Superconduoctors ةقافتاضوف ءاربهك ةلبيقلا

التوصيل الكهربائي الفائق (Superconductivity - S.C)

تعرف بأنها ظاهرة انعدام كل من المقاومة الكهربائية والفيض المغناطيسي داخل عدد من المواد عند تبريدها إلى درجة حرارية منخفضة تعرف بالدرجة الحرارية الحرجة (Critical – Temperature) ويرمز لها بالرمز (T_c) وتختلف قيمة درجة الحرارة الحرجة (Tc) من مادة إلى أخرى .

اول من اكتشف ظاهرة انعدام المقاومة هو العالم (Onnes) عام ١٩١١ إذ لاحظ انخفاض مقاوميه الزئبق الصلب وهبوطها المفاجئ إلى الصفر عند درجة حرارة حرجة مقدارها (4.2K).

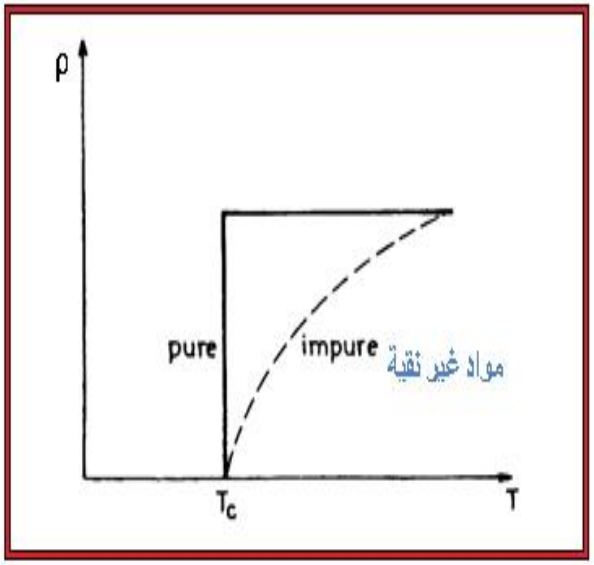
أهمية خاصة للموصلات الفائقة عالية الحرارة

- أنها سهلة التحضير ويستطيع جميع المهتمين بالحصول عليها بيسر
- أنها رخيصة الثمن حيث أن أكبر مكوناتها هو النحاس والبار يوم والكالسيوم وهي رخيصة ومتوفرة.
- أنها تتحول فوق درجة غليان النيتروجين وهو رخيص الثمن ومتوفر في كل مكان وسهل النقل والحمل ويبقى لفترات طويلة مقارنة بسلفه الهليوم المسال.
- أن الفرق بين درجات تحولها ودرجة الوسيط المبرد(النيتروجين) كبير في حالة مركبات الزئبق تفوق الخمسين درجة مما يجعلها أكثر استقراراً حيث أن ذلك الاستقرار يزيد بتزايد الفرق بين درجة حرارة العمل ودرجة حرارة التحول.
- أنه يسهل تشكيلها بأشكال مختلفة مثل الرقائق والأفلام أو المواد المكدسة.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

درجة الحرارة الحرجة Critical temperature (T_c)

إن المقاومة الكهربائية تهبط فجأة إلى الصفر في عدد من المواد وذلك عند تبريدها إلى درجات حرارة واطئة ،وهذه الدرجة تسمى بالدرجة الحرارية الحرجة (Tc) (Critical temperature) وتعد هذه الدرجة درجة حرارة تحول المادة من الحالة الاعتيادية (Normal State N.S) إلى الحالة فائقة التوصيل (Super conducting S.C) ،



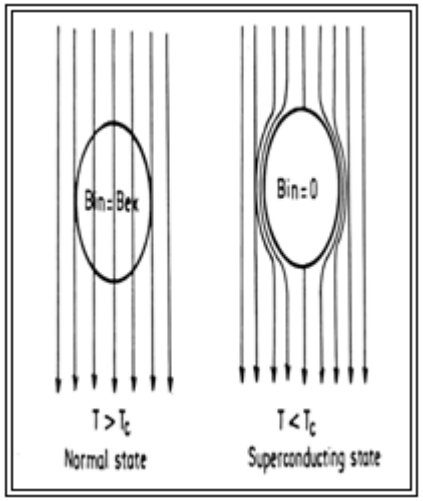
Resistivety

ان قيمة درجة الحرارة الحرجة تتغير من عنصر لآخر ففي العناصر النقية يكون الهبوط في المقاومة مع درجة الحرارة هبوطا حادا .ولكن في المركبات تقل المقاومة تدريجيا ،وان قيمة درجة الحرارة الحرجة تقل ايضا مع زيادة كثافة التيار المجهز للمادة . لذا فان المواد جميعها تفقد خاصية التوصيل الفائق وذلك عند تجهيزها بتيار كهربائي حرج (Critical current) .

وعموما فان درجة الحرارة الحرجة تعرف بأنها الدرجة الحرارية التي تنخفض فيها قيمة المقاومة الكهربائية للمادة إلى الصفر وتكون قيمة الدرجة الحرارية الحرجة للمواد الغير نقية المقاسة في منتصف المسافة بين بداية الهبوط إلى نهايته إلى ٥٠% من هبوط المقاومة ويمكن توضيح ذلك كما مبين في الشكل (٢-١)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ظاهرة مازنر Massner effect



إن المادة في الحالة الاعتيادية تسمح بمرور خطوط المجال المغناطيسي من خلالها عندما يسلط عليها مجال مغناطيسي خارجي ولكن لو تم خفض درجة حرارة المادة ذات خصائص التوصيل الفائق الى درجة الحرارة الحرجة (Tc) أي اصبحت المادة ذات توصيلية فائقة فان خطوط المجال المغناطيسي (B) سوف لن تستطيع اختراق المادة بل سوف تسير خطوط المجال المغناطيسي خارج المادة واطلق على هذه الظاهرة بظاهرة اقصاء الفيض المغناطيسي Flux exclusion او ظاهرة مازنر .

لقد تم تفسير ظاهرة مازنر على اساس عملية التحول بوجود المجال المغناطيسي من الحالة الاعتيادية الى حالة التوصيل الفائق مصحوبة بتوليد تيارات سطحية مستمرة كافية لمحو تاثير المجال المغناطيسي داخل المادة وكما هو موضح في الشكل (٢-٢).

ويلاحظ من الشكل اعلاه :-

١. لا يخترق المجال المغناطيسي المادة ذات التوصيل الفائق S.C
٢. يخترق المجال المغناطيسي المادة ذات التوصيل الاعتيادي N.C
٣. المجال المغناطيسي داخل المادة ذات التوصيل الفائق تساوي صفرا $B_{in}=0$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

فمن اجل توضيح ذلك رياضيا . دعنا نفرض أن المجال المغناطيسي داخل المادة B_{in} في الحالة الاعتيادية بدلالة المجال المغناطيسي المسلط على المادة B_{ext} والذي يمكن أن يكتب بالشكل التالي :

$$B_{in} = B_{ext} + \mu_0 M \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (١)$$

$$B_{in} = \mu_0 H + \mu_0 X H$$
$$= \mu_0 (H + X H) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (٢)$$

$$\therefore B_{in} = \mu_0 H (1+X) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (٣)$$

حيث أن :

m_0 = Permeability of free space النفاذية في الفراغ
M = Magnetization Intensity شدة المغناطيسية
H = External Magnetic field المجال المغناطيسي الخارجي
X = The susceptibility field for super conduit التأثرية المغناطيسية

حيث أن :

$B_{in} = 0$, $X = -1$ Then [$M = -H$]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

وعندما تكون المواد ذات توصيل فائق ($B_{in} = 0$) واعتمادا على المعادلة ($X_m = -1$) للمواد الدايامغناطيسية فان :

$$B_{ext} = -\mu_0 M \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (٤)$$

ان هذه العلاقة تبين ان شدة المغناطيسية تساوي وتعاكس المجال المغناطيسي الخارجي واعتمادا على هذه المعادلة يمكن تقسيم المواد الى نوعين (Type I , Type II) .

النوع الأول للمادة فائقة التوصيل Type I super conductor

في هذا النوع من المواد عندما تتجاوز قيمة المجال المغناطيسي المسلط المجال المغناطيسي الحرج فان المادة تتحول كليا إلى الحالة الاعتيادية وبذلك يتمكن المجال الخارجي من اختراق المادة وتصبح قيمة العزم المغناطيسي صفرا، أي أن $B_{int} = B_{ext}$ كما موضح في الشكل (٢–٣) .

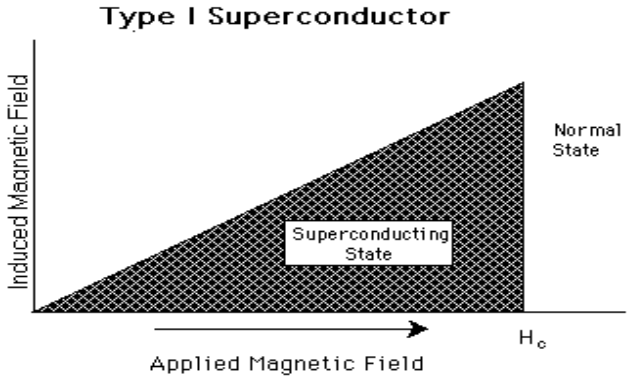


Fig. 10

الشكل (٢–٣) يبين العلاقة بين شدة المجال المغناطيسي الخارجي وبين المغناطيسية المحتثة.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

النوع الثاني من المواد الفائقة التوصيل Type II super conductor

إن هـــذا النـــوع مـــن المـــواد والمركبـــات الفائقـــة التوصـــيل الكهربـــائي (Super conductors) تخضع كليا إلى ظاهرة مازنر (Massner effect) إذ أن الفيض المغناطيسي يبدأ بالاختراق عند المجال المغناطيسي الحرج (B_{c1}) والذي هو اقل من المجال المغناطيسي (B_c) ولكن عند زيادة قيمة المجال المغناطيسي المسلط إلى (B_{c2}) أو أعلى من هذه القيمة فان المادة تبدأ بالتحول من حالة التوصيل الفائق (S.C) إلى الحالة الاعتيادية (N.C) وتسمى هذه الحالة التي تكون بها المادتين بين (B_{c1}) إلى (B_{c2}) بالحالة الدوامة (Vortex state) وعند زيادة المجال اكبر من (B_{c2}) يخترق المجـــال المغناطيســـي المـــادة وتتحـــول إلـــى الحالـــة الاعتياديـــة (Normal state) وكما موضحة في الشكل (٢-٤) .

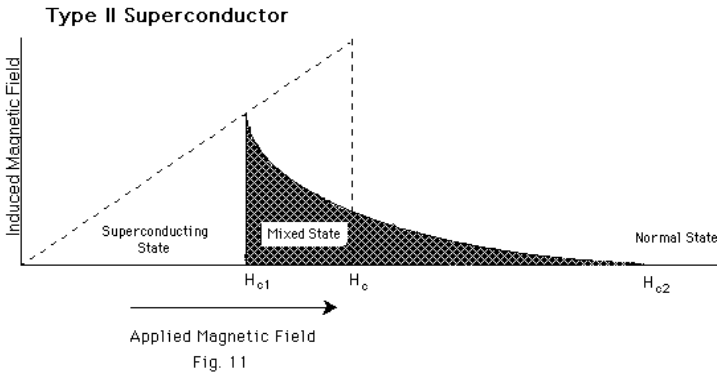


Fig. 11

عمق الاختراق (l) Penetration depth تتضمن ظاهرة مازنر :

بانعدام الفيض المغناطيسي (B) داخل جسم في حالة التوصيل الفائق عندما يتعرض لمجال مغناطيسي خارجي أو مجال مغناطيسي داخلي ناشئ عن مرور تيارات سطحية ولكن المشاهدات العلمية نصت أن المجال المغناطيسي الخارجي يستطيع

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

النفاذ داخل طبقة رقيقة جدا في القشرة الخارجية للجسم يعبر عن سمكها بما يسمى بثابت عمق الاختراق والذي يرمز له بالرمز (λ)

وقد وجد أن قيمة (B_{in})داخل الجسم يقل أسيا مع المسافة (x)على النحو التالي ($B_{in}=B_a\ e^{-x/\lambda}$) وبالتالي

فان الثابت (λ) يعبر عن سمك القشرة الخارجية التي يقل عندها الفيض الداخلي إلى مقدار يساوي (1/e) من الفيض الخارجي المؤثر على الجسم ونظرا لان (λ) صغيرة جدا تساوي تقريبا (1×10^{-8} m) فنجد أن الفيض ينعدم تقريبا عند مسافات صغيرة جدا . لذلك أشار مازنر إلى انعدام الفيض داخل الأجسام في الحالة (S.C) .

ظاهرتا الطفو والتعليق المغناطيسيتان

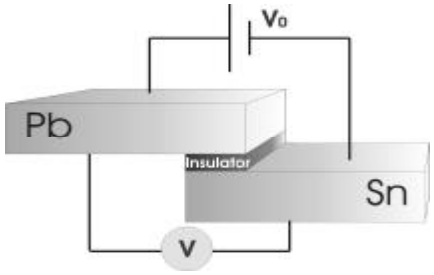
ظاهرة الطفو تحصل عندما يتم محاولة وضع قطعة مغناطيس في أعلى موصل فائق أو العكس. سوف يظل الجسم العلوي معلقاً في الهواء (طافياً) سواء كان المغناطيس أو الموصل نفسه. أنظر الشكل .

ظاهرة التعليق فيتم تقريب مغناطيس دائم من قطبه الجنوبي إلى الموصل أولاً مع إرغام الأخير على عدم الحركة. يؤدي ذلك إلى تمغنطه سلباً، ثم يتم إبعاد المغناطيس الدائم بسرعة معينة . أثناء ذلك تنعكس مغناطيسية الموصل الفائق (بسبب المجال المغناطيسي المحتبس حوله) فتنجذب لقطب المغناطيس الجنوبي. لقدأوقع المغناطيس الموصل في حباله أولاً ثم انسحب فلحق به الموصل راغباً في القرب منه،

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

إن وضع الموصل في هذه الحال مختلف تماماً عن قطعة مغناطيس بقرب مغناطيس آخر حيث يؤدي ذلك – كما هو معروف – إلى انجذاب بعضهما لبعض والتصاقهما أخيراً . أما في حالة الموصل والمغناطيس؛ فتقل القوة الجاذبة لدى الموصل كلما اقترب من المغناطيس وتزيد كلما ابتعد فيظل في مكان محدد لا يتعداه معلقاً في الهواء لا هو قادر على الاقتراب ولا على الفراق.

ظاهرة (أو وصلات) جوزيف صنJosephson Junctions



طلع علينا جوزيف صن بظاهرة صارت تعرف باسمه. لقد تنبأ هذا العالم أنه عندما يتم وضع موصلين فائقين بجانب بعضهما بحيث لا يفصل بينهما إلا شريحة رقيقة جداً من مادة عازلة؛ فإن بعض الأزواج الإلكترونية تستطيع التنفيق Tunneling من خلال تلك الشريحة غير الموصلة .وقد تم تأكيد تنبؤاته بعد فترة وجيزة من خلال التجربة.وبالطبع فهذه الظاهرة الكمية يمكن الاستفادة منها في عمل كثير من الدوائر الالكترونية السريعة جداً كما في الحاسبات الآلية وكذلك في صنع كواشف للمجالات المغناطيسية المتناهية في الصغر .

ظاهرة التكميم المغناطيسي

فكرة الظاهرة أنه إذا تم صنع موصل فائق على صورة حلقة (مهما كانت متناهية الصغر) يتولد التكميم عند تعرض الحلقة فائقة التوصيل إلى مجال يزيد قليلاً عن عدد صحيح من الكمات (بزيادة أقل من نصف كمة) ؛ فإن الزيادة ترفض

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ولا تمر من خلاله، في حين أنه لو تعرضت الحلقة ذات التوصيل الفائق لمجال يقل قليلاً عن عدد صحيح من الكمات بمقدار ضئيل (أقل من نصف كمة) فإنها تتكيف بحيث تكمل النقص من تلقاء نفسها من أجل أن تحافظ على العدد الصحيح من الكمات. أي لو مر مجال يساوي إلى مائة كمة مضافاً إليها ربع كمة فإن ذلك الربع يرفض ولا يمر من خلاله في حين لو كان بدل الربع نصف أو أكثر ولكن أقل من واحد صحيح؛ فإن الموصل يكمله إلى واحد صحيح، وهذا بالضرورة يقتضي أن التيار الذي يلف يزيد وينقص بمقدار ضئيل متجاوباً مع المجال الخارجي.

لقد تبين أن هذه الظاهرةذات أهمية بالغة جداً ، فهي مبدأ ما صار يعرف بمجس ألسكويد

Superconducting Quantum Interference Device(SQUID) .

عبارة عن جهاز حساس جداً للمجالات المغناطيسية وبإمكانه أن يميز التغير في المجال المغناطيسي ، بمعنى آخر يستطيع قياس مجال شدته تصل إلى :

$$1\times10^{-21}Tesla.m^2$$

والتي تساوي واحد من مليون من وحدة التكميم المغناطيسي نفسها.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

وهي حساسية مفرطة أكبر بكثير من الإشارات الصادرة عن المخ أو القلب أو سائر الجهاز العصبي في الكائن الحي.
ومجس ألسكويد ينقسم إلى نوعين أساسيين حيث:

يعتمد الأول منهما على التيار المستمر dc-SQUID

في حين يعتمد الآخر على التيار ذي التردد الراديوي.

والفكرة الأخيرة جعلت من المجس أهمية تطبيقية عالية، فهو لا يقيس المجال العام المتوافر، بل يقيس التغير في المجال مهما كان صغيراً .

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

نظرية الموصلات الفائقة

أن النظرية وضع أسسها ثلاثة من كبار العلماء وهم باردين وكوبر وشريفر J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer وعرفت باسمهم : نظرية باردين-كوبر-شريفر أو اختصاراً بـ BCS Theory ، .

من المعلوم أن نقل التيار في الموصلات يتم عادة :

بواسطة الإلكترونات الحرة، ومصدر المقاومة في الموصلات عادة هو من تصادم تلك الإلكترونات مع إلكترونات أخرى،

وأيضاً بالتفاعل مع ما يسمى بالفونونات وهي عبارة عن كمات الطاقة الاهتزازية في داخل الموصلات.

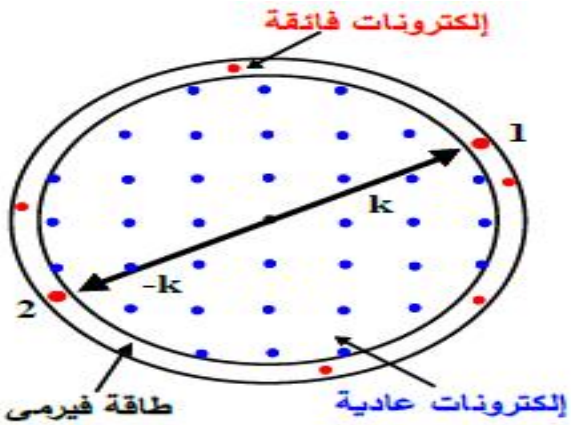
أهم أساس قامت عليه النظرية هو فكرة الأزواج الإلكترونية (Cooper Pairs) أو أزواج كوبر. ومن المعلوم أن الإلكترونات تحمل ذات الشحنة وبالتالي فحسب قانون كولوم يفترض أن تتنافر عن بعضها قدر المستطاع.

ولإلقاء الضوء على تركيب زوج كوبر

- نفترض معدن تقع إلكترونات التوصيل فيه داخل كرة فيرمى ،
- ,نفترض أن إلكترونين يقعان بالقرب من سطح فيرمى تماما الشكل(1 أ .) يحدث تنافر بين هذين الإلكترونين بسبب تشابه الشحنة وبالتالى وجود قوة كولوم .

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- وبسبب الحجب الذى تسببه الإلكترونات الاخرى الموجودة بين هذين الإلكترونين فإن قوة تنافر كولوم يمكن أن تتناقص،
- وعند أخذ هذا الحجب في الاعتبار فإن قوة التنافر بين الإلكترونين تختفي تماما بالرغم من صغر حجم كرة فيرمى.



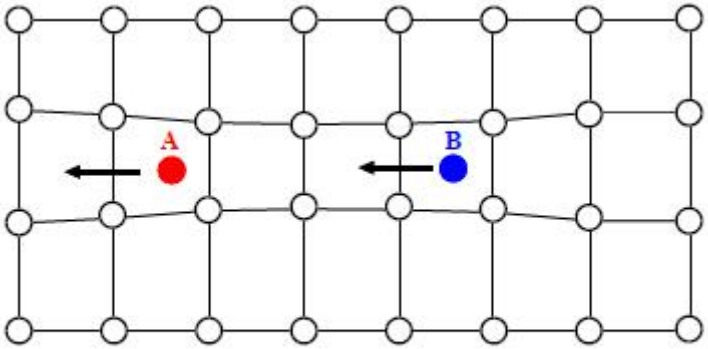
(أ)

الشكل 1(أ) التفاعل بين الإلكترونين الموجودان

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

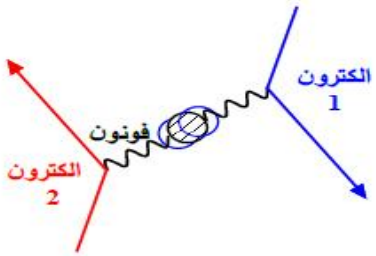
أفترض العالم كوبر أن الإلكترونين في زوج كوبر يكونان حالة ارتباط فيما بينهما وهذا الارتباط يكون منهما نظاما واحدا وبالتالى ترتبط حركة أحدهما بالأخر ويتفكك زوج كوبر فقط عندما يأخذ النظام كمية طاقة تساوى طاقة الربط بين الإلكترونين.

فسر كوبر منشأ قوة الترابط في زوج الإلكترونات على أساس وجود قوة جذب ولفترة وجيزة وتؤثر في إهتزاز الأيون الموجب الذى يمر بالقرب منه الإلكترون ويجذبه نحوه الشكل (19ب) وبالتالى ينتج تجمع(إستقطاب)للأيونات الموجبة بالقرب من الإلكترون المار وهذا الاستقطاب يسبب ظهور جذب إضافي بين الإلكترون والإلكترون الآخر وبالتالى يتولد زوج كوبر، كما هو مبين في الشكل (٢).



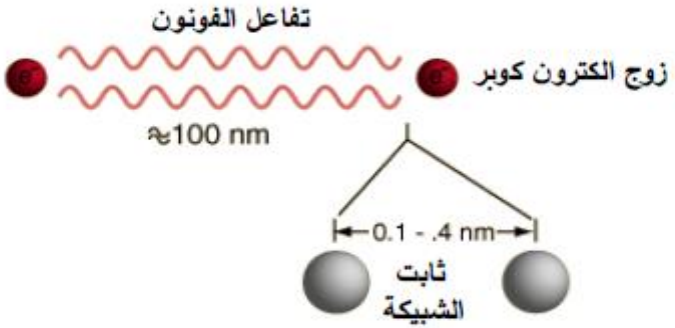
الشكل 2 حركة زوج كوبر.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



تسمى قوة الارتباط بين إلكترونى زوج كوبر بتفاعل الفونون وتكون طاقة الإرتباط في الزوج أكثر قوة عندما تكون عزوم و لف الإلكترونين متعاكسة،بمعنى $k\uparrow$ و $-k\downarrow\uparrow$ .. بناء على ذلك يمكن القول أن كل الإلكترونات الموجودة بالقرب من سطح فيرمى تتكثف في الحالة الأرضية وتكون أنظمة من أزواج كوبر وبذلك يعمل الزوج عمل البوزونات يبين الشكل هذا المفهوم.

ويوضح الشكل (٣) أيضا كيف أن أزواج كوبر ترتبط معا على مسافة مئات النانومتر أى على مسافة أكبر من ثابت الخلية بألف مرة ويكون سلوكها مثل سلوك البوزونات (bosons) وتتكثف في الحالة الأرضية .في ضوء نظرية كوبر يمكن القول أن المعدن يتحول من الحالة العادية إلى الحالة الفائقة على هيئة تكثيف للإلكترونات في الحالة الأرضية، أى التى يكونوا فيها أسفل فجوة الطاقة.



الشكل 3 التفاعل البينى في زوج كوبر ومقارنة مسافة الارتباط مع ثابت الشبيكة.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

نظراً لاختلاف اتجاه اللف لإلكترونى كوبر وحيث أن كمية تحرك كليهما متساوية في المقدار ومضادة في الاتجاه فإن كمية التحرك الكلية لزوج كوبر تساوى الصفر ويكون اللف الكلى للزوج يساوى صفر أيضا وبذلك يعرف الزوج بالبوزونات وليس كالإلكترونات العادية التى يكون لها لف $\pm 1/2$ والتى تعمل كفرميونات .
يجب ملاحظة أن زوج كوبر لا يحدث له تشتت كما يحدث للإلكترونات العادية وذلك لأنه إذا أثرت الشبيكة على أحد الإلكترونات وتغيرت كمية تحركه بمقدار معين فإن الشبيكة ذاتها تغير كمية تحرك الإلكترون الآخر في الاتجاه المعاكس بنفس المقدار، أى أن التغير الكلى لكمية تحرك الزوج تكون صفرا، كما يوضح الشكل (4) .

الشكل 4 ارتباط وتحرك زوج كوبر في الشبيكة.

ومما سبق نستخلص، أنه ليس للشبيكة أى تأثير على زوج كوبر وبذلك يكون حر الحركة تماما ولا يعانى أى مقاومة عند تحركه في الموصل الفائق

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

.يمكن تخيل حركة الإلكترونات الفائقة مثل حركة متسلقوا الجبال الذين يربطان بعضهم ببعض بحبل، فإذا ترك أحد الإلكترونات موضعه بسبب فوضى المنطقة الناتجة عن اضطراب ذرات الشبيكة فإن جيرانه ستجذبه ليعود إلى مكانه .تجعل هذه الخاصية منظومة أزواج كوبر ذات قابلية صغيرة للتشتت (وربما تنعدم) وتبعا لذلك تكون مقاومته معدومة، بحيث إذا تحرك الأزواج تحت تأثير قوة خارجية سوف يستمر سريان التيار في الموصل الفائق إلى مالا نهاية حتى يتوقف العامل المسبب له (التبريد حتى الدرجة الحرجة) .

ومن جراء فكرة الأزواج الإلكترونية يمكن أن تنقسم الإلكترونات إلى جزء فائق وآخر عادي حيث يقوم الأول بجميع الأعباء الكهربائية ويمنح الموصل جميع الصفات. وتتكون فجوة في طاقة الموصل بين الحالات الحاوية للأزواج وتلك الحاوية للإلكترونات العادية. وهذه الطاقة تمثل الطاقة اللازمة لكسر الرابطة بين الزوجين الإلكترونيين. وتتنبأ نظرية BCSبالعلاقة التالية التي تربط بين طاقة الفجوة وبين درجة التحول للموصل:

$$E_g = 3.53kT_C$$

حيث k ثابت بولتزمان. إن هذه العلاقة من أهم ما جاءتنا به النظرية. إنها تنص على أن طاقة الفجوة مرتبطة مباشرة بدرجة التحول. بمعنى آخر فإنه لكي نحصل على مواد فائقة التوصيل ذات تحول عال فعلينا أن نوفر موصلات بطاقات فجوة كبيرة. وقد اتفقت تلك المعادلة مع النتائج التجريبية للمواد الموصلة الفائقة التقليدية.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

بعض تطبيقات المواد فائقة التوصيل

المواصلات

وفي القطارات على وجه الخصوص يمكن الاستفادة من ظاهرة الطفو المغناطيسي أو التعليق .

أن توفر قطارات معلقة في الهواء وبالتالي فهي تسير بدون احتكاك مما يعطيتوفيراً هائلاً في الطاقة من جهة ويوفر سرعات كبيرة إلى جانب التخلص من الضوضاء فتكون مريحة جداً وخالية من المطبات لأنها تسير على وسادة هوائية. في اليابان تم تجريب هذه الفكرة عملياً شكل ٧،

حيث يرتفع القطار حوالي عشرة سنتيمترات عن المسار .والقطار يحوي المواد فائقة التوصيل في حين تتوفر المغناطيس الكبيرة على الطريق .وفي داخل القطار يتوفر جهاز تبريد وهذا كل ما يلزم حيث يستفاد من قوة التنافر مع المغناطيس نفسها في دفع القطار وتسييره بسرعات تزيد على ٥٠٠ كم في الساعة.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

التطبيقات العسكرية

إن قدرة الموصلات الفائقة على طرد المجالات المغناطيسية جعلت منها مرشحة لاستعمالها في الرادارات العسكرية. فمن المعلوم أن دقة الصور التي يوفرها الرادار تعتمد على قدرته على التحليل غير أن تلك القدرة تتأثر سلباً بالمجالات المغناطيسية المجاورة سواء الأرضية أو غيرها ، إن الصورة سوف تصاب بالتشويش والسبب هوتداخل تأثير المجالات المغناطيسية المجاورة والتي أثرت على حركة الإلكترونات المهبطية التي هي المسؤولة عن الصورة وقد تم الاقتراح باستعمال الدروع المغناطيسية لحل هذه المشكلة .والدروع المشار إليها عبارة عن اسطوانات ذات مقاسات مختلفة مصنوعة من المواد فائقة التوصيل، يوضع بداخلها مصدر الإلكترونات المهبطية فيحميها من المجالات الخارجية ويجعل الصورة الرادارية غاية في الوضوح

وأيضاً فمن التطبيقات العسكرية استخدام كاشف السكويد للكشف عن أدق الأعطال المتمثلة في الشقوق والشروخ في أجسام الطائرات العسكرية والمدنية على حد سواء. والطريقة تسمى بأسلوب الفحوصات اللا اتلافية (Non Destructive Testing NDT) وللكاشف القدرة التامة للكشف عن عيوب فنية أو شروخ في داخل أجسام الطائرات ولو كانت متوغلة في عمق يزيد كثيراً عن عشرة سنتيمترات.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

التطبيقات الطبية

يمكن الاستفادة من نفس الدروع التي سبقت الإشارة إليها في تطبيقات طبية كثيرة. وبصورة عامة فإنه عندما يراد دراسة الإشارات الكهربائية والمغناطيسية الصغيرة جداً المتولدة من المخ أو القلب أو الجهاز العصبي، فإنه يفضل توفير جو خال من المجالات المغناطيسية الخارجية التي تكون عادة أكبر كثيراً من تلك الإشارات. وقد تم الاستفادة بنجاح في بعض المناطق كما في اليابان من خاصية الدروع المغناطيسية مما وفر قدرات فائقة على قراءة الإشارات الصغيرة المشار إليها مما يوفر مزيداً من التشخيص لتلك الأعضاء الحساسة من جسم الكائن الحي

كما ويتم الاستفادة من قدرة كاشف السكويد الهائلة لقراءة تغيرات المجال المغناطيسي المتناهية في الصغر مع استخدام الدروع المغناطيسية، نكون بذلكوفرنا جهازاً متكاملاً يمكن أن يحل محل الأجهزة المستخدمة حالياً ويفوقها من حيث الدقة. وقد تم بالفعل استخدام الكاشف عندما وضعت مجوعة كبيرة منها بشكل نصف كروي تغلف رأس المريض. وصل عددها السكويدات في المجوعة الواحدة إلى ٦٤ في بعض التجارب.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Band theory of solids نظرية الأنطقة للمواد الصلبة

نظرية الأنطقة للمواد الصلبة

تم دراسة حركة الالكترونات في المواد الصلبة باستخدام نموذج الإلكترون الحر المكمى ،وهو نموذج مبسط جدا لإهماله جهد البلورة **Crystal Potential** أي إهمال التفاعل بين الكترونات التوصيل والشبيكة الدورية للبلورة، إن مبدأ تأثير جهد البلورة الدوري على الالكترونات يعني تفاعل الموجات المرافقة لالكترونات التوصيل مع لباب أيونات البلورة ،

إن الالكترونات في البلورات ترتب أنفسها ضمن أنطقه أو حزم تسمى أنطفة الطاقة **Energy Bands** ،إن هذه الأنطقة تكون مفصولة بعضها عن بعض بمناطق طاقة محرمة **Forbidden Energy Gaps** تمنع الالكترونات من احتلالها أو الوجود فيها وتسمى فسح الطاقة أو فجواتها

.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

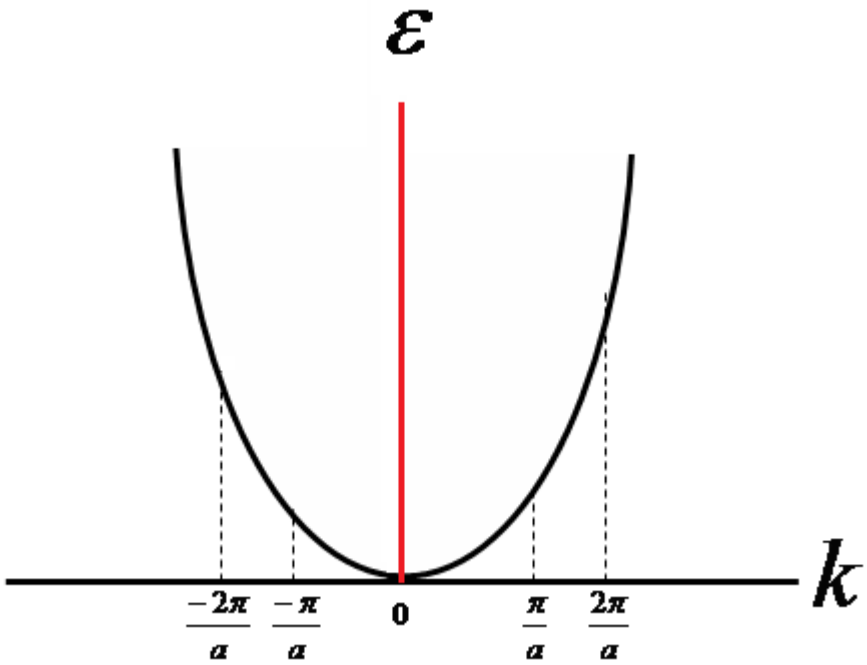
نموذج الإلكترون الحر لمادة صلبة

قد يكون مفيدا أن نستذكر الآن بعض ما درستاه في الفصل السابق عن الإلكترون الحر،عند إهمال تأثير الجهد الدوري للباب الأيونات الموجبة على الكترونات النطاق (معدل الطاقة الكامنة يساوي صفرا)،فأن الطاقة الكلية تكون مساوية للطاقة الحركية:

$$e_i = \frac{p^2}{2m} = \frac{\mathbf{h}^2 k^2}{2m} \quad \text{..... (1)}$$

حيث (p)زخم الإلكترون .

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



يوضح الشكل (1) طاقة الإلكترون الحر بوصفها دالة لمتجه موجته $\left(\vec{k}\right)$،

في نموذج الإلكترون الحر تكون جميع قيم $\left(\vec{k}\right)$ مسموحا بها وهكذا تتوزع قيم الطاقة من الصفر إلى اللانهاية وهذا يعني أن نموذج الإلكترون الحر لا يقدم لنا أية معلومات عن عرض نطاق الطاقة.فإذا كان المعدن عند درجة حرارة الصفر المطلق عند الحالة الأرضية (حالة الأساس)فعند ذلك تشغل جميع الالكترونات أوطأ المستويات الممكنة للطاقة بحيث يكون ذلك منسجما مع مبدأ پاولي للاستثناء،أما إذا كان العدد الكلي لالكترونات أقل من العدد الكلي لمستويات الطاقة المتاحة في النطاق فأن الالكترونات تشغل جميع حالات الطاقة صعودا إلى أعظم قيمة للطاقة (e_f) وهي طاقة فيرمي ،فعندما

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

تكون طاقة فيرمي مساوية ألى عرض النطاق فأن النطاق يكون مشغولا تماما .أما إذا كان نطاق الطاقة غير مملوء تماما فهذا يثير تساؤل .كيف يكون عرض النطاق؟.

كما أن الالكترونات الحرة عند مستوي فيرمي تكون في حالات طاقية ذات أطوال موجية مقاربة لفسح الشبيكة .ان هذا يعني وجوب حدوث ظواهر حيود قوية قد تفسد أو تبطل نهائيا نموذج الإلكترون الحر.

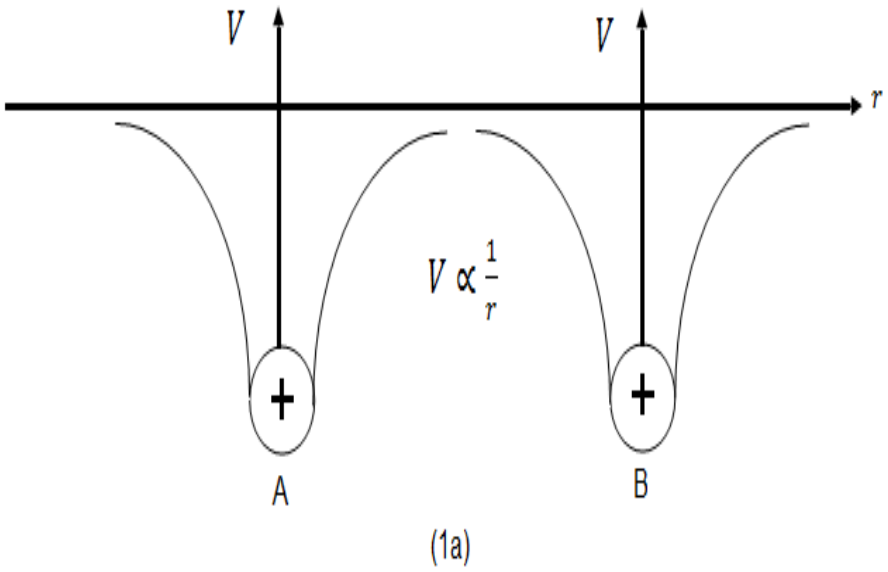
يعد حيود (انعكاس) براك إحدى الصفات الأساسية المميزة للانتشار ألموجي في البلورات .إن ذلك ينطبق على موجة الكترونية كما هو الحال عند انتشار موجة أشعة سينية أو موجة نيوترونية في بلورة .إن حدوث انعكاس براك لموجات الكترونية في بلورة قد يؤدي إلى حتمية وجود فسح للطاقة وهي مناطق طاقة حقيقية ولكن ليست لها حلول شبه موجية بموجب معادلة شرودنكر .ولهذا السبب تعد فسح الطاقة هذه ذات أهمية حاسمة في تحديد كون صلب ما مادة موصلة أم عازلة.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

مستويات الطاقة وحزم الطاقة

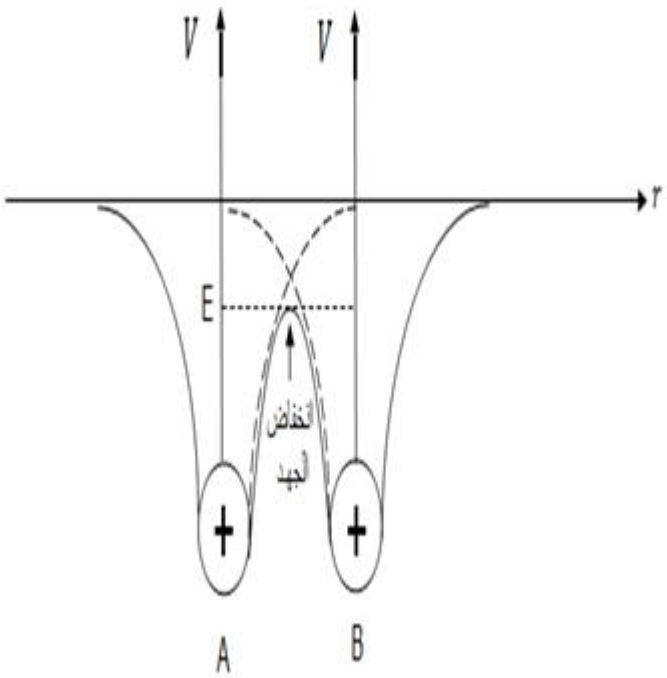
من المعروف ان الالكترونات في حركتها في الذرة تستقر في أغلفة حول النواة في مجموعات أو مستويات ذات طاقة محددة ، تقل ارتباطها في النواة كلما بعدت مستويات وجودها عن مركز النواة وبذلك يسهل انطلاقها بحرية بمجال نفوذها.

وفي حالة ذرة منفردة،فان الالكترون يتحرك حول النواة ويكون تحت تأثير جاذبية النواة فإذا كان لهذا الالكترون ان يتحرر من جذب النواة فعليه أن يعبر حاجز الجهد ،وهذا الجهد يتناسب عكسيا مع المسافة من النواة $\left(V \propto \frac{1}{r}\right)$ وهكذا يبدو منحني الجهد وكما هو واضح في الشكل (1a) .



(1a)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



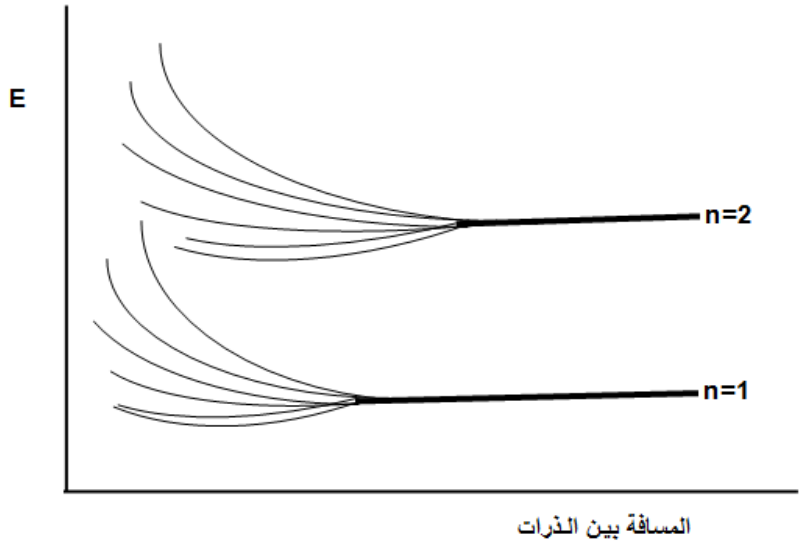
(1b)

والآن اذا الذرتان A و B جعلناهما تقتربان الواحدة من الاخرى فأنه كلما ازداد التقارب بينهما أصبحت قوة التجاذب بين النواة الواحدة والالكترونات الاخرى أشد وينجم عن ذلك انخفاض حاجز الجهد في المجال بين الذرتين وكما يبدو ذلك في الشكل (1b)، في حين يبقى حاجز الجهد عاليا في الطرف الآخر من الذرتين. ان زيادة التقارب بين الذرتين يؤدي الى تداخل أغلفتهما وبهذا ينخفض حاجز الجهد بينهما الى الحد الذي يصبح فيه مستوي الطاقة E المبين في الشكل (1b)موحدا لكل من الذرتين.

فإذا كان لكل مستوى الكترون واحد فان تداخل المستويين ينجم عن مستوى الموحد للذرتين سيضم الكترونين وعندئذ يتعذر التمييز بين الكترون الذرة A و الذرة B،ان احتواء المستوي لإلكترون واحد لا يتعارض مع قاعدة الاستبعاد لباولي شرط ان يكون الالكترونين دوران برمي متعاكس$\left(S=\pm\frac{1}{2}\right)$.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

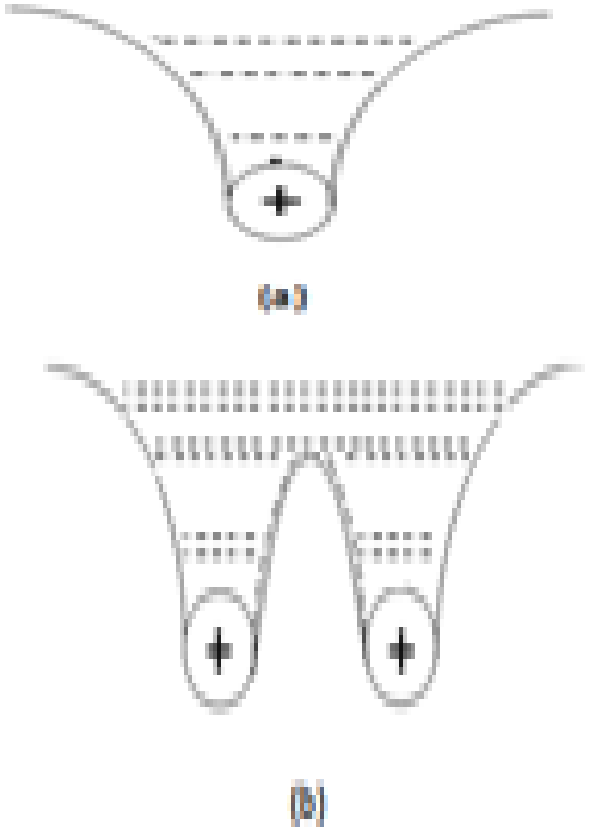
ولكن الصورة تختلف اذا كان مستوى الذرة المنفردة في الاصل يحتوي على الكترونين فعند تداخل الاغلفة للذرتين يصبح لدينا اربعة الكترونات في المستوي نفسه وعند تداخل الاغلفة لثلاثة ذرات يصبح لدينا ستة الكترونات في المستوي نفسه وعند تداخل الاغلفة لأربعة ذرات يصبح لدينا ثمانية الكترونات في المستوي نفسه وهذا يتناقض مع قاعدة الاستبعاد لباولي ولهذا يتحتم عندئذ انشطار المستوى n=1 الى مستويين متقاربين في الحالة الأولى و الى ثلاثة مستويات في الحالة الثانية والى أربعة مستويات متقاربة في الحالة الثالثة وهكذا بحيث ان كل مستوى فيه الكترونان.



شكل(2):انشطار المستويات عند تقارب الذرات.

ويمكن تعميم هذا المبدأ عند تداخل N من الذرات في مادة فأن كل مستوى ينشطر الى N من المستويات ولكل مستوي الكترونان ،ان المستوى يتحول الى حزمة او نطاق من المستويات Level Band ولها طاقة حزمة Energy Band تقاس بالإلكترون فولت شكل (2).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

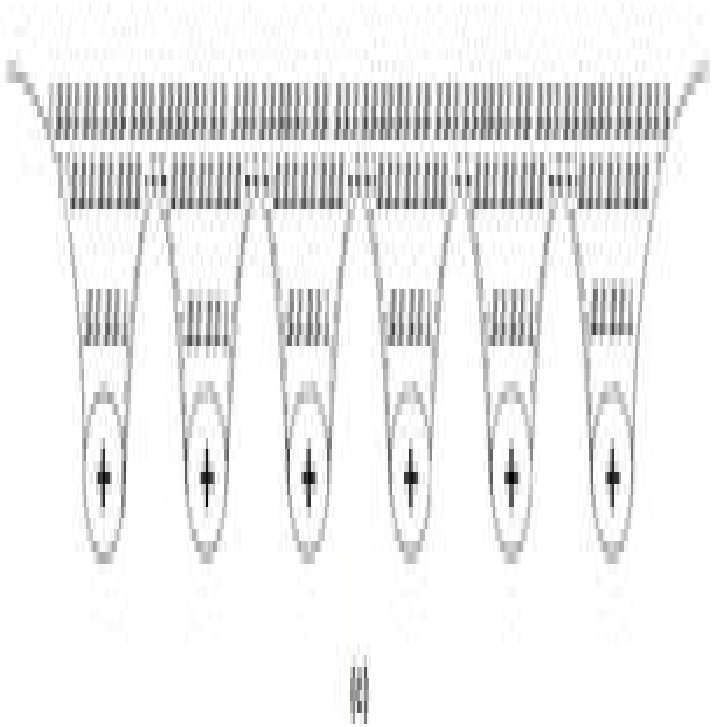


فمن أجل توضيح ذلك لنأخذ فلز الليثيوم Li^3 مثالا حيث تحتوي ذرة الليثيوم على ثلاثة الكترونات موزعة على الاغلفة الثانوية $1S^2\ 2S^1$ ،وعند حل معادلة شرودنكر نحصل على مستويات طاقة منفصلة لذرة الليثيوم ويرمز لها 1S 2S 2P وكما هو مبين في الشكل (3a)،

واذا أخذنا ذرتين من الليثيوم وجعلناهما يقتربان الواحدة من الاخرى لتكوين جزيئة الليثيوم Li_2 ،فاذا الغلاف الموحد للذرتين يضم اكثر من الكترونين لهما دوران برمي متعاكس $\left(S = \pm\frac{1}{2}\right)$ ،وعليه ينشطر الغلاف الموحد الى مستويين فرعيين للطاقة وكما هو مبين في الشكل (3b). يعتمد مقدار الانشطار في كل مستوى طاقة (للغلاف الموحد) اساسا على المسافة بين نواتي الذرتين المكونتين للجزيئة وعلى الغلاف الذري. فمثلا يكون الانشطار في الغلاف الثانوي 1S اوطأ من ذلك الانشطار للغلاف الثانوي 2S .ان تفسير ذلك ان نصف قطر الغلاف الثانوي1S يكون صغيرا جدا ، أي يكون الالكترون في هذا الغلاف مقيدا بقوة الى نواة ذرته ولا يتأثر كثيرا بالمجال الناشئ عن اقتراب ذرة من ذرة اخرى.

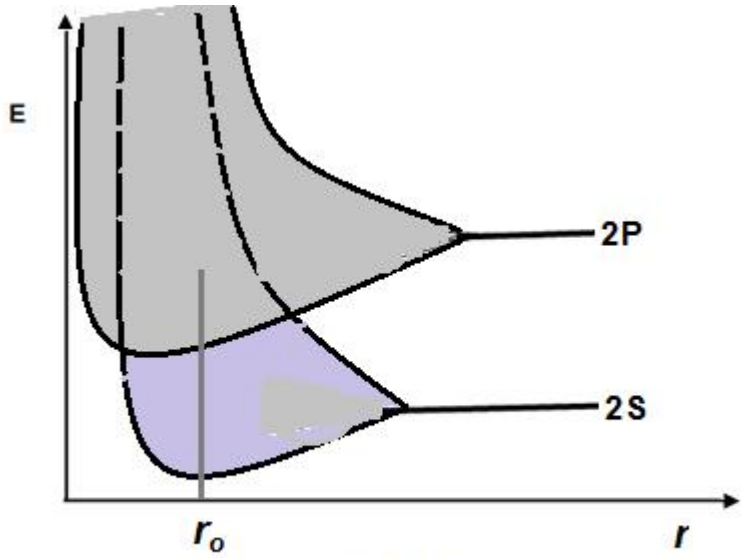
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ويمكن تعميم الاعتبارات المذكورة اعلاه لجزيئة Li المتعددة الذرات.فلجزيئة الليثيوم ذات الذرات الثلاثة ينشطر كل غلاف الى ثلاثة مستويات بينما ينشطر كل غلاف في جزيئة ذات أربع ذرات الى مجموعة رباعية.وهكذا يمكن اعتبار الليثيوم الصلب حالة نهائية عندها يصبح عدد الذرات كبيرا جدا وينتج عنها بلورة صلبة.



وبموجب ما تقدم تنشطر الاغلفة الموحدة الى N من المستويات الثانوية المتقاربة بعضها مع بعض حيث N تمثل عدد الذرات التي تضمها المادة الصلبة.ولما كان عدد الذرات N في المادة الصلبة كبيرا جدا (حوالي 10^{23} ذرة لكل مول) كانت المستويات الثانوية متقاربة جدا بعضها من بعض حيث يمكنها ان تتداخل بعضها ببعض لتشكل ما يسمى حزمة طاقة Energy Band ،وعلى هذا الاساس تكون كل من الاغلفة الثانوية 1S 2S 2P حزم طاقة 1S 2S 2P على التعاقب كما في الشكل (3c).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



الشكل(4) :اتساع المستويات 2S و2P لتكوين حزمة طاقة في البلورات.

ان الفلزات في طبيعة بنيتها البلورية يحتم تقارب ذراتها من بعضها البعض بحيث لا يمكن اعتبار ذراتها معزولة عن بعضها البعض لتكون كل ذرة تؤثر بمجالها على جارتها وهذا التأثير في الحقيقة يكون متبادل فيما بينها.فبدلا من أن تحتل مستويات الطاقة المختلفة في الذرة حدودا ضيقة في حالة الذرة المعزولة نجد أن هذه الحدود أو المستويات تتوسع في حدودها كلما اقتربت ذرتان من بعضها البعض فتأخذ شكل حزم من مستويات عديدة الطاقة ، وهذه الحزم تشتد في توسعها بصفة خاصة في مستويات الاغلفة الخارجية وكما هو مبين في الشكل (4) .

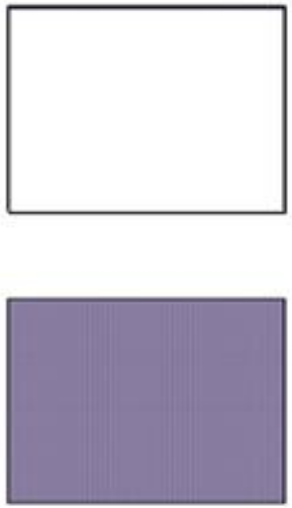
هذا التوسع يتوقف على المسافة الذرية(r) ،فإذا كانت هذه المسافات صغيرة اشتد التوسع في كل مستوى حتى تتداخل الحزم الناتجة عنها ،بينما لو كانت المسافات كبيرة بقى التوسع في حدود ضيقة فلا يحدث التداخل بل تبقى فجوات Gaps بينها.في بعض الفلزات يكون رص الذرات فيها بدرجة كبيرة تجعل من الحزم المتكونة تقترب من بعضها البعض فتتضاءل الفجوات وقد يحدث تداخل بين الحزم ،وفي هذه الحالة لا يبذل الغاز الالكتروني اي مجهود لإيجاد مسارات له اذ ان الحزمة الثانية متصلة وتندرج مستويات طاقتها مع مستويات الحزمة الاولى وبالتالي يتصف الفلز بأنه جيد التوصيل الكهربائي.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

الموصلات و العوازل و أشباه الموصلات :

إن الفرق بين الموصلات وأشباه الموصلات والعوازل يمكن التعرف عليها من نموذج حزم الطاقة الذي يعد ذو فائدة كبيرة في تحديد الخواص الكهربائية لأي مادة صلبة .

العوازل Insulators :



(6a)

تتصرف البلورة الصلبة بوصفها بلورة مادة عازلة اذا كانت انطقة الطاقة المسموح بها للالكترونات مملوءة تماما أو فارغة تماما. في الحالة الارضية يوجد نطاق طاقة مملوء تماما يعرف بنطاق التكافؤ وفوقه فجوة طاقة محرمة شكل (6a) ،ومن اجل احداث تيار كهربائي يجب تسليط مجال كهربائي لإثارة بعض الالكترونات الى نطاق أعلى يعرف بنطاق التوصيل يحتوي على حالات طاقية يكون عندها الإلكترون حر فيمكنه حمل التيار الكهربائي. وبسبب وجود فجوة الطاقة المحرمة ذات قيمة كبيرة لابد من توفر طاقة اثارة كافية لرفع الالكترونات عاليا فوق تلك الفجوة الى نطاق الطاقة التالي.ان طاقة الاثارة المحدودة لا يمكن تجهيزها بواسطة مجال كهربائي ثابت وصغير لذلك تنعدم حركة الالكترونات في مجال كهربائي وتوصف المادة عندئذ بالمادة العازلة .

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

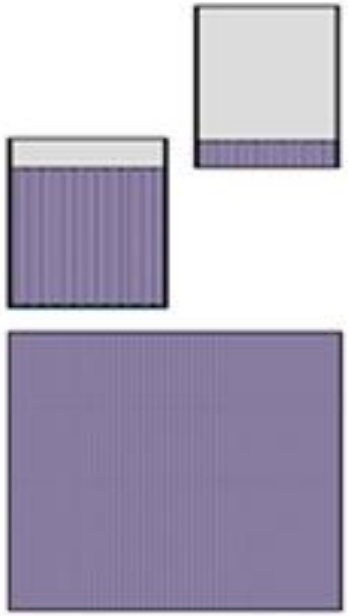
أشباه الموصلات Semiconductors:

(6b)

عندما تكون فجوة الطاقة الفاصلة بين نطاق التوصيل ونطاق التكافؤ صغيرة شكل (6b)عند درجة حرارة T،فان هنالك كثافة صغيرة من الالكترونات المتهيجة في نطاق التوصيل بحيث يمكن لهذه الالكترونات حمل التيار الكهربائي بسهولة،ويلاحظ ان التوصيلية الكهربائية لهذه المادة تزداد سريعا عند درجات الحرارة العالية ،وتكون جميع انطقة الطاقة مملوءة تماما باستثناء حالة واحدة او حالتين ضمن النطاق يكاد يكون مملوء او يكاد يكون فارغا.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

أشباه المعادن Semimetals:

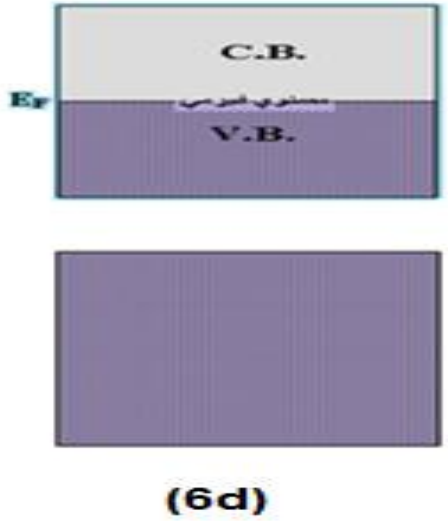


(6c)

تكون جميع انطقة الطاقة مملوءة تماما باستثناء حالة واحدة او حالتين ضمن النطاق يكاد يكون مملوء او يكاد يكون فارغا عند درجة الصفر المطلق ، وتكون فجوة الطاقة الفاصلة بين نطاق التوصيل ونطاق التكافؤ صغيرة شكل (6c). و عند درجة الصفر المطلق توجد الالكترونات في نطاق التوصيل بحيث يمكنها حمل التيار الكهربائي بسهولة.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

الموصلات Conductors:



(6d)

اذا كان نطاق التوصيل مملوء جزيئيا ويحتوي على حالات الكترونية فوق نطاق التكافؤ مباشرة شكل (6d)،يمكنها حمل التيار الكهربائي ولذلك تكون التوصيلية الكهربائية كبيرة ولا تعتمد على درجة حرارة المادة الصلبة ،باستثناء اسهام درجة حرارة في التحكم في بالميكانيكية التي بواسطتها تستطير الالكترونات.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

نموذج الإلكترون شبه الحر لمادة صلبة

يوصف تركيب أنطقه الطاقة في بلورة غالبا باستخدام نموذج الإلكترون شبه الحر Nearly (Free –Electron Model) .إن هذا النموذج يجيب على معظم الأسئلة حول سلوك الالكترونات في المعادن على الرغم من أن هنالك حالات يكون فيها نموذج الإلكترون شبه الحر غير قابل للتطبيق.

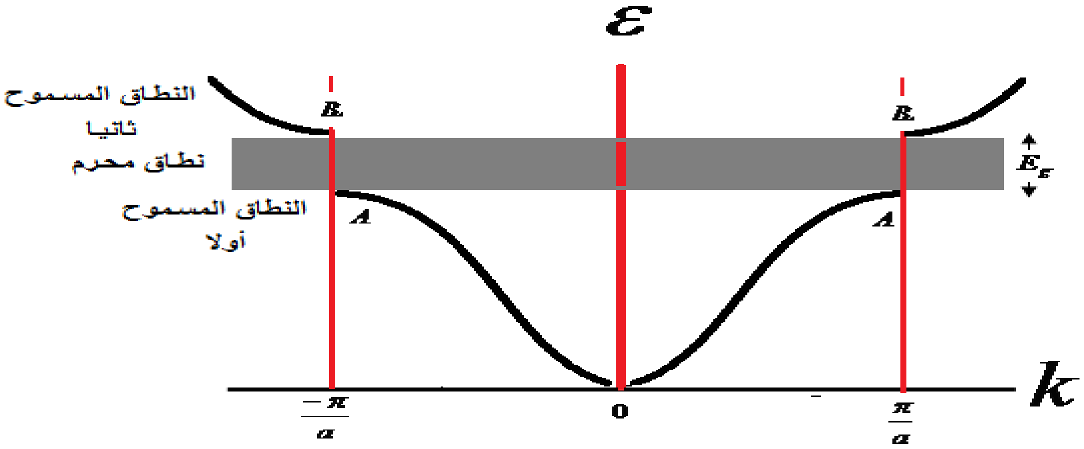
يفترض نموذج الإلكترون شبه الحر لحالات إلكترون في صلب حدوث قليل من التشويش Perturbation في طيف الحالات الالكترونية لإلكترون حر تماما. يعزى هذا التشويش الضعيف إلى الجهد الدوري للباب الأيونات الموجبة والتراكب القوي (جدير بالاعتبار)بين الذرات المتجاورة الذي يفرض بالقوة كنتيجة لصغر الفسح التي تفصل بين الذرات .والتفسير الأولي لهذه الفرضيات بالنسبة إلى غاز الكتروني في معدن ،على اعتبار أن اللباب الذرية هي مناطق ذات طاقة كامنة سالبة مقارنة بالطاقة الكامنة الالكترونية للمناطق التي تفصل تلك اللباب.ووفقا إلى قانون حفظ الطاقة الكلية يجب أن يتحرك إلكترون ما بسرعة اكبر مما هي عليه (يمتلك طاقة حركية كبيرة)عندما يمر من خلال منطقة اللب الذري .

إن الطاقة الكلية لإلكترون بموجب نموذج الإلكترون شبه الحر ليست حركية تماما.كما هو الحال لإلكترون حر تماما .بسبب الطاقة الكامنة لايونات الشبيكة،إن النتيجة المهمة هي أن الطاقة الحركية

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

لإلكترون شبه حر تعاني من انقطاع كما في الشكل ادناه أي حدوث فجوة عند قيم محددة لمتجه الموجة $(\vec{k})$ لشبيكة خطية ثابتها (a) كالآتي:

$$k = \pm \frac{j p}{a},\ j = 1,2,3\ldots.. \qquad (2)$$



بينما لا يعاني منحني الطاقة الحركية لإلكترون حر تماما مثل هذه الانقطاعات.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

الذي يوضح تغير الطاقة الحركية (e)بوصفها دالة لمتجه الموجة $\left(\vec{k}\right)$ لإلكترون شبه حر في شبيكة خطية أحادية الذرات ثابت فسحها البينية (a)ويظهر تأثير الشبيكة على حركة الإلكترون وذلك بتوليد فسحة طاقة (E_g)حيث يقتصر ذلك فقط عندما تقترب $\left(\vec{k}\right)$ من $\left(\pm\frac{p}{a}\right)$ أو مضاعفاتها الصحيحة $\left(\pm j\frac{p}{a}\right)$حيث يكون تشويش الشبيكة على الإلكترون عند نهايته العظمى ومن ناحية أخرى تتحرك

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

الالكترونات بحرية تامة خلال الشبيكة عند قيم اصغر من $\left(+j\frac{p}{a}\right)$واكبر من $\left(-j\frac{p}{a}\right)$ لانعدام التشويش أو مقاومة الشبيكة.

انعكاس براك ومنشأ فسحة الطاقة

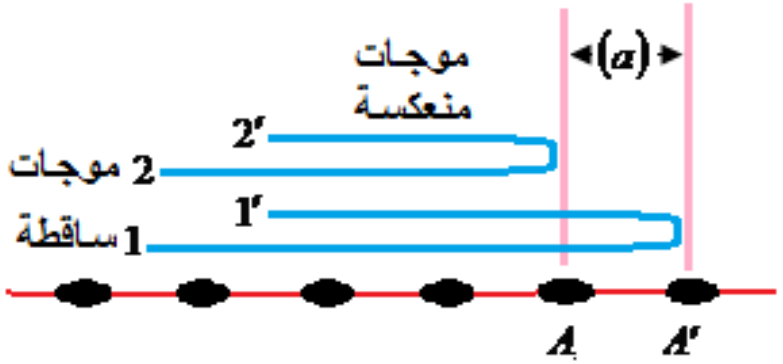
يمكن اعتبار حركة الالكترونات شبه الحرة في شبيكة خطية ثابتها(a)وعند حافات فسح الطاقة $\left(k=\pm\frac{jp}{a}\right)$مشابها لاستطارة الموجة الكهرومغناطيسية بوساطة الذرات في الشبيكة ،حيث تنشأ تقوية الموجات المستطيرة عندما يتحقق شرط براك للحيد القوي :

$$n\,l = 2\,a\;\;Sin \qquad \text{.....(3)}$$

حيث (a) تمثل البعد البيني بين السطوح و(q)تمثل الزاوية التي يصنعها اتجاه انتشار الموجة مع سطوح الشبيكة و(n)يمثل أي عدد صحيح .وعند انتشار الموجة مع سطوح الشبيكة بعد سقوطها

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

عموديا أي $(q = 90^{o})$ لذلك يصبح شرط براك $(n l = 2a)$، فمثلا عند انعكاس الموجات $(2,1)$ عند ذرات (أيونات) متعاقبة مثل A', A كما في الشكل (3) .



فأن فرق المسار بين الموجات المنعكسة يساوي $(2a)$ وفرق الطور بينهما يساوي $\left(2p\,\frac{2a}{l}\right)$. إن أعظم تداخل تقوية بين الموجات المنعكسة $(2',1')$ تحدث فقط عندما يكون فرق الطور بينهما مساويا $(\pm 2np)$ أو $(\pm 2jp)$ أي عندما :

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$\pm 2jp = 2p\frac{2a}{l}$$

$$\pm jl = 2a \quad \text{..... (4)}$$

أي يتحقق قانون براك ،ولما كانت $\left(l=\frac{2p}{k}\right)$كان $\left(k=\pm j\frac{p}{a}\right)$وهذا يتفق مع المعادلة (2).نستنتج مما تقدم انه عند قيم $\left(k=\pm j\frac{p}{a}\right)$تعاق حركة الالكترونات باتجاه معين حيث تجبر على الحركة بالاتجاه المعاكس نتيجة تعرضها لانعكاس براك ويتكرر عكس اتجاه الانتشار كلما تكرر انعكاس براك .ان ذلك يعني ان الدالات الالكترونية عند حافة أية فسحة للطاقة تكون موجات واقفة وليست منتقلة لأنها تحقق شرط براك للحيد القوي الذي يمكن التعبير عنه بدلالة متجه الموجة $\left(\vec{k}\right)$ومتجه الشبيكة المقلوبة $\left(\vec{G}\right)$كالآتي:

$$2\vec{k}\cdot\vec{G}+G^2=0 \quad \text{..... (5)}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

فضلا عن الصيغة المكتوبة في المعادلة (3)والمكافئة لها ،ولما كان متجه الشبيكة المقلوبة $\left(\vec{G}\right)$ لشبيكة خطية (ذات بعد واحد) ثابتها (a)يساوي $\left(j\frac{2p}{a}\right)$كان :

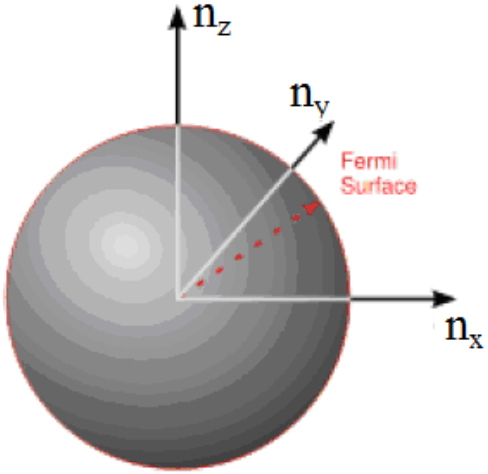
$$\vec{k} = \pm\frac{1}{2}G = \pm j\frac{p}{a} \quad \text{.....(6)}$$

للتمثيل على ذلك إن أول انعكاس (وظهور أول فسحة طاقة)يحدث عند $\left(k=\pm\frac{p}{a}\right)$وينشأ بسبب أن الموجة المنعكسة عن ذرة ما في شبيكة خطية تعاني من تداخل تقوية بفرق طور $(2p)$مع الموجة المنعكسة من ذرة أخرى مجاورة لها أولا .أن الحل بالنسبة للقيمة $\left(k=\pm\frac{p}{a}\right)$ يتضمن مركبتين متساويتين من الأمواج المنتقلة نحو اليسار $\left(k=-\frac{p}{a}\right)$ونحو اليمين $\left(k=+\frac{p}{a}\right)$ وان جمعهما لا يؤدي إلى دالات موجية منتقلة كما هو الحال بموجب الإلكترون الحر بل يؤدي إلى دالات لموجات واقفة .ان مدى قيم $\left(\vec{k}\right)$ بين $\left(+\frac{p}{a}\right)$و$\left(-\frac{p}{a}\right)$يشكل منطقة برليون الأولى لهذه الشبيكة أما المنطقة المحددة لقيم $\left(\vec{k}\right)$ بين $\left(\frac{-2p}{a}\right)$و$\left(-\frac{p}{a}\right)$وكذلك بين $\left(+\frac{p}{a}\right)$و$\left(+2\frac{p}{a}\right)$ فتشكل منطقة برليون الثانية وهكذا .....بقية المناطق.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

كثافة الحالات لغاز الكتروني حر في ثلاثة أبعاد



الشكل(2): سطح فيرمي الكروي

تعرف كثافة الحالات $(D(E))$ لغاز الكتروني حر بأنها عدد الحالات الكمية الالكترونية المتوفرة لكل وحدة مدى للطاقة ، وبعبارة اخرى تمثل $(dN = D(E)\,dE)$عدد الحالات الالكترونية المتاحة خلال مدى طاقة بين $(E$ و $E + dE)$.

ولحساب عدد الحالات الواقعة بين العدد الكمي (n) والعدد الكمي $(n + dn)$في كرة فيرمي شكل (2)،فإذا كان $\left(\frac{1}{8}\right)$حجم الكرة التي نصف قطرها (n) فأن عدد الحالات الواقعة بين (n) و$(n + dn)$ في قشرة سمكها (dn).

$$\text{عدد الحالات} = dN = \frac{1}{8}(4\pi n^2 dn) \quad \text{.....(50)}$$

ولما كانت العلاقة بين العدد الكمي(n) والطاقة (E):

$$E = \frac{h^2 n^2}{8mL^2} \quad \text{.....(51)}$$

$$n^2 = \frac{8mL^2}{h^2} E \Longrightarrow n = \frac{\sqrt{8mE}L}{h} \quad \text{.....(52)}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$2n\,dn = \frac{8mL^2}{h^2}dE$$

$$dn = \frac{4mL^2}{n\,h^2}dE = \frac{4mL^2}{h^2\left(\frac{\sqrt{8mEL}}{h}\right)}dE \quad \text{.....(53)}$$

$$dN = \frac{1}{8}(4\pi n^2 dn) = \frac{1}{8}4\pi\left(\frac{8mL^2}{h^2}E\right)\left(\frac{4mL^2}{h^2\left(\frac{\sqrt{8mEL}}{h}\right)}dE\right)$$

$$dN = D(E)dE = \frac{4}{8}\frac{8}{\sqrt{8}}4\pi\frac{m^{\frac{3}{2}}L^3}{h^3}E^{\frac{1}{2}}dE$$

$$D(E) = \frac{4\sqrt{2}\,\pi\,m^{\frac{3}{2}}L^3}{h^3}E^{\frac{1}{2}}$$

عدد الحالات لكل وحدة حجم (L^3) من الغاز:

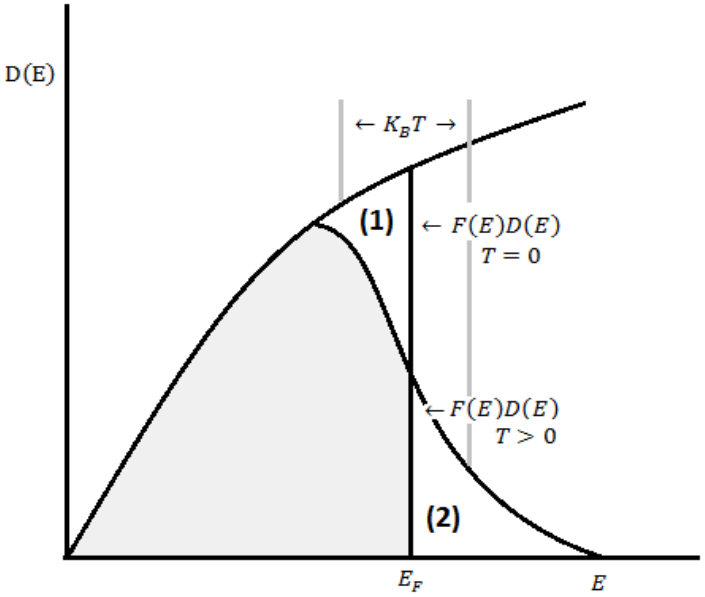
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$\left(D(E) = \frac{4\sqrt{2}\,\pi\,m^{\frac{3}{2}}}{h^3} E^{\frac{1}{2}}\right)$$

ولما كانت كل حالة تحوي الكترونين ببرمين $(\pm 1/2)$ لذا فان عدد المراتب المتوفرة عن الطاقة (E) $(D(E))$.

$$D(E) = \frac{8\sqrt{2}\,\pi\,m^{\frac{3}{2}}}{h^3} E^{\frac{1}{2}} \quad \text{.....(54)}$$

نلاحظ من الشكل (3) ان الدالة $(D(E))$ تبدأ بالتناقص قليلا عند ارتفاع درجة حرارة المعدن فوق $(T = 0\ K)$ ،حيث تسمح التهيجات الحرارية باستحداث مراتب اضافية للإشغال اعلى من (E_F) على حساب خلو اخرى ذات طاقات أقل من (E_F)،أي أن الطاقة تزداد فتتهيج الالكترونات حراريا وتغادر المنطقة المرقمة (1) الى المنطقة (2) بحيث أن عدد الحالات التي تفرغ أو تشغر تعادل عدد الحالات التي تملأ.



شكل (3)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

فيما يتعلق بالتوصيل الحراري

ينتقل التيار الحراري في وسط معدني بواسطة عمليتين:

اولا : استطارة الفونونات بواسطة غيرها من الفونونات وبواسطة العيوب البلورية والكترونات.

ثانيا : استطارة الالكترونات بواسطة فونونات وعيوب بلورية.

تشير التجارب العلمية الى ان موصلية المعدن للحرارة أحسن بكثير من تلك الموصلية لأي عازل على الرغم من توافر الفونونات في كل من المعادن والعوازل لذا فان التيار الحراري في معدن ينتقل بواسطة الكترونات التوصيل بسبب وفرة الكترونات التوصيل في معدن بالنسبة الى عازل بحيث ان اسهام الفونونات في عملية التوصيل الحراري في معدن يكون ضعيفا ويمكن اهماله ولذلك تعرف الموصلية الحرارية الناشئة عن اسهام الكترونات التوصيل بالموصلية الحرارية الالكترونية.

يمكن تطبيق فرضيات درود بشأن طبيعة حركة الكترونات التوصيل في فلز والمستخدمة في حساب التوصيلية الكهربائية (σ) في حساب الموصلية الحرارية للغاز الالكتروني الحر(k_{el})بالمعادلة:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$k_{el} = \frac{2}{3}\tau_m S^2 C_{el} \quad \text{.....(15)}$$

حيث ان(C_{el}):تمثل الحرارة النوعية الالكترونية الكلاسيكية لغاز الكتروني عند ثبوت الحجم

$$C_{el} = \frac{3}{2} n K_B \quad \text{.....(16)}$$

S، الانطلاق الحراري وتعطى بالمعادلة:

$$\left(S = \sqrt{\frac{3K_B T}{m}} \rightarrow S^2 = \frac{3K_B T}{m} \right) \quad \text{.....(17)}$$

نعوض المعادلتين (16)و(17)في المعادلة (15)لنحصل على :

$$k_{el} = \frac{2}{3}\tau_m S^2 \frac{3}{2} n K_B = \frac{2}{3}\tau_m \frac{3K_B T}{m} \frac{3}{2} n K_B = \frac{3nK_B{}^2 \tau_m T}{m} \quad \text{.....(18)}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$k_{el} = \frac{3nK_B^2 T\tau_m}{m} \text{.....(19)}$$

عدد لورنز Lorenz Number: هو النسبة بين معامل التوصيل الحراري الالكتروني $\left(K_{el} = \frac{3nK_B^2 T\tau_m}{m}\right)$ ومعامل التوصيل الكهربائي $\left(\sigma = \frac{ne^2\tau_m}{m}\right)$ لكل درجة حرارة $\left(\frac{1}{T}\right)$.

$$L = \frac{k_{el}/\sigma}{T} = 3\left(\frac{K_B}{e}\right)^2 \text{.....(20)}$$

تشير المعادلة (20) ان عدد لورنز كمية ثابتة لا تعتمد على عدد الكترونات التوصيل ولا على كتلة الالكترون وجد ان عدد لورنز حسب النظرية الكلاسيكية هو $\left(1.1x10^{-8}\left(\frac{volt}{kelvin}\right)^2\right)$.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

نموذج سمرفيلد

يعتبر سمرفيلد أول من طبق ميكانيك الكم على حركة الالكترونات في المواد الصلبة لمعالجة التوصيل الكهربائي في المعادن ،ويعتبر سمرفيلد رائدا لنظرية الغاز الالكتروني الحر مستفيدا من نظرية لورنتز ولكن بتطبيق احصاء فيرمي – ديراك الكمي بدلا من احصاء ماكسويل – بولتزمان الكلاسيكي.

افترض سمرفيلد أن زمن الاسترخاء(τ_r) بين تصادمين متتاليين بين الالكترونات والشبيكة يمكن اعتباره دالة لطاقة الالكترونات .

فعند درجات الحرارة الاعتيادية تكون طاقة معظم الكترونات الغاز الالكتروني الحر لمعدن هي أقل من طاقة فيرمي(E_F) بعدة مرات للكمية (K_BT) و لذلك لا تستطيع تلك الالكترونات من الاستطارة بسبب التصادم لتتغير طاقتها قليلا ، حيث ان جميع الحالات الالكترونية ذات الطاقة المقاربة تكون مشغولة وان أي اشغال اضافي يكون ممنوعا بموجب مبدأ الاستبعاد لباولي.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

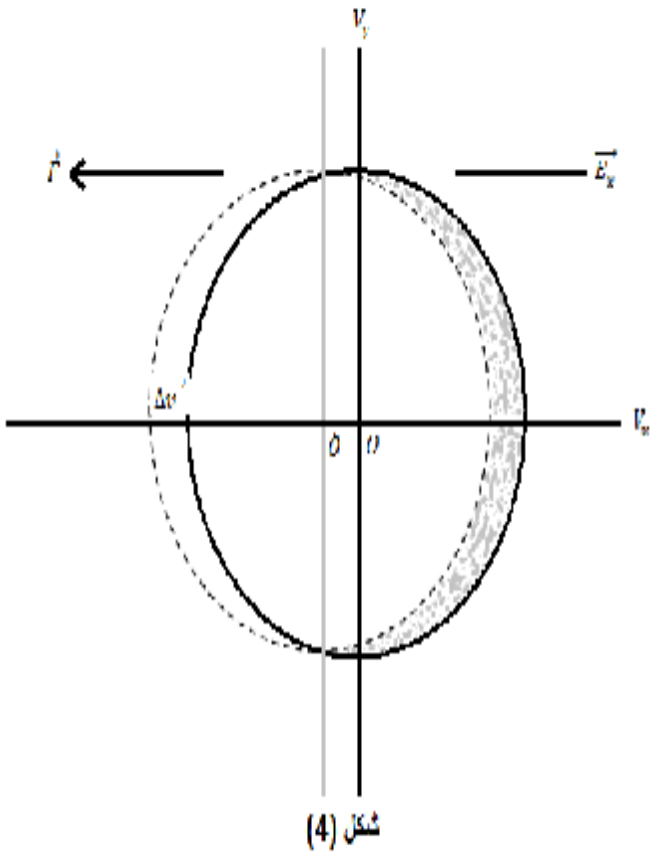
وبعبارة اخرى ان استطارة الالكترون في حالة ذات طاقة واطئة يمكن ان تحدث فقط اذا كان الارتفاع الى حالة شاغرة ممكنا بالقرب من طاقة فيرمي(E_F) ،وعلى هذا الاساس يكون جزءا صغيرا فقط من الالكترونات ذات الطاقة القريبة من طاقة فيرمي (حوالي $(4K_BT)/E_F$ الكترون) مستعدا وله القابلية على الاسهام بالتصادم بحيث يكون المسار الحر (λ_F) لإلكترون يمتلك طاقة فيرمي فقط ،اي ان الالكترونات القريبة من طاقة فيرمي تتحرك بانطلاق فيرمي $\left(S(E_F)=\left(\frac{2E_F}{m}\right)^{\frac{1}{2}}\right)$ ،لذلك يعرف متوسط الزمن الحر(τ_F) بين التصادمات لالكترونات توصيل ذات طاقة فيرمي(E_F) بالصيغة الآتية:

$$\tau_F = \frac{\lambda(E_F)}{S(E_F)} \quad \text{.....(55)}$$

عندئذ يمكن التعبير عن التوصيلية الكهربائية بالصيغة:

$$\sigma = \frac{n\, e^2\, \tau_F}{m} \quad \text{.....(56)}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



شكل (4)

فعلى الرغم من اشتراك جميع الكترونات التوصيل في ميكانيكية التوصيل الكهربائي نجد أن الالكترونات التي تمتلك طاقة مساوية أو مقاربة لطاقة فيرمي هي التي تسهم فقط في التوصيلية الكهربائية ،ويمكن توضيح ذلك بالاستعانة بالشكل (4) .

حيث تمثل الدائرة الكاملة توزيع فيرمي عند غياب المجال الكهربائي الخارجي ،وعند تسليط مجال كهربائي (E_x) باتجاه المحور السني الموجب يتزحزح توزيع فيرمي أي تتزحزح سرع جميع الكترونات دائرة فيرمي بمقدار متوسط سرعة الانسياق $(\Delta\vec{v})$كما توضحه الدائرة المنقطة. ان تسليط مجال كهربائي قد احدث تغيرا في توزيع فيرمي (أي اختفاء حالات وظهور حالات جديدة)ولكن ذلك يحدث فقط بجوار مستوى فيرمي ولذلك تكون الالكترونات ذات الطاقة المقاربة لطاقة فيرمي فقط ذات تأثير على قيمة التوصيلية الكهربائية.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

الاختلاف بين نموذج سمرفيلد ونموذج درود للتوصيلية الكهربائية ليس فلقط بالصيغة الرياضية وإنما:

١- في كيفية تعريف زمن الاسترخاء،بموجب نموذج سمرفيلد ان متوسط الزمن الحر يكون مهما فقط للأقلية الصغيرة من العدد الكلي لالكترونات الغاز الالكتروني ، في حين أن نموذج درود يشير الى العدد الكبير للالكترونات الحرة في معدن.

٢- نموذج سمرفيلد يفترض ان المسار الحر ذو قيمة كبيرة مقارنة بما يفترضه درود وسبب ذلك ان الانطلاق لقلة من الكترونات التوصيل يكون اكبر بكثير من متوسط الانطلاق لعدد كبير من الالكترونات الحرة تخضع لتوزيع ماكسويل – بولتزمان.

٣- يفترض سمرفيلد في نموذجه ان التيار يحمل بواسطة عدد قليل جدا من الالكترونات وجميعها تتحرك بسرعة عالية تعرف بسرعة أو انطلاق فيرمي. بينما نموذج درود يفترض ان التيار الكهربائي يحمل بالتساوي بوساطة جميع الكترونات التوصيل التي تتحرك بسرعة صغيرة جدا هي سرعة الانسياق.

٤- بالنسبة للموصلية الحرارية وفق نموذج سمرفيلد تعطى بالصيغة:

$$k_{el} = \frac{n\,\pi^2 K_B^2 T\,\tau_F}{3m} \quad \text{.....(57)}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

وهي اكبر من الموصلية الحرارية (k_{el}) وفق نموذج سمرفيلد بحوالي 10% .

٥-اما عدد لورنس(L) فيعطى بالعلاقة الآتية:

$$L = \frac{k_{el}}{\sigma}\Big/_{T} = \frac{1}{T}\frac{\frac{n\pi^2 K_B^2 T \tau_F}{3m}}{\frac{n e^2 \tau_F}{m}} = \frac{1}{3}\left(\frac{\pi K_B}{e}\right)^2 \quad \text{.....(58)}$$

$$L = 2.23x10^{-8}\left(\frac{volt}{kelvin}\right)^2 \quad \text{.....(59)}$$

ولابد من الاشارة الى أن عدد لورنز المحسوب في المعادلة(59)هو بناءا على النظرية الكمية بينما عدد لورنز حسب النظرية الكلاسيكية هو$\left(1.1x10^{-8}\left(\frac{volt}{kelvin}\right)^2\right)$ويلاحظ بانه أكبر من قيمة عدد لورنس (L) وفق نموذج درود بحوالي 10% .

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

إخفاقات النظرية الكمية للالكترون الحر

يعد نموذج الإلكترون الحر المكمى نموذجا خاما (غير كامل الإتقان) لأنه عاجز عن الإجابة عن بعض الأسئلة المتعلقة بالمواد ،ومن أهم الصعوبات التي واجهت نموذج الإلكترون المكمى:

أولا : عجز نموذج الإلكترون الحر المكمى عن التمييز بين الموصلات وأشباه الموصلات والعوازل.

ثانيا : افترض نموذج الإلكترون الحر المكمى أن التوصيلية الكهربائية لأي معدن تتناسب فقط هي وتركيز الالكترونات (n) حيث أن $\left(n=\frac{N}{V}\right)$ وتتساوى بقية المقادير مثل t_m و m لكافة المعادن.

ثالثا : لا يستطيع نموذج الإلكترون الحر المكمى تفسير سبب ظهور القيم الموجبة لمعامل هول لأنه يتنبأ بقيم سالبة لمعامل هول لجميع المعادن.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

رابعا : تشير كثير من خواص النقل إلى أن سطح فيرمي يكون غير كروي الشكل في أغلب الأحيان وهذا يتعارض مع تنبأ نموذج الإلكترون الحر المكمى الذي يعد سطح فيرمي سطحا كرويا.

خامسا : أهمل نموذج الإلكترون الحر المكمى الجهد الدوري للبلورة أي إهمال التفاعل بين الكترونات التوصيل والشبيكة الدورية للبلورة لذلك يدعى هذا الجهد بالجهد الدوري.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

العيوب البلورية Crystal Defects

في البلورات المثالية تترتب الذرات بشكل دوري منتظم من دون أي خلل أو عيب إلا انه في الحقيقة لا توجد بلورة خالية من العيوب ،ان المقصود بمصطلح العيب في فيزياء الحالة الصلبة بأنه انحراف أو اختلال في استمرارية الترتيب المنتظم للذرات في الشبيكة ،أي عدم الانتظام في البنية البلورية،تظهر العيوب البلورية على عدة أشكال والشائع منها:

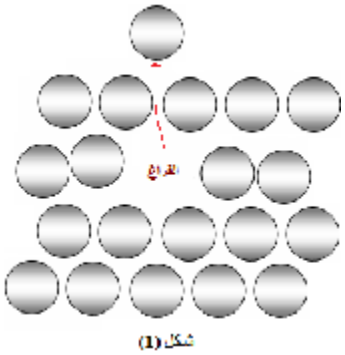
١-العيوب النقطية: مثل الفراغات ،الذرات الإضافية،عيوب شوتكي ،عيوب فرنكل.
٢-العيوب الخطية:مثل الانخلاع الحافي والانخلاع ألبرمي.
٣-العيوب السطحية:مثل خلل التراص،الحدود الحبيبية ،التوائم.
٤-العيوب الحجمية:مثل عناقيد كبيرة لعيوب نقطية.

العيوب النقطية Point Defects

يعرف العيب النقطي على انه انحراف او اختلال في موقع ذرة او مواقع عدد قليل من الذرات المتجاورة.إن سبب تسميته بالعيب النقطي لحدوثه في منطقة صغيرة جدا إذا ما قورنت بحجم البلورة ،لهذا تعد هذه المنطقة كنقطة في فضاء كبير.

إن العيوب النقطية إما أن تكون نتيجة فراغات Vacancies أو نتيجة ذرات إضافية Extra Atoms داخل البنية البلورية.

الفراغات Vacancies



شكل (1)

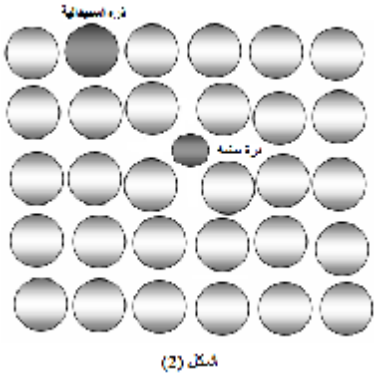
إن ابسط أنواع العيوب النقطية هو الفراغ وهو عبارة عن حيز الذرة المفقودة ضمن الترتيب المنتظم للذرات في الشبيكة كما في شكل (1) وقد يحدث هذا النوع نتيجة:

١- لخلل في الرص الذري أثناء عملية النمو البلوري Crystal Growth للمادة ،
٢- من جراء التذبذب الحراري للذرات حول مواقعها في الشبيكة عند درجات الحرارة العالية

فمن المحتمل أن تزاح الذرة عن مكانها تاركة فراغا.

الذرات الإضافية Extra Atoms

إن النوع الآخر من العيب النقطي هو وجود ذرات إضافية داخل البنية البلورية و يطلق عليها بالشوائب . إن الذرة المضافة يمكن لها أن تحتل موقعين متميزين في داخل الشبيكة:



شكل (2)

١- فإذا احتلت الذرة الإضافية موقع الذرة الأصلية فإنها تدعى عندئذ بالذرة الاستبدالية،
٢- أما إذا احتلت الذرة الشائبة موقع بيني بين الذرات الأصلية فأنها تدعى حين ذاك بالذرة البينية،

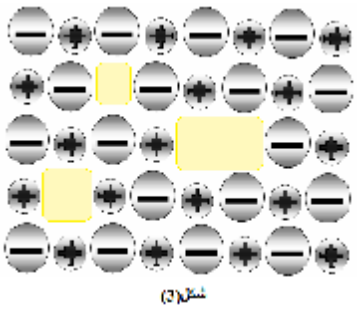
وكما هو واضح من الشكل(2) ،أن الذرات البينية تكون على نوعين:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

(a) فإما أن تكون من نفس النوع من ذرات الشبيكة ويتم ذلك بإزاحة الذرة الأصلية من موقعها الأصلي إلى موقع بيني،
(b) أوان تكون من نوع آخر يختلف عن الذرات الأصلية للبنية البلورية .
ويتم إضافة الشوائب إلى البنية البلورية بطرق دقيقة جداً لإضافة الشوائب أهمها:
- طريقة النمو البلوري أو
- طريقة الانتشار ،
- وهناك طريقة متطورة دقيقة جداً لإضافة الشوائب يطلق عليها طريقة الغرس الأيوني .

تعتمد مواقع الذرات البنية على نوع رص الذرات أو الايونات المكونة للبنية البلورية .
- ففي المواد الصلبة ذات الرص المحكم من الصعب جداً أن تحتوي بنيتها على ذرات بينية وذلك لصغر الحيز بين الذرات حيث لا يمكن أن يستوعب ذرة إضافية ومن أمثلة ذلك النحاس والخارصين .
- أما في الرص غير المحكم فأن الذرة الشائبة يمكن أن تحتل مكان بينياً خاصة إذا كان حجمها صغيراً أي بنصف قطر $0.8\ A$.

عيوب شوتكي Schottky Defect



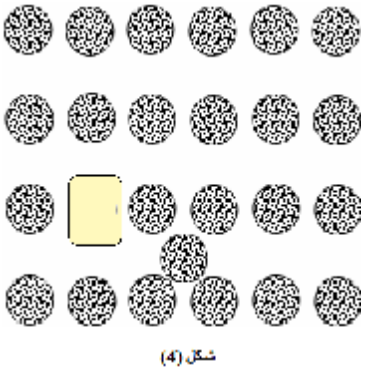
يعرف عيب شوتكي على أنة فقدان إحدى الذرات من موقعها الأصلي تاركة وراءها حيز من الفراغ وكما هو واضح من الشكل (3) ويحدث عيب شوتكي عادة في البلورات الأيونية مثل كلوريد الصوديوم . أن حدوث الفراغات في داخل البلورة يؤدي إلى تغير الطاقة الحرة والتي تعتمد بدورها على تغيير كل من الطاقة الداخلية و الانتروبي.أن المقصود بالطاقة الداخلية هنا في E_P :طاقة تكوين زوج من الفراغات فعليه تعرف طاقة التكوين على إنها الطاقة اللازمة لتكوين زوج من الفراغ الموجب والسالب فإذا كانت الطاقة اللازمة لتكوين زوج واحد من الفراغ الموجب و السالب في بلورة كلوريد الصوديوم NaCl هي (2 ev) فيكون عدد الفراغات عند درجة حرارة الغرفة تبعاً للمعادلة:

$$n = N\ e^{-\frac{E_P}{2K_BT}}$$

مساوياً إلى 10^{12} فراغاً لكل متر مكعب.بينما يكون عدد ايون الصوديوم Na وعدد ايون الكلورCL في المتر المكعب مساويا (2.2×10^{28}) لذا فان هناك فراغ واحد لكل 10^{16} أيون .ويزداد عدد الفراغات بازدياد درجة الحرارة . فإذا كان عدد الفراغات عند درجة الحرارة 300K هو 10^{12} فأن عددها سيكون عند 900K ب 10^{22}.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

عيوب فرنكل Frenkel Defect


شكل (4)

يعرف عيب فرنكل على انه إزاحة أحدى الذرات من موقعها الأصلي إلى موقع بيني تاركه ورآها حيزاً من الفراغ وكما هو واضح في الشكل (4). يحدث عيب فرنكل عادة في البلورات الفلزية وبلورات أشباه الموصلات.

أن هناك عيبين يحدثان في البلورة في وقت واحد هما: تكوين فراغاً وذرة بينية عندما تزاح الذرة الأصلية من موقعها الأصلي إلى موقع بيني داخل البنية البلورية ،

أن حدوث أزواج من (فراغ - ذرة بينية) في داخل البلورة يؤدي إلى تغير الطاقة الحرة والتي تعتمد بدورها على تغيير كل من الطاقة الداخلية والانتروبى

إن الطاقة الداخلية في عيوب فرنكل تتمثل بطاقة تكوين فرنكل E_i والتي تعرف على إنها الطاقة اللازمة لإزاحة ذرة عن موقعها الأصلي إلى الموقع بيني.

وعلى فرض أن الذرة البينية يمكن لها أن تحتل موقع واحد من المجموع الكلي N_i للموقع البنية لذا فأن معادلة فرنكل تعطى بالعلاقة:

$$n = \sqrt{N\ N_i}\ e^{-\frac{E_i}{2K_BT}}$$

عيوب الشبيكة Lattice Defect

عرفنا أن العيب النقطي يحدث في موقع ذرة أو في موقع عدد قليل من الذرات .أما إذا امتد الاختلال أو العيب ليشمل مساحات عديدة من البلورة فيسمى عندئذ بالعيب الشبيكي .

تنقسم العيوب الشبيكة إلى نوعين:

١)العيب الخطي .

٢)العيب السطحي.

العيب الخطي Line Defect

عرف بهذا الاسم نتيجة لطبيعة تطوره أو سريانه التي تكون على امتداد مسارات خطية .

وعلية فان البلورات لا تكون مثالية بل يمكن أن تحوي في بنيتها عيوباً خطية تعرف بالانخلاعات و التي تؤثر بصورة كبيرة على الخواص الميكانيكية للمادة الصلبة حيث تضعف من مقاومة المادة تحت تأثير الإجهاد ،

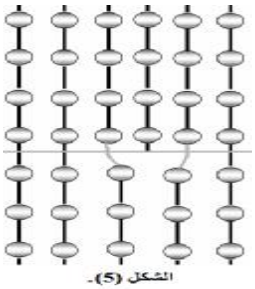
ويتم تقسيم الانخلاع إلى نوعين :

١- الانخلاع الحافي .

٢- الانخلاع اللولبي .

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

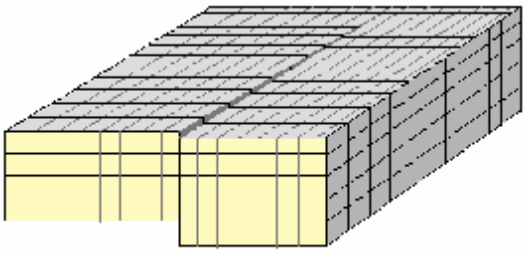
الانخلاع الحافي Edge Dislocation


الشكل (5)

يطلق على الانخلاع الحافي باسم انخلاع (تايلور- اوران) والذي يمكن أن يوصف على انه صف من الذرات يميز حدود حافة جزء من المستوى الذي امتد خارج البلورة وكما مبين من الشكل يرمز للانخلاع الحافي بحرف L والذي يسمى بمتجه بيرجيرز وهذا المتجه يشكل زاوية قائمة مع خط الانخلاع في الانخلاع الحافي وكما هو واضح من الشكل (5).

الانخلاع اللولبي Scraw Dislocation

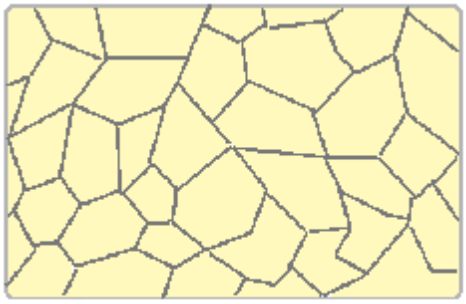
إن ابسط تعريف للانخلاع ألبرمي هو إزاحة جزء من شبكية بالنسبة إلى جزئها الأخر ويكون متجه الإزاحة متجه بيرجيرز موازي إلى خط الانخلاع ، ويطلق على هذا الانخلاع بانخلاع بيرجرز والذي يمكن أن يوصف على انه صف من الذرات المستوي البلوري حوله مساراً لولبياً ،وبتعبير آخر يدل انخلاع ألبرمي على الحد الفاصل بين الأجزاء المنزلقة وغير المنزلقة لبلورة مثالية عندما يكون هذا الحد موازيا إلى اتجاه الانزلاق وعلى عكس الانخلاع الحافي حيث يكون هذا الحد عموديا على اتجاه الانزلاق كما هو واضح من الشكل (6).


الشكل (6)

العيب السطحي Surface Defect

سمي هذا العيب بهذا الاسم لأنه ينشا من تجمع العديد من العيوب الخطية مكونة سطح من العيوب مثال ذلك حدود الحبيبات وخلل التراص و التوائم.

حدود الحبيبات Grains Boundary


الشكل(7)

بعض المواد الصلبة لا تتكون بنيتها من بلورة واحدة بل من عديد من البلورات صغيرة الحجم والتي يطلق عليها بالحبيبات . وان كل حبيبة داخل بنية المواد الصلبة تختلف في: اتجاهها وحجمها وشكلها و بعدها عن جارتها و بالتالي لابد أن يفصلها عن بعضها البعض حدود فاصله يطلق عليها بحدود الحبيبات كما هو واضح من الشكل (7).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

تعتبر حدود الحبيبات كمناطق انتقالية تكون الذرات فيها غير مقترنة مع أي من البلوريتين المتجاورتين وينتج عن ذلك مقاومة إضافية للمواد حيث يقل التوصيل الكهربائي فيها.

خلل التراص Stacking Fault

يعد خلل التراص من العيوب التي تحدث نتيجة لعدم استمرارية تعاقب المستويات بسبب خلل في ترتيب الذرات ذات النوع الواحد أو أكثر من نوع.

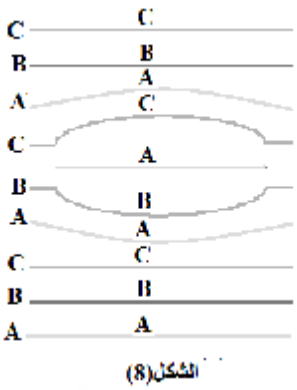
فلو فرضنا وجود عدد(n) من الطبقات التي تتكون من نوع A من الذرات وعدد (n+1)من الطبقات التي تكون من النوع B فعلية يكون تعاقب الطبقات عند أنماء البلورة على هذا النحو:

AB AB AB

فإذا حدث خلل في ترتيب الطبقات فان احد الطبقات التي ذراتيها من النوع C الموجودة داخل المادة الصلبة كشوائب تنمو بين الطبقات n و n+1 على هذا النحو :

AB ABC AB AB ABC AB AB

وبهذا تكون الطبقة C هي خلل التراص كما هو واضح من الشكل(8).



الشكل(8)

التوائم Twins

تعد التوائم من العيوب السطحية الشائعة والتي تحدث نتيجة: لعدم استمرارية دورية الشبيكة وتعد عملية تكوين التوائم نمطاً من أنماط التشويهات اللدنة وتلاحظ خاصة في بنية البلورات التي تنتمي إلى المواد البلورية المكعبة ذات الأوجه المتمركزة(F.c.c) فخلال عملية تكوين البلورات التوأمية تحدث إزاحة صغيرة بين المستويات العديدة المجاورة إن الجزء المشوه من البلورة له تماثلاً مرآتي مع الجزء غير المشوه كما هو في الشكل(9) يتم حدوث عملية التوأمة بالطرق التالية :

١)تتم بطريقة النمو البلوري وتعرف عندئذ بالتوائم النامية
٢)تتم بطريقة التشويه الميكانيكي كالطرق أو الضغط وتسمى بالتوائم المشوهة
٣)يتم حدوث التوأمة عند صهر المادة وإعادة نموها

إن مقدار التشويه في الشبيكة البلورية عند الحدود التوأمة يكون بسيطاً لذا تكون طاقة الذرات فيه قليلة تظهر الحدود التوأمة في بعض السبائك بصورة خاصة مثل :

- سبيكة النحاس الأصفر
- الفلزات مثل الخارصين و المغنسيوم.

العيوب الحجمية Volume Defect

تمتد هذه العيوب خلال حجوم صغيرة في بلورة، وللتمثيل على ذلك:

- عناقيد كبيرة لعيوب نقطية أو
- خلوات مقفلة
- وأنواع أخرى لشوائب دخيلة (inclusions).

وتكون جميع البلورات الحقيقية مؤلفة من بلورات مجهريه (microcrystal) صغيرة أو حقول (domains) كل منها قد تكون مثالية تقريبا أو تمتلك أنواعا مختلفة من العيوب . إن

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

حافة كل حقل قد تتغير من بضع مئات من الانكستروومات إلى بضع سنتمترات .ويكون هذا النوع من العيوب مهما في دراسات مثل :

- الانصهار
- وانتقالات متعددة الشكل البلوري (polymorphic transitions)
- واستطارة الأشعة السينية
- فضلا عن تأثيراتها في المواد الصلبة الفيرومغناطيسية.

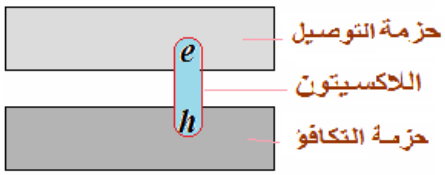
مفاهيم خاصة

البولارون Polaron

عبارة عن إلكترون يرافقه تشوه مرن في البلورة فعند تفاعل الإلكترون في شبيكة البلورة مع ذرات وايونات تلك الشبيكة بواسطة شحنته الكهربائية فانه يسبب تشوه مرنا (استقطاب) موضعيا في شبيكة البلورات الأيونية ،وان هذا التشوه يحاول مرافقة الإلكترون المتحرك ،حيث يتحرك هذا التشوه ضمن البلورة وعليه فان الجمع بين الإلكترون والتشوه المرن (أو مجال الإجهاد الناتج من التشوه)يسمى البولارون.

الاكسيتونات Excitons

يعرف على انه موجة استقطاب تنتج من ترابط بين إلكترون في نطاق حزمة التوصيل وفجوة في نطاق حزمة التكافؤ .إن طاقة الفوتون اللازمة لتوليد هذا الزوج تكون اقل من فجوة الطاقة ،وحيث إن الالكترونات والفجوات متعاكسة الشحنة فان كلا منهما يتحرك في المجال الكهروستاتيكي للآخر ولذلك فان احدهما يجذب الآخر بقوة كولوم فينشا عن ذلك زوج مقيد كما هو واضح في شكل (10) ،وفي هذه الحالة يدور الجسيمان (الإلكترون – فجوة) حول مركز كتلتيهما المشترك بزخم زاوي مكمم يعرف مثل هذا الزوج بالاكسيتون.



شكل (10)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

دوال توزيع الطاقة

Energy distribution functions

الجسيمات الأساسية

يتكون الجسم الصلب من عدد كبير من الجسيمات المجهرية (ذرات ،نوى ،الكترونات)،وقد صنفت الجسيمات على اساس "برمها Spin " أو لفها الذاتي ، ويحدد التصنيف طبيعة توزيع الطاقة لتكدس حشد من الجسيمات ،ويكون التصنيف للجسيمات كما يلي :

a) جسيمات متماثلة ، يكون لبرمها أي قيمة ، وتكون متباعدة عن بعضها البعض ،ويمكن التمييز بينها (كجزيئات الغاز) ،وتخضع لإحصاء ماكسويل – بولتزمان .

b) جسيمات متماثلة ، برم كل منها يساوي الصفر أو عدد صحيح من $(\hbar)$ ، غير قابلة للتمييز بينها (كالفوتونات ،الفونونات)، تسمى البوزونات (Bosons) ، تخضع لاحصاء بوز – أنيشتاين ، ولا تخضع لمبدأ باولي (Pauli exclusion principle) .

c) جسيمات متماثلة ، برم كل منها يساوي عدد فردي من أنصاف $(\hbar)$ ، غير قابلة للتمييز بينها (كالألكترونات ،البروتونات ، النيترونات)، تسمى الفيرميونات (Fermions)، تخضع لمبدأ پاولي ، وتتميز بسلوك فردي مميز ،فإذا شغل الفيرميون حالة طاقة معينة لا يمكن لأي فيرميون آخر أن يشغل تلك الحالة وهو الفارق الأساسي بين البوزونات والفيرميونات ، وتخضع لإحصاء فيرمي – ديراك .

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

دوال توزيع الطاقة

تعطي دالة توزيع الطاقة $(f(E))$ احتمالية أن يكون الجسيم في حالة طاقية (E) معينة ،وهناك ثلاثة دوال لتوزيع الطاقة تصف حالات الطاقة لها الأشكال التالية :

ا. دالة توزيع ماكسويل – بولتزمان (Maxwell – Boltzman distribution)

وهي توزيع كلاسيكي يصف حالات الطاقة للجسيمات التي يمكن التمييز بينها وله الشكل الرياضي المبين أدناه الشكل (1) مع شرح الرموز حيث (A) ثابت التنظيم ، (E) الطاقة التي يمتلكها الجسيم ، (K) ثابت بولتزمان ، (T) درجة الحرارة ، يسري مفعول هذا التوزيع في درجات الحرارة العالية .لا يوجد أي قيود على عدد الجسيمات التي تشغل مستوي طاقة معين .

$$f(E)_{\text{Maxwell-Boltzmann}} = \frac{1}{Ae^{E/kT}}$$

الشكل (1) : تفصيلات دالة توزيع ماكسويل – بولتزمان (Maxwell – Boltzman distribution) .

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

II. دالة توزيع فيرمي – ديراك (Fermi – Dirac distribution)

تكمن أهمية التوزيع انه عند درجة الصفر المطلق تكون كل حالات الطاقة عند مستويات طاقة اقل من طاقة مستوى فيرمي (E_f) مشغولة بالجسيمات وما فوق ذلك المستوى تكون حالات الطاقة فارغا ويعتبر مستوى فيرمي علامة مميزة حيث تكون دالة التوزيع للمستويات تحت مستوى فيرمي تساوي الواحد (احتمال الأشغال 100%)، تخضع الجسيمات لمبدأ باولي حيث كل مستوى طاقة يكون مشغولا بجسيم واحد فقط الشكل (2).

$$f(E)_{\text{Fermi-Dirac}} = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT}+1}$$

الشكل (2): تفصيلات دالة توزيع فيرمي – ديراك (Fermi – Dirac distribution) .

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

III. دالة توزيع بوز– اينشتاين (Bose – Einstein distribution)

لا تخضع البوزونات الى مبدأ باولي وعند الدرجات المنخفضة تسلك البوزونات سلوكا مختلفا عن الفيرميونات حيث ان عدد غير محدد يمكن أن يتواجد بنفس حالة الطاقة ، وهذا التجمع في نفس مستوى الطاقة يسمى التكاثف وهو ما يحصل في ظاهرة الموصلية الفائقة الشكل (3).

$$f(E)_{\text{Bose-Einstein}} = \frac{1}{Ae^{E/kT} - 1}$$

الشكل (3): تفصيلات دالة توزيع بوز– اينشتاين (Bose – Einstein distribution).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ان دوال الطاقة السابقة تعمل على المبدأ التالي :

بفرض أن عدد الجسيمات (N) وعدد الحالات المتوفرة (G)، فعندما يكون عدد الجسيمات أصغر بكثير من عدد الحالات أي عدد الحالات الفارغة كبير جدا هنا يكون احتمال انشغال الحالة أصغر بكثير من الواحد $(N/G \ll 1)$، واحتمال التقاء الجسيمات لتشغل نفس الحالة صغير مما يؤدي الى ظهور الصفة الجماعية ،

والعكس عندما $(N/G \gg 1)$ (بوزونات وفيرميونات) عندها تكون عدد الحالات المتوفرة من مرتبة عدد الجسيمات أو أقل ، والمشكلة تكمن في كيفية اشغال تلك الحالات فرديا أو جماعيا ،وهي مشكلة تعكس طبيعة الجسيمات التي تعرف بالمنطبقة (Degenerate)، ويزول هذا الانطباق في الدرجات الحرارة العالية وتصبح غير منطبقة (Non Degenerate).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

النظرية الكمية للالكترونات الحرة

بعد اكتشاف مبدأ الاستبعاد لباولي استطاع سمر فيلد استخدام نفس فكرة الكترونات الغاز الحرة في المعادن لحل المشاكل التي عانت منها النظرية الكلاسيكية لإلكترون الحر ،التي اعتمدت على توزيع ماكسويل – بولتزمان في حين ان النظرية الكمية لسمرفيلد تبنت التوزيع الكمي لفيرمي – ديراك لجسيمات تعرف بالفرميونات تخضع لمبدأ الاستبعاد لباولي الذي ينص: على ان كل حالة (مستوى) من حالات الطاقة يشغله الكترونين ببرمين متعاكسين$(\pm 1/2)$. ان دالة التوزيع لفيرمي – ديراك تمثل احتمالية اشغال حالة ما ذات طاقة (E) ،اي عدد الجسيمات في تلك الحالة أو التوقع لاحتلال حالة كمية طاقتها (E)وتعطى بالصيغة الرياضية :

$$f(E) = \frac{1}{1+e^{\left(\frac{E-E_F}{K_B T}\right)}} \quad \text{.....(48)}$$

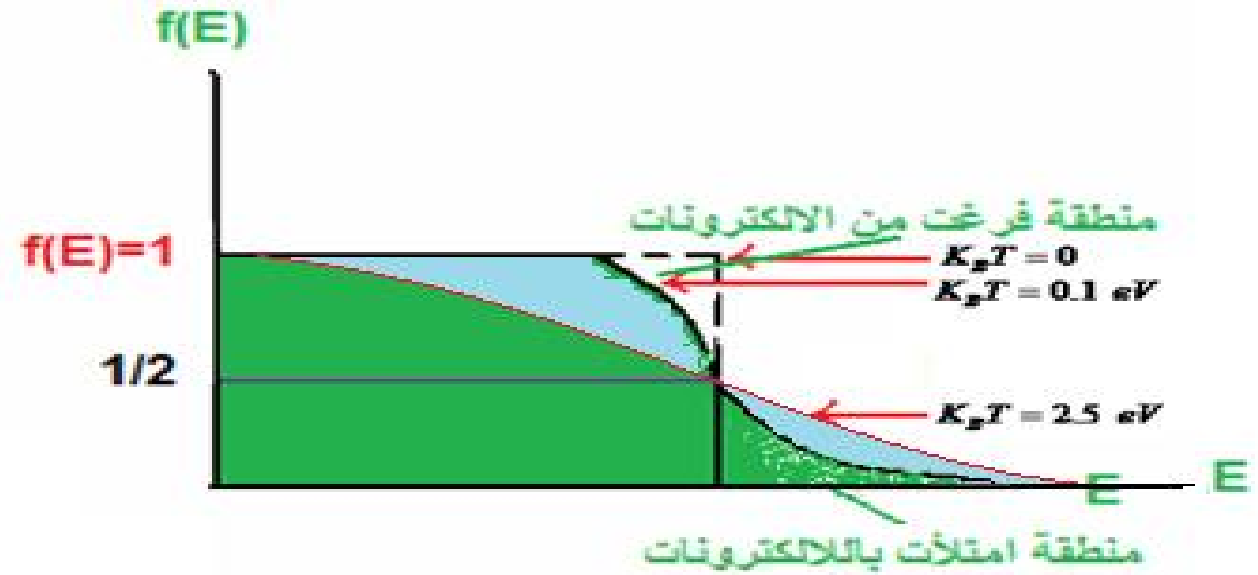
بموجب المعادلة (48)عند درجة حرارة $(T = 0\ K)$فان جميع حالات الطاقة لغاية$(E = E_F)$ تكون مشغولة تماما اي ان $(f(E) = 1)$ بينما تكون جميع حالات الطاقة $(E > E_F)$ فارغة أي ان $(f(E) = 0)$ ان سبب ذلك:

$$\lim_{T\to 0} exp\left(\frac{E-E_F}{K_B T}\right) = \begin{cases} 0 & f(E) = 1 \quad at \ E < E_F \\ 1 & f(E) = \frac{1}{2} \quad at \ E = E_F \\ \infty & f(E) = 0 \quad at \ E > E_F \end{cases} \quad \text{.....(49)}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

الشكل (1) يوضح اعتماد دالة التوزيع لفيرمي – ديراك على درجة الحرارة فهناك ثلاثة قيم ل(K_BT):

$T = 0$ $K_BT = 0$ | $T = 1200\ K$ $K_BT = 0.1eV$ | $T = 30000\ K$ $K_BT = 2.5eV$

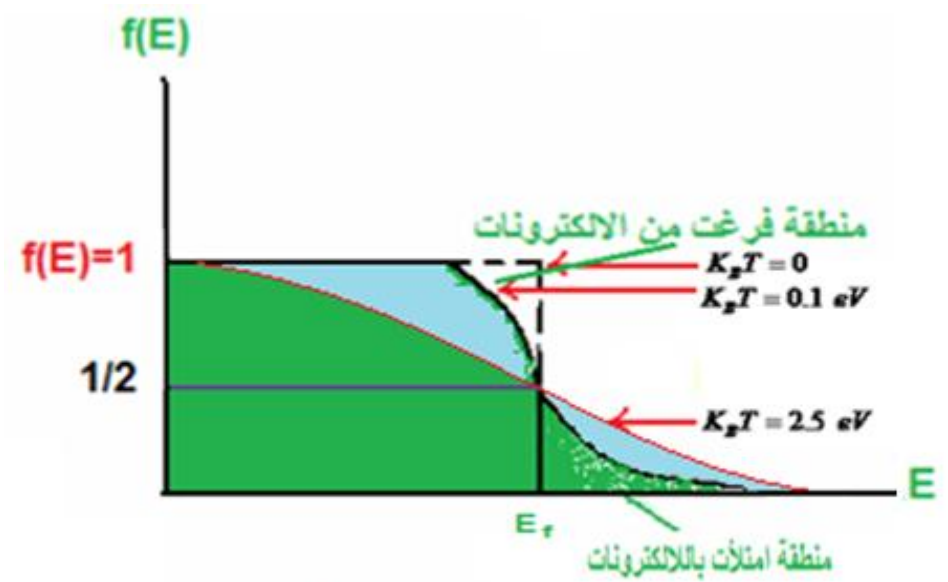


الشكل (1):شكل توزع فيرمي عند وفوق الصفر المطلق

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

حيث أن الفيرميونات عند درجة $(T=0\ K)$ تشغل أوطأ مستويات الطاقة المتوافرة ثم تصعد حتى تصل إلى الطاقة $(e=e_f)$ ولذلك تمثل (e_f) مؤشرا لأعظم طاقة للفيرميونات في المنظومة ولذلك سميت بطاقة فيرمي.حيث ان احتمالية الاشغال عند أية درجة حرارة تساوي نصفا فقط عندما تكون طاقة الالكترون مساوية لطاقة فيرمي $(e=e_f)$ عند تلك الدرجة .

ان الدالة $(f(E))$ تبدأ بالتناقص قليلا عن ارتفاع درجة حرارة المعدن ،وتفسير ذلك انه عند ارتفاع درجة الحرارة تسمح التهيجات الحرارية باستحداث حالات اضافية للإشغال ذات طاقات اعلى من (E_F) على حساب خلو حالات ذات طاقات أقل من (E_F) .



الشكل (1):شكل توزع فيرمي عند وفوق الصفر المطلق

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

W.H. : برهن ما يأتي :

$$(a) \quad f(E) = 1 \quad at \quad E < E_F$$
$$(b) \quad f(E) = \frac{1}{2} \quad at \quad E = E_F$$
$$(c) \quad f(E) = 0 \quad at \quad E > E_F$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

تأثير هول Hall Effect

(س1: ميز بين تأثير ثومسن وبين تأثير هول)

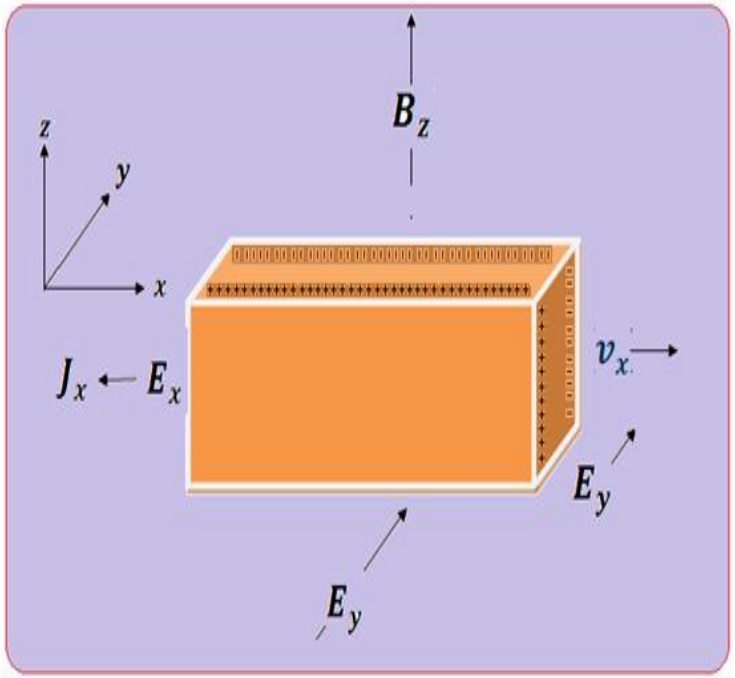
تأثير ثومسن : هو تولد قوة دافعة كهربائية في موصل نتيجة لوجود فرق بين درجة حرارة نهايتيه.

تأثير هول : هو اختلاف توزع التيار في شريحة معدنية بفعل مجال مغناطيسي ،فعند تسليط مجال مغناطيسي على موصل (يحمل تيارا كهربائيا) باتجاه عمودي على اتجاه سريان التيار تنشأ نزعة لدى حاملات الشحنة الى الانحراف جانبا فتسبب تولد قوة دافعة كهربائية عبر الموصل باتجاه عمودي على اتجاه كل من التيار والمجال المغناطيسي.

(س2: اشرح التفسير الفيزيائي لعامل هول)

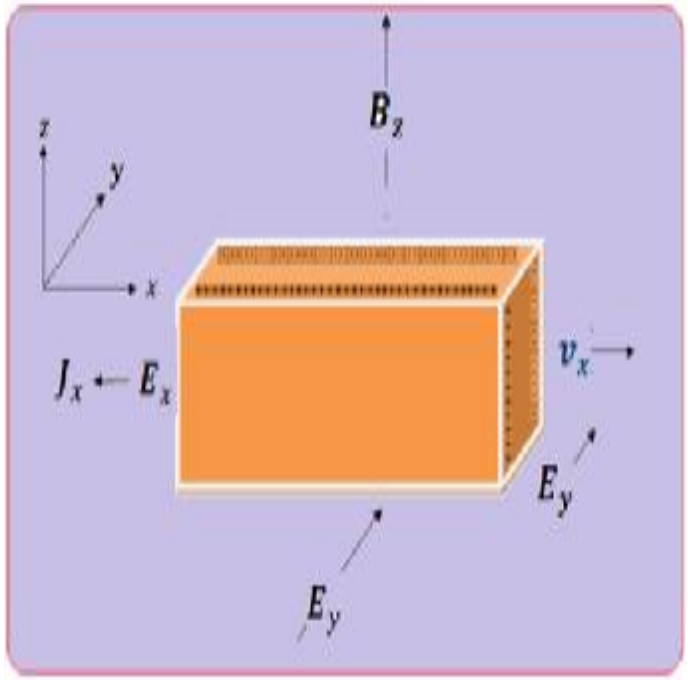
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

التفسير الفيزيائي لهذه الظاهرة : عند وضع شريحة من فلز تحت تأثير **مجال مغناطيسي عمودي** وإمرار **تيار كهربائي** في تلك الشريحة،يتولد **فرق جهد كهربائي عمودي** على اتجاه كل من **التيار والمجال المغناطيسي**. ان التيار الكهربائي **عبارة عن سيل من الالكترونات التي تتحرك بسرعة انجراف** (v_e) **باتجاه معاكس لاتجاه المجال الكهربائي**(E_x)،وعند تسليط مجال مغناطيسي **حثه** (B) على شريحة معدنية تتولد **قوة لورنتز** $[F = e(\overline{v_e} x \overline{B})]$ فتنحرف هذه الالكترونات نحو اليمين **(حسب قاعدة اليد اليمنى)**.تعمل هذه القوة على تجميع الالكترونات في الطرف الايمن من الشريحة ليكون هذا الطرف **سالب الشحنة** وفي الوقت نفسه يحدث نقصا في الالكترونات في الطرف الأيسر فيكون **موجب الشحنة** ونتيجة لذلك يتولد **مجالا كهربائيا** (E_y)ينبع من الشحنة الموجبة ليصب بالشحنة السالبة نحو اليمين لينمو بالتدريج فيعمل على منع المزيد من الانحراف الجانبي للالكترونات حتى يحدث الاتزان يعرف هذا المجال **بمجال هول** (E_H) ويطلق على فرق الجهد بين طرفي الشريحة **بجهد هول** (V_H).



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

(س3:اشرح معامل هول رياضيا).....للتعبير عن تأثير هول رياضيا نفرض ان كثافة التيار في اتجاه المحور $(-x)$ في شريحة الفلز هي (J_x) وان المجال المغناطيسي المؤثر في اتجاه المحور (z) هي (B_z) ان القوة المؤثرة على الالكترون بوجود المجال الكهربائي (E) والمجال المغناطيسي (B) تعطى بالعلاقة:



$$\mathbf{F} = e\left(E_y - v_e\, x\, B_z\right) \quad \text{.....(37)}$$

وبما أن حركة الالكترون تكون في اتجاه المحور (x) فعليه تكون القوة المؤثرة على الالكترون في اتجاه المحور (y) :

$$\mathbf{F_y} = e\left(E_y - v_e\, x\, B_z\right) \quad \text{.....(38)}$$

وتصبح القوة (F_y) مساوية للصفر عندما يحدث التوازن بين تأثير المجال المغناطيسي (B_z) وتأثير المجال اللكهربائي(E_y) الناتج عن انحراف الالكترونات:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$0 = e(E_y - v_e\, x\, B_z)$$

$$\therefore e\,E_y = e v_x\, B_z$$

$$E_y = E_H = v_x\, B_z \quad \text{.....(39)}$$

وهي معادلة مجال هول حيث (v_x) تمثل معدل سرعة انسياق الالكترونات بعكس اتجاه المجال الكهربائي الخارجي ، ولما كانت كثافة التيار (J_x) تعطى بدلالة سرعة الانسياق (v_x) وعدد الالكترونات لكل وحدة حجم(n):

$$J_x = (-en\Delta\overline{v_x}) \text{.....(40)}$$

$$\therefore v_x = \frac{-J_x}{n\,e} \text{.....(41)}$$

بتعويض المعادلة (41) في المعادلة (39) نحصل:

$$\therefore E_H = \left(\frac{-1}{n\,e}\right) J_x\, B_z \text{.....(42)}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

المعادلة (42) تعني ان مجال هول يتناسب مع كل من كثافة التيار (J_x) وشدة المجال المغناطيسي (B_z) ويدعى ثابت التناسب بمعامل هول الذي يحدد نوع الاستجابة العمودية على اتجاه كل من التيار والمجال المغناطيسي أي أن :

$$R_H = \left(\frac{-1}{n\,e}\right) = \frac{E_{H(y)}}{J_x\,B_z} \quad \text{.....(43)}$$

ان معامل هول يحدد اشارة وكثافة حاملات الشحنة فهو سالب عندما تكون الحاملات الكترونات حرة .وتزداد قيمة معامل هول بانخفاض تركيز الحاملات. عليه فهو وسيلة مهمة لمعرفة تركيز وإشارة حاملات الشحنة ولاسيما في المواد شبه الموصلة.

يمكن ربط معامل هول (R_H)مع التوصيلية الكهربائية (σ) من خلال الصيغة الرياضية التالية:

$$\sigma = ne\mu = -\frac{\mu}{R_H}$$

$$\therefore \mu = -\sigma\, R_H \quad \text{.....(44)}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

(س4:اشرح مفهوم المقاومة المغناطيسية) ..... المقاومة المغناطيسية

عند دراسة تأثير هول وجد أن كثافة التيار الكهربائي تعطى بالمعادلة:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \vec{J} + \mu(\vec{J} x \vec{B}) \quad \text{.....(45)}$$

حيث تمثل (μ) تحركية هول Hall Mobility لحاملات الشحنة وتقاس بوحدات متر مربع لكل (فولت.ثانية).
التفسير الفيزيائي للحد الأول في الطرف الأيمن من المعادلة (45) التي تمثل حل معادلة النقل لبولتزمان باستخدام نظرية لورنتز وللمرتبة الأولى للمجال المغناطيسي هو أن التوصيل لغاز الكتروني على طول معدن يجب ان لا يضعف حتى في حالة وجود مجال مغناطيسي له مركبة عمودية على كثافة التيار (J)،وهذا يشير الى ان المقاومة الكهربائية لمعدن لا تعتمد على تأثيرات المجال المغناطيسي.

اما من الناحية التجريبية فقد وجد أن المواصلة Conductance (قدرة المادة على توصيل التيار الكهربائي) تتناقص عند وجود المعدن في مجال مغناطيسي وتعرف هذه الظاهرة بتأثير المقاومة المغناطيسية وهذا يدل على نشوء مقاومة كهربائية اضافية في موصل نتيجة وجوده في مجال مغناطيسي خارجي.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

اما نظريا وبموجب نظرية لورنتز فأن حل معادلة النقل لبولتزمان لدرجة أعلى من الدرجة الأولى للمجال المغناطيسي يظهر تناقصا في القدرة على توصيل التيار الكهربائي ويعتمد ذلك على مربع المجال المغناطيسي(الدرجة الثانية) وهذا ما يتطابق مع القياسات العملية.

ان تفسير ذلك هو ان بعض الالكترونات قد تتحرك أسرع أو أبطأ من متوسط سرعة الالكترونات ولذلك فهي تسلك مسالك منحنية من احدى نهايتي الموصل الى النهاية الأخرى ،ان الانحناء أو التقوس لكثير من المسارات الالكترونية يقلل من القدرة على توصيل التيار الكهربائي حيث يعبر عن التوصيلية الكهربائية المغناطيسية بالصيغة الرياضية التالية:

$$\sigma_B = \frac{J^2\sigma}{J^2+(\sigma R_H)^2\left|\vec{J}\,x\,\vec{B}\right|^2} \quad \text{.....(46)}$$

تكون المقاومة الكهربائية المغناطيسية أعظم ما يمكن عندما يكون المجال المغناطيسي$(\vec{B})$ بكامله عموديا على اتجاه سريان التيار $(\vec{J})$،وتتلاشى المقاومة عندما يكون المجال المغناطيسي$(\vec{B})$ موازيا لكثافة التيار $(\vec{J})$ أي أن$(\vec{J}\,x\,\vec{B}) = 0$

وهذا يعني :

$$\sigma_B = \frac{J^2\sigma}{J^2+0} = \frac{J^2\sigma}{J^2} = \sigma \quad \text{.....(47)}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

(س5: بين اخفاقات النظريات الكلاسيكية للالكترون الحر).....

اخفاقات النظريات الكلاسيكية للإلكترون الحر

أولا : تفترض النماذج الكلاسيكية ان الالكترونات الحرة في المعادن ذات طاقة حركية $\left(\frac{3}{2}nK_BT\right)$ وهذا يعني امتلاك المعدن حرارة نوعية الكترونية عالية ، إلا أن التجارب تشير الى أن الحرارة النوعية المرافقة للغاز الالكتروني تكون صغيرة جدا ، و الحال نفسه ينطبق على القابلية البارامغناطيسية العالية المتوقعة لحاملات شحنة حرة تماما .

ثانيا : ان متوسط المسار الحر المستنتج عمليا من تأثير هول والتوصيلية الكهربائية كبير جدا مقارنة بالفسح بين ذرات المعدن ، وهذا يعني ضمنا عدم تصادم بعضها مع بعض أو عدم تصادمها مع لباب الأيونات الموجبة وكأن الكترونات التوصيل غازا ذا دقائق عديمة التفاعل المتبادل ، وهذه الظاهرة لم تستطع تفسيرها النظرية الكلاسيكية.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ثالثا : لم تستطع النظريات الكلاسيكية تفسير الاشارات الشاذة لمعامل هول الذي اشارته سالبة دائما للمعادن لكن بعض من المعادن مثل الكادميوم (Cd) والزنك (Zn)معامل هول لها ذو اشارة موجبة.

رابعا : تتنبأ النظريات الكلاسيكية بأن معامل هول له كمية ثابتة $\left(R_H = \frac{-1}{n\,e}\right)$ لا تعتمد على درجة الحرارة (T) وزمن الاسترخاء (τ_r) وشدة المجال المغناطيسي المسلط $(\vec{B})$ ،ولكن من الناحية العملية وجد أن معامل هول يعتمد على درجة الحرارة وشدة المجال المغناطيسي ومن المحتمل أيضا على زمن الاسترخاء غير المسيطر عليه عمليا.

خامسا : لم تستطع النظريات الكلاسيكية اعطاء تفسير للتصرف المعقد الذي تسلكه مقاومة المعدن تحت تأثير مجال مغناطيسي ، حيث تزداد مقاومة العناصر النادرة مثل النحاس والفضة والذهب بصورة واضحة بزيادة المجال المسلط.

سادسا : لم تفلح النظريات الكلاسيكية في تفسير اعتماد التوصيلية الكهربائية على درجات الحرارة ، حيث تتناسب التوصيلية الكهربائية مع (T^{-1}) عند درجات الحرارة العالية ومع (T^{-5}) عند درجات الحرارة الواطئة .

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

نظرية درود للتوصيل الالكتروني

- تعد نظرية درود أول نظرية كلاسيكية للغاز الالكتروني الحر في الفلزات
- صور درود البنية البلورية لأي فلز على :انه رص من لباب الايونات الموجبة Positive Ion Cores يتخللها عدد كبير من الالكترونات الحرة ناتجة عن مساهمة كل ذرة في الفلز بإلكترون تكافؤي أو أكثر ويطلق على هذه الالكترونات بالكترونات التوصيل ،وتتأثر هذه الالكترونات بالمجالات الكهربائية والمغناطيسية.

- فرضيات درود على ان :
- الالكترونات على الرغم من شحنتها السالبة تتصرف كجزيئات غاز مثالي متعادلة الشحنة .
- اهمل المجال الدوري الذي تتحرك فيه الالكترونات والذي يرجع الى دورية الشبيكة .
- ان الكترونات التوصيل تستطار Scattered نتيجة تصادمها العشوائي بلباب الايونات الموجبة بحيث ان معدل سرعتها بعد كل تصادم يساوي صفرا.البنية البلورية للمادة الصلبة.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- **ماذا يحصل للالكترونات التوصيل قبل وبعد تسليط المجال الكهربائي ؟**
- **قبل تسليط المجال الكهربائي الخارجي على المعدن**

يكون توزيع السرع موحد الخواص Isotopic في جميع الاتجاهات ،عليه فان معدل سرعة الالكترونات بأي اتجاه كان يساوي صفرا على الرغم من استمرارها في الحركة واصطدامها بلباب الايونات الموجبة.

- **وعند تسليط مجال كهربائي خارجي على فلز**

تكتسب الالكترونات تعجيلا نتيجة تغير قيمة أو اتجاه سرعة انجراف Drift Velocity الالكترونات او كل من القيمة والاتجاه وهذا التغيير يباد ويستأصل عند كل تصادم بين الالكترونات ولباب الايونات الموجبة ،

وبسبب هذا التصادم يفقد الالكترون جميع طاقته التي اكتسبها بواسطة المجال الكهربائي المسلط وتكون سرعته بعد التصادم عشوائية ليس لها علاقة باتجاه حركته قبل التصادم وكأن الالكترون فقد تصرف حالته الحركية قبل التصادم .

وهذا يعني ان التغير في سرعة الالكترون يظهر فقط خلال فترة بين تصادم وأخر ولذلك يزداد تأثير المجال الكهربائي المسلط على الكترونات التوصيل كلما زادت الفترة الزمنية بين تصادمين متتاليين.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- عرف ما يأتي: متوسط الزمن الحر، المسار الحر الالكتروني ، الانطلاق الحراري.

- متوسط الزمن الحر Mean Free Time : هي الفترة الزمنية بين تصادمين متتاليين ويعرف ايضا بزمن الاسترخاء Relaxation Time ويرمز له بالرمز ،وهو معدل الزمن اللازم الذي يستغرقه الكترون لقطع مسافة (تعرف بالمسار الحر) بين تصادمين متعاقبين.

- المسار الحر الالكتروني Electronic Free Path :هو المسافة التي يتحركها اي الكترون توصيل بفاعلية انطلاقه الحراري خلال متوسط الزمن الحر .
- الانطلاق الحراري Thermal Speed :هو انطلاق الالكترون عند حركته من استطارة الى مركز استطارة آخر.

-س: اشتق معدلة التوصيلية الكهربائية عند تسليط مجال كهربائي ثابت القيمة والاتجاه .

عند تسليط مجال كهربائي ثابت القيمة والاتجاه فان الالكترونات الحرة تتأثر بتعجيل منتظم بسبب ازدياد سرعتها مع الزمن بموجب قوانين نيوتن.

$$F = m\left(\frac{\Delta v_1}{t}\right) = eE$$

وبعد مرور زمن من بدء تسليط المجال الكهربائي يكتسب الاليكترون الذي يعان استطارة خلال هذه الفترة سرعة انجراف فضلا عن سرعته الحرارية التي مقدارها :

$$\Delta v_1 = \left(\frac{-eE_1}{m}\right)t$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

اذا كانت الجسيمات تمتلك جمعيها نفس زمن الاسترخاء فان لها نفس معدل سرعة الانجراف.

$$\Delta\bar{v} = \left(\frac{-eE\tau_m}{m}\right)$$

- اما اذا كان الفلز يحتوي على عدد من الالكترونات لكل متر مكعب،وان جميعها تتحرك بسرعة انجراف ثابتة في مجال كهربائي فان كثافة التيار الكهربائي تعطى بالمعادلة :
- حيث ان التوصيلية الكهربائية كمية موجبة وغير متجهة.

$$\mathbf{J} = (-en\Delta\bar{v}) = \left(\frac{ne^2\tau_m}{m}\right)\bar{E} = \sigma\bar{E}$$

- س:بين الصيغة الثانية لقانون أوم ؟

$$\sigma = \left(\frac{ne^2\tau_m}{m}\right)$$

- هي علاقة خطية العلاقة تربط بين $(\bar{\mathbf{E}})$و $(\mathbf{J})$ تعرف بقانون أوم

$$\mathbf{J} = \sigma\bar{E}$$

- ومنها يمكن حساب قيمة التوصيلية الكهربائية (σ) بدلالة المقادير المعروفة(n) ، (m)،(e) و(τ_m).

$$\sigma = \left(\frac{ne^2\tau_m}{m}\right)$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- س:بين العلاقة بين التوصيلية الكهربائية والتحركية ؟

- ويمكن التعبير عن التوصيلية الكهربائية باستخدام ما يعرف بالتحركية الانجرافية Drift Mobility والتي تعرف على انها:

- السرعة الانجرافية المنتظمة لكل وحدة مجال كهربائي .

$$\mu = \frac{\Delta \bar{v}}{E} = \frac{e\tau_m}{m}$$

- بالمقارنة مع المعادلة $\sigma = \left(\frac{ne^2\tau_m}{m}\right)$

نحصل على : $\sigma = ne\mu$

وبالتعويض نحصل على: $\sigma = \left(\frac{ne^2\tau_m}{m}\right) = \frac{ne^2\lambda}{m\,S_{th}} = \frac{ne^2\lambda}{(3mK_BT)^{1/2}}$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

فشل نظرية درود

- ويلاحظ من المعادلة الاخيرة : $\sigma = \frac{ne^2\lambda}{(3mK_BT)^{1/2}}$
- ان التوصيلية الكهربائية (σ)تتناسب طرديا مع $(T)^{-1/2}$ لمدى واسع من درجات الحرارة ،وقد وجد عمليا ان تبريد الفلز الى درجات حرارية واطئة فان التوصيلية الكهربائية تناسب طرديا مع $(T)^{-5}$ قبل الوصول الى مستوى مستقر،
- وبهذا فشلت نظرية درود في تفسير النتائج عند درجات الحرارة الواطئة لأن الكترونات التوصيل لا تتصرف تماما كجزيئات الغاز

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

نموذج الالكترون الحر

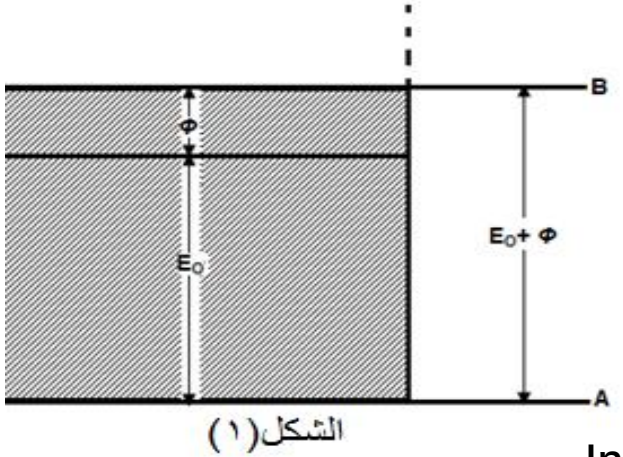
- **تعاريف مهمة:**

- **حاجز الجهد Potential Barrier: هو عبارة عن جهد خارجي يعمل على حجز حركة الالكترونات وتقيدها عند سطح المعدن مما يتطلب طاقة لازمة لقذف إلكترون إلى خارج سطح المعدن ليصبح حر الحركة تماما.**
- **الجهد داخلي Inner Potential للمعدن : وهو يمثل التغير في الطاقة الكامنة لإلكترون عند مروره عبر حد فاصل بين المعدن والفراغ الخارجي.**
- **دالة الشغل Work Function: وهي عبارة عن اقل طاقة اضافية يجب منحها للإلكترون الممتلك لأعظم طاقة حركية E_o لكي يرتفع الى خارج سطح المعدن في مستويات ممتدة الى ما لانهاية،بحيث تتحرك الالكترونات بحرية بأية قيمة من الطاقة الحركية في الفراغ.**
- **الانبعاث الأيوني الحراري Thermionic Emission: وهي عملية تحفيز الكترون التوصيل حراريا ليمتلك دالة الشغل ليجتاز حاجز الجهد ليصبح حر الحركة خارج المعدن.**
- **الانبعاث الضوئي Photoelectric Emission: وهي عملية تحفيز الكترون التوصيل ضوئيا من خلال امتصاصه فوتونا ليحصل دالة الشغل ليتمكن من اجتياز حاجز الجهد ليصبح حر الحركة خارج المعدن.**
- **لباب الأيونات الموجبة: وهي تتكون من نويات الذرات والالكترونات الشاغلة للقشرات المقفلة او المشبعة المحيطة بالنواة.**
- **الجهد الكاذب Pseudo Potential:هو محصلة او صافي الجهد الناتج عن التجاذب الكولومبي والجهد التنافري المقدم من قبل التأثيرات الكمية لإضعاف التجاذب الكولومبي ما بين الكترونات التوصيل السالبة الشحنة ولباب الايونات الموجبة الشحنة.**

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

• بين بالتفصيل نموذج الالكترون الحر

- تكون الكترونات التوصيل حرة الحركة في باطن المعدن ولكن عند السطح الخارجي لمعدن تتعرض الى جهد خارجي او حاجز خارجي يدعى بحاجز الجهد Potential Barrierحيث يعمل على حجز حركة الالكترونات وتقيدها ، ولغرض قذف الإلكترون إلى خارج سطح المعدن يتطلب طاقة ،عليه فان الحركة الحرة للالكترونات تقتصر على باطن المعدن بعيدا عن سطحه.ولتمثل بالشكل(١).



الشكل(١)

تمثل المنطقة المظللة مستويات طاقة مستمرة تقابل (جميع الطاقات الحركية من الصفر الى Eo) وقد تراكبت فوق طاقة كامنة ممثلة بوساطة المستوى A. المستوى B يمثل طاقة الكترون في الفراغ خارج سطح المعدن .

($E_o+\varphi$):الفرق بين المستويين A و B هو الجهد داخلي Inner Potential للمعدن وهو يمثل التغير في الطاقة الكامنة لإلكترون عند مروره عبر حد فاصل بين المعدن والفراغ الخارجي.

ومن اجل ان تتحرك الالكترونات بحرية في الفراغ خارج المعدن لابد من امتلاكها اعظم طاقة حركية E_oومن ثم اكتسابها لطاقة تعرف بدالة الشغل وهي اقل طاقة اضافية يجب منحها لتلك الإلكترونات لكي ترتفع الى المستوى B او اعلى منه.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- **التفسيرات والمبررات التي وضعت من قبل نموذج الالكترون الحر حول ضعف التفاعل بين الكترونات التوصيل ولباب الأيونات الموجبة هي:**

- **أولا : على الرغم من تفاعل الكترون التوصيل مع لب الأيون الموجب من خلال التجاذب الكولومبي فأن التأثيرات الكمية تقدم جهداً تنافريا اضافيا يحاول اضعاف التجاذب الكولومبي ،وان الجهد الصافي يعرف بالجهد الكاذب Pseudo Potential.**

- **ثانيا :عندما يجتاز الالكترون ما أي أيون فأن سرعة الالكترون تزداد زيادة سريعة ،لأن اقترابه كثيرا من أيون يسبب نقصانا في جهده ولهذا السبب يقضي الالكترون فترة زمنية قصيرة من وقته قرب الأيون ،حيث يكون جهد الأيون في تلك المنطقة قويا جدا.وهذا يعني ان إلكترون التوصيل يقضي معظم وقته بعيدا عن الأيون الموجب في مناطق حيث يكون الجهد ضعيفا وهذا ما يجعلنا نعتقد بأن إلكترون التوصيل يتصرف بوصفه جسيما حرا الى حد ما.**

- **ثالثا :ان التفاعل بين الكترون التوصيل وأيون موجب يكون ضعيفا جدا عندما تكون المسافة بينهما كبيرة،لأن الأيونات تكون قد حجبت أو سترت Screened بواسطة بقيت الالكترونات أي ان التفاعل يكون بصيغة جهد كولوم المحجوب ذو المدى القصير وليس بصيغة جهد كولوم التام ذو المدى الطويل.**

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- **أما التفسيرات والمبررات التي قدمها نموذج الإلكترون الحر حول ضعف التفاعل بين الكترونات التوصيل انفسها فتكون بالشكل التالي:**

- **أولا :ان الإلكترونات ذات برومات Spins متوازية تميل الى البقاء بعيدة بعضها عن بعض بموجب قاعدة پاولي للاستبعاد.**

- **ثانيا :ان الالكترونات ذات البرومات المتعاكسة تفضل البقاء بعيدة بعضها عن بعض لكي تنخفض طاقة المنظومة الى الحد الأدنى ،لأن الاقتراب الشديد لإلكترون من الكترون آخر يجعل الطاقة الكامنة الكولومبية كبيرة بصورة مفرطة ، وهذا يسبب انتهاكا لنزعة المنظومة لامتلاك أوطأ طاقة ممكنة.**

- **ثالثا :ان التصادم بين الالكترونين يستوجب وجود حالتين شاغرتين قبل حدوث التصادم،وهذه الحالتين تكون موجودة في قشرة عرضها (K_BT)،وأن حدوث التصادم بعيدا عن هذه القشرة غير وارد لكون الحالات البعيدة عن القشرة(قشرة فيرمي)تكون مملوءة بالالكترونات .**

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- ان معدل الطاقة الحركية لكل الكترون في توزيع ماكسويل – بولتزمان يساوي :

$$\frac{3}{2}K_B T = \frac{1}{2}m(S_{RMS})^2 \quad \text{....(13)}$$

- جذر متوسط مربع السرع للاكترون

$$S_{RMS} = \left(\frac{3K_B\ T}{m}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{....(14)}$$

- حيث ان الانطلاق الاكثر احتمالا للاكترون :

$$S_{MPS} = \left(\frac{2K_B\ T}{m}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{....(15)}$$

- وجد عند درجات الحرارة الاعتيادية أن قيمة جذر متوسط مربع السرع حوالي $10^5\ m/s$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

الخواص الكهربائية للمواد الصلبة

- **المواد الصلبة : هي عبارة عن تجمع او تراص عدد كبير من الذرات المرتبة بشكل هندسي معين يعرف بالبلورة وتختلف هذه الذرات باختلاف العناصر الكيميائية للمادة المكونة لها،تتراوح انصاف اقطار الذرات من $0.46\ A^{O}$ الى $3.0\ A^{O}$.**

- **عناصر المادة الصلبة تحتوي على جسيمات مشحونة : أيونات موجبة ،أيونات سالبة (الكترونات) ، تعد الجسيمات قبل التأثير عليها ذات حركة عشوائية وعند التأثير عليها تصبح ذات حركة اتجاهية.**

ومن اهم العوامل التي تؤثر على حركة الجسيمات المشحونة :

- **طاقة الكترونات التكافؤ الموجودة في الغلاف الخارجي للذرة.**
- **حركة برم الالكترونات في الذرة.**
- **الاعاقة الكهربائية التي تصاحب المجال الكهربائي والتخلف المغناطيسي المصاحب للمجال المغناطيسي.**
- **البنية البلورية للمادة الصلبة.**

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- **الكترونات التكافؤ والكترونات التوصيل**
- **الكترونات التكافؤ :هي تلك الإلكترونات التي تشغل القشرة الخارجية للذرة وتستعمل لربط الذرات بعضها ببعض لتشكيل جزيئة أو بلورة ،ويختلف عدد الكترونات التكافؤ من عنصر إلى أخر ويكون بشكل عام اقل من العدد اللازم لإشباع أو ملء القشرة الخارجية للذرة الحرة، و تكون مسئولة عن الصفات الكيميائية .**

ملاحظة :عند تقريب الذرات الحرة بعضها من بعض لتشكيل مادة في حالة الصلابة تتراكب الذرات المجاورة او تتشابك بحيث ان الكترون التكافؤ لذرة ما لم يعد مقيدا للذرة الام بل يكون منتميا للبلورة الكاملة .

الكترونات التوصيل :هي الكترونات ناشئة عن الكترونات التكافؤ للذرات المتشابكة، وتكون حرة التنقل من أيون ما الى أيون اخر،وتستطيع حمل التيار الكهربائي (لذلك سميت بحاملات التيار) تحت تأثير مجال كهربائي خارجي ، تكون مسئولة عن معظم صفات المادة الصلبة.

عدد الكترونات التوصيل لوحدة الحجم =عدد الكترونات التكافؤ لذرة منفردة x عدد الذرات لوحدة الحجم

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- التوصيل الكهربائي للمواد الصلبة :يعرف على انه قابلية انتقال الشحنة الكهربائية من موقع الى آخر في تلك المادة،تعتمد حركة الشحنة الكهربائية على نوع المادة الصلبة .
- تكون الشحنات الكهربائية على هيئة :
- الكترونات : تتكون من الكترونات حرة Free Electrons ذات شحنة سالبة .
- فراغات الكترونية : عبارة عن نقص في الشحنة السالبة ضمن البنية البلورية، تتكون من فجوات Holes ذات شحنة موجبة .

- تنشأ في البنية البلورية ذات الأواصر التساهمية عند فقدان احد الكترونات المزدوج الالكتروني للآصرة التساهمية .
- تنشأ في المواد ذات الأواصر الأيونية عند كسر الآصرة الأيونية .

في التوصيل الأيوني :يكون الوسيط الحامل للشحنات المنقولة اما أيونات موجبة او أيونات سالبة.

اما في التوصيل الالكتروني: فالالكترونات هي وسيط النقل.

ويرمز لمعامل التوصيل الكهربائي (التوصيلية) (σ)الذي هو حاصل ضرب عدد حاملات الشحنة (n) ومقدار الشحنة (q)التي يحملها الحامل الواحد وتحركية (μ)حاملات الشحنة اي ان :

$$\sigma = nq\mu$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

تصنف المواد الصلبة بموجب معاملات توصيلها الكهربائي الى ثلاثة اصناف :

- الموصلات Conductors :هي مواد جيدة التوصيل الكهربائي وهي مواد فلزية مثل (الذهب،الفضة ،النحاس،الالمنيوم....) يكون معامل التوصيل الكهربائي لها بحدود $10^{7}(\Omega.m)^{-1}$.

- أشباه الموصلات Semiconductors:هي مواد عازلة عند درجة حرارة الصفر المطلق وموصلة بشكل ضعيف عند درجة حرارة الغرفة مثل (السيلكون ،الجرمانيوم ،كبريتيد الخارصين) يكون معامل التوصيل الكهربائي لها بحدود $10^{2}(\Omega.m)^{-1}$.

- العوازل Insulators :هي مواد رديئة التوصيل الكهربائي او عازلة كهربائيا مثل (الأبونيت،المطاط،البلاستك،الزجاج،الخزف) يكون معامل التوصيل الكهربائي لها بحدود $10^{-8}(\Omega.m)^{-1}$.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- **الذرة المعدنية** :هي ذرة يحوي مدارها الخارجي عددا قليلا من نسبيا من الكترونات ذات ارتباط ضعيف بنواتها ولذلك تستطيع الهروب من تلك الذرة بسهولة أي إن طاقة تأينها واطئة نسبيا.
- **المعدن الصلب** :هو مادة ذات لمعان معدني وذات كثافة عالية وجيدة التوصيل للحرارة والكهربائية،و يقل عامل التوصيل الكهربائي لها مع ارتفاع درجة الحرارة .
- يتكون المعدن الصلب من صفوف مرتبة لايونات موجبة الشحنة (كاتيونات) مرتبة داخل بحيرة من الإلكترونات السالبة الشحنة (أنيونات) المهاجرة من ذراتها والتي تكون مسئولة عن القابلية العالية جدا للتوصيل الكهربائي والحراري للمعادن الصلبة .

الخواص الشائعة للفلزات :

- التوصيل الكهربائي والحراري الجيد.
- المتانة العالية.
- العاكسية الضوئية المسئولة عن تميز الفلزات بمظهرها البراق.

عدد الكترونات التوصيل في فلز في وحدة الحجم (تركيز):

$$n = Z\left(\frac{\rho}{M}\right)N_A$$

- Z:العدد الذري للفلز ،M:الوزن الذري للفلز ،ρ :كثافة الفلز، N_A:عدد افوكادرو (6.0225×10^{23}) ذرة لكل مول.

تمرين: اذا كانت كثافة النحاس (8.95×10^{3} كغم لكل متر مكعب) واذا علمت أن المقاومية الكهربائية (1.55×10^{3} أوم .متر) فاحسب (١) تركيز الكترونات التوصيل .(٢) تحركية الألكترونات.

مساعدة للحل : من الجدول الدوري اجلب قيم (Z، M:لفلز النحاس) يمكن حساب التركيز ومن معرفة شحنة الالكترون وقلب المقاومية نستطيع ايجاد التحركية.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- **الغاز الإلكتروني الحر :هو غاز افتراضي يتكون من الكترونات التوصيل حرة الحركة داخل البلورة ،وهذا يعني عدم تعرضها لأي نوع من الاصطدام (عدا اصطدامها مع سطح البلورة وانعكاسها منه) .**

وهذا يشبه حركة ذرات غاز مثالي ولذلك يطلق على الإلكترونات التوصيل مصطلح ((الغاز الالكتروني الحر Free Electron Gas)).

- **ما الفرق بين الغاز الالكتروني الحر في معدن عن جزيئات الغاز؟**

- **أولا:يكون الغاز الإلكتروني الحر ذا شحنة سالبة بينما تكون جزيئات الغاز الاعتيادية متعادلة الشحنة ،**
- **ولذلك يمكن اعتبار الغاز الإليكتروني الحر في معدن مثل:**
- **(البلازما) وهي مادة عالية التأين فيها أعداد متساوية من النويات الذرية المؤبنة والالكترونات الطليقة.**

- **ثانيا: يكون تركيز الالكترونات في المعدن كبيرا جدا (حوالي 3×10^{28} إلكترون لكل متر مكعب) ،**
- **بينما يكون تركيز الغاز الاعتيادي (حوالي 10^{25} جزيئة لكل متر مكعب).**

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

اسئلة للمراجعة

- (س١):ما هي العوامل التي تؤثر على الحركة العشوائية للجسيمات المشحونة.
- (س٢): ميز بين الكترونات التكافؤ والكترونات التوصيل .
- (س٣): ميز بين نوعي حاملات الشحنة (الالكترونات الحرة وبين الفجوات).
- (س٤): عرف التوصيل الكهربائي ثم صنف المواد الصلبة تبعا لمعامل توصليها الكهربائية.
- (س٥): عرف ما يأتي : الكاتيونات ، الآنيونات ،الذرة المعدنية ،المعدن الصلب ، الغاز الالكتروني الحر.
- (س٦): ماهي الخواص الشائعة للفلزات.
- (س٧):ما هي الصيغة الرياضية لتركيز الكترونات التوصيل (عدد الالكترونات لوحدة الحجم).
- (س٨): ما الفرق بين الغاز الالكتروني الحر في معدن عن جزيئات الغاز؟
- (س٩):ذا كانت كثافة النحاس ($8.95x10^{3}$ كغم لكل متر مكعب) واذا علمت أن التوصيلية الكهربائية $2.9x10^{-5}$ لكل أوم .مترفاحسب (١) تركيز الكترونات التوصيل .(٢) تحركية الألكترونات.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com