

## Магнитная термометрия

Магнитная термометрия, метод измерения температур, основанный на сильной температурной зависимости магнитных свойств магнетиков, в особенности в области магнитных фазовых переходов. Применяется для измерения как высоких, так и низких температур или градиентов температур. При температурах, близких к абсолютному нулю (ниже 1 К), в качестве термометрического параметра используют магнитную восприимчивость парамагнитного вещества – парамагнитной соли или ядерного парамагнетика, для которых характерна сильная зависимость магнитной восприимчивости от температуры в необходимой области температур. Температурная зависимость магнитной восприимчивости парамагнетика  $\chi$  описывается законом Кюри  $\chi=C/T$  (где  $C$  – константа Кюри,  $T$  – абсолютная температура) или законом Кюри – Вейса  $\chi=C/(T-\theta)$  (где  $\theta$  – парамагнитная температура Кюри). При приближении к абсолютному нулю или к температуре  $\theta$  магнитная восприимчивость быстро изменяется, достигая больших величин – это свойство парамагнетиков и используется в магнитной термометрии.

Законы Кюри и Кюри – Вейса могут нарушаться в области низких температур, что приводит к погрешности в определении абсолютной температуры. В общем случае с помощью законов Кюри и Кюри – Вейса определяют т. н. магнитную температуру, которая совпадает с абсолютной температурой только в области выполнения этих законов. Для установления связи между магнитной и абсолютной температурами проводится предварительная калибровка используемого вещества путём измерения и определения температурных зависимостей его теплоёмкости и энтропии. Константы Кюри определяют в области температур 0,5–2 К. На основе этих измерений составляют калибровочные таблицы  $\chi(T)$  для используемых веществ. В качестве парамагнитной соли используют церий-магниевого нитрата, для которого  $\theta \approx 1,9\text{К}$ , а в области более низких температур – это же вещество, но с замещением церия на лантан. Магнитная восприимчивость парамагнитных солей в слабых полях может быть измерена динамическим методом или с помощью СКВИД-магнитометра.

Температуры порядка  $10^{-6}$  К могут быть измерены с помощью ядерных парамагнетиков (медь, алюминий, платина), у которых закону Кюри подчиняется ядерная магнитная восприимчивость. В этом случае восприимчивость может быть измерена СКВИД-магнитометром (статический метод, характеризуемый малой мощностью, выделяемой в термометре) или с помощью резонансных методов, например ядерного магнитного резонанса.

Измерение температуры с помощью ядерных парамагнетиков предъявляет повышенные требования к чистоте образца.

В диапазоне температур 2–27 К в качестве термометрического вещества могут быть использованы соли  $Gd(PO_3)_3$  и  $Nd(C_2H_5SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ . В технических целях для определения температуры может быть использован тот факт, что в точках фазовых переходов как 1-го, так и 2-го рода магнитные материалы имеют наиболее существенную зависимость магнитных параметров от температуры. Так, например, термомагнитный материал – редкоземельный металл гадолиний имеет сильную зависимость намагниченности от температуры в точке Кюри, расположенной в области комнатных температур. Это даёт возможность изготавливать датчики температуры, которые могут работать под действием экстремально сильных давлений. Применение интерметаллических соединений редкоземельных металлов в комбинации с конструкционными сталями позволяет расширить температурный интервал работы таких датчиков в область как низких, так и более высоких температур. Поскольку магнитные свойства данных материалов, как правило, сильно зависят не только от температуры, но и от статических и динамических нагрузок (например, имеют большой сдвиг точки Кюри под действием давления), это даёт уникальную возможность одновременно использовать их как датчики линейных и объёмных воздействий (датчики давления).

С 2000 гг. появились новые высокочувствительные методы бесконтактного измерения не только упомянутых выше магнитных характеристик, но непосредственно температуры магнетика (например, с помощью лазера или оптоволокна).

Тишин Александр Метталинович, Спичкин Юрий Иванович

### **Библиография:**

- Лоунасмаа О. В. Принципы и методы получения температур ниже 1 К / пер. с англ. В. Б. Гинодмана и Б. Г. Журкина. – Москва : Мир, 1977.
- Методы получения и измерения низких и сверхнизких температур : справочник / [Веркин Б. И. и др.]. – Киев : Наукова думка, 1987.
- Tishin A. M. Static and dynamic stresses / A. M. Tishin, Y. I. Spichkin, J. Bohr // Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. – 1999. – Vol. 26, ch. 170. – P. 87–176.