

сильной температурной зависимости магн. свойств ряда веществ. В более узком смысле термин «М. т.» относится к методу измерения темп-р, в к-ром термометрич. параметром служит *магнитная восприимчивость* χ парамагн. соли или ядерного парамагнетика. В этом методе за магн. темп-ру принимается величина $T^* = C/\chi$, где C — константа в *Кюри законе* (иногда вместо закона Кюри используют *Кюри—Вейса закон*). В области темп-р, в к-рой выполняется закон Кюри, T^* совпадает с абс. термодинамич. темп-рой T . При понижении темп-ры значения T и T^* могут существенно различаться. Для установления связи между T^* и T в этом случае проводят калибровку используемой парамагн. соли, исходя из второго начала термодинамики

$$T = \frac{(\partial Q/\partial T^*)_{H=0}}{(\partial S/\partial T^*)_{H=0}} = f(T^*),$$

где $(\partial Q/\partial T^*)_{H=0}$ — теплоёмкость, измеренная с помощью магн. термометра, S — энтропия, H — магн. поле. Величину $(\partial S/\partial T^*)_{H=0}$ находят экспериментально, адиабатически размагничивая соль от разл. начальных значений магн. поля и вычисляя зависимость $S(H)$ при высоких темп-рах, где парамагн. соль подчиняется закону Кюри. Одновременно измеряют получаемую при размагничивании от данного значения поля темп-ру $T^*(H)$. Т. о. находят зависимость $S(T^*)$ и соответственно величину $(\partial S/\partial T^*)_{H=0}$. Практически магн. темп-ру T^* переводят в абсолютную, используя таблицы, составленные для ряда солей.

М. т. применяется для измерения как темп-ры магн. подсистемы парамагнетика, так и темп-ры др. подсистем, приведённых в тепловое равновесие с магн. подсистемой. Для измерения темп-р в диапазоне $1 \div 0,01$ К обычно применяется церий-магнийский нитрат (ЦМН), магн. восприимчивость к-рого подчиняется закону Кюри — Вейса. Этой зависимостью удобно пользоваться до темп-р $\approx 5 T_c$ (T_c — темп-ра упорядочения, для ЦМН $T_c \approx 1,9$ мК). При более низких темп-рах магн. восприимчивость ЦМН описывается более сложной зависимостью. Для измерения более низких темп-р (до ~ 1 мК) используют ЦМН, в к-ром Се частично замещён La. Восприимчивость парамагн. соли измеряют мостами перем. тока по сравнению взаимной индуктивности двух одинаковых катушек, в одной из к-рых находится образец соли, а при малых количествах соли — сверхпроводящим квантовым интерферометром магн. потока — СКВИП (или *СквиД*) [разрешение по темп-ре $\Delta(1/T) = 0,001$ К $^{-1}$ удаётся получить с использованьем только 1 мг соли].

Магн. термометр на основе парамагн. соли является вторичным. Его калибруют, определяя константы в законе Кюри или Кюри — Вейса др. методом (по другому термометру), обычно в области темп-р $2—0,5$ К. Точность измерения магн. темп-ры в этом диапазоне не превосходит 0,1%.

Для измерения в миллиградусном и микроградусном диапазоне темп-р используют датчики на основе ядерного магнетизма веществ (Cu, Al, Tl, Pt, AuIn₂), у к-рых ядерная магн. восприимчивость подчиняется закону Кюри. Т. к. ядерная восприимчивость на неск. порядков меньше электронной, особое внимание приходится уделять чистоте используемых веществ. Статич. методы измерения ядерной намагниченности с использованием СКВИПа (сквида) пригодны только для образцов, в к-рых магнетизм электронов не влияет на результаты при всех темп-рах, при к-рых проходят измерения. Насыщение намагниченности электронной составляющей достигается паложением достаточно больших внеш. магн. полей. К преимуществам статич. метода измерения ядерной намагниченности относится малая мощность, выделяемая в термометре, к-рая может быть уменьшена до очень малой величины ($\sim 10^{-18}$ Вт).

Резонансные методы измерения ядерной намагниченности имеют очевидное преимущество по сравнению со статическими, т. к. ларморовские частоты ядер и элек-

тронов примесных атомов различаются на неск. порядков. Используются как непрерывные, так и импульсные методы *ядерного магнитного резонанса*. В случае ЯМР, осуществляемого в непрерывном режиме, восприимчивость ядер измеряется по величине сигнала поглощения радиочастотного (РЧ-) поля, а в импульсном режиме — по величине сигнала индукции. Методы непрерывного ЯМР позволяют проводить измерения с большей точностью, чем импульсные методы, однако весьма серьёзным фактором является перегрев ядерной спиновой системы РЧ-полем. При импульсном ЯМР величина сигнала индукции пропорциональна величине намагниченности ядер до подачи РЧ-импульса. Поэтому, увеличивая значение задержки между импульсами, можно контролировать перегрев ядерной спиновой системы.

Наиб. распространён платиновый импульсный ЯМР-термометр. В платине время ядерной спин-решёточной *релаксации* τ подчиняется закону Коринги $\tau = \kappa/T$ с малой величиной постоянной Коринги ($\kappa = 0,03$ с·К), что обеспечивает быстрое установление равновесия между темп-рой ядер и электронов проводимости. Кроме того, измерение τ часто используют для самокалибровки платинового ЯМР-термометра. К перспективным видам М. т. для миллиградусной области темп-р относится использование СКВИПа в методах ЯМР, что позволяет существенно уменьшить погрешности измерений за счёт снижения мощности, выделяемой в ядерную спиновую систему.

Лит.: Гольдман М., Спиновая температура и ЯМР в твердых телах, пер. с англ., М., 1972; Лоунасаа О. В., Принципы и методы получения температуры ниже 1 К, пер. с англ., М., 1977. Ю. М. Буньков.

МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ — пространств. последовательность *магнетиков* (веществ или сред с разл. магн. проницаемостью), по к-рым проходит определ. *магнитный поток*. Понятие «М. ц.» широко используется при расчётах пост. магнитов, электромагнитов, реле, магн. усилителей, электроизмерит. и др. приборов. В технике распространены как М. ц., в к-рых магн. поток практически полностью проходит в ферромагнетиках и ферримагнетиках — ферритах (за м к н у т е М. ц.), так и М. ц., включающие помимо ферромагнетиков и ферримагнетиков диамагнетики (напр., воздушные зазоры). Если магн. поток возбуждается в М. ц. пост. магнитами, то такую цепь называют *полярной* или *нейтральной*; магн. поток в ней возбуждается током, протекающим в обмотках, охватывающих часть или всю М. ц. В зависимости от характера тока возбуждения различают М. ц. постоянного, перемещенного и импульсного магн. потоков. Вследствие формальной аналогии электр. и магн. цепей к ним применим общий матем. аппарат, для М. ц. аналогом *Ома закона* служит *ф-ла* $F = \Phi \cdot R_m$, где Φ — магн. поток, R_m — *магнитное сопротивление*, F — *магнитодвижущая сила*. К М. ц. применимы *Кирхгофа правила*. Существует, однако, и принципиальное различие между М. ц. и электр. цепью: в М. ц. с неизменным во времени потоком Φ не выделяется Джоулева теплота (см. *Джоуля — Ленца закон*), т. е. нет рассеяния эл.-магн. энергии.

Лит.: Калашников С. Г., Электричество, 5 изд., М., 1985; Полянов К. М., Ферромагнетики, М.—Л., 1957.

МАГНИТНАЯ ЯЧЕЙКА — элемент структуры магнитоупорядоченного кристалла, параллельными переносами к-рого в трёх измерениях (*трансляциями*) можно полностью воспроизвести *магнитную атомную структуру* кристалла. Понятие «М. я.» во многом аналогично кристаллохимическому понятию «элементарная ячейка» кристалла (ЭЯК), но существуют и различия в их определении. В случае М. я. трансляции должны приводить к совмещению кристалла с самим собой с учётом атомных магн. моментов, а не только положений атомов и их хим. сортности, как в случае