

из измерения вольтамперных характеристик в диапазоне напряжений 0–3 В. Мы полагаем, что данный эффект обусловлен плавлением и последующей кристаллизацией поликристаллических слоев SiGe при импульсной лазерной обработке, которая, в целом, способствует повышению структурной однородности слоев SiGe.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Photodetectors: Devices, Circuits and Applications / Ed. by S. Donati. – New York: John Wiley & Sons, 2020. – 464 p.
2. Silicon–germanium receivers for short-wave infrared optoelectronics and communications / D. Benedikovic [et al.] // Nanophotonics. – 2021. – Vol. 10, № 3. – P. 1059–1079.
3. N-type heavy doping with ultralow resistivity in Ge by Sb deposition and pulsed laser melting / C. Carraro [et al.] Appl. Surf. Sci. – 2020. – Vol. 509. – P. 145229 (1-7).

ПРОБЛЕМЫ ВЫРАЩИВАНИЯ ТРУБЧАТЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ ДЛЯ НЕПЛАНАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

А. И. Простомолотов¹, Н. А. Вerezub¹, Т. Т. Кондратенко²

¹⁾ *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, пр. Вернадский 101/1,
119526 Москва, Россия, e-mail: aprosto@inbox.ru*

²⁾ *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, пр. Ленинский 53,
119991 Москва, Россия, e-mail: vkrkt@yandex.ru*

Анализируются процессы термомеханики применительно к существующему и хорошо отлаженному процессу выращивания методом Чохральского поликристаллических сильно дислокационных кремниевых труб большого диаметра для эпитаксиальных реакторов. Отмечается, что для выращивания трубчатых малодислокационных монокристаллов кремния малого диаметра требуется существенная модернизация стандартного теплового узла, которая в данной работе реализуется применительно к установке «РЕДМЕТ-10» для метода Чохральского. С помощью компьютерного моделирования рассчитываются процессы термомеханики в такой модернизированной установке. Характеризуются параметры выращенных трубчатых монокристаллов кремния, оценивается их пригодность для изготовления силовых полупроводниковых приборов по непланарной технологии.

Ключевые слова: монокристалл; кремний; трубы; моделирование; теплообмен.

PROBLEMS OF GROWING TUBULAR SILICON SINGLE CRYSTALS FOR NON-PLANAR POWER ELECTRONICS TECHNOLOGIES

A. I. Prostomolotov¹, N. A. Verezub¹, T. T. Kondratenko²

¹⁾ *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Vernadskii av. 101/1,
119526 Moscow, Russia,*

²⁾ *Lebedev Physical Institute. RAS, av. Leninsky 53, 119991 Moscow, Russia
Corresponding author: A. I. Prostomolotov (aprosto@inbox.ru)*

The processes of thermal mechanics are analyzed in relation to the existing and well-established process of growing polycrystalline highly dislocation silicon tubes of large diameter for epitaxial reactors by the Czochralski method. It is noted that the growth of tubular low-dislocation silicon single crystals of small diameter requires a significant modernization of the standard thermal unit, which is implemented in this work in relation to the «REDMET-10» installation for the Czochralski method. With the help of computer simulation, thermomechanical processes are calculated in such a modernized installation. The parameters of the grown tubular silicon monocrystals are characterized, and their suitability for the manufacture of power semiconductor devices using nonplanar technology is assessed.

Key words: single crystal; silicon; pipes; modeling; heat exchange.

ВВЕДЕНИЕ

Первые практические применения метода Чохральского показаны для высокоскоростного выращивания кремниевых труб большого диаметра [1]. Недостатком таких ростовых процессов являются остаточные напряжения в трубе. При изготовлении на ее основе кремниевого реактора путем сварки или пайки отдельных составных частей последние испытывают локальные температурные воздействия в области места сварки, что приводит к появлению вторичных остаточных термических напряжений. Присутствие напряжений затрудняет механическую обработку труб, снижает их ресурс работы.

В [2] исследовались поля температур и напряжений в таких кремниевых трубах, выращиваемых в тепловом узле установки «ЕКЗ-1600 ЭЛМА». Математическая модель для определения распределения температур в выращиваемой трубе (внутренний диаметр $r_1 = 145$ мм, внешний – $r_2 = 155$ мм) соответствует геометрии реальной установки. Для сравнения полученных данных проведено моделирование распределения температур в трубе с иной геометрией ($r_1 = 75$ мм, $r_2 = 155$ мм). Известные максимальные значения термоупругих напряжений в монокристаллах кремния: в небольших по диаметру кристаллах составляют единицы МПа: 200 мм кристаллах от 13.4 до 16.2 МПа [3]. Для труб 1 и 2 максимальные значения достигаются вблизи фронта кристаллизации (ФК) и составляют 23.1 и 30.9 МПа, соответственно. Затем, на расстоянии 1–2 см, величина напряжений существенно снижается и далее равна не более 1 МПа. Можно предположить, что термоупругие напряжения такой величины вблизи ФК, превышающие предел прочности кремния, способны вызывать образование трещин в выращиваемых трубах.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫРАЩИВАНИЯ ТРУБЧАТЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ МАЛОГО ДИАМЕТРА

В последнее время актуальными стали разработки непланарных технологий на основе монокристаллических труб кремния малого диаметра, предназначенных для изготовления на их основе мощных силовых полупроводниковых приборов [4]. Для преодоления недостатков метода Степанова было предложено выращивать трубчатые монокристаллы кремния методом Чохральского. Выращивание труб малого диаметра (35 мм) сопряжено со значительными трудностями. В [5] использован специально модернизированный тепловой узел ростовой установки «РЕДМЕТ-10». В его стандартную конструкцию были внесены существенные изменения, при этом особенностями ростового процесса являются использование полой цилиндрической мо-

нокристаллической затравки, перераспределение основного теплового потока к расплаву от дна тигля, вращение в одну сторону тигля и трубчатой затравки. Была изготовлена дополнительная графитовая оснастка для теплового узла ростовой установки «РЕДМЕТ-10» (рис. 1), которая позволяет стабильно выращивать полый цилиндрический монокристалл на цилиндрическую затравку.

Устройство для выращивания полых цилиндрических монокристаллов кремния включает вакуумную камеру (на рис. 1 не показана), в которой размещен тепловой узел. Тепловой узел содержит цилиндрический резистивный нагреватель 1, в полости которого размещен полый цилиндрический держатель 2. В верхней части держателя 2 размещен кварцевый плавильный тигель 3 для кремниевого расплава, имеющий плоское дно. Под дном установлена графитовая диафрагма 4. В нижней части стенки держателя 2 выполнены прорезы 5. Параллельно поверхности кремниевого расплава расположен нижний торец полый цилиндрической затравки 6 монокристалла кремния, верхний торец которой закреплен в подвесе 7 механизма вертикального перемещения и вращения (на чертеже не показан). Верхний торец затравки 6 закрыт теплоизоляционным материалом – углеволокном. Тигель 3 экранирован по боковой поверхности с помощью конусного экрана 8. Держатель 2 закреплен на платформе, установленной на цилиндрическом полом водоохлаждаемом штоке 9, соединенном с механизмом вертикального перемещения и вращения (на чертеже не показан). Дно тигля 3 находится на расстоянии 50–80 мм от поверхности платформы. Нагреватель 1, держатель 2, тигель 3, диафрагма 4, затравка 6, экран 8 и шток 9 установлены симметрично относительно общей центральной оси вращения [6]. Сохранен стандартный нагреватель диаметром 160 мм.

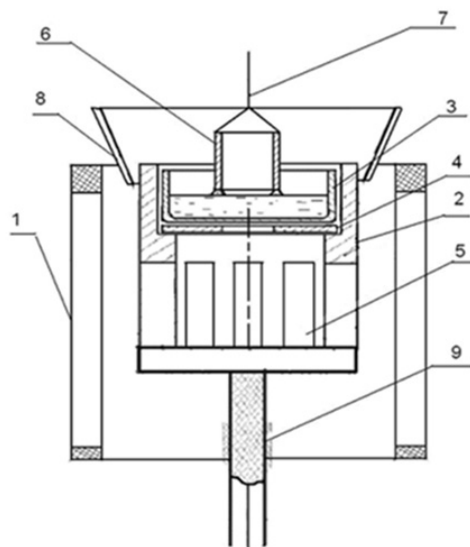


Рисунок 1. Модернизированный тепловой узел «РЕДМЕТ-10» для выращивания трубчатых монокристаллов кремния малого диаметра:
 1 – цилиндрический резистивный нагреватель,
 2 – подставка-держатель, 3 – кварцевый тигель,
 4 – графитовая подставка, 5 – окна в подставке,
 6 – трубчатая затравка, 7 – подвес затравки,
 8 – конусный тепловой экран, 9 – цилиндрический водоохлаждаемый шток

В измененной схеме [7] уменьшен диаметр опорной платформы с 200 до 60 мм. Изготовлен опорный стакан-подставка высотой 150 мм, величина зазора от дна тигля до поверхности платформы составляет от 80 до 100 мм. Величина зазора между дном тигля и поверхностью опорной платформы на штоке может изменяться с помощью сменных графитовых колец в пределах 25 мм. Такое расположение тигля внутри теплового узла предназначено для осуществления донного нагрева в тигле [8]. Величина хода штока для перемещения тигля с расплавом относительно верхнего торца на-

гревателя составляла 110 мм. Боковой конусный экран предназначен для регулировки величины теплового потока, падающего с внешней стороны на затравку и на поверхность растущего кристалла. Затравки с внешним диаметром 35 мм и толщиной стенки 3 мм вырезали механически из монокристаллического слитка кремния, выращенного методом Чохральского с плотностью дислокаций 10^2 см^{-2} . Их подвергали травлению для удаления механически нарушенного поверхностного слоя. Направление роста $\langle 111 \rangle$ совпадало с центральной продольной осью цилиндра. Для изготовления приборов на основе непланарного кремния требовалось выращивать профильный монокристалл наружным диаметром до 4 см с толщиной стенки 1–1.2 см. Скорость вытягивания была в пределах 0.5–0.8 мм/мин. Вращение затравки и тигля со скоростью 6–8 об/мин в одну сторону в процессе роста монокристалла позволяет стабилизировать сечение полого монокристаллического профиля. Загрузка – кремний марки КЭФ-0.02, расход аргона составлял 960 л/час при давлении 1100–1600 Па; процесс затравления кристалла осуществлялся путем перемещения ростовой сборки по вертикали.

Разработана методика измерения и проведены непосредственные измерения температуры в тигле с расплавом с помощью семи вольфрамо-рениевых термопар. Экспериментально определено оптимальное положение конусного экрана относительно тигля с расплавом, этому соответствовала мощность нагревателя в пределах 44–50 кВт и расположение тигля на уровне кромки нагревателя. Проведенные измерения указывают на возможность такого распределения температуры по зеркалу расплава, при котором расплав внутри трубы имеет температуру на несколько градусов выше, чем расплав между внешней стенкой затравки и стенкой плавильного тигля. Такое распределение температуры обеспечивает стабильное сохранение полости внутри растущего кристалла. Для исследования влияния тепловых условий процесса выращивания на геометрические параметры и плотность дислокаций использованы 2 вида конусных тепловых экранов (8, рис. 1) высотой 110 мм:

1. графитовый экран со слоем теплоизолирующего материала (углеволок) толщиной 10 мм на внутренней стороне, при этом температура внутренней поверхности экрана изменялась от 1150°C на нижнем основании конуса до 950°C на верхнем основании («холодный» экран);

2. графитовый экран толщиной 3 мм. Температура внутренней поверхности изменялась от 1350°C на нижнем основании конуса до 1150°C на верхнем основании («горячий» экран).

Для проведения исследований полученные монокристаллы были разрезаны на кольца. Измерения геометрических размеров образца, полученного в условиях роста с «холодным» экраном, показали, что его наружный диаметр постоянный (35 мм), а внутренний уменьшается от 29 мм в начале процесса до 18 мм на длине 60 мм, при этом толщина стенки изменяется от 3 мм до 8.5 мм, соответственно. Если был задействован «горячий» экран, то в процессе выращивания внешний диаметр трубки увеличивается от 35 мм до 42 мм, а внутренний – от 29 мм до 36 мм. Толщина стенки сохраняется постоянной (3–3.5 мм). В выращенных образцах профильных монокристаллов кремния были выполнены исследования плотности дислокаций по их длине и сечению при помощи рентгеновского дифрактометра «ДРОН-3» методом съемки «кривых качания» [9]. Результаты измерений показали, что среднее значение плотности дислокаций в случае «холодного» экрана на 3–4 порядка выше, чем для тру-

бок, выращенных с «горячим» экраном. В комплексе с измерениями плотности дислокаций были проведены измерения удельного электросопротивления (УЭС) образцов 4-х зондовым методом на установке «ВИК УС 07», сопряженной с компьютером. Из результатов измерений следует, что значения УЭС для «холодного» экрана существенно превышают эти значения в случае «горячего» экрана.

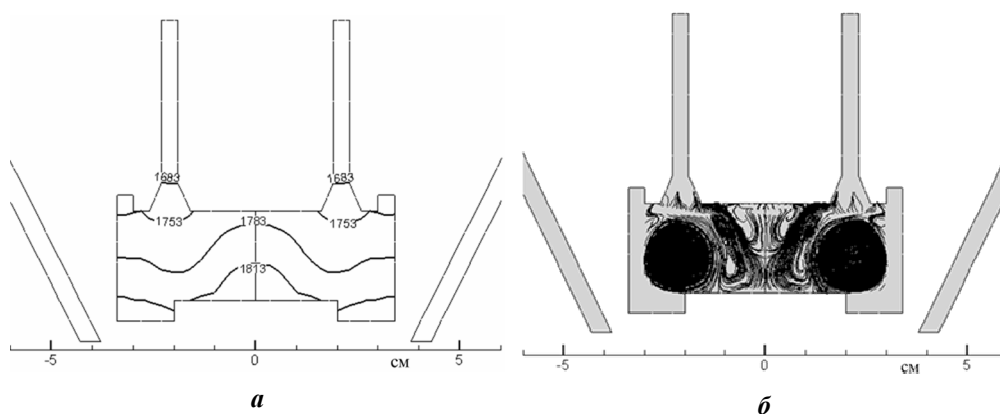


Рисунок 2. Изотермы [K] (а) и траектории течения расплава (б) при верхнем положении ростовой сборки

Для компьютерного моделирования применяется математическая модель метода Чохральского [10] и программный комплекс Crystmo/Net [11]. Результаты параметрических расчетов приведены на Рис. 2, где показаны тепловые поля в ростовой сборке и структура течения расплава. Изотерма $T = 1683$ K соответствует ФК для кремния. В самом нижнем положении ростовой сборки боковые стенки тигля практически не закрыты экраном (2) и значительно прогреваются за счет радиационного потока тепла от нагревателя (1). Однако в самом верхнем положении ростовой сборки (рис. 2) боковая стенка тигля с расплавом полностью закрыта от радиационного потока тепла от нагревателя. При этом преобладает донный нагрев, что заметно по перегреву центра расплава. Вытягивание трубки заданного диаметра происходит устойчиво. Однако при этом, по сравнению с предыдущим вариантом, примерно на 20% увеличивается мощность нагревателя. Можно отметить характерную особенность процессов теплопереноса в тепловом узле «РЕДМЕТ-10», что особенно заметно для верхнего положения ростовой сборки, когда нужный прогрев дна тигля достигается после надлежащего нагрева вершины нижнего штока (4). Процесс нагрева тигля происходит как бы в два этапа: на первом за счет тепловой радиации от нагревателя нагревается вершина нижнего штока (4) до значительной температуры, а на втором этапе тепловая радиация от штока снизу приводит к разогреву дна тигля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный в данной работе выбор метода Чохральского для выращивания монокристаллических труб малого диаметра потребовал существенной модернизации теплового узла стандартной ростовой установки «РЕДМЕТ-10». Его модернизация связана с оптимизацией размещения тигля с расплавом относительно стандартного нагревателя и бокового конического экрана, что потребовало проведения компьютерного моделирования термомеханических процессов и верификации расчетных

данных с соответствующими температурными измерениями с помощью термопар. Выращенные трубки монокристаллического кремния малого диаметра имеют нужные размеры и обладают надлежащими электрофизическими свойствами для изготовления на их основе силовых полупроводниковых приборов по непланарной технологии.

Компьютерное моделирование выполнено по теме государственного задания ИПМех РАН (№ госрегистрации АААА-А20-120011690136-2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Silicon furnace components for microelectronic applications fabricated from shaped silicon tubes / A.A. Alioshin [и др.] // J. Crystal Growth — 1990. — V. 104, № 1.—P. 130—135.
2. Analysis of thermostress state in silicon tubes during its melt growing / A.A. Alioshin, I.D. Epimakhov, I.V. Panfilov, A.I. Prostomolotov // Single Crystal Growth and Heat&Mass Transfer: Fourth Int. Conf., Obninsk (Russia), 24-28 sept. 2001. — V. 3. P. 680—688.
3. Wijaranakula, W. A. Real-time simulation of point defect reactions near the solid and melt interface of a 200 mm diameter Czochralski silicon crystal / W. A. Wijaranakula // J. Electrochem. Soc. — 1993. — V. 140, № 11. — P. 3306—3316.
4. Приборы и технология на основе непланарного кремния / Л.В. Кожитов, Т.Т. Кондратенко, В.В. Крапухин, Т.Я. Кондратенко // Новые материалы. — М.: МИСиС, 2002. — С. 15—184.
5. Перспективные технологии и оборудование для материаловедения, микро- и нанoeлектроники / Л.В. Кожитов // Труды IV Междунар. сем. —Астрахань: АГУ. 20-23 мая 2006 г. — С. 30—31.
6. Способ выращивания полых цилиндрических монокристаллов Si на основе метода Чохральского и устройство для его осуществления / Л.В. Кожитов [и др.] // Патент РФ. — 2007. № 2355831. — 10 с.
7. Получение профильных монокристаллов кремния трубчатой формы / А.П. Блиев [и др.] // Фундаментальные исследования: техн. науки — 2007. — № 12 (часть 3). — С. 519—520.
8. Гаража, Е. В. Конвективный массоперенос в расплаве при выращивании кристаллов методом Чохральского / Е. В. Гаража, Е. Н. Тумаев // Реология и физ.-хим. механика гетерофаз. систем: IV конф. мол. уч. —М.: МГУ. 22-24 июня 2015 г. — С. 107—108.
9. Боуэн, Б.К. Высокора разрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография / Б.К. Боуэн, Д.К. Таннер. — СПб.: Наука, 2002. — 280 с.
10. Вerezub, N. A. Механика процессов выращивания и термообработки монокристаллического кремния / Н. А. Вerezub, А. И. Простомолотов // Изв. РАН: МТТ. —2020. — № 5. — С. 51—63.
11. Prostomolotov, A. Crystmo/Net remote access code for Czochralski crystal growth modelling / A. Prostomolotov, N. Ilyasov, N. Verezub // Science and Technology. —2013. —V. 3, № 2A. — P. 18—25.

ОЦЕНКА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛЛОВ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА

М. С. Русецкий¹, Н. М. Казючиц¹, В. Н. Казючиц¹, В. И. Антонов²

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: rusetsky@bsu.by*

²⁾ *Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: antonov@atomtex.com*

Проведено сравнение сцинтилляционных свойств синтезированного методом высоких давлений и высоких температур (НРНТ) алмаза и промышленного сцинтиллятора на основе ZnS:Ag. Световой выход сцинтилляций от α -частиц в алмазах примерно в 3 раза меньше, чем в ZnS:Ag. Оцененное время затухания люминесценции в