

КВАДРУПОЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ И ОСОБЕННОСТИ ЯМР ОПТИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЯДЕР В ТВЕРДЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РАСТВОРАХ.

Б.П.Захарченя, В.А.Новиков, В.Г.Флейшер

Обнаружены резонансные переходы оптически ориентированных ядер с частотами, изменяющимися при поворотах кристалла по синусоидальному закону в диапазоне между нулем и утроенной частотой обычного ЯМР. Резонансы связаны с нарушением кубической симметрии при замещении галлия алюминием в твердом растворе Ga Al As.

В многочисленных работах по оптической ориентации электронных и ядерных спинов в полупроводниках до сих пор не было сообщений о проявлении анизотропии кристаллического поля. В последнее время при исследовании оптической ориентации в твердых растворах Ga Al As нами был обнаружен ряд сильных анизотропных эффектов. Исследование ЯМР на оптически ориентированных ядрах позволило установить, что в оптическом канале проявляется ядерное квадрупольное взаимодействие. ЯМР регистрировался оптически по изменению степени ρ циркулярной поляризации люминесценции при наложении слабого переменного поля на резонансных частотах. В исследованных кристаллах величина ρ численно равна проекции $\langle S_z \rangle$ среднего спина электронов на направление наблюдения. При возникновении ядерной поляризации, на электронные спины действует эффективное магнитное поле ядер H_N [1,2]. Используя условия, при которых это влияние оказывается сильным, можно оптически регистрировать ЯМР с высокой чувствительностью, изменяя поле H_N на резонансных частотах.

На рис. 1 представлена геометрия опыта. Возбуждающий, циркулярно поляризованный (σ) луч He - Ne-лазера распространяется вдоль оси z , нормально к поверхности (плоскость (100)) кристалла. Постоянное магнитное поле H_x приложено вдоль оси x . Переменное магнитное поле H_y действует вдоль оси y . Кристалл поворачивается вокруг оси z и регистрируются спектры ЯМР для различных углов ϕ между осью [110] и осью x . Измерения проведены на кристаллах p -Al_{0,24}Ga_{0,76}As при 77 К.

Электронные спины прецессируют в суммарном поле $H_x + H_N$. На частотах ЯМР изменяется поле H_N и, следовательно, скорость прецессии электронных спинов и величина проекции $\langle S_z \rangle$. При этом наблюдаются изменения ($\Delta\rho$) циркулярной поляризации люминесценции, показанные на рис. 2. Следует отметить, что структура спектра существенно зависит от величины поля H_x и ориентации кристалла. На рис. 2 приведены линии, движение которых надежно прослеживается в широком диапазоне изменения полей H_x и углов ϕ . В отдельных областях значений H_x и ϕ наблюдаются дополнительные детали спектра, включающие как широкие раз-

мытые линии, так и хорошо разрешенные. В этом сообщении мы ограничиваемся рассмотрением поведения отдельных резонансных линий, приведенных на рис. 2. Значения частот приведенных резонансов изменяются линейно при изменении величины поля H_x . Следует обратить внимание на хорошее выделение резонансных линий при оптической регистрации ЯМР в относительно слабом поле (десятки эрстед). Ранее оптически регистрировались ЯМР спектры полупроводника в полях более килоэрстеда.

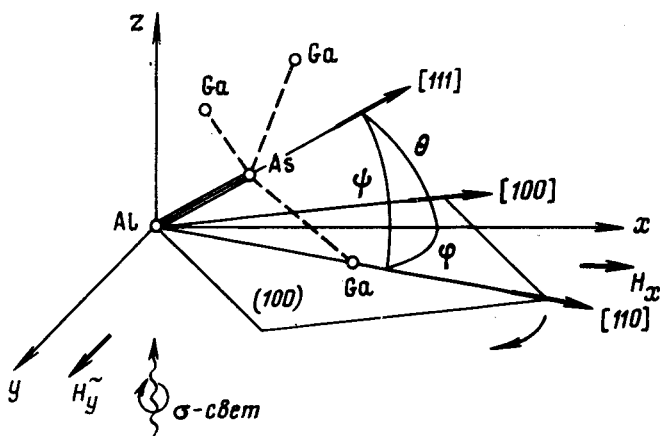


Рис. 1. Геометрия опыта. Представлен случай, когда один из ближайших к атому As атом Ga заменен на Al. Обозначения в тексте

Оптическое детектирование ЯМР осуществляется косвенно по зависимости $\langle S_z \rangle$ от H_N . Величина $\langle S_z \rangle$ является весьма сложной функцией [3]. Она зависит от величины поля H_x , интенсивности света и ориентации кристалла. Здесь мы не имеем возможности останавливаться на форме и знаке резонансных сигналов. Отметим лишь, что ЯМР спектры на рис. 2 включают низкочастотную и высокочастотную ветви, причем низкочастотной ветви соответствует уменьшение ρ (отрицательные величины $\Delta\rho$), а высокочастотной — положительные $\Delta\rho$. При меньших полях H_x наблюдаются положительные значения $\Delta\rho$ и для низкочастотной ветви. Весьма сложной оказывается зависимость ЯМР сигнала от амплитуды поля H_y . В области малых полей H_y наблюдается сильная нелинейность. При больших H_y (порядка и более одного эрстеда) наблюдается сглаживание ЯМР спектров и изменение знака $\Delta\rho$ в некотором диапазоне полей H_x . При этом наблюдаются частотные зависимости, приведенные в работе двух авторов [3].

На рис. 3 представлены экспериментальные значения резонансных частот в зависимости от угла ϕ . Сплошные линии представляют собой отрезки синусоиды.

Такой вид угловых зависимостей связан с частичным замещением галлия алюминием в твердых растворах Ga Al As. При этом кубическая симметрия элементарных ячеек нарушается, появляются заметные гра-

диенты поля и связанные с ними квадрупольные эффекты. В исследованных составах, в среднем, один из четырех ближайших к ядру As^{75} атомов Ga заменен на Al. Связи атомов Ga — Al и As — Al расположены вдоль пространственных диагоналей куба. Таким образом, в этих направлениях в разных ячейках возникают градиенты поля, действующие на ядра As^{75} .

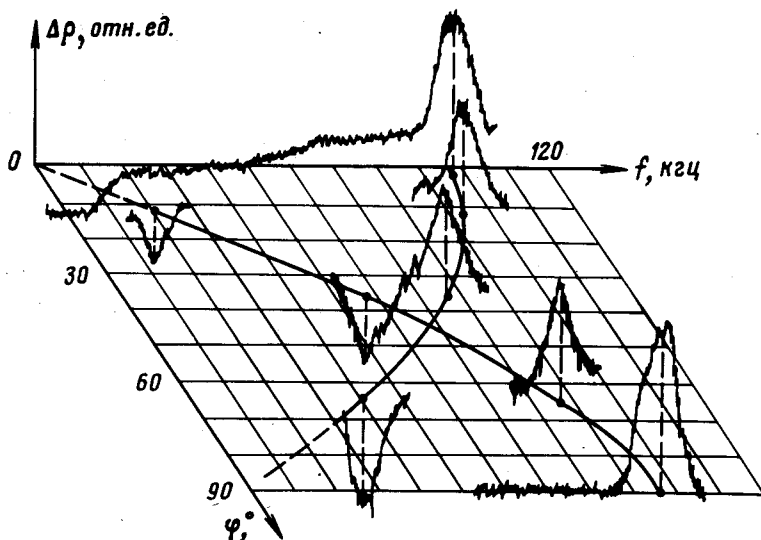


Рис. 2. Изменения $\Delta\rho$ степени циркулярной поляризации люминесценции в зависимости от угла ϕ и частоты f переменного поля H_y . Постоянное поле $H_x = 57$ э. Температура 77K

Максимальные частоты на рис. 3 соответствуют направлениям поля H_x вдоль диагоналей граней куба. Эти частоты отличаются от величины $3\gamma_I H_x$ (γ_I — гиромангнитное отношение для ядер As^{75}) множителем $\approx 0,82$, соответствующим значению $\cos \psi$ для ψ , равного углу между осями $[110]$ и $[111]$. Наклон внешнего магнитного поля к оси z , при котором угол между полем и осью $[111]$ уменьшается, как и следовало ожидать, сопровождается дополнительным увеличением резонансной частоты.

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о наличии резонансных переходов между расщепленными во внешнем поле уровнями с магнитными квантовыми числами $\pm 3/2$. Это расщепление существенно меньше квадрупольного расщепления между уровнями $1/2$ и $3/2$, так что ядерная зеемановская энергия входит в спиновый гамильтониан в виде члена, пропорционального $H \cos \theta$, где θ — угол между направлением градиента кристаллического поля и внешним магнитным полем. В условиях оптической ориентации электронов за счет сверхтонкого взаимодействия происходят либо преимущественно переходы $+1/2 \rightarrow +3/2$, либо $-1/2 \rightarrow -3/2$, в зависимости от знака циркулярной поляризации возбуждающего света. Преимущественное заселе-

ние одного из уровней $3/2$ приводит к появлению компоненты поля H_N , действующего на электронные спины, наряду с компонентой, возникающей в результате охлаждения ядерной спин-системы в поле электронов [3]. Выравнивание заселенностей при медленном прохождении резонансов изменяет поле H_N и, как следствие, величину ρ . Переходы между уровнями $\pm 3/2$ становятся возможными, благодаря примешиванию состояний с квантовым числом $1/2$ при $\theta \neq 0$. Две частотные ветви на рис. 3 связаны с вкладом двух пар пространственных диагоналей куба, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Резонансные частоты для одной пары изменяются при изменении ϕ , как $3\gamma_1 H_x \cos \psi \cos \phi$ и для другой, как $3\gamma_1 H_x \cos \psi \sin \phi$.

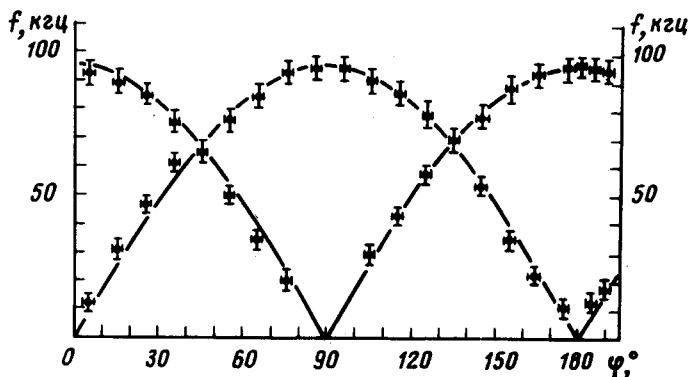


Рис. 3. Угловые зависимости резонансных частот для ядер As^{75} . $H_x = 57$ э. Температура 77К

Наблюдаются также аналогичные резонансные переходы для изотопов Ga^{69} и Ga^{71} , однако, они выражены более слабо и проследить за ними труднее, что, возможно, связано с меньшей величиной квадрупольного момента этих ядер, большей величиной межатомного расстояния $Ga - Al$ и тем, что каждое ядро Ga имеет несколько замещенных на Al ближайших соседей.

Непосредственно перед отправкой этого сообщения авторам стало известно о наблюдении аналогичных переходов В.Л.Берковицем и В.И.Сафаровым,

Авторы благодарны М.И.Дьяконову, В.И.Перелю и И.А.Меркулову за обсуждения.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
6 июля 1977 г.

Литература

- [1] В.Л.Берковиц, А.М.Екимов, В.И.Сафаров. ЖЭТФ, 65, 346, 1973.
- [2] М.И.Дьяконов, В.И.Перель. ЖЭТФ, 65, 362, 1973.
- [3] В.А.Новиков, В.Г.Флейшер. ЖЭТФ, 71, 778, 1976.