

## ОПТИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОННО-ЯДЕРНЫЙ РЕЗОНАНС В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

*А. И. Екимов, В. И. Сафаров*

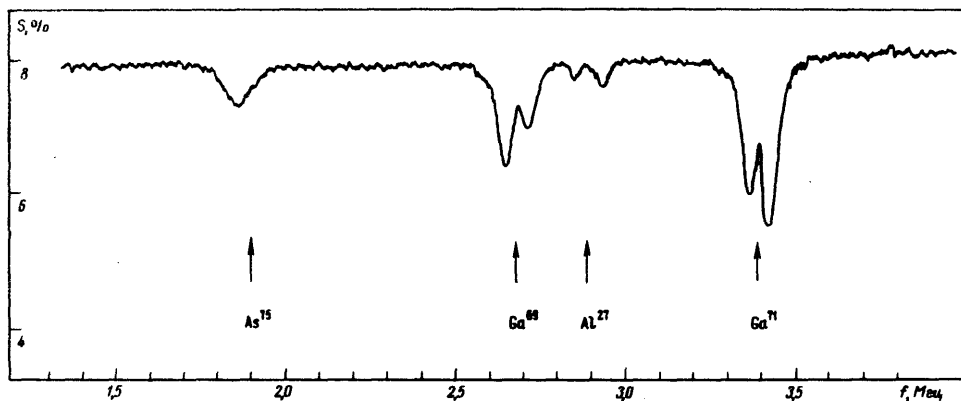
К настоящему времени выполнено значительное число работ по оптической накачке ориентированных по спину электронов в полупроводниках. Метод оптической накачки позволяет легко создавать в зоне проводимости высокую поляризацию электронных спинов и оптически ее детектировать [1 - 3]. Применение этого метода для исследования полупроводников оказалось очень плодотворным: была осуществлена спиновая ориентация неосновных [1 - 3] и основных [4] носителей, измерены времена жизни неравновесных электронов [2, 3, 5], исследованы механизмы спиновой релаксации "холодных" [2, 5] и "горячих" [2, 6] электронов, осуществлена спиновая ориентация экситонов [7], зафиксирован электронный парамагнитный резонанс на неравновесных электронах [8].

В работах [1, 9] было показано, что в опытах по оптической накачке может проявляться ряд эффектов, обусловленных взаимодействием создаваемых светом поляризованных электронов с магнитными моментами ядер основной решетки кристалла. В работе [1] было обнаружено, что такое взаимодействие приводит к динамической поляризации ядер (эффект Оверхаузера), то есть создаваемая светом спиновая поляризация передается от электронной системы к ядерной. Это явление было зафиксировано по изменению ядерной намагниченности (по изменению величины сигнала ЯМР). В предыдущей работе [9] нами было показано, что при наличии сильной спиновой релаксации ядер взаимодействие с ядерными магнитными моментами представляет собой существенный механизм спиновой релаксации электронов, эффективность которого, однако, сильно зависит от ядерной намагниченности (точнее, от различия степени поляризации электронов и ядер). Таким образом, создаваемые при оптической накачке электронная и ядерная намагниченности оказываются взаимосвязанными, так что изменения в одной из спиновых систем (например, ядерной) могут быть обнаружены по изменению спиновой поляризации другой системы (например, электронной). Так в работе [9] уничтожение ядерной намагниченности слабым поперечным магнитным полем (эффект Ханле для поляризованных ядер) было зафиксировано по изменению степени стационарной поляризации электронов.

Изменение ядерной намагниченности может быть достигнуто также в условиях магнитного резонанса. В настоящей работе оптическим методом обнаружено изменение стационарной спиновой ориентации фотоэлектронов при насыщении ядерных подуровней в кристалле переменным высокочастотным полем.

Опыты проводились на кристаллах  $Ga_x Al_{1-x} As$  все атомы основной решетки которых, обладают ядерными магнитными моментами. Ранее [9] нами было обнаружено, что в этих кристаллах при  $4,2^\circ K$

стационарная спиновая ориентация фотоэлектронов в значительной степени определяется их взаимодействием с ядрами и сильно зависит от величины ядерной намагниченности. Ориентированные по спину электроны создавались в зоне проводимости в результате возбуждения циркулярно поляризованным светом. Степень стационарной ориентации фотоэлектронов, как и ранее [3 - 6], измерялась оптически — по степени циркулярной поляризации фотолюминесценции. Кристалл помещался в постоянное магнитное поле, ориентированное параллельно направлению распространения возбуждающего света (параллельно ориентации спинов создаваемых светом электронов). В перпендикулярном направлении прикладывалось переменное высокочастотное поле, которое индуцировало переходы между ядерными подуровнями, расщепленными постоянным полем  $H_0$ . Резонанс фиксировался по изменению степени циркулярной поляризации люминесценции при сканировании частоты ВЧ поля.



Зависимость степени циркулярной поляризации люминесценции кристалла  $Ga_{0,8}Al_{0,2}As$  (при возбуждении циркулярно поляризованным светом) от частоты приложенного поперечного ВЧ поля. Постоянное продольное магнитное поле  $H_0 = 2,6 \text{ кГс}$ . Стрелками помечено положение частот ядерного магнитного резонанса для атомов основной решетки кристалла в данном поле  $H_0$ .

На рисунке для постоянного поля  $H_0 = 2,6 \text{ кГс}$  представлена полученная зависимость степени поляризации люминесценции от частоты приложенного ВЧ поля. Как видно наблюдается резкое уменьшение степени поляризации люминесценции (следовательно, и степени ориентации электронов) в области частот ВЧ поля, соответствующих магнитному резонансу ядер атомов основной решетки кристалла. Проявляющиеся резонансные линии имеют дублетную структуру. С изменением напряженности постоянного магнитного поля  $H_0$  центры дублетов смещались линейно, но величина дублетного расщепления оставалась примерно постоянной.

Таким образом в кристалле впервые удалось оптическим способом зарегистрировать изменение заселенности ядерных подуровней, вызванное действием радиочастотного поля. Обнаруженное явление представляется аналогичным электронно-ядерному двойному резонансу (ЭНДОР). Однако в отличие от ЭНДОР'а изменение электронной поляризации детектируется оптически. Это обстоятельство определяет ряд существенных преимуществ. Прежде всего высокую чувствительность: в наших опытах эффект был четко зафиксирован (с соотношением сигнал-шум 100 : 1) в случае, когда стационарное число созданных светом электронов составляло всего  $10^9$ . Кроме того, люминесценция может быть получена от очень малых по размеру образцов. Так, в нашем случае для возбуждения использовался He-Ne-лазер, и при фокусировании его излучения на кристалл в люминесценции проявляется лишь малая часть образца площадью  $\approx 0,1 \text{ мм}^2$  и толщиной  $\approx 1 \text{ мк}$ , то есть объемом  $10^{-7} \text{ см}^3$ . Ясно, что при таких малых размерах исследуемой области совершенно отпадают обычно очень жесткие требования на однородность постоянного магнитного поля.

В заключение авторы выражают признательность В.Берковцу за помощь при постановке эксперимента и В.И.Перелю и М.И.Дьяконову за обсуждения.

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

Поступила в редакцию  
23 февраля 1972 г.

### Литература

- [ 1 ] G.Lampel. Phys. Rev. Lett., 20, 491, 1968.
- [ 2 ] R.R.Parsons. Phys. Rev. Lett., 23, 1152, 1969; Canad J. Physics, 49, 1850, 1971.
- [ 3 ] А.И.Екимов, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 12, 293, 1970.
- [ 4 ] А.И.Екимов, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 13, 251, 1971.
- [ 5 ] Д.З.Гарбузов, А.И.Екимов, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 13, 36, 1971.
- [ 6 ] А.И.Екимов, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 13, 700, 1971.
- [ 7 ] Е.Ф.Гросс, А.И.Екимов, Б.С.Разбирин, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 14, 108, 1971.
- [ 8 ] С.Hermann, G.Lampel. Phys. Rev., Lett., 27, 373, 1971.
- [ 9 ] А.И.Екимов, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 15, 257, 1972.