

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ МЮОНОВ В МОНОКРИСТАЛЛЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ В ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*С.Г.Барсов, А.Л.Геталов, В.А.Гордеев, В.А.Евсеев,  
Р.Ф.Коноплева, С.П.Круглов, В.И.Кудинов, Л.А.Кузьмин,  
С.М.Микиртычьянц, Е.В.Минайчев, Г.Г.Мясищева,  
Ю.В.Обухов, Г.И.Савельев, В.Г.Фирсов, Г.В.Щербаков*

Приводятся экспериментальные результаты по определению параметров мюонной компоненты поляризации в арсениде галлия как функции температуры. Показано, что наблюдаемые на опыте зависимости качественно согласуются с модельными представлениями, развитыми ранее авторами для атомарных полупроводников.

Как известно, в атомарных полупроводниках (кремний<sup>1</sup>, германий<sup>2</sup>, алмаз<sup>3</sup>) методом прецессии спина положительных мюонов в перпендикулярном по отношению к первоначальному направлению спина частиц внешнем магнитном поле (метод  $\mu SR$ ) идентифицированы три состояния мюона, отличающиеся между собой характером сверхтонкого взаимодействия

последнего со связанным с ним электроном в кристаллической решетке полупроводника. Состояния эти получили обозначения:  $\text{Mu}$  — атом мюония, в котором сверхтонкое взаимодействие мюона и электрона изотропно,  $\text{Mu}^*$  — "аномальный" мюоний, где сверхтонкое взаимодействие мюона и электрона анизотропно и значительно слабее, нежели в первом случае, и  $\mu^+$  — мюонная компонента поляризации, для которой сверхтонкое взаимодействие практически отсутствует. В перечисленных выше простых полупроводниках прецессионные частоты каждого из состояний, области их температурной устойчивости исследованы достаточно подробно, однако процессы образования состояний, их модельные представления, хотя и обсуждались неоднократно в литературе <sup>1-4</sup>, на сегодняшний день не могут считаться окончательно установленными.

В последнее время были опубликованы предварительные результаты аналогичных экспериментов, выполненных с бинарными полупроводниками — арсенидом и фосфидом галлия <sup>5-7</sup>. Показано, что в исследованных образцах также наблюдались перечисленные выше состояния, а зависимость доли мюонной компоненты от температуры качественно совпадает с имеющей место для кремния <sup>4</sup>.

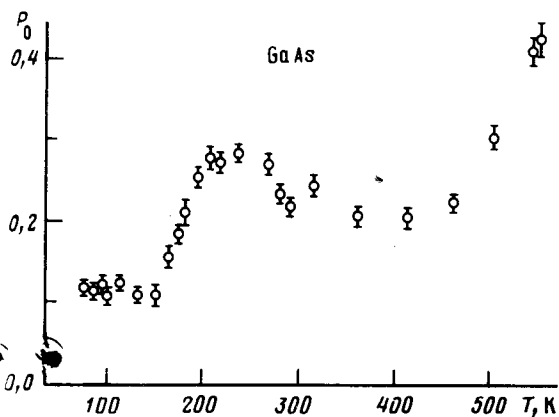


Рис. 1. Зависимость начальной поляризации  $P_0$  мюонной компоненты поляризации в арсениде галлия от температуры

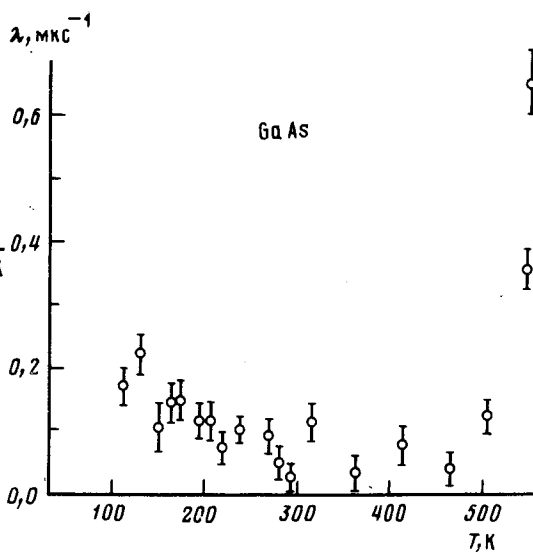


Рис. 2. Зависимость скорости релаксации мюонной компоненты поляризации в арсениде галлия от температуры

В настоящей работе приводятся результаты исследований температурной зависимости начальной амплитуды и скорости релаксации мюонной компоненты поляризации в перпендикулярном внешнем магнитном поле напряженностью  $\sim 280$  Э. Опыты выполнены на мезонном канале синхроциклотрона ЛИЯФ с монокристаллическим полуизолирующим образцом арсенида галлия, легированного хромом ( $\rho > 10^8$  Ом·см,  $[p] = 2 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup> при  $T = 500$  К с энергией активации 0,69 эВ), в интервале температур  $60 \div 560$  К. Методика постановки экспериментов, регистрирующая аппаратура не отличались существенно от использованных в опытах с кремнием <sup>4</sup>. Для повышения точности измерений скорости релаксации интервал времен регистрации  $\mu$ -распадов был расширен в сравнении с предварительными опытами <sup>5</sup> и составлял 16 мкс. Результаты экспериментов приведены на рисунках.

Из рисунков 1 и 2 видно, что характер зависимости доли мюонной компоненты поляризации от температуры в арсениде галлия, как и в кремнии, позволяет выделить четыре температурные области с различными значениями начальной поляризации:

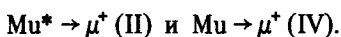
I –  $60 \div 160$  К. Поляризация неизменна и составляет  $P_0 = 0,12 \pm 0,02$ .

II –  $160 \div 200$  К. Резкое возрастание  $P_0$  до значения  $P_0 = 0,30 \pm 0,02$ .

III –  $200 \div 500$  К. Монотонное уменьшение значений  $P_0$  до величины  $P_0 = 0,20 \pm 0,02$ . Отметим, что для кремния в области III наблюдались постоянные в пределах ошибок опытов значения  $P_0$ .

IV –  $T > 500$  К. Резкое увеличение значений начальной поляризации и скорости релаксации мюонной прецессии (рис. 2).

Анализ полученных данных в сопоставлении с аналогичными результатами и в рамках физических представлений, развитых нами ранее для кремния <sup>4</sup> с учетом предварительных опытов в продольных магнитных полях <sup>5</sup> и факта наблюдения в арсениде галлия частот прецессии нормального и аномального мюония <sup>6,7</sup> позволяют предположить, что характерный рост мюонной компоненты поляризации в областях температуры II и IV связан с переходами между состояниями



Отсутствие плато в зависимости начальной поляризации в области III связано, по-видимому, с тем, что образующееся состояние  $\mu^+$  в бинарных полупроводниках не является устойчивым. Полученные данные говорят в пользу универсальности механизма взаимодействия атома мюония с кристаллической решеткой как атомарных, так и бинарных полупроводников. Более полный анализ картины взаимодействий положительных мюонов с бинарными полупроводниками возможен при сопоставлении полученных данных с результатами исследований в продольных магнитных полях.

#### Литература

1. Patterson B.D., Hintermann A., Kündig W., Meier P.F., Waldner G., Graf H., Recknagel E., Weidinger A., Wichert Th. Phys. Rev. Lett., 1978, 40, 1347.
2. Holzschuh E., Graf H., Recknagel E., Weidinger A., Wichert Th. Phys. Rev. B., 1979, 20, 4391.
3. Holzschuh E., Kündig W., Meier P.F., Patterson B.D., Sellschop J.P.F., Stemmet M.C. Appel H. Phys. Rev. A., 1982, 25, 1272.
4. Барсов С.Г., Геталов А.Л., Гордеев В.А., Коноплева Р.Ф., Круглов С.П., Кудинов В.И., Кузьмин Л.А., Микиртычянц С.М., Минайчев Е.В., Мяснищева Г.Г., Обухов Ю.В., Савельев Г.И., Фирсов В.Г., Щербакоев Г.В. ЖЭТФ, 1979, 76, 2198; ЖЭТФ, 1980, 79, 1461.
5. Barsov S.G., Getalov A.L., Gordeev V.A., Kruglov S.P., Kudinov V.I., Kuz'min L.A., Mikirtychyants S.M., Minai-chev E.V., Myasishcheva G.G., Obukhov Y.V., Savel'ev G.I., Firsov V.G., Shcherbakov G.V., Hyperfine Interactions, 1984, 17, 634, (Yamada Conference on Muon Spin Rotation and Associated Problems. April 18 – 22, 1983, Shimoda, Japan, p. 82).
6. Blazey K.W., Estle T.L., Felber J., Holzschuh E., Keller H., Kiefl R.F., Kündig W., Meier P.F., Odermatt W., Patterson B.D., Rudaz S.L., Schneider J.W. SIN Newsletter, 1984, 16, 105.
7. Kiefl R.F., Holzschuh E., Keller H., Kündig W., Meier P.F., Patterson B.D., Schneider J.W., Blazey K.W., Rudaz S.L., Denison A.B. Phys. Rev. Lett., 1984, 53, 90.

Институт теоретической,  
и экспериментальной физики

Институт ядерной физики  
им. Б.П.Константинова  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
23 мая 1985 г.