

خواص مغناطيسية وخواص العازل Magnetic and Dielectric Properties

(٩, ١) مقدمة

Introduction

إحدى نتائج تقارب الذرات في العازل هي أن خواص الذرات المختلفة أو الجزيئات يمكنها التفاعل بشكل تعاوني لكي تنتج تأثيرات غير موجودة في الموائع. إحدى الأمثلة المعروفة جيداً هي الفرومغناطيسية Ferromagnetic في قطعة من الحديد تستخدم كمغناطيس على سبيل المثال. تتراصف مغناطيسية ذرات الحديد لكي تنتج تأثيراً مغناطيسياً قوياً. تؤدي تأثيرات مغناطيسية تعاونية أخرى إلى تلاشي (فرومغناطيسية مضادة أو عكس فرومغناطيسية anti-ferromagnetic) أو تلاشي جزئي (مغناطيسية فريتية ferrimagnetism) في المغناطيسية للذرات المختلفة. تكون للفرومغناطيسية والمغناطيسية الفريتية تطبيقات تجارية عديدة من إبر البوصلات ومغناطيسيات الساعات إلى أشربة الفيديو وأجهزة ذاكرة الحاسوب.

لا تتقيد التأثيرات التعاونية بالمغناطيسية فقط؛ يمكن حدوث تأثيرات مماثلة لاستجابة البلورة إلى الإجهاد الميكانيكي والمجالات الكهربائية. يكون النظر الكهربائي للفرومغناطيسية تأثيرات فركهربية ferroelectric التي تظهر فيها المادة استقطاباً كهربائياً كلياً، فصل للشحنة. تكون المواد كهربية مهمة في صناعة الإلكترونيات مثل المكثفات (لتخزين الشحنة) والترانزستورات (لتحويل الطاقة فوق الصوتية إلى طاقة كهربية). تكون البلورات الفركهربية فئة ثانوية من البلورات الكهروضغطية (الكهربية الضغطية) piezoelectric. وتكون للبلورات الكهروضغطية استخدامات تجارية تخصها. على سبيل المثال، تستخدم كوارتز الساعات بلورات كوارتز كهروضغطية كمولدات للذبذبة.

يناقش هذا الفصل أنواع المواد التي تظهر خواص مغناطيسية وخواص عازل. لكي نبدأ، على أية حال، سوف ندرس التأثيرات المغناطيسية الأضعف التي يمكن أن تكون موجودة في كل أنواع المادة. من ثم نناقش أصل

التأثيرات المغنطيسية التعاونية، بدءًا من تأثيرات الكهربية الضغطية piezoelectric effect وتطبيقاتها من ثم نعتبر المواد الفروكهربية بصفة خاصة تيتانات الباريوم الأكسيدية أو أكسيد تيتانات الباريوم ($BaTiO_3$) التي تستخدم على نطاق واسع كمكثف.

(٩,٢) القابلية المغنطيسية

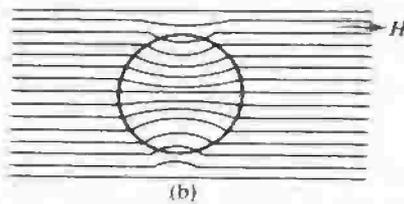
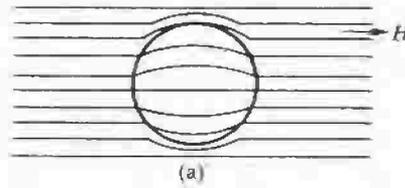
Magnetic Susceptibility

يتنج المجال المغنطيسي خطوط قوى تتغلغل في الوسط الذي يطبق عليه المجال. تظهر خطوط القوة هذه، على سبيل المثال، عند تشتت برادة الحديد على قطعة من ورق تعطى مغنطيس على هيئة قضيب. تعرف كثافة خطوط القوة هذه على أنها كثافة الفيض المغنطيسي magnetic flux density في الفراغ، يرتبط المجال المغنطيسي وكثافة الفيض المغنطيسي بالانفاذية المطلقة في الفراغ μ_0 .

$$(٩,١) \quad B = \mu_0 H$$

لو وضعت مادة مغنطيسية في المجال، فيمكنها أن تزيد أو تنقص كثافة الفيض. تختزل المواد الدايمغنطيسية كثافة خطوط القوة كما هو موصوف في الشكل رقم (٩,١). تزيد المواد البارامغنطيسية كثافة الفيض. يُعرف مجال العينة في المجال المغنطيسي المطبق على أنه مغنطيسيتها M , Magnetisation، يُعطى كثافة الفيض المغنطيسي بالمعادلة (٩,٢).

$$(٩,٢) \quad B = \mu_0 (H+M)$$



الشكل رقم (٩,١). كثافة فيض في (a) عينة دايمغنطيسية (b) عينة بارامغنطيسية.

تناقش المغناطيسية عادة في حدود القابلية المغناطيسية χ magnetic susceptibility حيث $\chi = M/H$.

توجد الدايا مغناطيسية في جميع المواد، لكنها تكون ضعيفة جداً بحيث لا يتم ملاحظتها عادة في وجود تأثيرات أخرى. يتم إنتاجها بدوران الإلكترونات في ذرة أو جزيء. تكون الذرات أو الجزيئات بمدارات مغلقة من الإلكترونات دايا مغناطيسية. تكون الإلكترونات المنفردة باعثة على البارامغناطيسية. يوجد السلوك البارامغناطيسي للمواد مثل الأكسجين السائل أو معقدات العناصر الانتقالية التي تكون فيها الإلكترونات لمنفردة على مراكز مختلفة معزولة عن بعضها البعض. في مجال مغناطيسي تتجه العزوم المغناطيسية على مراكز مختلفة للترانصف مع المجال ومن ثم مع بعضها البعض، لكن يكون هذا معاكسا للتأثير العشوائي من الطاقة الحرارية وفي غياب مجال، تترانصف الإلكترونات المنفردة على مراكز مختلفة بشكل عشوائي. يؤدي التأثير المتبادل للمجال المطبق والتوزيع العشوائي الحراري إلى الاعتماد على درجة الحرارة الموصوف بقانون كيوري Curie law:

$$(٩,٣) \quad \chi = \frac{C}{T}$$

حيث χ هي القابلية المغناطيسية، C مقدار ثابت يعرف على أنه ثابت كيوري، و T هي درجة الحرارة بالكلفن. اعتماداً مختلفاً على درجة الحرارة يتم ملاحظته عندما يكون هناك سلوك تعاوني. يكون التحول من سلوك الاستقلال إلى السلوك التعاوني مصحوباً بدرجة حرارة مميزة للفرومغناطيسية ليصبح قانون كيوري:

$$(٩,٤) \quad \chi = \frac{C}{T - T_C}$$

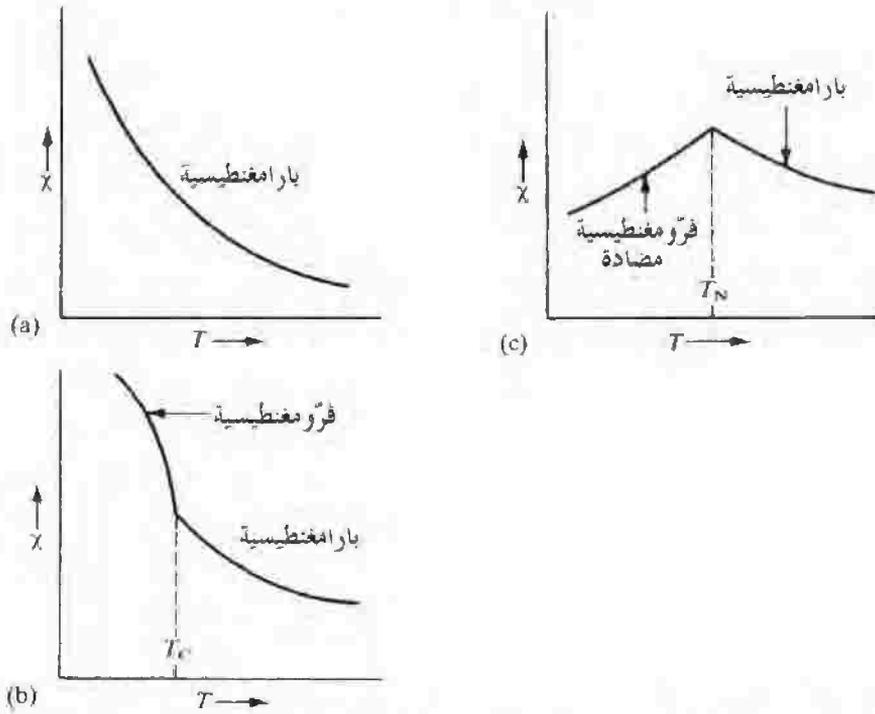
حيث T_C هي درجة حرارة كيوري Curie temperature. للفرومغناطيسية المضادة يكون الاعتماد على درجة الحرارة في الشكل:

$$(٩,٥) \quad \chi = \frac{C}{T + T_N}$$

حيث T_N هي درجة حرارة نيل Néel Temperature يصف الشكل رقم (٩,٢) هذين السلوكين.

يكون للمغناطيسية الفريمية شكل أكثر تعقيداً في الاعتماد على درجة الحرارة مع أيونات عند مواضع مختلفة يكون لها درجات حرارة مميزة مختلفة.

يُدرّج الجدول رقم (٩,١) خصائص الأنواع المتنوعة من المغناطيسية التي سوف نهم بها.



الشكل رقم (٩،٢). تغير قابلية مغناطيسية مع درجة الحرارة لـ (a) مادة بارامغناطيسية (b) مادة فرّومغناطيسية و(c) مادة فرّومغناطيسية مضادة (عكس فرّومغناطيسية).

الجدول رقم (٩،١). خصائص أنواع التمثنط.

النوع	علامة χ	قيمة χ النموذجية (محسوبة باستخدام وحدات SI)	اعتماد χ على H	تغير χ مع زيادة درجة الحرارة	الأصل
الدايامغناطيسية	-	$(1-600) \times 10^{-5}$	غير معتمدة	لا يوجد	شحنة إلكترون
بارامغناطيسية	+	0-0.1	غير معتمدة	تتناقص	الحركة المغزلية والمدارية للإلكترونات والذرات المفردة
فرّومغناطيسية	+	10^{-7} -0.1	معتمدة	تتناقص	تداخل تعاوني بين العزوم المغناطيسية
فرّومغناطيسية مضادة	+	0-0.1	قد تكون معتمدة	تتزايد	لذرات مفردة
بارامغناطيسية باولي	+	10^{-5}	غير معتمدة	لا يوجد	حركة مغزلية ومدارية للإلكترونات غير متمركزة

(٩,٣) البارامغناطيسية في معقدات الفلز

Paramagnetic in Metal Complexes

في المواد الصلبة المحتوية على معقدات لفلز تلك التي تكون فيها الإلكترونات غير المقترنة (المنفردة) على ذرات الفلز المختلفة معزولة بشكل فعال، يمكن مناقشة القابلية في ضوء العزم المغناطيسية. يمكن التفكير في معقد فلز معزول على أنه مغناطيس صغير. كل معقد في مادة صلبة سوف ينتج مجاله المغناطيسي الخاص به بسبب الإلكترونات المنفردة. لو أن المادة الصلبة تتكون من نوع واحد من المعقدات، من ثم ينتج كل معقد نفس قيمة المجال المغناطيسي. من ناحية ثانية، تتسبب الحركة الحرارية في عشوائية توجه هذه المجالات في قانون كيوري (المعادلة ٩,٣) يكون الاعتماد على درجة الحرارة نتيجة لهذه الحركة الحرارية، لكن يعطي الثابت C معلومات عن قيمة المجال المغناطيسي المعروف على أنه العزم المغناطيسي μ magnetic moment للمعقد. لا يتغير العزم المغناطيسي على خلاف القابلية عادة مع درجة الحرارة. تكون الكمية χ اللابعدية في المعادلة (٩,٣) هي القابلية لوحدة الحجم. لكي نحصل على حجم المجال المغناطيسي بسبب معقد منفرد، نقسم χ على الوزن النوعي لكي تعطى القابلية لوحدة الكتلة من العينة ومن ثم نضرب في الكتلة الجزيئية النسبية لكي نحصل على القابلية المولارية χ_m . بافتراض أن كل معقد يكون له عزم مغناطيسي M وأن ذاك الاتجاه يكون عشوائياً بحركة حرارية، فإنه بالإمكان أن نوضح أن χ_m تتناسب مع μ^2 كما في المعادلة (٩,٦):

$$(٩,٦) \quad \chi_m = \frac{N_A \mu_0}{3kT} \mu^2$$

حيث N_A هو عدد أفوجادرو، Avogadro's number، k هو ثابت بولتزمان Boltzman's constant، μ_0 هي الأنفاذية المطلقة في الفراغ و T هي درجة الحرارة بالكلفن. في وحدات SI تكون χ_m بوحدة $\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$ والعزم المغناطيسي بالجول لكل تسلا (J T^{-1}). من العادة أن نستشهد μ بوحدة مغنيطونات بوهر Bohr magneton (μ_B أو B.M.) حيث يكون لكل مغنيطون بوهر قيمة $9.274 \times 10^{-24} \text{ J T}^{-1}$.

يكون العزم المغناطيسي μ نتيجة لكمية الحركة الزاوية (العزم المداري) للإلكترونات المنفردة. تمتلك الإلكترونات كلاً من كمية حركة مغزلية وكمية حركة زاوية. لعناصر الصف الأول الانتقالية يكون الإسهام من كمية الحرارة الزاوية مختزلاً بشكل كبير أو "مخمد" بسبب الانحلال المتماثل الخاسي لمدارات 3d. في معقدات هذه الذرات يكون العزم المغناطيسي غالباً قريباً إلى تلك القيمة المستنبطة لكمية الحركة الزاوية المغزلية فقط (معادلة ٩,٧):

$$(٩,٧) \quad \mu_s = g\sqrt{S(S+1)}$$

حيث g مقدار ثابت، للإلكترون حر تكون له القيمة 2.0023 وتكون μ_B بمغنيطونات بوهر.

تعتمد قيمة S على عدد الإلكترونات المنفردة ويعطي الجدول رقم (٤،٢) قيم S و μ_B للأعداد المحتملة من الإلكترونات 3d المنفردة.

تُحدث الإسهامات من كمية الحركة الزاوية المدارية انحرافات عن هذه القيم. للمعقدات التي تحتوي على أيونات فلز أثقل، يكون تداخل كميتي الحركة المغزلية والمدارية أكبر. للانثيدات يعتمد العزم المغنطيسي على كمية الحركة المدارية الكلية للإلكترونات، J ، ليس فقط أو بالضبط على كمية الحركة المغزلية. تكون كمية الحركة المدارية الكلية J ناتجة عن مجموع كمية الحركة الزاوية المدارية L والزاوية المغزلية S .

$$(٩،٨) \quad J = L + S$$

الجدول رقم (٩،٢). قيم S و μ_B للإلكترونات 3d غير مقترنة.

عدد الإلكترونات غير المقترنة	عدد الكم المغزلي، S	العزم المغنطيسي μ_B بوحدات مغنيطون بوهر
1	$\frac{1}{2}$	1.73
2	1	2.83
3	$\frac{3}{2}$	3.87
4	2	4.90
5	$\frac{5}{2}$	5.92

لو أن J هي رقم الكم لكمية الحركة الزاوية الإلكترونية الكلية، من ثم يُعطى العزم المغنطيسي بالمعادلة:

$$(٩،٩) \quad \mu = g\sqrt{J(J+1)}$$

حيث:

$$(٩،١٠) \quad g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

يكون هذا باعثاً على عزوم مغنطيسية كبيرة خاصة للمدارات التي تكون أكثر من نصف ممتلئة. على سبيل المثال، يكون لأيون Tb^{3+} تشكيل f^8 9.72 مغنيطونات بوهر من المعادلة (٩،٩).

(٩, ٤) الفلزات الفرومغناطيسية

Ferromagnetic Metals

عند مناقشة التوصيل الكهربى للفلزات، تم وصفها في ضوء لُب أيونية وإلكترونات تكافؤ غير متمركزة. تساهم إلكترونات اللب (الإلكترونات في المدارات الداخلية) بحد دايامغناطيسي في القابلية المغناطيسية، لكن يمكن لإلكترونات التكافؤ أن تنشأ عنها بارامغناطيسية أو واحدة من التأثيرات التعاونية التي وصفناها.

عند ملء نطاق التوصيل، فقد وصفنا ضمناً الإلكترونات في مستويات طاقة بغزل مقترن. حتى في الحالة الأرضية للجزيئات البسيطة مثل O_2 ، من ناحية ثانية، قد يكون أكثر ملاءمة أن يكون لدينا إلكترونات في مدارات مختلفة بغزل متوازٍ عن كونها في نفس المدار بغزل مقترن. يحدث هذا عندما تكون هناك مستويات متماثلة في الطاقة أو قريبة من التماثل. في نطاق الطاقة، يوجد عديد من المستويات المتماثلة في الطاقة، أيضاً مستويات عديدة قريبة في الطاقة من مستوى الطاقة الأعلى المشغول. لهذا قد يكون من الملائم أن نخترل تنافر الإلكترون بامتلاكنا إلكترونات في مستويات مشغولة أحادياً بغزل متوازٍ قريبة من مستوى فرمي Fermi. لكي نحصل على تأثير يمكن قياسه، ينبغي لعدد الغزول المتوازية أن تقارن بعدد الذرات: لا يتم ملاحظة 10^3 غزول غير متوازية في عينة تحتوى على 10^{23} ذرة، إلا إذا كانت كثافة الحالات عالية جداً بالقرب من مستوى فرمي، فإن عدداً كبيراً من الإلكترونات سوف يرتقي إلى مستويات طاقة أعلى في النطاق لكي يمكن إحراز عدد يمكن قياسه من الغزول المنفردة. سوف تكون طاقة الترقى الناتجة كبيرة جداً لكي يتم تعويضها بالفقد في تنافر الإلكترون. في النطاقات الواسعة من الفلزات البسيطة، تكون كثافة الحالات نسبياً منخفضة، بحيث ترتقي بعض الإلكترونات في غياب مجال مغناطيسي.

عند تطبيق مجال مغناطيسي، سوف تكسب الإلكترونات حد طاقة إضافي بسبب تداخل غزولها مع المجال. لو أن الغزل يكون موازياً للمجال، من ثم فإن طاقته المغناطيسية تكون سالبة (أي أن الإلكترونات تكون عند طاقة أقل عما كانت في غياب المجال). للإلكترون بغزل موازٍ مضاد أو عكسياً للمجال، فإنه يكون من الجدير بالاهتمام الآن أن يذهب إلى حالة طاقة أعلى ويغير اتجاه الغزل طالما أن طاقة الترقى لا تكون أكثر من الزيادة في الطاقة المغناطيسية. سوف ينتج هذا عدم توازن محسوس لغزول الإلكترون المتراصفة مع المجال وضده ومن ثم تظهر المادة الصلبة البارامغناطيسية. يعرف هذا النوع من البارامغناطيسية على أنه بارامغناطيسية باولي Pauli paramagnetic. إنه تأثير ضعيف جداً الذي يعطي قابلية مغناطيسية أقل بكثير من البارامغناطيسية المناقشة في المقطع ٩,٣ (انظر الجدول رقم ٩,١).

فلزات قليلة جداً، يمكن للإلكترونات المنفردة، من ناحية ثانية، أن تؤدي إلى الفرومغناطيسية. في كل الجدول الدوري يملك الحديد، الكوبالت، النيكل وبعض اللانثينيدات (Gd, Tb) فقط هذه الخاصية. لذلك، ما هو الشيء الخاص جداً لهذه العناصر التي يكسبها هذه الخاصية المنفردة؟ إنه ليس تركيبها البلوري؛ لكل منها تركيب مختلف وتكون التراكيب مماثلة لتلك الفلزات الأخرى ذات الفرومغناطيسية المضادة. يكون للكوبالت، الحديد والنيكل نطاق 3d ضيق ممتلئ تقريباً.

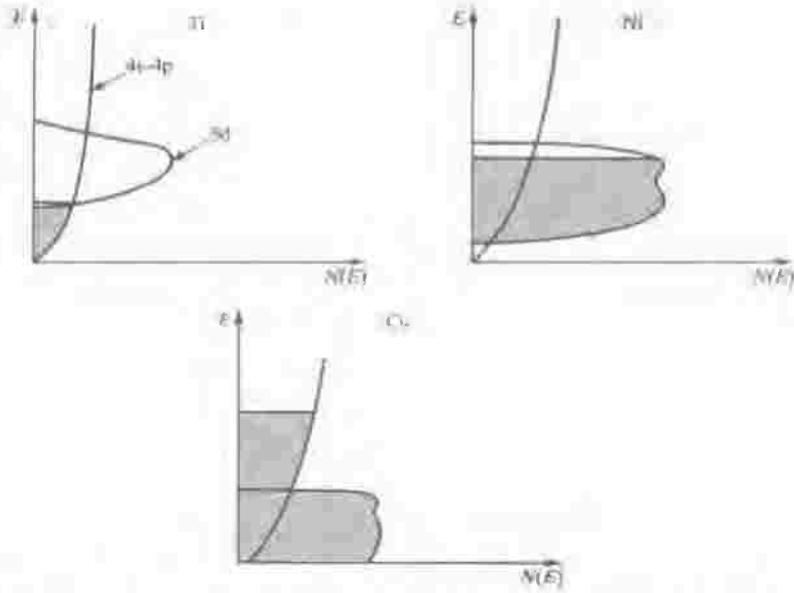
تكون مدارات 3d أقل انتشاراً من 4s و 4p (أي تكون متمركزة أقرب للنواة الذرية). يؤدي هذا إلى تلاحم أقل بحيث يكون نطاق 3d أضيق بكثير من نطاق 4s/4p. أكثر من ذلك، تكون خمس مدارات 3d موجودة، بحيث يكون لبلورة بعدد N من الذرات، لا بد من 5N من المستويات يتم تسكينها. مع إلكترونات أكثر ونطاق ضيق، لا بد لمتوسط كثافة الحالات أن تكون أعلى بكثير من نطاقات ns/mp. بصفة خاصة تكون كثافة الحالات القريبة من مستوى فرمي عالية، في هذه الحالة، يكون من الأفضل من حيث الطاقة أن يكون لها أرقام أساسية من الإلكترونات المنفردة على حساب تعدد مستويات الطاقة الأعلى. وهكذا، يكون لهذه العناصر عدد كبير من الإلكترونات غير المنفردة حتى في غياب مجال مغناطيسي. للحديد، على سبيل المثال، يكون لبلورة بعدد N من الذرات حتى 2.2N من الإلكترونات المنفردة موجودة بمغزلية متراصة بالتوازي. لاحظ التناقض مع المادة البارامغناطيسية التي تحتوي على أيونات معقد فلز انتقالي حيث يمكن لكل أيون أن يكون له حتى خمسة إلكترونات منفردة، ولكن في غياب المجال المغناطيسي تراصف الإلكترونات على الأيونات المختلفة عشوائياً.

هكذا تنشأ الفرومغناطيسية من تراصف غزول الإلكترون في جميع أنحاء المادة الصلبة ويحدث بصفة خاصة للنطاقات الممتلئة جزئياً بكثافة حالات عالية بجوار مستوى فرمي. تكون مدارات 4d و 5d أكثر انتشاراً عن 3d وتنتج نطاقات أوسع بحيث لا تلاحظ الفرومغناطيسية في العناصر الانتقالية من الصف الثاني والثالث. تصبح مدارات 3d نفسها أقل انتشاراً غير السلاسل الانتقالية و أقل في الطاقة. في التيتانيوم تكون إلكترونات التكافؤ في نطاق 4p / 4s بكثافة حالات منخفضة وعلى الطرف الآخر من السلسلة، في النحاس يسقط نطاق 3d في الطاقة بحيث يكون مستوى فرمي في نطاق 4p / 4s. هكذا، فإنه فقط في وسط السلسلة تكون مستوى فرمي في منطقة كثافة حالات عالية. يعطي الشكل رقم (٩،٣) مخططات نطاق لـ Ti، Ni و Cu. يشير التظليل إلى المستويات المشغولة.

تؤدي كثافة الحالات العالية الموجودة في نطاق 3d من Fe، Co و Ni إلى اختزال متوسط المسار الحر للإلكترونات في هذا النطاق. ينشأ عن هذا نقص في تنقلتها ومن ثم في الموصلية الكهربية لهذه العناصر مقارنة مع فلزات بسيطة والنحاس حيث تكون إلكترونات التوصيل في نطاقات s/p.

لا تكون العناصر النقية عادة مناسبة لتطبيقات تتطلب فرومغنطيسية فلز وعديد من السبائك الفرومغنطيسية قد تم إنتاجها. تحتوي بعضاً من هذا في عنصر فرومغنطيسي أو أكثر وبين هذا سبائك الحديد، الكوبالت والنيكل مع اللانثينيدات، على سبيل المثال، أنتج SmCo_5 و $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ بعضاً من المغنطيسيات الدائمة المعروفة الأكثر قوة. في سبائك اللانثينيدات، تساهم إلكترونات f في المغنطيسية. من المحتمل أن يؤدي هذا إلى تمغنط عالٍ جداً بسبب أن مدارات f السبعة تكون موجودة، ومن ثم يكون التمغنط الأقصى المحتمل مقابلاً لسبعة إلكترونات لكل ذرة. يكون الحد الأقصى للتمغنط للعناصر الانتقالية هو خمسة إلكترونات لكل ذرة، حيث توجد فقط خمسة مدارات d. عملياً لا يتم الوصول أبداً إلى الحد الأقصى هذا. في فلزات اللانثينيدات النقية، يكون التلاحم بين مدارات f صغيراً جداً بحيث يمكن اعتبارها متركزة. في اللانثينيدات الفرومغنطيسية تكون المغنطيسية ناتجة عن عدم تركز إلكترونات d. ينشأ عن التداخل بين إلكترونات d هذه وإلكترونات f المتمركزة تراصفاً للإلكترونات d و f لاختزال التنافر الإلكتروني. هكذا تكون إلكترونات f على الذرات المختلفة متراففة خلال واسطة إلكترونات d. في السبائك يمكن تراصف الإلكترونات f عن طريق إلكترونات d العنصر الانتقالي، ورغم أن ليس جميع إلكترونات d و f تكون متراففة، بالإمكان إحراز قيم عالية من المغنطيسية (التمغنط). لا يكون من المدهش أن سبائك عنصر انتقالي/ لانتيد هي مغنطيسيات قوية جداً. يمكن عمل سبائك أخرى من عناصر غير مغنطيسية مثل المغنسيوم، وفي هذه يتم تداخل مدارات d إلى المدى الضروري لحدوث الفرومغنطيسية بتغير المسافة بين الأنوية عن تلك التي في العنصر.

تعتمد فائدة مادة فرومغنطيسية معينة على عوامل مثل حجم المغنطيسية الناتجة، كيف يمكن للمادة الصلبة أن تتمغنط بسهولة وكيف يمكن إزالة مغنطيسيتها ومدى استجابتها إلى مجال مطبق. سوف يحدد عدد الإلكترونات المنفردة المجال الأقصى، لكن تعتمد العوامل الأخرى على تركيب المادة الصلبة والشوائب التي تحتويها، كما سيناقش لاحقاً.



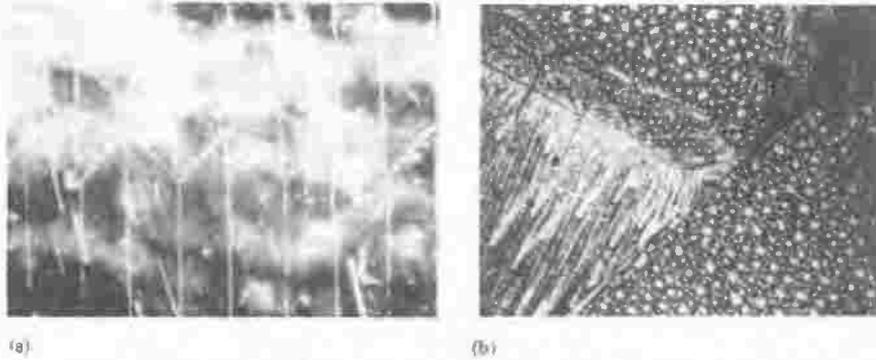
الشكل رقم (٩,٣). رسومات بيانية تخطيطية لمستوى طاقة في Ti، Ni و Cu. يمثل التظليل مستويات الطاقة المشغولة.

(٩,٤,١) نطاقات فرومغناطيسية Ferromagnetic Domains

ربما يكون قد حدث عائق للتفسير السابق بالنسبة لك. لو أن عدد $2.2 N$ من الإلكترونات قد تراصف جميعها في أي عينة من الحديد، لماذا لا تكون كل قطع الحديد ممغنطة؟ إن السبب في هذا هو أن تصورنا ينطبق فقط لأحجام صغيرة (عادة 10^{-24} إلى 10^{-18} m^3) من الفلز بداخل بلورة، تسمى نطاقات domains. خلال كل نطاق، تكون الغزول كلها متراففة، لكن تكون النطاقات المختلفة متراففة عشوائياً نسبة إلى بعضها البعض ويمكن عملياً مشاهدة هذه النطاقات خلال مجهر بواسطة نثر مسحوق جديد مجزأ بدقة على سطح مصقول من بلورة (الشكل رقم ٩,٤) ما هو السبب في تكوين هذه النطاقات؟

تتجه الغزول إلى أن تتراصف متوازية بسبب المدى القصير لتدخلات التبادل exchange interactions الناجمة عن تنافر إلكترون-إلكترون، لكن يحدث أيضاً نطاق ثنائي قطب مغناطيسي magnetic dipole أطول، الذي يميل إلى جعل تراصف الغزول مضاد التوازي. لو أنك تدرس بناء نطاق بدءاً من عدة غزول فقط، تسود تداخلات الاستبدال في الأصل، ومن ثم تقع الغزول كلها متوازية. كلما أضيفت غزول أكثر، سوف يتعرض الغزل المنفرد إلى تداخل ثنائي قطب مغناطيسي أكبر وأكبر. سوف يتغلب تداخل ثنائي القطب المغناطيسي في النهاية على تداخل التبادل ويكون لقطعة من بلورة غزول متراففة بتوازٍ مضاد للنطاق الأصلي. هكذا، بداخل النطاقات تحفظ قوى

التبادل الغزول متوازية، بينما تحفظ تداخل ثنائي القطب المغناطيسي غزول النطاقات المختلفة متراففة في اتجاهات مختلفة.



الشكل رقم (٩،٤). (a) نماذج نطاق بلورة وحيدة من الحديد تحتوي على 38% من السليكون. توضح الخطوط البيضاء الحدود بين النطاقات.

(From R.Eisberg and R. Resnick (1985) *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and*)

نماذج (b) و (*Particles*, John Wiley, New York. Courtesy of H.J. Williams, Bell Telephone Laboratories.

نطاق مغناطيسي على سطح من بلورة منفردة من الحديد. (From W.J. Moore (1967) *Seven Solid States*, W.A.

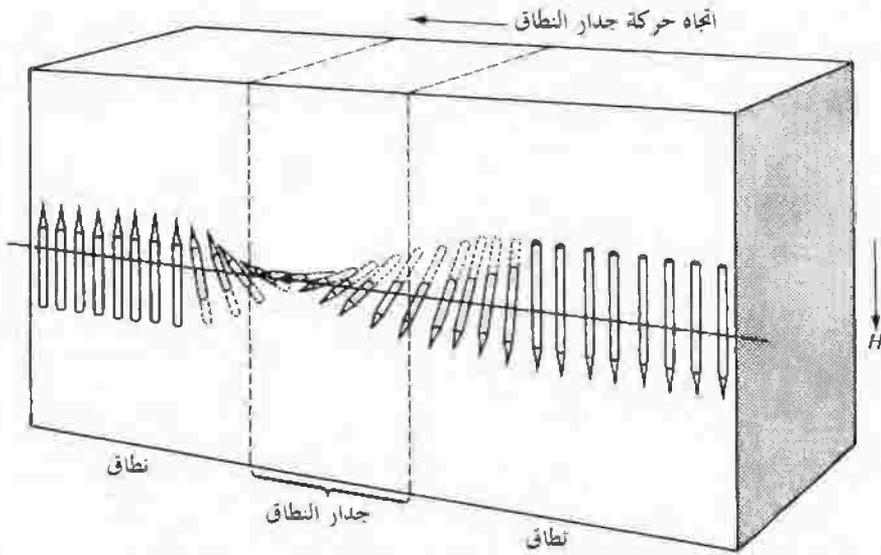
(Benjamin Inc., New York

عندما يطبق مجال مغناطيسي على مادة فرومغناطيسية، تميل النطاقات كلها إلى أن تتحد مع المجال. يتم إنجاز التراصف بطريقتين. الأولى هي نطاق بتراصف صحيح يمكن أن ينمو على حساب نطاق مجاور. توجد بين النطاقين مساحة بسمك دقيق تعرف على أنها جدران النطاق. يكون التحول من تراصف نطاق إلى تراصف النطاق التالي تدريجياً خلال هذا الجدار. عند تطبيق مجال مغناطيسي تغير الغزول في الجدار الأقرب إلى النطاق المتراصف اتجاه غزولها لكي تتحد مع جملة النطاق. ينشأ عن هذا تغير اتجاه التراصف للغزول التالية. تكون التأثيرات الخالصة هي تحرك جدار النطاق إلى الخارج أكثر كما هو موصوف في الشكل رقم (٩،٥). تكون هذه العملية انعكاسية، تعود الغزول إلى حالتها السابقة بعد إزالة المجال المغناطيسي.

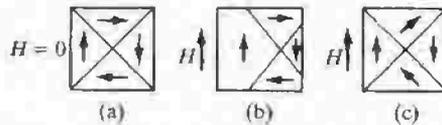
لو تواجدت شوائب أو عيوب، سيكون من الصعب للنطاق أن ينمو؛ تكون هناك طاقة تنشيط لتراصف الغزول خلال العيب، ومن ثم نكون بحاجة إلى مجال مغناطيسي أكبر. حالما يتم نمو النطاق إلى ما وراء العيب، لا يمكن من ناحية ثانية أن يتقلص خلفاً بمجرد إزالة المجال المغناطيسي بسبب أن هذا سوف يتطلب إدخال طاقة. تظل المادة الصلبة في هذه الحالة محتفظة بالتمغنط. تعتمد الكمية المحتفظ بها على نوع وعدد العيوب. هكذا يظل الصلب

(الذي هو جديد بنسبة شوائب عالية) مغنطيسياً بعد إزالة المجال، بينما يحتفظ الحديد اللين أو المطاوع (الذي هو أكثر نقاوة) بصعوبة بأي مغنطيسية.

تكون الآلية الثانية للتراسف، التي تحدث فقط في مجالات مغنطيسية قوية هي أن تفاعلات الغزول مع المجال المطبق تصبح كبيرة بالدرجة الكافية للتغلب على تداخلات ثنائي القطب وتغير كامل النطاقات من الغزول تراصفها تلقائياً. يقارن الشكل رقم (٩، ٦) بين الآليتين.



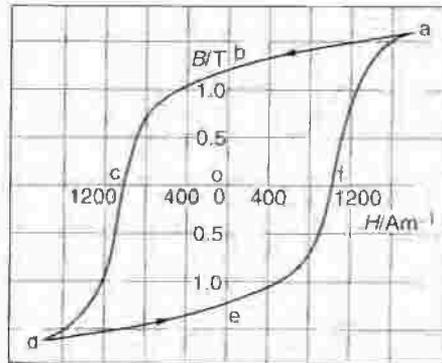
الشكل رقم (٩، ٥). تحرك جدار نطاق. توضح الخطوط المتقطعة جدار النطاق، الذي يفصل نطاقين مع عزوم مغنطيسية متصلة في الجهات متضادة. تلتوي العزوم لكي تتراسف مع المجال المطبق ويتحرك الجدار في اتجاه السهم.



الشكل رقم (٩، ٦). عملية التمتعط طبقاً إلى نموذج النطاق (a) غير ممتطة (b) ممتطة بنمو نطاق (c) ممتطة بدوران نطاق (تراسف غزل).

تنجلي الخاصية المغنطيسية للمواد الفرومغنطيسية المختلفة بمنحنيات التخلف (المغنطيسي) لها *hysteresis curves*. إن هذا هو رسم لكثافة فيض مغنطيسي B ضد مجال مغنطيسي مطبق H . لو بدأنا بعينة غير مغنطيسية التي تكون فيها كل النطاقات متراصفة عشوائياً، من ثم فإنه في غياب مجال مغنطيسي تكون B و H صفراً. كلما زاد المجال،

تزيد أيضاً كثافة الفيض. يصف الشكل رقم (٩,٧) رسم B ضد H. في البداية، يشبه المنحنى Oa التي هي ليست خطأً مستقيماً بسيطاً بسبب زيادة المغناطيسية مع المجال. عند النقطة a تصل المغناطيسية إلى قيمتها العظمى؛ تكون جميع الغزول متراصة. عند اختزال المجال المطبق لا تتبع كثافة الفيض المنحنى الابتدائي. يكون هذا بسبب صعوبة قلب أو عكس العمليات حيث تكون النطاقات قد تنامت خلال العيوب في البلورة. لا بد من تطبيق مجال كبير بدرجة كافية في الاتجاه المعاكس لكي يوفر طاقة التنشيط لإعادة التراصف خلال العيب قبل أن يكون بإمكان عملية التمتعظ أن تنعكس. لهذا عند النقطة "b" يكون H صفر، B ليست صفرأً بسبب أنه مازال هناك إسهام من التمتعظ M. يعرف التمتعظ عند هذه النقطة على أنها المغناطيسية المتخلفة remanent magnetization. يكون المجال اللازم تطبيقه في الاتجاه المعاكس لكي يختزل المغناطيسية إلى الصفر هو القوة المغناطيسية القهرية coercive force ويكون مساوياً للمسافة "oc".



الشكل رقم (٩,٧). منحنى B-H لأستيل (فولاذ) صلب نموذجي.

(٩,٤,٢) مغناطيسيات دائمة Permanent Magnets

تحتاج المواد التي تستخدم كمغناطيسيات دائماً قوة مغناطيسية قهرية كبيرة، بحيث إنه لا يكون من السهل إزالة مغناطيسيتها ومن المفضل أن يكون لها أيضاً مغناطيسية متخلفة كبيرة. يكون لهذه المواد منحنيات تخلف مسطحة. يتم عملها غالباً من سبائك من حديد، كوبالت، أو نيكل التي تتكون مع بلورات صغيرة وتشمل مساحات لا مغناطيسية بحيث يكون نمو النطاق والانكماش صعباً. تُصنع المغناطيسيات للساعات الإلكترونية على سبيل المثال من سبائك سماريوم/كوبالت. الأكثر شهرة من هذه السبائك هو SmCo_5 ، الذي له قوة مغناطيسية قهرية $6 \times 10^5 \text{ A m}^{-1}$ مقارنة بـ 50 A m^{-1} للحديد النقي.

(٩,٥) مركبات فرومغناطيسية - ثاني أكسيد الكروم

Ferromagnetic Compounds - Chromium Dioxide

يتبلور ثاني أكسيد الكروم (CrO_2) بتركيب الروتيل ويكون فرومغناطيسياً بدرجة حرارة كيوري 392 K. يكون لـ CrO_2 مدارات فلز 3d التي يمكنها أن تتلاحم لكي تكون نطاقاً. في ثاني أكسيد الكروم، من ناحية ثانية، يكون هذا النطاق ضيقاً جداً وبالتالي كمثل Fe، Co و Ni يظهر ثاني أكسيد الكروم فرومغناطيسية. يكون للأكاسيد الثنائية المتأخرة في الصف إلكترونات 3d متمركزة (مثل MnO_2) وتكون مواد عازلة أو أشباه موصلات. لا يكون لـ TiO_2 إلكترونات 3d وهو عازل. يملك VO_2 تركيباً مختلفاً عند درجة حرارة الغرفة ويكون شبه موصل. إنه يخضع، من ناحية ثانية، إلى انتقال طور إلى فلز عند 340، حيث يصبح بارامغناطيس باولي. لهذا يشغل ثاني أكسيد الكروم موقعاً فريداً بين الأكاسيد الثنائية، مشابهاً للحديد، الكوبالت والنيكل بين الصف الأول من العناصر الانتقالية، التي فيها تملك الأكاسيد الثنائية من العناصر إلى اليسار نطاقات واسعة من إلكترونات غير متمركزة ويكون للعناصر إلى اليمين أكاسيد ثنائية بإلكترونات 3d متمركزة. بسبب أن ذرات الفلز في الأكاسيد الثنائية تكون مختلفة عن الفلزات كعناصر، تقع النطاقات الضيقة الباعثة على المغناطيسية مبكرة في الصف عنها للعناصر الفلزية.

(٩,٥,١) شرائط سمعية Audio Tapes

يقع الاهتمام التجاري في CrO_2 في استخدامه كمسحوق مغناطيسي على شرائط الاستماع. يتكون شريط التسجيل عادة من شريط من البولي استر متشرب ببلورات إبرية من مادة مغناطيسية مثل ثاني أكسيد الكروم أو $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. يكون لرأس التسجيل قلب من حديد مع ملف يحيط به فجوة حيث يمر الشريط عبرها. تصطدم موجات الصوت من صوت أو موسيقى يراد تسجيلها بغشاء في الميكروفون. تتسبب اهتزازات الغشاء في جعل الملف المتصل من السلك أن يتحرك للداخل والخارج في المجال المغناطيسي. يُحدث هذا تياراً كهربياً متراوحاً في الملف؛ يعتمد التيار على تردد حركة الملف ومن ثم على تردد موجات الصوت. يمر التيار المتغير للملف على رأس تسجيل منتجاً مجالاً مغناطيسياً متغيراً في القلب الحديدي (اللين). يمغنط هذا بالتالي الدقائق على الشريط وتكون شدة واتجاه هذه المغناطيسية تسجيلاً للصوت الأصلي. لتشغيل الشريط تنعكس كل العملية.

لهذا تحتاج المواد لشرائط التسجيل أن تحتفظ بمغناطيسيتها بحيث لا يتم فقد التسجيل. هنا يساعد امتلاك بلورات إبرية متراففة مع مجال التسجيل، لكن ينبغي للمادة أن يكون لها قوة مغناطيسية قهرية عالية. يستوفي ثاني أكسيد الكروم هذه المتطلبات ويكون له مغناطيسية تعطي مدى واسعاً من الاستجابة وبالتالي يكون له جودة إعادة إنتاج عالية. يكون له بعض العيوب، من ناحية ثانية، حيث يكون له درجة حرارة كيوري منخفضة، وبالتالي يفقد التسجيل بالتسخين وهو أيضاً سام.

(٩,٦) فرومغنطيسية مضادة - أكاسيد عنصر انتقالي أحادية

Antiferromagnetism Transition Metal Monoxide

نوقشت هذه الأكاسيد في فصل سابق وربما تتذكر أن لجميعها تركيب كلوريد الصوديوم، لكن لها موصلية متغيرة. سوف نرى في هذا القطاع أن خواصها المغنطيسية تكون متغيرة بالتساوي. في VO و TiO تكون مدارات $3d$ متشرة وتكوّن نطاقات غير متمركزة. تكون هذه الأكاسيد موصلات فلزية. تحدد خاصية عدم التمركز للإلكترونات $3d$ أيضاً الخاصية المغنطيسية لهذه الأملاح وبالمثل للفلزات البسيطة، تكون بارامغنطيسية باولي. يكون لـ NiO و CoO ، FeO ، MnO إلكترونات $3d$ متمركزة وتكون بارامغنطيسية عند درجات حرارة عالية. تكون درجات حرارة نيل Néel temperature لهذا الانتقال هي 122 K ، 198 K ، 293 K و 523 K على التوالي.

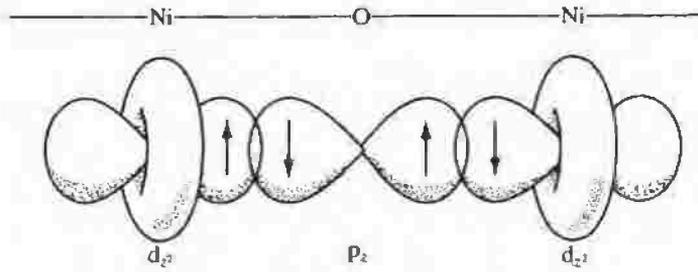
في الفرومغنطيسية المضادة، تتداخل الغزول على أنوية أو نوى مختلفة بشكل تعاوني، لكن بطريقة تلاشي بها العزوم المغنطيسية. تُظهر المواد الفرومغنطيسية المضادة لهذا انخفاضاً في القابلية المغنطيسية عند بدء السلوك التعاوني. تعرف درجة الحرارة التي تميز هذه الطريقة على أنها درجة حرارة نيل (الشكل رقم ٩,٢ (c)).

يقترح ظهور السلوك التعاوني تداخل إلكترونات d على أيونات مختلفة، لكن نفس الخواص الإلكترونية بافتراض أن الإلكترونات d تكون متمركزة. هكذا كيف يمكن التوفيق بين هاتين الخاصيتين؟

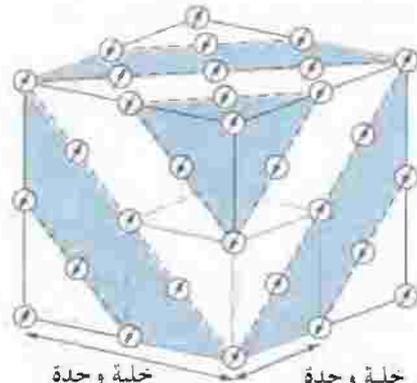
من المعتقد أن التداخل المغنطيسي في هذه المركبات يكون ناتجاً بطريقة غير مباشرة خلال أيونات الأكسيد، الآلية المعروفة بالتبادل الفوقي *superexchange*. في بلورة من NiO على سبيل المثال، يوجد ترتيب خطي من $\text{Ni}-\text{O}-\text{Ni}$. يمكن للمدار d^2 على النيكل أن يتداخل مع $2p_z$ على الأكسجين مؤدياً إلى تساهمية جزئية. سوف تكون لرابطة NiO المتكونة إلكترون d^2 وإلكترون $2p_z$ متجاورين. يكون لأيون الأكسيد أو لأيون الأكسيدي مداراً مغلقاً، ومن ثم يكون هناك إلكترون $2p_z$ آخر، الذي لا بد أن يكون لها غزل معكوس. يكون هذا الإلكترون رابطة جزئية مع النيكل التالي وبالتالي يتزوج d^2 على هذا النيكل مع إلكترون $2p_z$ بغزل معكوس. كما هو مبين في الشكل رقم (٩,٨) تكون النتيجة الخالصة هي أيونات نيكل متجاورة لها غزول متضادة.

يمكن ملاحظة العزوم المغنطيسية مترددة الغزل في الفرومغنطيسيات المضادة مثل NiO عملياً باستخدام حيود نيوترين. بسبب أن النيوترونات يكون لها عزم مغنطيسي، تستجيب حزمة النيوترون المستخدمة، ليس فقط لموضع النيوترون ولكن أيضاً للعزوم المغنطيسية للذرات. لا يكون للأشعة السينية، على الناحية الأخرى، عزم مغنطيسي وتستجيب للكثافة الإلكترونية ومن ثم للمواضع الذرية. يكون تركيب NiO كما هو محدد بحيود الشعاع السيني هو تركيب NaCl بسيط. من ناحية ثانية، عندما يتحدد التركيب بحيود النيوترون، تظهر قمم

إضافية يمكن تفسيرها على أنها تعطي خلية وحدة تركيب مغنطيسية ضعف طول خلية وحدة التركيب المحددة بواسطة الشعاع السيني. يبين الشكل رقم (٩,٩) مواضع ذرات النيكل في الخلية هذه. تكون خلية وحدة التركيب الكريستالوجرافية مُقيّدة بذرات متطابقة بتراص غزل متطابق. يشير التظليل إلى طبقات من أيونات النيكل موازية للقطر الجسمي للمكعب. تكون غزول كل أيونات النيكل في طبقة معينة متراصفة بالتوازي ولكنها تكون مختلفة التوازي مع طبقة التالية (المقطع ١, ٥, ٢).



الشكل رقم (٩,٨). تلاحم بين مدارات $Ni d_{z^2}$ و $O p_z$ في NiO .



خلية وحدة تركيب كيميائية طول a مغنطيسية طول $2a$

الشكل رقم (٩,٩). وحدة خلية تركيب مغنطيسية من NiO مع خلية وحدة تركيب كريستالوجرافية أو كيميائية مشار إليها.

(٩,٧) المغنطيسية الفريتية - الفريتات

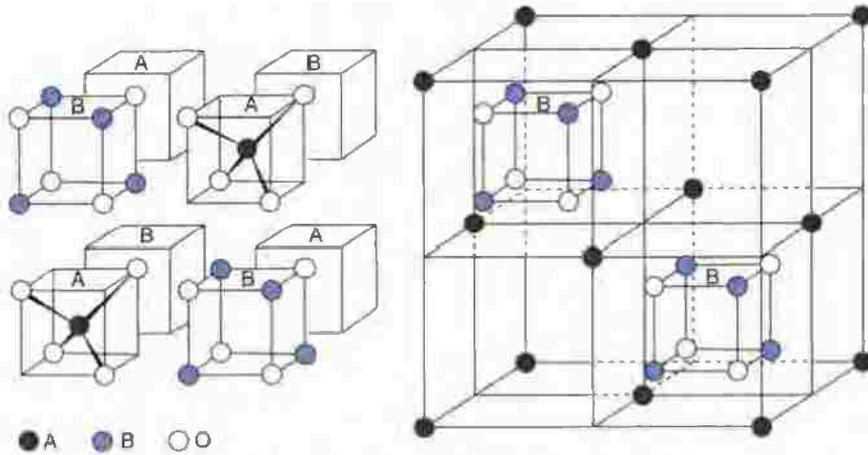
Ferrimagnetism - Ferrites

تم منح الاسم فريت في الأصل لفتة من أكاسيد مختلفة لها تركيب سبينل معكوس inverse spinel structure والصيغة التركيبية AFe_2O_4 حيث A هو أيون فلز ثنائي. امتدت الصيغة لتشمل أكاسيد أخرى لا تحتوي بالضرورة على حديد يكون لها خواص مغنطيسية مماثلة.

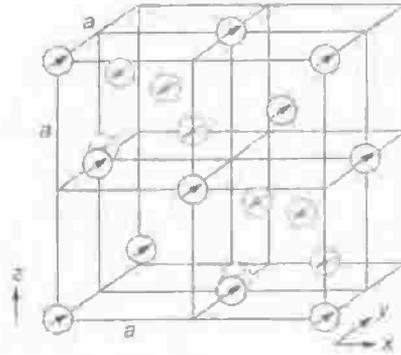
إن تركيب السبينل هو تركيب أكسيد مختلط شائع، مُصنّف بالسبينل نفسه $MgAl_2O_4$ حيث تكون أيونات الأكسيد في ترتيب محكم التراص مكعبي ممرّكز الوجه (انظر المقطع ١,٦,٣ والشكل رقم ١,٤٣) لأي ترتيب من أيونات الأكسيد N يكون هناك عدد N ، من الثقوب الثمانية، ويشغل الأيونات الثلاثية (Al^{3+}) نصف المواقع الثمانية (الشكل رقم ٩,١٠).

بالإضافة إلى هذا، يكون هناك عدد $2N$ من المواقع الرباعية وتشغل أيونات (Mg^{2+}) الثمانية ثُمّن هذه المواضع. في تركيب السبينل المعكوس، تكون أيونات الأكسيد أيضاً في ترتيب مكعبي محكم التراص، لكن تشغل أيونات الفلز الثمانية المواضع الثمانية وتنقسم الأيونات الثلاثية بالتساوي بين المواضع الرباعية والثمانية. تتداخل المواضع الرباعية بشكل مباشر مع بعضها البعض وتكون غزوها متراصفة بالتوازي. تتداخل الأيونات على المواضع الثمانية أيضاً مع تلك على المواضع الرباعية، لكن تتداخل في صفة الحالة خلال أيونات الأكسيد وتكون غزوها مختلفة التوازي كما في NiO .

في الفريتات AFe_2O_4 تكون أيونات Fe^{3+} على المواضع الرباعية متراصفة بتوازي مضاد لتلك على المواضع الثمانية، بحيث لا يكون هناك مغناطيسية محصلة من هذه الأيونات. لو أن الأيونات الثمانية A يكون لها إلكترونات غير منفردة، فإنها تتجه إلى أن تكون غزوها متراصفة بالتوازي مع تلك لأيونات Fe^{3+} على مواضع ثمانية مجاورة، ومن ثم مع تلك لأيونات A^{2+} أخرى. ينتج هذا تداخلاً فرّومغناطيسياً للفريتات التي تكون لأيونات A^{2+} فيها إلكترونات منفردة يوضح الشكل رقم (٩,١١) التركيب المغناطيسي لفريت فرّومغناطيسي.



الشكل رقم (٩,١٠). تركيب السبينل AB_2O_4 .



⊙ موضع رباعي

⊗ موضع ثماني

الشكل رقم (٩، ١١). تركيب مغنطيسي لسينيل معكوس ترومغنطيسي.

في المجنيتيت Fe_3O_4 ، تكون الأيونات الثنائية هي الحديد، يكون التداخل بين الأيونات على مواضع ثمانية متجاورة قوية جزئياً. إحدى الطرق للنظر في التركيب الإلكتروني لهذا الأكسيد أنه ترتيب من أيونات O^{2-} وأيونات Fe^{3+} بالكثرونات تجعل نصف أيونات Fe^{2+} الثنائية غير متمركزة فوق كل الأيونات على المواضع الثمانية. يكون لأيونات Fe^{3+} إلكترونات 3d كلها بغزل متوازية. حيث إنه يوجد فقط خمسة إلكترونات 3d بغزل واحد على أي ذرة، فإن الغزل غير المتمركز لابد أن يكون له غزل مضاد. كونه غير متمركز، فلا بد أن يكون له أيضاً غزل مضاد لإلكترونات 3d على ذرة Fe التالية. من ثم لابد أن يكون للأيونين غزل متراصفة، ولا بد لهذه الغزول أن تتراصف مع تلك لأيونات Fe الأخرى على المواضع الثمانية. يكون عدم التمركز أقل للفريتات الأخرى. إن المجنيتيت هو حجر المغنطيس القديم المستخدم منذ القدم كبوصلة. في الآونة الحديثة وجد للمجنيتيت استخدام كوسائل ذاكرة في الحاسوبات، كدقائق مغنطيسية على شرائط التسجيل وقلوب المحولات.

(٩،٨) مقاومة مغنطيسية عملاقة، نفقية وضخمة

Giant, Tunelling and Colossal Magnetoresistance

(٩،٨، ١) مقاومة مغنطيسية عملاقة Giant Magnetoresistance

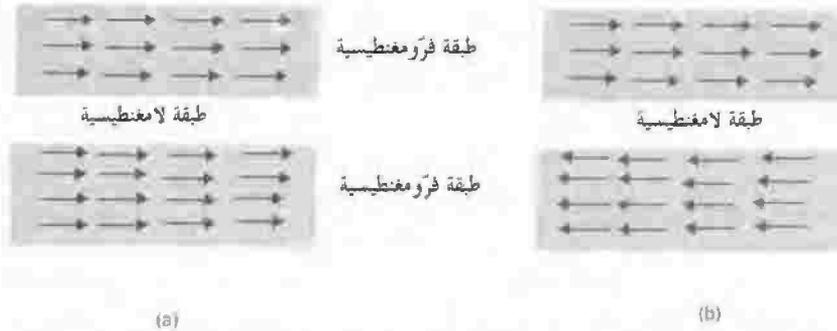
المقاومة المغنطيسية هي التغير في التيار الكهربائي المار خلال مادة كنتيجة لتطبيق مجال مغنطيسي على العينة. في عام 1988، وجد أنه لبعض المواد الفلزية عديدة الطبقات، فإن تطبيق مجال مغنطيسي بشدة 1 إلى 3 mT يتسبب في

هبوط المقاومة إلى النصف أو أقل من قيمة المجال صفر لها. أطلق على هذه الظاهرة مقاومة مغنطيسية عملاقة giant magnetoresistance (GMR). خلال عقد من الزمن، كانت الوسائل التجارية مثل الحاسوبات والأقراص المغنطة المعتمدة على GMR متاحة.

لوحظت GMR في طبقات متعددة مغنطيسية فلزية (أي ركام من طبقات بسلك نانومتر من فلزات مختلفة، بخاصة طبقات متناوبة من فلز فرّومغنطيسي وفلز لا مغنطيسي [مثل Co/Cu، Fe/Cr]). تكون الغزل خلال طبقة فرّومغنطيسية وحيدة متراففة جميعها، لكن يعتمد الاقتران بين الطبقات الفرّومغنطيسية على سمك الطبقة اللامغنطيسية المتداخلة. عند سمك معين تكون الطبقات الفرّومغنطيسية المتجاورة مقترنة بسلوك فرّومغنطيسي مضاد وسوف يزيد هذا المقاومة. عند تطبيق مجال مغنطيسي يجعل هذا المجال الطبقات متراففة بسلوك فرّومغنطيسي ويحدث هبوطاً ملحوظاً في المقاومة الكهربائية.

يمكن فهم GMR لو اعتقدنا أن الإلكترونات بغزل إلى أعلى والإلكترونات بغزل إلى أسفل توصل الكهربائية بطريقة مستقلة. في المواد الفرّومغنطيسية، يكون هناك كثافة أعلى بكثير من الإلكترونات بحالة غزل معينة وسوف تحمل هذه الإلكترونات معظم التيار. إحدى الطرق للنظر إلى هذا هي اعتبار نطاقي طاقة منفصلين للإلكترونات الغزل العلوي والإلكترونات الغزل السفلي. (يفسر هذا النموذج القيمة 2.2 B.M. للعزم المغنطيسي للحديد الفلزي). لأحد الأصناف (أي غزل علوي) ستكون نطاقات 3d ممتلئة. للإلكترونات غزل سفلي سيكون نطاق 3d ممتلئاً جزئياً بسبب أن نطاق 3d بغزل علوي يكون ممتلئاً. تشغل حوامل التيار بغزل علوي نطاق s/p عالي الطاقة، بينما تشغل حوامل التيار بغزل علوي نطاق 3d. يكون متوسط المسار الحر للإلكترونات في نطاق s/p أعلى من نطاق 3d، ومن ثم تحمل إلكترونات الغزل العلوي تياراً أكثر من إلكترونات الغزل السفلي.

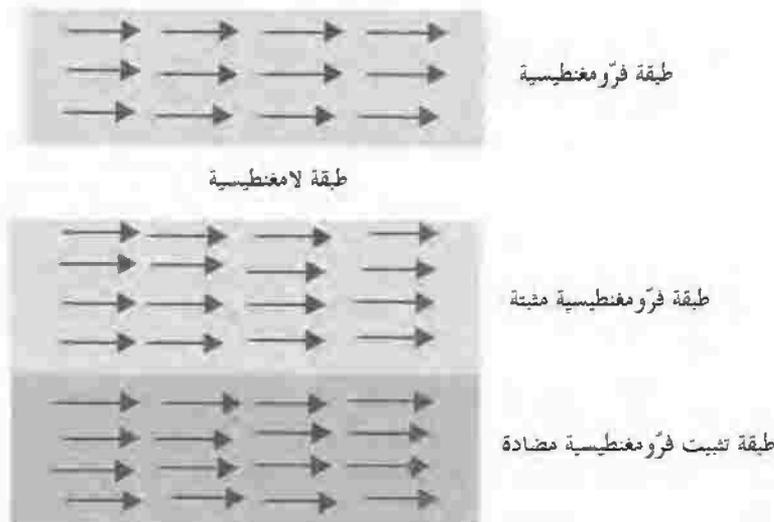
افترض الآن أن طبقة فرّومغنطيسية يكون لها غالبية من الإلكترونات بغزل علوي. لو أن الطبقة التالية يكون لها أيضاً غالبية من الإلكترونات بغزل علوي أيضاً (الشكل رقم ٩، ١٢ (a))، من ثم يمكن للتيار أن يمر بشكل مباشر من طبقة فرّومغنطيسية إلى طبقة تالية. من ناحية ثانية، لو أن غالبية الإلكترونات التالية يكون لها غزل سفلي (الشكل رقم ٤، ١٢ (b))، عندئذ فإن التيار من الطبقة الأولى سيتم حمله بعدد ضئيل من الإلكترونات في نطاق 3d الخاص بها وهكذا يتم اختزال الموصلية. تكون الموصلية لهذا أكثر بكثير لطبقتين متراففتين بسلوك فرّومغنطيسي مضاد عن طبقتين متراففتين بسلوك فرّومغنطيسي.



الشكل رقم (٩، ١٢). طبقتان مغناطيسيتان مفصولتان بطبقة لامغناطيسية مع (a) غزول في الطبقتين المغناطيسيتين متراصفة فرّومغناطيسياً و(b) الغزول في الطبقتين المغناطيسيتين متراصفة فرّومغناطيسياً مضاداً.

(٩، ٨، ٢) رؤوس قراءة أسطوانة صلبة Hard Disk Read Heads

في رؤوس قراءة أسطوانة صلبة يكون لطبقة فرّومغناطيسية معينة اتجاه غزل خاص بها مثبت بواسطة الاقتران بطبقة فرّومغناطيسية مضادة (الشكل رقم ٩، ١٣). تكون الطبقة الفرّومغناطيسية الثانية مفصولة عن الأولى بفلز لا مغناطيسي، له حرية تغيير اتجاه غزله عند تطبيق مجال.



الشكل رقم (٩، ١٣). طبقتان مغناطيسيتان كما في رأس القراءة لأسطوانة صلبة ممغنطة، موضحاً التثبيت بطبقة فرّومغناطيسية مضادة.

عندما يتحرك رأس القراءة فوق الأسطوانة الصلبة، تتسبب المجالات المغناطيسية على القرص في جعل الغزول في الطبقة الثانية متراصفة إما موازية وإما مختلفة التوزيع مع تلك في الطبقة الأولى. يتم تشفير المعلومات كسلسلة من 0s و 1s مقابلة للتوجهات المختلفة من المجال المغناطيسي على القرص وتكون هذه باعثة على تيار مرتفع

أو منخفض في رأس القراءة. يمكن لرؤوس القراءة GMR أن تكشف المجالات الأضعف عن رؤوس القراءة الأولى، للتمكن من التقاط المعلومات على الأسطوانة الصلبة. لقد قادت إنتاجها إلى سعة أسطوانات صلبة كبيرة موجودة في حاسوبات محمولة حديثة (2005). تستخدم مبدأ مماثلاً في شرائح ذاكرة مغنطيسية عشوائية المنفذ.

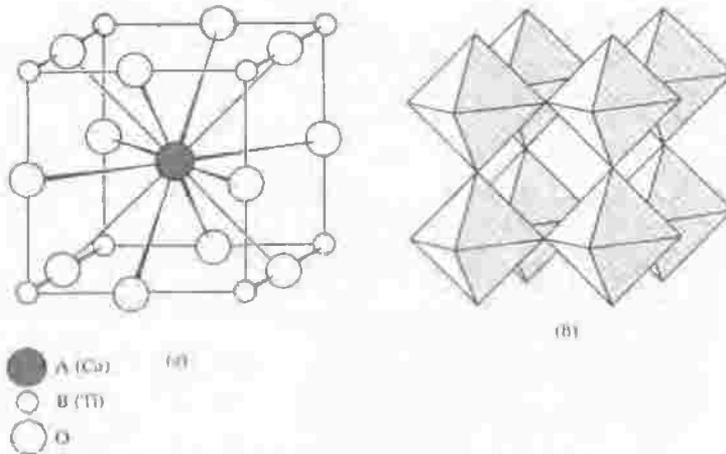
(٩,٨,٣) مقاومة مغنطيسية نفقية وضخمة

Tunnelling and Colossal Magento resistance

لاقت ظاهرة مشابهة، مقاومة مغنطيسية نفقية (TMR) tunneling magnetoresistance اهتماماً كقاعدة لمجسات مغنطيسية ووسائل أو أجهزة تخزين. هنا توجد طبقة عازلة رقيقة تفصل الطبقتين الفرومغنطيسيتين، تسري الإلكترونات من الطبقة فرومغنطيسية إلى الطبقة التالية بواسطة أنفاق ميكانيكية كمية.

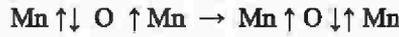
لوحظت المقاومة المغنطيسية الضخمة colossal magnetoresistance (CMR) في 1993 لبعض مركبات مثل بيروفسكيت المنجنيت المدمم (أي $La_{1-x}Ca_xMnO_3$). تم ملاحظة تغير في المقاومة الكهربية برتب أعظم في هذه المركبات، لكن يكون مطلوباً مجالات مغنطيسية قوية برتب من عشرات عديدة من التسلا (التي تكون أقوى مائة مرة عن تلك التي تنتج مقاومة فرومغنطيسية عملاقة) أو أكبر.

يكون لبيروفسكيت المنجنيت المدمم الذي يظهر CMR الصيغة العامة $RE_{1-x}M_xMnO_3$ حيث تمثل RE عنصراً أرضياً نادراً و M فلزاً ثنائياً مثل Cu، Cr، Ba أو Pb. تشغل الأيونات RE الثلاثية وأيونات M الثنائية المواضع A في تركيب البروفسكيت الشكل رقم (٩,١٤) ويكون له تناسق بـ 12 نقلة مع الأكسجين. تشغل أيونات Mn الثمانية B، يكون (1-x) من أيونات المنجنيز هي Mn^{3+} و x هي Mn^{4+} . تكون بيئة أيونات $Mn^{3+}(d^4)$ مشوهة بسبب تأثير جان-تيلر Jahn-Teller وعند قيم صغيرة عن x يحدث تشوه تعاوني.



الشكل رقم (٩,١٤). تركيب بيروفسكيت.

كما في أكاسيد عنصر انتقالي أخرى، مثل NiO، تكون الغزول على أيونات الفلز الانتقالي مقترنة بواسطة أيونات الأكسيد. تقترن أيونات Mn^{4+} بسلك فَرّومغناطيسي أو فَرّومغناطيسي مضاد. تقترن أيونات Mn^{3+} مع أيونات Mn^{4+} في علمية تعرف على أنها تبادل مزدوج. في هذه العملية يحدث قفز تلقائي للإلكترون من مدار Mn^{3+} إلى مدار O 2P ومن مدار O 2P إلى أيون Mn^{4+} .



ينتج هذا اقتراناً فَرّومغناطيسياً.

يكون التبادل الثنائي قوياً في المنجنيتات بـ $x \approx \frac{1}{2}$ ، وتكوّن هذه المنجنيتات manganites طبقات فَرّومغناطيسية عند درجات حرارة منخفضة. يمكن وصف هذه الأطوار في ضوء نظرية النطاق. تتحد مدارات e_g على المنجنيز ومدارات O 2P لتكون نطاقين. نطاق للإلكترونات غزل علوي وآخر للإلكترونات غزل سفلي. على غير العادة يكون هناك فجوة نطاقية كبيرة بين الاثنين بحيث أنه عند درجة حرارة منخفضة يكون أحد النطاقين فارغاً والآخر نصف ممتلئ. (يشار إلى هذه المواد الصلبة على أنها أنصاف فلزات بسبب أنه يكون هناك نوع واحد من الغزل له الحرية في حمل تيار كهربائي). تختفي الفَرّومغناطيسية عند درجة حرارة كيوري. فوق هذه الدرجة من الأفضل الاعتقاد بأن إلكترونات e_g على المنجنيز تكون متمركزة وتكون المادة الصلبة بارامغناطيسية ويكون لها مقاومة كهربية أكبر بكثير عندما يصل الطور الفَرّومغناطيسي نقطة كيوري، ترتفع المقاومة الكهربائية حيث تبدأ الطاقة الحرارية في التغلب على التبادل المزدوج. إنه في هذه المنطقة الذي تظهر فيه المنجنيتات CMR. يصحح تطبيق مجال مغناطيسي قوي على المنجنيتات التراصفات للاحتفاظ بنصف الحالة الفلزية وبالتالي تقل المقاومة.

(٩,٩) الاستقطاب الكهربائي

Electrical Polarization

رغم أن المواد الصلبة تتكون من دقائق مشحونة (أنيوية وإلكترونات) لا يكون للمادة الصلبة شحنة إجمالية. لمعظم المواد الصلبة لا يكون هناك أيضاً فصل مُحصّل للشحنات الموجبة والسالبة، بحيث لا يكون هناك عزم ثنائي قطب مُحصّل. حتى لو أن المادة الصلبة تكون مكونة من جزيئات مع عزوم ثنائي قطب دائمة (مثل الثلج)، فإن الجزيئات تترتب عادة بطريقة لا تكون لخلية وحدة التركيب للبلورة فيها عزم قطبي مُحصّل وبالتالي لا يكون للمادة الصلبة شيء. إذا تم وضع مثل تلك المادة الصلبة في مجال كهربائي، يكون هناك مجال مُحثّ معاكس للمجال المطبق.

ينشأ هذا المجال من مصدرين، تشوه السحابة الإلكترونية للذرات أو الجزيئات وتحرك طفيف للذرات نفسها. يكون متوسط عزم ثنائي القطب لوحدة الحجم المحث في المادة الصلبة هو الاستقطاب الكهربائي P ويكون متناسباً مع المجال E .

$$(9,10) \quad P = \epsilon_0 \chi_e E$$

حيث ϵ_0 هي نفاذية الفراغ ($8.85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$)، χ_e هي قابلية العزل الكهربائي (بدون وحدات). لمعظم المواد الصلبة تقع القابلية الكهربائية بين 0 و 10. يتم تحديد القابلية غالباً بطريقة عملية لتحديد السعة لدائرة كهربية مع وبدون وجود المادة الصلبة. تكون النسبة بين هاتين السعتين هي الإنفاذية النسبية أو ثابت العزل الكهربائي للمادة الصلبة.

$$(9,11) \quad \frac{C}{C_0} = \epsilon_r$$

حيث C هي السعة بالفرايدي farads في وجود المادة الصلبة و C_0 هي تلك في غياب المادة الصلبة، يرتبط ثابت العزل الكهربائي ϵ_r مع القابلية بالعلاقة:

$$(9,12) \quad \epsilon_r = 1 + \chi_e$$

لو تم إنجاز العملية باستخدام مجال كهربائي متغير عالي التردد، من ثم لا يمكن للذرات أن تتبع التغيرات في المجال و يتم القياس الراجع إلى إزاحة الإلكترون فقط. يوفر الإشعاع الكهرومغناطيسي في منطقتي المرئي وفوق البنفسجي مثل هذا المجال ويكون معامل الانكسار للمادة مقياساً لإسهام الإلكترون في ثابت العزل الكهربائي. تتجه المواد بثابت عزل كهربائي كبير أيضاً إلى أن يكون لها معاملات انكسار عالية.

رغم أن معظم المواد لا يكون لها عزم ثابت ثنائي قطب في غياب مجال كهربائي، فإن الفئة من المواد الصلبة التي تفعل تكون مهمة من الناحية التجارية وتكون مادة الموضوع المتبقي من هذا الفصل.

(9,10) بلورات كهروضغوية - الكوارتز- α

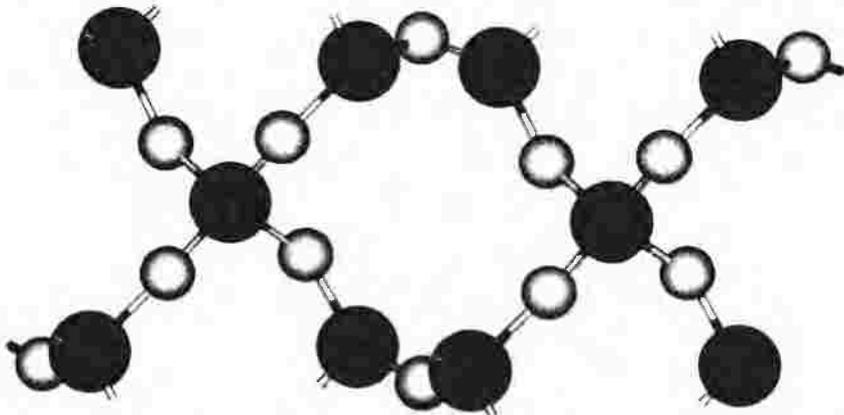
Piezoelectric Crystals- α - Quartz

(الكهربية الضغوية، البلورة الكهروضغوية، piezoelectric crystal هي تلك التي تظهر جهداً كهربياً عندما تتعرض إلى شد ميكانيكي، على سبيل المثال، عند تطبيق ضغط عليها وتظهر بطريقة عكسية إجهاداً عند تطبيق مجال كهربائي عليها. يُحدث تطبيق المجال الكهربائي تحركاً طفيفاً للذرات في البلورة بحيث يظهر عزم ثنائي قطب في

البلورة. لكي تكون البلورة كهروضغطية لابد أن تعمل بلورة من وحدات غير متماثلة مركزياً (أي لا تملك مركز تماثل). من بين 32 تصنيف للبلورات (انظر فصل الأول)، تملك ١١ بلورة مركز تماثل وأخرى لا تكون كهروضغطية بسبب عناصر التماثل الأخرى التي تملكها.

يعتمد الكوارتز- α على رباعيات SiO_4 لا يكون للرباعيات مراكز تماثل، وفي الكوارتز- α تكون الرباعيات منحرفة بحيث يكون لكل وحدة عزم ثنائي قطب خالص. من ناحية ثانية، تكون الرباعيات مرتبة بطريقة (الشكل رقم ٩، ١٥) بحيث لا تملك البلورة عادة استقطاباً إجمالياً.

يغير الإجهاد زوايا الرابطة Si-O-Si بين الرباعيات بحيث لا تتلاشى عزوم ثنائي القطب بعد ويكون للبلورة استقطاب كهربي خالص. يكون التأثير في الكوارتز- α صغير وتكون الطاقة الكهربية الخارجة فقط 0.01 من طاقة الإجهاد الداخلة بينما في ملح روشلي (بلورة كهروضغطية أخرى مستخدمة تجارياً) تكون نسبة الطاقة الخارجة إلى الطاقة الداخلة 0.181. يكون الكوارتز- α ، من ناحية ثانية، مفيداً من تطبيقات حيث تكون بحاجة إلى مولدات ذبذبة بتردد ثابت كما هو في ساعات الكوارتز. يحدث تيار كهربي تشوه الكوارتز، وإذا تم تطبيق مجال كهربي متناوب تهتز البلورة. عندما يوافق تردد التيار الكهربي تردد الاهتزاز الطبيعي للبلورة، يحدث الرنين ويتم وضع تذبذب مستقر مع بلورة هزازة تغذي طاقة خلفياً لدائرة كهربية. إن أهمية الكوارتز- α في بعض الأجهزة مثل الساعات يعود إلى حقيقة أنه لبعض قطع كريستالوجرافية لا يعتمد الاهتزاز الطبيعي للبلورة على درجة الحرارة ومن ثم سوف تهتز البلورة عند نفس التردد وسوف تحافظ الساعة على الوقت، بغض النظر عن كون اليوم حاراً أو بارداً.



الشكل رقم (٩، ١٥). تركيب الكوارتز- α . مشاهداً أسفل حلقة سداسية من السليكونات. لاحظ أن أكسجينات حول كل سليكون تكون مرتبة في رباعي مشوه وأن السليكونات نفسها تعمل إسقاطاً سداسياً مشوهاً.

لبعض التطبيقات مثل التصوير بالأشعة فوق السمعية من المهم أن يكون تحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربية عالياً.

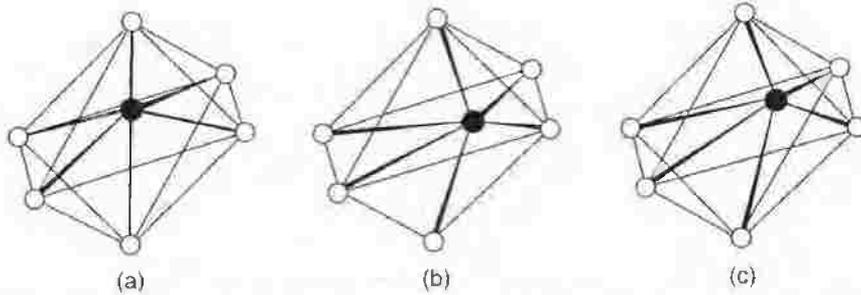
تكون بعض البلورات الكهرضغطية مستقطبة كهربائياً في غياب إجهاد ميكانيكي؛ أحد الأمثلة هو بلورات حجر كريم التورمالين *tourmaline*. لا يكون هذا التأثير عادة ملحوظا بسبب أن البلورة لا تعمل كمصدر كهربي. رغم وجود شحنة سطحية، فإن هذا يتم معادلته بسرعة بواسطة دقائق مشحونة من البيئة ومن البلورة نفسها. من ناحية ثانية، يتناقص حد الاستقطاب مع تزايد درجة الحرارة ويمكن أن يستخدم في إظهار الطبيعة القطبية للبلورة. يقل استقطاب التورمالين إذا تم تسخينه ويفقد بعضاً من شحناته السطحية. بالتبريد السريع يكون له استقطاب خالص وسوف يجذب دقائق صغيرة مشحونة كهربياً مثل القش. تعرف مثل تلك البلورات على أنها بيروكهربية (كهربية حرارية) *pyroelectric* وتكون البلورات الفروكهربية هي صنف خالص من البلورات الكهربية.

(٩، ١١) التأثير الفروكهربي

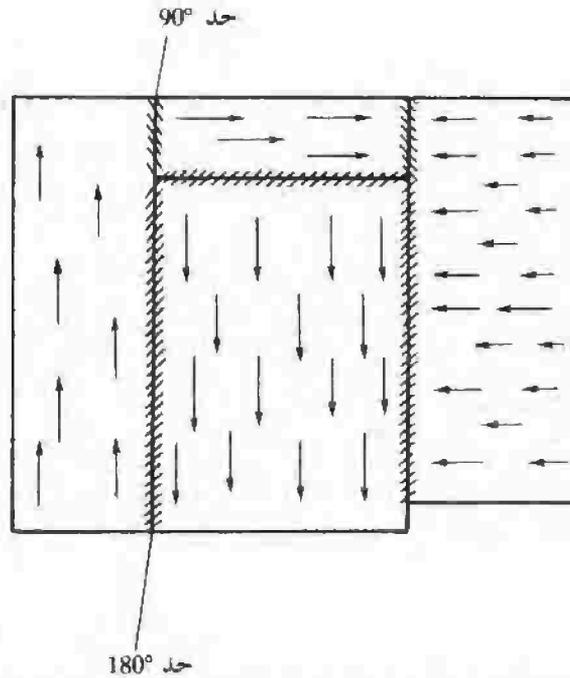
The Ferroelectric Effect

تملك البلورات الفروكهربية نطاقات من توجه مختلف من الاستقطاب الكهربي الذي بالإمكان إعادة توجيهه وإحضاره إلى تراصف بواسطة مجال كهربي. بين أكثر المواد الفروكهربية العديدة هناك البيروفسكيتات *perovskites* (انظر الفصل الأول) الذي منها يكون تيتانات الباريوم هو المثال التقليدي (BaTiO_3). يكون لهذه المادة ثابت عزل كهربي (حوالي 1000) وتستخدم بكثرة في المكثفات. فوق 393 K يكون لـ BaTiO_3 تركيب مكعبي كما في الشكل رقم (١، ٤٤) (انظر الفصل الأول) مع أيونات Ba^{2+} في المركز، تكون أيونات Ti^{4+} عند أركان المكعب وثمانية الأوجه من أيونات O^{2-} حول أيون تيتانيوم. تكون أيونات Ti^{4+} صغيرة (قطر 7.5 pm) ولهذا يكون هناك مساحة لها لكي تتحرك داخل قفص O_6 . يتحول التركيب إلى رباعي عند 393 K الذي تتحرك فيه ذرة Ti بعيداً عن المركز على طول رابطة Ti-O. عند 298 K يحدث تغير أبعد تتحرك فيه ذرة Ti بعيداً عن المركز على طول القطر بين الروابط Ti-O وعند 183 K نحصل على صور معيّني (موشور سداسي منتظم) الذي فيه يكون هناك تشوه على طول قطر المكعب. يعطى الشكل رقم (٩، ١٦) التشوهات الثلاثة. يكبر هذا الشكل التأثير: تكون ذرة Ti متحركة 15 pm بعيداً عن المركز. في الأطوار الثلاثة هذه، يكون لـ TiO_6 عزم ثنائي قطب خالص. لكي نوضح كيف تنشأ الفروكهربية، تستخدم التركيب الرباعي كمثال. لو أن كل ذرات Ti تكون بعيدة عن المركز بدرجة طفيفة في نفس الاتجاه، من ثم

يكون للبلورة استقطاب مُحصَل. من ناحية ثانية، مثل الفرومغناطيسية تكوّن الفروكهربية نطاقات يوجد بداخلها استقطاب مُحصَل، لكن يكون لنطاقات مختلفة استقطابها الخاص بها في اتجاهات مختلفة وذلك يعطي استقطاباً مُحصَلاً بالقيمة صفر. في الطور الرباعي من BaTiO_3 يمكن لذرة Ti أن تكون بعيدة عن المركز في ستة اتجاهات مختلفة على طول أي من روابط Ti-O. يكون للنطاقات المتجاورة نتيجة لذلك استقطاب إما أن يكون عند 90° وإما عند 180° نسبة إلى بعضها البعض الشكل رقم (٩، ١٧).



الشكل رقم (٩، ١٦). تشوهات ثنائيات TiO_6 في (a) التركيب رباعي الأضلاع (b) التركيب متعامد الأضلاع (c) التركيب المعيني من تيتانات الباريوم.

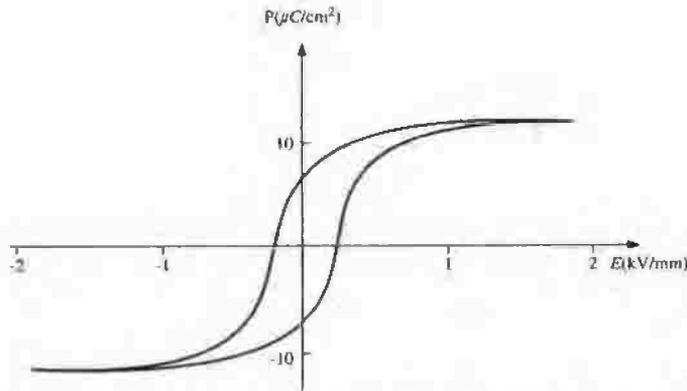


الشكل رقم (٩، ١٧). مخطط النطاقات في تيتانات الباريوم، موضحاً الحدود 90° و 180° .

يمكن للنطاق أن يكون من الرتبة 10^{-8} m أو حتى أكثر. يمكن استخدام وسائل عديدة للحصول على صور من النطاقات. إن الشكل رقم (٩, ١٨) هو صورة فوتوغرافية مأخوذة لشريحة رقيقة من تيتانات الباريوم تحت مجهر استقطابي يمكن فيه مشاهدة نطاقات مختلفة بوضوح. لاحظ حدة حدود النطاقات domain boundaries. عند تطبيق مجال كهربائي تنمو النطاقات المتراففة على حساب بعضها البعض على نحو ملائم. كما هو مع الفرومغناطيسيات، تظهر الاستجابة للمجال تحلّف hysteresis؛ ينمو الاستقطاب حتى يكون لكامل البلورة قطبيتها الخاصة بها متراففة، يبقى هذا الاستقطاب في حين يختزل المجال إلى الصفر ويكون هناك انحرافات على هيئة مجال بقطبية معكوسة هو المطبق فقط. يوضح الشكل رقم (٩, ١٩) منحنى التخلف لتيتانات الباريوم.



الشكل رقم (٩, ١٨). صورة فوتوغرافية لشريحة رقيقة من تيتانات الباريوم مأخوذة تحت المجهر الاستقطابي، تصوير نطاقات باستقطابات مختلفة. (From A. Guinier and R. Julien (1989) *The Solid State from Superconductors to Superalloys*, Oxford University Press/International Union of Crystallography, Oxford, Figure 2.9, p.67. (Reproduced by permission of Oxford University Press).



الشكل رقم (٩, ١٩). رسم الاستقطاب ضد مجال كهربائي مطبق لتيتانات الباريوم بحجم حبيبة $2 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-4}$ m.

تخضع القابلية الكهربائية وثابت العزل الكهربائي للمواد الفيرومغناطيسية لقانون كيوري المعتمد على درجة

الحرارة:

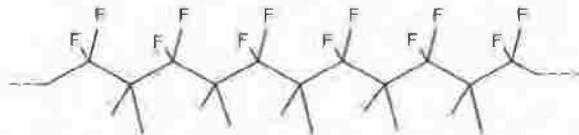
$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + C/(T - T_c) \quad (9, 13)$$

حيث ϵ_∞ هي النفاذية عند ترددات بصرية و T_c هي درجة حرارة كيوري. يمكن بسهولة مشاهدة أصل درجة الحرارة كيوري في تيتانات الباريوم بسبب أن درجة حرارة كيوري هي درجة الحرارة 393 K التي عندها يخضع تيتانات الباريوم إلى تحول طور للتركيب المكعبي. فوق درجة حرارة كيوري يكون للتركيب مركز ثنائي ولا يكون هناك عزم ثنائي قطب محصل. يظل ثابت العزل الكهربائي مرتفعاً بسبب أن الذرات يمكنها أن تتحرك بعيداً عن المركز بمجال كهربائي مطبق، لكن يتم فقد الاستقطاب حالما يتم إزالة المجال.

في $PbZrO_3$ ، الذي له أيضاً تركيب بيروفسكيت تكون الذرات المزاحة مترتبة بالتناوب من اتجاهات معاكسة. ينتج هذا حالة فيروكهربية مضادة. يعطي $PbZrO_3$ مع استبدال بعض الزركونيوم بالتيتانيوم مواد فيروكهربية واسعة الاستخدام، $PZT (PbZr_{1-x}Ti_xO_3)$.

جدير بالملاحظة أن بعض البوليمرات فيروكهربية. يستخدم بولي فينيلين فلوريد $(-CH_2-CF_2)_n$ كغشاء رقيق (تقريباً حوالي 25 μm في السمك) في تجارب الموجة الصدمية لقياس الإجهاد. يكون مدى الضغط الذي يعمل هذا البوليمر فوقه برتبة أكبر من تلك للكوارتز أو نيوبات الليثيوم.

في طور β - للبولي فينيلين فلوريد (PVDF)، تكون مجموعات CF_2 في سلسلة البوليمر كلها متوجهة في نفس الاتجاه (الشكل رقم 9, 20) بحيث ينتج عزم ثنائي قطب. خلال النطاق تكون مجموعات CF_2 على السلاسل المختلفة متراصة. عند تطبيق مجال كهربائي تدور السلاسل خلال زيادات بـ 60° لكي تتراصف متوازية مع النطاق المجاور.

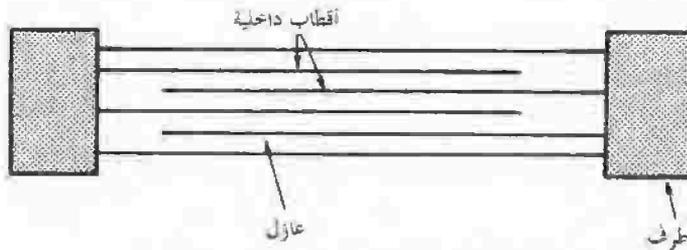


الشكل رقم (9, 20). تراصف مجموعات CF_2 في فلوريد البولي فينيلين β -polyvinyl fluoride.

(٩,١١,١) مكثفات سيراميكية عديدة الطبقات

Multilayer Ceramic Capacitors

تستخدم المكثفات لتخزين الطاقة. يتم تطبيق مجال كهربائي لحث شحنة في المكثف. يظل المكثف مشحوناً حتى نحتاج إلى تيار. لكي يكون مفيداً في الدوائر الإلكترونية الحديثة التي تشمل الحاسوبات، مركبات الفضاء، مجموعات TV وتطبيقات أخرى عديدة لا بد للمكثف أن يكون صغيراً. لكي يتم الاحتفاظ بمواسعة أو سعة عالية (لكي نخزن كمية كبيرة من طاقة كهربائية بينها يظل صغيراً) تحتاج المادة أن يكون لها نفاذية عالية. لهذا يكون تيتانات الباريوم بنفاذيته المرتفعة مفيد جداً لهذا الغرض. يكون لتيتانات الباريوم النقي نفاذية (حوالي 7000) قريبة من درجة الحرارة كيبوري، لكن تهبط هذه فجأة مع الحرارة إلى القيمة عند درجة حرارة الغرفة (من 1 إلى 2000). رغم أن هذا يظل مرتفعاً للدوائر الإلكترونية، فإنه سيكون مفيداً أن يتم الاحتفاظ بالقيمة الأعلى بحيث يمكن اختزال حجم المكثف. يكون من الضروري أيضاً لبعض التطبيقات أن تكون النفاذية ثابتة مع درجة الحرارة فوق مدى من 180 K، من 218 K إلى 398 K. يكون لتيتانات الباريوم مع بعض من التيتانيوم مستبدلاً بالزركونيوم أو القصدير درجة حرارة كيبوري أقرب إلى درجة حرارة الغرفة ومنحنى مسطح بين النفاذية ودرجة الحرارة. يمكن عمل تعديلات أكثر بإحلال جزئي لأيونات الباريوم. تتكون المادة المصنوعة بهذه الطريقة من عدة أطوار مخلوطة معاً كل منها بدرجة حرارة كيبوري مختلفة ويكون هذا هو الباعث على المنحنى المسطح للنفاذية ضد درجة الحرارة. عامل آخر يؤثر على خواص العزل لتيتانات الباريوم هو حجم الحبيبة. على سطح البلورات الرباعية يكون التركيب مكعبي، لهذا لدقائق صغيرة من نسبة سطح إلى حجم كبيرة يكون هناك نسبة عالية من مادة مكعبة. يؤدي هذا إلى نفاذية عالية عند درجة حرارة الغرفة، لكن نفاذية أقل عند درجة حرارة كيبوري. لدقائق صغيرة جداً، لا يكون هناك تأثير فروكهرري. لهذا يكون من الضروري أن نتج حبيبات بحجم مناسب لكي تعطي الخواص المطلوبة. لكي نصنع مكثفات متعددة الطبقات، يتم إقحام تيتانات الباريوم بحجم حبيبة مناسب ومدماً بمدعم مناسب مع طبقات توصيل (الشكل رقم ٩,٢١). يمكن هذا من استخدام جهاز واحد بدلاً من مكثفات أسطوانية عديدة على التوازي.



الشكل رقم (٩,٢١). مقطع خلال مكثف متعدد الطبقات.

إن تيتانات الباريوم هو أحد الأمثلة في المادة الفروكهربية. بعض الأكاسيد الأخرى بتركيب البيروفسكيت تكون أيضاً فروكهربية (تيتانات الرصاص وتيتانات الليثيوم). إحدى المجموعات المهمة من تلك المواد المستخدمة في تطبيقات محولات الطاقة هي الأكاسيد المختلطة PZT ($\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$). إن هذه مثل تيتانات الباريوم يكون لها أيونات صغيرة في أنقاض O_6 التي يمكن استبدالها بسهولة. تشمل بعض المواد الصلبة الفروكهربية المواد المترابطة بالهيدروجين مثل KH_2PO_4 وملح شيلي ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)، أملاح بأيونات تملك عزوم ثنائي قطب، مثل NaNO_2 والبوليمرات لبولي فينيلين الفلوريد. لقد تم اقتراح أن الآليات الخاصة بالفروكهربية قد تشمل أيضاً بعض العمليات البيولوجية مثل ذاكرة المخ وعمليات توصيل النبضات في خلايا القلب والخلايا العصبية.

يغطي الفصل العاشر المجال المثير للمواد فائقة التوصيل التي تشمل المواد فائقة التوصيل عند درجة حرارة عالية، يكون لكثير منها علاقة بتركيب البيروفسكيت.

الأسئلة

Questions

- ١- رغم أن المنجنيز لا يكون فرومغناطيسياً، تكون بعض السبائك مثل Cu_2MnAl فرومغناطيسية. تكون المسافة Mn-Mn في هذه السبائك أكبر من فلز المنجنيز. ما هو التأثير الذي يملكه هذا، وما هو تأثير هذا على نطاق 3d للمغنيسيوم؟ لماذا يتسبب هذا في جعل السبيكة فرومغناطيسية؟
- ٢- يكون للمركب EuO تركيب NaCl ويكون باراً مغناطيسي فوق 70 K، لكن منتظم مغناطيسياً دون هذا. تكون نماذج الحيود له عند درجات حرارة عالية ومنخفضة متطابقة. ما هي طبيعة هذا الترتيب المغناطيسي.
- ٣- يكون لـ ZnFe_2O_4 تركيب سينيل معكوس عند درجات حرارة منخفضة. ما هو نوع التماثل الذي تتوقع أن يُظهره.
- ٤- في ثنائي كبريتيد البيريت لعنصر انتقالي MS_2 تشغل أيونات Mn^{2+} مواضع ثمانية. إذا تكون نطاق d فإنه سوف ينقسم إلى اثنين كما في الأكاسيد الأحادية. اعتبر المعلومات عن بعض الكبريتيدات الثنائية المعطاة لاحقاً، أي نطاق تكون فيه الإلكترونات لو كانت غير متمركزة، وفي حال شبه الموصل، بين أي من النطاقين تقع الفجوة النطاقية ذات الاهتمام أو المعنية:

Mn S₂ فُرومغنطيسي مضاد ($T_N = 78 \text{ K}$)، عازل فوق T_N ثلاثم البارامغنطيسية خمس إلكترونات غير مقترنة لكل ذرة منجنيز.

FeS₂ دايا مغنطيسي، شبه موصل.

CoS₂ فُرومغنطيسي ($T_C = 118 \text{ K}$) فلزي.

- ٥- في المواد الفروكهربية المترابطة هيدروجينياً تتغير درجة حرارة كيوري Curie temperature والنفاذية عندما يتم استبدال الهيدروجين بالديوتريم. ما الذي تقترحه هنا حول أصل الانتقال الفروكهربي في هذه المركبات.
- ٦- يكون لـ KTaO_3 تركيب بيروفسكيت، لكن لا يكون فروكهربياً أو فروكهربياً مضاداً. من ناحية ثانية عندما يتم استبدال بعض أيونات K بأيونات Li، ينتج مادة فروكهربية. اشرح لماذا يكون لإحلال Li هذا التأثير.