

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ДИФФУЗИОННО-НАМАГНИЧЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

Е.К.Завойский

Показано, что поляризация электронов проводимости (ЭП) диамагнитного металла, находящегося в контакте с ферромагнетиком приводит к ряду интересных эффектов, которые могут быть обнаружены разными методами

Контакт металлической пленки с проводящим ферромагнетиком в сильном магнитном поле вызывает диффузию поляризованных ЭП ферромагнетика в металл и диффузию частично деполяризованных ЭП из металла в ферромагнетик. Сильная поляризация в металле будет заметна на глубине порядка длины L пробега ЭП без изменения направления спина, что для некоторых металлов при достаточно низкой температуре составит многие тысячи атомных расстояний. Обозначая через p_0 степень поляризации ЭП на границе ферромагнетика, находим

$$p = p_0 \exp(-x/L), \quad (1)$$

где p – степень поляризации ЭП в металле на расстоянии x от границы с ферромагнетиком.

Подобный по величине магнитный момент может быть получен металлом только в сверхсильном магнитном поле H_0 , величина которого зависит от p

$$H_0 \approx \frac{p}{1-p} \frac{k\Theta}{\mu},$$

где μ – магнитный момент электрона, k – постоянная Больцмана, Θ – температура вырождения. Оценка показывает, что $H_0 \approx 10^8 + 10^9$ э. Однако, внешнее магнитное поле может создать момент направленный вдоль поля, в то время как в случае индуцированного ферромагнетиком момента [1], его направление в металле определяется поляризацией ЭП в ферромагнетике.

Рассмотрим некоторые свойства диффузионно намагниченного металла.

1. Поляризация ЭП в диамагнитном металле вызовет ослабление виртуальных магнитных полей H_i , создаваемых магнитными моментами ЭП. Как известно,

$$H_i \approx \frac{\mu}{r^3} + \frac{\mu_j}{r_j^3},$$

где r и r_j – расстояние между ЭП и, соответственно, ядрами атомов, μ_j – магнитный момент ядра. Степень уменьшения H_i определяется значением r и при $r \rightarrow 1$ зависит только от полей, создаваемых ядрами. Поэтому, при $\mu_j = 0$ и $r = 1$ степень уменьшения H_i может составлять несколько порядков величины. Однако, этому могут мешать микро и макро неоднородности полей на границе металлов. Но если L велико и $L \approx x$, то их роль будет небольшой.

Уменьшение H_i дает, по-видимому, уникальную возможность выяснить рассеяние ЭП на H_i и его вклад в электропроводность металлов. Пока трудно дать оценку этому эффекту, но как известно, в металлах время спин-спиновой и спин-решетчатой релаксации равны, и уменьшение H_i вызовет ослабление связи спинов с решеткой, что часто сопровождается (например, при понижении температуры) уменьшением и трансляционной связи ЭП с решеткой. Заметим, что интересно было бы поставить подобные эксперименты с пленками TTF-TCNQ, так как в этом веществе зависимость ширины кривой электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) подобна зависимости электропроводности от температуры [2] и сужение кривой ЭПР позволило бы выделить магнетонную компоненту сопротивления.

Весьма вероятно, что неоднородности магнитного поля на границе металлов будут сказываться меньше на электропроводности металла чем на спектре ЭПР. Заметим также, что удлинение времени спин-решеточной релаксации ЭП за счет снижения H_i приводит к увеличению L . Этот нелинейный эффект может сделать зависимость (1) более сложной.

2. Должно наблюдаться возрастание сигнала ЭПР. Максимальное увеличение можно оценить по отношению a энергии $2\rho n \mu H$, где n – плотность ЭП, к паулиевской парамагнитной энергии ЭП в поле H

$$a \approx 4\rho n \mu H (\chi H)^{-1},$$

где

$$\chi \approx 3n \mu^2 (2k\Theta)^{-1}.$$

Оценка величины a показывает, что даже при x превышающем на порядок L , $a \gtrsim 1$. Если же толщина металла равна или меньше L , то, естественно, $a \gg 1$. Заметим, что если толщина скин-слоя больше x , то на спектр ЭПР в металле могут наложиться процессы взаимодействия высокочастотного поля с ферромагнетиком.

3. Изменение g -фактора линии ЭПР будет определяться магнитным потоком, вызванным поляризацией ЭП в металле. При насыщении (частичном или полном) ЭП металла резонансные кривые будут смещаться в сторону уменьшения абсолютного значения Δg . Импульсное насыщение ЭПР, по-видимому, будет хорошим методом измерения времени установления поляризации ЭП в металле.

4. В многослойных блоках металла, чередующегося с ферромагнетиком, возможны сильные эффекты акустического парамагнитного резонанса. Оценка сигнала в металле будет порядка вычисленной в (2). Этот эффект должен облегчить получение поляризованных ядерных мишеней.

5. Мазер-эффект на ЭП металла возможен в случае отрицательной поляризации ЭП металла, или при положительной поляризации, но с использованием вспомогательного короткого СВЧ импульса (или быстрой инверсии магнитного поля), переводящего спины на верхний зеемановский уровень. Если степень поляризации ЭП в металле будет большой, а ширина кривой ЭПР малой, то при интенсивных индуцированных переходах между зеемановскими подуровнями будут нарушаться условия резонанса за счет изменения намагниченности металла. Чтобы поддерживать резонансные условия, может быть использована модуляция магнитного поля с периодом порядка или больше времени восстановления поляризации ЭП. При этом резонансные условия, возникшие при некотором магнитном поле, могут автоматически поддерживаться до тех пор, пока в металле будет выполнено условие

$$dH / dt = 0,$$

где H – напряженность магнитного поля в металле, в которое входит, вообще говоря, и поле, вызванное индуцированными токами. Модуляция магнитного поля обеспечивает периодический мазер-эффект и баланс энергии.

Автор благодарен проф. В.Т.Гейликману за обсуждения.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
25 декабря 1975 г.

Литература

- [1] В.Я.Гемлицкий, О.А.Гурковский, В.И.Николаев, И.Н.Николаев, В.М.Черепанов, С.С.Якимов. ЖЭТФ, 67, 756, 1974.
- [2] Y. Tomkiewicz, B.A.Scott, L.J.Tao, R.S.Title. Phys. Rev. Lett., 32, 1363, 1974.