

Парамагнетик

Парамагнѐтик, вещество, намагничивающееся во внешнем магнитном поле в направлении поля, но не обладающее магнитным упорядочением. В парамагнетиках парамагнетизм преобладает над диамагнетизмом. При помещении парамагнетика во внешнее неоднородное магнитное поле он втягивается в область более сильного поля. Парамагнетики относятся к слабомагнитным веществам; их парамагнитная восприимчивость положительна и мала (порядка 10^{-3} – 10^{-5}). В слабом магнитном поле и при не очень низкой температуре [т. е. вдали от условий магнитного насыщения или проявления осцилляционных эффектов (см. Эффект де Хааза – ван Альвена)] восприимчивость парамагнетика не зависит от величины напряжѐнности поля. К классическим (ланжевендовским) парамагнетикам, температурная зависимость которых описывается законом Кюри, относятся все газы, атомы или ионы которых обладают отличным от нуля результирующим магнитным моментом (например, щелочные или переходные металлы в газообразном состоянии, O₂, NO₂, NO, S₂, Cl₂O).

Парамагнетиками являются жидкие растворы солей переходных и редкоземельных металлов, а также кристаллы соединений этих элементов, обладающие ионной и неполярной связями, при условии, что магнитно-активные ионы слабо взаимодействуют друг с другом и их ближайшее окружение в конденсированной фазе слабо влияет на их парамагнетизм. Типичными представителями этого класса парамагнетиков являются гидратированные соли редкоземельных элементов – например, Pr₂(SO₄)₃·8H₂O, Gd₂(SO₄)₃·8H₂O. Их магнитные свойства определяются магнитными моментами незаполненной 4f-оболочки, которая экранирована от взаимодействия с соседними атомами, заполненными внешними 5s- и 5p-оболочками ионов.

В парамагнитных диэлектрических соединениях переходных металлов группы Fe, Pd и Pt [например, NH₄Fe(SO₄)₂·12H₂O, KCr(SO₄)₂·12H₂O] может наблюдаться т. н. замораживание орбитального момента атомов внутрикристаллическим полем. Электроны незаполненных 3d-, 4d- и 5d-оболочек атомов переходных металлов менее экранированы, чем электроны 4f-оболочки, и внутрикристаллическое поле может частично или полностью снимать вырождение основного энергетического уровня магнитного иона. Тогда средние значения проекций орбитального момента электронов на любую ось становятся равными нулю; таким образом, в формировании магнитного момента иона принимает участие только спин иона. Согласно теореме Крамерса, у атомов (ионов) с полуцелым значением спина всегда остаѐтся по крайней мере двукратное вырождение, снимаемое только во внешнем магнитном поле. В этом случае парамагнитная восприимчивость будет

подчиняться закону Кюри. Спин-орбитальное взаимодействие может частично снимать «замораживание» орбитального момента.

Вещества, содержащие парамагнитные ионы с синглетным основным состоянием (Eu^{3+} , Sm^{3+} , Pr^{3+} , Tm^{3+} , Tb^{3+} , Ho^{3+}), относятся к поляризационным, или ванфлековским, парамагнетикам (например, интерметаллические соединения PrNi_5 , PrCr_6 , LiTmF_4). Их парамагнитная восприимчивость не зависит от температуры.

Большинство непереходных металлов (все щелочные металлы, щёлочноземельные металлы, за исключением V и Al , а также сплавы этих металлов) проявляют парамагнетизм Паули. К паулиевским парамагнетикам относятся также переходные металлы и их сплавы, например Pd , Pt , Sc , Ti , V , восприимчивость которых даже при комнатной температуре обычно на 1–2 порядка больше, чем у непереходных металлов. Для некоторых переходных металлов уменьшение магнитной восприимчивости с ростом температуры следует закону Кюри – Вейса, для других (например, V , Ta) – отклоняется от этого закона, а, например, для Mo , наоборот, восприимчивость растёт с увеличением температуры. В общем случае температурные зависимости восприимчивости переходных металлов и их сплавов весьма разнообразны и сложны.

Парамагнитными свойствами обладает ряд органических соединений, например стабильные нитроксильные радикалы ($\text{RR}'\text{-N-O}\cdot$). Их применяют в качестве спиновых меток и парамагнитных зондов в экологии и медицине.

Парамагнетиками становятся все ферро- и антиферромагнитные вещества при температурах выше температуры фазового перехода в парамагнитное состояние.

Существуют также ядерные парамагнетики, например ^3He при сверхнизких температурах ($< 0,1 \text{ K}$).

Парамагнетики применяют в магнитном охлаждении до сверхнизких температур, в квантовой электронике и при исследовании веществ (см. Электронный парамагнитный резонанс, Ядерный магнитный резонанс).

Котельникова Ольга Анатольевна, Радковская Анна Александровна

Библиография:

- Вонсовский С. В. Магнетизм : магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферримагнетиков. – Москва : Наука, 1971.
- Вонсовский С. В. Магнетизм. – Москва : Наука, 1984. – (Проблемы науки и технического прогресса).
- Херд К. М. Многообразие видов магнитного упорядочения в твердых телах // Успехи физических наук. – 1984. – Т. 142, № 2. – С. 331–355.
- Ландау Л. Д. Теоретическая физика. В 10 т. Т. 8. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 4-е изд., стер. – Москва : Наука, 2005.