربوطة. وعلى النقيض من ذلك، فإن الإلكترونات الحرة والموجودة بكم هائل في كل من المعادن وأشباه الموصلات المنحلة تكون غير مربوطة لأي من الذرات، وبالتالي لا توجد أي قوة رادة عندما يحدث لها إزاحة. هذا يعني أن ثابت الزنبرك في المعادلة (12-32) يساوي صفرا، وبالتالي يكون التردد الرنيني الطبيعي ω_0 يساوي صفرا. هذا يقودنا إلى الاستنتاج العام أن نموذج المتذبذب ثنائي القطب يكون صالحا لكل الترددات عدا الحالة التي فيها $\omega = \omega_0$. وهذا يعني أيضا أن نموذج المتذبذب ثنائي القطب لا يصلح

لوصف حالة نظام حوامل الشحنة الحرة، ويستخدم لوصف هذه الحالة ما يسمى بنموذج درودى - لورنس (Drude - Lorentz) الذى يضم نموذجى درودى لموصلية الإلكترونات الحرة ونموذج لورنس لثنائى القطب المتذبذب معا.

نحاول الآن استخدام هذا النموذج لإيجاد اعتماد كل من معامل الانكسار ومعامل الامتصاص على التردد، مما يتيح الحصول على معلومات هامة عن تشتت معامل الانكسار (Dispersion) فى الأوساط الضوئية ويعطى تصورا لارتباط ظاهرة الامتصاص بمعامل الانكسار. لذلك، نعتبر التفاعل بين موجة ضوئية وذرة فى حالة وجود تردد رنينى وحيد ω_0 يتصف بالعلاقة (12-32)، حيث تتمثل إزاحة ثنائيات الأقطاب الذرية بمعادلة توافقية مخمدة (damped harmonic) بسبب الفقد الطاقى فى أثناء عمليات التصادم. وكما سنرى فإن حد التخميم يسبب نقصا فى قمة معامل الامتصاص ويؤدى إلى تعريض (توسيع) خطوط الامتصاص.

المجال الكهربى للموجة الضوئية يحدث اهتزازات قسرية (Forced) على ثنائى القطب الذرى بسبب القوة المؤثرة على الإلكترونات، فإذا اعتبرنا أن $m_e \gg m_0$ ، فإنه يمكن إهمال حركة النواة، وبالتالي تحكم إزاحة الإلكترون بمعادلة الحركة الآتية:

$$m_0 \frac{d^2x}{dt^2} + m_0 \gamma \frac{dx}{dt} + m_0 \omega_0^2 x = -e\epsilon \quad (12-35)$$

حيث γ - هى معدل التخميم Damping rate. وتمثل حدود الطرف الأيسر للمعادلة (12-35) قوة التعجيل، قوة التخميم (تعتبر قوة احتكاك، حيث أنها تتناسب مع السرعة وتمانع الحركة) والقوة الرادة على الترتيب. والطرف الأيمن يمثل قوة المجال الكهربى المتردد (driving force) للموجة الضوئية. وبفرض أن الموجة الضوئية وحيدة اللون (monochromatic) وتردها الزاوى، فإنه يمكن كتابة شدة المجال ϵ كدالة فى الزمن بالصورة الآتية:

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 e^{-i\omega t} \quad (12-36)$$

وبالمثل يمكن كتابة الإزاحة بالصورة الآتية:

$$x(t) = x_0 e^{-i\omega t} \quad (12-37)$$

وبالتعويض فى العلاقة (12-35) نجد أن:

$$(-m_0 \omega^2 x_0 - im_0 \gamma \omega x_0 + m_0 \omega_0^2 x_0) e^{-i\omega t} = e\epsilon_0 e^{-i\omega t} \quad (12-38)$$

ومنهما نحصل على:

$$\mathbf{x}_0 = \frac{-e\epsilon_0/m_0}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega} \quad (12-39)$$

هذه الإزاحة للإلكترونات عن مواضع اتزانها تسبب ظهور عزم ثنائي قطب $P(t)$ متغير مع الزمن وتعطى قيمته بالعلاقة $P(t) = -e\mathbf{x}(t)$. وهذا يعطى مشاركة رنينية في الاستقطاب (عزم ثنائي القطب في وحدة الحجم) في المادة. فإذا كان N هو عدد الذرات في وحدة الحجم، فإن:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{\text{resonant}} &= N\mathbf{P} \\ &= -Nex \\ &= \frac{Ne^2}{m_0(\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega)} \boldsymbol{\epsilon} \end{aligned} \quad (12-40)$$

واضح من العلاقة (12-40) أن قيمة P_{resonant} صغيرة ما لم يقترب التردد ω من القيمة ω_0 . وهذه صفة عامة للمهتزازات القسرية، أي أن الاستجابة الضوئية للمادة تكون ضعيفة ما لم يقترب التردد من ω_0 .

والمعادلة (12-40) يمكن استخدامها للحصول على ثابت العزل النسبي ϵ_r ، حيث ترتبط الإزاحة الكهربائية (electric displacement) D للوسط مع المجال الكهربى $\boldsymbol{\epsilon}$ والاستقطابية \mathbf{P} من خلال العلاقة الآتية:

$$D = \epsilon_0 \boldsymbol{\epsilon} + \mathbf{P} \quad (12-41)$$

ولما كانت الاستجابة الضوئية للمادة تحدث عند الترددات القريبة من ω_0 ، فإنه يفضل تقسيم الاستقطاب إلى جزءين، جزء غير رنيني ويرمز له بالرمز $P_{\text{background}}$ وآخر رنيني P_{resonant} ينشأ بسبب الاستجابة القسرية للمتذبذب.

$$\begin{aligned} \text{i.e. } D &= \epsilon_0 \boldsymbol{\epsilon} + \mathbf{P}_{\text{background}} + \mathbf{P}_{\text{resonant}} \\ &= \epsilon_0 \boldsymbol{\epsilon} + \epsilon_0 \chi \boldsymbol{\epsilon} + \mathbf{P}_{\text{resonant}} \\ &= \left[\epsilon_0 + \epsilon_0 \chi + \frac{Ne^2}{m_0} \cdot \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega)} \right] \boldsymbol{\epsilon} \end{aligned} \quad (12-42)$$

حيث χ هي السماحية الكهربائية electric susceptibility للوسط. وللتبسيط رياضياً، نفرض أن المادة متماثلة الخواص في كل الاتجاهات (isotropic)، حيث تكون:

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r \boldsymbol{\epsilon} \quad (12-43)$$

وبمقارنة العلاقتين (12-42)، (12-43) نجد أن ثابت العزل النسبي كدالة في التردد يعطى بالعلاقة الآتية :-

$$\epsilon_r(\omega) = 1 + \mathfrak{K} + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_0} \cdot \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega)} \quad (12-44)$$

وهذه العلاقة يمكن تجزئتها إلى جزئين حقيقي ϵ_1 وتخيلي ϵ_2 كالآتي :

$$\epsilon_1(\omega) = 1 + \mathfrak{K} + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_0} \cdot \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\gamma\omega)^2} \quad (12-45)$$

$$\epsilon_2(\omega) = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_0} \cdot \frac{\gamma\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\gamma\omega)^2} \quad (12-46)$$

ويمكن الحصول على تبسيط أكثر للعلاقتين السابقتين عندما تكون الترددات قريبة من الرنين، حيث تكون $\gamma \gg \omega \approx \omega_0$ ، وهذا يسمح لنا بالتقريب التالي:

$$\begin{aligned} \omega_0^2 - \omega^2 &= (\omega_0 + \omega)(\omega_0 - \omega) \\ &= 2\omega_0 \Delta\omega \end{aligned}$$

ويعطى ثابت العزل النسبي عند الحد الأدنى ($\omega_0 = 0$) والأقصى ($\omega = \infty$) للتردد كالآتي:

$$\epsilon_r(0) = \epsilon_{st} = 1 + \mathfrak{K} + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_0 \omega_0^2} \quad (12-47)$$

$$\epsilon_r(\infty) = \epsilon_\infty = 1 + \mathfrak{K} \quad (12-48)$$

حيث ϵ_{st} هو ثابت العزل النسبي في المجال الكهربى الاستاتيكي الذى لا يتغير مع الزمن.

العادلتان (12-47)، (12-48) يمكن صياغتهما بالشكل الآتى:

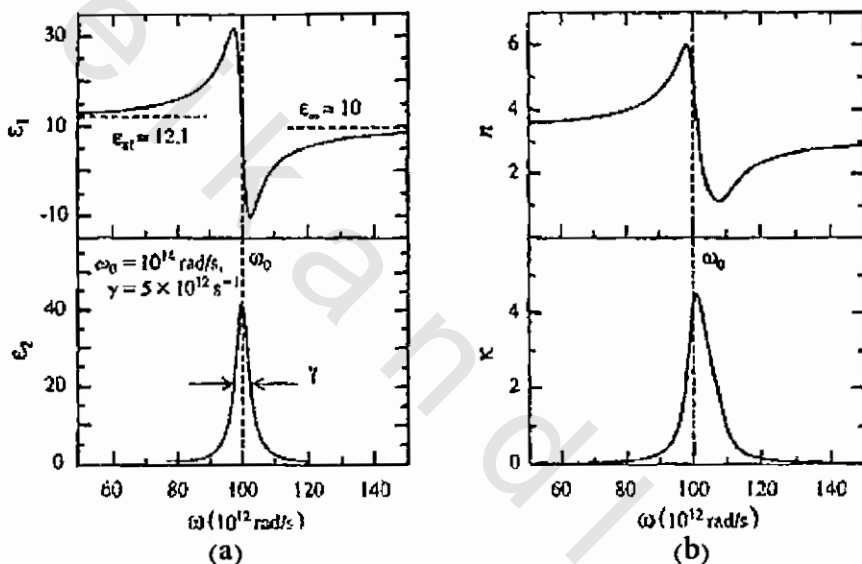
$$\epsilon_{st} - \epsilon_\infty = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_0 \omega_0^2} \quad (12-49)$$

وأخيراً، نعيد كتابة العلاقتين (12-45)، (12-46) فى صيغتين صالحتين للاستخدام عند قيم الترددات القريبة من التردد الرنينى كالآتى:

$$\epsilon_1(\Delta\omega) = \epsilon_{st} - (\epsilon_{st} - \epsilon_{st}) \frac{2\omega_0 \Delta\omega}{4(\Delta\omega)^2 + \gamma^2} \quad (12-50)$$

$$\epsilon_2(\Delta\omega) = (\epsilon_{st} - \epsilon_{st}) \frac{\gamma\omega_0}{4(\Delta\omega)^2 + \gamma^2} \quad (12-51)$$

العلاقان (12-50)، (12-51) تصفان خط امتصاص ذرى حاد يتمركز حول القيمة ω_0 ويتميز باتساع نصف قمة (half maximum width) يساوى γ . بتمثيل العلاقة بين كل من ϵ_1, ϵ_2 المعطيتين بالعلاقتين (12-50)، (12-51) على الترتيب مع التردد لقيم ω القريبة من ω_0 ، وباستخدام قيم للتوابت $\omega_0 = 10^{14} \text{ rad s}^{-1}$ ، $\epsilon_{st} = 12.1$ ، $\epsilon_{\infty} = 10$ تكافئ القيم الخاصة بخطوط امتصاص الأشعة تحت الحمراء فى البلورات الأيونية نحصل على تغير للدالتين $\epsilon_1(\Delta\omega)$ ، $\epsilon_2(\Delta\omega)$ كالبيينين فى شكل (9-12). نلاحظ أن العلاقة $\epsilon_2(\omega)$ عبارة عن دالة قيمة peaked function تقع قمتهما عند ولها اتساع نصف قمى يساوى γ .



شكل: (9-12) إعتداد كل من مركبتى ثابت العزل (a) ومعاملى الانكسار والانتراض (b) على التردد عند قيم قريبة من التردد الرنينى

الدالة $\epsilon_2(\omega)$ تبدو أكثر تعقيدا، حيث تزداد تدريجيا بالاقتراب من ω_0 من جهة قيم الترددات الأقل بدءا بالقيمة ϵ_{st} لتصل إلى قيمتها العظمى عندما $\omega = \omega_0 - \gamma/2$ ، ثم يحدث هبوط حاد لها وتمر بقيمة صغرى عندما $\omega = \omega_0 + \gamma/2$ ، ثم تزداد لتصل للقيمة ϵ_{∞} عند حد التردد العالى. واضح أن مدى الترددات الذى تتأثر فيه قيم يتحدد بقيمة ϵ_1, ϵ_2 وهذا يوضح أن تأثير التخميد على الاهتزازة يسبب توسيع الخط الطيفى (Line broadening). اعتماد مركبتى ثابت العزل ϵ_1, ϵ_2 على التردد المبين فى شكل (9-12)، يسمى اعتماد لورنس (Lorentzian depen).

شكل (9-12) يبين أيضا المنحنين الخاصين بالدالتين $n(\omega)$ ، $K(\omega)$ واللتين تم حسابهما من العلاقتين (22-12)، (23-12) على الترتيب. نلاحظ تشابها عاما في سلوك $n(\omega)$ مع $\epsilon_1(\omega)$ وكذلك في سلوك $K(\omega)$ مع $\epsilon_2(\omega)$ بشكل يوحي بأنهما تطيعان العلاقتين $K = \epsilon_2/n$ ، $n = \sqrt{\epsilon_1}$ ، ويكون هذا التشابه في السلوك تشابها تاما إذا كانت K صغيرة جدا بحيث $K \ll n$ ، وهو ما يطابق حالة الوسط الغازى الذى يبدى امتصاصا ضعيفا بسبب صغر كثافته الذرية. أما فى حالتنا هذه الميئة بشكل (9-12) فإن التشابه يعتبر تقريبا بسبب الامتصاص الكبير الحادث عندما $\omega = \omega_0$ ، حيث لا يمكن افتراض أن $K \ll n$ ، وهو السلوك المتوقع لخط الامتصاص الذرى.

الحالات الرنينية المتعددة Multiple resonance

يمتلك الوسط الضوئى عموما العديد من الترددات الرنينية المميزة، حيث يمكن أن نلاحظ حالات رنين مختلفة بسبب اهتزازات الشبكية وتذبذبات الإلكترونات المربوطة خلال الذرة كما ذكرنا، وقد يكون ممكنا لوسط ما أن يحتوى على العديد من كل نوع من أنواع هذه التذبذبات التى يمكن التعامل معها دون صعوبة باعتبار أنها توجد عند ترددات مختلفة. وفيما سبق قمنا بتقسيم الاستقطاب إلى جزئين رنينى وغير رنينى، وسوف ينصب اهتمامنا هنا على الجزء الرنينى.

تعطى مشاركة متذبذب ما فى الاستقطاب بالعلاقة الآتية:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{\text{reson}} &= N\mathbf{P} = -Nex \\ &= \frac{Ne^2}{m_0} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega)} \boldsymbol{\epsilon} \end{aligned}$$

وفى الوسط الذى يحتوى على العديد من المتذبذبات الإلكترونية ذات الترددات المختلفة، فإن الاستقطاب الكلى يعطى كالتالى:

$$\mathbf{P} = \left[\frac{Ne^2}{m_0} \sum_j \frac{1}{(\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j\omega)} \right] \boldsymbol{\epsilon} \quad (12-52)$$

حيث، هما التردد ومعامل التخميم لخط رنينى معين على الترتيب.

وباستخدام العلاقتين (41-12)، (52-12) نجد أن:

$$D = \epsilon_0 \mathcal{E} + P$$

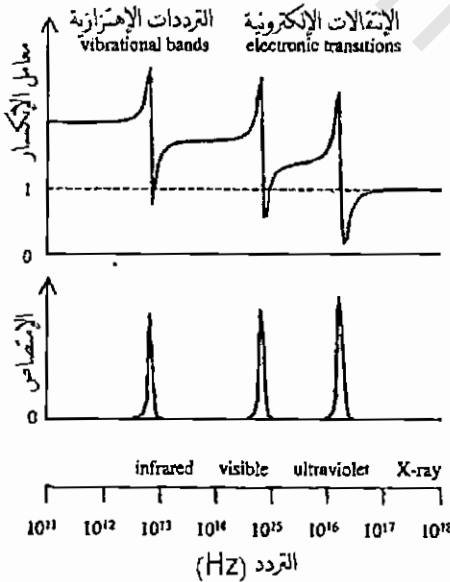
$$= \epsilon_0 \mathcal{E} + \left[\frac{Ne^2}{m_0} \sum_j \frac{1}{(\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j\omega)} \right] \mathcal{E}$$

$$= \epsilon_0 \left[1 + \frac{Ne^2}{m_0\epsilon_0} \sum_j \frac{1}{(\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j\omega)} \right] \mathcal{E}$$

وبمقارنة العلاقة الأخيرة بالعلاقة (12-43) نجد أن:

$$\epsilon_r(\omega) = 1 + \frac{Ne^2}{m_0\epsilon_0} \sum_j \frac{1}{(\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j\omega)} \quad (12-53)$$

شكل (12-10) يبين اعتماد كل من معاملي الانكسار والامتصاص المحسوبين باستخدام العلاقة (12-53) على التردد. ولفهم هذا الشكل دعنا نبدأ بالترددات العالية في اتجاه الترددات الأدنى. وبالتالي لا يمتلك الوسط استقطابية ويكون ثابت العزل مساويا للوحدة، ومع تقليل التردد تظهر الانتقالات الحادثة بواسطة الإلكترونات الداخلية في المناطق الطيفية UV، x-ray، ثم انتقالات الإلكترونات الخارجية في منطقة UV، Vis، حيث توجد



بعدها منطقة خالية تستمر حتى الوصول إلى الترددات الاهتزازية في المنطقة IR. كل من هذه الترددات الرنينية تعطى الخصائص الترددية المميزة لمتذبذب لورنس، حيث تظهر قمة في طيف الامتصاص، وهزهزة (wiggles) في معامل الانكسار. أما في المنطقة البينية فالوسط يعتبر شفافا، حيث يكون معامل الامتصاص مساويا للصفر، ومعامل الانكسار يكون ثابتا تقريبا.

شكل (12-10): اعتماد معاملي الانكسار والامتصاص على التردد لوسط عديد الترددات الرنينية

يزداد معامل الانكسار في اتجاه نقص التردد وذلك لأن $\epsilon_{\infty} < \epsilon_{st}$ وهو ما يعنى أن قيمة n تحت خط الامتصاص أكبر منها فوقه. أى مع عبور الحالات الرنينية في اتجاه نقص التردد واحدة تلو الأخرى تزداد قيمة n .

وعموماً، فلقد تنبأ نموذج المتذبذب ثنائى القطب أن كل متذبذب يضيف حداً أو خطأ للامتصاص (العلاقة 40-12)، وهذا يعنى وجود مجموعات من خطوط الامتصاص التي لها نفس الشدة، إلا أن النتائج العملية بينت أن شدة الامتصاص تختلف بوضوح بين الانتقالات الذرية المختلفة بسبب تغير احتمال الانتقال الميكانيكى الكمي، فإذا كانت f_j هى شدة المتذبذب oscillator strength لكل انتقال، فإن المعادلة (53-12) تصبح كالآتى:

$$\epsilon_r = 1 + \frac{Ne^2}{m_o \epsilon_o} \left[\sum_j \frac{f_j}{(\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega)} \right] \quad (12 - 54)$$

ويمكن بيان أنه من النظرية الكمية لابد أن يكون $\sum_j f_j = 1$ ، فى حين تنبأ النموذج الكلاسيكى أن $f_j = 1$ لكل متذبذب. وتفسير ذلك هو أن الإلكترون يمكن أن يكون متواجداً فى انتقالات عديدة فى نفس الوقت، وأن قوة الامتصاص قد تكون مقسمة بين هذه الانتقالات.

تصحيح المجال الموضعى Local field Correction

تعتبر العلاقة (54-12) صالحة لحساب ثابت العزل فى حالة الغازات بسبب الكثافات الذرية الصغيرة لها. أما فى حالة الجوامد، كوسط ضوئى كثيف، فإنه يوجد عامل آخر لابد أن يؤخذ فى الاعتبار، وهو تأثير ثنائيات الأقطاب الذرية الذاتية الأخرى والتي يتولد عنها مجالات كهربية، وبالتالي يكون المجال الموضعى الفعلى المؤثر على الذرة كالتالى:

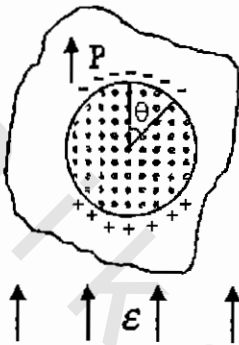
$$\epsilon_{local} = \epsilon + \epsilon_{others} \quad (12-55)$$

حيث ϵ المجال الخارجى، ϵ_{others} المجال الناتج عن ثنائيات الأقطاب الأخرى. وحساب المجال المصحح ϵ_{others} الناشئ، بسبب تأثير ثنائيات الأقطاب الذاتية يعتبر معقداً جداً. إلا أن هناك حلاً تقريبياً للورنس يمكن اشتقاقه إذا افترضنا أن كل ثنائيات الأقطاب تأخذ اتجاهها موازياً لاتجاه المجال ومرتبته فى شبيكية مكعبة، حيث ترسم كرة وهمية حول ذرة معينة (شكل 11-12) بحيث تقسم الوسط إلى ثنائيات أقطاب قريبة

وآخري بعيدة. ويحسب المجال الناتج من الثنائيات البعيدة عن طريق التعامل مع الوسط خارج الكرة على أنه عازل منتظم الاستقطاب. وبهذه الطريقة يمكن الحصول على النتيجة التالية:

$$\epsilon_{\text{others}} = \frac{P}{3\epsilon_0} \quad (12-56)$$

حيث P هي استقطابية العازل خارج الكرة.



شكل (12-11): طريقة لورنس
لحساب المجال الموضعي

وتصبح العلاقة (12-55) كالتالي:

$$\epsilon_{\text{Local}} = \epsilon + \frac{P}{3\epsilon_0} \quad (12-57)$$

وتعطي الاستقطابية الماكروسكوبية من العلاقة:-

$$P = N\epsilon_0 \chi_0 \epsilon_{\text{local}} \quad (12-58)$$

حيث السماحية الذرية (susceptibility/atom)، وتكون الاستقطابية للذرة الواحدة

هي:

$$P = \epsilon_0 \chi_0 \epsilon_{\text{local}} \quad (12-59)$$

وباستخدام العلاقة (12-40) نجد أن:

$$P = \frac{e^2}{m_0} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega)} \epsilon_{\text{Local}}$$

وبمقارنة العلاقتين الأخيرتين نحصل على:

$$\chi_a = \frac{e^2}{\epsilon_0 m_0} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega)} \quad (12-60)$$

وفي حالة وجود حالات رنينية متعددة، فإن العلاقة (12-60) تصبح كالتالي:

$$\chi_a = \frac{e^2}{\epsilon_0 m_0} \sum_j \frac{f_j}{(\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j\omega)} \quad (12-61)$$

علاقة كلاوزيس - موزيتي - Clausius - Mossetti relation

من (12-41)، نجد أن (12-43):

$$P = (\epsilon_r - 1) \epsilon_0 \epsilon$$

ومن (12-57)، نجد أن (12-58):

$$P = N \epsilon_0 \chi_a \left(\epsilon + \frac{P}{3 \epsilon_0} \right)$$

$$\therefore N \epsilon_0 \chi_a \left(\epsilon + \frac{P}{3 \epsilon_0} \right) = (\epsilon_r - 1) \epsilon_0 \epsilon \quad (12-62)$$

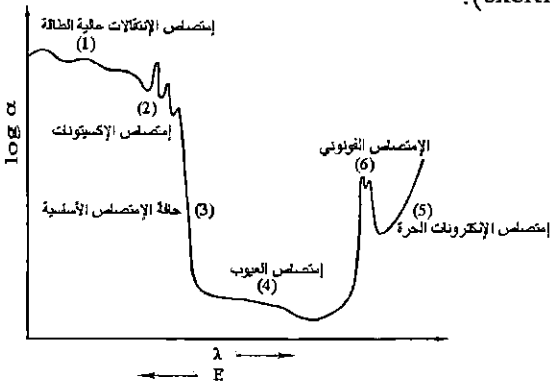
$$\text{i.e. } \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N \chi_a}{3} \quad (12-63)$$

وتسمى العلاقة (١٢-٦٣) بعلاقة كلاوزيس - موزيتي. وهي صالحة تماما في حالة الغازات والسوائل، كما أنها تصلح أيضا للبللورات المكعبة، وذلك لأن تصحيح لورنس يعطى نتائج دقيقة لحساب تأثيرات المجال الموضعي في هذه البللورات.

الامتصاص الضوئي optical absorption

يحدث الامتصاص الضوئي في الجسم الصلب بواسطة العديد من العمليات الإلكترونية كما يتضح من طيف الامتصاص (شكل 12-12)، فإذا بدأنا من الطاقات العالية في الاتجاه الأقل، فإن الامتصاص الضوئي يحدث بشكل أساسي خلال العمليات التالية:

- ١- الانتقال الإلكتروني من أو إلى المناطق ذات الطاقات الأكبر منها للفاصل الطاقى الأساسي لمنطقتي التكافؤ والتوصيل.
- ٢- امتصاص الطاقة الضوئية وتكوين الزوج المترابط من حاملتي الشحنة (إلكترون - فجوة) والمسمى إكسيتون (exciton).



شكل (12-12): الشكل العام لطيف الامتصاص الضوئي.

٣- انتقال الإلكترونات من أقصى قمة منطقة التكافؤ إلى قاع منطقة التوصيل والمسمى بحافة الامتصاص الأساسية Fundamental absorption.

٤- الانتقال من مواضع العيوب البلورية إلى منطقة ما أو خلال المستويات الطاقية للعيوب ذاتها.

٥- انتقال الإلكترونات الحرة إلى حالة طاقية أعلى في نفس المنطقة أو إثارة الاهتزازات البلازمية.

٦- الامتصاص الضوئي لإثارة اهتزازات الشبيكية.

وسوف نتناول بعضا من هذه العمليات بتفصيل أكثر خلال هذا الفصل.

الانتقال الإلكتروني بين المناطق الطاقية Interband transition

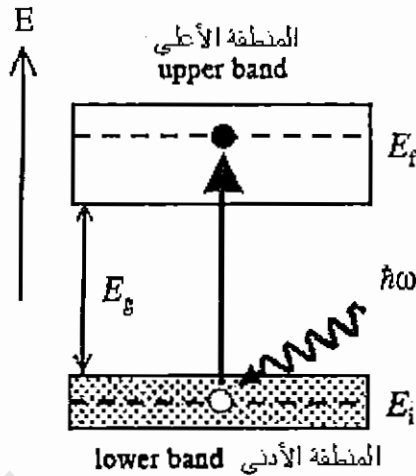
الانتقال المباشر وغير المباشر Direct and indirect transition

شكل (12-13) يبين مخططا بسيطا لمنطقتين طاقتين مسموحتين تفصلهما منطقة محرمة اتساعها E_g . يحدث الانتقال عندما يقفز إلكترون من المنطقة الأقل طاقة بشرط احتوائها على إلكترونات إلى المنطقة الأعلى ذات الحالات الخالية بواسطة امتصاص فوتون. مثال ذلك، الانتقال الحادث عبر المنطقة المحرمة الأساسية Fundamental band gap لشبه الموصل أول العازل، وفي هذه الحالة يقوم الفوتون بإثارة إلكترون من منطقة التكافؤ إلى منطقة التوصيل. ويتطبيق قانون حفظ الطاقة نجد أن:

$$E_f = E_i + \hbar\omega \quad (12-64)$$

حيث E_i ، E_f هما طاقتا الإلكترون في منطقتي التكافؤ والتوصيل على الترتيب، $\hbar\omega$ هي طاقة الفوتون.

ونظرا لوجود مدى مستمر للحالات الطاقية في كل من المنطقتين العليا والسفلى، فإن الانتقال الإلكتروني يكون متاحا في مدى متصل من الترددات. هذا المدى يتحدد بواسطة حدود المنطقتين. ولما كانت أصغر قيمة للفرق $E_f - E_i$ تساوي اتساع المنطقة المحرمة E_g ، فإن الانتقال بين المنطقتين لا يكون ممكنا ما لم يتحقق الشرط $\hbar\omega \geq E_g$. مثل هذا النوع من الانتقالات يكون مصحوبا بتكوين زوج من حوامل الشحنة (إلكترون في منطقة التوصيل وفجوة في منطقة التكافؤ).



شكل (12-13): الإنتقال الإلكتروني عبر المنطقة المحرمة نتيجة إمتصاص فوتون

معدل الطاقة الضوئية الممتصة بواسطة هذه الانتقالات تعتمد على تركيب هذه المناطق والمواقع النسبية لقمة منطقة التكافؤ وقاع منطقة التوصيل، فإذا وقعا في مركز منطقة بريليون ($k=0$)، فإن المادة تكون ذات فاصل طاقي مباشر (direct gap) ويسمى الانتقال بين المنطقتين بالانتقال المباشر (direct transition) - شكل (12-14.a). أما المواد ذات الفاصل الطاقي غير المباشر (indirect gap) فيكون قاع منطقة التوصيل بها غير واقع عند $k=0$ ، ولكنه يكون مزاحا عند حافة منطقة بريليون أو بالقرب منها، ويسمى الانتقال حينئذ بالانتقال غير المباشر (indirect transition) - شكل (12-14.b).

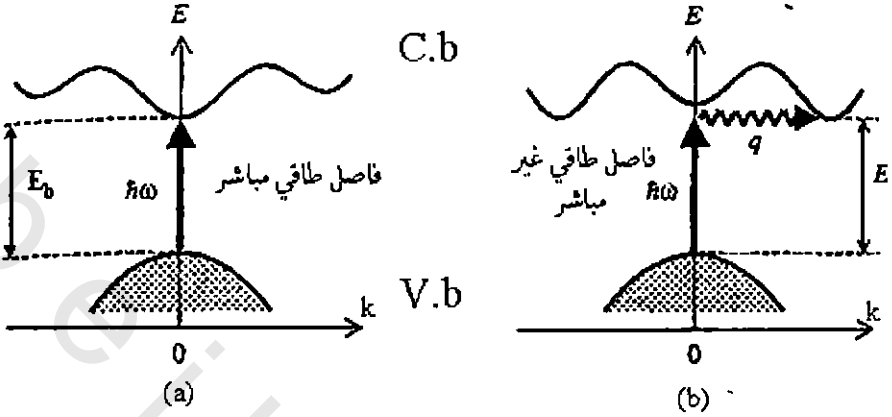
وفى هذه الانتقالات يكون ضروريا أيضا حفظ كمية الحركة بين الحالات الابتدائية والنهائية، وهذا يتطلب أن يكون التغير فى كمية حركة الإلكترون مساويا لكمية حركة الفوتون فى حالة الانتقال المباشر.

$$\text{i.e } \hbar k_f - \hbar k_i = \pm \hbar k$$

ولما كان المتجه الموجى للفوتون $k = \frac{2\pi}{\lambda} = 10^7 m^{-1}$ (حيث الطول الموجى للضوء) أصغر كثيرا منه للإلكترون، لأن المتجه الموجى للإلكترون يرتبط بمنطقة بريليون ويساوى π/a حيث $a = 10^{-10} m$ هى ثابت البلورة، لذا فإنه يمكن إهمال كمية تحرك الفوتون فى العلاقة السابقة.

$$\text{i.e } k_f = k_i \quad (12-65)$$

ولذلك، تمثل عملية امتصاص فوتون في حالة الانتقال المباشر بخط رأسي على مخطط العلاقة $E(k)$.



شكل (12-14): الانتقال المباشر (a) وغير المباشر (b)

وفي حالة الانتقال غير المباشر، فإن المتجه الموجي للإلكترون سيتغير بوضوح عندما يقفز من منطقة التكافؤ إلى منطقة التوصيل، ويكون غير ممكن للإلكترون أن يؤدي هذه القفزة بواسطة امتصاص فوتون فقط بسبب صغر المتجه الموجي له، لذا فإن هذا الانتقال لا بد أن يشتمل على فونون ليحافظ على بقاء كمية التحرك ثابتة، فإذا كان الإلكترون يشغل الحالة الابتدائية (k_i, k_i) في منطقة التكافؤ ثم إنتقل إلى الحالة النهائية (k_f, k_f) في منطقة التوصيل نتيجة حدوث انتقال غير مباشر، فإن حفظ الطاقة يتطلب أن يكون:

$$E_f - E_i = \hbar\omega \pm \hbar U$$

وحفظ كمية الحركة يتطلب أن يكون:

$$\hbar k_f - \hbar k_i = \pm \hbar Q$$

حيث $U\hbar$ ، $\hbar Q$ هما طاقة وكمية تحرك الفونون على الترتيب. وتعني الإشارة (+) امتصاص فونون، والإشارة (-) إشعاع فونون. وأهملت كمية التحرك للفوتون في العلاقة السابقة لصغرها. وعليه، فإن الانتقال غير المباشر يشتمل على فوتونات وفونونات، ولذلك يصنف من وجهة النظر الكمية ضمن العمليات من الرتبة الثانية - second order process، أما الانتقال المباشر فيعتبر عملية من الرتبة الأولى وذلك لاحتوائه على فوتونات فقط.

اعتماد معامل الامتصاص على التردد

اعتماد معامل الامتصاص (α) على التردد يمكن تحديده إذا أمكن معرفة كثافة الحالات (joint density of states) للإلكترونات والفجوات، وكثافة الحالات بدورها يمكن حسابها بتحليل التركيب النطاقي المبسط المبين في شكل (12-15).

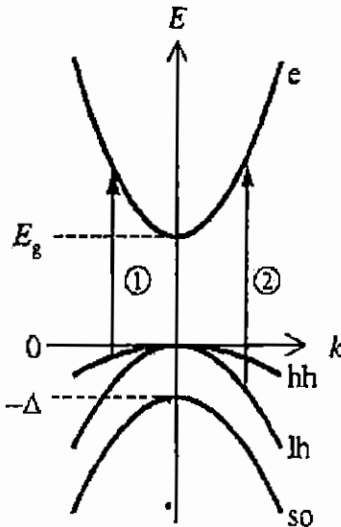
ويتحدد شكل المناطق الطاقية (the dispersion of the bands) بقيم الكتل الفعالة الخاصة بها، فإذا كانت m_{so}^* ، m_{lh}^* ، m_{hh}^* ، m^* هي الكتل الفعالة للإلكترونات منطقة التوصيل، للفجوات الثقيلة heavy holes، للفجوات الخفيفة light holes ولفجوات المنطقة المفصولة split-off holes على الترتيب، فإنه يمكن لنا كتابة العلاقة $E(k)$ لكل من هذه المناطق كالآتي:

$$E_c(k) = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \quad (12-66)$$

$$E_{hh}(k) = - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_{hh}^*} \quad (12-67)$$

$$E_{lh}(k) = - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_{lh}^*} \quad (12-68)$$

$$E_{so}(k) = - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_{so}^*} \quad (12-69)$$



شكل (12-15): مخطط بسيط للتركيب النطاقي لحساب كثافة الحالات للإلكترونات والفجوات

وبتطبيق قانون حفظ الطاقة في حالة الفجوات الثقيلة أو الخفيفة نجد أن:

$$\hbar\omega = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \quad (12-70)$$

حيث m_h^* ترمز لأي من m_{hh}^* أو m_{hh}^* . وبإدخال الكتلة الفعالة u للإلكترون والفجوة

معاً، حيث:

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{m^*} + \frac{1}{m_h^*} \quad (12-71)$$

يمكن تبسيط العلاقة (١٢-٧٠) لتصبح بالصورة الآتية:

$$\hbar\omega = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2u} \quad (12-72)$$

وتعطي كثافة الحالات للإلكترونات من العلاقة الآتية:

$$N(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m^*}{\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}} E^{\frac{1}{2}}$$

حيث E - طاقة الإلكترون مقاسة من قاع منطقة التوصيل. وتحسب كثافة الحالات

الرابطية $g(\hbar\omega)$ joint density of states للإلكترونات والفجوات عادة من قمة منطقة

التكافؤ، بوضع $E = (\hbar\omega - E_g)$ وإستبدال m^* بالكتلة u نجد أن:

$$g(\hbar\omega) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2u}{\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}} (\hbar\omega - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (12-73)$$

واضح أن كثافة الحالات تتناسب مع $(\hbar\omega - E_g)^{\frac{1}{2}}$ لكل القيم $\hbar\omega \geq E_g$ ، واما

كان معامل الامتصاص (α) يتناسب مع كثافة الحالات، فإنه يتناسب بدوره مع المقدار $(\hbar\omega - E_g)^{\frac{1}{2}}$ للانتقال المباشر. أي أن:

$$\hbar\omega < E_g \quad \alpha = 0 \quad \text{عندما}$$

$$\hbar\omega \geq E_g \quad \alpha \sim (\hbar\omega - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad \text{عندما} \quad (12-74)$$

النتائج العملية لمعامل الامتصاص لأشياء موصلات III-V ذات الفاصل الطاقى المباشر

شكل (12-16) أظهرت علاقة خطية بين α^2 ، $(\hbar\omega - E_g)$ مؤكدة توافقها مع هذا

الاستنتاج النظرى، إلا أنه لكثير من أشباه الموصلات (III-V) لا تتفق النتائج العملية

والنظرية تماماً. وربما يرجع ذلك للأسباب التالية:

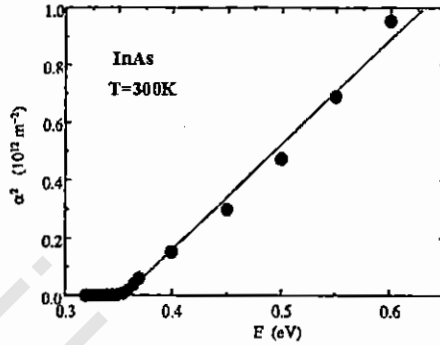
١- لم يؤخذ فى الاعتبار تأثير الكتلة على الامتصاص حيث يكون الامتصاص كبيراً

للقيم الكبيرة للكتلة.

٢- أهمل تأثير الجذب لكولوم بين الإلكترون والفجوة، والذى يحفز تكوين إكسيتونات، حيث

يصبح هذا التأثير قوياً كلما كان اتساع الفاصل الطاقى كبيراً أو درجة الحرارة منخفضة.

- ٣- أهمل تأثير الشوائب والتي تتمركز في منطقة الفاصل الطاقى لأشباه الموصلات ويمكنها امتصاص طاقة ضوئية أقل من الفاصل الطاقى.
- ٤- حسبت كثافة الحالات على أساس أن المنطقة عبارة عن قطع مكافئ، وهذا صحيح فقط بالقرب من $k = 0$.

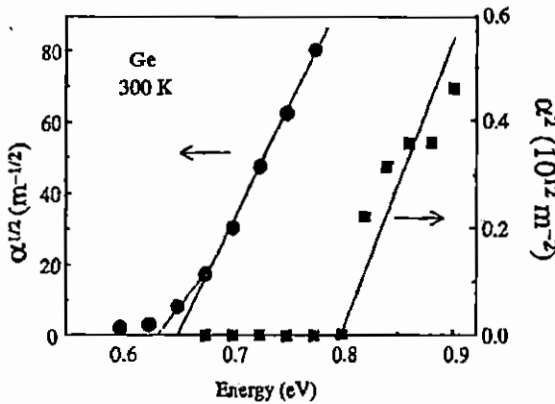


شكل (12-16): علاقة خطية بين α^2 ، لشبه الموصل ذي الفاصل الطاقى المباشر

أما فى حالة الانتقال غير المباشر والذي فيه امتصاص أو إشعاع لفونون، وجد أن معامل الامتصاص يمكن أن يعطى بالصورة الآتية:

$$\alpha^{\text{indirect}} \sim (\hbar\omega - E_g \pm \hbar U)^2 \quad (12-75)$$

شكل (12-17) يعطى نتائج قياسات الامتصاص للجermanيوم عند درجة حرارة الغرفة، حيث يتضح أن العلاقة $\sqrt{\alpha}$ مع $\hbar\omega$ فى المدى الطيفى القريب من قيمة E_g عبارة عن خط مستقيم، مما يتفق مع العلاقة (12-75)، كذلك نجد أن: $\hbar U \approx 0.01 \text{ eV}$, $E_g = 0.66 \text{ eV}$ (فونون ممتص)، كما يدل ذيل المنحنى الممتد حتى 0.60 eV على حدوث امتصاص لأكثر من فونون (multiphonon absorption).



شكل (12-17): علاقة خطية بين $\sqrt{\alpha}$ ، $\hbar\omega$ للجermanيوم ذي الفاصل الطاقى غير المباشر.

انكماش المنطقة المحرمة وامتلاء المنطقة المسموحة

Band – gap narrowing and band filling

تتسبب الكثافة العالية للشوائب النقطية point defects في ظهور حوامل شحنة بكثافة كبيرة في المواد شبه الموصلة، مما يؤثر تأثيراً حاداً على التركيب النطاقي للمادة. هذا التأثير يتمثل في تكوين ذيل للمنطقة band tailing، إزاحة حافة الامتصاص الأساسية في اتجاه القيم الطاقية الأعلى Blue shift والمعروفة بتأثير بورششتين – موس BM effect، وكذلك في تضيق أو انكماش المنطقة المحرمة gap narrowing. فالمستويات الطاقية للشوائب المعطية تكون عبارة عن خطوط منفصلة إذا كانت كثافة الشوائب منخفضة وتقع تحت قاع منطقة التوصيل، ونتيجة للانتقال المتتابع للإلكترونات من هذه المستويات الشائبة تمتلئ منطقة التوصيل وتحدث إزاحة للانتقالات بين منطقتي التكافؤ والتوصيل في اتجاه الطاقات الأعلى. وعندما يزيد تركيز حوامل الشحنة عن القيمة الحرجة لموت (Mott) والتي تبلغ 10^{24} m^{-3} ، تتداخل الدوال الموجية للذرات الشائبة المعطية وتغوص منطقة الشوائب في منطقة التوصيل بسبب اتساع (انبعاث) مستويات هذه الشوائب وينتقل مستوى فيرمي إلى منطقة التوصيل مؤدياً إلى انحلال الغاز الإلكتروني وتكوين ذيل لمنطقة التوصيل. في نفس الوقت، يؤدي التفاعل بين الجسيمات العديدة (تأثير كولوم بين الجسيمات المشحونة، إلكترون مع إلكترون، إلكترون مع الذرات الشائبة المتأينة) إلى إزاحة منطقة التوصيل إلى أسفل. وتتأثر منطقة التكافؤ بشكل عكسي، فالتفاعلات بين الفجوات والإلكترونات مع أيونات الشوائب المعطية سيؤدي إلى إزاحة منطقة التكافؤ إلى أعلى.

وعموماً يتحدد اتساع المنطقة المحرمة الضوئية (optical gap) بالعاملين الآتيين:

١- إزاحة حافة الامتصاص (BM – shift) بسبب امتلاء الحالات الأدنى لمنطقة التوصيل بواسطة الإلكترونات.

٢- انكماش المنطقة المحرمة بسبب تداخل الدوال الموجية لحوامل الشحنة في حالة الكثافات العالية والمسمى many – body effect. هذا العامل يمكن إهماله في حالتى المواد النقية أو المطعومة بدرجات صغيرة، أى عندما تكون كثافة حوامل الشحنة أقل من القيمة الحرجة، وتعطى القيمة الطاقية للمنطقة المحرمة للانتقالات المباشرة بالعلاقة التالية:

$$E_{g_0} = E_c^0(k_f) - E_v^0(k_f) \quad (12 - 76)$$

حيث $E_c^0(k_f)$ ، $E_v^0(k_f)$ هما الطاقتان الابتدائية والنهائية للانتقال على الترتيب ،
 E_{g0} هى اتساع المنطقة المحرمة لشبه الموصل غير المطعوم. 0 ترمز للحالات غير
المشوشة unperturbed bands ، k_f المتجه الموجى لفيرمى والذى يعطى بالعلاقة
 $k_f = (3\pi^2 n_e)^{\frac{1}{3}}$ ، حيث n_e هى تركيز أو كثافة الإلكترونات.

وتعتمد قيمة الإزاحة (BM - shift) على طاقة كل من الحالات الابتدائية
والنهائية ، وتعطى من العلاقة الآتية :

$$\begin{aligned} \Delta E_g^{BM} &= \frac{\hbar^2 k_f^2}{2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \\ &= \frac{\hbar^2 k_f^2}{2\mu} = \frac{\hbar^2}{2\mu} (3\pi^2 n_e)^{\frac{2}{3}} \end{aligned} \quad (12 - 77)$$

واضح أن الإزاحة ΔE_g^{BM} تتناسب طرديا مع $n_e^{\frac{2}{3}}$.

ويعطى الفاصل الضوئى (optical band gap) من العلاقة الآتية :

$$\begin{aligned} E_g^{OP} &= E_{g0} + \Delta E_g^{BM} \\ &= E_{g0} + \frac{\hbar^2}{2\mu} (3\pi^2 n_e)^{\frac{2}{3}} \end{aligned} \quad (12 - 78)$$

وعندما يزيد تركيز حوامل الشحنة عن قيمته الحرجة يصبح تأثير العامل الثانى
many - body effect على المنطقة الطاقية ملحوظا ، حيث يتصف بنظرية التشويش
الكمية theory of perturbation ، كالاتى :

$$E_v(k, \omega) = E_v^0(k) + \hbar \Sigma_v(k, \omega)$$

$$E_c(k, \omega) = E_c^0(k) + \hbar \Sigma_c(k, \omega)$$

$\hbar \Sigma_v(k, \omega)$ ، $\hbar \Sigma_c(k, \omega)$ هى الطاقات الذاتية (self - energy terms) لمنطقتي
التكافؤ والتوصيل على الترتيب نتيجة تأثير تشويش التداخل لحوامل الشحنة ، والذى
يؤدى إلى انكماش المنطقة المحرمة ، وبالتالي يعطى اتساع الفاصل الضوئى بالعلاقة
الآتية :

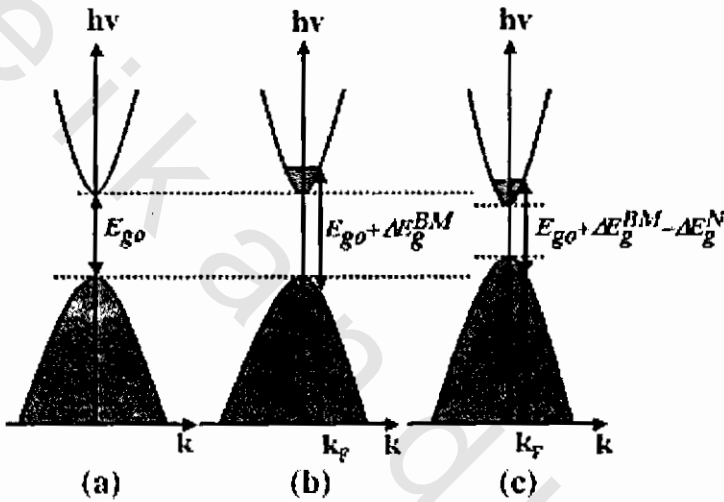
$$\begin{aligned} E_g^{OP} &= E_c(k_f, \omega) - E_v(k_f, \omega) \\ &= E_{g0} + \Delta E_g^{BM} - \Delta E_g^N \end{aligned} \quad (12 - 79)$$

حيث $\Delta E_g^N = \hbar \Sigma_v(k, \omega) - \hbar \Sigma_c(k, \omega)$ هو مقدار انكماش المنطقة المحرمة.

شكل (12-18) يوضح نموذجا بسيطا للتركيب الطاقى لشبه موصل منحل ، حيث

تعتبر المساحات المظلمة عن الحالات المشغولة، كما أخذت قمة منطقة التكافؤ كمرجع لقياس الطاقة. نلاحظ من الشكل ما يلي:

- ١- عندما يكون التركيب متوازن من حيث التكافؤ (stoichiometric)، تظهر منطقة محرمة مباشرة تفصل بين منطقتي التوصيل والتكافؤ اتساعها E_{g0} (شكل 12-18.a)
- ٢- عندما يكون التركيب غير متوازن non-stoichiometric والكثافة الإلكترونية أقل من الكثافة الحرجة، نلاحظ أن الفاصل الطاقى الضوئى قد زاد بالمقدار نتيجة للإزاحة الطاقية للانتقال الإلكتروني فى اتجاه القيمة الطاقية الأعلى بسبب امتلاء الحالات الأدنى من قاع منطقة التوصيل (شكل 12-18.b).



شكل (12-18): التركيب الطاقى لشبه موصل منحل متوازن التكافؤ (a) stoichiometric، غير متوازن التكافؤ non-stoichiometric والكثافة الإلكترونية أقل من قيمتها الحرجة (b)، غير متوازن التكافؤ والكثافة الإلكترونية أكبر من الحرجة (c).

- ٣- عندما يكون التركيب غير متوازن والكثافة الإلكترونية أكبر من الكثافة الحرجة، نلاحظ حدوث ضيق أو انكماش للمنطقة الطاقية بسبب تأثير تداخل الدوال الموجية لحوامل الشحنة، والذي يؤدي إلى تعويض جزئى لاتساع الناتج عن تأثير إزاحة بورشتين - موس (شكل 12-18.c).

الخصائص الضوئية المرتبطة بحوامل الشحنة الحرة

حوامل الشحنة الحرة وانعكاسية الوسط البلازمي

free carriers and plasma reflection

الغاز المتعادل المكون من أيونات وإلكترونات يسمى بلازما، لذلك تعامل المعادن وأشباه الموصلات المنحلة على أنها أوساط بلازما لأنها تحتوى على أعداد متساوية من الأيونات الموجبة الثابتة والإلكترونات الحرة. وعندما تتعامل هذه الإلكترونات مع الموجات الكهرومغناطيسية لا تتعرض لقوى رادة خلافا لما يحدث مع الإلكترونات المربوطة فى الذرة، والتي لها ترددات رنينية فى المنطقة المرئية ومنطقة الأشعة فوق البنفسجية بسبب هذه القوى الرادة.

سنحاول الآن إيجاد صيغة لثابت العزل لوسط البلازما باستخدام نموذج درودى - لورنس، فإذا تأثر إلكترون كهربي متردد $\epsilon(t)$ وأدى إلى إزاحته بمقدار، فإن معادلة الحركة له تكتب بالصورة الآتية:

$$m_0 \frac{d^2x}{dt^2} + m_0\gamma \frac{dx}{dt} = -e\epsilon(t) \quad (12-80)$$

$$= -e\epsilon_0 e^{-i\omega t}$$

حيث ω - تردد الضوء، ϵ_0 السعة الموجية. ويمثل الحد الأول فى العلاقة السابقة قوة التعجيل للإلكترون، والحد الثانى - قوة تخميد الاحتكاك، بينما يمثل الطرف الأيمن قوة التوجيه القسرية بواسطة مجال الموجة الضوئية. العلاقة (12-80) هى نفسها معادلة الحركة لمتذبذب الإلكترونات المربوطة فى الذرة، إلا أنها تخلو من حد القوة الرادة، حيث أننا نتعامل مع إلكترونات حرة، وبوضع $x = x_0 e^{-i\omega t}$ فى المعادلة (12-80) نحصل على ما يلى:

$$x(t) = \frac{e\epsilon(t)}{m_0(\omega^2 + i\gamma\omega)} \quad (12-81)$$

وتعطى الاستقطابية للغاز الإلكتروني بالعلاقة $P = -eNx$ ، حيث N هو عدد الإلكترونات فى وحدة الحجم، كما تعطى الإزاحة الكهربية بدلالة ثابت العزل ϵ_r بالعلاقة الآتية:

$$D = \epsilon_r \epsilon_0 \epsilon$$

$$= \epsilon_0 (1 + \chi) \epsilon = \epsilon_0 \epsilon + P$$

$$= \epsilon_0 \mathcal{E} - \frac{Ne^2}{m_0(\omega^2 + i\gamma\omega)} \mathcal{E} \quad (12-82)$$

أى أن:

$$\epsilon_r(\omega) = 1 - \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_0} \frac{1}{(\omega^2 + i\gamma\omega)} \quad (12-83)$$

هذه العلاقة تشبه تماما العلاقة (12-44) لتذبذب الإلكترونات المربوطة، عدا أن التردد الرنينى بها ω_0 يساوى صفرا، كما أن تأثير الاستقطاب المرجعى (background) لم يؤخذ فى الاعتبار. ويمكن إعادة كتابة العلاقة (12-83) فى الصورة الآتية:

$$\epsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 + i\gamma\omega)} \quad (12-84)$$

حيث:

$$\omega_p = \left(\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12-85)$$

تسمى تردد البلازما (plasma frequency). فإذا كان التخمييد ضعيفا ($\gamma = 0$) فإن

ثابت العزل يعطى كالآتى:

$$\epsilon_r = 1 - \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)^2 \quad (12-86)$$

ومعامل الانكسار المركب يكون كالآتى:

$$\bar{n} = \sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}$$

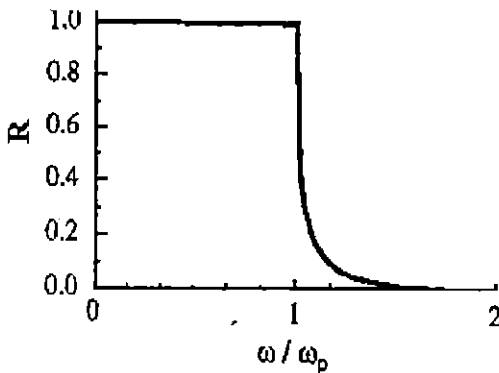
وبالتالى تصبح \bar{n} ذات قيمة تخيلية عندما $\omega_p > \omega$ وحقيقية عندما $\omega > \omega_p$ ،

ومساوية للصفر عندما $\omega_p = \omega$ ، وتعطى الانعكاسية \mathcal{R} بالعلاقة الآتية:

$$\mathcal{R} = \left| \frac{\bar{n} - 1}{\bar{n} + 1} \right|^2 \quad (12-87)$$

حيث $\mathcal{R} \leftarrow 1$ عندما $\omega \geq \omega_p$ ، وتقل \mathcal{R} للقيم $\omega > \omega_p$ وتقترب من الصفر عندما

تقترب ω من ∞ ، وهو ما يوضحه سلوك العلاقة بين \mathcal{R} ، $\frac{\omega}{\omega_p}$ المبين فى شكل (12-19).



شكل (12-19): علاقة انعكاسية الوسط البلازما بالتردد

الموصلية الكهربية للإلكترونات الحرة Free carrier conductivity

لقد أهملنا تأثير التخميد في العلاقة (12-86)، ولكي نجعل المعنى الفيزيائي للتخميد أكثر وضوحاً دعنا نعيد كتابة معادلة الحركة بالطريقة التالية:

$$m_0 \frac{dv}{dt} + m_0 \gamma v = -e \epsilon \quad (12-88)$$

$$\text{i.e. } \frac{dp}{dt} = -\frac{p}{\tau} - e \epsilon \quad (12-89)$$

حيث $P = m_0 v$ هي كمية الحركة، $\tau = \frac{1}{\gamma}$ هي زمن التخميد damping time وهي مقلوب معامل التخميد. وتبين العلاقة (12-89) أن المجال يعمل على تعجيل الإلكترون، بينما التخميد يعمل على تثبيط كمية تحركه مع الزمن ليفقدها في زمن قدره T ، ولذلك تسمى T بزمن تبعثر كمية التحرك. وإذا كان المجال متردداً ($\epsilon = \epsilon_0 e^{-i\omega t}$)، فإن كلا من $x = x_0 e^{-i\omega t}$ ، $v = v_0 e^{-i\omega t}$ يكونان مترددين أيضاً. بالتعويض في العلاقة (12-89) نجد أن:

$$v(t) = \frac{-e\tau}{m_0} \left(\frac{1}{1-i\omega\tau} \right) \epsilon(t) \quad (12-90)$$

وتعطي كثافة التيار j بالعلاقة الآتية:

$$j = -Ne v = \sigma \epsilon \quad (12-91)$$

وبضم العلاقتين (12-90)، (12-91) نحصل على الموصلية الكهربية المترددة (ω) σ كالتالي:

$$j = \frac{Ne^2\tau}{m_0} \left(\frac{1}{1-i\omega\tau} \right) \epsilon = \sigma \epsilon$$

$$\begin{aligned} \therefore \sigma(\omega) &= \frac{Ne^2\tau}{m_0} \left(\frac{1}{1-i\omega\tau} \right) \\ &= \sigma_0 \left(\frac{1}{1-i\omega\tau} \right) \end{aligned} \quad (12-92)$$

$$\sigma_0 = \frac{Ne^2\tau}{m_0} \quad (12-93)$$

حيث σ_0 هي الموصلية الكهربية عندما يكون المجال الكهربائي ثابتاً.

absorption coefficient of free electrons

سنحاول اشتقاق علاقة تربط بين الموصلية الكهربائية للإلكترونات الحرة ومعامل الامتصاص عند ترددات صغيرة جدا بحيث $\omega \ll \mathcal{T}^{-1}$ أى $\omega \mathcal{T} \ll 1$. لذلك سنجزئ ثابت العزل ϵ_r المعطى بالعلاقة (12-84) إلى جزئيه الحقيقى والتخيلى مع وضع $\gamma = \mathcal{T}^{-1}$ ، حيث نحصل على:

$$\epsilon_1 = 1 - \frac{\omega_p^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (12-94)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\omega_p^2 \tau}{\omega(1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (12-95)$$

وبما أن $\omega \mathcal{T} \ll 1$ ، فإن $\epsilon_2 \gg \epsilon_1$. وبالتعويض عن ϵ_1 ، ϵ_2 فى العلاقتين (12-94) و (12-95)، لتعيين معاملى الانكسار n والإضمحلال K ، نجد أن:

$$n \approx K = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{2}}$$

$$\begin{aligned} \text{i.e. } \alpha &= \frac{2\omega K}{c} = \frac{2\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_2}{2}} = \frac{2\omega}{c} (\frac{\omega_p^2 \tau}{2\omega})^{1/2} \\ &= \left(\frac{2\omega_p^2 \tau \omega}{c^2} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (12-96)$$

وبالتعويض عن $\omega_p^2 \tau = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0}$ (باستخدام العلاقتين (12-85)، (12-93))، وعن $c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}$ (النظرية الكهرومغناطيسية) فى العلاقة (12-96) نجد أن:

$$\alpha = (2\sigma_0 \omega \mu_0)^{1/2} \quad (12-97)$$

وهكذا، فإن معامل الامتصاص يتناسب مع الجذر التربيعى لكل من الموصلية الكهربائية المستمرة والتردد.

وتبين العلاقة (12-97) أن المجال الكهربى المتردد يمكنه فقط التغلغل إلى مسافة صغيرة خلال المواد الموصلة مثل المعادن وهى ظاهرة معروفة وتسمى skin effect، فإذا كان المجال يتغير بالعامل $e^{-z/\delta}$ عند مسافة z من السطح، فإن الشدة تقل بالعامل $e^{-2z/\delta}$ ، وبالمقارنة مع العلاقة (4) نجد أن:

$$\delta = \frac{2}{\alpha} = \left(\frac{2}{\sigma_0 \omega \mu_0} \right)^{1/2} \quad (12-98)$$

حيث تعرف δ بعمق التغلغل (skin depth). والعلاقة (97-12) لا تصلح للاستخدام في حالة الترددات العالية وذلك لأن التقريب $\omega T \ll 1$ يصبح غير صحيح.

البلازمونات Plasmons

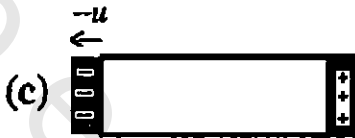
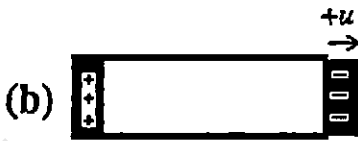
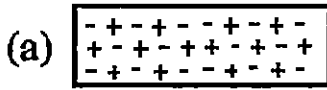
تخبرنا العلاقة (86-12) أن ثابت العزل عند التخميد الضعيف لغاز الإلكترونات الحرة يساوى الصفر عندما $\omega = \omega_p$ ، وهذا يعنى أن شيئاً غير عادى يحدث عند هذا التردد، وهذا حقيقى فى الواقع.

ذكرنا آنفاً، أن نظام البلازما (المعادن مثلاً) يتكون من أيونات موجبة ذات مواضع ثابتة فى الشبكية مع غاز إلكترونى يعادل تأثير شحنة الأيونات. شكل (20.a-12) يبين شريحة من الأيونات والإلكترونات خلال جسم البللورة. نفرض حدوث إزاحة للغاز الإلكترونى كما فى شكل (20.b-12)، فإن أيونات الشبكية تبدى قوة رادة مضادة لهذه الإزاحة. هذا يؤدى إلى إزاحة الإلكترونات إلى الجانب الآخر متجاوزة وضع الاتزان شكل (20.c-12)، وبالتالي تحدث قوة رادة من الأيونات لإعادتها. وهكذا، يحدث تذبذب للغاز الإلكترونى حول الأيونات الموجبة. هذه الاهتزازات تسمى اهتزازات البلازما (plasma oscillation)، والكم الطاقى لهذه الاهتزازات يسمى بلازمون (Plasmon).

إزاحة الإلكترونات $\pm u$ تتسبب فى تكوين شحنات على سطحى الشريحة، نفرض أن قيمتها لوحدة المساحات تساوى $-Neu$ ، حيث N عدد الإلكترونات فى وحدة الحجم للمعدن. وتقوم الأيونات unbalanced ions بتكوين شحنات مساوية موجبة عند الطرف الآخر للشريحة. ومن قانون جاوس أن شدة المجال ϵ تعطى بالعلاقة $\epsilon = \frac{Q}{\epsilon_0} = \frac{Neu}{\epsilon_0}$. يقوم هذا المجال الكهربى بمعارضة الإزاحة للإلكترونات، وتكتب معادلة الحركة لوحدة الحجم للغاز الإلكترونى فى هذه الحالة بالعلاقة الآتية:

$$Nm_o \frac{d^2u}{dt^2} = -Ne\epsilon = -\left(\frac{N^2e^2}{\epsilon_0}\right) u$$

$$\text{i.e. } \frac{d^2u}{dt^2} + \left(\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_o}\right) u = 0 \quad (12 - 99)$$



شكل (20-12): شريحة للوسط البلازما
(a)، تذبذب الغاز الإلكتروني حول
الأيونات الموجبة (b & c).

وهي معادلة حركة توافقية بسيطة لها تردد زاوي ω يعطى من العلاقة الآتية:

$$\omega = \left(\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_0} \right)^{1/2} = \omega_p \quad (12-100)$$

أى أن التردد الزاوي لهذه الحركة الاهتزازية بواسطة الغاز الإلكتروني يساوى ω_p تردد البلازما. هذا يعنى أن البلازما لها تردد رنين طبيعي يساوى. وتكون الإستقطابية P (عزم ثنائى القطب لوحدة الحجم) الناتجة تساوى Neu وتعمل فى اتجاه مضاد للمجال، وتكون الإزاحة الكهربائية $D = \epsilon_0 \epsilon + P$ مساوية للصفر، وهذا يعنى أن ثابت ϵ_r العزل يساوى الصفر أيضا. أى أن اهتزاز البلازما يحدث تحت شرط $\epsilon_r = 0$. ويمكن ملاحظة هذه الاهتزازات البلازمية فى المعادن بواسطة طيف فقد الطاقة electrons energy loss spectroscopy، حيث يسלט شعاع إلكترونى بطاقة E_{in} تساوى تقريبا 2 keV على غشاء رقيق thin film من المعدن. الإلكترون أثناء مروره خلال المعدن يمكنه إثارة البلازمونات وتعطى طاقة الإلكترونات النافذة E_{out} خلال المعدن من العلاقة الآتية:

$$E_{out} = E_{in} - n\hbar\omega_p$$

حيث n - عدد البلازمونات المثارة. وبقياس طاقة الإلكترونات النافذة يمكن إيجاد تردد البلازما ω_p .

كما يمكن ملاحظة البلازمونات مباشرة فى حالة أشباه الموصلات المنحلة باستخدام طيف رامان Raman spectroscopy، حيث تتغير طاقة الفوتون الساقط بعد خروجه

بسبب عملية التثتت غير المرن مع البلازمون، حيث يعطى قانون حفظ الطاقة بالصورة الآتية:

$$\hbar\omega_{\text{out}} = \hbar\omega_{\text{in}} \pm \hbar\omega_p \quad (12-101)$$

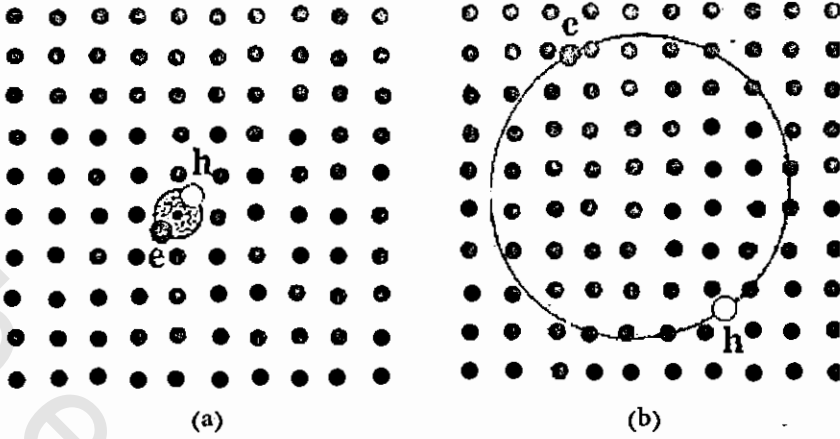
حيث ω_{out} طاقة الفوتون الخارج، ω_{in} طاقة الفوتون الساقط، $\omega_p \pm$ طاقة البلازمون الممتص (+) أو المنبعث (-).

الامتصاص الضوئى وتكون الإكسيتونات Excitons

امتصاص فوتون وحدوث انتقال بين المناطق فى شبه الموصل أو العازل يؤدى إلى ظهور إلكترون فى منطقة التوصيل وفجوة فى منطقة التكافؤ. هذان الجسيمان مختلفا الشحنة ينشآن عند نفس النقطة فى الفراغ البلورى ويمكنهما التجاذب فيما بينهما بقوة كولوم، مما يزيد من احتمال تكوين الزوج (إلكترون - فجوة)، وبالتالي يزيد معدل الانتقال الضوئى (Optical transition). هذا الزوج المربوط المتعادل يسمى إكسيتون (Exciton). والإكسيتونات يمكن ملاحظتها فى العديد من المواد البلورية وتتواجد على نوعين هما :

١- إكسيتونات فرنكل (Frenkel excitons)، وهى إكسيتونات عالية الترابط tightly bound excitons)) وتلاحظ عادة فى بلورات المواد العازلة والجزئية. ولها نصف قطر ترابط صغير يقارب أبعاد الخلية الأحادية، وهذا يجعلها ضمن الحالات الموضعية (Localized states) - شكل (12-21 a).

٢- إكسيتونات ونر - موت (winner - mott excitons) وتعرف بالإكسيتونات الحرة Free excitons، وتلاحظ عادة فى أشباه الموصلات. نصف قطر الترابط لها كبير ويشمل العديد من الذرات (شكل 12-21.b)، وبالتالي فهى تتبع الحالات غير الموضعية delocalized states، وتتحرك فى البلورة عن طريق القفز (hopping). ويكون الإكسيتون مستقرا فقط إذا كانت طاقة التجاذب كافية لحمايته ضد التصادم بالفونونات، أى عندما تكون الطاقة عند درجة حرارة T أكبر من طاقة الفونون $k_B T$ المثار حراريا.



شكل (12-21): نوعا الإكسيتونات المربوط (a) والحر (b).

الامتصاص للطاقات الأعلى من الحافة الأساسية

معامل الامتصاص α يتناسب مع كثافة الحالات $g(\hbar\omega)$ كما تخبرنا قاعدة فيرمي fermi's golden rule، وباعتبار حقيقة أن الحالات الإلكترونية الابتدائية والنهائية تقع خلال مناطق متصلة، فإن كثافة الحالات في وحدة المدى الطاقى تعطى كما يلي:

$$g(E) dE = 2 g(k) dk \quad (12-102)$$

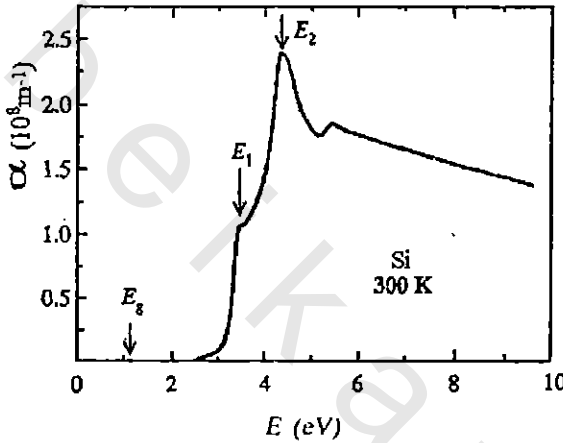
حيث $g(k)$ - كثافة الحالات في فراغ المتجه الموجى، و ضربنا في العدد 2 بسبب وجود إلكترونين في الحالة طبقا لمبدأ باولي.

$$\text{i.e.} \quad g(E) = \frac{2g(k)}{dE/dk} \quad (12-103)$$

العلاقة الأخيرة تبين أن كثافة الحالات تتناسب عكسيا مع التدرج $\frac{dE}{dk}$ (gradient) لنحنى العلاقة $(E-k)$ ، وبالتالي فإن القوة الامتصاصية تتناسب مع $\frac{dE}{dk}$ عكسيا، فإذا عرف التركيب النطاقي للمادة يمكن تحديد الاحتمالات الأقوى للانتقال عبر المناطق.

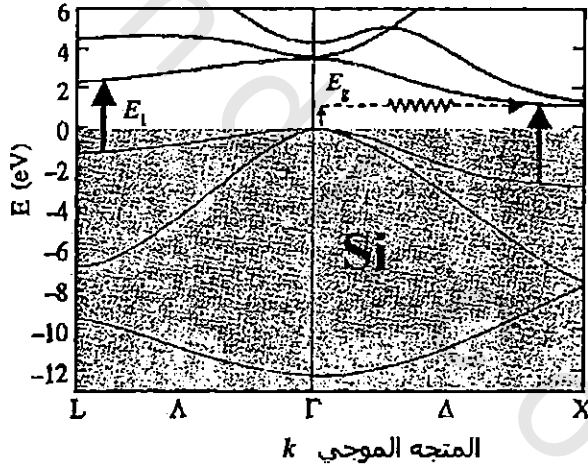
شكل (12-22) يبين طيف الامتصاص لعنصر السيليكون عند درجة حرارة الغرفة، حيث يتضح وجود قمتين للامتصاص E_1, E_2 عند 3.5 eV ، 4.3 eV على الترتيب فوق حافة الامتصاص الأساسية $E_g = 1.1 \text{ eV}$. هذه الخصائص موضحة على التركيب النطاقي في شكل (12-23)، حيث نلاحظ أن منطقتي التكافؤ والتوصيل عند هذين الانتقالين تبدوان متوازيتين تقريبا، وأن $\frac{dE}{dk} \approx 0$ وبالتالي تكون كثافة الحالات عالية جدا، لذا نتوقع أن يكون الامتصاص عاليا جدا.

في منطقة بريليون عندما تكون المناطق متوازية، فإن طاقة الفوتون E للانتقال المباشر لا تعتمد على k ، لأنه يمكن الحصول على انتقالات مباشرة عديدة لنفس طاقة الفوتون عند قيم مختلفة للمتجه k ، وهذا حقيقي عندما $\frac{dE}{dk} \approx 0$ ، حيث تتشتت (diverge) الحالات الطاقية على هذه المنطقة. وعمليا يحدث توازي المناطق الطاقية عند جزء فقط من منطقة بريليون، وبالتالي تصبح كثافة الحالات كبيرة جدا عند هذا الجزء.



شكل (12-22): طيف امتصاص السيليكون عند درجة حرارة الغرفة.

شكل (12-23): التركيب النطاقي للسيليكون.



حافة الامتصاص في المواد الأمورفية غير المعدنية

تتميز المواد الأمورفية غير المعدنية بحافة امتصاص ضوئي أقل حدة ولكنها أكثر وضوحا بالمقارنة بالمواد البلورية. وتساعد قياسات حافة الامتصاص في تنمية فهم

نظرية التركيب الإلكتروني لهذه المواد والتي وضع أساسها العالمان ديفيس وموت Davis & Mott وآخرون. ولقد قسم العالم توك (Tauc) حافة الامتصاص في الجوامد الأمورفية إلى ثلاث مناطق كما فى شكل (12-24) كالتالى:

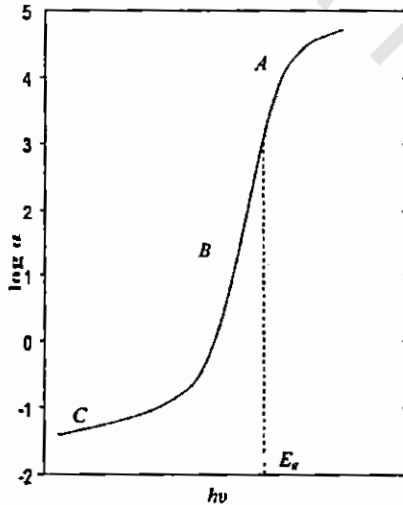
المنطقة (A): وهى منطقة الامتصاص العالى، حيث يكون معامل الامتصاص α كبيراً ($\alpha > 10^6 \text{m}^{-1}$)، وتتصف بالعلاقة الآتية:

$$\alpha \hbar \omega = \beta (\hbar \omega - E_{\text{opt}})^n \quad (12 - 104)$$

β - ثابت، E_{opt} - الفاصل الطاقى الضوئى، n - تأخذ إحدى القيم بين 1 و 3 بالاعتماد على شكل دالة كثافة الحالات غير الموضعية (non-localized) ونوع الانتقال. المنطقة (B): منطقة الامتصاص الوسطى (وتعرف بمنطقة أورباخ Urbach) حيث: $10^2 < \alpha (\text{m}^{-1}) < 10^6$ ويزداد فيها الامتصاص أسياً طبقاً للعلاقة الآتية:

$$\alpha (\omega) \sim e^{(\hbar \omega / E_1)} \quad (12 - 105)$$

الطاقة E_1 تميز انحدار الذيل الأسى (exponential tail) لمنحنى كثافة الحالات وتحدد الحالات الموضعية، ولقد بين أورباخ أن E_1 تقيس اتساع ذيل الحالات الموضعية فى المنطقة المحرمة.

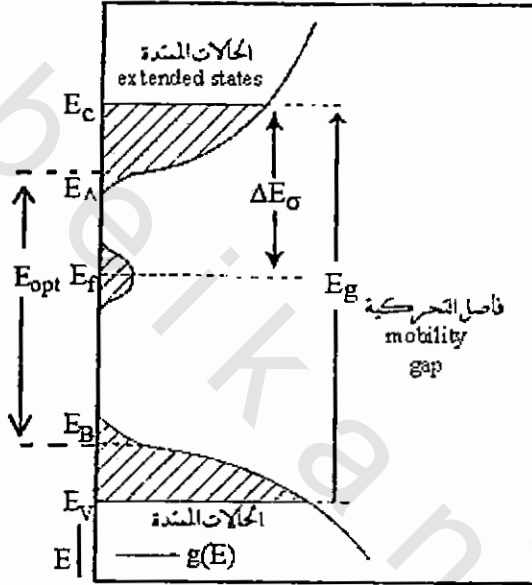


شكل (12-24): حافة الامتصاص فى المواد الأمورفية الصلبة.

المنطقة (C): خاصة بالامتصاص الأقل حيث $\alpha < 10^2 \text{m}^{-1}$ والتي تتصف بعلاقة مماثلة للعلاقة (12-105) ولكن لها طاقة E_2 أكبر من E_1 .

$$\text{i.e. } \alpha (\omega) \sim e^{(\hbar \omega / E_2)} \quad (12 - 106)$$

ولقد نسب العالم توك (Tauc) هذا الذيل ذا الطاقة المنخفضة إلى خصائص المادة ذاتها (intrinsic features). شكل (١٢-٢٥) يعطي كثافة الحالات $g(E)$ للمواد الأمورفية الصلبة كدالة في الطاقة طبقا للنموذج المقترح بواسطة العالمين موت وديفيس Mott & Davis.



شكل (12-25): تغير كثافة الحالات في المواد الأمورفية الصلبة مع الطاقة.

المناطق المظلمة تمثل الحالات الموضعية، والتي يحدد سمكها بالقيم $(E_c - E_a)$ ، بالقرب من حافتي التحركية $(E_b - E_v)$ mobility edges اللتين تفضلان بين الحالات الموضعية والحالات الممتدة extended states. وسمك الحالات الموضعية يعتمد على درجة التشويه في المادة material disorder. وكما هو معروف أن الروابط غير المشبعة unsaturated bonds هي المسؤولة عن تكوين العيوب في المواد الأمورفية والتي بدورها مسؤولة عن تكون الحالات الموضعية في التركيب.

تمارين عامة

- ١- أ- عرف كل من طاقة التأين E_i ، وطاقة الميل الإلكتروني (electron affinity) E_{af} للذرة وبين علاقتهما بالسالبية الكهربية لعنصر χ (electron negativity).
ب- وإذا كان لبللورة $NaCl$:

$$E_i(Na) = 5.14 \text{ eV} , \quad E_{af}(Cl) = 3.71 \text{ eV}$$

وأن طاقة الجذب الإلكترونيستاتيكي بين أيوني الصوديوم والكلور تساوى 4.51 eV ، فبين أنه يمكن للصوديوم والكلور تكوين جزيء ثنائي الذرة برابطة أيونية قوية.

الحل:

أ - طاقة التأين E_i : هى الطاقة المطلوبة لتحرير إلكترون من الذرة المتعادلة. التثوقية الإلكترونية E_{af} : هى مقدار الطاقة المكتسبة عند إضافة إلكترون لذرة متعادلة. وترتبط E_i ، E_{af} بالسالبية الكهربية للعنصر بعلاقة تسمى علاقة ميليكان الآتية:

$$\chi = 0.148(E_i + E_{af})$$

ويعبر عن هذه الطاقات بالإلكترون فولت. واضح أن χ تكون كبيرة للذرة التى لها E_i ، E_{af} كبيرتان. وتتحدد أيونية الرابطة بين ذرتين بالفرق بين سالبيتيهما. أى أن أيونية الرابطة تساوى $\chi_1 - \chi_2$. وهذا يعنى ان الفرق بين سالبيتى الذرتين يعتبر مقياساً لأيونية الرابطة بينهما.

ب - تتكون الرابطة فى بللورة $NaCl$ بخلع إلكترون ذرة الصوديوم وإضافته إلى ذرة الكلور، حيث يتحولاً إلى أيونين مختلفى الشحنة، وعن طريق قوة الجذب الكهروستاتيكي بينهما يتم الترابط الأيونى. والفرق بين طاقة تأين الصوديوم المطلوب بذلها وطاقة التثوقية الإلكترونية التى تكتسب عند إضافة هذا الإلكترون إلى ذرة الكلور يساوى أقل طاقة مطلوب تزويدها لتكوين الرابطة، وهى:

$$E_i - E_{af} = 5.14 - 3.71 = 1.43 \text{ eV}$$

هذا الفارق يتم تعويضه بواسطة مجال الجذب الكهروستاتيكي، حيث يشارك بطاقة تساوى 4.5 eV عندما تكون المسافة بين الأيونين أقل ما يمكن، هذه المشاركة من المجال الكهروستاتيكي تزيد عن الطاقة المطلوبة بمقدار $3.08 \text{ eV} = 5.14 - 1.34$. أى أنه يمكن للصوديوم والكلور تكوين جزيء ثنائي الذرة برابطة أيونية قوية.

٢- أ- إذا كان $B = h_2\hat{x} + k_2\hat{y} + \ell_2\hat{z}$ & $A = h_1\hat{x} + k_1\hat{y} + \ell_1\hat{z}$ حيث
 $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ هي وحدات متجه لثلاثة اتجاهات لا تقع كلها في مستوى واحد. أثبت
أن الزاوية θ بين المتجهين A, B يمكن إيجادها من خلال العلاقة الآتية:

$$\cos \theta = \frac{h_1h_2 + k_1k_2 + \ell_1\ell_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + \ell_1^2} \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + \ell_2^2}}$$

ب- أوجد الزوايا بين المتجهات الأساسية للخلية الابتدائية لكل من الشبكيات
B.C.C & F.C.C

ج- إذا كانت الزوايا بين روابط التركيب الرباعي للماس هي نفس الزوايا بين أقطار
الشكل المكعب، فأوجد باستخدام المتجهات قيم هذه الزوايا.
الحل : (أ)

$$A \cdot B = h_1h_2 + k_1k_2 + \ell_1\ell_2$$

$$|A||B| = \sqrt{h_1^2 + k_1^2 + \ell_1^2} \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + \ell_2^2}$$

$$\therefore \cos \theta = \frac{A \cdot B}{|A||B|} = \frac{h_1h_2 + k_1k_2 + \ell_1\ell_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + \ell_1^2} \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + \ell_2^2}}$$

(ب) في حالة الشبكية F.C.C يكون:

$$a_1 = \frac{a}{2}(\hat{y} + \hat{z}), \quad a_2 = \frac{a}{2}(\hat{x} + \hat{z}) \quad \& \quad a_3 = \frac{a}{2}(\hat{x} + \hat{y})$$

وتعطي الزاوية بين المتجهين a_1 & a_2 كالآتي:

$$\cos \theta = \frac{h_1h_2 + k_1k_2 + \ell_1\ell_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + \ell_1^2} \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + \ell_2^2}}$$

$$= \frac{\left(\frac{a}{2}\right)^2}{2\left(\frac{a}{2}\right)^2}$$

$$= \frac{1}{2}$$

$$\therefore \theta = 60^\circ$$

وبالمثل لباقي المتجهات.

(ج) يعطى متجها قطرى المكعب EC .GB (شكل I) حيث :

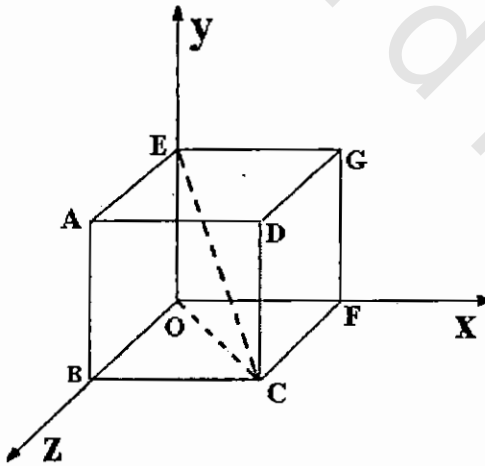
$$\begin{aligned} EC &= EO + OC \\ &= EO + OB + BC \\ &= -a\hat{y} + a\hat{z} + a\hat{x} \\ &= a(\hat{x} - \hat{y} + \hat{z}) . \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} GB &= GF + FB \\ &= GF + FC + CB \\ &= -a\hat{y} + a\hat{z} - a\hat{x} \\ &= a(-\hat{x} - \hat{y} + \hat{z}) \end{aligned}$$

$$\therefore h_1 = a , k_1 = -a , l_1 = a$$

$$\& h_2 = -a , k_2 = -a , l_2 = a$$

$$\therefore \cos \theta = \frac{a^2}{3a^2} = \frac{1}{3}$$



شكل (I)

٣- ناقش الخاصية الآيونية للرابطة ionicity of a bond للألكال هاليدات halides alkali مستعينا بقيم السالبية الكهربية لبعض العناصر المعطاة بالجدول الآتى:

قيم السالبة الكهربائية لبعض العناصر

H						
2.1						
Li	Be	B	C	N	O	F
1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl
0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.5	3.0
K	Ca	Sc	Ge	As	Se	Br
0.8	1.0	1.3	1.8	2.0	2.4	2.8
Rb	Sr	Y	Sn	Sb	Te	I
0.8	1.0	1.3	1.8	1.9	2.1	2.1

٤- إذا كانت متجهات الخلية الأولية للشبكية الفراغية السداسية تعطى كالآتي:

$$\mathbf{a} = \left[\left(\frac{\sqrt{3}}{2} a \right) \hat{\mathbf{x}} + \frac{a}{2} \hat{\mathbf{y}} \right], \quad \mathbf{b} = \left[\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} a \right) \hat{\mathbf{x}} + \frac{a}{2} \hat{\mathbf{y}} \right] \quad \& \quad \mathbf{c} = c \hat{\mathbf{z}}$$

(أ) - أوجد الزوايا بين هذه المتجهات.

(ب) - اثبت أن حجم الخلية الأولية يساوى $\frac{\sqrt{3}}{2} a^2 c$.

(ج) - اثبت أن متجهات الخلية الأولية للشبكية المعكوسة هي:

$$\mathbf{A} = \frac{2\pi}{\sqrt{3}a} \hat{\mathbf{x}} + \frac{2\pi}{a} \hat{\mathbf{y}}, \quad \mathbf{B} = -\frac{2\pi}{\sqrt{3}a} \hat{\mathbf{x}} + \frac{2\pi}{a} \hat{\mathbf{y}} \quad \& \quad \mathbf{C} = \frac{2\pi}{c} \hat{\mathbf{z}}$$

(د) - أوجد حدود منطقة بريليون الأولى للشبكية الفراغية.

الحل

(د): حدود منطقة بريليون الأولى للشبكية الفراغية السداسية هي المستويات العمودية

المنصفة لمتجهات الخلية الأولية للشبكية المعكوسة، أى تكون كالتالى:

$$\begin{aligned} \pm \frac{1}{2} \mathbf{A} &= \pm \left(\frac{\pi}{\sqrt{3}a} \hat{\mathbf{x}} + \frac{\pi}{a} \hat{\mathbf{y}} \right) \\ \pm \frac{1}{2} \mathbf{B} &= \pm \left(-\frac{\pi}{\sqrt{3}a} \hat{\mathbf{x}} + \frac{\pi}{a} \hat{\mathbf{y}} \right) \\ \& \quad \pm \frac{1}{2} \mathbf{C} &= \pm \frac{\pi}{c} \hat{\mathbf{z}} \end{aligned}$$

٥- أ- اثبت أن متجه الشبكية المعكوسة $K = hb_1 + kb_2 + lb_3$ عمودى على المستوى (hkl) .

ب - اثبت أن المسافة بين المستويين المتوازيين المتجاورين فى الشبكية البللورية هى $d(hkl) = \frac{2\pi}{|k|}$.

ج- اثبت أنه للشبكية المكعبة البسيطة يكون $d^2 = a^2 (h^2 + k^2 + l^2)^{-1}$.

٦- باعتبار أن حجم منطقة بريليون الأولى V_B يساوى حجم الخلية الأولية فى فراغ فويرر (الفراغ المعكوس)، اثبت أن $V_B = (2\pi)^3/V_C$ ، حيث V_C هو حجم الخلية الأولية للبلورة.

٧- أوجد النسبة المثالية $\frac{c}{a}$ للشبكية السداسية ذات التركيب المكثف، وقارنها مع قيمها للعناصر التالية:

$He (1.633), Mg (1.623), Ti (1.586) \& Zn (1.861)$

ما تفسيرك للانحراف عن القيمة المثالية.

الحل:

النسبة $\frac{c}{a}$ المثالية للتركيب السداسى ذى الرص المكثف يمكن حسابها باستخدام كرات صلبة مرصوفة فى شبكية سداسية (شكل II)، فإذا كان نصف قطر الكرة r ، فإن البارامتر a ($b=a$) والبارامتر c يمكن كتابتهما بدلالة r كما يلى:

$$a = 2r$$

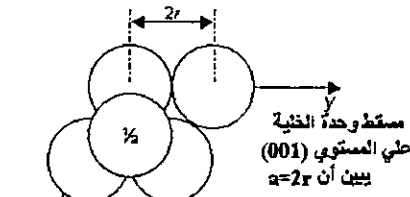
$$= \left[\left(\frac{a}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{c}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left[\frac{a^2}{3} + \frac{c^2}{4} \right]^{\frac{1}{2}}$$

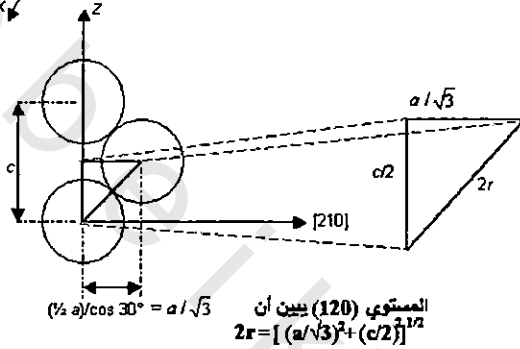
$$\therefore a^2 = \frac{a^2}{3} + \frac{c^2}{4}$$

$$\therefore \frac{c}{a} = 1.633$$

والتسبة $\frac{c}{a}$ نادرا ما تكون مثالية، وذلك بسبب تصرف المواد من حيث الانزلاق على الأقل.



شكل (II)



٨- اثبت أن معكوسة الشبكية المعكوسة هي الشبكية البلورية الأصلية.

٩- إذا كان الطول الموجي لأشعة إكس المستخدمة لفحص بلورة الألومنيوم يساوي 1.537 أنجستروم، وكانت الأشعة الحائدة ناتجة عن المستوى (111) عند زاوية 19.2° ، فإذا علمنا أن التركيب البلوري للألومنيوم هو من النوع B.C.C وكثافته 2699 kbm^{-3} والوزن الذري له 26.98، أوجد عدد أفوجادرو.

١٠- يزداد سمك طبقة الأكسيد المتكونة على سطح معدن ما مع الزمن، فإذا كان تركيز الأكسجين C_0 عند الحد الفاصل بين الأكسيد والهواء أكبر من قيمته C_1 عند الحد الفاصل بين الأكسيد والمعدن. فإذا افترضنا أن سرعة زيادة سمك الأكسيد x تتحدد بسرعة انتشار الأكسجين في هذه الطبقة، اثبت أن سمك الأكسيد يعتمد على الزمن t بالصورة التالية:

$$x = Bt^{\frac{1}{2}}$$

حيث B مقدار ثابت.

١١- بين أن تداخل المناطق الطاقية يمكن حدوثه في الشبكية حتى في بعدين، حقق ذلك برسم علاقة التشتت للإلكترونات.

١٢- اشرح لماذا وكيف يتغير اتساع المنطقة المحرمة (للماس والسيليكون مثلا) مع ارتفاع درجة الحرارة.

١٣- يتبلور السيليكون على شكل التركيب الماسى بثابت بلورى يساوى 5.43 أنجشتروم.

(أ) كم ذرة تحتويها الخلية الابتدائية؟

(ب) احسب طاقة تأين ذرة الفسفور فى بلورة السيليكون المطعوم بالفسفور إذا كان ثابت العزل للسيليكون.

١٤- احسب طاقة التأين للذرات المعطية فى المركب InSb إذا كان $\frac{m^*}{m_0} = 0.01$ ، $\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 25$.

١٥- أكتب معادلة الحركة لسلسلة خطية مكونة من عدد كبير N من الذرات فى بعد واحد، علما بأن كتلة الذرة هى m ، المسافة الذرية هى a . أوجد علاقة التشتت $\omega(k)$ ثم:

(أ) قارن علاقة التشتت الناتجة مع علاقة التشتت فى حالة السلسلة الخطية ثنائية الذرة.

(ب) بين أن كمية الحركة الكلية للفونون $\sum_{r=1}^N m \dot{u}_r(t) = 0$.

(ج) قارن السرعة الموجية الناتجة مع سرعة الموجات الصوتية فى قضيب طويل وأوجد معامل المرونة الفعال.

١٦- أوجد قيمة التردد الأقصى للفونونات فى بلورة محدودة وبين أنه يعتمد على نوع مادة البلورة.

١٧- أوجد وارسم سرعتى الطور والمجموعة للفونونات لسلسلة خطية ثنائية الذرة إذا كانت نسبة كتلتى الذرتين 1:5 ، احسب نسبة مشاركة الفونونات الضوئية فى الموصلية الحرارية.

١٨- احسب الطاقة الحرارية والسعة الذرية لكل من:

(أ) نظام مكون من متذبذبين هارمونييين اثنين.

(ب) نظام مكون من مستويين طاقيين ، هل لذلك معنى فيزيائى؟

١٩- تبين أن العديد من المواد البارامغناطيسية لاتطيع قانون كورى.

(أ) اشرح سبب ذلك وأوجد صيغة لاعتماد القابلية المغناطيسية لهذه المواد على درجة الحرارة.

(ب) إذا كان ثابت كورى يساوى 1.85 لكل وزن جزيئى جرامى لمادة ما فاوجد العزم المغناطيسى الفعال لهذه المادة، وعدد الإلكترونات غير التزاوجية / ذرة إذا كان العزم ناتجا عن الحركة المغزلية فقط.

الحل:

(أ) يعتمد قانون كورى على نظرية لانجفين للبارامغناطيسية التى تفترض أن حاملات العزم المغناطيسى (الجزئيات أو الذرات) لا تتفاعل فيما بينها وتتأثر فقط بالمجال المطبق ودرجة الحرارة، حيث تتناسب القابلية المغناطيسية لهذه المواد عكسيا مع درجة الحرارة.

$$i.e \quad \chi = \frac{M}{H} = \frac{C}{T}$$

وهو ما يعرف بقانون كورى. إلا أن العديد من المواد البارامغناطيسية لا تطيع قانون كورى، حيث أرجع العالم وايس ذلك إلى تفاعل العزوم فيما بينها، وأن هذا التفاعل يعبر عنه من خلال ما يسمى بالمجال الجزيئى H_M ، وأن شدة هذا المجال تتناسب مع التمغنطية التشبعية J_s ، حيث:

$$H_M = \eta J_s = \eta M$$

تسمى η الثابت الجزيئى.

لذلك يكون المجال الكلى المؤثر H_t على المادة هو:

$$H_t = H + H_M = H + \eta M$$

وبإحلال المجال الكلى بدلا من المجال المطبق فى قانون كورى نجد أن:

$$\chi = \frac{M}{H + \eta M} = \frac{C}{T}$$

$$\therefore MT = C(H + \eta M)$$

$$i.e \quad \chi = \frac{M}{H} = \frac{C}{T - C\eta} \\ = \frac{C}{T - \theta}$$

وتسمى هذه العلاقة العامة بقانون كورى - وايس. θ لها أبعاد درجة الحرارة وتتناسب مع ثابت المجال الجزيئى η ، لذلك تعتبر مقياسا لشدة التفاعل بين الجزيئات. وبالتالي تكون $\theta = \eta = 0$ للمواد التى تطيع قانون كورى.

(ب) تعطى القابلية المغناطيسية من النظرية الكمية للبارامغناطيسية بالعلاقة (60-11) الآتية:

بوححدات بوهر ماجنتون.

حيث N عدد الذرات في وحدة الحجم، $\mu_{\text{eff}} = g\sqrt{J(J+1)}$ ، وتعطى χ للجزيئي الجرامى (للمول) كالآتى:

$$\chi = \frac{N_A}{3k_B T} \mu_{\text{eff}}^2 = \frac{C}{T}$$

حيث N_A عدد أفوجادرو، $\mu_0 = 1$ فى النظام المطلق cgs.

$$\therefore \mu_{\text{eff}} = \left(\frac{3k_B C}{N_A} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left(\frac{3 \times 1.38 \times 10^{-16} \times 1.85}{6.02 \times 10^{23}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= 3.57 \times 10^{-20} \text{ erg/oe}$$

$$= \frac{3.57 \times 10^{-20}}{0.927 \times 10^{-20}} = 3.85 \mu_B$$

فإذا كان الهمغنت مغزليا خالصا، فإن:

$$\mu_{\text{eff}} = 2\sqrt{J(J+1)} = 2\sqrt{S(S+1)} = 3.85$$

$$\therefore S(S+1) = 3.7$$

$$\therefore S = 1.485 \approx \frac{3}{2} = n \left(\frac{1}{2} \right)$$

$$\therefore n = 3 \text{ electrons}$$

٢٠- اثبت أن القابلية المغناطيسية للمواد الدايمغناطيسية لا تعتمد على أى من درجة الحرارة أو شدة المجال المغناطيسى.

٢١- إذا كان عدد الذرات فى وحدة الحجم من مادة دايمغناطيسية يساوى $5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ والمسافة المتوسطة للإلكترونات من النواة تساوى 10^{-10} m ، فاثبت أن القابلية المغناطيسية χ تعطى من العلاقة الآتية:

$$\chi = 10^{-6} Z$$

حيث Z هى عدد الإلكترونات فى الذرة.

٢٢- أوجد العزم المغناطيسى لوحدة الحجم من النحاس إذا كانت شدة المجال المغناطيسى داخله تساوى 10^4 Am^{-1} إذا علمت أن القابلية المغناطيسية للنحاس تساوى -0.9×10^{-5} .

٢٣- بين أن تردد لامرور الزاوى للإلكترون لا يعتمد على سرعته أو نصف قطر مداره، وأوجد قيمته فى مجال كثافة الفيض له تساوى $T = 0.05$.

٢٤- أ - احسب القابلية الدايمغناطيسية لذرة الهيدروجين.

ب - احسب القابلية البارامغناطيسية لوحدة الحجم من السيزيوم عند درجة حرارة $K = 300$ علما بأن طاقة فيرمى للسيزيوم هى 1.55 eV .

٢٥- احسب الإنتروبيا لعدد N عزم مغزلى فى مجال مغناطيسى مستخدما أساسيات الديناميكا الحرارية الإحصائية. صف عملية التمنط الأديباتيكي وكيف تستخدم لتبريد ملح بارامغناطيسى؟ كم مقدار الحرارة التى يمكن طرحها من الشبكية فى عملية التمنط الأديباتيكي؟

٢٦- عند دراسة تغير معامل الانكسار n لبعض المواد مع التردد، نلاحظ أحيانا هبوط قيمة n إلى أقل من الواحد الصحيح عند بعض الترددات مما يدل على أن سرعة الموجة تكون أكبر من سرعة الضوء، فسر ذلك مؤكدا عدم التعارض مع النظرية النسبية مع إثبات أن:

$$v_g = v \left(1 - \frac{k}{n} \frac{dn}{dk} \right)$$

حيث v ، v_g هما السرعة الطورية وسرعة المجموعة على الترتيب، k هى المتجه الموجى.

الحل:

هبوط قيمة $n = \frac{c}{v}$ إلى أقل من الوحدة يعنى أن سرعة الطور للموجة أكبر من السرعة للضوء فى الفراغ، مما يعنى تعارضا مع النظرية النسبية. وفى الواقع، تنتقل الموجة على هيئة حزمة وتنتشر بسرعة تسمى سرعة المجموعة، حيث:

$$\begin{aligned} v_g &= \frac{d\omega}{dk} = \frac{nc - ck \frac{dn}{dk}}{n^2} = \frac{c}{n} \left(1 - \frac{k}{n} \frac{dn}{dk} \right) \\ &= v \left(1 - \frac{k}{n} \frac{dn}{dk} \right) \end{aligned}$$

$$\text{حيث } v = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{n}$$

ولقد وجد أن موجبة لمعظم المواد، حيث يزداد معامل الانكسار مع التردد ويقال إن هذه المواد تمتلك تشتتا عاديا normal dispersion، أما إذا كان معامل الانكسار يقل مع التردد فيقال حينئذ أن المادة تمتلك تشتتا شاذا anomalous dispersion. إذن

لمعظم المواد تكون $\frac{dn}{dk}$ موجبة، وهذا يعنى أن $v_g < v$. فإذا كنا نحاول نقل إشارة ضوئية فى منطقة $v > c$ الترددات الطيفية حيث يكون، فإننا دائما نجد أن $v_g < c$.
 ٢٧- فى حالة متذبذب لورنس البسيط ($X = 0$) عندما لا يوجد تخميد ($\gamma = 0$) يعطى ثابت العزل بالعلاقة الآتية:

$$\epsilon_r = 1 + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_0} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

اثبت أن سرعة المجموعة v_g دائما أقل من سرعة الضوء c فى الفراغ.

٢٨- إذا كان معامل الانكسار للجرمانيوم عند 400 nm هو: $\bar{n} = 4.141 + i(2.215)$ احسب عند هذا الطول الموجى كلا من:

أ- سرعة الطور للضوء ب- معامل الامتصاص ج- الانعكاسية.

٢٩- إذا كان ثابت العزل المركب للمح كلوريد الصوديوم الذى يبدي امتصاصا شديدا للضوء فى المنطقة تحت الحمراء هو $\bar{\epsilon}_r = -16.8 + i(91.4)$ ، أوجد معامل الامتصاص والانعكاسية للملح فى هذه المنطقة من الطيف.

٣٠- شبه موصل ذو فاصل طاقى مباشر قيمته 1.35 eV عند درجة حرارة الغرفة ومعامل الامتصاص عند 775 nm يساوى $3.5 \times 10^6 m^{-1}$ ، فإذا رسب على عينة منه سمكها $1 \mu m$ طبقة سطحية تمنع انعكاس الأشعة. Antireflection coating احسب الإنفاذية للعينة عند 620 nm.

الحل:

$$T = (1-R)^2 e^{-\alpha l}$$

حيث $R = 0$ لعدم وجود انعكاس.

$$\therefore T = e^{-\alpha l}$$

وبما أن $\alpha(\hbar\omega) \sim (\hbar\omega - E_g)^1$ عندما $E \geq E_g$ ، حيث: 775 nm تقابل طاقة وهى أكبر من، وكذلك 620 nm تقابل طاقة وهى أكبر من.

$$\therefore \frac{\alpha(620 \text{ nm})}{\alpha(775 \text{ nm})} = \frac{(2-1.35)^{\frac{1}{2}}}{(1.6-1.35)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\therefore \frac{\alpha(620 \text{ nm})}{3.5 \times 10^6} = \frac{(0.65)^{\frac{1}{2}}}{(0.25)^{\frac{1}{2}}} = 1.612$$

$$\therefore \alpha(620 \text{ nm}) = 5.64 \times 10^6 m^{-1}$$

$$\therefore T = e^{-\alpha l} = e^{-5.64 \times 10^6 \times 10^{-6}} = 0.37\%$$

٣١- الزنك معدن ثنائي التكافؤ يحتوى على عدد من الذرات فى المتر المكعب يساوى 6.6×10^{28} ذرة، بين لماذا يبدو سطحه كأنه مرآة تعكس صورة الشمس.

الحل:

كثافة الإلكترونات الحرة N تعطى من:

$$N = 2 \times 6.6 \times 10^{28} = 1.3 \times 10^{29} \text{ m}^{-3}$$

$$\therefore \omega_p = \left(\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_0} \right)^{\frac{1}{2}} = 2 \times 10^{16} \text{ rad/s}$$

يقابلها طول موجى قدره $\lambda_p = \frac{2\pi c}{\omega_p} = 93 \text{ nm}$ وهى تقع فى مدى الأشعة فوق البنفسجية. ولما كانت الإلكترونات تعكس كل الترددات الأقل من ω_p ، فهذا يعنى ان الزنك يعكس كل الأطوال الموجية الخاصة بمنطقة الطيف المرئى، وبالتالي يبدو كأنه يعكس صورة الشمس.

٣٢- إذا كانت موصلية الألومنيوم عند درجة حرارة الغرفة تساوى $4.1 \times 10^7 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ ، أوجد الانعكاسية له عند 500 nm ، إذا علمت أن كثافة الإلكترونات 1.8×10^{29} لكل متر مكعب، $\omega_p = 2.4 \times 10^{16} \text{ rad/s}$ مبينا تأثير التخميد عليها.

الحل:

$$\therefore \sigma_0 = \frac{Ne^2 \tau}{m_0}$$

$$\therefore \tau = \frac{\sigma_0 m_0}{Ne^2} = 8.0 \times 10^{-15} \text{ s}$$

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda} = 3.8 \times 10^{15} \text{ rad/s}$$
 يقابل تردد زاوى 500 nm الطول الموجى

$$\therefore \epsilon_1 = 1 - \frac{\omega_p^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} = -39$$

$$\epsilon_2 = \frac{\omega_p^2 \tau}{\omega(1 + \omega^2 \tau^2)} = 1.3$$

$$\therefore n = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ -39 + [(-39)^2 + (1.3)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} = 0.1$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ 39 + [(-39)^2 + (1.3)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} = 6.2$$

$$\therefore \mathcal{R} = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} = 99\%$$

هذه النتيجة تبين أن وجود التخميد أدى إلى تقليل الانعكاسية بمقدار 1% فقط.
 ٣٣- إذا كانت الموصلية الكهربية للنحاس تساوي $6.5 \times 10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ عند درجة حرارة الغرفة. قارن بين قيمتي عمق التغلغل عندما يكون تردد المجال الكهربائي 50 Hz. 100 MHz وأوجد معامل الامتصاص في الحالتين.

الحل:

$$\delta = \frac{2}{\alpha} = \left(\frac{2}{\sigma_0 \omega \mu_0} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ يعطى عمق التغلغل بالعلاقة التالية:}$$

$$\therefore \omega_1 = 50 \times 2\pi = 314 \text{ rad s}^{-1}$$

$$\therefore \omega_2 = 100 \times 10^6 \times 2\pi = 6.28 \times 10^8 \text{ rad s}^{-1}$$

$$\therefore \frac{\delta(50 \text{ Hz})}{\delta(100 \text{ MHz})} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^{\frac{1}{2}} = 1.414 \times 10^3$$

ولإيجاد معامل الامتصاص نوجد:

$$\delta_1 = \frac{2}{\alpha_1} = \left(\frac{2}{\sigma_0 \omega \mu_0} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.88 \times 10^2 \text{ m}$$

$$\therefore \alpha_1 = \frac{2}{\delta_1} = 2.27 \times 10^2 \text{ m}^{-1}$$

$$\alpha_2 = \frac{2}{\delta_2} = 3.22 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$$

وبالمثل

٣٤- مستعينا بأساسيات التركيب النطاقي وكثافة الحالات، اشرح لماذا يظهر النحاس ملونا خلافا للكثير من المعادن الأخرى.

■■■

المراجع (References)

- 1-Solid State Physics. G.I.Epifanov. Moscow institute of electronic engineering. 1979.
- 2-Solid State Physics. Neil W Ashcroft. N.David Mermin. Cornell University 1976. Volume 1 & II.
- 3-Physics of Solids. Charles A. werrett. Robb M Thomson. University of Illinois. 1964.
- 4-Introduction to Solid State Physics. Charles Kittel. I-V Editions. John Willey and Sons .Inc.1978.
- 5-Optical Properties of Solid. Mark Fox. University of Sheffield. 2006.
- 6-G.D.Mahan. J Appl. Phys. .1980.
- 7-K.Kawamura etal. Thin Solid Films.2003.
- 8-Point -defects - induced band-gap narrowing. H.Sam etal. Thin Solid Films. 2004.
- 9-Electronic Properties of Crystalline Solids. Richard H.Bube. Academic press. New York .1974.
- 10- Solid State Physics .J.S.Blakemore. Cambridge Univ. press 2004.
- 11- Electronic Emission.L.N.Dobrylov. M.V.Gomounova. Moscow. Nawka press 1966.
- 12- Solid State Physics. H.Ibach.H.Luth ; Springer. Indian reprint 2004.
- 13- Solid State Physics and its applications. R.J.Elliott. A.F.Gibson ; G.B.1976.
- 14-A modern Handbook of physics. B.M.Yavorsky and A.A.Detlaf. Mir Publishers. Moscow 1982.

- 15- Physics of Semiconductors and Dielectrics. P.T.Areshken. High School. Moscow 1977.
- 16- Materials Science. B.Arzasov. Mir Publishers. Moscow 1989.
- 17- Electronic processes in Non-crystalline Materials. N.F.Mott and E.A.Davis. Clarendon. Oxford .1971.
- 18-Mostafa Kamal. A.B.El Bediur. Radiation Effects in solids. vol 159 pp.651-657. 2004.
- 19-G.E.Doan. The principles of physical Metallurgy. Mc Graw - Hill Book company. INC. New York. Toronto. London. Library of congress card Number 52-743. 1953.
- 20-Green .D.. An Introduction to Mechanical properties of Ce-ramics. Cambridge Solid State Science Series .Eds. Clarke. D.R.Suresh.S. Ward.I.M..1998.
- 21-D.Kuhlmann-Wilsdrof. "Theory of Plastic deformation". Materials Science and Engineering A. vol. 113. pp 1-42. 1989.
- ٢٢- أساسيات فيزياء الجوامد د. رأفت كامل واصف دار النشر للجامعات - القاهرة
١٩٩٤.
- ٢٣- فيزياء الحالة الصلبة، د. يحيى نوارى الجمال جامعة الموصل - العراق.

أهم الرموز الفيزيائية المستخدمة

الرمز	الكمية الفيزيائية	الرمز	الكمية الفيزيائية
A	طاقة التفاعل التبادلي للإلكترونات ، المساحة	E_f	طاقة التكوين ، طاقة الإلكترون في الحالة النهائية
A_f	سعة الموجة المصاحبة للإلكترون ، سعة الاهتزاز الذرية	E_f	طاقة مستوى فيرمي
a	نصف قطر بوهر	E_g	اتساع الفاصل الطائي
a_f	متجهات شبكيات برافي	E_i	طاقة الإلكترون في منطقة التكافؤ ، طاقة تآين الذرة
a_f	مجموعة متجهات شبكية برافي	E_j	الحاجز الطائي بين نرات الشبكة
a	ثابت معادلة طاقة فان ديرفال	E_k	طاقة حركة
B	ثابت معادلة التناثر ليورن	E_n	الموضع الطائي للمستوى الثاني رقم n
B_{ext}	كثافة الفيض الخارجي	E_{opt}	اتساع الفاصل الطائي الضوئي
B_{int}	كثافة الفيض الداخلي	E_{ph}	طاقة الفونون
B_j	دالة بريليون	E_p	الطاقة الكلية
B_{int}	الحث المغناطيسي المتبقي	E_p	طاقة قمة منطقة التكافؤ
B_s	قيمة الحث المغناطيسي التشعبية	E_v	طاقة تكوين الفراغ
b	متجه بيرجر	E_v	الطاقة متوسطة الكمية للمبتدئ التوافقي
b_f	مجموعة متجهات الشبكية المعكوسة	E	سعة الموجة الكهربية
b	ثابت معادلة طاقة فان ديرفال	ϵ_{in}	مجال كهربي تأثيري
C	سرعة الضوء	F	القوة
C	ثابت كوري	F_{cp}	قوة للجذب المركزي
c	طول محور الخلية الابتدائية للتركيب السداسي	F_c	قوة لورنس
c_e	السعة الحرارية للغاز الإلكتروني	F_p	قوة المقاومة
C_f	مجموعة متجهات معكوسة الشبكية المعكوسة	F_p	كسر الانزلاق
C_f	سرعة الموجات الطولية	f	دالة فيرمي ، قوة رادة
C_p	سرعة انتشار الموجات	f	القيمة المتوسطة للقوة
c_p	سرعة الموجات المستعرضة	f_D	محصلة التدفق الانتشاري
c_p	السعة الحرارية الذرية	f_E	دالة أينشتاين
D	الإزاحة الكهربية	f_i	شدة المتذبذب الإلكتروني لكل انتقال
D	معامل الانتشار	F	الطاقة الحرة للنظام
D_0	ثابت الانتشار الذري	G	الإجهاد القصي ، معامل الصلابة
d	القطر الأساسي للخلية الابتدائية ، المسافة بين مستويات براج	G_c	الإجهاد القصي الحرج
E	طاقة التنشيط للانتشار الذري	g	كثافة الحالات في فراغ المتجه الموجي ، معامل لاند
E_0	طاقة مستوى الشوائب الأخذة	g	معامل اللاهارجونية
E_{0f}	طاقة التشويقية الإلكترونية	G	معامل المرونة القصي
E_b	طاقة الكترون زوج كوبر	H	شدة المجال المغناطيسي
E_c	طاقة فاج منطقة التوصيل	H_c	المجال المغناطيسي الحرج
E_d	طاقة مستوى الشوائب المعطبة	H_{ex}	مجال مغناطيسي خارجي
E_{eg}	الفواصل الطائي في الموصلات الفائقة	H_{in}	مجال مغناطيسي تأثيري
E_{exc}	طاقة إثارة الجسيمين	H_{int}	مجال مغناطيسي داخلي
H_g	مؤثر هيرميت	m^*	الكتلة الفعالة للإلكترون
h	ثابت بلانك	m_{in}^*	الكتلة الفعالة للفجوات
h, k, ℓ	معاملات ميللر	m_{hh}^*	الكتلة الفعالة للفجوات الثقيلة
h	ثابت بلانك $\frac{h}{2\pi}$	m_{lh}^*	الكتلة الفعالة للفجوات الخفيفة

أهم الرموز الفيزيائية المستخدمة

الرمز	الكمية الفيزيائية	الرمز	الكمية الفيزيائية
I	شدة الضوء ، شدة التيار	m_{30}	الكتلة الفعالة لفجوات المنطقة المفصولة
I_m	شدة التمنظف	N	عدد عيوب فرنكل ، عدد الإلكترونات للمادة ، عدد الإلكترونات في وحدة الحجم ، عدد الذرات في وحدة الحجم
f	شدة التيار	N_A	عدد أفوجادرو
J	العدد الكمي الذاتي	N_i	تركيز الشوائب
J_m	التمنظية أو درجة التمنظف	n	العدد الكمي الرنيني ، أس بورن ، العدد الكمي الرئيسي ، معامل الانكسار
J_{me}	العزم المغناطيسي الإلكتروني لوحدة الحجم	\bar{n}	معامل الانكسار المركب
J_s	التمنظية التشعبية	n_0	تركيز الغاز الإلكتروني
J	ثابت جول	n_{ph}	تركيز الفونونات
I	كثافة التيار	n_s	هو تركيز إلكترونات التوصيل الفائق
J_e	كثافة التيار الحرجة	P	عزم ثنائي القطب
J	طاقة تفاعل التبادل الكهروستاتيكي	P_{resonant}	المركبة الرنينية للاستقطاب
K	طاقة التفاعل الكهروستاتيكي	$P_{\text{background}}$	المركبة غير الرنينية للاستقطاب
K_B	أصغر طول لمعجه الشبكة المعكوسة	P	شدة القطب
k	المتجه الموجي	P_j	كمية التحرك الذرية الكلية
k_f	المتجه الموجي لغيري	P_L	كمية التحرك المدارية الكلية للذرة
k_{max}	القيمة القصوى للعدد الموجي	P_s	كمية التحرك المغزلية للإلكترون
K	الموصلية الحرارية	P_{SH}	مركبة كمية التحرك المغزلية للإلكترون في اتجاه المجال
K_e	الموصلية الحرارية للغاز الإلكتروني	n	كمية تحرك الإلكترون
K_{lattice}	الموصلية الحرارية للشبكة	p_0	كمية الحركة للإلكترون
β	الانضغاطية	p_f	كمية التحرك المدارية للإلكترون
K	معامل الانقراض	P_{PH}	مسقط كمية التحرك المداري في المجال المغناطيسي
L	العدد الكمي المداري الكلي ، العنول	P_{ph}	كمية الحركة للفونون
L_c	عدد لورنس	P	الاستقطابية
L	القطر الفعال للتشابي الإلكتروني أو طول الانتصاق	q	الشحنة الجبرية
f	المسافة بين القطبين ، الطول ، العدد الكمي المداري	q	عدد صحيح
M	العزم المغناطيسي ، الكتلة	R	المقاومة الكهربائية ، الثابت العام للغازات
M_{eff}	العزم المغناطيسي الفعال	R	الانعكاسية
M_j	العزم المغناطيسي الذري	R	متجه شبكية برافيه الفراغي
M_{jH}	مركبة العزم المغناطيسي الذري في اتجاه المجال	R_k	متجه نصف قطر النواة
m	الكتلة	r	متجه موضع الإلكترون
m_0	كتلة السكون للإلكترون	r_s	متجه موضع النواة
m_j	العدد الكمي المغناطيسي	r_e	متجه نصف قطر موضع الإلكترون
m_f	العدد الكمي المغناطيسي	r_{in}	متجه نصف قطر موضع النواة
m_N	كتلة النواة	r_{ph}	نصف قطر كرة التشتت الاحتمالية للفونون
r_s	متجه نصف قطر الموضع للإلكترون	χ	القابلية المغناطيسية
S	الإنتروبيا ، تكامل التداخل للسحابات الإلكترونية ، العدد الكمي المغزلي ، المساحة المحددة بمدار الإلكترون	χ_e	السماحية الكهربائية
S_{conf}	الإنتروبيا التكوينية	χ_m	القابلية المغناطيسية المولارية
S_{cl}	الإنتروبيا المغناطيسية	χ_v	القابلية المغناطيسية الحجمية

أهم الرموز الفيزيائية المستخدمة

الرمز	الكمية الفيزيائية	الرمز	الكمية الفيزيائية
S_{th}	الانتروبيا الحرارية	χ_D	التقبلية المغناطيسية الكتلية
T	درجة الحرارة ، متجه الإزاحة الفراغي	ϵ	السماحية الكهربائية
T_c	درجة الحرارة الحرجة	ϵ_0	السماحية الفراغية
t	الزمن	γ	معامل بنج للوسط
T	الإنتاغية	γ	السالبية الكهربائية للعنصر
U	الطاقة الداخلية للنظام ، طاقة الوضع	γ	إحداثي موضع
U_{att}	طاقة التجاذب الأيوني	z	العدد الذري للعنصر ، إحدائي موضع
U_b	طاقة الربط	α	معامل الامتصاص
U_d	طاقة تفاعل التشتت	α	المعامل الحراري للمقاومة النوعية ، معامل التمدد الطولي
U_{ee}	دالة الوضع لتفاعل الإلكترونات كل مع الأخر	α_1	معامل التمدد الطولي الحراري
U_{ex}	دالة وضع الإلكترونات والأيونية في المجال الخارجي	α_2	معامل التمدد الطولي المغناطيسي
U_{ie}	دالة تفاعل كل إلكترون مع كل نواة	β	ثابت القوة الرادة ، معامل المرونة الحجمي للجسم الصلب
U_{ij}	دالة الوضع لتفاعل النويات كل مع الأخرى	γ	معدل التخميد
U_{in}	طاقة تفاعل الحث	γ_1	معامل التخميد لخط رنيني معين
U_{ni}	طاقة الوضع للعزم المغناطيسي	γ_e	النسبة الجيرومغناطيسية المدارية
U_{or}	طاقة التفاعل التوجيهي	γ_s	النسبة الجيرومغناطيسية المغزلية
U_{rep}	طاقة التنافر	Δ	الجهد الكيميائي لمادة الاتصال
U	الإزاحة الذرية	ΔE_d	طاقة التأين للمستويات الشاغرة المعطية
u	القيمة الكتلية المعبرة عن كتلتي النواة والإلكترون	ΔE_{BM}	إزاحة بورشتين - موس
V	حجم الخلية الابتدائية للشبكة الأساسية ، الحجم	ΔE_N	مقدار التكمش المنطقة المحرمة
V_c	حجم الخلية الأولية للشبكة المعكوسة	ΔT	الإجهاد القصي اللازم لتحريك الانخلاعات
V_c	فرق جهد الاتصال	δ	عمق التغلغل
v	السرعة	ψ	موثر لا بلاس
\bar{v}	السرعة المتوسطة	λ	ثابت ماندلونج
v_0	سرعة الإلكترون	ϵ	ثابت العزل
v_d	السرعة الانتشارية أو الانتفاغية	ϵ_0	ثابت العزل للفراغ
v_F	سرعة إلكترونات فيرمي	ϵ_1	القيمة الحقيقية لثابت العزل
v_g	سرعة المجموعة	ϵ_2	القيمة التخيلية لثابت العزل
v_N	سرعة النواة	ϵ_{gr}	ثابت العزل النسبي عند الترددات العالية
v_T	السرعة الحرارية المتوسطة للإلكترونات	ϵ_F	ثابت العزل النسبي
W	عدد الطرق الإحصائية	ϵ_{gr}	ثابت العزل النسبي في المجال الكهربائي الاستاتيكي
W_g	الكتلة المولارية	ϵ_F	ثابت العزل النسبي المركب
W_{th}	الاحتمال التيرموديناميكي	η	ثابت المجال الحزني
W_{tr}	الشغل المبذول في عملية التمهيط	ξ	سعة الاهتزازة الذرية الثقيلة نسبيا
x	الإزاحة ، إحدائي الموضع	ζ	سعة الاهتزازة الذرية الخفيفة نسبيا
θ	زاوية براج	σ	الموصلية النوعية
θ_{cr}	بدرجة حرارة أو نقطة كوري	σ_1	الموصلية الكهربائية الذاتية
θ_D	درجة حرارة ديبياي	σ_N	الموصلية الكهربائية للإلكترونات
θ_B	درجة حرارة أينشتاين	σ_0	الموصلية الكهربائية المستمرة
λ	الطول الموجي	σ_p	الموصلية الكهربائية للفعوات

أهم الرموز الفيزيائية المستخدمة

الرمز	الكمية الفيزيائية	الرمز	الكمية الفيزيائية
λ_g	الطول الموجي المقابل لإتساع المنطقة المحرمة	σ_{ph}	مساحة مقطع تشتت للفونون
λ_{min}	أقل طول موجي	σ_e	مساحة مقطع التبعثر
λ_{ph}	طول المسار الحر للفونون	σ_r	إجهاد الإذعان
λ	متوسط طول المسار الحر	τ	زمن الاسترخاء
λ_e	متوسط المسار الحر للإلكترون	τ_p	زمن الاسترخاء لإلكترونات فيرمي
λ_e	متوسط المسار الحر لإلكترونات فيرمي	$\bar{\tau}$	متوسط زمن الاسترخاء
γ	عق التغلغل في المواد فانقة التوصيل	ϕ	دالة الشغل
μ	النفاذية المغناطيسية	θ	زاوية التشتت ، الإنفعال التصي
μ	النفاذية المغناطيسية التفاضلية	ψ	الدالة الموجية للإلكترون
μ_0	النفاذية المغناطيسية للفراغ	ω	سرعة زاوية ، التردد الزاوي ، أقل تردد للذبذبات الضوئية
μ_{Al}	تحركية الإلكترونات في الألمنيوم	ω_0	أقل تردد لفرع الذبذبات الضوئي
μ_B	بوهر ماجنتون	ω'	أقصى تردد لفرع الصوتي للذبذبات
μ_{eff}	النفاذية المغناطيسية الفعالة	ω'_0	أقل تردد لفرع الصوتي للذبذبات
μ_{ii}	العزم المغناطيسي للذرة	ω_c	التردد الحرج
μ_i	تحركية الفجوات		
μ_i	النفاذية المغناطيسية الأولية		
μ_i	العزم المغناطيسي المداري للإلكترون		
μ_{ii}	مركبة العزم المغناطيسي المداري في اتجاه المجال		
μ_{ii}	تحركية للإلكترونات		
μ_{int}	مجموع تحركية الإلكترونات والفجوات		
μ_i	النفاذية المغناطيسية النسبية		
μ_i	العزم المغناطيسي المغزلي للإلكترون		
μ_{int}	مركبة العزم المغناطيسي المغزلي للإلكترون في اتجاه المجال		
ν	التردد		
ν	تردد المنتذبذبي الذري		
ν_D	تردد ديبياي		
ν_F	عدد التصادمات للإلكترونات		
ν_L	التردد الحاد نتيجة وجود المجال المغناطيسي		
ν_{reson}	التردد الرنيني		
$\bar{\nu}$	متوسط عدد التصادمات		
ρ	المقاومة النوعية ، كثافة المادة		
ρ_{res}	المقاومة المتبقية		
β_p	كثافة الاحتمال		
ρ_T	المقاومة النوعية الحرارية		
β_L	كثافة الانخلاعات		

جدول : بادئات مضاعفات وكسور الوحدات الأساسية في النظام SI

معامل الضرب Multiplying factor	البادئة Perfix	الرمز Symbol	معامل الضرب Multiplying factor	البادئة Perfix	الرمز Symbol
10^{-18}	a	أتو atto	10^{18}	E	إكزا exa
10^{-15}	f	فيمنو femto	10^{15}	P	بيتا peta
10^{-12}	p	بيكو pico	10^{12}	T	تيرا tera
10^{-9}	n	نانو nano	10^9	G	جيجا giga
10^{-6}	u	ميكرو micro	10^6	M	ميجا mega
10^{-3}	m	ميلي milli	10^3	k	كيلو kilo
10^{-2}	c	سنتي centi	10^2	h	هكتو hecto
10^{-1}	d	ديسي deci	10	da	ديكا deca

بعض الثوابت الفيزيائية

القيمة	الرمز	الكمية
$5.292 \times 10^{-11} \text{ m}$	a_H	نصف قطر الهيدروجين لبوهر
$2.9979 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$	C	سرعة الضوء في الفراغ
$1.602 \times 10^{-19} \text{ c}$	e	شحنة الإلكترون
$9.109 \times 10^{-31} \text{ Kg}$	m_0	كتلة السكون للإلكترون
$1.7588 \times 10^{11} \text{ cKg}^{-1}$	e/m_0	الشحنة النوعية للإلكترون
$1.6726 \times 10^{-27} \text{ Kg}$	m_p	كتلة السكون للبروتون
$1.6749 \times 10^{-27} \text{ Kg}$	m_n	كتلة النيوترون
$6.673 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ Kg}^{-2}$	G	ثابت الجاذبية
$6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$	h	ثابت بلانك $\hbar = \frac{h}{2\pi}$
$6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	N_A	عدد أفوجادرو
$8.315 \text{ Jmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	R	الثابت العام للغازات
$1.3807 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$	$k_B = \frac{R}{N_A}$	ثابت بولتزمان
$8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$	ϵ_0	السماحية الكهربائية للفراغ (الثابت الكهربائي)
$4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$	μ_0	النفاذية المغناطيسية الفراغ (الثابت المغناطيسي)
$9.274 \times 10^{-24} \text{ JT}^{-1}$	$\mu_B = \frac{eh}{2m_0}$	بوهر ماجنتون
$9.2848 \times 10^{-24} \text{ JT}^{-1}$	μ_e	العزم المغناطيسي للإلكترون
$5.67 \times 10^{-8} \text{ wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$	σ	ثابت ستيفان - بولتزمان
$1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$	eV	الإلكترون فولت
$1.1604 \times 10^4 \text{ K}$		$k_B T = 1 \text{ eV}$ درجة الحرارة عندما
$2.418 \times 10^4 \text{ Hz}$		$h\nu = 1 \text{ eV}$ التردد عندما
$1.2398 \times 10^{-6} \text{ m}$		$\frac{hc}{\lambda} = 1 \text{ eV}$ الطول الموجي عندما

الحاصلون على جائزة نوبل في الفيزياء من 1901 إلى 2012

- 2012** منحت الجائزة مشاركة بين : **DAVID J. WINELAND & SERGE HAROCHE**
عن الطرق التجريبية الرائدة التي جعلت من الممكن قياس ومعالجة الأنظمة الكمية المستقلة
individual quantum systems .
- 2011** منحت مناصفة بين : **SAUL PERLMUTTER**
& **ADAM G. RIESS** and **BRIAN P. SCHMIDT**
عن اكتشاف التمدد المتسارع للكون accelerating expansion of the universe من خلال مشاهدات نجم
المويزونوقاي البعيد distant supernovae .
- 2010** منحت مناصفة بين : **ANDRE GEIM & KONSTANTIN NOVOSELOV**
عن التجارب الرائدة على مادة الجرافين في بعدين .
- 2009** منحت مناصفة بين : **CHARLES K. KAO**
عن الإيجرات المتعلقة بانتقال الضوء في الألياف للاتصالات الضوئية optical communication .
- WILLARD S. BOYLE & GEORGE E. & SMITH**
عن اختراع دائرة شبه موصل للتصوير والتي تسمى CCD sensor .
- 2008** منحت مناصفة بين : **YOICHIRO NAMBU**
عن اكتشاف ميكانيكية التماثل المحطم spontaneous broken symmetry ذاتيا في الفيزياء دون الذرية .
- & **MAKOTO KOBAYASHI & TOSHIHIDE MASKAWA**
عن اكتشاف أصل التماثل المحطم the origin of the broken symmetry الذي يتنبأ بوجود ثلاث عائلات
على الأقل من الكواركات الطبيعية .
- 2007** منحت مشاركة بين : **ALBERT FERT & PETER GRÜNBERG**
عن اكتشافهما المقاومة المتقاطيسية المفرطة Giant Magnetoresistance .
- 2006** منحت مشاركة بين : **JOHN C. MATHER & GEORGE C. SMOOT**
عن اكتشاف خصائص الجسم الأسود وعدم تماثل الخواص الاتجاهية للأشعة الكونية المرجعية الميكرونية .
- 2005** منحت مناصفة بين : **ROY J. GLAUBER**
عن إسهامه في النظرية الكمية للإلتصاق الضوئي Theory of optical coherence .
- & **THEODOR W. HÄNSCH & JOHN L. HALL**
عن مساهمته في تطوير أطراف الدقة الليزرية laser-based precision spectroscopy التي تشمل على
تكنولوجيا مشط التردد الضوئي Optical comb technique .
- 2004** منحت مشاركة بين : **FRANK WILCZEK & DAVID J. GROSS, H. DAVID POLITZER**
عن إكتشافه خط الحرية التقريبي asymptotic freedom في نظرية التفاعل الضوئي .
- 2003** منحت مشاركة بين : **ANTHONY J. LEGGETT & ALEXEI A. ABRIKOSOV, VITALY L. GINZBURG**
عن المساهمات الرائدة في نظرية الموصلات الفائقة والموانع الفائقة superconductors and superfluids .
- 2002** منحت مناصفة بين : **MASATOSHI KOSHIBA & RAYMOND DAVIS JR.,**
عن مساهمتهما الرائدة في مجال الفلك (فيزياء الفضاء astrophysics) وخاصة في إكتشاف النيوتريو الكوني .
- & **RICCARDO GIACCONI**
عن مساهمته الرائدة في فيزياء الفضاء والتي توجت باكتشاف مصادر الأشعة السينية الكونية cosmic X-ray .
- 2001** منحت مشاركة بين : **ERIC A. CORNELL, WOLFGANG KETTERLE & CARL E. WIEMAN**
عن تحقيق تكثيف بوز-أينشتاين Bose-Einstein condensation على غازات الذرات القلوية المخففة ، وكذلك
الدراسات الأساسية المبكرة عن خصائص المتكثفات condensates .
- 2000** منحت مناصفة بين : **HERBERT KROEMER & ZHORES I. ALFEROV**
عن تطوير تركيبات شبه الموصل semiconductor heterostructures واستخداماتها في الإلكترونيات الضوئية .

& JACK ST. CLAIR KILBY

عن مساهمته في اختراع الدوائر المتكاملة integrated circuit .

1999 منحت مشاركة بين : MARTINUS J.G. VELTMAN & GERARDUS 'T HOOFT

عن تفسير التركيب الكمي للتفاعلات ضعيفة الكهربية في الفيزياء .

1998 منحت مشاركة بين :

ROBERT B. LAUGHLIN, HORST L. STORMER & DANIEL C. TSUI

. fractionally charged excitations عن إكتشافهم صيغة جديدة للمانع الكمي ذات إثارات لكسور الشحنات

1997 منحت مشاركة بين :

WILLIAM D. PHILLIPS & STEVEN CHU, CLAUDE COHEN-TANNOUDJI

. cool and trap atoms with laser light عن تطوير طرق تبريد واصطياد الذرات بضوء الليزر

1996 منحت مشاركة بين :

DAVID M. LEE, DOUGLAS D. OSHEROFF & ROBERT C. RICHARDSON

. superfluidity in helium-3 عن إكتشافهم المانعية المفرطة في الهيليوم-3

1995 منحت مناصفة بين :

MARTIN L. PERL

عن إكتشاف جسيم التاو lepton tau وهو جسيم أولي سالب الشحنة وله

دورانية مغزلية تساوي $\frac{1}{2}$ وهو كبير الشبه بالإلكترون ونظرا لكبر كتلته لا يمكنه الانبعث .

& FREDERICK REINES

عن إكتشاف النيوترينو neutrino .

1994 منحت عن المساهمات الرائدة في تطوير طرق التبعثر النيوتروني لدراسة المواد الصلبة بين :

BERTRAM N. BROCKHOUSE

عن تطوير الطيف النيوتروني .

& CLIFFORD G. SHULL

عن تطوير طريقة حيود النيوترونات .

1993 منحت مشاركة بين : JOSEPH H. TAYLOR JR. & RUSSELL A. HULSE

. عن إكتشاف نوع جديد من النجوم النيترونية باعثة النبضات pulsar ، مما أتاح إمكانيات جديدة لدراسة الجاذبية

1992 منحت للعالم : GEORGES CHARPAK

عن إكتشاف وتطوير كواشف الجسيمات particle detectors ، وبشكل خاص حجرة التناسب عديدة

الأسلاك multiwire proportional chamber .

1991 منحت للعالم : PIERRE-GILLES DE GENNES

عن إكتشاف طرق لدراسة ظاهرة الترتيب أو النسق (order) في الأنظمة البسيطة وتطويرها لتعمم على أنظمة

المواد الأكثر تعقيدا ، وبشكل خاص على البلورات السائلة والمواد البوليمرية (polymers) .

1990 منحت مشاركة بين :

RICHARD E. TAYLOR & JEROME I. FRIEDMAN, HENRY W. KENDALL -

عن الدراسات الرائدة المتعلقة بالتشتت غير المرين للإلكترونات بواسطة البروتونات والنيوترونات المقيدة والتي

تعتبر ذات أهمية أساسية في تطوير نموذج الجسيم الأولي الكوارك (quark) في فيزياء الجسيمات .

1989 منحت مناصفة بين : NORMAN F. RAMSEY

عن اختراع طريقة المجالات المتذبذبة المنفصلة واستخدامها في ميزر (maser) الهيدروجين والساعات الذرية

الأخرى .

& WOLFGANG PAUL and HANS G. DEHMELT

عن تطوير تكنولوجيا إصطياد الأيونات ion trap technique .

1988 منحت مشاركة بين :

LEON M. LEDERMAN, MELVIN SCHWARTZ and JACK STEINBERGER

عن تكنولوجيا شعاع النيوترينو ، وتحقق التركيب الثنائي لجسيمات البيتون من خلال إكتشاف الجسيم الأولي مون

نيوترينو muon neutrino .

1987 منحت مشاركة بين : LLER- K. ALEXANDER M& J. GEORG BEDNORZ

عن المساهمات الهامة في إكتشاف الموصلية الفائقة في المواد الخزفية (ceramic materials) .

1986 منحت مناصفة بين : ERNST RUSKA

عن الإنجازات الهامة في مجال الضوء الإلكتروني وتصميم أول ميكروسكوب إلكتروني .

& **HEINRICH ROHRER** and **GERD BINNIG**

عن تصميم الميكروسكوب النفقي الماسح (scanning tunneling microscope) .

KLAUS VON KLITZING

1985 منحت للعالم :

عن اكتشاف تأثير هول الكمي (quantized Hall effect) .

SIMON VAN DER MEER & CARLO RUBBIA

1984 منحت مشاركة بين :

عن المساهمات الحاسمة في مشروع كبير قادت إلى اكتشاف مجال الجسيمات المرسله W and Z ذات التفاعل

الضعيف weak interaction .

SUBRAMANYAN CHANDRASEKHAR

1983 منحت مناصفة بين :

عن الدراسات النظرية للعمليات الفيزيائية ذات الأهمية في تركيب ونشوء النجوم structure & evolution of stars

& **WILLIAM A. FOWLER**

عن الدراسات النظرية والتجريبية في مجال التفاعلات النووية ذات الأهمية في تكوين عناصر كيميائية في الكون .

KENNETH G. WILSON

1982 منحت للعالم :

عن نظرية الظواهر الحرجة المرتبطة بالتحويلات الطورية critical phenomena in connection with phase

transitions .

ARTHUR L. SCHAWLOW & NICOLAAS BLOEMBERGEN

1981 منحت مناصفة بين :

عن المساهمة في تطوير طيف الليزر .

& **KAIM SIEGBAHN**

عن المساهمة في تطوير الطيف الإلكتروني ذي الثبات العالي high- resolution .

VAL L. FITCH & JAMES W. CRONIN

1980 منحت مشاركة بين :

عن اكتشاف نقض (مخالفة) مبادئ التماثل الأساسية أثناء اضمحلال ميزونات K المتعادلة decay of neutral

K-mesons .

1979 منحت مشاركة بين :

STEVEN WEINBERG & SHELDON L. GLASHOW, ABDUS SALAM

عن المساهمات في نظرية التفاعل الكهرومغناطيسي والتفاعل الضعيف الموحد بين الجسيمات الأولية والتي

شملت التنبؤ بالتأثير المتبادل الضعيف weak neutral current .

PYOTR LEONIDOVICH KAPITSA

1978 منحت مناصفة بين :

عن اختراعاته واكتشافاته الأساسية في مجال فيزياء الحرارة المنخفضة low-temperature physics .

& **ROBERT W. WILSON** and **ARNO A. PENZIAS**

عن اكتشاف الشعاع الكوني المرجعي القصير cosmic microwave background radiation .

1977 منحت مشاركة بين :

JOHN H. VAN VLECK & PHILIP W. ANDERSON, SIR NEVILL F. MOTT

عن الدراسات النظرية الأساسية عن التركيب الإلكتروني للأنظمة المغناطيسية وغيرالمرتبطة magnetic and

disordered systems .

SAMUEL C. C. TING & BURTON RICHTER

1976 منحت مشاركة بين :

عن العمل الرائد في اكتشاف جسيم أولي ثقيل من نوع جديد .

JAMES RAINWATER & AAGE BOHR, BEN MOTTELSON

1975 منحت مشاركة بين :

عن اكتشاف الإرتباط بين الحركة التجمعية collective motion وحركة الجسيم في النواة الثرية وتطوير نظرية

تركيب النواة بناء على هذا الإرتباط .

ANTONY HEWISH & SIR MARTIN RYLE

1974 منحت مشاركة بين :

عن الأعمال الرائدة في فيزياء الفلك ، وملاحظات ريل Ryle واختراعاته ، ودور هيويس Hewish في اكتشاف

البولسارس pulsars .

IVAR GIAEVER & LEO ESAKI

1973 منحت مناصفة بين :

عن اكتشافهما التجريبية المرتبطة بالظواهر النفقية tunneling phenomena في أشباه الموصلات والموصلات

الفائقة .

& **BRIAN D. JOSEPHSON**

عن تنبؤاته النظرية عن خصائص التيار الفائق supercurrent خلال الحاجز النفقي ، خاصة تلك الظواهر الهامة

المعروفة بتأثيرات جوزيفسون Josephson effects .

1972 منحت مشاركة بين: J. ROBERT SCHRIEFFER & JOHN BARDEEN, LEON N. COOPER
عن مشاركتهم في تطوير نظرية التوصيل الفائق ، والمعروفة بالنظرية BCS-theory .
1971 منحت للعالم :

DENNIS GABOR

عن اختراع وتطوير الطريقة الهولوجرافية holographic method .

HANNES ALFVN

1970 منحت مناصفة بين :
عن الأعمال الأساسية والاكتشافات في مجال الديناميكا الهيدروديناميكية المغناطيسية magneto-hydrodynamics
وتطبيقاتها المثمرة في الأفرع المختلفة لفيزياء البلازما plasma physics .

& LOUIS NEL

عن الأعمال الرائدة والاكتشافات المتعلقة بالانتقير ومغناطيسية والغيرمغناطيسية antiferrromagnetism and ferrimagnetism
والتي أدت إلى تطبيقات هامة في مجال فيزياء الجوامد solid state physics .

MURRAY GELL-MANN

1969 منحت للعالم :
عن المساهمات والاكتشافات المتعلقة بتصنيف الجسيمات الأولية وتفاعلاتها classification of elementary particles and their interactions .

LUIS W. ALVAREZ

1968 منحت للعالم :
عن المساهمات الناجزة في فيزياء الجسيمات الأولية ، وخاصة إكتشاف عدد كبير من الحالات الرنينية resonance
من خلال تطوير تكنولوجيا حجرة فقاعة الهيدروجين hydrogen bubble chamber وتحليل النتائج .

HANS ALBRECHT BETHE

1967 منحت للعالم :
عن مساهماته في نظرية التفاعلات النووية ، واكتشافاته المرتبطة بتولد الطاقة في النجوم energy production in stars

ALFRED KASTLER

1966 منحت للعالم :
عن إكتشاف وتطوير طرق ضوئية لدراسة الرنين الهيرتيزي hertzian resonances في الفرات .
1965 منحت مشاركة بين :

RICHARD P. FEYNMAN & SIN-ITIRO TOMONAGA, JULIAN SCHWINGER

عن الأعمال الهامة في مجال الديناميكا الكهربائية الكمية quantum electrodynamics والمساهمات الجادة
في فيزياء الجسيمات الأولية physics of elementary particles .
1964 منحت مناصفة بين :

CHARLES H. TOWNES

& NICOLAY G. BASOV and ALEKSANDR M. PROKHOROV

عن الأعمال الهامة في مجال الإلكترونيات الكمية ، والتي أدت إلى تصنيع المكبرات amplifiers والمتذبذبات
oscillators المعتمدة على مبدأ الليزر - ميزر maser-laser principle .

EUGENE P. WIGNER

1963 منحت مناصفة بين :
عن المساهمات في نظرية النواة الذرية والجسيمات الأولية ، خاصة من خلال إكتشاف وتطبيق مبادئ التماثل
الأساسية fundamental symmetry principles .

& J. HANS D. JENSEN and MARIA GOEPPERT-MAYER

عن الاكتشافات المتعلقة بتركيب الغلاف النووي nuclear shell structure .

LEV DAVIDOVICH LANDAU

1962 منحت للعالم :
عن النظريات الفذة في المواد الكثيفة ، خاصة الهيليوم السائل .

ROBERT HOFSTADTER

1961 منحت مناصفة بين :
عن الدراسات الهامة عن تشتت الإلكترون في النواة والاكتشافات المتعلقة بتركيب النيكلونات structure of the nucleons .

& RUDOLF LUDWIG MOSSBAUER

عن الأبحاث المتعلقة بالإمتصاص الرنيني resonance absorption لإشعاع جاما وإكتشاف تأثير
"موسباور" الذي يحمل إسمه .

DONALD A. GLASER

1960 منحت للعالم :
عن اختراعه لفرقة الفقاعة bubble chamber .

EMILIO GINO SEGR & OWEN CHAMBERLAIN

1959 منحت مشاركة بين :
عن إكتشاف الأنتيبروتون antiproton .

- 1958 منحت مشاركة بين :
PAVEL ALEKSEYEVICH CHERENKOV , IL'JA MIKHAILOVICH FRANK & IGOR YEVGENYEVICH TAMM
 عن اكتشاف وتفسيـر تأثير تشيرنكوف Cherenkov effect .
- 1957 منحت مشاركة بين :
TSUNG-DAO LEE & CHEN NING YANG
 عن الدراسات العميقة عن قوانين المضاهاة (parity laws) والتي أدت إلى اكتشافات هامة في مجال الجسيمات الأولية .
- 1956 منحت مشاركة بين :
WALTER HOUSER BRATTAIN & WILLIAM SHOCKLEY, JOHN BARDEEN
 عن الدراسات المتعمقة على أشباه الموصلات واكتشاف تأثير الترانزستور transistor effect .
- 1955 منحت مناصفة بين :
WILLIS EUGENE LAMB
 عن الاكتشافات المتعلقة بالتركيب الدقيق لطيف الهيدروجين hydrogen spectrum .
- & POLYKARP KUSCH
 عن التحديد الدقيق للعزم المغناطيسي للإلكترون magnetic moment of the electron .
- 1954 منحت مناصفة بين :
MAX BORN
 عن الدراسات الأساسية في الميكانيكا الكمية وخاصة عن التفسير الإحصائي للدالة الموجية .
- & WALTHER BOTHE
 عن نظرية التناطبق coincidence method والاكتشافات الناتجة عنها
- 1953 منحت للعالم :
FRITS (FREDERIK) ZERNIKE
 عن تأسيس طريقة التباين الطوري phase contrast method وإختراع ميكروسكوب التباين الطوري phase contrast microscope .
- 1952 منحت مشاركة بين :
FELIX BLOCH & EDWARD MILLS PURCELL
 عن تطوير طرق جديدة لدقة قياسات العزم المغناطيسي النووي nuclear magnetic precision measurements والاكتشافات المرتبطة بها .
- 1951 منحت مشاركة بين :
SIR JOHN DOUGLAS COCKCROFT & ERNEST THOMAS SINTON WALTON
 عن العمل الرائد عن تحول الأنوية الذرية transmutation of atomic nuclei باستخدام جسيمات ذرية معجلة صناعيا .
- 1950 منحت للعالم :
CECIL FRANK POWELL
 عن تطوير طريقة فوتوغرافية لدراسة العمليات النووية والاكتشافات المرتبطة بالميزونات mesons .
- 1949 منحت للعالم :
HIDEKI YUKAWA
 عن تنبؤه بوجود ميزونات بواسطة عمل بحثي نظري عن القوى النووية .
- 1948 منحت للعالم :
LORD PATRICK MAYNARD STUART BLACKETT
 عن تطويره لطريقة حجرة سحابة ويلسون Wilson cloud chamber method ، واكتشافاته في مجال الفيزياء النووية والإشعاع الكوني cosmic radiation .
- 1947 منحت للعالم :
SIR EDWARD VICTOR APPLETON
 عن دراساته في الفيزياء عن طبقات الجو العليا واكتشافه لما يسمى بطبقة أبلينتون Appleton layer .
- 1946 منحت للعالم :
PERCY WILLIAMS BRIDGMAN
 عن اختراعه جهاز لإنتاج الضغوط العالية جدا extremely high pressures ، وكذلك لإكتشافاته في مجال فيزياء الضغوط العالية .
- 1945 منحت للعالم :
WOLFGANG PAULI
 عن اكتشافه لمبدأ الإستثناء الذي سمي بإسمه Pauli Principle .
- 1944 منحت للعالم :
ISIDOR ISAAC RABI
 عن تأسيسه وتطويره لطريقة الرنين لتسجيل الخصائص المغناطيسية للأنوية الذرية .
- 1943 منحت للعالم :
OTTO STERN
 عن مساهمته في تطوير طريقة الشعاع الجزيئي molecular ray method ، واكتشافه للعزم المغناطيسي للبروتون .

- ERNEST ORLANDO LAWRENCE** : منحت للعالم : 1939
 عن اختراعه وتطويره للسيكلوترون cyclotron وعن النتائج التي أمكنه التوصل إليها بواسطة خاصته خاصة ما يرتبط
 بالعناصر الصناعية المشعة artificial radioactive elements .
- ENRICO FERMI** : منحت للعالم : 1938
 عن إثبات وجود عناصر مشعة جديدة بواسطة التشعيع النيوتروني neutron irradiation ، ولإكتشافه للتفاعلات
 النووية الناتجة بواسطة النيوترونات البطيئة slow neutrons .
- 1937 منحت مشاركة بين :
SIR GEORGE PAGET THOMSON & CLINTON JOSEPH DAVISSON
 عن اكتشاف حيود الإلكترونات diffraction of electrons بواسطة البلورات معصليا .
- 1936 منحت مناصفة بين :
VICTOR FRANZ HESS
 عن اكتشافه للإشعاع الكوني cosmic radiation .
- & **CARL DAVID ANDERSON**
 عن اكتشافه البوزيترون positron .
- 1935 منحت للعالم :
SIR JAMES CHADWICK
 عن اكتشافه النيوترون neutron .
- 1933 منحت مشاركة بين :
ERWIN SCHRODINGER & PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC
 عن اكتشاف أشكال جديدة أكثر فائدة للنظرية الذرية new productive forms of atomic theory .
- 1932 منحت للعالم :
WERNER HEISENBERG
 عن إنشائه للميكانيكا الكمية ، والتي أدى تطبيقها إلى اكتشاف الصور المختلفة للهيدروجين
 allotropic forms of hydrogen .
- 1930 منحت للعالم :
SIR CHANDRASEKHARA VENKATA RAMAN
 عن أعماله العلمية في مجال تشتت الضوء واكتشافه للتأثير الذي سمي باسمه (تأثير رامان Raman effect) .
- 1929 منحت للعالم :
PRINCE LOUIS-VICTOR DE BROGLIE
 عن اكتشافه للطبيعة الموجية للإلكترونات wave nature of electrons .
- 1928 منحت للعالم :
SIR OWEN WILLANS RICHARDSON
 عن دراسته للظاهرة الثيرموأيونية thermionic phenomenon واكتشافه للقانون الذي سمي باسمه
 Richardson Law .
- 1927 منحت مناصفة بين :
ARTHUR HOLLY COMPTON
 عن اكتشافه للتأثير الذي سمي باسمه (تأثير كمتون Compton effect) .
- & **CHARLES THOMSON REES WILSON**
 عن طريقته لاجل مسارات الجسيمات المشحونة كهربيا مرئية ، وذلك بواسطة تكثيف البخار .
- 1926 منحت للعالم :
JEAN BAPTISTE PERRIN
 عن دراسته على التركيب غير المتصل للمادة وخاصة اكتشافه للاتزان الترسوبي sedimentation equilibrium .
- 1925 منحت مشاركة بين :
GUSTAV HERTZ & JAMES FRANCK
 عن اكتشافاتهما للقوانين التي تحكم تأثير الإلكترون على الذرة .
- 1924 منحت للعالم :
KARL MANNE GEORG SIEGBAHN
 عن اكتشافاته وأبحاثه في مجال طيف الأشعة السينية X-ray spectroscopy .
- 1923 منحت للعالم :
ROBERT ANDREWS MILLIKAN
 عن إنجازاته عن الشحنة العنصرية elementary charge للكهرباء وعن التأثير الكهروضوئي
 photoelectric effect .
- 1922 منحت للعالم :
NIELS BOHR
 عن إنجازاته في فحص تركيب الذرات والانبعاث الإشعاعي منها .
- 1921 منحت للعالم :
ALBERT EINSTEIN
 عن إنجازاته في مجال الفيزياء النظرية وخاصة لإكتشافه قانون التأثير الكهروضوئي
 law of the photoelectric effect .
- 1920 منحت للعالم :
CHARLES EDOUARD GUILLAUME
 عن إنجازاته التي قدمها للقياسات الدقيقة precision measurements للفيزياء واكتشافه شذوذ مبانك الصلب والنيكل .

1919 منحت للعالم : JOHANNES STARK
عن اكتشافه لتأثير دبلر Doppler effect في الأشعة الموجبة canal rays وانفلاق خطوط الطيف splitting of spectral lines في المجالات الكهربائية .

1918 منحت للعالم : MAX KARL ERNST LUDWIG PLANCK

عن إسهاماته التي قدمها في تطوير علم الفيزياء باكتشافه الكمات الطاقية energy quanta .

1917 منحت للعالم : CHARLES GLOVER BARKLA

عن اكتشافه لخصائص إشعاع رونتنجن للعناصر (Rontgen radiation of the elements) .

1915 منحت مشاركة بين :

SIR WILLIAM HENRY BRAGG & SIR WILLIAM LAWRENCE BRAGG

عن ريادتهما في تحليل التركيب البللوري باستخدام الأشعة السينية X-rays .

1914 منحت للعالم : MAX VON LAUE

عن اكتشافه لحيود الأشعة السينية بواسطة البلورات diffraction of X-rays by crystals .

1913 منحت للعالم : HEIKE KAMERLINGH-ONNES

عن أبحاثه على خصائص المادة عند درجات الحرارة المنخفضة ، والتي قادت لإنتاج سائل الهيليوم .

1912 منحت للعالم : NILS GUSTAF DALN

عن اختراعه للمنظمات الأتوماتيكية automatic regulators لاستخدامها في توصيل المراكم الغازية gas accumulators لإضاءة الفنارات والعوامات الخاصة بإرشاد السفن .

1911 منحت للعالم : WILHELM WIEN

عن اكتشافاته المتعلقة بالقوانين التي تحكم الإشعاع الحراري .

1910 منحت للعالم : JOHANNES DIDERIK VAN DER WAALS

عن دراساته على معادلة الحالة للغازات والسوائل equation of state for gases and liquids .

1909 منحت مشاركة بين : GUGLIELMO MARCONI & CARL FERDINAND BRAUN

عن مساهمتهما في تطوير التلغراف اللاسلكي wireless telegraphy .

1908 منحت للعالم : GABRIEL LIPPMANN

عن اختراعه لطريقة إنتاج الألوان التي تعتمد فوتوغرافيا على ظاهرة التداخل phenomenon of interference .

1907 منحت للعالم : ALBERT ABRAHAM MICHELSON

عن أجهزة الدقة الضوئية optical precision instruments التي استخدمت في الدراسات الطيفية spectroscopic and metrological investigations .

1906 منحت للعالم : SIR JOSEPH JOHN THOMSON

عن التقدير الكبير لدراساته النظرية والعملية على التوصيل الكهربائي للغازات .

conduction of electricity by gases

1905 منحت للعالم : PHILIPP EDUARD ANTON LENARD

عن دراساته على أشعة الكاثود cathode rays .

1904 منحت للعالم : LORD JOHN WILLIAM STRUTT RAYLEIGH

عن دراساته على كثافات معظم الغازات الهامة واكتشافه لغاز الأرجون .

1903 منحت مناصفة بين : ANTOINE HENRI BECQUEREL

عن خدماته غير العادية التي قدمها بواسطة إكتشاف النشاط الإشعاعي الذاتي spontaneous radioactivity .

& PIERRE CURIE and MARIE CURIE, née SKŁODOWSKA

عن الخدمات غير العادية التي قدمت بواسطة أبحاثهما المشتركة على ظواهر الإشعاع التي اكتشفت بواسطة البروفيسور هنري بيكوريل Professor Henri Becquerel .

1902 منحت مشاركة بين : PIETER ZEEMAN & HENDRIK ANTOON LORENTZ

عن الخدمات غير العادية التي قدمت بواسطة أبحاثهما على تأثير المغناطيسية على ظواهر الإشعاع .

1901 منحت للعالم : WILHELM CONRAD RONTGEN

عن الخدمات غير العادية التي قدمها بواسطة اكتشافه لأشعة سميت باسمه Rontgen rays .