

НАМАГНИЧИВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ СВЕТОМ И ЯМР  
ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКЕ В ПОПЕРЕЧНОМ ПОЛЕ

Б. П. Захарченя, М. Е. Компан, В. Г. Флейшер

Получен сигнал ядерной индукции при оптической ориентации спинов в кристалле  $n\text{-GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$ . Оптическая накачка осуществлена лазерным лучом, модулированным по циркулярной поляризации на частоте ларморовой прецессии ядер в поперечном лучу магнитном поле. Приведен участок спектра, соответствующий изотопам Ga.

Поглощение циркулярно поляризованного света полупроводником вблизи края поглощения при наличии спин-орбитального расщепления зон приводит к ориентации спинов электронов и ядер и появлению макроскопических магнитных полей. Из-за малости этих полей их непосредственная регистрация затруднена. Исследования оптической ориентации в полупроводниках (к настоящему времени опубликовано свыше 50-ти работ) развивались на основе анализа поляризации рекомбинационного излучения. Лишь в первой работе [1] была измерена ядерная намагниченность, накопленная в результате длительного освещения полупроводника. Эта работа остается пока также единственной, где осуществлена оптическая ориентация в объеме (при непрямом переходе в кремнии). В случае прямых переходов коэффициенты поглощения  $k$  достигают  $10^4 + 10^5 \text{ см}^{-1}$ . Спиновая ориентация создается в тонком приповерхностном слое, где абсолютное число ядер мало. При этом исследование оптической ориентации по сигналу ЯМР аналогично [1] затруднено или невозможно, особенно в случае полупроводников с малой концентрацией магнитных ядер.

Ниже описан резонансный метод детектирования слабых макроскопических электронных и ядерных полей, индуцированных светом и приводятся первые экспериментальные результаты. Для возбуждения полупроводника используется модулированный по циркулярной поляризации с помощью кристалла KDP (см. рис. 1) лазерный луч. Возникающие магнитные поля, осциллирующие с частотой модуляции поляризации, детектируются индукционным датчиком ИД. Он представляет собой катушку с внутренним диаметром 2 мм, вплотную прижатую к образцу. Катушка содержит 550 витков провода диаметром 30 мкм. Приведенные ко входу шумы усилительного тракта составляют  $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ в.гц}^{-1/2}$  на рабочей частоте  $f_{\text{мод}}$ , равной 206,5 кГц. При 4,2°К добротность входного контура  $\approx 65$ . Усиленный сигнал выделяется схемой синхронного детектирования и после преобразователя "напряжение-частота" АЦП накапливается многоканальным амплитудным анализатором МА. Ядерная намагниченность регистрируется по резонансу при оптической накачке, модулированной синфазно с прецессией ядерных спинов в поперечном магнитном поле  $H_{\perp}$ . Очевидно, что все ядра, ориентированные в течение времени  $T_2$  их поперечной спиновой релаксации дают вклад в полезный сигнал. Ориентация ядерных спинов возникает в результате спиновой релаксации электронов за счет сверхтонкого взаимодействия. Макси-

мальный сигнал получается при выполнении условия  $T_1^e \lesssim 1/\omega_L$ , где  $T_1^e$  — время существования спиновой ориентации электронов и  $\omega_L$  — угловая частота их ларморовой прецессии в поле  $H_L$ . Резонанс регистрируется при многократном прохождении выбранного диапазона  $H_L$ . Величина  $H_L$  задает номер канала анализатора МА, в котором накапливается число импульсов, пропорциональное сигналу ядерной индукции в этом поле.

На рис. 2 представлен спектр, полученный с кристаллом  $n\text{-GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$  с шириной запрещенной зоны при  $4,2^\circ\text{K}$ , равной  $1,89 \text{ эв}$  и концентрацией доноров  $\approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Кристалл возбуждался He — Ne-лазером ( $1,96 \text{ эв}$ ). Приведенный участок спектра, соответствующий изотопам Ga, получен в результате  $\approx 10^3$  проходов в течение 9 ч.

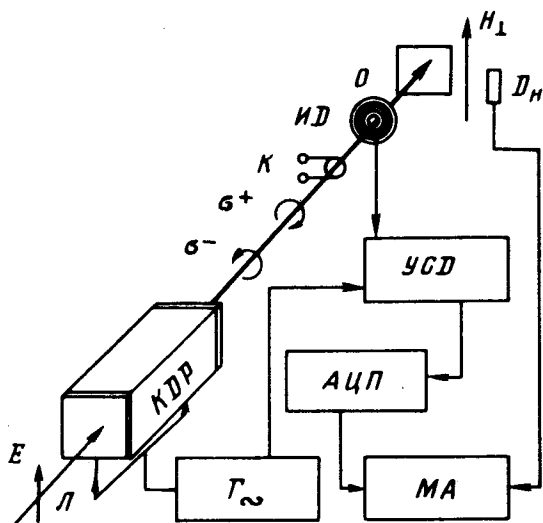


Рис. 1. Упрощенная схема эксперимента: Л — лазерный луч, поляризованный в направлении вектора  $E$ , KDP — электрооптический кристалл, модулирующий циркулярную поляризацию ( $\sigma^+ \rightleftharpoons \sigma^-$ ) на частоте  $205,6 \text{ кГц}$ , ИД — индукционный датчик, О — образец,

К — калибровочные витки,  $D_H$  — датчик магнитного поля, УСД — блок резонансного усиления и синхронного детектирования, АЦП — аналогово-цифровой преобразователь, МА — многоканальный амплитудный анализатор,  $G_{\sim}$  — генератор раскочки KDP

Оценим величины ожидаемого магнитного поля. Амплитуда осциллирующего поля на оси лазерного луча с радиусом  $R$  непосредственно у поверхности образца  $H_{\sim} = 2\pi I_{\sim} / kR$ , если свет поглощается в поверхностном слое с толщиной, много меньшей  $R$ . Здесь  $I_{\sim}$  — амплитуда составляющей намагниченности вдоль оси катушки ИД. С увеличением расстояния  $d$  от поверхности образца это поле спадает как  $R^2 / (R^2 + d^2)^{3/2}$ . Величина поля на оси магнитного лепестка, образованного ядрами:  $H_{\sim}^N = 2PaGT_2\mu_B / R^3$ . Здесь  $P$  — степень ориентации фотовозбужденных электронов,  $G$  — скорость их генерации,  $\mu_B$  — ядерный магнетон и  $a$  — отношение вероятности спиновой релаксации электронов за счет обмена с ядрами к полной вероятности  $1/T_1^e$ . Ядерная ориентация сохраняется в течение времени  $T_2$ , которое полностью определяет ширину линий на рис. 2 и составляет  $\approx 10^{-4} \text{ сек}$ . Величина  $P$  для твердых растворов на основе GaAs равна 0,5. При использовании He — Ne-лазера с диаметром луча, равным  $1 \text{ мм}$ ,  $PG \approx 10^{17} \text{ см}^{-3} \text{ сек}^{-1}$  и  $H_{\sim}^N \approx a \cdot 10^{-6} \text{ э}$ . Если  $a \lesssim 10^{-2}$ ,  $H_{\sim}^N \lesssim 10^{-8} \text{ э}$ . Проверка чувствительности установки осуществлялась с

помощью 2-х витковой катушки, помещенной на ИД с противоположной от образца стороны. При пропускании переменного тока силой  $0,5 \cdot 10^{-9} \text{ а}$  с частотой 205,6 кГц и постоянной интегрирования 1 сек выходной сигнал, соответствующий  $H_{\sim} \approx 6 \cdot 10^{-9} \text{ э}$ , заметно превышает шум. Измерение абсолютной величины ядерной намагниченности с помощью такой калибровки затруднено из-за неоднородного распределения интенсивности на освещаемой площади образца и неадекватности возникающего магнитного лепестка с током в витке.

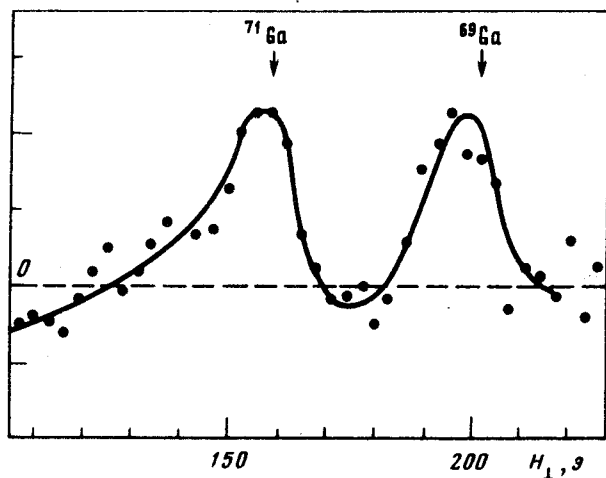


Рис. 2. Спектр сигнала ядерной индукции кристалла  $n\text{-GaP}_{0,35}\text{As}_{0,65}$  при  $4,2^\circ\text{К}$  на частоте модуляции циркулярной поляризации света накачки, равной 205,6 кГц

Отметим в заключение, что макроскопические магнитные поля вне полупроводника на много порядков меньше локальных полей, действующих только на спин электрона при контактном сверхтонком взаимодействии в полупроводнике. Контактные поля проявляются в оптическом канале и наблюдаются по изменению поляризации рекомбинационного излучения [2]. Описанный выше способ измерения макроскопической намагниченности представляется перспективным для исследования оптической ориентации в случаях, когда рекомбинационное излучение слабо или отсутствует совсем или когда велик фон переходов с участием равновесных неориентированных электронов (полупроводники  $n$ -типа). Для магниторазведенных кристаллов можно ожидать возрастания чувствительности, если  $T_2$  определяется только локальными полями. В этом случае  $T_2$  возрастает с уменьшением концентрации магнитных ядер квадратично и при линейном убывании  $\alpha$ ,  $H_{\sim}^N$  линейно увеличивается. Использование описанного метода для измерения электронной намагниченности целесообразно при больших  $T_1^e$ . Соответствующий ей сигнал должен монотонно изменяться в поперечном магнитном поле (аналогично эффекту Ханле). Возрастание этого сигнала при увеличении  $T_1^e$  ограничивается условием  $T_1^e < 1/f_{\text{мод}}$ . Очевидно, что чувствительность регистрации намагниченности светом увеличивается при переходе к объемной накачке.

Авторы благодарны М.М.Афанасьеву за помощь в эксперименте.

## Литература

- [1] G. Lampel. Phys. Rev. Lett., 20, 491, 1968.
- [2] В.Л. Берковиц, А.И. Екимов, В.И. Сафаров. ЖЭТФ, 65, 346, 1973.
-