

## КОМБИНИРОВАННЫЙ РЕЗОНАНС НА ДИСЛОКАЦИЯХ В КРЕМНИИ

*В.В.Кведер, В.Я.Кравченко, Т.Р.Мчедлидзе, Ю.А.Осипьян,  
Д.Е.Хмельницкий, А.И.Шалынин*

В пластически деформированном кремнии обнаружен комбинированный резонанс, соответствующий переходам между зеемановскими уровнями электронов, захваченных в одномерную дислокационную зону, за счет их движения по дислокации под действием высокочастотного электрического поля.

Пластическая деформация кристаллов кремния приводит к появлению большого числа специфических квазиодномерных дефектов, известных под общим названием дислокации, которые обладают рядом интересных физических свойств. С дислокациями связан ряд пиков плотности электронных состояний, лежащих внутри запрещенной зоны <sup>1</sup>. Эти пики обусловлены, во-первых, оборванными связями в ядрах дислокаций (ДОС), которые порождают сигнал ЭПР от дислокаций, во-вторых, сильным искажением кристалла вокруг дислокационных линий (и имеющим трансляционную симметрию вдоль дислокации), в-третьих – специфическими

дефектами, существующими в этих ядрах дислокаций и вблизи них. С некоторыми из этих глубоких электронных состояний связана значительная высокочастотная проводимость, наблюдающаяся вдоль линий дислокаций <sup>2</sup>.

Отжиг деформированного кремния при  $T > 800^\circ\text{C}$  приводит к исчезновению дислокационного сигнала ЭПР и электронные состояния, обусловленные ДОС исчезают <sup>2</sup>. Исчезновение ДОС может быть, в частности объяснено реконструкцией ядер дислокаций <sup>3,4</sup>, в результате чего ДОС оказываются попарно замкнуты. Однако и в условиях реконструкции с некоторыми типами дислокаций могут быть связаны глубокие квазидномерные зоны о чем свидетельствует наличие высокочастотной проводимости в образцах *n*-типа <sup>2</sup> и данные об энергетическом спектре <sup>1</sup>.

Интересным классом явлений, которые могут дать информацию об электронных свойствах дислокаций в полупроводниках, являются спин-зависимые эффекты. Один из них – спин-зависимая рекомбинация электронов через ДОС исследован в <sup>5</sup>.

Наряду с этим в пластически деформированном кремнии, отожженном при  $T > 800^\circ\text{C}$  был обнаружен другой спин-зависимый эффект <sup>6</sup>, заключающийся в резонансном изменении действительной ( $\epsilon'$ ) и мнимой ( $\epsilon''$ ) части диэлектрической проницаемости образца на частоте парамагнитного резонанса  $\hbar\omega = g\mu_B H_0$ . В настоящей работе на основании исследования анизотропии эффекта мы постараемся показать, что его природа заключается в комбинированном спиновом резонансе <sup>7,8</sup> на электронах, принадлежащих квазидномерной дислокационной зоне одного из типов реконструированных дислокаций.

Исследовались образцы кремния *n* – ( $2 \cdot 10^{14}$  ат · Р/см<sup>3</sup>) и *p* – ( $10^{13}$  ат · В/см<sup>3</sup>) типа, пластически деформированные на 2% сжатием вдоль [110] при  $680^\circ\text{C}$  (плотность дислокаций ( $2 - 4$ )  $\cdot 10^{19}$  см<sup>-2</sup>). После деформации образцы отжигались 30 мин при  $850^\circ\text{C}$ . Измерения проводились при  $T = 1,4\text{ K}$ . Образец, имеющий форму, близкую к сферической, помещался в прямоугольной резонатор (мода  $H_{102}$ ) супергетеродинного ЭПР-спектрометра с рабочей частотой  $f_0 \cong 9,5\text{ ГГц}$ , в ту часть резонатора, где электрическое СВЧ-поле  $E_1 \neq 0$ . Во внешнем магнитном поле  $H_0 \cong 3,4\text{ кЭ}$  наблюдалось резонансное изменение действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости образца (см. рис. 1). Амплитуда сигнала, названного *Ch*-линией, при малой СВЧ мощности пропорциональна  $E_1^2$ , а при большой СВЧ-мощности быстро насыщается. При смещении образца в область, где  $E_1 \cong 0$ , а  $H_1$  – максимально, сигнал падает примерно в 200 раз. *g*-фактор *Ch*-линии близок к *g*-фактору свободных электронов, но обладает некоторой анизотропией, изменяясь при вращении образца от  $g = 1,99$  до  $2,016$ .

Амплитуда *Ch*-линии очень сильно зависит от ориентации образца относительно направлений  $E_1$  и  $H_0$  (см. рис. 2). Анализ анизотропии амплитуды *A* при вращении образца вокруг различных осей показал, что она хорошо описывается формулой

$$A = A_0 \cos^2 \theta_E [1 - \sin^2 \theta_H \sin^2 \varphi_H], \quad (1)$$

где углы  $\theta_E$ ,  $\theta_H$  и  $\varphi_H$  изображены на рис. 3, (I и F – некоторые кристаллографические направления, смысл которых будет ясен из обсуждения). Для образцов, деформированных сжатием [110] или [123], направления I и F с точностью  $7^\circ$  совпадают с [110] и [001] соответственно. Непрерывные кривые на рис. 2A, 2B рассчитаны по формуле (1). Величина анизотропии очень велика. Например, при  $E_1 \parallel H_0$  амплитуда *Ch*-линии *A* при  $E_1 \parallel [110]$  в 500 раз меньше, чем при  $E_1 \parallel [1\bar{1}0]$ !

Столь необычная анизотропия эффекта и тот факт, что он намного сильнее, чем обычный ЭПР, позволяет полагать, что он обусловлен комбинированным резонансом в квазидномерной системе. Действительно, спектр электронов в зоне, связанной с дислокацией, имеющей краевую компоненту, формируется потенциалом ядра, обладающим низкой симметрией, т.е. электрон испытывает действие кристаллического поля  $F$ , перпендикулярного оси дислокации I. Вследствие релятивистских эффектов движение электронов вдоль I со скоростью  $v$  порождает магнитное поле  $\tilde{h} = -[v \times F]/ec$  непосредственно воздействующее на спин. Во внешнем поле  $E_1(\omega)$  скорость  $v$  приобретает высокочастотную компоненту, что приводит к переходам между зеемановскими

ми подуровнями (комбинированный резонанс (КР), предсказанный Рашба<sup>7,8</sup>). Интенсивность КР для зонных электронов значительно выше, чем интенсивность ЭПР. Можно показать, что в этом случае зависимость интенсивности КР от ориентации постоянного магнитного поля  $H_0$  и СВЧ-поля  $E_1$  дается формулой (1).

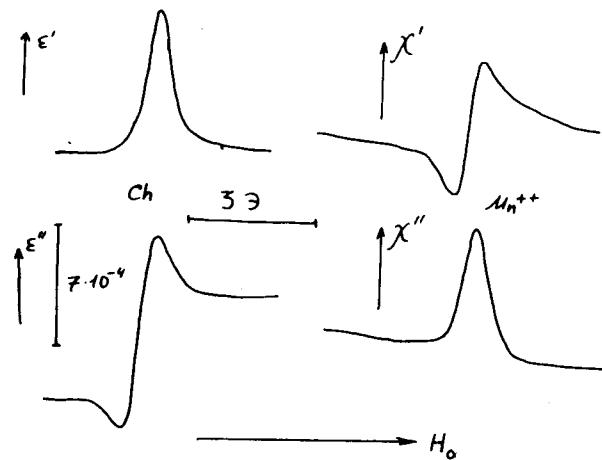


Рис. 1

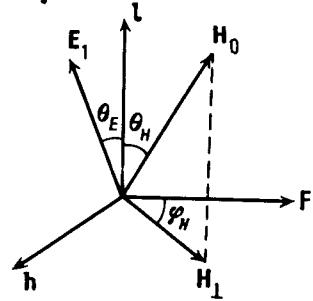


Рис. 3

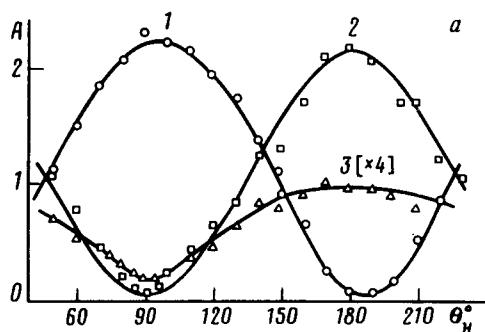


Рис. 2

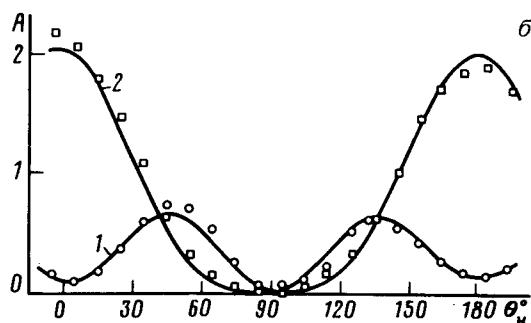


Рис. 1. Изменение действительной ( $\epsilon'$ ) и мнимой ( $\epsilon''$ ) части диэлектрической проницаемости образца при резонансе. Справа для сравнения приведен сигнал ЭПР эталона (4-я линия СТС  $Mn^{++}$  в  $MgO$ )

Рис. 2. Анизотропия амплитуды  $Ch$ -линии при вращении образца вокруг  $\vec{\Omega}$ . СВЧ мощность  $P = 1,5 \cdot 10^{-7}$  Вт для 1 и 2,  $P = 1,6 \cdot 10^{-4}$  Вт для 3. Кривые 1 соответствуют  $E_1 \perp H_0$  ( $\theta_E = \theta_H + \pi/2$ ), кривые 2, 3 –  $E_1 \parallel H_0$  ( $\theta_E = \theta_H$ ). Зависимость от угла между  $H_0$  и осью  $[1\bar{1}0]$ ,  $\vec{\Omega} = [110]$  ( $\varphi_H = 0$ ). 2В. То же,  $\vec{\Omega} = [001]$  ( $\varphi_H = \pi/2$ )

Рис. 3. 1 – направление оси дислокации ( $[110]$ ),  $F$  – направление кристаллического поля ( $[001]$ ),  $\tilde{h}$  – направление эффективного СВЧ магнитного поля ( $[110]$ ),  $H_0$  – вектор постоянного магнитного поля,  $\theta_H$  и  $\varphi_H$  – полярный и азимутальный углы  $H_0$ ,  $E_1$  – вектор СВЧ электрического поля,  $\theta_E$  – полярный угол  $E_1$

Наблюдение КР позволяет сделать некоторые заключения о характере спектра электронов, участвующих в резонансе, о симметрии и величине кристаллического поля в ядре. Существенное превышение сигнала КР над ЭПР несомненно свидетельствует о зонном характере электронных состояний. Эта зона, согласно данным по ориентационной зависимости  $Ch$ -линии, одномерна, т.е. КР возбуждается только компонентой  $E_1$ , параллельной оси дислокации. Интенсивность КР определяется величиной поля  $F$ , возникающего вследствие понижения симметрии в ядре дислокации. Оценку можно получить из сравнения интенсивностей КР и ЭПР:

$$A_{\text{кр}}/A_{\text{ЭПР}} \cong (\tilde{h}/H_1)^2 \cong (E_1/H_1)^2 (F/mc\omega)^2.$$

Так как  $A_{\text{кр}}/A_{\text{эпр}} \geq 200$  и в условиях эксперимента  $E_1 \cong H_1/3$ , то имеем  $F/e \geq 5 \cdot 10^7$  В/см. Большая величина  $F$  указывает на то, что электронная зона, ответственная за КР, соответствует глубоким состояниям, лежащим в запрещенной зоне полупроводника.

### Литература

1. Kveder. V.V., Ossipyan Yu.A., Schröter W., Zoth G. Phys. Stat. Sol. (a), 1982, **72**, 701.
2. Kveder V.V., Ossipyan Yu.A., Sagdeev I.R., Shalynin A.I., Zolotukhin M.N. Phys. Stat. Sol. (a), 1985, **87**, 657.
3. Marklund S. Phys. Stat. Sol. (b), 1979, **92**, 83.
4. Золотухин М.Н., Кведер В.В., Осипьян Ю.А., Сагдеев И.Р. ФТТ, 1984, **26**, 1412.
5. Кведер В.В., Осипьян Ю.А., Шалынин А.И. ЖЭТФ, 1982, **83**, 699.
6. Кведер В.В., Осипьян Ю.А., Шалынин А.И. Письма в ЖЭТФ, 1984, **40**, 10.
7. Рашба Э.И. УФН, 1964, **84**, 557.
8. Рашба Э.И. ФТТ, 1960, **2**, 1224.

Институт физики твердого тела  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
16 января 1986 г.