

ЦЕНТРЫ ДИЛАТАЦИИ В ОБЛУЧЕННОМ ЭЛЕКТРОНАМИ КРЕМНИИ

В. Е. Кустов, А. Б. Ройцин, Н. А. Трипачко, В. И. Шаховцов

Институт физики Академии наук Украины,

252650, Киев, Украина

(Получена 4.03.1992. Принята к печати 27.05.1992)

Показано, что ширина линии ЭПР Fe^0 в облученном электронами с энергией 4 МэВ монокристаллическом кремнии определяется суперпозицией упругого и электрополевого неоднородных уширений. Проведенный расчет позволил выделить упругое уширение, на основании которого определена дозовая зависимость плотности деформационных зарядов вторичных радиационных дефектов. Приведенные оценки свидетельствуют об аннигиляции подавляющего большинства компонент пар Френкеля. Количество вторичных радиационных дефектов, которые выступают как центры дилатации, зависит от температуры облучения и концентрации кислорода в образцах.

Только небольшая часть первичных радиационных дефектов (РД) в кремнии (вакансий и междоузлий) участвует в образовании электрически-, оптически- и парамагнитно-активных дефектов [1]. Судьба остальных первичных РД недостаточно ясна. Большинство авторов считают, что большинство первичных РД аннигилирует, однако доказательств такой интенсивной аннигиляции недостаточно. Можно предположить, что часть первичных РД образует неактивные вторичные дефекты. Эти дефекты могут не проявлять себя в электрофизических и резонансных экспериментах, но обязаны выступать как центры дилатации. Однако прямые оптические измерения изменения длины монокристалла [2] и рентгеновские измерения параметра решетки [3] показали, что электронное облучение не приводит к заметному изменению объема монокристалла кремния. Если не принимать во внимание возможную аннигиляцию большинства первичных РД, то данный экспериментальный факт может быть связан с тем, что возникающие радиационные центры дилатации имеют противоположные по знаку, но близкие по величине деформационные заряды (ДЗ). При близких концентрациях таких центров с разным знаком ДЗ средний параметр решетки кремния может не измениться.

Метод парамагнитных тензозондов [4], основанный на изучении неоднородного уширения линии ЭПР специально введенного глубокого центра, позволяет в отличие от рентгеновского метода определять модуль плотности ДЗ. Таким образом этот метод может быть использован в случае центров дилатации с разным знаком ДЗ [5]. В настоящей работе данный метод применялся для оценки концентрации радиационных центров дилатации в кремнии, облученном электронами с энергией 4 МэВ.

Исследовались образцы промышленного бездислокационного монокристаллического кремния с различной концентрацией кислорода и содержанием мелких примесей не более $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Концентрация углерода составляла $(2 \div 5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. В качестве тензозонда использовалось междоузельное железо (Fe^0). Особенности введения и наблюдения этого парамагнитного тензозонда описаны в работе [6].

Перед облучением проводилось измерение угловой зависимости ширины от пика до пика (ΔH_{pp}) первой производной линии ЭПР при вращении магнитного поля в плоскости (110) при температуре 30 К. В исходных образцах ни ширина, ни интенсивность линии ЭПР не зависели от освещения белым светом. Облучение проводилось при температурах 85 ± 3 и 275 ± 5 К. После набора определенной дозы при температуре 85 К образцы без отогрева переносились в криостат ЭПР спектрометра и проводилось повторное измерение угловой зависимости ΔH_{pp} при температуре 30 К. После облучения наблюдалось значительное увеличение ΔH_{pp} (рис. 1). Отогрев образца при комнатной температуре в течение нескольких минут приводит к уменьшению уширения (рис. 1). Было обнаружено, что отжиг образцов, облученных при 85 К, приводит к тому же уширению линии ЭПР, какое наблюдается в случае аналогичного облучения при 273 К. Вызванное электронным облучением дополнительное уширение δH_{pp} росло с ростом концентрации кислорода. Во всех облученных образцах освещение белым светом приводило к росту δH при соответствующем уменьшении интенсивности линии ЭПР.

После облучения электронами существенно искажилась характерная для упругого неоднородного уширения угловая зависимость δH [4, 6]. Форма линии ЭПР Fe⁰ в облученных образцах кремния отличается от лоренцевой, приближаясь к форме Хольцмарка [7], особенно при направлении магнитного поля H вдоль оси [111] и при освещении образцов белым светом.

Приведенные экспериментальные факты позволяют утверждать, что в облученном электронами кремнии мы наблюдаем суперпозицию упругого и электрополевого неоднородных уширений линии ЭПР. Упругое неоднородное уширение

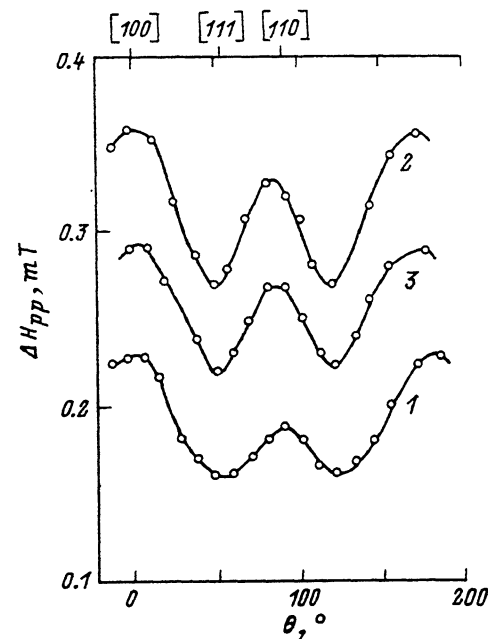


Рис. 1. Угловая зависимость ширины первой производной линии ЭПР Fe⁰ в кремнии при вращении магнитного поля в плоскости (110) для образца с концентрацией кислорода $N_O = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. 1 — до облучения, 2 — после облучения при 85 К дозой $\Phi = 4.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, 3 — после отогрева при 20 °С в течение 5 мин.

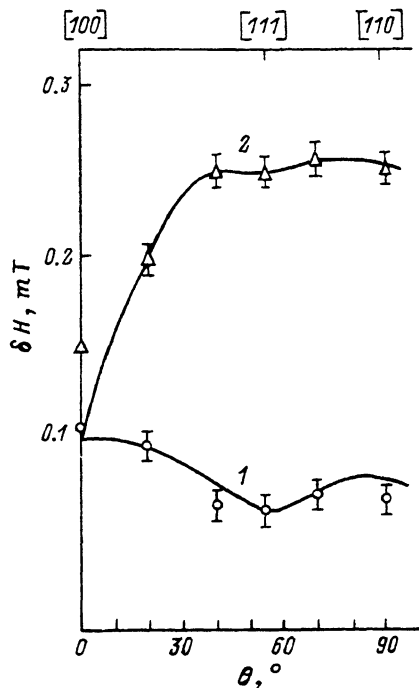


Рис. 2. Угловая зависимость неоднородного уширения линии ЭПР Fe⁰, возникающего в результате облучения при 0 °С образца с концентрацией кислорода $N_O = 1.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ дозой $\Phi = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. 1 — измерение при 30 К в темноте, 2 — влияние освещения белым светом.

(δH_b) линии ЭПР данного тензозонда в кремнии с точечными центрами дилатации рассмотрено в работах [4, 6], где показано, что угловая зависимость δH_b при вращении магнитного поля в плоскости $\langle 110 \rangle$ имеет вид

$$\delta H_b = \frac{2\sqrt{7}}{5} \frac{\pi^2}{g\beta} G_{11} \sum_{i=1}^{\infty} n_i |A_i| \left\{ 1 - 3 \sin^2 \theta \left(1 - \frac{3}{4} \sin^2 \theta \right) \left[1 - \left(\frac{4}{3} \frac{G_{44}}{G_{11}} \right)^2 \right] \right\}, \quad (1)$$

где G_{11} и G_{44} — спин-фононные константы Fe^0 ; β — магнетон Бора; $g = 2.070$; θ — угол между осью $[100]$ и направлением магнитного поля; n_i — концентрация i -дефекта; A_i — его деформационный заряд, который линейно связан с изменением объема кристалла при введении одного данного дефекта [6]. При ориентации магнитного поля вдоль оси $[100]$ наблюдается максимальное упругое неоднородное уширение:

$$\delta H_b^m = 0.25 \cdot 10^{-7} \sum_{i=1}^{\infty} n_i |A_i|, \text{ мТ.} \quad (2)$$

Неоднородное уширение линии ЭПР электрическими полями заряженных точечных дефектов в общем виде рассмотрено в работе [7]. Расчет для нашего конкретного случая показал, что при вращении магнитного поля в плоскости $\langle 110 \rangle$ электрополевое неоднородное уширение представляется в следующем виде:

$$\delta H_{ef} = 3.15 n^{2/3} \frac{ZeE}{\epsilon g\beta} \sin \theta \sqrt{4 - 3 \sin^2 \theta}, \quad (3)$$

где n — концентрация заряженных точечных дефектов, Ze — заряд дефекта (e — заряд электрона), ϵ — диэлектрическая проницаемость кремния, $E = 5 \cdot 10^{-8} \text{ В}^{-1}$ [8] — электрополевая константа Fe^0 в кремнии. При ориентации магнитного поля вдоль оси $[100]$ $\delta H_{ef} = 0$, а при ориентации вдоль оси $[111]$ эффект максимален:

$$\delta H_{ef} = 2 \cdot 10^{-12} Z \cdot n^{2/3}, \text{ мТ.} \quad (4)$$

Проведенный расчет позволяет в принципе разделить электрополевой и упругий вклады в неоднородное уширение линии ЭПР. Такая попытка представлена на рис. 2, однако в этом случае присутствует некоторая погрешность, связанная с заменой свертки линий лоренцевой формы (упругое уширение) и формы Хольцмарка (электрополевое уширение) простым суммированием их ширин. Так, сплошная линия на рис. 2 проведена как результат суперпозиции упругого неоднородного уширения при плотности ДЗ радиационных дефектов $\sum n_i |A_i| = 2.5 \cdot 10^{-7}$ и электрополевого неоднородного уширения, которое возникает при концентрации заряженных точечных дефектов $Zn = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Сплошная линия 2 является результатом возрастания после освещения белым светом концентрации заряженных дефектов до $Zn = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при том же упругом уширении. При ориентации магнитного поля вдоль оси $[100]$ в соответствии с расчетом (3) δH определяется только по формуле (2). В этом случае можно построить дозовую зависимость суммарной плотности модуля ДЗ всех центров дилатации (рис. 3). Для определения дозовой зависимости суммарной концентрации радиационных центров дилатации необходимо знание их деформационных зарядов. Примем средний ДЗ такого центра дилатации $|A| = 1 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$, что близко к теоретическим [9] и экспериментальным [10] оценкам ДЗ вакансии и междоузлия в кремнии. Тогда из рис. 3 можно определить суммарную концентрацию данных центров дилатации. Если считать, что каждый падающий на образец электрон с энергией 4 МэВ на единице длины рождает семь пар Френкеля

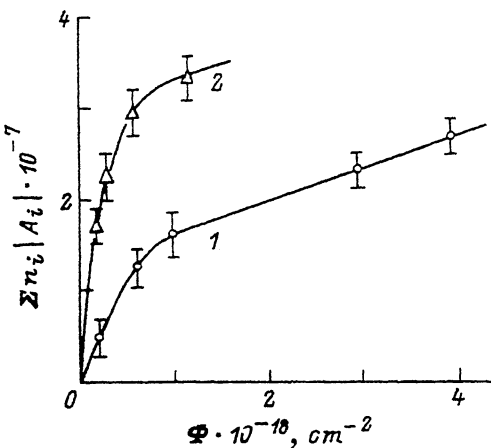


Рис. 3. Зависимость суммарной плотности деформационных зарядов радиационных дефектов в кремнии с различной концентрацией кислорода от дозы облучения электронами при температуре 0°C . N_0 см $^{-3}$: 1 — $6 \cdot 10^{16}$, 2 — $1.2 \cdot 10^{18}$.

(14 первичных РД) [11], то в области доз облучения $\Phi < 1 \cdot 10^{18}$ см $^{-2}$ в кремнии с малой концентрацией кислорода аннигилирует 98—99% первичных РД, а в материале с концентрацией кислорода $N_0 = 1.2 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ — 96—97% первичных РД. При увеличении дозы облучения доля выживших вторичных РД уменьшается. При облучении в области температур 85 К

выживает первичных радиационных дефектов в 2÷3 раза больше, что может быть связано с образованием при низкотемпературном облучении термически нестабильных вторичных РД.

Таким образом, после облучения монокристаллического кремния электронами наблюдаются электрополевое и упругое неоднородное уширение линии ЭПР Fe 0 . Проведенный расчет позволяет на основании этого уширения оценить концентрацию центров дилатации в облученном кремнии. Оказалось, что при комнатной температуре при дозе $\Phi < 1 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ количество радиационных центров дилатации составляет незначительную часть от числа первичных радиационных дефектов: это 1÷2 в бескислородном кремнии и 3÷4% в кремнии с высоким содержанием кислорода ($N_0 = 1.2 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$). Данный результат подтверждает предположение о рекомбинации основной части первичных радиационных дефектов в кремнии.

Полученная нелинейная дозовая зависимость суммарной плотности деформационных зарядов радиационных дефектов и уменьшение процента выживших дефектов при росте дозы, по-видимому, являются следствием не прямой аннигиляции первичных дефектов на различных радиационных центрах дилатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. Л. Винецкий, Г. А. Холодарь. Радиационная физика полупроводников. Киев (1979).
- [2] F. L. Vook. Phys. Rev., 125, 855 (1962).
- [3] F. L. Vook. Proc. VII Int. conf. on the physics of semiconductors, 51. Dunod, Paris (1965).
- [4] А. А. Бугай, В. Е. Кустов, Ю. Г. Семенов, В. И. Шаховцов, В. Л. Шиндич. ФТТ, 27, 1824 (1985).
- [5] В. Е. Кустов, В. И. Шаховцов. Всес. конф. «Физические методы исследования и диагностика материалов и элементов вычислительной техники», 160. Кишинев (1986).
- [6] В. Е. Кустов, М. Г. Мильвидский, Ю. Г. Семенов, Б. М. Туровский, В. И. Шаховцов, В. Л. Шиндич. ФТП, 20, 270 (1986).
- [7] В. Б. Мимс. Электро-полевой эффект в парамагнитном резонансе, 224. Киев (1982).
- [8] G. W. Ludwig, F. S. Ham. Proc. I. Int. Conf., 2, 620. Jerusalem (1962).
- [9] F. P. Larkins, A. M. Stoneham. J. Phys. C., 4, 154 (1971).
- [10] W. Mayer., H. Peisl. J. Nucl. Mater., 108, 627 (1982).
- [11] В. С. Вавилов. Действие излучений на полупроводники, 264. М. (1963).