

КОМБИНИРОВАННЫЙ РЕЗОНАНС НА СВЯЗАННЫХ НОСИТЕЛЯХ В КОМПЕНСИРОВАННОМ n – Ge

Е.М.Гершензон, Н.М.Левин, М.С.Фогельсон

Комбинированный резонанс в полупроводниках известен для свободных носителей [1] и для некоторых парамагнитных примесей, создающих глубокие уровни в запрещенной зоне [2, 3]. В последнем случае эффект обязан отсутствию центра инверсии для позиции, занимаемой примесным центром, и проявляется в электродипольном характере возбуждения электронного спинового резонанса (ЭСР).

Нами наблюдалось электродипольное возбуждение ЭСР в 3-сантиметровом диапазоне волн на донорах As в Ge при существенной компенсации его Ga.

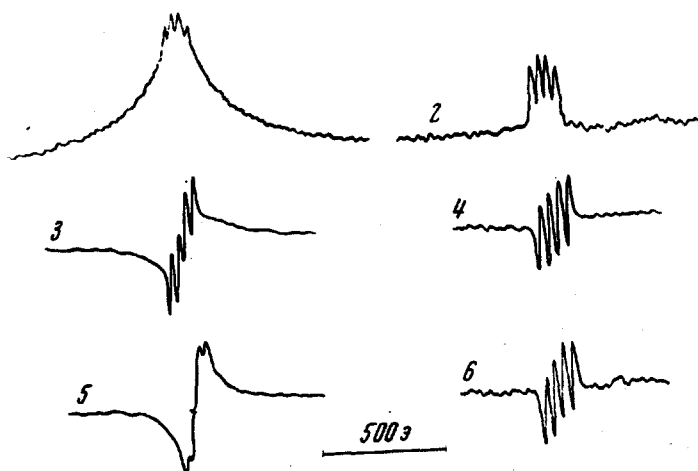


Рис. 1: Форма линий ЭСР образцов 3, 2 – 15 К (спектры 1, 3, 5, 6) и 4, 5 – 15 (спектры 2, 4). $H_0 \parallel [100]$. 1, 2 – линии поглощения, 3 – 6 – производные линий поглощения. Спектры 1 – 4 соответствуют $T = 4,2^\circ\text{K}$, спектр 5 – $1,7^\circ\text{K}$, спектр 6 – 9°K .

В области сравнительно малых концентраций примеси, где обычно наблюдается разрешенный 4-компонентный спектр [4], компенсация приводит к появлению интенсивной и широкой линии поглощения на частоте спинового резонанса. На рис. 1 показана форма сигналов поглощения (спектры 1, 2) и их первая про-

изводная (спектры 3, 4) для компенсированного и некомпенсированного образцов 3,2 – 15 К ($N_D - N_A = 3,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, степень компенсации $K = 0,5$) и 4,5 – 15 ($N_D - N_A = 4,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $K < 0,01$). При $T = 1,7^\circ\text{К}$ соотношение интегральных интенсивностей сигналов от этих образцов, имеющих равные размеры и расположенных в пучности магнитного поля СВЧ, приблизительно равно 70.

Электродипольный характер возбуждения подтверждается экспериментами по зависимости интенсивности сигнала от условий наблюдения резонанса. Дополнительная линия имеет почти одинаковую интенсивность как при $H_1 \perp H_0$ так и при $H_1 \parallel H_0$ (H_1 – магнитное поле СВЧ, H_0 – постоянное поле); для некомпенсированного образца резонанс во втором случае не наблюдается. Сигнал от компенсированного образца, в противоположность некомпенсированному, нарастает по мере перемещения из пучности магнитного в пучность электрического поля СВЧ (рис. 2); сравнение велось с сигналом от опорного образца – монокристалла $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, расположенного на торцевой стенке прямоугольного резонатора H_{102} .

Повышение температуры приводит к уширению дополнительной линии и ослаблению ее интенсивности; при $T = 9^\circ\text{К}$ спектр компенсированного образца становится аналогичным спектру некомпенсированного (рис. 1, спектры 4 – 6).

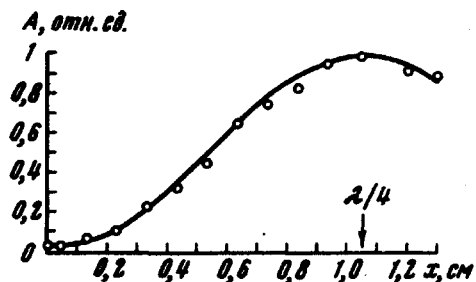


Рис. 2. Зависимость амплитуды A сигнала ЭСР от перемещения образца 3, 2 – 15 К в резонаторе H_{102} . \times – пучность магнитного поля СВЧ

Увеличение степени компенсации свыше 0,5 для образцов с концентрацией основной примеси $N_D \approx (4-8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ не приводит к заметным изменениям наблюдаемой картины спектра. Для образца 1,3 – 16 К ($N_D - N_A = 1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $K = 0,45$) при достаточно низкой температуре также наблюдается появление интенсивной и широкой дополнительной линии, налагающейся на спектр, свойственный некомпенсированному образцу с соответствующей разностной концентрацией.

На имеющихся в нашем распоряжении компенсированных образцах с более высокой концентрацией $N_D \geq 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $K \geq 0,4$ наблюдать резонанс не удается вследствие резкого роста электрических потерь.

Из приведенных данных можно заключить, что при определенных концентрациях донорных и акцепторных примесей в германии оказывается возможным компенсированный резонанс – электродипольное возбуждение спинового резонанса электронов, локализованных на донорах. По-видимому, существенным фактором здесь является потеря центра инверсии для волновой функции электрона, локализованного вблизи пары $D^0 - D^+$ (нейтральный донор – ионизированный донор), под воздействием поляризующего поля ближайшего заряженного акцептора A^- . Сильное анизотропное спин-орбитальное взаимодействие, присущее электрону зоны проводимости Ge, способствует возникновению эффекта. Следует заметить, что изменение структуры волновой функции электрона, локализованного

на доноре, под воздействием поля акцептора наблюдалось методом ЭСР в [5] по уменьшению константы сверхтонкого взаимодействия.

В настоящее время нами изучаются сходные эффекты в образцах Ge, легированного Р и компенсированного Ga.

Московский государственный
педагогический институт
им. В.И.Ленина

Поступила в редакцию
26 июня 1970 г.

Литература

- [1] Э.И.Рашба. УФН, 84, 557, 1964.
- [2] N.Bloembergen. Science, 133, 1363, 1961.
- [3] G.W.Ludwig, F.S.Ham. Phys. Rev. Lett., 8, 210, 1962.
- [4] E.M.Gershenzon, N.M.Pevin, M.S.Fogelson. Phys. stat. sol., 33, 865, 1970.
- [5] Н.А.Пенин, Б.Г.Журкин, Б.А.Волков. Тр. IX Международн. конференции по физике полупроводников, 1968. Л., Изд. Наука, 1969, т. 2, стр. 1185.

Письма в ЖЭТФ, том 12, стр. 203 - 205

5 сентября 1970 г.

ИЗЛУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ЭКСИТОНОВ В Ge В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

А.С.Алексеев, В.С.Багаев, Т.Н.Галкина, О.В.Гоголин,
Н.А.Пенин, А.Н.Семенов, В.Б.Стопачинский

В последнее время несомненный интерес вызывают вопросы, связанные с поведением экситонного газа при низких температурах и высоких плотностях, когда $(n\sigma_0)^3 \sim 1$, где n — концентрация экситонов, а σ_0 — их борковский радиус. При этом обсуждаются, в основном, две концепции для возможного состояния системы "сильно" взаимодействующих экситонов, а именно: либо диэлектрический газ, состоящий из экситонных молекул, либо подобные жидкому металлу электронно-дырочные капли. Причем, несмотря на существенные различия этих двух моделей, большинство экспериментов и, в частности, данные по рекомбинационному изучению объясняются различными авторами как с той, так и с другой точки зрения.

Причина, объясняющая это обстоятельство, заключается, по-видимому, в том, что в настоящее время отсутствует достаточно надежная теория, описывающая эти явления с учетом реальной зонной структуры исследуемых полупроводников, что приводит к известной свободе в выборе определенных допущений при интерпретации экспериментальных данных. Для того, чтобы ограничить эту свободу, необходимы эксперименты по изучению системы взаимо-