

## ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННЫХ НАРУШЕНИЙ В РЕШЕТКЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ ВНЕДРЕННОГО АТОМА МЮОНИЯ

*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. Мясичева, Ю.В.Обухов,  
Г.И.Савельев, В.Г.Фирсов, Г.В.Щербаков*

Экспериментально обнаружено, что радиационные дефекты различным образом влияют на нормальный и аномальный мюоний в кремнии. Показано, что подвижности этих двух состояний мюония в решетке образца существенно различны.

Как показано в наших предыдущих работах <sup>1,2</sup> исследование температурной зависимости величины поляризации и скорости релаксации поляризации ансамбля  $\mu^+$ -мезонов в перпендикулярных и продольных магнитных полях несет информацию как о вероятности образования различных связанных состояний  $\mu^+$ -мезона, так и о динамике переходов между ними. Для описания всей совокупности экспериментального материала по исследованию состояний  $\mu^+$ -мезона в полупроводниках авторами предложено модельное представление трех возможных состояний  $\mu^+$ -мезона в веществе <sup>1</sup>, в котором под аномальным мюонием ( $\text{Mu}^*$ ) подразумевается связанная система в решетке кремния с неспаренным электроном, локализованным на одном из соседних с мюоном атомов решетки (модель химической связи).

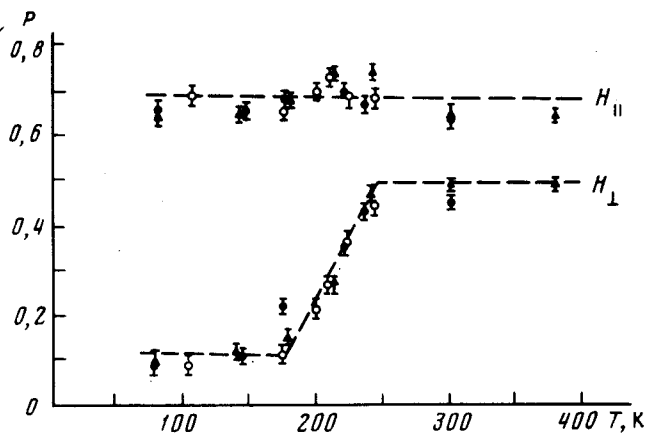


Рис.1. Температурная зависимость начальной поляризации  $\mu^+$ -мезонов в кремнии ( $p = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) для продольного ( $H_{||} = 250 \text{ Э}$ ) и перпендикулярного ( $H_{\perp} = 350 \text{ Э}$ ) магнитных полей

Последовательная феноменологическая теория, описывающая состояния  $\text{Mu}$  и  $\text{Mu}^*$  в решетках твердых тел со структурой алмаза, развита в работах Белоусова, Горелкина и Смильги <sup>3</sup>.

С целью апробации модели химической связи и получения новых экспериментальных данных для дальнейшего развития теории и наших представлений о поведении  $\mu^+$ -мезона в веществе и проводились исследования, описанные в настоящей работе.

По-видимому, наиболее полную информацию о трех различных состояниях  $\mu^+$ -мезона в веществе может дать исследование вероятности их образования и динамики изменения за доступное для наблюдения время существования этих состояний при различных (заведомо известных) параметрах окружающей среды. Так, например, известно, что атомы водорода, внедренные в кремний при ионной имплантации, активно взаимодействуют с радиационными нарушениями решетки с образованием связи типа  $\text{Si} - \text{H}$  <sup>4</sup>.

Аналогом атома водорода в кремнии является свободный атом мюония ( $\text{Mu}$ ), который быстро находит точечный дефект и вступает во взаимодействие с ним, аналогично атому водорода.

Что касается поведения аномального мюония в зависимости от числа радиационных дефектов в образце, то оно во многом зависит от структуры этого состояния. Если мы будем рассматривать  $\text{Mu}^*$  как свободный атом  $(\mu^+e^-)^*$ , отличающийся от  $\text{Mu}$ , только своей сверхтонкой структурой, то условия взаимодействия этой системы с радиационными дефектами образца не должны сильно отличаться от взаимодействий атома  $\text{Mu}$ . Если же рассматривать систему  $\text{Mu}^*$  как комплекс, жестко закрепленный в кристаллической решетке, то наоборот, из-за отсутствия диффузии по объему образца радиационные дефекты не смогут изменить динамику поведения системы  $\text{Mu}^*$  в кремнии.

Для выяснения этого вопроса нами исследовалось влияние радиационных нарушений монокристалла кремния и последующего их отжига на соотношение амплитуд нормального, аномального мюония и  $\mu^+$ -мезона. С этой целью подробно исследованный нами ранее образец кремния  $p$ -типа ( $p = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) был подвергнут облучению быстрыми нейтронами в экспериментальных каналах реактора ЛИЯФ АН СССР. Были проведены три серии облучений различными дозами нейтронов, которые создали, по оценкам, концентрации дефектов (смещенных атомов), равные:  $2 \cdot 10^{18}$ ;  $10^{17}$  и  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

После каждого облучения проводились  $\mu \text{SR}$ -исследования с облученным образцом и с тем же образцом после полного термического отжига радиационных дефектов. Эксперименты проводились на установке „Мюоний” на пучке мю-мезонного канала синхротрона ЛИЯФ <sup>5</sup>. Результаты исследования приведены на рис.1 и рис.2. На рис.1 показана температурная зависимость начальной ( $t = 0$ ) поляризации ансамбля  $\mu^+$ -мезонов в продольном ( $H_{||} = 250 \text{ Э}$ ) и в перпендикулярном ( $H_{\perp} = 350 \text{ Э}$ ) магнитных полях для необлученного образца (пунктир-

ные линии <sup>2</sup>), при концентрации радиационных дефектов  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (треугольники),  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (темные кружки) и после полного термического отжига дефектов (светлые кружки). Из приведенных зависимостей видно, что начальная (при  $t = 0$ ) поляризация  $\mu^+$ -мезонов слабо зависит от концентрации дефектов в образце, что указывает на то, что радиационные дефекты не изменяют вероятность образования трех состояний  $\text{Mu}$ ,  $\text{Mu}^*$  и  $\mu^+$  в начальный момент времени.

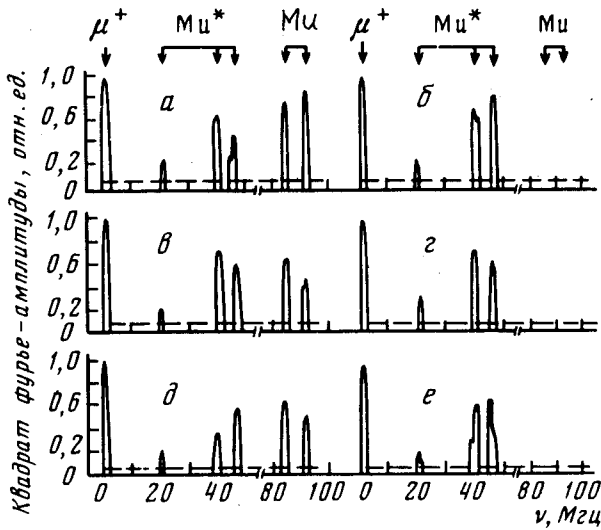


Рис.2. Результаты фурье-анализа экспериментальных  $\mu\text{SR}$ -спектров ( $H_{\perp} = 60 \text{ Э}$ ,  $T = 80 \text{ К}$ ): а – необлученный образец, б – концентрация дефектов после первого облучения –  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , в – после первого термического отжига, г – концентрация дефектов после второго облучения –  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , д – после второго термического отжига, е – концентрация дефектов после третьего облучения –  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Пунктирные линии – уровень белого шума

На рис.2 показаны фурье-преобразования  $\mu\text{SR}$ -спектров для исследуемого образца кремния при  $T = 80 \text{ К}$  в поле  $H_{\perp} = 60 \text{ Э}$  на различных этапах облучения и последующего отжига. Из рисунка видно, что образующиеся радиационные дефекты различным образом влияют на нормальный и аномальный мюоний в кремнии (для  $t > 0$ ). При концентрации дефектов в диапазоне  $10^{16} \div 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  нормальный мюоний по прецессии на мюониевой частоте экспериментально не наблюдается. В то же время амплитуда и скорость релаксации поляризации  $\mu^+$  в составе аномального мюония практически не изменились. Этот факт свидетельствует о существенно разной подвижности нормального и аномального мюония в кристаллической решетке кремния. Последующий температурный отжиг образца приводит к восстановлению исходных характеристик поляризации спина  $\mu^+$ -мезона в составе нормального мюония.

Проведенные исследования показывают, что радиационные дефекты существенным образом изменяют динамику поведения состояния нормального мюония в кремнии и практически не влияют на аномальный мюоний. Это явление можно использовать как для более детального изучения состояний аномального мюония в полупроводниках, так и для обнаружения с помощью  $\mu\text{SR}$ -дефектоскопии радиационных дефектов в слаболегированных образцах кремния и германия. Полученные данные качественно подтверждают представления о механизме взаимодействия  $\mu^+$ -мезона в решетке атомарных полупроводников, изложенные в модели химической связи <sup>1</sup>.

Авторы приносят благодарность В.П.Смилге, В.Н.Горелкину за полезные обсуждения, И.В.Назаркину и В.А.Чеканову за помощь при проведении облучения образцов кремния на реакторе ВВРМ ЛИЯФ АН СССР и измерении их электрофизических свойств.

#### Литература

1. Барсов С.Г., Геталов А.Л., Гордеев В.А., Коноплева Р.Ф., Круглов С.П., Кудинов В.И., Кузьмин Л.А., Микртычьянц С.М., Минайчев Е.В. и др. ЖЭТФ, 1979, 76, 2198.
2. Барсов С.Г., Геталов А.Л., Гордеев В.А., Коноплева Р.Ф., Круглов С.П., Кудинов В.И., Кузьмин Л.А., Микртычьянц С.М., Минайчев Е.В., Мясичева Г.Г. и др. ЖЭТФ, 1980, 79, 1461.
3. Белоусов Ю.М., Горелкин В.Н., Смилга В.П. ЖЭТФ, 1978, 74, 629; ЖЭТФ, 1978, 75, 2005.

4. Герасименко Н.Н., Тныштыкбаев К.Б. ФТП, 1980, 14, 1673.

5. Барсов С.Г. и др. Препринт ЛИЯФ-659, Л., 1981.

Институт теоретической и  
экспериментальной физики

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

---

Поступила в редакцию  
26 ноября 1982 г.