

Подвижность носителей в М. п. невелика по сравнению с обычными полупроводниками. Она лимитируется дополнит. механизмом рассеяния на неоднородностях и флуктуациях намагниченности (см. *Рассеяние носителей заряда в твердом теле*). Определение эффективной массы носителей с помощью эффекта Холла затруднено, т. к. из-за спонтанной намагниченности велик вклад

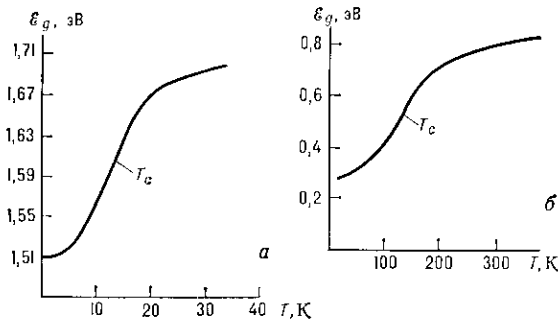


Рис. 3. Температурная зависимость края оптического поглощения в  $\text{EuS}$  (а) и  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$  (б);  $\epsilon_g$  — ширина запрещенной зоны.

аномальной составляющей (см. *Холла эффект, Гальваномангнитные явления*). Кроме того, наличие электрон-магнитного взаимодействия в М. п. приводит к изменению величины затухания спиновых волн в М. п. при пропускании тока.

Характерной особенностью М. п. является т. н. гигантское красное смещение края оптич. поглощения при изменении темп-ры. Так, у  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$  край поглощения сдвигается от 0,8 до 0,3 эВ при понижении  $T$  от 300 до 4 К (рис. 3). Пек-рым М. п. свойственны явления фотомангнетизма (изменение магн. свойств при освещении). Так, в  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  при освещении изменяются магн. проницаемость, коэрцитивная сила, вид скачков Баркгаузена.

Многие особенности М. п., в частности аномалии кинетич. характеристик, иногда объясняют исходя из теоретич. предсказания существования в М. п. ферроионов — областей, в к-рых концентрация электронов проводимости и магн. момент отличаются от средних по кристаллу. Такие области могут быть, в частности, локализованы на примесях, вакансиях и др. дефектах. Наличие дефектов существенно влияет также на магнитокристаллич. анизотропию М. п. Так, чистый М. п.  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  практически изотропен, но при легировании и отжиге, к-рые меняют число примесей и вакансий, становится анизотропным, причём направление осей анизотропии и её степень можно изменять, меняя кол-во и тип примесей и вакансий.

Необычные свойства М. п. делают их перспективными для создания ячеек памяти, для термомагн. и фотомангн. записи, для вращения плоскости поляризации эл.-магн. излучения, в частности в диапазоне СВЧ. На М. п. реализованы  $p-n$ -переходы, Шоттки барьеры и др. структуры.

Лит.: Метфессель З., Маттис Д., *Магнитные полупроводники*, пер. с англ., М., 1972; *Магнитные полупроводники шпинели типа  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$* , под ред. С. И. Радауцана, Киш., 1978; Нагаев Э. Л., *Физика магнитных полупроводников*, М., 1979; *Магнитные полупроводники — халькогенидные шпинели*, М., 1981; *Магнитные полупроводники*, под ред. В. Р. Веселаго, М., 1982.

**МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

(биомангнетизм). Жизнедеятельность любого организма сопровождается протеканием внутри него очень слабых электрич. токов — биотоков (они возникают как следствие электрич. активности клеток, гл. обр. мышечных и нервных). Биотоки порождают магн. поле с индукцией  $10^{-14}$ — $10^{-11}$  Тл (рис. 1), выходящее и за пределы организма. Его наз. биоманг-

нитным. Измерение биомангн. поля и получение на этой основе информации о генерирующих его биотоках составляют метод и предмет возникшего в 70-х гг. 20 в. направления исследований, получившего наименование «биомангнетизм», в отличие от магнитофизиологии, изучающей воздействие магн. поля на живые организмы.

Уверенное измерение слабых биомангнитных полей стало возможным прежде всего благодаря изобретению в 60-х гг. прибора, получившего название *сквид*. Чувствительность сквид-магнитометра к магнитному полю на два порядка выше, чем у лучших несверхпроводящих магнитометров, и достигает  $10^{-14}$  Тл·Гц $^{-1}$ . Чувствительным к магнитному полю элементом сквид-магнитометра служит петля из сверхпроводника, расположенная на дне дьюара с жидким гелием и индуктивно связанная с собственно сквидом, также работающим при «гелиевой» темп-ре (с обнаружением в 1986 оксидных высокотемпературных сверхпроводников

появилась принципиальная возможность создания «азотных» сквидов, работающих при темп-ре 77 К).

Регистрация биомангн. полей по аналогии с электрографич. методами (кардиографией, энцефалографией

Рис. 1. Место биомангнитных сигналов человека в шкале магнитных полей. Указаны характерные уровни помех и частотные диапазоны сигналов.



и т. п.) наз. биомангнитографией. Магнитография и электрография дают разную информацию о токах в организме, поэтому они — не конкурирующие, а дополняющие друг друга методы исследования. К достоинствам биомангнитографии можно отнести: 1) возможность измерять квазипостоянные сигналы, к-рые на электрограммах особенно часто маскируются из-за электрич. проводимости кожи; 2) бесконтактность и, в частности, возможность перемещать магн. датчик для точной локации (определения местонахождения) источника биотоковой активности; 3) возможность детектировать магн. включения в организме, а при наличии внеш. поля измерять магн. восприимчивость органов и тканей.

Магнитография уже применялась для исследования сердца, плода, скелетных мышц, глаза, сетчатки глаза, мозга, магнитных загрязнений лёгких, постоянных токов в коже человека и т. д. Большинство этих исследований возможно только в условиях тщательного экранирования от «шумовых» магнитных полей самой различной природы (см. *Магнитное экранирование*).

Наиб. сильные электрич. и магн. поля в организме порождает сердце. Сигналы, записываемые на электрокардиограмме (ЭКГ), можно представить как следствие вращения в пространстве перемещающегося электрич. диполя, расположенного в центре сердца. Аналогичная модель применима и при магнитокардиографических (МКГ) исследованиях. Величина магн. момента человеческого сердца в максимум составляет ок. 0,8 мкА·м $^2$ . Более полное представление об электрической активности сердца даёт карта расщепления магн. поля по поверхности грудной клетки. Преимущества МКГ перед ЭКГ иллюстрирует рис. 2.

В исследованиях МКГ имеется направление, близкое по содержанию к нейромагнетизму (см. ниже), заклю-