

УДК 537.311.33:669.782  
DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27982

# ОБ ОБРАЗОВАНИИ СТРАТОВОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ

**А. А. Якименко\***

E-mail: syostri@mail.ru

**И. Ф. Червоний**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой\*

E-mail: rot44@yandex.ru

\*Кафедра металлургии цветных металлов

Запорожская государственная

инженерная академия

пр. Ленина 226, г. Запорожье, Украина, 69006

*У роботі виконано аналіз накопичення домішки в розплаві у фронті кристалізації при вирощуванні монокристалів кремнію і розглянута модель прискореної кристалізації цієї області розплаву. Для усунення або значного зниження характеристик страт, пропонується застосовувати режими вирощування монокристалів при високих швидкостях, що виключить накопичення домішки з фронту кристалізації і забезпечить однорідний її розподіл за обсягом монокристала*

**Ключові слова:** кремній, фронт кристалізації, монокристал, домішка, неоднорідність, страти, мікросхема, концентрація, переохолодження, фаза

*В работе выполнен анализ накопления примеси в расплаве у фронта кристаллизации при выращивании монокристаллов кремния и рассмотрена модель ускоренной кристаллизации этой области расплава. Для устранения или значительного снижения характеристик страт, предлагается применять режимы выращивания монокристаллов при высоких скоростях, что исключит накопление примеси у фронта кристаллизации и обеспечит однородное ее распределение по объему монокристалла*

**Ключевые слова:** кремний, фронт кристаллизации, монокристалл, примесь, неоднородность, страты, микросхема, концентрация, переохлаждение, фаза

## 1. Введение

Развитие электроники и микроэлектроники основано на применении монокристаллического кремния и неразрывно связано с качественными характеристиками выращиваемых монокристаллов кремния. Главным направлением в микроэлектронике является минимизация размеров элементов и увеличение плотности их расположения в одной микросхеме (рис. 1) [1].

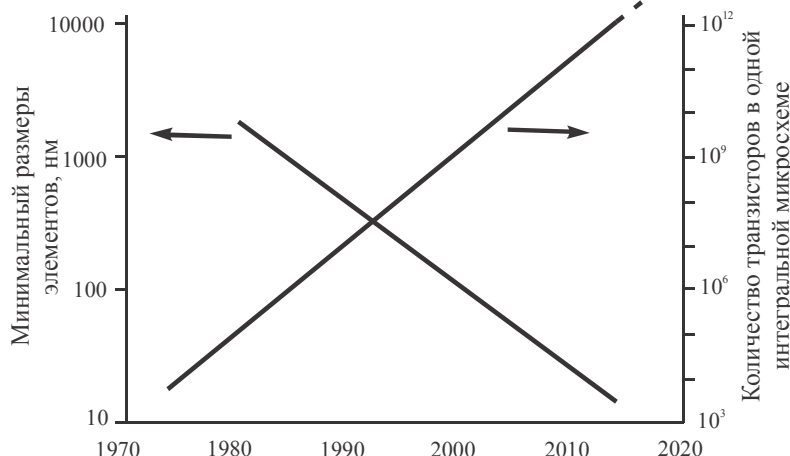


Рис. 1. Развитие микроэлектронных устройств на основе кремния [1]

Для изготовления микросхем используются пластины монокристаллического кремния, вырезанные из выращенного из расплава монокристалла. Мини-

тюризация и повышение плотности элементов микросхем выдвигает повышенные требования к однородности электрофизических и структурных характеристик пластин кремния. Как отмечается в работе [2], наличие электрофизических нарушений (дефектов) резко снижает (до 75 %) выход годных микросхем. Одним из таких дефектов является примесная полосчатая (стратовая) неоднородность монокристаллов кремния, которые выращиваются из расплава методом Чохральского или бестигельной зонной плавкой.

## 2. Анализ литературных данных

Выращивание монокристаллического кремния из расплава сопровождается наличием фазового перехода первого рода с образованием монокристаллического кремния. Формирование заданной структуры монокристалла и его электрофизических характеристик (количество примесей и их распределение по объему монокристалла) определяется технологическими режимами процесса выращивания. При фазовом переходе – фронте кристаллизации монокристалла происходит перераспределение примеси в зависимости от температурных условий кристаллизации, характера потоков в расплаве и вида примеси, который характеризуется коэффициентом распределения между жидкой и твердой фазами.

В выращиваемом монокристалле характер распределения примеси проявляется в виде определенной неоднородности по длине и по поперечному сечению монокристалла. По длине монокристалла (при рассмотрении продольного сечения) характер макронеоднородности проявляется в виде волнообразного или параболического распределения. В поперечном сечении монокристалла такой характер распределения проявляется в виде кольцевой неоднородности. Наиболее существенное влияние на качество монокристаллов оказывает микрораспределение примеси – распределение в виде страт (полос). Такое распределение имеет большую частоту и при увеличении плотности приборов на единице площади кристалла проявляет отрицательное действие. При подготовке пластин кремния к изготовлению микросхем такие неоднородности проявляются как дефекты и сопутствуют искажению электрофизических характеристик, т.е. браку микросхем [2]. Изучению и уменьшению стратовой неоднородности посвящен ряд работ, в которых авторы анализируют условия их образования и методы устранения. В работе [3] проводится анализ тепловых условий выращивания на распределение примесей в объеме монокристалла и рассматривается влияние переохлаждения в расплаве при концентрации примеси  $>10^{20}$  см<sup>-3</sup>. При воздействии ультразвуковых волн в диапазоне 0,25...10 МГц на межфазную границу авторами [4] не удалось исключить образование стратовой неоднородности в выращиваемых монокристаллах кремния. В то же время автору работы [5] при воздействии ультразвуковых колебаний с частотой 18...20 кГц и интенсивностью 0,3–0,6 Вт·см<sup>-2</sup> удалось снизить величину макронеоднородности распределения примеси. Влияние условий кристаллизации на образование стратовой неоднородности исследовалось также авторами работы [6], в которой высказывается предположение о преобладающем воздействии механизма роста монокристаллов, в частности послынного роста, на формирование микронеоднородности.

Выполненный анализ литературных данных свидетельствует о поиске причин и условий образования стратовой неоднородности, однако проведенные многими авторами исследования на настоящее время не привели к положительным результатам.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью проведения настоящих исследований было выполнение теоретического обоснования условий образования стратовой неоднородности в монокристаллах кремния, выращиваемых из расплава.

Задачами исследования, решение которых представляется необходимым для достижения этой цели, были выбраны:

- выделение моноатомного слоя в качестве объекта кристаллизации; расчет концентрации примеси в расплаве вблизи границы раздела фаз в приближении перераспределения примеси в жидкой и твердой фазах при кристаллизации моноатомного слоя;
- рассмотрение условий накопления примеси в расплаве у фронта кристаллизации и образования области концентрационного переохлаждения;

- анализ образования переохлаждения расплава за счет повышения концентрации примеси;
- расчет изменения скорости кристаллизации слоя расплава, обогащенного примесью;
- анализ возможности скачкообразного изменения скорости кристаллизации расплава при изменении в нем концентрации примеси;
- создание модели образования стратовой неоднородности в монокристаллах кремния.

### 4. Анализ условий образования стратовой неоднородности

При выращивании монокристаллов кремния из расплава на фронте кристаллизации, между жидкой и твердой фазами, происходит перераспределение примесей, в зависимости от их свойств – растворимости в жидкой и твердой фазах. При выполнении настоящих исследований были сделаны следующие допущения:

- коэффициент распределения примеси принимался постоянным и равным равновесному и не изменялся в процессе выращивания;
- концентрация примесей в расплаве остается постоянной в течение процесса выращивания;
- скорость выращивания принималась постоянной;
- при анализе перераспределения примесей рассматривалось, что кристаллизация происходит из моноатомных слоев кремния.

При условии принятых допущений применялась следующая модель перераспределения примесей: при кристаллизации одного слоя кремния одна часть примеси усваивается растущим кристаллом, а другая часть остается в расплаве, обогащая прифронтную область расплава. При кристаллизации второго слоя кремния растущим кристаллом усваивается примесь из обогащенного примесью расплава после кристаллизации первого атомного слоя и т. д. Таким образом, в прифронтной области расплава происходит пошаговое накопление примеси и образование области концентрационного переохлаждения [7], включая возможное увеличение ее концентрации до критического значения – достижения возникновения самостоятельной второй фазы, исходя из условий образования самостоятельных соединений на основе кремния и примеси или самостоятельных фаз на основе межпримесного взаимодействия. В качестве примера рассмотрим случай выращивания из расплава монокристаллов кремния, легированных фосфором. Атомный слой кремния принимался равным  $\sim 3 \text{ \AA}$ , исходя из атомного радиуса  $1,33 \text{ \AA}$  [8]. Равновесный коэффициент распределения фосфора в кремнии –  $k_0=0,35$ . Скорость выращивания принималась равной 3 мм/мин и сохранялась постоянной в процессе выращивания. Концентрация примеси в расплаве составляла  $C_0=1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>.

При выполнении принятых допущений, после кристаллизации первого атомного слоя  $0,35 \cdot C_0$  примеси переходит в расплав, а  $(1-k_0) \cdot C_0$  примеси остается в расплаве, увеличивая на эту величину начальную концентрацию примеси в расплаве перед фронтом кристаллизации, т.е. обеспечивается создание слоя с повышенным содержанием примеси. Последующее увеличение концентрации примеси в области перед

фронтом кристаллизации можно выразить зависимостью

$$C_n^{кр} = k_0 \cdot (2 - k_0)^{n-1} \cdot C_0, \tag{1}$$

где  $C_0$  – начальная концентрация примеси в расплаве,  $см^{-3}$ ;  $k_0$  – коэффициент распределения примеси;  $C_n^{кр}$  – концентрация примеси в кристалле после кристаллизации  $n$ -го слоя,  $см^{-3}$ .

После выполнения расчетов для начальной концентрации  $C_0 = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , получаем упрощенное выражение изменения концентрации примеси в прифронтовом слое расплава в зависимости от количества закристаллизовавшихся атомных слоев кремния

$$C_n^{кр} = 2 \cdot 10^{14} \cdot \exp(0,5008n), \tag{2}$$

где  $n$  – количество закристаллизовавшихся атомных слоев кремния, шт, 0,5008 – согласующий коэффициент, 1/шт.

В реальных условиях выращивания [8] на продольном сечении монокристаллов кремния (рис. 2) установлено слоистое (стратовое) расположение примесей (дефектов).

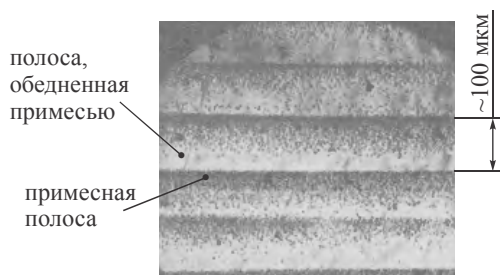


Рис. 2. Фото слоистого расположение дефектов  $\times 100$  [8]

Расстояние между стратами составляет примерно 100 мкм. На таком расстоянии может разместиться более  $3 \cdot 10^6$  атомных слоев кремния. В соответствии с уравнением (2) уже при кристаллизации 30...35 атомных слоев кремния концентрация примеси достигает значений  $(1...3) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . При этом, согласно работе [9], температура смеси кремний-фосфор достигает величины 1310 °С, т.е. создается градиент температуры  $\sim 110...120 \text{ К} \cdot \text{см}^{-1}$ , в сравнении с температурой равновесного фазового перехода при малых концентрациях примеси. При таких градиентах температуры, в соответствии с данными работы [10], максимальная скорость выращивания значительно увеличивается

$$v_{max} = \beta_s \cdot \text{grad}T_s / (L \cdot \rho_s), \tag{3}$$

где  $\beta_s$  – теплопроводность твердого вещества вблизи температуры плавления,  $\beta_s = 0,31 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ;  $\text{grad}T_s$  – температурный градиент в кристалле,  $\text{К} \cdot \text{см}^{-1}$ ;  $L$  – скрытая теплота кристаллизации,  $L = 50,7 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $\rho_s$  – плотность кристаллизующего материала; вблизи температуры плавления принимаем  $\rho_s = 2,4 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ .

При фиксированной и принятой для анализа величине  $\text{grad}T_s = 20 \text{ К} \cdot \text{см}^{-1}$  у фронта кристаллизации для малых концентраций, для концентрации

$(1...3) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$   $\text{grad}T_s$  достигает величины  $110...120 \text{ К} \cdot \text{см}^{-1}$ . В соответствии с расчетами по уравнению (3), скорость выращивания увеличивается в 5...7 раз. Таким образом, обеспечиваются условия скачкообразного изменения скорости выращивания и кристаллизации слоя расплава, обогащенного примесью. После скачкообразной кристаллизации у прифронтовой области повторяется процесс накопления примеси до определенной величины и повторение режима ускоренной кристаллизации. Эта модель подтверждается рис. 2, на котором отчетливо видно чередование полос обогащенных примесью и полос со слабым насыщением примесью.

При рассмотрении комплекса примесей, находящихся в расплаве, механизм их накопления у прифронтовой области и кристаллизации расплава может изменяться в зависимости от свойств примесей и характеристик технологического процесса. Однако, при рассмотрении возможности устранения или значительного снижения негативных характеристик страт, можно применять встречные режимы выращивания монокристаллов, а именно использовать приемы выращивания монокристаллов при высоких скоростях, что исключит накопление примеси у фронта кристаллизации и обеспечит однородное ее распределение по объему монокристалла.

## 5. Выводы

В работе приведено описание модели образования полосчатой (стратовой) неоднородности распределения примеси при выращивании из расплава монокристаллов кремния. Выполненные расчеты показали возможность накопления примеси у фронта кристаллизации и ускоренной кристаллизации этой области расплава.

На основании выполненных расчетов предложена следующая модель перераспределения примесей и образования стратовой неоднородности: при кристаллизации моноатомного слоя кремния только часть примеси из расплава (при условии равномерного распределения примеси в объеме расплава и в соответствии с коэффициентом распределения примеси) усваивается растущим кристаллом, а другая часть примеси (не усвоенная растущим кристаллом) остается в расплаве, обогащая прифронтовую область расплава. При кристаллизации второго слоя кремния растущим кристаллом усваивается примесь из обогащенного примесью расплава после кристаллизации первого атомного слоя и т.д. Таким образом, в прифронтовой области расплава происходит пошаговое накопление примеси и образование области концентрационно-го переохлаждения, включая возможное увеличение концентрации примеси до критического значения – достижения условий возникновения самостоятельной второй фазы, исходя из условий образования самостоятельных соединений на основе кремния и примеси или самостоятельных фаз на основе межпримесного взаимодействия. Для устранения или значительного снижения характеристик страт, предлагается применять режимы выращивания монокристаллов при высоких скоростях, что исключит накопление примеси у фронта кристаллизации и обеспечит однородное ее распределение по объему монокристалла.

Література

1. Лекція 17. Основні принципи нанотехнології. Перспективи нанотехнології в системах записи і хранения інформації [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://rudocs.exdat.com/docs/index-247352.html> – 10.09.2014.
2. Закон Мура і його вплив на мікропроцесори. Створюємо свій процесор [Електронна версія] / Режим доступу : [http://www.igropolis.com/articles/46496/Zakon\\_Mura\\_i\\_ego\\_vliyanie\\_na\\_mikroprocessory.htm](http://www.igropolis.com/articles/46496/Zakon_Mura_i_ego_vliyanie_na_mikroprocessory.htm) – 12.09.2014.
3. Friedrich, J. Constitutional Supercooling in Czochralski Growth of Heavily Doped Silicon Crystals [Electronic resource] / J. Friedrich, L. Stockmeier, G. Muller // Acta Physica Polonica. – 2013. – Vol. 124, Issue 2. – P. 219. – Available at: <http://connection.ebscohost.com/c/articles/89750179/constitutional-supercooling-czochralski-growth-heavily-doped-silicon-crystals> – 10.09.2014. doi:10.12693/aphyspola.124.219
4. 5th International Workshop on Crystal Growth Technology [Electronic resource] / Berlin, Germany, 2011. – P. 32. – Available at: [http://iwcgt5.ikz-berlin.de/fileadmin/pdf/IWCGT5\\_Abstractbook.pdf](http://iwcgt5.ikz-berlin.de/fileadmin/pdf/IWCGT5_Abstractbook.pdf) – 01.09.2014
5. Патент RU 2257428. Бывалый [Электронная версия] / Способ получения однородных монокристаллов. – опул. 27.07.2005. – Бюл. № 21. – Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/images/patents/211/2257428/patent-2257428.pdf>. – 15.09.2014
6. 5th International Workshop on Crystal Growth Technology. June 26 - 30, 2011 Berlin, Germany. P. 79 [Electronic resource] / Available at : [http://iwcgt5.ikz-berlin.de/fileadmin/pdf/IWCGT5\\_Abstractbook.pdf](http://iwcgt5.ikz-berlin.de/fileadmin/pdf/IWCGT5_Abstractbook.pdf) – 15.08.2014
7. Нашельский, А. Я. Технология полупроводниковых материалов [Текст] / А. Я. Нашельский. – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.
8. Фалькевич, Э. С. Технология полупроводникового кремния [Текст] / Э. С. Фалькевич, Э. О. Пульнер, И. Ф. Червоный, Л. Я. Шварцман, В. Н. Ярким, И. В. Салли, Э. О. Пульнер, И. Ф. Червоный. – М.: Металлургия, 1992. – 408 с.
9. Глазов, В. М. Физико-химические основы легирования полупроводников [Текст] / В. М. Глазов, В. С. Земсков. – М.: Наука, 1967. – 367 с.
10. Случинская, И. А. Основы материаловедения и технологии полупроводников [Текст] / И. А. Случинская. – М.: Наука, 2002. – 376 с. – Режим доступа <http://www.twirpx.com/file/96095/> – 17.08.2014

*Типова схема компаратора включає диференціальний каскад, вихідну логіку та схему зміщення рівнів. Сучасні компаратори мають стробуючий вхід, що забезпечує порівняння вхідних сигналів тільки в момент подачі відповідного імпульсу. Це дозволяє надавати компараторам прицельності, тобто порівнювати вхідні сигнали в той момент часу, коли це є необхідно із великою точністю*

*Ключові слова: операційний підсилювач, однопороговий аналоговий компаратор та гістерезисний компаратор Шмітта, бар'єр Шоттки*

*Типичная схема компаратора включает дифференциальный каскад, исходную логику и схему смещения уровней. Современные компараторы имеют стробирующий вход, обеспечивающий сравнение входных сигналов только в момент подачи соответствующего импульса. Это позволяет предоставлять компараторам прецизионности, т.е. сравнивать входные сигналы в тот момент времени, когда это необходимо с большой точностью*

*Ключевые слова: операционный усилитель, однопороговий аналоговий компаратор и гистерезисний компаратор Шмитта, бар'єр Шоттки*

УДК 681.3

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27559

## СХЕМОТЕХНІЧНІ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ФІЗИКО-ТОПОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ІНТЕГРАЛЬНИХ КОМПАРАТОРІВ

**С. П. Новосядлий**

Доктор технічних наук, професор  
Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки  
Прикарпатський національний  
університет ім. В. Стефаника  
вул. Шевченка, 57,  
м. Івано-Франківськ, Україна, 76025  
E-mail: nsp@mail.pu.if.ua

### 1. Вступ

На практиці найбільше поширення отримали пристрої, які формують на виході або напругу проти-

лежної полярності при практично рівних абсолютних значення, або напругу однієї полярності. Перший варіант характерний для використання в ролі схеми порівняння операційного підсилювача (ОП), а дру-