

С. Г. Егоров

О РОЛИ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ МЕТОДОМ БЗП

В работе исследуются условия возникновения конвекции в расплавленной зоне при выращивании монокристаллов кремния методом бестигельной зонной плавки. Установлено, что возникающие в расплавленной зоне течения (термогравитационные, центробежные, термокапиллярные и электродинамические) влияют на распределение примесей в расплаве и, следовательно, определяют качество конечной продукции

Ключевые слова: бестигельная зонная плавка, движение расплава

1. Введение

Представленные в докладе исследования относятся к области металлургии, а именно к выращиванию монокристаллов кремния методом вертикальной индукционной бестигельной зонной плавки (БЗП). Метод бестигельной зонной плавки получать монокристаллы с меньшим содержанием примесей O_2 , C, Fe, Al и др. Только на основе таких монокристаллов могут быть изготовлены тиристоры, работающие на токах 2000 А и являющиеся основным элементом силовых электрических преобразовательных подстанций. Электрофизические и структурные свойства монокристаллов определяются наличием в них примесей и равномерностью их распределения, как в продольном, так и в поперечном сечениях. Изучение механизма распределения примесей в объеме расплава и вблизи фронта кристаллизации монокристалла с целью создания таких условий плавки, которые позволят производить с высоким выходом в готовую продукцию монокристаллы кремния с требуемым комплексом электрофизических и структурных характеристик методом вертикальной индукционной бестигельной зонной плавки является актуальным.

2. Постановка проблемы

Основной целью исследований является установление закономерностей влияния движения расплава, вызванное центробежными, электродинамическим, термокапиллярными и архимедовыми силами, на распределение примесей в объеме расплава и кристаллизацию монокристаллов.

3. Основная часть

3.1. Анализ литературных источников по теме исследований

Выращивание монокристаллов кремния мето-

дом вертикальной индукционной бестигельной зонной плавки осуществляется согласно технологии и на оборудовании, описанных в работах [1,2]. Качество выращиваемых монокристаллов определяется количеством примесей и их распределения в объеме расплавленной зоны. Распределение примесей определяется конвективными потоками в расплавленной зоне [3-4].

В расплавленной зоне во время бестигельной зонной плавки возникают: термогравитационное, центробежное, термокапиллярное и электродинамическое течения. В условиях тепловой конвекции значительно повышается интенсивность теплопередачи от источника тепла к жидкости. Кроме того, конвекция приводит к появлению вертикального, горизонтального и смешанного температурного расслоения. Наличие температурного расслоения приводит к появлению макро- и микронеоднородностей распределения легирующих примесей в монокристаллах [5]. Для описания тепловых потоков используются безразмерные параметрические числа: Грасгофа, Прандтля и Релея.

При выращивании монокристаллов возникают центробежные течения обусловленные вращением монокристалла и/или исходного кристалла. Для оценки влияния этой конвекции используют вращательное число Рейнольдса, которое показывает отношение инерционных сил к силам вязкости. Термокапиллярная конвекция развивается в жидкости при наличии границы раздела газ-жидкость и температурного градиента вдоль этой границы. Сила поверхностного натяжения вызывает движение жидкости из более нагретых областей поверхности, где поверхностное натяжение уменьшается, к более холодным областям поверхности, где поверхностное натяжение увеличивается. Данная конвекция характеризуется числом Марангони и представляет собой отношение градиента сил поверхностного натяжения, вызванного разностью температур, к силам вязкости [6, 7].

Применение в методе БЗП высокочастотного индукционного нагрева приводит к появлению электро-

динамической силы, которая воздействует на расплав. Эта сила направлена вглубь расплава от свободной поверхности и потому она оказывает стабилизирующее действие на жидкую зону. Электродинамическая сила не является постоянной вдоль всей свободной поверхности, что вызывает электродинамическую конвекцию [8, 9].

Таким образом, наличие только одного механизма конвекции может значительно влиять на распределение температуры и примеси в объеме расплава. Хотя в этом случае относительно легко контролировать движение расплава. В случае, когда в жидкой зоне действует несколько видов конвекции очень сложно руководить потоками, что сказывается на качестве выращиваемых кристаллов [10].

3.2. Результаты исследований

Исследования проводились на серийных установках типа «Кристалл», используемых для получения монокристаллов диаметром до 105 мм. Выращивание монокристаллов производилось в направлениях [111] и [100]. Плавки проводились как в вакууме при остаточном давлении в рабочей камере печи не более $1,33 \times 10^{-2}$ Па, так и в газовой среде (аргон или смесь аргона с водородом) при давлении до 2×10^5 Па. В экспериментах изменяли скорость перемещения расплавленной зоны (1...5 мм/мин) и скорость вращения монокристалла (5...120 мин⁻¹).

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что изменение скорости перемещения расплавленной зоны и скорости вращения монокристалла изменяет соотношение между конвективными потоками разной природы в расплавленной зоне. Это приводит к колебаниям температуры расплава и концентрации примесей вблизи фронта кристаллизации, а также к изменению толщины диффузионного слоя на фронте кристаллизации. Изменение толщины диффузионного слоя ведет к изменению величины эффективного коэффициента распределения примеси на фронте кристаллизации. Данные колебания коэффициента распределения примесей и определяет колебание концентрации примесей в растущем монокристалле.

Литература

1. Фалькевич, Э.С. Технология полупроводникового кремния [Текст] / Э.С. Фалькевич, Э.О. Пульнер, И.Ф. Червоный и др.; под ред. Э.С. Фалькевича. – М.: Металлургия. – 1992. – 408 с. – Библиогр.: с. 399-407. – 1170 экз. – ISBN 5-229-00740-0.
2. Червоный, И.Ф. Напівпровідниковий кремній: теорія і технологія виробництва [Текст] : монографія / І.Ф. Червоный, В.З. Куцова, В.І. Пожув та інш.; під ред. І.Ф. Червоного. – 2-ге вид., допрацьоване та перероблене. – Запоріжжя: ЗДІА, 2009. – 488 с. – Библиогр.: с. 446-484. – 300 прим. – ISBN 978-966-8462-24-5.
3. Червоный, И.Ф. Применение безразмерных критериев для описания состояния расплава кремния при БЗП

[Текст] : сб. трудов ЗГИА / И.Ф. Червоный, С.Г. Егоров, В.О. Масленников // Металлургия. – 2002. – Вып. № 6. – С.90-94.

4. Егоров, С.Г. Описание движения расплава кремния при бестигельной зонной плавке [Текст] / С.Г. Егоров, И.Ф. Червоный, Г.А. Колобов, А.П. Никоненко // материалы Международной конференции «Наука о материалах на рубеже веков: Достижения и Перспективы», 4-8 ноября 2002, Киев. – С.143-144.
5. Егоров, С.Г. Уменьшение влияния тепловой конвекции на качество монокристаллов кремния [Текст] : зб. праць ЗДІА / С.Г. Егоров, І.Ф. Червоный, Р.Н. Воляр // Металургія. – 2009. – Вип. № 19. – С.81-86.
6. Егоров, С.Г. Вплив потоків в розплаві на розподіл домішки під час бестигельного зонного плавлення [Текст] : зб. праць ЗДІА / С.Г. Егоров, Е.Я. Швець, І.Ф. Червоный, О.П. Головка // Металургія. – 2005. – Вип. №12. – С.57-62.
7. Червоный, И.Ф. К вопросу о взаимосвязи однородности монокристаллов кремния и потоков расплава в процессе БЗП [Текст] / И.Ф. Червоный, С.Г. Егоров, Е.Я. Швець // материалы Международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании», 3-10 июня 2005, Варна, Болгария. – С.129-130.
8. Егоров, С.Г. Исследование электромагнитных полей плавильного и подогревающего индукторов при бестигельной зонной плавке [Текст] / С.Г. Егоров, И.Ф. Червоный, Е.Я. Швець // Современная электротехнология. – № 2. – 2003. – С.34-36.
9. Червоный, И.Ф. Магнитное поле плавильного и подогревающего индукторов при бестигельной зонной плавке [Текст] : сб. трудов ЗГИА / И.Ф. Червоный, С.Г. Егоров // Металлургия. – 2003. – Вып. № 7. – С.60-64.
10. Егоров, С.Г. Конвекционные течения в расплавах полупроводников [Текст] : монография / С.Г. Егоров, В.И. Пожув, И.Ф. Червоный. – Запорожье: ЗГИА, 2007. – 155 с. – Библиогр.: с. 139-152. – 300 прим. – ISBN 978-966-7101-82-4.

ПРО РОЛЬ РУХУ РОЗПЛАВУ ПРИ ВИРОЩУВАННІ МОНОКРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ ЗА МЕТОДОМ БЗП

С. Г. Егоров

У роботі досліджуються умови виникнення конвекції у розплавленій зоні при вирощуванні монокристалів кремнію методом бестигельної зонної плавки. Встановлено, що течії, які виникають у розплавленій зоні (термогравітаційні, відцентрові, термокапілярні та електродинамічні) впливають на розподіл домішок у розплаві і внаслідок цього визначають якість кінцевої продукції.

Ключові слова: бестигельна зонна плавка, рух розплаву

Сергій Геннадійович Егоров, доцент кафедри металургії кольорових металів Запорізької державної інженерної академії, тел. (099) 235-91-86, e-mail: egrv@ukr.net

ABOUT THE ROLE OF MELT MOVEMENT DURING OF THE SILICON SINGLE CRYSTAL GROWTH BY FZ METHOD

S. Egorov

In work the conditions of occurrence of convection in the melted zone during growth of silicon single crystals by the floating zone melting method was investigated. It are fix, that streams in the melted zone (thermogravitational, centrifugal, thermocapillary and electrodynamic) influenced on distribution of impurity in the melt and, hence, defined quality of end production.

Keywords: floating-zone melting, melt movement

Sergey Egorov, associate professor of non-ferrous metallurgy department of the Zaporozhye state engineering academy, tel. (099) 235-91-86, e-mail: egrv@ukr.net