

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ В ИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ СЛОЯХ Si(Tl)

Д.И. Пискунов

УДК 539.219.22

Методами электронной микроскопии изучены особенности процессов распада в пересыщенном твердом растворе Si(Tl). Показано, что при отжиге кристаллов Si, ионно-легированных Tl, происходит образование преципитатов. Предложен возможный механизм их образования.

Создание слоев кремния, легированных таллием, актуально для ряда задач, однако решению проблемы препятствует низкая ($\approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) растворимость таллия в кремнии. Одним из путей решения проблемы является создание пересыщенных твердых растворов с помощью внедрения ионов и последующего термического, либо импульсного лазерного отжига, но выбор оптимальных режимов ионного легирования затруднен из-за неизученности закономерностей процессов преципитации в пересыщенных растворах таллия в кремнии. Следует также ожидать, что эти процессы в ионно-легированных слоях будут иметь свои особенности, обусловленные высокой концентрацией точечных несовершенств и их неоднородным распределением по толщине активизируемого слоя.

В настоящей работе изучались закономерности процесса преципитации в слоях кремния, имплантированных дозой $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ Tl}^+$ с энергией 1,0 МэВ и отжигавшихся при 1473 К. Структурные исследования проводились методом электронной микроскопии "на просвет". Распределение таллия по глубине и концентрация прочих примесей изучались методом масс-спектрометрии вторичных ионов.

Распределение таллия имело максимум $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ на глубине 500 нм. Суммарная концентрация прочих примесей на глубине максимума не превышала $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. В ионно-легированном слое обнаружены преципитаты трех типов: малые (размерами $\leq 30 \text{ нм}$) на глубинах $< R_p$ (R_p — средний проецированный пробег ионов Tl^+ с энергией 1,0 МэВ), не вызывавшие возникновения упругих деформаций в окружающей матрице (что проявлялось в отсутствие деформационного контраста на электронных микрофотогра-

фиях), крупные (размерами до 1 мкм), локализованные на глубинах, соответствующих максимуму распределения таллия; малые (размерами < 30 нм), обладающие контрастом Эшби – Брауна [1] (который свидетельствует о наличии в окружающей матрице полей упругих деформаций) на глубинах $\gg R_p$. Общее число атомов в преципитатах коррелировало с числом атомов Tl в слое и существенно превышало число прочих атомов. Следовательно, указанные преципитаты связаны с распадом пересыщенного раствора таллия в кремнии.

Крупные преципитаты представляли собой композиции из шести лучей, ориентированных вдоль направлений $(311)_{Si}$, выходящих из одного центра. В центрах наблюдались дислокационные сетки. Наряду с первичным центром образование могло содержать вторичные на одном из лучей. Вторичные центры также генерировали лучи, однако протяженность лучей, связанных со вторичными центрами, была много меньше протяженности первичных. Микроэлектронограммы от крупных выделений отвечали кубической фазе с постоянной решетки $7,748 \text{ \AA}$, что соответствует удвоенному периоду $\beta-Tl$. На электронограммах присутствовали запрещенные отражения типа $1/2, 1/2, 1/2$ (в решетке $\beta-Tl$), которые не объяснялись кривизной сферы отражения, двойной дифракцией, двойникованием $2/2$. Для этих выделений плоскость $(110)_{Tl}$ параллельна $(001)_{Si}$ и направления $[001]_{Tl}$ или $[110]_{Tl}$ параллельны $(001)_{Si}$. Характер сопряжения подтверждается при изучении муаровой осцилляции на микрофотографиях выделений.

Малые преципитаты наблюдались при тех же дифракционных условиях, что и крупные. Некогерентные выделения (не вызывающие напряжений в окружающей матрице) имели форму кубооктаэдра. Идентичность их структуры кристаллической структуре крупных выделений доказана с помощью муаровых изображений, сформированных парами рефлексов, принадлежащих разным сечениям обратной решетки. Форма некогерентных преципитатов обычно искажалась порой, занимавшей $\approx 6\%$ объема. Некогерентные преципитаты имели те же ориентационные соотношения с решеткой матрицы, что и крупные выделения.

Можно предположить следующую последовательность стадий распада. При температуре отжига таллий существует в жидкой фазе, поэтому его преципитаты представляют собой капли. Формирование капельных преципитатов по-разному протекает в приповерхностных и глубинных слоях. Приповерхностный объем содержит неравновесные вакансии, которые, по-видимому, играют существенную роль в процессе распада. В глубинных слоях велика роль межузельной компоненты. Преципитация в приповерхностной области связана с формированием пор, заполняемых атомами таллия. Огранка

пор определяется минимумом поверхностной энергии матрицы. Аналогичную форму кубооктаэдра имеют и другие выделения в кремнии, например, аморфные включения SiO_2 . Пересыщение приповерхностного объема вакансиями облегчает зарождение в нем преципитатов, а в дальнейшем способствует тому, что их рост происходит без возникновения напряжений, связанных с несовпадением параметров решетки матрицы и выделений. Напротив, рост преципитатов в глубинных слоях связан с упругими напряжениями, проявляющимся в возникновении контраста Эшби — Брауна. Об отсутствии напряжений несоответствия для приповерхностных областей свидетельствуют также рентгеновские данные. Границей между указанными зонами распада является, по-видимому, слой, соответствующий максимуму распределения примеси. В этой области зарождение преципитатов происходит через формирование некогерентных кубооктаэдров, однако концентрация вакансий не может обеспечить их роста, поэтому дальнейший рост преципитатов протекает через образование игл (лучей), что обеспечивает оптимальное сопряжение решеток преципитата и матрицы вдоль направлений $\langle 211 \rangle_{\text{Tl}}$, параллельных $\langle 311 \rangle_{\text{Si}}$.

При охлаждении до 576 К таллий кристаллизуется эпитаксиально, зарождаясь на фасетках $\{001\}_{\text{Si}}$. Уменьшение объема при охлаждении и кристаллизации способствует формированию поры. Растворенные в жидкой фазе атомы Si встраиваются в решетку Tl, вызывая запрещенные рефлекссы.

Московский институт электронной техники
Поступила в редакцию 9 июля 1985 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эшби М., Браун Л. В кн. "Прямые методы исследования дефектов в кристаллах", М., Мир, 1965, с. 89, 109.
2. Хирш П и др. Электронная микроскопия тонких кристаллов. М., Мир, 1968.