

ДИСЛОКАЦИИ В КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУРАХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЯМЫМ СРАЩИВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТЕЙ С РЕЛЬЕФОМ

© Т.С.Аргунова, И.В.Грехов, М.Ю.Гуткин, Л.С.Костина,
Е.Н.Белякова, Т.В.Кудрявцева, Е.Д.Ким*, Д.М.Парк*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санк-Петербург, Россия

*Power Semiconductor Research Laboratory, Korea Electrotechnology Research
Institute P.O. Box 20, Changwon, Gyungnam 641-600, Korea

(Поступила в Редакцию 14 июня 1996 г.)

Технология прямого сращивания различных материалов в настоящее время привлекает внимание широкого круга исследований. Суть метода заключается в возникновении слабого электростатического взаимодействия контактирующих пластин при комнатной температуре, которое затем усиливается при последующих высокотемпературных обработках и завершается формированием ковалентных связей между атомами кремния через границу раздела [1,2]. Способы обработки поверхности, облегчающие возникновение первоначального контакта, и режимы термообработок, обеспечивающих его усиление, исследованы во многих работах [3,4]. Было показано, что несовершенство поверхности пластин, включающее слабые повреждения, загрязнения и шероховатость, препятствует формированию непрерывной границы раздела [3,5]. Пластины, предназначенные для сращивания, должны иметь зеркально полированные (с шероховатостью не более 10–20Å), тщательно отмытые и химически активированные поверхности. Практика показывает, что ни особые условия хранения и транспортировки пластин, ни специальная полировка, ни высокие стандарты чистых комнат не могут гарантировать надежно воспроизводимое почти совершенное сращивание гладких пластин кремния.

Настоящая работа посвящена модифицированной технологии сращивания неокисленных кремниевых пластин. Авторами ранее сообщалось, что формирование регулярного рельефа на интерфейсе таких структур улучшает его свойства и уменьшает плотность дефектов кристаллической решетки [6,7]. Рельеф в виде ортогональной сетки канавок изготавливался на полированной поверхности одной из пластин каждой пары при помощи метода фотолитографии. Геометрические параметры сетки показаны на рис. 1. Перед сращиванием пластины подвергались стандартной отмывке и гидрофилизации с последующей промывкой в деионизованной воде с удельным сопротивлени-

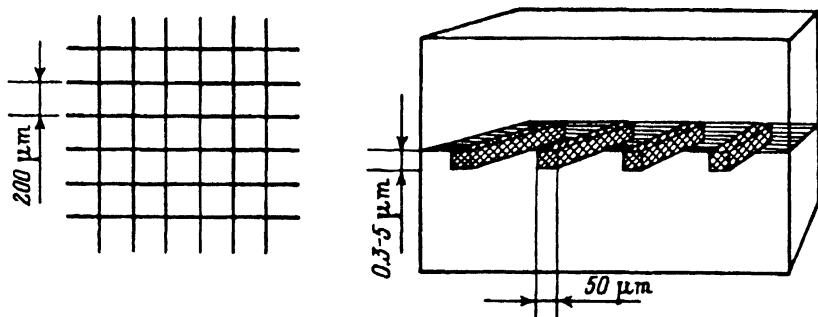


Рис. 1. Схема и параметры регулярного рельефа, наносимого на полированную поверхность одной из пластин перед срачиванием при помощи фотолитографии.

ем $\sim 18 \text{ М}\Omega \cdot \text{см}$ [4]. Их структурное качество контролировалось высокочувствительной многокристалльной рентгено топографической схемой [8]. С целью уменьшения вероятности попадания пыли соединение пластин также осуществлялось под поверхностью деионизованной воды. Комплекс методов рентгеновской топографии в геометрии Брэгга и Лауэ и STEM-метод применялись для исследования структурного совершенства после срачивания. Было обнаружено, что отжиг при температуре 1150°C приводит к перестройке дислокационной структуры вблизи границы раздела пластин, приводящей к формированию скоплений дислокаций вблизи канавок и существенному уменьшению их плотности в областях контакта между канавками. Одновременно с миграцией дислокаций наблюдалось зарастание канавок. Целью данной работы является объяснение роли периодического рельефа в снижении плотности приграничных дислокаций.

В процессе срачивания зарождение дислокаций могло иметь место на остаточных поверхностных нарушениях, а также в результате работы источников в объеме недостаточно чистого кремния. Этот процесс, включающий механизмы скольжения и переползания, схематически представлен на рис. 2, а. Быстрое спадание упругих контактных напряжений, вызывающих скольжение дислокаций (по закону $1/R^2$, где R — расстояние от границы), приводит к тому, что дислокации оказываются локализованными в тонком приграничном слое толщиной $\Delta = 1-5 \mu\text{m}$. Взаимодействие дислокаций способствует формированию характерной структуры дислокационных зарядов (рис. 2, б), типичной для пластической деформации в мезообъемах [9]. Такая дислокационная структура сильно неоднородна и термодинамически неустойчива. При высокотемпературном отжиге образование более выгодной конфигурации будет сопровождаться аннигиляцией дислокационных зарядов и их «рассасыванием» за счет скольжения дислокаций по направлению к канавкам (рис. 2, с). Скольжение дислокаций в плоскостях, параллельных границе, вызывается силой, имеющей две основные составляющие. Первая составляющая — сила притяжения дислокаций свободными поверхностями канавок F_i или «сила изображения». Вторая — сила междислокационного взаимодействия F_d , отталкивающая друг от друга дислокации одного знака, залегающие в одной или очень близких плоскостях скольжения. Оценим вклад каждой из этих сил.

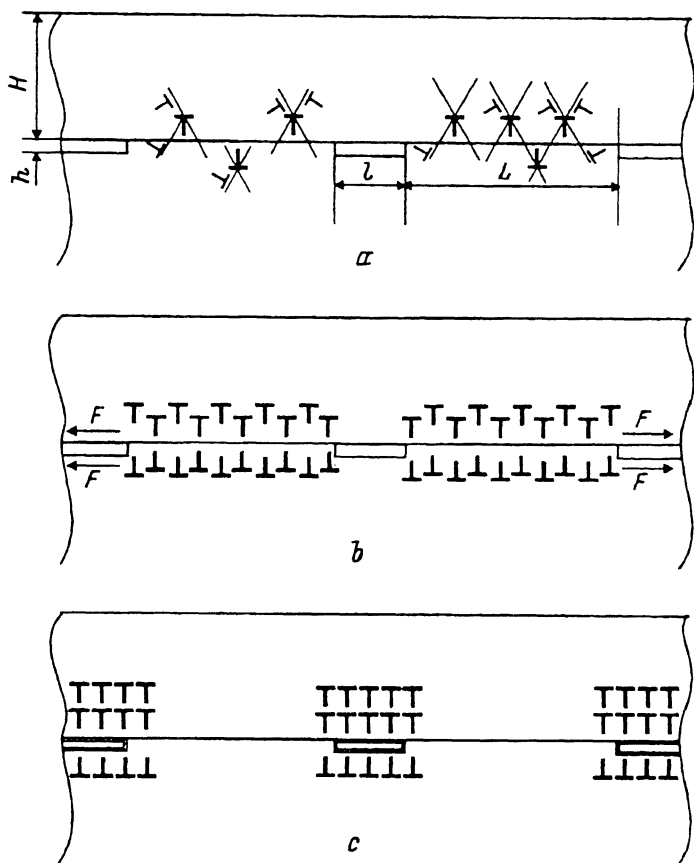


Рис. 2. Зарождение (а) и эволюция (b, c) приграничной дислокационной структуры в процессе отжига сращиваемых кремниевых пластин.

Для оценки силы изображения взаимодействие дислокации с канавкой было промоделировано с использованием решений граничных задач теории упругости, а именно: 1) о взаимодействии прямолинейной винтовой дислокации с цилиндрическим включением эллиптического сечения, имеющего модуль сдвига, отличный от модуля сдвига окружающей среды [10]; 2) о краевой дислокации вблизи клинообразного выреза [11]. Оценка скалывающего напряжения σ_i , соответствующего максимально возможной силе притяжения при $r \ll h \leq 0.1 \mu\text{m} \approx 200b$, где r — расстояние от дислокации до стенки канавки и b — ее вектор Бюргера, дает величину $\sigma_i \geq 50 \text{ МПа}$, что превышает предел текучести кремния при $T = 1150^\circ\text{C}$. Таким образом, боковые стенки канавок служат эффективными стоками для ближайших к ним дислокаций. Эффективность более глубоких канавок выше, так как при этом увеличивается как число плоскостей скольжения, пересекающих стенки канавок, так и радиус действия силы изображения.

Не приводя подробно оценку вклада силы F_d , отметим, что эта сила может быть представлена в виде $F_d = b\sigma_{xy}(x, y)$, где $\sigma_{xy}(x, y)$ — сдвиговая компонента суммарного поля всех дислокаций в системе, по-

лученная интегрированием полей отдельных дислокаций [12], взятых с учетом свободной поверхности. Приближенная формула для скалывающего напряжения имеет вид

$$\sigma_{xy} \approx \frac{Gb\rho}{2\pi(1-\nu)} \left\{ -\frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\Delta^2}{\delta^2} \right) - \frac{\Delta^2}{\Delta^2 + \delta^2} + \frac{3\Delta^2}{2(l+\delta)^2} + \Delta\Psi(x_1, l, L) \right\}, \quad (1)$$

где

$$\Psi(x_1, l, L) = \frac{l^2(x_1^2 + l^2)}{x_1(4x_1^2 + l^2)^2} - x_1 \left[\frac{16x_1^2 + 7L^2}{(4x_1^2 + L^2)^2} - \frac{16x_1^2 + 7(L+l)^2}{[4x_1^2 + (L+l)^2]^2} \right]. \quad (2)$$

Подставив в полученное выражение геометрические параметры структуры, находим, что для сильнодислокационных систем ($\rho \sim 10^8 - 10^{10} \text{ см}^{-2}$) скалывающее напряжение достигает значительных величин: $\sigma_{xy} \approx -(7.4 - 74) \text{ МПа}$.

Таким образом, в срачиваемых структурах с периодическим рельефом на интерфейсе при высокотемпературном отжиге происходит «рассасывание» приграничных дислокаций путем 1) переползания и аннигиляции на границе; 2) скольжения и выхода на боковые стенки канавок под действием значительных короткодействующих сил изображения и сил междислокационного взаимодействия. Эффективным источником вакансий, обеспечивающих переползание дислокаций, являются свободные поверхности канавок, что приводит к частичному зарастанию последних. К такому же результату приводит выход дислокаций на поверхности канавок в результате скольжения. Исходя из вышесказанного, рельефный интерфейс может быть рекомендован как эффективное средство понижения плотности приграничных дислокаций в структурах, получаемых прямым срачиванием пластин с зеркально полированными поверхностями.

Список литературы

- [1] J.B. Lasky. *Appl. Phys. Lett.* **48**, 78 (1986).
- [2] R. Stengl, K.-Y. Ahn, U. Gösele. *Jpn. J. Appl. Phys.* **27**, L2364 (1988).
- [3] M. Shimbo, K. Furukawa, K. Fukuda, K. Tanzawa. *J. Appl. Phys.* **60**, 2987 (1986).
- [4] В.М. Волле, В.Б. Воронков, И.В. Грехов, В.А. Козлов. *Электротехника* **2**, 58 (1992).
- [5] W.P. Maszara. *J. Electrochem. Soc.* **138**, 341 (1991).
- [6] I.V. Grekhov, T.S. Argunova, L.S. Kostina, T.V. Kudryavtzeva, E.D. Kim, S.C. Kim. *Electron. Lett.* **31**, 20 (1995).
- [7] Т.С. Аргунова, А.Г. Андреев, Е.И. Белякова, И.В. Грехов, Л.С. Костина, Т.В. Кудрявцева. *Письма в ЖТФ* **22**, 1 (1996).
- [8] I.L. Shul'pina. *J. Phys. D.: Appl. Phys.* **26**, A82 (1993).
- [9] В.И. Владимиров. *Физическая природа разрушения металлов. Металлургия. М.* (1984). 280 с.
- [10] G.P. Sendecyk. In: *Fundamental Aspects of Dislocation Theory/ Ed. J.A. Summons, R. de Wit, R. Bullough. Nat. Bur. Stand. (U.S.). Spec. Publ. (1970). V. 1. P. 57.*
- [11] M. Hecker, A.E. Romanov. *Phys. Stat. Sol. (a)* **130**, 91 (1992).
- [12] T. Mura. In: *Advances in Materials Research/ Ed. H. Herman. Interscience Publ. N.Y. (1968). V. 3. 108 p.*