

P14-2004-103

Т. Н. Мамедов¹, Д. Андрейка², Д. Г. Андрианов³,
Д. Герлах⁴, В. Н. Горелкин⁵, К. И. Грицай¹,
В. А. Жуков¹, А. В. Стойков^{1,4}, У. Циммерманн⁴

**ВЛИЯНИЕ ОДНООСНО-СТАТИЧЕСКОГО
ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕДЕНИЕ АКЦЕПТОРНОЙ
ПРИМЕСИ АЛЮМИНИЯ В КРЕМНИИ**

Направлено в «Письма в Журнал экспериментальной
и теоретической физики»

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

²University Babeş-Bolyai, 3400 Cluj-Napoca, Romania

³Государственный научно-исследовательский и проектный институт
редкометаллической промышленности «Гиредмет», 109017,
Москва, Россия

⁴Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen PSI, Switzerland

⁵Московский физико-технический институт, 141700 Долгопрудный,
Московская обл., Россия

Мамедов Т. Н. и др.

P14-2004-103

Влияние одноосно-статического давления
на поведение акцепторной примеси алюминия в кремнии

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния одноосного давления на поведение мелких акцепторных центров алюминия в кремнии. Примесные атомы μAl в образцах кристаллического кремния с примесью фосфора ($1,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ — первый образец, $1,9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ — второй образец) создавались путем имплантации отрицательных мюонов. Поляризация мюонов была исследована в поперечном спину мюона магнитном поле величиной 2,5 кГс в диапазоне температур 10–300 К. Направление выбранной оси кристалла ([111] в первом образце, [100] во втором), внешнего магнитного поля и начальной поляризации спина мюона были взаимно перпендикулярны. Обнаружено, что внешнее давление, приложенное вдоль указанной оси кристалла, приводит к изменению как абсолютной величины скорости релаксации магнитного момента акцепторного центра, так и характера ее температурной зависимости.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Перевод авторов

Mamedov T. N. et al.

P14-2004-103

The Effect of Uniaxial Static Pressure
on the Behaviour of the Aluminum Acceptor Impurity in Silicon

The results on the effect of uniaxial static pressure on the behaviour of aluminum shallow acceptors in silicon are presented. Impurity atoms of μAl in silicon crystals with phosphorus impurity ($1.6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ for the first sample and $1.9 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ for the second 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 10–300 K. Orientations of the chosen crystal axis ([111] for the first sample, [100] for the second one), magnetic field, and the muon polarization were reciprocally perpendicular. It was found that uniaxial pressure applied along the chosen crystal axes changes both the absolute value and the temperature dependence of the acceptor center magnetic moment relaxation rate.

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.

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

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы применение пучков поляризованных отрицательных мюонов позволило существенно восполнить пробел, существовавший в экспериментальном исследовании взаимодействия мелких акцепторных примесей в решетке кристаллического кремния. Были получены данные о сверхтонком взаимодействии в акцепторном центре (АЦ), о скорости и механизмах релаксации его магнитного момента, о процессах рассеяния свободных носителей заряда (электронов и дырок) на АЦ при концентрации примеси, близкой или выше критической концентрации, соответствующей переходу полупроводник–металл, о межпримесных взаимодействиях, о механизме и скорости ионизации АЦ в невырожденном кремнии *n*- и *p*-типа [1–4]. Несмотря на то, что примеси и дефекты в полупроводниках изучаются более полувека, вышеперечисленные данные о поведении неглубоких акцепторных примесей в кремнии были получены впервые.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния одноосной деформации кристалла кремния на скорость релаксации магнитного момента неглубокого акцепторного центра алюминия (см. также [5, 6]). Интерес к исследованию поведения акцепторной примеси в деформированном кристалле кремния обусловлен рядом причин. Как известно, кремний, полученный методом эпитаксиального выращивания (например, на подложке кристалла германия или алмаза), а также в гетероструктурах, оказывается напряженным. Причем напряжение кристалла аналогично тому, что возникает при сжатии кристалла по направлению, перпендикулярному к поверхности подложки, на которой выращивался образец. Возможность использования напряженного кремния с донорной или акцепторной примесью для создания модели квантового компьютера в настоящее время широко обсуждается в литературе [7, 8].

Исследования поведения акцепторной примеси в деформированном кремнии представляют интерес и с точки зрения уточнения структуры гамильтониана АЦ в полупроводниках с кристаллической структурой алмаза. В общем случае этот гамильтониан достаточно сложный [9].

Первое свидетельство о влиянии деформации кристалла кремния на поведение акцепторных примесей были получены в ЭПР-исследованиях [10, 11].

Возможность использования поляризованных отрицательных мюонов для исследования акцепторной примеси в кремнии определяется тем, что при захвате мюона атомом Si образуется мюонный атом μAl , который с точки зрения строения его электронной оболочки имитирует атом алюминия. При этом поляризация мюона зависит от состояния электронной оболочки (парамагнитное или диамагнитное) мюонного атома (АЦ), от сверхтонкого взаимодействия в АЦ и от его взаимодействий со средой.

1. ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения были проведены на спектрометре GPD [12], расположенном на мюонном канале μE1 ускорителя протонов в Институте Пауля Шеррера (PSI, Швейцария). Исследуемые образцы, вырезанные из монокристаллов кремния, имели форму правильной четырехгранной призмы с основанием $9,5 \times 9,5$ мм и высотой 22 мм. Были исследованы два образца с концентрациями примеси фосфора $1,6 \cdot 10^{13}$ и $1,9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Образцы были ориентированы так, что в первом случае ось кристалла [111], а во втором случае ось [100] была перпендикулярна основанию призмы с точностью $\pm 1^\circ$. Однородное магнитное поле на образце создавалось кольцами Гельмгольца. Величина магнитного поля составляла 2,5 кГс с долговременной стабильностью не хуже 10^{-4} . Выбранная ось кристалла ([111] для первого образца и [100] для второго), направление внешнего магнитного поля и начальная поляризация спина мюона были взаимно перпендикулярны.

Для создания одноосной деформации в кристалле разработана ячейка высокого давления. Ячейка была изготовлена из термообработанной бериллиевой бронзы и позволяла создавать на образце давление до 5 кбар. Давление прилагалось к основанию призмы. Контроль давления на кристалл (напряжение кристалла) производился тензорезистором типа EV001 П1-5-350Б (НИИФИ, Пенза). Датчик приклеивался на одну из граней кремниевой призмы клеем БФ-2, и затем клей подвергался полимеризации при высокой температуре. Ячейка с зафиксированным давлением размещалась в криостате, охлаждаемом парами жидкого гелия. Температура образцов в диапазоне 4 – 300 К поддерживалась с точностью 0,1 К.

Временная эволюция поляризации мюонов $P(t)$, остановившихся в образце, исследовалась путем регистрации электронов распада из реакции $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$. При этом зависимость количества зарегистрированных электронов от времени имеет вид экспоненты, модулированной функцией $P(t)$. Методика измерений и процедура восстановления параметров поляризации спина мюона из аппаратурных $\mu^- \text{SR}$ -спектров подробно описаны в [1, 2].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 и 2 представлены результаты измерений температурной зависимости скорости релаксации λ и сдвига частоты прецессии спина мюона $\Delta\omega/\omega_0$ для образцов кремния с концентрацией примеси фосфора $1,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (образец №1) и $1,9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (образец №2). Сдвиг частоты прецессии определялся как разность между частотами прецессии при температуре T и комнатной температуре: $\Delta\omega = \omega - \omega_0$.

На рисунках во вставках стрелками указаны взаимные ориентации внешнего магнитного поля, оси кристалла и направления начальной поляризации

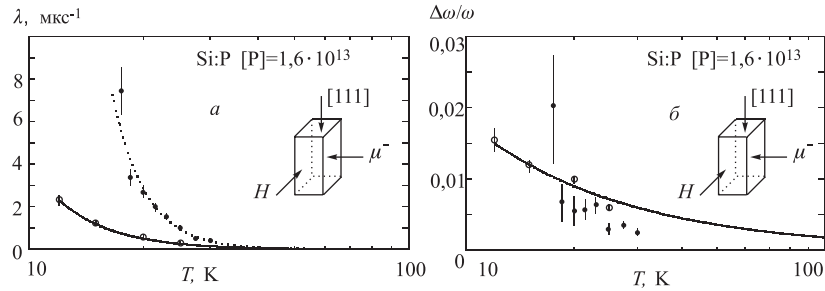


Рис. 1. Температурная зависимость скорости релаксации (а) и сдвига частоты прецессии спина мюона (б) в кремнии с концентрацией примеси фосфора $1,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Темные кружки — давление на образце составляет 3 кбар, светлые кружки — давление отсутствует. На рис. (а) кривые проведены по методу наименьших квадратов (см. в тексте), на рис. (б) кривая проведена для наглядности

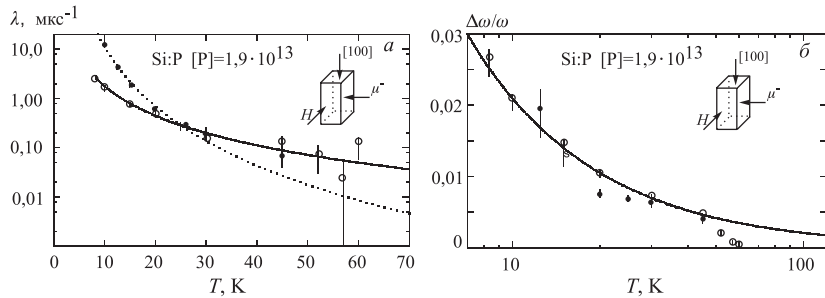


Рис. 2. Температурная зависимость скорости релаксации (а) и сдвига частоты прецессии спина мюона (б) в кремнии с концентрацией примеси фосфора $1,9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Темные кружки — давление на образце составляет 1,7 кбар, светлые кружки — давление отсутствует. Кривые проведены по методу наименьших квадратов (см. текст)

мюона. Направление внешнего давления совпадало с указанным направлением оси кристалла. Давление на образцы № 1 и № 2 составляло 3,0 и 1,7 кбар соответственно. Данные, полученные в условиях приложения статического давления к образцам, сравниваются на рисунках с аналогичными результатами измерений в отсутствие внешнего давления. Как видно из рис. 1 и 2, в результате приложения к образцу внешнего давления происходит существенное изменение скорости релаксации спина мюона. Более того, изменяется также и вид температурной зависимости скорости релаксации.

В отличие от скорости релаксации, влияние внешнего давления на сдвиг частоты прецессии спина мюона в обоих образцах является незначительным. Эти результаты не противоречат предварительным теоретическим оценкам [13]. По данным [13] наиболее сильное влияние внешнего давления на сдвиг частоты ожидается при сжатии кристалла кремния по оси [011].

Согласно [14] имеют место следующие аналитические соотношения между

Таблица 1. Значение параметров температурной зависимости скорости релаксации магнитного момента акцепторного центра в кремнии: $\nu = C \cdot T^\alpha$

Параметр	Образец №1 Давление, кбар		Образец №2 Давление, кбар	
	0	3	0	1,7
C , мкс $^{-1}$	$4,4 \pm 2,6$	$0,02 \pm 0,01$	60 ± 20	$0,15 \pm 0,08$
α	$2,7 \pm 0,2$	$4,8 \pm 0,3$	$2,0 \pm 0,1$	$3,8 \pm 0,2$

величинами, характеризующими временную эволюцию вектора поляризации мюона на $1S$ -уровне в атоме ${}_{\mu}Al$, и величинами, которые характеризуют взаимодействие данного АЦ в решетке кремния:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = -\frac{g\mu_B}{2\mu_B^\mu} \frac{J(J+1)A}{3k_B T}, \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{J(J+1)}{3} \left(\frac{(A/\hbar)^2}{\nu} + \frac{(A/\hbar)^2 \nu}{\nu^2 + \omega_e^2} \right), \quad (2)$$

где A – константа сверхтонкого взаимодействия мюона и электронной оболочки АЦ; ν – скорость релаксации магнитного момента АЦ; $\hbar = h/2\pi$, h – постоянная Планка; k_B – постоянная Больцмана; μ_B и μ_B^μ – магнетон Бора для электрона и мюона соответственно; g – g -фактор для АЦ; $\omega_e = g\mu_B B/\hbar$ – угловая частота прецессии магнитного момента электронной оболочки АЦ в магнитном поле B ; T – температура. Для мелкого АЦ в кремнии $J = 3/2$ [9], $g = -1,07$ [15].

В результате аппроксимации функции (1) к экспериментальным данным по сдвигу частоты прецессии спина мюона для образца №2 в области температур $\lesssim 50$ К были получены значения константы сверхтонкого взаимодействия $A/h = (32,0 \pm 0,9)$ МГц в отсутствие и $A/h = (26,3 \pm 1,0)$ МГц в присутствии внешнего давления. Кривая на рис. 2, б соответствует наилучшей аппроксимации данных в отсутствие внешнего давления на образце.

Экспериментальные данные по температурной зависимости скорости релаксации спина мюона были фитированы зависимостью (2). При этом принималось (см. [2]), что значение константы сверхтонкого взаимодействия равно $A/h = 26,5$ МГц и скорость релаксации магнитного момента акцепторного центра ${}_{\mu}Al$ зависит от температуры как $\nu = C \cdot T^\alpha$. Полученные значения параметров C и α приведены в табл. 1.

Для образца №1 в отсутствие внешнего давления значение α близко к трем, что хорошо согласуется с полученными нами ранее данными (см., например, [2]) для данного образца. В то же время в случае образца №2 в отсутствие внешнего давления $\alpha \simeq 2$.

Следует отметить, что для более 10 образцов n - и p -типа кремния с концентрацией примеси $\lesssim 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, изученных нами ранее в условиях отсутствия внешнего давления, $\alpha \simeq 3$ [2]. То обстоятельство, что в случае образца № 2 полученное в отсутствие внешнего давления значение α близко к двум, возможно, свидетельствует о зависимости ν от взаимной ориентации оси кристалла и внешнего магнитного поля.

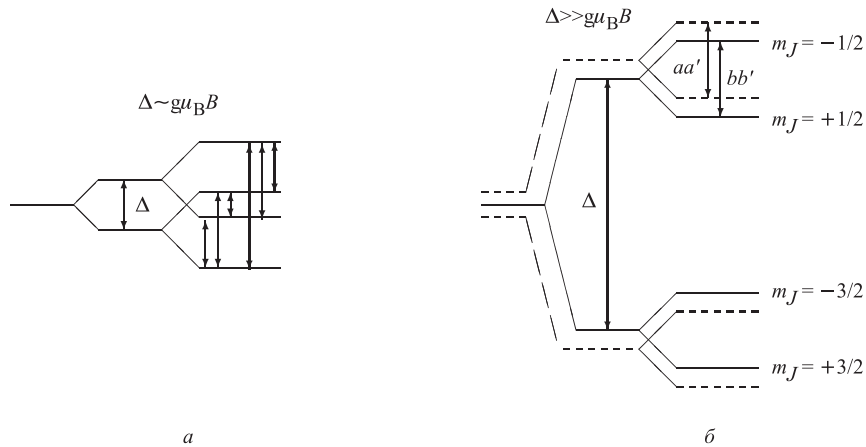


Рис. 3. Расщепление основного состояния мелкого акцепторного центра в кремнии в магнитном поле B : a) в отсутствие сжатия, b) при одноосном сжатии кристалла (Δ — энергия деформации). Пунктирными линиями показано расщепление, возникающее в результате случайных внутренних напряжений

Как следует из данных, приведенных в табл. 1, в результате приложения внешнего статического давления параметр C в выражении для скорости релаксации магнитного момента АЦ уменьшается более чем на два порядка, а показатель степени α увеличивается примерно на две единицы.

Наблюдаемая зависимость скорости релаксации магнитного момента акцепторного центра в кремнии от внешнего давления с теоретической точки зрения является понятной, хотя количественные расчеты данного эффекта до сих пор отсутствуют (ввиду их сложности). Согласно [9], четырехкратно вырожденное состояние эффективно взаимодействует с фононным полем в кристалле при отсутствии деформации. Это обуславливает высокую скорость релаксации магнитного момента АЦ даже при низких температурах. В случае же деформации кристалла под внешним давлением четырехкратно вырожденное состояние акцепторного центра расщепляется на два кramerсовских дублета (см. рис. 3), взаимодействие которых с фононами резко ослаблено, и соответственно скорость релаксации магнитного момента акцепторного центра уменьшается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые экспериментально показано, что вследствие одноосного сжатия кристалла при температурах $\lesssim 50$ К имеет место существенное изменение температурной зависимости скорости релаксации магнитного момента акцепторного центра. Для получения более детальной информации о влиянии внешнего давления на взаимодействие акцепторной примеси в решетке кремния предполагается исследование зависимости скорости релаксации и сдвига частоты прецессии спина мюона от величины внешнего давления и от ориентации магнитного поля относительно оси кристалла.

Авторы выражают признательность В.С.Егорову (РИЦ «Курчатовский институт») за предоставление образца тензодатчика и Н.Я.Мининой (кафедра физики низких температур МГУ) за подробную консультацию по использованию тензорезисторов для измерения напряжения кристалла.

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. *Mamedov T. N., Chaplygin I. L., Duginov V. N. et al.* // J. Phys.: Condens. Matter. 1999. V. 11. P. 2849.
2. *Мамедов Т. Н., Стойков А. В., Горелкин В. Н.* // ЭЧАЯ. 2002. Т. 33, вып. 4. С. 1005.
3. *Mamedov T. N., Herlach D., Gorelkin V. N. et al.* // Physica B. 2003. V. 326. (1-4). P. 97.
4. *Мамедов Т. Н., Андрианов Д. Г., Герлах Д. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 79. С. 25.
5. *Mamedov T. N., Andreica D., Andrianov D. G. et al.* // PSI Scientific Report. 2002. V. III. P. 115.
6. *Mamedov T. N., Andreica D., Andrianov D. G. et al.* // PSI Scientific Report. 2003. V. III. P. 123.
7. *Koiler B., Xuedong Hu, Das Sarma S.* // Phys. Rev. B. 2002. V. 66. P. 115201.
8. *Golding B., Dykman M. I.* <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/0309147> (2003).
9. *Бир Г. Л., Пикус Г. Е.* Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М.: Наука, 1972.
10. *Feher G., Hensel J. C., Gere E. A.* // Phys. Rev. Lett. 1960. V. 5. P. 309.

11. *Ludwig G. W., Woodbury H. H.* // Bull. Am. Phys. Soc. 1961. V. 1. P. 118.
12. *Abela R., Baines C., Donath X. et al.* // Нур. Int. 1994. V. 87. P. 1105.
13. *Батурин А. С., Горелкин В. Н.* // Труды XXXVII школы ПИЯФ (в печати).
14. *Gorelkin V. N., Mamedov T. N., Baturin A. S.* // Physica B. 2000. V. 289–290. P. 585.
15. *Neubrand H.* // phys. stat. sol. (b) 1978. V. 86. P. 269.

Получено 29 июня 2004 г.

Редактор *Е. Л. Аксенова*

Подписано в печать 29.07.2004.

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

Усл. печ. л. 0,69. Уч.-изд. л. 1,04. Тираж 295 экз. Заказ № 54497.

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/