

проводнике, а также от степени его компенсации позволяет проверить теоретич. модели релаксац. процессов и их особенности в полупроводниках электронного ( $n$ ) и дырочного ( $p$ ) типов проводимости. По изменению характера спин-решёточной релаксации на ядрах  $^{29}\text{Si}$  и появлению сдвига Найта при концентрации носителей заряда  $n = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  можно установить переход от полупроводникового к металлич. типу проводимости, а также характер этого перехода. Аналогичные исследования осуществлены на ядрах  $^{73}\text{Ge}$  ( $I \neq 0$ ) в монокристаллах германия. Ядра всех элементов, образующих решётку соединений  $\text{A}^{III}\text{B}^V$ , за исключением  $\text{P}$  ( $I = 1/2$ ), обладают квадрупольными моментами  $Q \neq 0$ . Это проявляется в температурных зависимостях релаксац. характеристик, в частности в ускорении спин-решёточной релаксации за счёт квадрупольных эффектов.

Хим. сдвиг тем больше, чем больше число электронов в оболочке атома и чем меньше эфф. заряд оболочки соседних атомов в кристалле. Наиб. исследованы соединения  $\text{A}^{III}\text{B}^V$ , в к-рых хим. сдвиг достигает  $10^2$ — $10^3$  миллионов долей от  $H_0$ . Величины хим. сдвига на ядрах  $^{11}\text{B}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{121}\text{Sb}$  коррелируют со значениями эфф. заряда соседних атомов.

ЯМР применяется также для изучения адсорбции газов и жидкостей поверхностью полупроводников. Адсорбция парамагн. ядер уменьшает подвижность ядерных спинов жидкой или газообразной фазы, что приводит к изменению ширины спектральной линии ЯМР. Адсорбция влияет также на времена спин-спиновой и спин-решёточной релаксаций [8].

Величина диполь-дипольного взаимодействия парамагн. ядер изменяется в зависимости от ориентации магн. поля  $H_0$  относительно кристаллографии осей. Изучение этой анизотропии даёт возможность определить взаимную ориентацию спинов ядер, расстояния между ядрами, характер и симметрию ближайшего окружения парамагн. центра, а также исследовать структурные дефекты кристаллов. При взаимодействии большого числа парамагн. ядер анализ сложных спектров ЯМР осуществляется с помощью т. н. второго момента спектральной линии, к-рый при взаимодействии одинаковых ядер описывается ф-лой Ван Флека [1, 2]. Второй момент определяется среднеквадратичной величиной локальных магн. полей, созданных на ядре всеми др. ядерными диполями. Каждая структурная модель характеризуется определ. значениями величины второго момента, что успешно применяется при анализе структуры стеклообразных полупроводников. Существуют программы для расчёта на ЭВМ вторых моментов линий ЯМР по структурным моделям для монокристаллов произвольной симметрии [9].

Для соединений  $\text{A}^{III}\text{B}^V$  с решёткой  $\text{ZnS}$  исследованы разл. магн. взаимодействия и их влияние на второй момент спектральной линии. Аналогичные расчёты позволили оценить концентрацию собств. дефектов в  $\text{GaAs}$ , установить их вид, место нахождения и заряд [10]. Изучение влияния примесей на форму спектров ЯМР позволяет определить положение примесей в решётке и их концентрации, а также влияние примесей на эффекты экранирования градиентов электр. полей в кристалле.

Исследования методом ЯМР протонов в гидрированном аморфном  $\text{Si}$  обнаружили кластеры мономеров и позволили определить их ср. размеры.

При исследовании полупроводниковых кристаллов широко используются методы двойного электронно-ядерного резонанса и оптич. поляризации ядер (см. *Оптическая ориентация* в полупроводниках).

Лит.: 1) Абрагам А., Ядерный магнетизм, пер. с англ., М., 1963; 2) Понтер Х., Введение в курс спектроскопии ЯМР, пер. с англ., М., 1984; 3) Керрингтон А., Мак-Лечлан Э., Магнитный резонанс и его применение в химии, пер. с англ., М., 1970; 4) Ядерный магнитный резонанс; под ред. П. М. Бородин, Л., 1982; 5) Бузник В. М., Ядерный резонанс в ионных кристаллах, Новосибир., 1981; 6) Хеберлен У., Мерино М., ЯМР высокого разрешения в твердых телах, пер. с англ., М., 1980; 7) Рембеза С. И., Парамагнитный резонанс в полупроводниках, М., 1988; 8) Киселев В. Ф., Крылов О. В., Адсорбционные процессы на

поверхности полупроводников и диэлектриков, М., 1978; 9) Бондарь А. М., Самсонова Е. А., Вычисление вторых моментов спектров ЯМР по структурным моделям с использованием ЭВМ, М., 1978; 10) Андрианов Д. Г. [и др.], Исследование собственных точечных дефектов структуры в монокристаллах арсенида галлия методом ядерного магнитного резонанса, «ФТП», 1983, т. 17, № 1, с. 93. С. И. Рембеза.

**ЯДЕРНЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС** акустический — см. *Акустический ядерный магнитный резонанс*.

**ЯДЕРНЫЙ ПАРАМАГНЕТИЗМ** — парамагнетизм вследствие обусловленного магн. моментами атомных ядер. В пост. магн. поле  $H$  существование магн. моментов у ядер приводит к слабому парамагнетизму в виде небольшой добавочной ядерной намагниченности  $M_n = \chi_n H$ , где  $\chi_n$  — ядерная магнитная восприимчивость (на 1 моль), зависящая от темп-ры (*Кюри закон*). Ядерная намагниченность  $M_n$  в  $10^5$ — $10^8$  раз меньше, чем в случае электронного парамагнетизма. Я. п. впервые обнаружен в 1937 Л. В. Шубниковым и Б. Г. Лазаревым (СССР) в твёрдом водороде. Изучается методом *ядерного магнитного резонанса*.

**ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР** — содержащая ядерное горючее установка, в к-рой осуществляется управляемая ядерная цепная реакция деления. Первый Я. р. был построен в 1942 в Чикаго (США) под руководством Э. Ферми (E. Fermi).

По своему назначению Я. р. подразделяются на неск. групп: 1) энергетические реакторы, в к-рых энергия, выделяющаяся при делении ядер горючего, используется для выработки электроэнергии, а также для др. промышленных и бытовых нужд (Я. р. для АЭС, транспортные Я. р. для морского флота и др.); 2) экспериментальные, или опытные, реакторы, служащие для проведения экспериментов в области физики и техники реакторов; 3) исследовательские реакторы, в к-рых возникающее излучение используется для научных и прикладных исследований в области ядерной физики, физики твёрдого тела, биофизики, химии и др.; 4) промышленные, или изотопные, реакторы, используемые для наработки (накопления) искусств. изотопов. В многоцелевых Я. р. могут совмещаться различные по назначению функции.

Принципиальная схема Я. р. приведена на рис. 1. Осн. часть Я. р. — активная зона, где сосредоточено ядерное горючее, протекает цепная реакция деления и выделяется энергия. Активная зона имеет обычно цилиндрич. конфигурацию, объём её в зависимости от назначения и возможностей конструктивного воплощения — от долей литра до многих кубометров. Кол-во горючего, необходимое

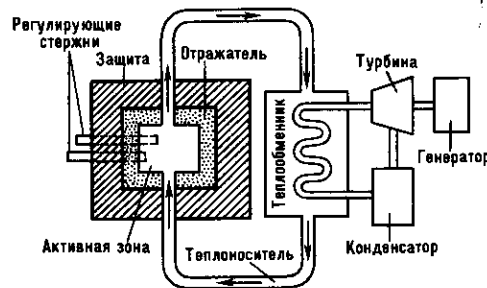


Рис. 1. Схема ядерного реактора.

для поддержания управляемой цепной реакции, — критическая масса — от сотен грамм до неск. тонн. При загрузке Я. р. ядерное горючее превышает критич. массу на величину, соответствующую запасу на выгорание. Ядерное горючее размещается, как правило, внутри тепловыделяющих элементов (*ТВЭЛов*), кол-во к-рых в активной зоне может достигать многих десятков тысяч. В конце срока службы (кампании) — многие месяцы или годы — ТВЭЛы полностью или частично извлекаются и заменяются новыми. Для удобства загрузки ТВЭЛы собираются по неск.