

ЗАХВАТ ЖИДКИХ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ ДВИЖУЩИМИСЯ ДЕФЕКТАМИ УПАКОВКИ

В.Н.Лозовский, Г.С.Константинова, С.В.Лозовский

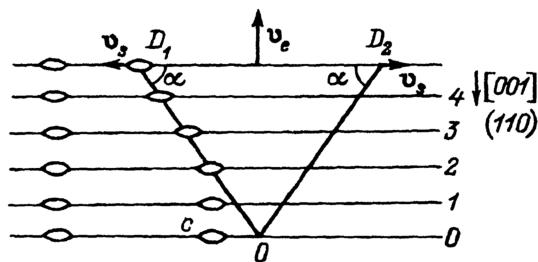
Новочеркасский государственный технический университет,
346400, Новочеркасск, Россия
(Поступило в Редакцию 9 ноября 1994 г.)

Обнаружен и количественно оценен эффект взаимодействия жидких микровключений с дефектами упаковки в кристалле Si. Эффект состоит в захвате микровключений дефектами упаковки, перемещающимися по поверхности растущего эпитаксиально слоя Si.

Эпислой выращивались из паровой фазы сэндвич-методом. Между плоскопараллельными источником и подложкой диаметром 50–70 мм, разделенных вакуумным промежутком толщиной 0.1 мм, создавалась разность температур 70°C при температуре подложки 1300°C. Разность давлений насыщенных паров Si у подложки и источника служила движущей силой роста. На начальной стадии процесса на поверхность подложки напылялся тонкий слой металла. Создавалась пленка жидкого раствора в расплаве, которая под действием сил поверхностного натяжения распадалась на капли радиусом 0.5–1.5 мкм. Плотность капель составляла $10^5 - 10^6 \text{ см}^{-2}$. Исследования показали, что части застывших капель, расположенные выше фронта кристаллизации, имели вид сферических сегментов с отношением высоты к диаметру 1:5. По данным рентгеновского микроанализа состав капель: Si, Fe, Cr и Ni в отношении 93.5:5.1:0.6:0.8. Одновременно на начальной стадии в эпислое зарождались дефекты упаковки, плотность которых зависела от вакуумных условий. В дальнейшем процессе роста эпислоя образования новых капель и дефектов упаковки не происходило.

В установившемся режиме растущая поверхность подложки перемещалась вертикально со скоростью $v_e = 2 \text{ мкм/ч}$ (рис. 1). Одновременно в жидких каплях шел процесс кристаллизации по механизму пар-жидкость-кристалл. Поскольку в данных условиях коэффициент конденсации из паровой фазы был близок к 1 и для поверхности кристалла, и для поверхности капель, то последние перемещались вертикально синхронно с растущим фронтом.

Дефекты упаковки (ДУ) растут вдоль плоскостей $\{111\}$, пересекая ростовую поверхность по направлениям $\langle 110 \rangle$. Например, на фронте (001) ДУ образуют квадрат (рис. 2). Так как плоскости $\{111\}$ составляют угол $\alpha = 54.75^\circ$ с плоскостью (001), то по мере роста эпислоя ДУ перемещаются по его поверхности со скоростью $v_s = v_e \text{ ctg } \alpha = 14 \text{ мкм/ч}$ (рис. 1) и площадь квадрата увеличивается. Обнаружено, что, если при перемещении ДУ сталкиваются с жидкими каплями, они увлекают капли за собой (рис. 1). Так как капли и ДУ формируются только на начальной стадии роста, то внутренняя область ДУ оказывается свободной от капель (рис. 2). Повышенная концентрация капель на границах слева объясняется тем, что капли мигрировали по поверхности эпислоя под действием небольшого тангенциального градиента



температуры, направленного приблизительно по диагонали квадратов слева направо.

Таким образом, в отсутствие тангенциального градиента температуры капли участвуют в двух независимых взаимно перпендикулярных движениях: вертикальном — под действием силы пересыщения в паровой фазе и горизонтальном — увлекаемые силой поверхностного натяжения ДУ. Синхронность вертикального перемещения капель и поверхности эпислоя при захвате капель сохраняется.

Ранее наблюдались и исследовались явления увлечения микровключений (пор, включений второй фазы, жидких и твердых частиц окислов) движущимися границами зерен в объеме металлов. Эти явления играют большую роль в процессах рекристаллизации, спекания, ползучести [1]. В указанных процессах перемещения границ зерен обусловлены движущими силами, создаваемыми различием механических напряжений или лапласовых давлений в смежных зернах. Движущую силу для перемещения включений дают и поверхностное натяжение границ, и указанные различия в смежных зернах. В зависимости от соотношения движущей силы перемещения границы и силы поверхностного натяжения, увлекающей включения, последние могут тормозить и даже стопорить движение границ. Сложность и непостоянство формы и структуры границ, а также условий взаимодействия границ и включений затрудняют количественное описание в реальных поликристаллах.

В нашем случае горизонтальное перемещение ДУ обусловлено не движущими силами, а геометрическими условиями (поэтому формы квадратов на рис. 2 не искажены, несмотря на значительное различие захваченных капель на сторонах). Форма и структура ДУ просты и постоянны, области кристалла по разные стороны ДУ физически идентичны. Единственная движущая сила горизонтального перемещения капель — поверхностное натяжение ДУ. Простота и определенность условий позволяют оценить эту движущую силу. Для оцен-

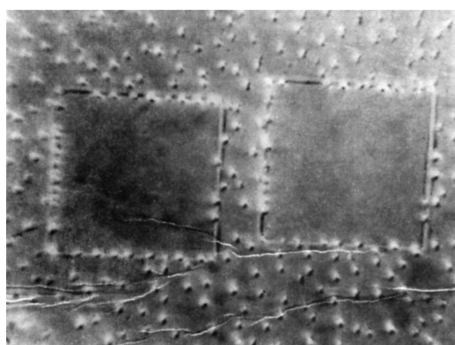


Рис. 2. Дефектов упаковки с захваченными каплями на фронте кристаллизации (001). Увеличение $\times 490$.

ки используется значение удельной поверхностной энергии ДУ {111} в Si, $\sigma = 50$ эрг/см² из работы [2] и полученную величину сравним с движущей силой термомиграции капель в этих же условиях.

Для сравнения движущих сил различной природы в качестве меры движущей силы удобно взять разность химических потенциалов $\Delta\mu$ атомов Si в двух твердых фазах, граничащих с каплей (область кристалла, разделенных плоскостью, проходящей через центр капли и перпендикулярной движению капли). Когда одна из твердых фаз содержит ДУ, $\Delta\mu$ можно определить из условия равенства градиента μ в капле и силы поверхностного натяжения, действующей со стороны ДУ на каплю, отнесенной к одному молю Si в жидкой фазе. Величина $\Delta\mu$ обратно пропорциональна радиусу капли и зависит от положения ДУ: $\Delta\mu = 0$, если ДУ проходит через центр капли, и $\Delta\mu = \Delta\mu_{\max}$, если ДУ касается капли. В предположении, что объемы частей капли выше и ниже фронта эпислоя равны, для среднего радиуса капли $r = 1$ мкм получим $\Delta\mu_{\max} = 76 \cdot 10^5$ эрг/моль.

Термомиграция капель по поверхности эпислоя происходит при различии температур в центре и на периферии подложки. При среднем значении тангенциального градиента температуры $G = 25$ град/см скорости термомиграции v_T лежали в диапазоне 60–120 мкм/ч. Градиент температуры G создает перепад химического потенциала на капле $\Delta\mu_T = RT \frac{\Delta C}{C}$, где R — газовая постоянная, T — абсолютная температура,

$$\Delta C = \frac{dC}{dT} G \cdot 2r$$

— перепад равновесной растворимости C кремния в жидкой фазе, dC/dT — наклон линии ликвидуса ($dC/dT \sim 10^{-3}$ град⁻¹ для систем кремний–металл при 1300°C).

Для $r = 1$ мкм, $C = 0.93$ получим $\Delta\mu_T = 7 \cdot 10^5$ эрг/моль.

Сравнение $\Delta\mu_T$ и $\Delta\mu_{\max}$, v_T и v_s показывает, что сила поверхностного натяжения ДУ достаточна для сообщения каплям скорости на 1.5–2 порядка больше наблюдаемой. Взаимодействие микрокапель с ДУ является сильным, несмотря на малую величину энергии дефекта (энергия ДУ одного порядка с энергией двойниковых границ; для границ зерен в металлах $\sigma \sim 10^3$ эрг/см² [1]). Перемещаясь за ДУ, капля имеет большой запас движущей силы. Наличие запаса $\Delta\mu$ подтверждается тем, что при противоположных направлениях G и v_s отрыва капель не было.

Особенность описанного эффекта — возможность визуального наблюдения. Оценка эффекта показывает возможность обнаруживать на поверхности полупроводников двойниковые границы, микродвойниковые дефекты, границы блоков, области напряжений и т.п., а также определять энергию этих дефектов по захвату и отрыву движущихся микрокапель.

Список литературы

- [1] Гегузин Я.Е., Кривоглаз М.А. Движение макроскопических включений в твердых телах. М.: Металлургия, 1971. 344 с.
- [2] Aerts E., Delavionette P., Siems R., Amelinkx S. // J. Appl. Phys. 1962. Vol. 33. N 10. P. 3078–3080.