

Об.2; 12

© 1990

ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ  
ПОДЛОЖКИ В ЗАТРАВОЧНЫХ ОКНАХ  
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СЛОЕВ КРЕМНИЯ  
НА ИЗОЛЯТОРЕ ИМПУЛЬСНЫМ НАГРЕВОМ

С.Н. Коляденко, А.В. Двуреченский,  
В.Ю. Баландин, С.П. Верходанов,  
Л.В. Мишина, О.А. Кулясова

Один из способов формирования структур кремний-на-изоляторе (КНИ) заключается в перекристаллизации исходного слоя поликремния с использованием импульсного нагрева [1]. Ориентация и структурное совершенство слоев КНИ в данной технологии задается с помощью затравливания от монокристаллической матрицы через окна в разделительном диэлектрике. Известно, что для воспроизводимого и контролируемого роста пленки кремния в структурах с затравкой необходимо обеспечить как полное плавление слоя исходного поликремния, так и небольшое подплавление монокристалла подложки.

Целью настоящей работы являлось исследование особенностей плавления монокристаллической подложки в области затравки в процессе перекристаллизации с использованием импульсного нагрева.

Эксперименты проводились на структурах, приготовленных следующим образом. На поверхность стандартной пластины кремния с ориентацией поверхности (100) наносился слой  $SiO_2$  толщиной 0.5 мкм. Затем в диэлектрике создавались окна шириной два, пять, и 50 мкм и длиной 10 000 мкм, далее наносился слой поликремния толщиной 1.0 мкм. Поликристаллический кремний легировался примесью В и Р для подложек  $n$ - или  $p$ -типа проводимости соответственно.

Нагрев и плавление поликристаллического кремния в структурах осуществлялся импульсом света, генерируемым ксеноновыми лампами, длительностью 20 мс на уровне мощности 0.1  $P_{max}$  ( $P_{max}$  - максимальная мощность излучения, составляющая  $\sim 4000$  Вт/см<sup>2</sup>). Предварительный подогрев образцов составлял 1000-1100 °С.

Для выявления формы  $p$ - $n$ -перехода, образовавшегося во время перекристаллизации в затравочных областях, последовательно удалялись слои перекристаллизованного кремния и слой разделительного диэлектрика, а освободившуюся поверхность подложки обрабатывали в травителе на основе плавиковой, азотной и уксусной кислот. Проникновение примеси в глубь подложки изучалось с использованием косых шлифов с углом наклона 3°.

Исследование перераспределения примеси из легированного слоя поликремния позволило выявить ряд особенностей плавления моно-

кристаллической подложки в окнах разделительного диэлектрика. Эксперименты показали, что плавление начинается в отдельных точках поверхности затравки. Это, по-видимому, связано с существованием в кристалле областей, имеющих более низкую температуру плавления [2]. На последующих стадиях характер продвижения фронта плавления (ФП) определяется ориентацией затравочного окна в диэлектрике относительно кристаллографического направления  $\langle 110 \rangle$  монокристаллической подложки.

Если стороны затравок параллельны указанным направлениям, фронт плавления от отдельной точки плавления распространяется преимущественно вдоль окна в разделительном диэлектрике до соединения с ФП от соседней точки плавления. При этом продвижение ФП в перпендикулярном направлении, то есть под разделительный диэлектрик, незначительно (при оптимальной для процесса перекристаллизации плотности энергии).

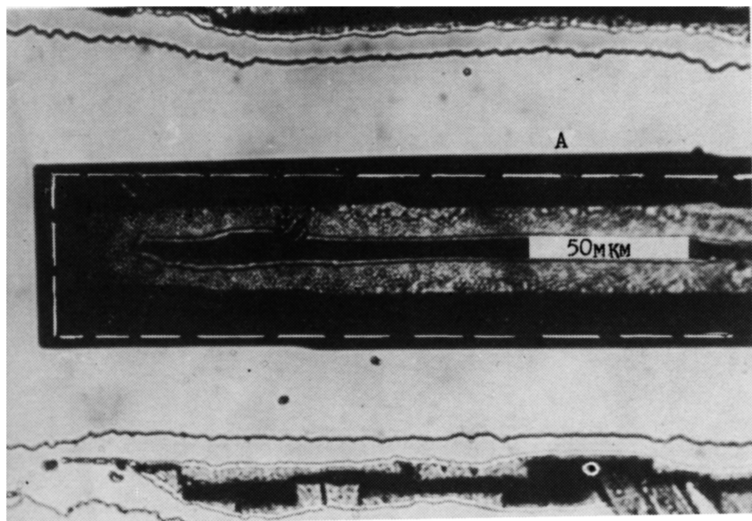
Отклонение ориентации сторон затравок от направления типа  $\langle 110 \rangle$  приводит к образованию на фронте плавления макроступеней, возникающих в месте соединения ФП от соседних точек, инициирующих начало плавления (рис. 1).

Плавление монокристаллической подложки в области затравки не ограничивается только приповерхностной областью, а распространяется в объем монокристалла на несколько микрометров (рис. 2). При этом, как и в случае плавления чистой поверхности кремния, фронт плавления ограничивается плотно упакованными плоскостями типа  $\{111\}$  [3].

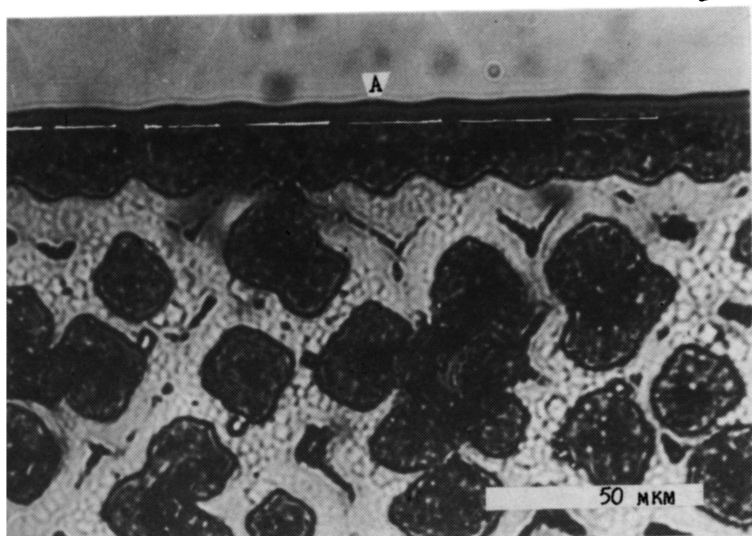
На характер плавления подложки оказывает влияние не только ориентация затравки, но и ее геометрия. Так, плавление прежде всего начинается на концах затравочных окон, о чем свидетельствует большая глубина проплавления в этой части затравочных областей.

Важно отметить и тот факт, что если в узких затравках (шириной меньше 5 мкм) плавление охватывает всю поверхность монокристалла, то в широких ( $\sim 50$  и более мкм) плавится только часть поверхности вдоль сторон окон в разделительном диэлектрике (рис. 1). При этом фронт плавления, как видно из рис. 1, продвигается под  $SiO_2$  на расстояние заметно меньшее, чем к центру затравки. Оказалось также, что форма ФП движущихся в противоположных направлениях, различна.

Обнаруженные особенности плавления монокристалла вблизи края затравочного окна в разделительном диэлектрике обусловлены, по-видимому, распределением температуры в кристаллической подложке. Как следует из расчетов, наибольшее значение температуры должно быть в центре затравки, а наименьшее — в центре области под  $SiO_2$ . Таким образом, фронт плавления, продвигаясь под разделительным диэлектриком, перемещается в более холодную область и возникающие (или имеющиеся) на нем случайные выступы будут иметь меньшую скорость плавления по сравнению с соседними участками, что должно приводить к выравниванию ФП. Напротив, фронт плавления, движущийся в противоположную сторону, продвига-

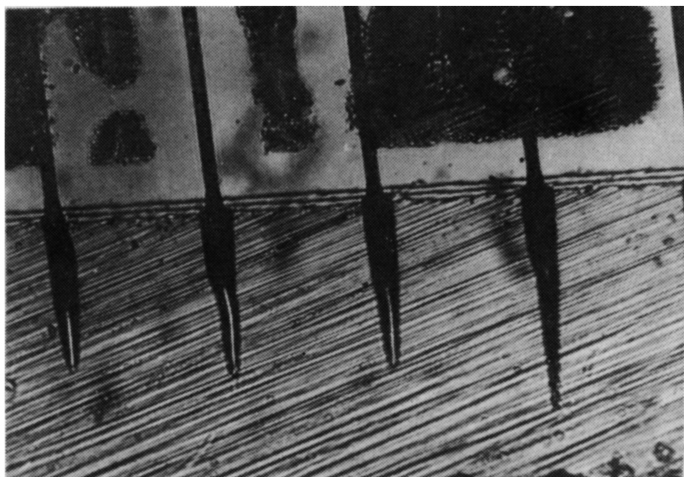


а

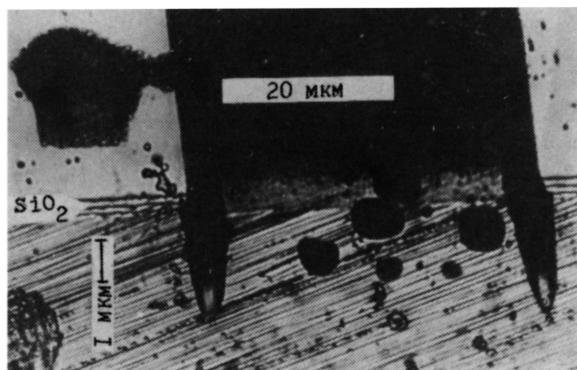


б

Рис. 1. Микрофотография участка поверхности подложки с окрашенным р-п-переходом (А), образовавшимся в процессе перекристаллизации пленки КНИ в затравках шириной более 50 мкм. Пунктирная линия обозначает положение края окна в  $SiO_2$  в исходной структуре. Разориентация сторон затравок относительно направлений типа  $\langle 110 \rangle$  подложки: а)  $-1.5^\circ$ , б)  $-36^\circ$ . В центральной части рис. 1, б наблюдаются следы локального плавления.



*a*



*б*

Рис. 2. Микрофотография участка косо шлифа с окрашенным р-переходом в подложке. а) Окна в  $SiO_2$  имеют ширину 2 мкм. Более глубокое проплавление соответствует участку, расположенному ближе к концу затравочной области. б) Плавление вдоль краев затравки шириной 50 мкм.

ется в более нагретую область и вершины выступов, возникающие (или уже существующие) на ФП, имеют большую скорость по сравнению с соседними участками, что вероятно приводит к образованию ячеистой структуры фазовой границы. Аналогичные явления наблюдаются и при росте кристаллов [4].

Исходя из изложенных фактов асимметрии формы плавления в исследуемых экспериментальных условиях, возможны следующие

ситуации: либо плавление у края затравки начинается при равновесной температуре плавления ( $T_0$ ) и в центре широкой затравки кристалл перегрет, либо в центре окна кристалл находится вблизи  $T_0$  (о чем свидетельствуют области локального плавления на рис. 1, б), и плавление кремния начинается при температуре ниже  $T_0$ . Известно [5], что деформация повышает свободную энергию кристалла, что может снижать температуру плавления.

На основании экспериментальных данных и оценок в распределении температурных полей мы предположили, что начало плавления  $Si$  вблизи краев затравки связано с понижением температуры плавления в этих областях вследствие механических напряжений, возникающих во время нагрева структуры.

Для анализа величины возможного изменения температуры плавления ( $\Delta T$ ) были проведены расчеты механических напряжений в используемых экспериментальных структурах в приближении однородного нагрева до температуры 1680 К. Такое приближение оправдано, поскольку, согласно оценкам, при длительности нагревающего импульса больше 10 мс разница температуры между освещаемой и неосвещаемой сторонами структуры составляет приблизительно 10 К.

Результаты расчета изменения температуры фазового перехода, обусловленного действием механического напряжения, представлены на рис. 3. Видно, что при удалении от края окна в диэлектрике к центру затравки значение  $\Delta T$  быстро убывает. Таким образом, можно предположить, что одной из причин наблюдаемого эффекта локального плавления вблизи края окна в  $SiO_2$  является действие механических напряжений, которые обеспечивают стимулирование плавления подложки, а дальнейшее продвижение ФП определяется распределением температуры в кристалле.

В затравочных областях меньшей ширины механические напряжения, возникающие у противоположных краев затравок, вероятно перекрываются, и плавление осуществляется по всей поверхности монокристалла в окне разделительного диэлектрика.

Наличие макроступеней на фронте плавления при разориентации сторон затравок относительно направлений типа  $\langle 110 \rangle$  монокристаллической подложки, по-видимому, оказывает влияние на совершенство растущей пленки на изоляторе. Эти макроступени должны сохраняться при обратном процессе - кристаллизации. Наличие на фронте кристаллизации макроступеней является, как известно [6], причиной образования малоугловых границ формируемой пленки кремния на изоляторе. Таким образом, формирование макроступеней и фасетирование фронта кристаллизации может быть обусловлено особенностями плавления монокристаллической подложки в затравочной области.

Исследованы особенности плавления областей кремниевой подложки, служащих затравкой при формировании структур кремния на изоляторе импульсным нагревом. Обнаружено, что плавление начинается вблизи края окна в диэлектрике и распространяется на глубину нескольких микрометров в оптимальных условиях кристаллизации пленки кремния поверх слоя двуокиси кремния.

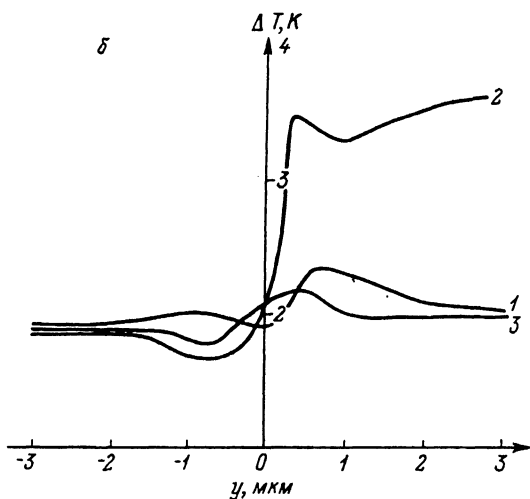
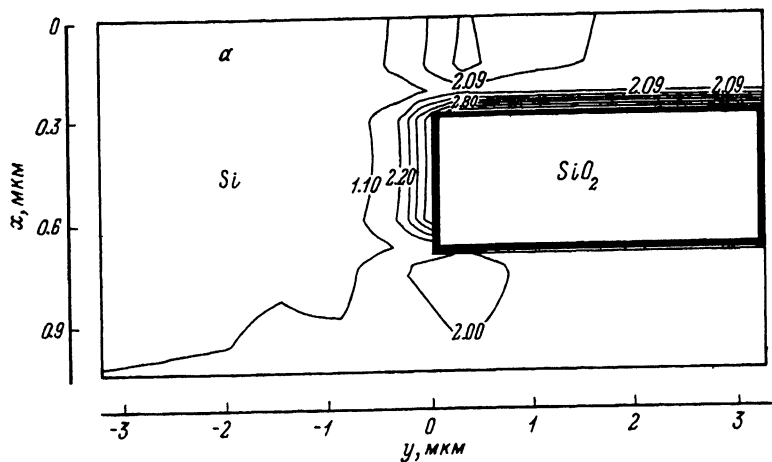


Рис. 3. Расчетные значения уменьшения температуры плавления кремния. Вследствие термоупругих напряжений в однородно нагретой (до 1680 К) КНИ-структуре: а) изотермы  $\Delta T$  в поперечное сечении КНИ-структур, цифрами - размерность в Кельвинах; б) зависимость  $\Delta T$  от расстояния от края затравочного окна: 1 - вдоль поверхности образца, 2 - на глубине верхней границы  $SiO_2$ , 3 - под  $SiO_2$ .

Установлено, что форма фронта плавления в плоскости затравки зависит от ориентации края окна в диэлектрике относительно кристаллографического направления типа  $\langle 110 \rangle$ : фронт плавления явля-

ется плоским, если край окна параллелен  $[110]$  и имеет макроступени при отклонении края окна от данного направления, причем с увеличением угла отклонения возрастает плотность макроступеней.

Возможное объяснение обнаруженных особенностей в процессе плавления основывается на представлении о понижении температуры плавления в областях, характеризующихся большими механическими напряжениями, возникающими при нагревании вследствие различных коэффициентов термического расширения кремния и диэлектрика. Сделанные расчеты свидетельствуют о возможности изменения температуры плавления на несколько градусов.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Коляденко С.Н., Двуреченский А.В., Васильев А.Л. // Электронная промышленность. 1989. № 4. С. 3-7.
- [2] Верховданов С.П., Герасименко Н.Н., Мясников А.М. // Поверхность: физика, химия, механика. 1988. № 5. С. 69-73.
- [3] Heinig K.-H. Proceeding of Conference on Energy Pulse Modification of Semiconductors and Related Materials., Dresden, GDR, September, 1984. V.1. P. 265-279.
- [4] Лодиз Р., Паркер Р. Рост монокристаллов. М.: Мир, 1974. 540 с.
- [5] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. 1987. М.: Наука. 248 с.
- [6] Geis M. W., Smith H. J., Selversmith D. J. // J. Electrochem. Soc. 1983. V. 130. N 5. P. 1178-1183.

Поступило в Редакцию  
1 июня 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 22

26 ноября 1990 г.

07

© 1990

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР

П.В. Адамсон

В оптической передаче и обработке информации одна из ключевых задач заключается в значительном повышении информационной емкости соответствующих систем. Поэтому дальнейший прогресс волоконной оптики неразрывно связан с совершенствованием волоконно-