

P14-2004-104

Т. Н. Мамедов¹, А. Г. Дутов², Д. Герлах³,
В. Н. Горелкин⁴, К. И. Грицай¹, В. А. Жуков¹,
А. В. Стойков^{1,3}, В. Б. Шипило², У. Циммерманн³

ИССЛЕДОВАНИЕ АКЦЕПТОРНОЙ ПРИМЕСИ БОРА
В ИСКУССТВЕННОМ АЛМАЗЕ μ^- SR-МЕТОДОМ

¹Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна,
Московская обл., Россия

²Институт физики твердого тела и полупроводников НАНБ,
220726 Минск, Белоруссия

³Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen PSI, Switzerland

⁴Московский физико-технический институт, 141700 Долгопрудный,
Московская обл., Россия

Мамедов Т. Н. и др.

P14-2004-104

Исследование акцепторной примеси бора
в искусственном алмазе μ^- SR-методом

Представлены первые результаты, полученные в исследовании акцепторных центров бора в искусственном алмазе μ^- SR-методом. Атомы акцепторной примеси ${}_{\mu}\text{B}$ в образце создавались путем имплантации отрицательных мюонов. Поляризация мюонов была исследована в поперечном спину мюона магнитном поле величиной 2,5 кГс в диапазоне температур 4,2 – 300 К. Обнаружено, что акцепторный центр ${}_{\mu}\text{B}$ в алмазе находится как в диамагнитном (ионизованном), так и в парамагнитном состояниях. С ростом температуры вклад диамагнитной фракции увеличивается немонотонным образом.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 02-02-16881.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Перевод авторов

Mamedov T. N. et al.

P14-2004-104

Investigation of the Boron Acceptor Impurity
in Synthetic Diamond by the μ^- SR-method

The primary results in the investigation of boron acceptor centers in synthetic diamond by the μ^- SR-method are presented. Atoms of ${}_{\mu}\text{B}$ acceptor impurity in the sample were created by implantation of negative muons. The polarization of muons was studied in a magnetic field of 2.5 kGs transverse to the direction of the muon spin in the temperature range 4.2 – 300 K. It was found that ${}_{\mu}\text{B}$ acceptor in diamond exists in both diamagnetic (ionized) and paramagnetic states. The fraction of the diamagnetic state increases non-monotonously as the temperature increases.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR, and supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project 02-02-16881.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2004

ВВЕДЕНИЕ

Алмаз как полупроводник, обладающий высокой механической прочностью, теплопроводностью и радиационной устойчивостью, давно привлекает к себе внимание с точки зрения изготовления на его основе детекторов ядерного излучения и элементов твердотельной электроники, способных работать в условиях сильных радиационных и тепловых нагрузок (см., например, [1]). Существенный прогресс [2, 3], достигнутый в последние годы в технологии получения высококачественных поликристаллических и кристаллических пленок искусственного алмаза толщиной 200–300 мкм и более, делает реальным создание в ближайшие годы на основе алмаза детекторов ядерного излучения и элементов электроники.

Основными электрически активными примесями в алмазе являются атомы азота и бора [1, 4, 5]. Однако атомы азота в алмазе образуют очень глубокие донорные уровни ($E_c = 1,7$ эВ и $E_c = 4,0$ эВ при ширине запрещенной зоны $E_g = 5,4$ эВ), и поэтому применение алмаза с примесью азота в электронных устройствах затруднено. Замещающие атомы бора в решетке алмаза образуют относительно неглубокие акцепторные центры ($E_v = 0,37$ эВ [6, 7]). Растворимость атомов бора в алмазе достаточно высокая ($\sim 10^{21}$ см⁻³), и критическая концентрация, соответствующая переходу полупроводник–металл, составляет $n_c = 2 \cdot 10^{20}$ см⁻³ [4, 8].

Как и в других полупроводниках с кристаллической структурой алмаза, ЭПР-сигнал акцепторных примесей в алмазе наблюдался лишь в деформированных образцах [9]. При этом резонансная линия настолько широкая, что сверхтонкая структура не наблюдается, и соответственно из этих данных определение константы сверхтонкого взаимодействия акцепторного центра не представляется возможным.

Результаты [10–13], достигнутые в изучении взаимодействия акцепторной примеси алюминия в решетке кремния с использованием пучков поляризованных отрицательных мюонов, дают достаточное основание полагать, что применение данного метода позволит, хотя бы частично, заполнить пробел, имеющийся в настоящее время в экспериментальном исследовании акцепторной примеси бора в алмазе. Возможность использования поляризованных отрицательных мюонов для исследования взаимодействий акцепторной примеси в алмазе обусловлена тем, что при захвате мюона атомом углерода образовавшийся мюонный атом μ^- с точки зрения строения его электронной оболочки имитирует атом бора. При этом поляризация мюона определяется состоянием

электронной оболочки (парамагнитное или диамагнитное) мюонного атома — акцепторного центра (АЦ), сверхтонким взаимодействием в АЦ и взаимодействиями АЦ со средой. Соответственно, исследуя временную эволюцию поляризации мюонов, остановившихся в алмазе, можно получать информацию о взаимодействиях акцепторной примеси бора в кристаллической решетке алмаза.

1. ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения были выполнены на спектрометре GPD [14], расположенном на мюонном канале $\mu E1$ ускорителя протонов Института Пауля Шеррера (PSI, Швейцария). Перпендикулярное к направлению вектора начальной поляризации спина мюона однородное магнитное поле на образце создавалось кольцами Гельмгольца. Величина магнитного поля составляла 2,5 кГс с долговременной стабильностью не хуже 10^{-4} . Измерения проводились в гелиевом криостате, что позволяло изменять температуру в диапазоне 4,2–300 К. Температура образца стабилизировалась с точностью не хуже 0,1 К.

В измерениях был использован мелкокристаллический алмаз, полученный методом спонтанного синтеза при давлении 5,5 ГПа и температуре 1620 К (см. [15]) и отсортированный по размерности зерна в интервале 120–180 мкм.

Известно, что синтетический алмаз, полученный вышеуказанным способом, содержит примесь атомов азота, алюминия, марганца, железа и никеля. Как показывают исследования [16], концентрация примесных атомов, находящихся в парамагнитном состоянии, в алмазе составляет $\sim 10^{17}$ см $^{-3}$, хотя общая концентрация примесей может достигать 0,1 % (атомы марганца, железа и никеля в основном находятся в виде включений).

Временная эволюция поляризации мюонов $P(t)$, остановившихся в образце, исследовалась путем измерения временного распределения электронов из реакции $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$. При этом зависимость количества зарегистрированных электронов от времени (по отношению к времени остановки мюонов в образце) имеет вид экспоненты, модулированной функцией $P(t)$. Методика измерений и процедура восстановления функции поляризации спина мюона $P(t)$ из аппаратных μ^- SR-спектров подробно описаны в [10, 11].

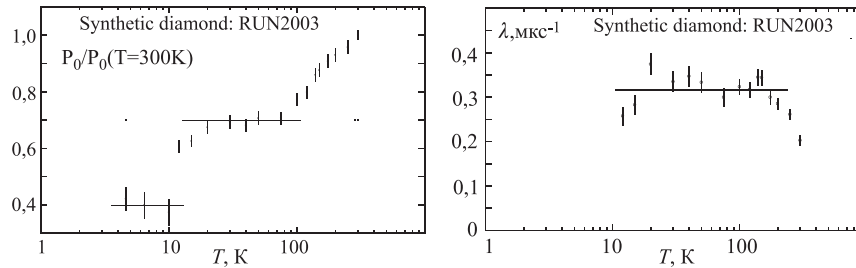
2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты измерений температурной зависимости поляризации $P_0(T)/P_0(300\text{ K})$, где $P_0 = P(t=0)$, и скорости релаксации λ спина отрицательного мюона в искусственном алмазе представлены на рисунке. Во всем диапазоне температур наблюдается существенная остаточная поляризация отрицательных мюонов и релаксация спина мюона со скоростью 0,2–0,4 мкс $^{-1}$. При

комнатной температуре наблюдаемое в начальный момент времени значение поляризации мюона в алмазе в пределах ошибки совпадает с поляризацией в графите. Реакторный графит использовался как стандартный образец для контроля поляризации пучка мюонов. В нем остаточная поляризация мюона максимальна и релаксация поляризации отсутствует.

В отличие от кремния (см., например, [10–13]), в алмазе во всем диапазоне температур частота прецессии спина мюона во внешнем магнитном поле совпадает с частотой прецессии в графите с точностью $5 \cdot 10^{-4}$.

Совпадение частоты прецессии спина мюона в алмазе с ее значением в графите и практически отсутствие температурной зависимости скорости релаксации при $T \lesssim 150$ К дает достаточное основание полагать, что наблюдаемая фракция (далее диамагнитная фракция) поляризации мюона соответствует диамагнитному (ионизованному) состоянию акцепторного центра $\mu\text{В}$. При этом релаксация поляризации мюона, по-видимому, обусловлена дипольным взаимодействием спина мюона с парамагнитными примесями в образце, а недостающая фракция поляризации $(1 - P_0(T)/P_0(300\text{ К}))$ связана с образованием акцепторного центра в парамагнитном состоянии и высокой скоростью релаксации спина мюона в этом состоянии.



Температурная зависимость поляризации и скорости релаксации спина мюона в искусственном алмазе. Линии проведены для наглядности

Из рисунка видно, что акцепторные центры $\mu\text{В}$ при низких температурах ($T \lesssim 10$ К) с вероятностью $\sim 40\%$ находятся в ионизованном состоянии. С увеличением температуры вклад диамагнитной фракции возрастает и при комнатной температуре становится близким к единице. Однако доля диамагнитной фракции является немонотонной функцией температуры. В областях 5–10 и 20–90 К ее вклад не зависит от температуры, а в интервале 10–15 К наблюдается скачок в температурной зависимости.

Значительная доля диамагнитной фракции примеси $\mu\text{В}$ свидетельствует о высокой вероятности ионизации АЦ бора в алмазе с высокой концентрацией примеси азота. Для выяснения механизмов ионизации и причины немонотонной температурной зависимости вероятности ионизации акцептор-

ной примеси бора в алмазе в области температур $T < 300$ К предполагается проведение исследований в образцах с разными концентрациями примесей.

Авторы благодарны дирекции Института Пауля Шеррера (Швейцария) за предоставление возможности проведения настоящих измерений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 02-02-16881.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вавилов В. С.* // УФН. 1997. Т. 167. С. 17.
2. *Isberg J. et al.* // Science. 2002. V. 297. P. 1670.
3. *Adam W., Berdermann E., Bergonzo P. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 2003. V. 514. P. 79.
4. *Collins A. T.* // Ceramics International. 1996. V. 22. P. 321.
5. *Chrenko R. M.* // Phys. Rev. B. 1973. V. 7. P. 4560.
6. *Безруков Г. Н. и др.* // Физика и техника полупроводников. 1970. Т. 4. С. 693;
Bezrukov G. N. et al. // Sov. Phys. Semicond. 1970. V. 4. P. 587.
7. *Collins A. T., Williams A. W. S.* // J. Phys. C. 1971. V. 4(13). P. 1789.
8. *Williams A. W. S., Lightowers E. C., Collins A. T.* // J. Phys. C. 1970. V. 3. P. 1727.
9. *Ammerlaan C. A. J.* // Inst. Phys. Conf. Series. 1980. V. 59. P. 81.
10. *Mamedov T. N., Chaplygin I. L., Duginov V. N. et al.* // J. Phys.: Condens. Matter. 1999. V. 11. P. 2849.
11. *Мамедов Т. Н., Стойков А. В., Горелкин В. Н.* // ЭЧАЯ. 2002. Т. 33, вып. 4. С. 1005.
12. *Mamedov T. N., Herlach D., Gorelkin V. N. et al.* // Physica. B. 2003. V. 326(1–4). P. 97.
13. *Мамедов Т. Н., Андрианов Д. Г., Герлах Д. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 79. С. 25.
14. *Abela R., Baines C., Donath X. et al.* // Нур. Int. 1994. V. 87. P. 1105.
15. *Шуило В. Б., Звонарев Е. В., Кузей А. М. и др.* Получение, свойства и применение порошков алмаза и нитрида бора. Минск: Белорусская наука, 2003.
16. *Дутов А. Г., Комар В. А., Шуило В. Б. и др.* Препринт ОИЯИ Д14-2003-220. Дубна, 2003.

Получено 29 июня 2004 г.

Редактор *Е. К. Аксенова*

Подписано в печать 11.05.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,92. Тираж 280 экз. Заказ №. 54417.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/