

СПЕКТРАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЯДЕР ПРИ ПРИМЕСНОМ ПОГЛОЩЕНИИ СВЕТА В КРЕМНИИ

Н.Т.Баграев, Л.С.Власенко

Впервые обнаружена динамическая поляризация ядер Si^{29} в кремнии при фотоионизации примесных центров. Обнаружено влияние магнитного поля на зависимость степени оптической поляризации ядер от длины волны света накачки.

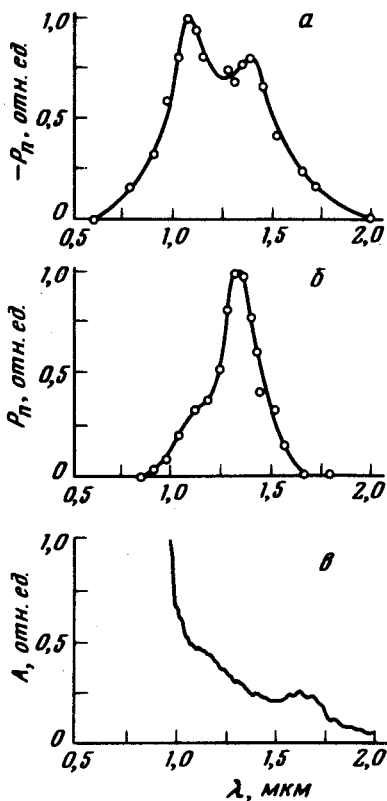
В настоящей работе описаны результаты экспериментов по оптической поляризации ядерных моментов в кремнии при фотоионизации примесных центров светом с энергией квантов меньшей, чем ширина запрещенной зоны.

Эксперименты проводились с кремнием, содержащим $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ атомов фосфора и компенсированным самарием примерно в такой же концентрации. Освещение образца производилось при $T = 77 \text{ К}$ в различных магнитных полях H_0 неполяризованным монохроматическим светом. Источником света служила лампа накаливания мощностью 50 Вт. Для получения монохроматического света, длина волны которого варьировалась в экспериментах от 0,5 до 2 мкм, использовался призмный монохроматор. Образец облучался светом с фиксированной длиной волны λ в течение 30 минут, затем нагревался до комнатной температуры и переносился в радиоспектрометр ядерного магнитного резонанса (ЯМР), с помощью которого измерялась ядерная намагниченность. За время переноса и измерения, которое составляло ~ 2 мин, ядерная намагниченность не успевала заметно уменьшиться по величине, так как время спин-решеточной релаксации ядер Si^{29} было ~ 1 час.

Величина сигналов ЯМР ядер Si^{29} , наблюдаемых методом быстрого адиабатического прохождения [1], а, следовательно, и степень поляризации ядер P_n зависела от длины волны света накачки λ . Зависимости P_n от λ , полученные при двух значениях магнитного поля $H_0 = 1500 \text{ э}$ и $H_0 = 20 \text{ э}$, приведены на рисунке (а и б). Отметим, что максимальные по величине сигналы ЯМР ядер Si^{29} , наблюдаемые в этих экспериментах, в 10 ÷ 15 раз превосходили равновесные сигналы ЯМР, полученные в этом же образце в магнитном поле 5 кэ при 300 К.

Экспериментальные зависимости, приведенные на рис. а и б, показывают, что динамическая поляризация ядер Si^{29} возникает при облучении кристалла светом с энергией квантов меньшей, чем ширина запрещенной зоны кремния ($E_g \approx 1,19 \text{ эВ}$, $\lambda_g \approx 1,04 \text{ мкм}$). Так, в магнитном поле $H_0 = 1500 \text{ э}$ (см. рис. а) оптическая поляризация ядер Si^{29} наблюдается при облучении образца светом с $\lambda \approx 1,7 \text{ мкм}$, что соответствует переходу электронов с примесного уровня самария ($E_v + 0,45 \text{ эВ}$ [2]) в зону проводимости. О наличии таких фотопереходов свидетельствует

приведенный на рис. *в* спектр оптического поглощения в исследованном образце кремния, полученный при $T = 77$ К с помощью двухлучевого спектрофотометра. На этом спектре наблюдается увеличение поглощения света с длинами волн $< 1,75$ мкм.



Зависимость степени оптической поляризации P_n ядер Si^{29} от длины волны света накачки λ в магнитном поле 1500 э (а) и 20 э (б); в — оптическое поглощение в кремнии, компенсированном самарием

По мере уменьшения длины волны света накачки, степень оптической поляризации ядер P_n возрастает и достигает максимума при $\lambda \approx 1,4$ мкм (рис. а), после чего наблюдается некоторый ее спад. Уменьшение P_n при изменении λ от 1,4 до 1,25 мкм связано с тем, что неравновесные по спину электроны, возбуждаемые с уровня самария в состояния выше дна зоны проводимости, приходят в равновесное состояние при термализации на дно зоны проводимости. Как известно [1,3], динамическая поляризация ядер возникает при их взаимодействии с электронными спинами, находящимися в неравновесном состоянии. Следовательно, при уменьшении длины волны света накачки степень оптической поляризации ядер будет уменьшаться.

При дальнейшем уменьшении λ начинают давать вклад в оптическую поляризацию ядер Si^{29} переходы электронов из валентной зоны в зону проводимости, чему соответствует второй максимум P_n при $\lambda \approx 1$ мкм на рис. а. Уменьшение P_n при $\lambda < 1$ мкм также связано с релаксацией спинов фотовозбужденных "горячих" электронов при их термализации.

Направление ядерной намагниченности, возникающей при оптической накачке неполяризованным светом с различной длиной волны в магнитном поле 1500 э, противоположно направлению равновесной намагниченности ядер Si^{29} , что соответствует контактному взаимодействию ядер Si^{29} с электронами, захваченными из зоны проводимости на мелкие донорные уровни фосфора [3].

Если оптическая накачка осуществляется в магнитном поле $H_0 = 20$ э, то спектральная зависимость степени оптической поляризации ядер Si^{29} (рис. б) существенно изменяется. Направление возникающей в этом случае ядерной намагниченности противоположно направлению намагниченности ядер Si^{29} при оптической накачке в магнитном поле 1500 э и совпадает с направлением равновесной ядерной намагниченности, что свидетельствует о диполь-дипольном характере сверхтонкого взаимодействия ядер Si^{29} с электронными спинами [1]. Диполь-дипольное взаимодействие является преобладающим для электронов, захваченных на глубокие примесные уровни, и приводит к поляризации ядер Si^{29} в слабых магнитных полях [3]. Таким образом, оптическая поляризация ядер Si^{29} при оптической накачке в магнитном поле 20 э обусловлена их взаимодействием с электронами, захваченными из зоны проводимости на уровень самария ($E_p + 0,45$ эВ).

Как видно из рис. б, динамическая поляризация ядер Si^{29} возникает преимущественно в результате примесного поглощения света, а облучение кристалла в магнитном поле 20 э светом с длиной волны ~ 1 мкм, соответствующей собственному поглощению, практически не приводит к поляризации ядер Si^{29} . Это связано, по-видимому, с различными процессами рекомбинации фотовозбужденных электронов в случае их возбуждения с примесного уровня самария и при возбуждении из валентной зоны в зону проводимости.

Таким образом, в результате проведенных исследований показано, что динамическая поляризация ядер решетки кремния может возникать не только при межзонном поглощении света, но и в результате примесного поглощения света с энергией квантов, меньшей ширины запрещенной зоны. Отметим также, что ввиду малого коэффициента поглощения "примесного" света можно осуществить оптическую поляризацию ядер в большом объеме кристалла.

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

Поступила в редакцию
8 августа 1978 г.

Литература

- [1] А.Абрагам. Ядерный магнетизм. М., ИИЛ, 1963.
- [2] Г.В.Воронкова, М.И.Иглицын, А.Р.Салманов. ФТП, 9, 499, 1975.
- [3] Н.Т.Баграев, Л.С.Власенко, Р.А.Житников. ФТТ, 19, 1504, 1977.