

УДК 669.187.58

ПЛАВЛЕНИЕ КРЕМНИЯ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ БЕСТИГЕЛЬНОЙ ЗОННОЙ ПЛАВКЕ

И. Ф. Червоный, Е. Я. Швец, С. Г. Егоров

Рассмотрены условия плавления исходного кристалла кремния при вертикальной индукционной бестигельной зонной плавке. Установлено, что для обеспечения стекания расплава необходимо значительно увеличить радиус площади контакта капли при минимальной толщине слоя расплава на поверхности плавления. Определены оптимальные режимы плавления для эффективного стекания расплава, образовавшегося на части поверхности исходного кристалла, в общую зону.

Conditions of melting initial crystal of silicon in vertical induction crucible-free zonal melting are considered. It was established that to provide the molten metal flowing out, it is necessary to increase significantly the radius of drop contact area at minimum thickness of melt layer at the surface of melting. Optimum conditions of melting are defined for effective flowing out of molten metal, formed at the part of surface of initial crystal, into the common zone.

Ключевые слова: бестигельная зонная плавка; капля; расплав; поверхность плавления; ячейка расплава; центробежная сила; угол наклона поверхности плавления

При выращивании монокристаллов кремния способом вертикальной бестигельной зонной плавки (БЗП) зафиксировано различное поведение расплава на участках плавления исходного поликристаллического стержня и кристаллизации. В работах [1, 2] изучено влияние состояния и поведения расплава на условия кристаллизации, а также распределение примеси. Поведение расплава на участке плавления требует более детального исследования. Это объясняется необходимостью обеспечения расплавления высокочастотным током плавильного индуктора части поверхности исходного поликристалла и равномерного, своевременного стекания образующихся капель в общую зону расплава. Кроме того, следует учитывать влияние центробежной силы на стекание капель расплава, поскольку при выращивании монокристаллов кремния способом БЗП происходит вращение исходного поликристаллического стержня и/или монокристалла.

Цель настоящей работы заключалась в изучении и создании оптимальных условий плавления исходного поликристалла кремния для обеспечения эффективного стекания капель в общую зону расплава.

При вертикальной БЗП в камере плавления на верхнем штоке вертикально закрепляют исходный

поликристаллический кремниевый стержень. На нижнем торце при помощи индукционного нагревателя создают каплю расплава, в которую вводят затравочный монокристалл, крепящийся на нижнем штоке, после чего создают зону расплава. Последняя перемещается вдоль исходного стержня кремния. Со стороны затравочного кристалла происходит рост монокристалла кремния с заданной структурой, а со стороны исходного кристалла — плавление кремния (рис. 1). При этом может вращаться как исходный стержень кремния, так и монокристалл. Основным требованием при плавлении

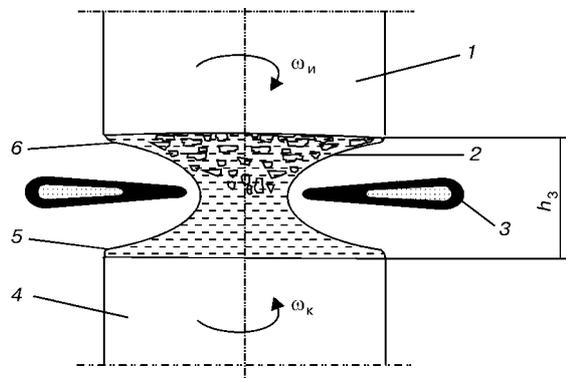


Рис. 1. Схема процесса БЗП: 1 — исходный кристалл; 2 — плавление; 3 — индуктор; 4 — выращиваемый кристалл; 5 — расплав; 6 — нерасплавившаяся часть; h_3 — общая высота зоны расплава; $\omega_{и}$, $\omega_{к}$ — частота вращения соответственно исходного поликристаллического стержня и кристалла

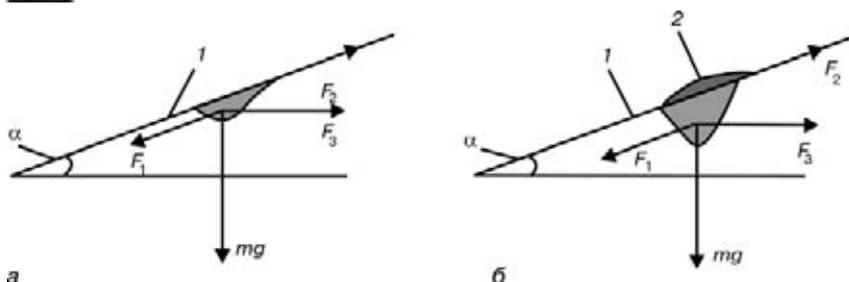


Рис. 2. Схема капли расплава по поверхности плавления: а — стекание капли; б — стекание капли затруднено; 1 — поверхность плавления; 2 — ячейка расплава; α — угол наклона поверхности плавления к горизонтالي; F_1 — сила, обеспечивающая скатывание капли; F_2 — сила, удерживающая каплю на поверхности плавления; F_3 — центробежная сила

является устойчивость зоны расплава, обеспечиваемая непрерывным и равномерным стеканием капель в общую зону расплава.

Основным элементом индукционной установки является индуктор, при помощи которого передается энергия в стержень и происходит его плавление. Электромагнитное поле, создаваемое индуктором, должно обеспечивать нагрев и плавление исходного стержня, поддерживать оптимальные тепловые условия в зоне расплава и заданное охлаждение монокристалла, выращиваемого из расплавленной зоны.

Определяющими факторами при разработке индукционных систем для плавления кристаллов кремния различных диаметров являются максимально допустимая высота зоны расплава и тепловые условия, обеспечивающие воспроизводимость процесса выращивания бездислокационных монокристаллов. Теоретически максимальная высота зоны расплава цилиндрической формы составляет 1,5 см [3]. Поэтому высота индуктора не может превышать указанную.

В связи с необходимостью увеличения диаметра выращиваемых монокристаллов разработаны технологические приемы с применением индуктора, внутренний диаметр которого меньше, чем у монокристалла (рис. 1).

Это позволило вместо цилиндрической использовать форму зоны расплава типа «игольчатое ушко» [4], при которой расплав находится на торце кристаллизующейся части кристалла и соединяется с исходным стержнем переходным участком диаметром 10... 15 мм. На исходном стержне образуется небольшое количество стекающего расплава,

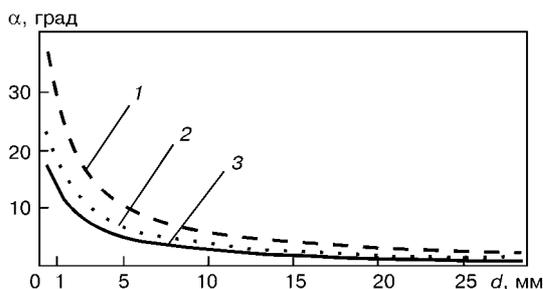


Рис. 3. Зависимость угла наклона поверхности плавления от диаметра площади контакта капли расплава при различных значениях толщины слоя расплава, мкм: 1 — 100; 2 — 150; 3 — 200

который через переходной участок поступает в расплав на торце кристаллизующейся части монокристалла.

Новые приемы выращивания монокристаллов диаметром более 100 мм позволили увеличить расстояние между плавящейся частью исходного стержня и кристаллизующейся частью монокристалла до 25... 27 мм [5].

При плавке индуктором с внутренним диаметром меньше диаметра кристалла (рис. 1) исходный

кристалл на участке плавления образует так называемый конус плавления. На поверхности конуса, обращенной к индуктору, происходят максимальное выделение мощности, а также плавление исходного кристалла. Стекая по конусу, капли попадают в зону расплава.

Условия стекания жидкости по наклонной поверхности подробно рассмотрены в работе [6]. При БЗП кремния стекание расплава характеризуется не только силами поверхностного натяжения кремния, массой образовавшейся капли расплава, но и действующей на эту каплю центробежной силой (рис. 2).

В соответствии с работой [6], силы F_1 , удерживающая каплю на поверхности плавления, и F_2 , обеспечивающая ее стекание, равны

$$F_1 = mgs\sin\alpha,$$

$$F_2 = 2R\Delta\sigma,$$

где R — радиус площади контакта капли с поверхностью плавления; $\Delta\sigma$ — поверхностное натяжение на границе раздела фаз; $\Delta\sigma = \sigma_{т.г} + \sigma_{ж.г} - \sigma_{ж.т}$; $\sigma_{т.г}$ — поверхностное натяжение в системе твердое-газ ($\sigma_{т.г} = 1,617 \cdot 10^{-6}$ Н/м); $\sigma_{ж.г}$ — поверхностное натяжение в системе жидкость-газ ($\sigma_{ж.г} = 0,720 \cdot 10^{-6}$ Н/м); $\sigma_{ж.т}$ — поверхностное натяжение в системе жидкость-твердое ($\sigma_{ж.т} = 0,210 \cdot 10^{-6}$ Н/м); m — масса капли расплава, кг.

При вращении на каплю действует центробежная сила

$$F_3 = m\omega^2r,$$

где ω — частота вращения исходного стержня; s^{-1} ; r — расстояние от оси вращения до центра тяжести капли, м.

Следовательно, условия стекания капли по поверхности плавления при учете действующей на каплю центробежной силы соблюдаются при $F_1 > (F_2 + F_3)$, т. е. $mgs\sin\alpha > (2R\Delta\sigma + m\omega^2r)$. Анализируя полученное соотношение, можно прийти к выводу, что при наличии вращения исходного стержня стекание капли расплава определяется частотой вращения стержня и расположением капли относительно оси вращения. При данной частоте вращения



капли в центральной области стекают в зону расплава быстрее (низкое значение r), чем в периферийной области (значение r приближается к радиусу стержня).

В реальных процессах плавки соблюдение условия $mg \sin \alpha > (2R\Delta\sigma + m\omega^2 r)$ затруднено в связи с тем, что исходные стержни кремния отличаются структурной и примесной неоднородностью. Участки с повышенной концентрацией примеси и плотностью структурных дефектов способствуют значительно большему поглощению высокочастотной энергии, излучаемой индуктором, чем участки с малым количеством примеси и малой плотностью дефектов. При образовании расплава удельное электрическое сопротивление таких участков резко снижается, и выделение в них энергии приводит к интенсивному плавлению.

На поверхности плавления могут образовываться ячейки расплава с радиусом площади контакта капли R примерно 3...5 мм (рис. 2, б). Для выполнения условия стекания капли необходимо обеспечить угол наклона поверхности плавления гораздо больший (рис. 3), чем угол, создаваемый максимально возможной высотой индуктора (рис. 1). Стеkanie капли возможно только при накоплении определенной массы расплава, что приводит к углублению ячейки.

В случае образования нескольких расположенных рядом ячеек и стекания из них расплава между ними возникают острые кромки, прозрачные для принятых рабочих частот индуктора (1). Кромки являются местами интенсивного теплоотвода и не обеспечивают плавление соседних участков исходного стержня кремния.

При постоянном перемещении исходного стержня во время плавки количество нерасплавленного материала увеличивается с образованием острых выступов на поверхности плавления, называемых шпорами. При достижении выступами поверхности индуктора происходят короткое замыкание и аварийное прекращение процесса плавки.

Одновременно с образованием выступов обнаруживается другой неблагоприятный для процесса выращивания монокристаллов эффект, суть которого заключается в следующем. Для стекания капли расплава из образовавшейся ячейки при максимальном угле наклона поверхности плавления, ограниченного максимальной высотой индуктора, необходимо

увеличение массы расплава, что без стекания приводит к увеличению размера капли и нарушению равномерности поступления в зону расплава.

Достигнув критического размера, капля расплава резко стекает (обрывается), зачастую объединяясь с каплями из соседних ячеек. Оторвавшаяся капля может попасть на индуктор, создав условия короткого замыкания, или в зону расплава, резко изменив объем зоны, что приводит к нарушению ее геометрической формы и оптимальных условий кристаллизации монокристалла, или же к прорыву расплава, т. е. к аварийному прекращению процесса выращивания монокристалла.

Выводы

1. Установлено, что при определенной частоте вращения исходного стержня можно удерживать каплю от стекания в зону расплава.
2. Показано, что с увеличением радиуса стержня труднее становится удерживать капли из-за разной скорости стекания в центральной и периферийных областях.
3. Определено, что одним из путей равномерного плавления исходного стержня и стекания в общую зону расплава является формирование ячеек нерасплавленного исходного материала на поверхности плавления при минимальной толщине расплава.

1. Смирнов В. А., Старшинова И. В., Фрязинов И. В. Математическое моделирование процессов выращивания монокристаллов по Чохральскому // Математическое моделирование. Получение монокристаллов и полупроводниковых структур. — М.: Наука, 1986. — С. 40–59.
2. О взаимосвязи гидродинамической устойчивости расплава и радиальной примесной неоднородности в кристаллах / Д. А. Зейналов, И. В. Старшинова, Л. Н. Титюник, М. А. Филипов // Там же. — М.: Наука, 1986. — С. 59–66.
3. Шапков Ю. М. Металлургия полупроводников. — М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по черн. и цв. металлург., 1960. — 212 с.
4. Полупроводниковый кремний: теория и практика производства / Ю. Н. Таран, В. З. Купцова, И. Ф. Червоный и др. — Запорожье: ЗГИА, 2004. — 344 с.
5. Keller W., Muhlbauer A. Floating-Zone Silicon. — New York; Basel: Marcel Dekker Inc., 1981. — 298 p.
6. Плавление кремния при вертикальной индукционной БЗП / И. Ф. Червоный, Т. Н. Нестеренко, Н. Г. Сидоренко, О. П. Головки // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов: Сб. докл. 6-й междунар. конф. (Харьков, 16–21 мая 2005 г.). — Харьков, 2005. — С. 136–139.

Запорож. гос. инж. акад.

Поступила 27.10.2006