

СВЧ-ПРОВОДИМОСТЬ И ИНВЕРТИРОВАННЫЙ СИГНАЛ ЭПР НОВЫХ ЦЕНТРОВ В КРЕМНИИ С КИСЛОРОДОМ

В.М.Бабич, Н.П.Баран, А.А.Бугай,
А.А.Кончиц, В.М.Максименко

В термообрабоченном кислородсодержащем кремнии при низких температурах обнаружены СВЧ-проводимость и коррелирующий с ней сигнал ЭПР новых центров. Результаты интерпретируются в модели, учитывающей образование преципитатов с дислокационными диполями и переход кислорода в узельные положения с образованием парамагнитных центров.

В настоящее время установлено, что отжиг кристаллов кремния с высоким содержанием кислорода при $T \approx 920$ К приводит к образованию термодоноров-11 (ТД-11), обусловленных SiO_x -преципитатами. При этом в запрещенной зоне возникает квазинепрерывный набор энергетических уровней с глубинами залегания $E = 0,01 - 0,3$ эВ^{–1}.

В данной работе сообщается о новых свойствах таких кристаллов, возникающих при длительных отжигах.

Методом ЭПР ($\nu_{\text{свч}} = 9,3$ ГГц) при $T = 1,8 - 40$ К изучались образцы кремния, выращенного методом Чохральского ($N_0 \approx 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$), *n*- и *p*-типа ($N_p = 5 \cdot 10^{14}$ и $N_B = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, соответственно), отожженные при $T = 920$ К в течение 20 – 200 часов. Образцы размером $3 \times 3 \times 10 \text{ мм}^3$ помещались в пучность магнитного поля цилиндрического резонатора (H_{011}).

Обнаружено, что при гелиевых температурах исследуемые образцы обладают значительной СВЧ-проводимостью, которая проявляется в уменьшении в несколько раз добротности резонатора Q . Этот эффект коррелирует с появлением новых парамагнитных центров (далее Si-2K), обладающих рядом характерных свойств. На рис. 1 показан спектр ЭПР Si-2K центров при $H \parallel [001]$, записанный на супергетеродинном спектрометре. Видно, что линии спектра узкие ($\approx 0,03$ мТ), а фаза сигнала противоположна обычно наблюдаемой в ЭПР. Измерениями при различных $T, f_{\text{мод}}, P_{\text{свч}}$, а также измерениями скорости релаксации τ_1^{-1} методом импульсного насыщения установлено, что наблюдаемая инверсия линий ЭПР спектра Si-2K центров не связана с условиями прохождения. При произвольной ориентации кристалла спектр состоит из 12 линий равной интенсивности. При вращении H в плоскости (110) спектр упрощается и его угловая зависимость имеет вид, представленный на рис. 2. Она описывается

спин-гамильтонианом C_s симметрии с $s = 1/2$ и значениями g -тензора: $g_1 = 2,0018, g_2 = 1,9980, g_3 = 2,0014$. Из рис. 2 видно, что некоторые линии наблюдаются лишь в ограниченном интервале углов. Это указывает на наличие выделенных ориентаций Si-2K центров.

При включении межзонной подсветки спектр ЭПР Si-2K центров и СВЧ-проводимость исчезают, при этом величина Q становится близкой к ее значению в отсутствие образца. Выключение подсветки приводит к восстановлению спектра ЭПР и СВЧ-проводимости со временем, зависящим от T и наличия нескомпенсированных мелких ТД-11, термически возбуждающихся при температурах измерения. В исходных образцах p -типа при $T \leq 4,2$ К восстановления не происходит.

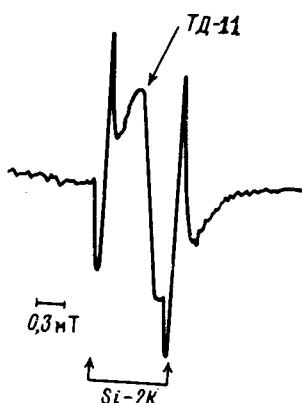


Рис. 1

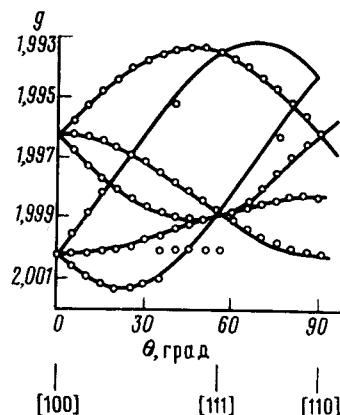


Рис. 2

Рис. 1. Спектр ЭПР Si-2K центров. Широкая линия в центре – сигнал ЭПР термодоноров-11. $H \parallel [001]$; $T_{\text{изм}} = 10$ К; $P_{\text{СВЧ}} = 10^{-7}$ Вт; $f_{\text{мод}} = 4,3$ кГц

Рис. 2. Угловая зависимость спектра ЭПР Si-2K центров. Магнитное поле вращалось в плоскости (110). $T_{\text{изм}} = 20$ К. Точки – эксперимент, сплошные линии – теоретический расчет

На основании холловских и ЭПР данных установлено, что описанным эффектам сопутствует появление в запрещенной зоне как донорных, так и акцепторных уровней. Обнаружено также, что концентрация Si-2K центров заметно возрастает при воздействии на образцы ультразвука ($f = 1$ МГц), и еще более сильно возрастает при последующем после воздействия ультразвука отжиге (≈ 3 часа) при $T \cong 1000$ К. Центры Si-2K и СВЧ-проводимость разрушаются отжигом при $T = 1150$ К за время $\sim 0,5$ часа, а также при облучении образцов электронами ($E = 1,5$ МэВ) и γ -квантами.

Полученные экспериментальные данные можно объяснить в следующей модели. Как показано в ¹, длительный отжиг при $T \cong 920$ К образцов кислородсодержащего Si приводит к появлению протяженных кислородных преципитатов с дислокационными диполями, ориентированными преимущественно вдоль направлений $\{110\}$. Можно предположить, что упругие поля дислокационных диполей способствуют встраиванию кислорода в узельные положения вблизи ядра дислокаций с образованием параметрического состояния (Si-2K центр). Уменьшение добродатности Q обусловлено нерезонансной высокочастотной проводимостью, связанной с движением захваченных на дислокационные диполи электронов аналогично тому, как это происходит в пластически деформированном кремнии ^{2, 3}. При подсветке на дислокационные диполи захватываются дырки, рекомбинирующие с электронами, уничтожая СВЧ-проводимость. Исчезновение спектра ЭПР Si-2K центров при подсветке происходит либо вследствие их перезарядки, либо вследствие того, что без подсветки мы наблюдаем сигнал спин-зависимой проводимости, который исчезает вместе с разрушением СВЧ-проводимости.

Воздействие ультразвука на кристалл увеличивает длину некоторых дислокационных диполей, а последующий отжиг (1 – 3 часа) при 1000 К приводит к увеличению числа кисло-

родных центров замещения, т.е. к росту концентрации парамагнитных центров. Электронное и γ -облучение, а также отжиг при $T \cong 1150$ К разрушают дислокационные диполи, что приводит к исчезновению спектра ЭПР и СВЧ-проводимости.

Следует отметить, что наблюдаемая нами противоположная фаза сигналов ЭПР Si-2K центров может быть связана как с инверсией населенностей в спиновой системе парамагнитных центров из-за взаимодействия их с носителями тока ⁴, с эффектами спин-зависимой проводимости ³, либо с проявлением комбинированного резонанса электронов в квазидимерной системе аналогично тому, как это было обнаружено в пластически деформированном кремнии ⁵.

Над выяснением этих вопросов авторы работают в настоящее время.

Авторы благодарят Б.Д.Шанину и В.Г.Грачева за полезные замечания и обсуждение результатов.

Литература

1. Bourret A. Proc. 13-th Int. Conf. on Defects in Semicond., Coronado, California, 1984, p. 129.
2. Кведер В.В., Осипьян Ю.А., Шалыгин А.И. Письма в ЖЭТФ, 1984, 40, 10.
3. Кведер В.В., Осипьян Ю.А., Шалыгин А.И. ЖЭТФ, 1985, 88, 309.
4. Кончиц А.А., Зарецкий И.М., Семенов Ю.Г., Шанина Б.Д., Вихнин В.С., Круликовский Б.К. Письма в ЖЭТФ, 1980, 31, 56.
5. Кведер В.В., Кравченко В.Я., Мчелидзе Т.Р., Осипьян Ю.А., Хмельницкий Д.Е., Шалыгин А.И. Письма в ЖЭТФ, 1986, 43, 202.



Поступила в редакцию
31 июля 1986 г.

После переработки
14 октября 1986 г.