

## СПИН-ЗАВИСИМАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПО ДИСЛОКАЦИЯМ В Si

В.В.Кведер, Ю.А.Осипьян, А.И.Шалынин

В пластически деформированном кремнии при  $T = 1,4\text{К}$  обнаружено резонансное изменение дислокационной проводимости. Предполагается, что эффект связан с взаимодействием носителей тока с локализованными на дислокациях парамагнитными  $Sh$ -центрами, неизвестными ранее.

В настоящее время можно считать твердо установленным, что при пластической деформации в кристаллах кремния появляются парамагнитные центры, представляющие собой цепочки оборванных связей в ядрах дислокаций (ДОС), а также различные дефекты на дислокациях. Эти центры дают специфический сигнал электронного парамагнитного резонанса (ДЭПР) <sup>1, 2</sup>. Наряду с ДЭПР, в пластически деформированном кремнии наблюдается значительная высокочастотная электропроводность вдоль дислокационных линий, связанная с движением захваченных дислокациями электронов ( $n$ -тип) и дырок ( $p$ -тип) <sup>3</sup>. В этой связи представляло бы значительный интерес исследование влияния спинового состояния дислокационных парамагнитных центров на проводимость вдоль дислокаций. Однако в неотожженных кристаллах, где электроны и дырки в основном захватываются непосредственно на ДОС, нам такой эффект наблюдать пока не удалось. В настоящей работе мы сообщаем об обнаружении спин-зависимой проводимости в образцах, отожженных после деформации при  $800 \div 850^\circ\text{C}$ .

Как следует из приведенных ранее наблюдений <sup>2</sup> отжиг пластически деформированных образцов при  $T > 700^\circ\text{C}$  приводит к ослаблению вплоть до полного исчезновения сигнала ЭПР цепочек ДОС. Мы объясняем это реконструкцией атомного строения ядер дислокаций, приводящей к замыканию ДОС. Глубокие электронные состояния, связанные с наличием непосредственно ДОС при этом исчезают. Однако в этом случае могут сохраняться некоторые одномерные зоны, обусловленные сильным искажением решетки кристалла вокруг дислокаций. Носители, захваченные в эти состояния могут также давать проводимость вдоль дислокаций и обладая спином должны чувствовать спиновое состояние находящихся в ядрах дислокаций парамагнитных дефектов. Можно полагать, что именно это явление наблюдалось в наших экспериментах.

Исследовались образцы кремния  $n$ -типа ( $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и  $10^{15} \text{ см}^{-3} P$ ) и  $p$ -типа ( $10^{13} \text{ см}^{-3} V$ ) пластически деформированные на  $2 \div 3\%$  сжатием вдоль  $[110]$  при  $680^\circ \text{C}$ . Затем образцы отжигались 30 минут при  $800 \div 850^\circ \text{C}$ .

Измерения проводились при  $T = 1,4 \text{ K}$ . Образец помещался в прямоугольный резонатор ( $H_{102}$ ) супергетеродинного ЭПР спектрометра с рабочей частотой  $f_0 \approx 9,5 \text{ ГГц}$ . В тот же резонатор подводилась СВЧ мощность (накачка) на частоте  $f_H \approx 18 \text{ ГГц}$ . Приемная часть ЭПР спектрометра была защищена от попадания в нее сигнала накачки при помощи отражательного фильтра. Резонатор был тщательно заэкранирован от ИК-излучения теплых частей волновода и криостата. Имелась возможность освещать образец миниатюрной лампочкой накаливания. На статическое магнитное поле  $H$  накладывалась модуляция с амплитудой  $0,3 \text{ Э}$ , частотой  $80 \text{ Гц}$ , что позволяло регистрировать производные поглощения и дисперсии.

На рис. 1 (кривая 3) представлена производная поглощения высокочастотной мощности на частоте  $f_0$  в присутствии  $18 \text{ ГГц}$  накачки при сканировании  $H$  вблизи  $H_H^{\text{pe3}} \approx 6 \text{ кЭ}$ . В отсутствие накачки сигнал не наблюдается. Установлено, что регистрируемый сигнал (назовем его  $ch$ -линией) не связан с просачиванием мощности накачки в приемный тракт или нагревом образца,  $Ch$ -линия появляется только после освещения образца лампочкой и амплитуда практически не меняется в течение нескольких часов после выключения света. Сигнал наблюдается только в образцах с дислокациями.

Обнаруженный сигнал наблюдается также в полях  $H_0^{\text{pe3}} \approx 3 \text{ кЭ}$  вне зависимости от наличия  $18 \text{ ГГц}$  накачки. Сигнал резко уменьшается при смещении образца в область высокочастотного магнитного поля резонатора, где электрическое поле на рабочей частоте  $f_0$  мало.

На рис. 1 приведены производные поглощения (1) и дисперсии (2) в поле  $\approx 3 \text{ кЭ}$ . Величины  $g$ -фактора  $H_H^{\text{pe3}} / \gamma f_H$  и  $H_0^{\text{pe3}} / \gamma f_0$  совпадают. Справа показана линия ЭПР эталона  $\text{Mn}^{++}$  в  $\text{MgO}$ .

На рис. 2 показана анизотропия положения  $Ch$ -линии для трех различных направлений вращения кристалла (ось вращения  $\vec{\Omega}$  была перпендикулярна  $H$ ). Сплошными кривыми проведены расчетные зависимости, соответствующие  $g$ -тензору.  $g_{11} = 1,9915 \pm 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $g_{22} = 2,0064 \pm 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $g_{33} = 2,0159 \pm 5 \cdot 10^{-4}$ , главные оси которого имеют в системе координат кристалла  $[100]$ ,  $[010]$ ,  $[001]$  направляющие косинусы  $\eta_1 \approx (0,38; -0,9; -0,2)$ ,  $\eta_2 \approx (0,32; -0,06; 0,94)$ ,  $\eta_3 \approx (0,87; 0,43; -0,25)$ . Было установлено, что амплитуда линии  $Ch$  сильно изменяется при вращении кристалла, и линия практически исчезает при  $E_{f_0} \perp [110]$ , где  $E_{f_0}$  — высокочастотное электрическое поле. (Заметим, что  $E_{f_0} \parallel H$ ). На рис. 3 для примера показана относительная амплитуда линии при вращении кристалла вокруг оси  $[110]$ , сплошная кривая соответствует  $A/A_{\text{max}} = 0,83 \cos^2 \varphi + 0,1$ . Кривая проведена методом наименьших квадратов. Здесь  $\varphi$  — угол между направлением  $[110]$  и  $E_{f_0} \parallel H$ . Ширина линии при этом практически не меняется.

Представленные результаты на наш взгляд свидетельствуют о том, что наблюдаемая  $Ch$ -линия связана с резонансным изменением одномерной или квазиодномерной проводимости некоторых объектов, лежащих вдоль направления  $[110]$ . При  $1,4 \text{ K}$  в отсутствие подсветки такие объекты могут обладать проводимостью лишь в том случае, если с ними связаны электронные энергетические зоны, лежащие в запрещенной зоне кремния.

По-видимому, обнаруженный эффект связан с взаимодействием движущихся по таким квазиодномерным объектам носителей тока с некоторыми парамагнитными центрами ( $Ch$ -центрами), локализованными на, или в непосредственной близости от этих объектов. На наш взгляд наиболее разумно предположить, что такими проводящими объектами являются дислокации, лежащие вдоль  $[110]$ , например,  $90^\circ$  частичные.

Следует отметить, что в <sup>4</sup> при исследовании ЭПР в  $\text{Ge}$  с дислокациями обнаружен ряд линий, возникающих после освещения образца, фаза которых противоположна обычным ЭПР линиям. В принципе сигнал ЭПР противоположной фазы может быть получен при на-

рушении условий медленного прохождения <sup>5</sup>. Однако, наиболее вероятно, что в <sup>4</sup> наблюдается аналогичный эффект.

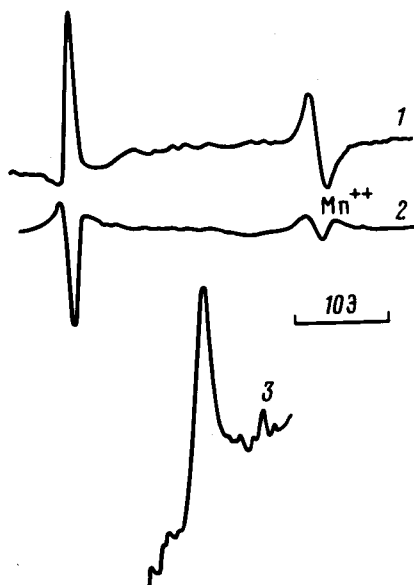


Рис. 1

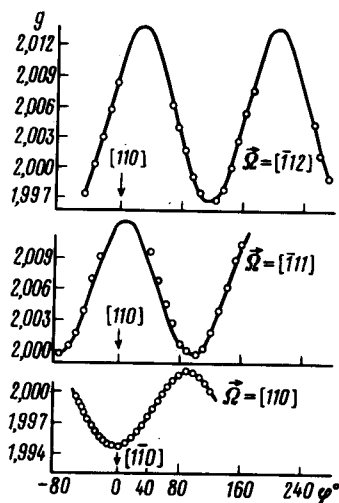


Рис. 2

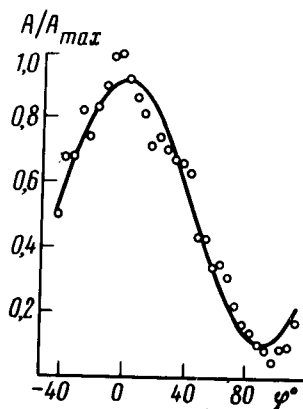


Рис. 3

Регистрируемые производные поглощения и дисперсии соответствуют  $\partial \epsilon''/\partial H$  и  $\partial \epsilon'/\partial H$ , где  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$  — диэлектрическая проницаемость образца. Как следует из рис. 3,  $\frac{\partial \chi'/\partial H}{\partial \epsilon'/\partial H} < 0,1$ . То же самое можно сказать и о  $\frac{\partial \chi''/\partial H}{\partial \epsilon''/\partial H}$ , где  $\chi = \chi' + i\chi''$  — магнитная восприимчивость образца, резонансно меняющаяся в обычном ЭПР. Оценка числа парамагнитных центров, исходя из этого факта и величины сигнала, дает  $N_{Ch} < 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

По предварительным измерениям, величина сигнала  $\partial \epsilon''/\partial H$  и  $\partial \epsilon'/\partial H$  растет с уменьшением мощности вплоть до  $P_{\text{СВЧ}} \approx 10^{-7} \text{ Вт}$  ( $H_{\text{СВЧ}} \approx 10^{-3} \text{ Э}$ ).

Анализ формы линии показывает, что знак  $\partial \epsilon'/\partial H$  и  $\partial \epsilon''/\partial H$  совпадает. Если проводящие участки дислокаций представить в виде очень вытянутых эллипсоидов длиной  $l$ , радиусом  $r$  и проводимостью на единицу длины  $S$ , то согласно <sup>6</sup> такое синхронное изменение  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  при изменении величины  $S$  возможно лишь в случае  $2\pi\epsilon_0\epsilon_b f_0 l^2 > \kappa S$ , где  $\epsilon_0\epsilon_b$  — диэлектрическая проницаемость кремния,  $\kappa = 6/\pi[\ln(l/r) - 1]$ . Таким образом проводящие участки должны быть достаточно длинными. К такому же выводу можно прийти и из соображений о необходимости наличия на длине  $l$  хотя бы одного  $Ch$ -центра.

#### Литература

1. *Grazhulis V.A., Kveder V.V., Osipyay Yu. A.* Phys. stat. sol. (b), 1982, 103, 519.
2. *Золотухин М.Н., Кведер В.В., Осипьян Ю.А.* ЖЭТФ, 1981, 81, 299.
3. *Гражулис В.А., Кведер В.В., Мухина В.Ю., Осипьян Ю.А.* Письма в ЖЭТФ, 1976, 24, 164.
4. *Pakulis E.J.* J. Magn. Res., 1983, 51, 490.
5. *Weger W.* Bell. Syst. Techn. J., 1960, 39, 1013.
6. *Labusch R.* Physica, 1983, 117B, 203. North-Holland Publ. Comp.