

03,11

Результаты экспериментов по кристаллизации твердого раствора Ge—Si—Sb на космическом комплексе „Союз—Аполлон“ в условиях микрогравитации

© И.Л. Шульпина¹, И.А. Прохоров²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Лаборатория космического материаловедения ИК РАН — филиал ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН, Калуга, Россия

E-mail: iren.shulpina@yandex.ru

(Поступила в Редакцию 18 октября 2018 г.

В окончательной редакции 26 ноября 2018 г.

Принята к публикации 28 ноября 2018 г.)

Рассматриваются объективные факторы, позволяющие эксперименту по выращиванию кристаллов твердого раствора Ge-Si-Sb на космическом комплексе „Союз—Аполлон“ занимать особое место среди множества экспериментов по выращиванию монокристаллов на борту космических аппаратов. При исследовании выращенных на комплексе кристаллов в них была обнаружена поперечная к направлению кристаллизации аномальная и неожиданно высокая ликвация компонентов твердого раствора. Анализ полученных результатов впервые позволил установить причинно-следственную связь аномальной ликвации с особенностями микрогравитации на космических аппаратах. Определение физической природы аномальной ликвации оказало влияние на направление дальнейших исследований, проявившись в углубленном изучении специфических характеристик новой технологической среды, быстром развитии численных методов исследования процессов теплопереноса в расплавах, расширении круга исследуемых кристаллов и методов их изучения. Большой вклад в развитие этого направления был сделан профессором В.С. Земсковым.¹

DOI: 10.21883/FTT.2019.04.47410.321

1. Введение

Важность проблемы получения кристаллов полупроводников с высокой макро- и микрооднородностью структуры и свойств стимулировала проведение всесторонних исследований процессов, ответственных за формирование в них концентрационной неоднородности, и это стало важной частью экспериментов по выращиванию кристаллов в условиях микрогравитации. Успехи в создании космических аппаратов (КА) в 70-х годах прошлого века привели к возможностям проведения технологических экспериментов по выращиванию кристаллов в условиях микрогравитации. В наземных условиях сильная нестационарная термогравитационная конвекция вызывает нестабильность параметров роста кристаллов, что ограничивает возможности получения кристаллов с высокой степенью однородности и совершенства структуры. КА позволяют реализовать условия длительной невесомости, когда ускорение силы тяжести g составляет $(10^{-5} - 10^{-6}) g_0$, где g_0 — ускорение силы тяжести на Земле. Ожидалось, что это обеспечит возможность получения на борту КА кристаллов со свойствами, недостижимыми на Земле.

Результаты первых экспериментов, проведенных в 1973–74 гг. на американской станции „Скайлэб“, как

будто обнадеживали [1,2]. Методом Бриджмена в ампулах были получены кристаллы InSb(Te) с более высокой однородностью и с меньшей плотностью дислокаций, чем у их наземных аналогов. Однако в кристаллах Ge(Ga) по распределению удельного сопротивления была заметна не только продольная, но и поперечная неоднородность. Таким образом, воспроизводимость результатов не достигалась. А в 1975 г. состоялась историческая стыковка в космосе советского корабля „Союз“ и американского „Аполлон“. На образовавшемся космическом комплексе „Союз—Аполлон“ были проведены эксперименты по выращиванию кристаллов твердого раствора Ge—Si—Sb (Институт металлургии АН СССР) и Ge с Ga (Массачусетский технологический институт, США).

Выбор советской стороной твердого раствора Ge—Si—Sb для эксперимента в полете был хорошо аргументирован. В то время этот твердый раствор был уже достаточно изучен и мог быть получен методом вытягивания из расплава, подпитываемого твердым слитком, на специальных установках в лабораторных условиях. Реальная структура кристаллов хорошо поддавалась характеристике рентгенотопографическим методом обратного отражения, а при приготовлении достаточно тонких образцов методом Ланга на просвет [3]. На основе спектроскопии высокого разрешения были разработаны оптические методы определения концентрации Si

¹ К 90-летию юбилею В.С. Земскова.

в Ge [4] и электрофизические методы для Sb. Кроме того, были проведены так называемые имитационные опыты по выращиванию этих кристаллов [5,6]. Целью этих экспериментов была попытка выявить в земных условиях влияние силы тяжести на распределение компонентов в процессе кристаллизации. Кристаллы Ge с 1 at.% Si и 0.001 at.% Sb были выращены тремя вариантами направленной кристаллизации — горизонтальным, когда вектор силы тяжести перпендикулярен направлению кристаллизации, и двумя вертикальными с подачей тепла снизу (при параллельном направлении вектора силы тяжести и направления кристаллизации) и сверху (при их антипараллельном направлении). Сравнение структуры продольных сечений полученных кристаллов и распределения в них Si и Sb показало, что наиболее несовершенными получаются образцы, получаемые горизонтальной кристаллизацией, а наиболее совершенными те, что получались при вертикальной кристаллизации с подачей тепла сверху. Это проявлялось в разной ширине начальной, наиболее нарушенной области кристаллизации, а также в интенсивности проявления микронеоднородности в виде полос роста. Таким образом, было выяснено, что расплав твердого раствора Ge–Si–Sb является гравитационно-чувствительным. В кристаллах, выращенных тремя вариантами направленной кристаллизации на Земле, наблюдалась зависимость совершенства структуры и распределения компонентов по длине кристаллов от направления силы тяжести, которая в земных условиях определяет величину и направление конвекционных потоков в расплаве.

Эта статья посвящена анализу результатов эксперимента по выращиванию кристаллов твердого раствора Ge–Si–Sb, выполненных по программе подготовки и проведения экспериментов на космическом комплексе „Союз–Аполлон“.

2. Условия эксперимента

Плавление и последующая нормальная направленная кристаллизация твердого раствора Ge с 1 at.% Si и 0.001 at.% Sb в идентичных тепловых условиях во время полета космического комплекса и на Земле были включены в программу эксперимента МА-150 „Универсальная печь“ [5]. Исходные кристаллы цилиндрической формы длиной 70–80 mm и диаметром 10 mm, выращенные методом Чохральского в направлении $\langle 111 \rangle$, помещались в кварцевые ампулы, которые откачивались и затем запаивались. Ампулы с кристаллами вставлялись в специальные патроны, а они в многоцелевую электрическую печь. Печь разогревалась до температуры плавления твердого раствора 950°C. Температурный режим печи обрабатывался на Земле так, чтобы в условиях эксперимента исходный слиток расплавился не полностью, а оставшаяся нерасплавленной часть служила затравкой при последующей перекристаллизации твердого раствора. Перед кристаллизацией в течение 1.5 h температура

в печи поддерживалась постоянной для достижения теплового равновесия. Затем происходило контролируемое охлаждение расплава со скоростью 0.45°C/min в направлении кристаллизации.

Печь располагалась в стыковочно-шлюзовом переходном отсеке. Продольная ось модуля совпадала с продольными осями космических кораблей, лежала в плоскости орбиты и была направлена по касательной к орбите. Продольные оси ампул в печи и ось модуля были параллельны. Расстояние от оси модуля до осей ампул составляло 0.5 m, рис. 1 [6]. Полет комплекса проходил на высоте 200 km по орбите, близкой к круговой. Космонавты во время выполнения эксперимента спали, а комплекс совершал колебательное движение вокруг продольной оси и перемещался по высоте в связи с включением двигателей стабилизации и ориентации. Включение двигателей было кратковременным. Микроускорения, связанные с таким движением, изменялись периодически от максимального значения $(3-5) \cdot 10^{-3}g_0$ до минимального значения, близкого к нулю, но своего знака не меняли и были перпендикулярны направлению кристаллизации. Они преобладали над другими составляющими микроускорений. Это очень важная характеристика и особенность космического комплекса „Союз–Аполлон“, рис. 2 [5,6]. Условия проведения

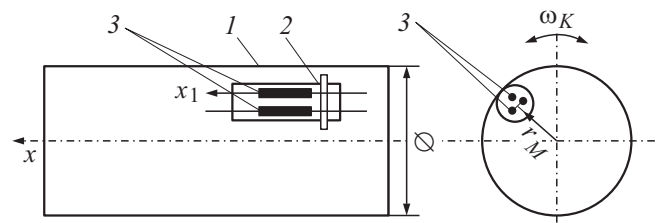


Рис. 1. Схема расположения универсальной печи в стыковочном модуле станции „Союз–Аполлон“: 1 — корпус стыковочного модуля; 2 — универсальная печь; 3 — ампула с образцами сплавов; 4 — ω_k — угловая скорость колебаний модуля вокруг оси x [6].

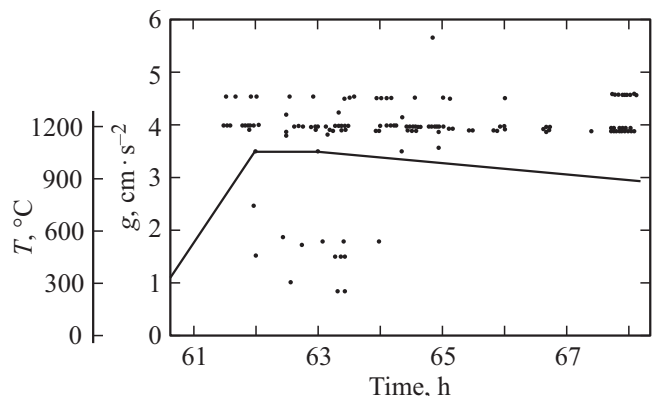


Рис. 2. Изменение ускорения в месте расположения универсальной печи на КА „Союз–Аполлон“ в период проведения эксперимента по кристаллизации твердого раствора. Сплошная линия — изменение температуры печи [6].

эксперимента в данном случае были хорошо известны. Эксперимент „Универсальная печь“ в земных условиях выполнялся в печи-аналоге в идентичных температурных режимах в космическо-ракетном центре НАСА в г. Хантсвилл и Институте металлургии им. А.А. Байкова в Москве.

3. Результаты исследований

По возвращении на Землю были изучены форма слитков и их поверхность в сравнении с наземными аналогами. По внешней форме слитков можно было определить, что один из трех слитков МА-150-16 расплавился полностью. Его конец имел полусферическую форму, никогда не наблюдавшуюся у наземных кристаллов, МА-150-07. Два других слитка имели лишь закругленные концы. В одном из них МА-150-17 сохранилась затравка длиной около 4 мм, а в другом МА-150-18 только очень маленькая часть от нее, рис. 3 [5,6]. Но именно этот слиток по результатам травления имел монокристаллическую структуру, остальные были поликристаллами. Все полетные кристаллы имели характерный поверхностный рельеф в виде вытянутых холмов или гребней, за счет которых происходило касание расплава стенок графитизированных ампул. Для дальнейших исследований слитки препарировались для получения продольных и поперечных сечений в виде пластин. Распределение в кристаллах Si и Sb было измерено в ФТИ им. А.Ф. Иоффе и представлено для поперечных сечений в виде объемных моделей, рис. 4 [7] а для продольных в виде графиков, рис. 5 [6,7]. Распределение Si в поперечных сечениях наземных кристаллов было близко к равномерному, что соответствовало представлениям о нормальной направленной кристаллизации. Однако отклонение в 10–15% все-таки наблюдалось. А в полетных кристаллах была обнаружена резко выраженная неоднородность состава в поперечных сечениях — неожиданное систематическое смещение Si к одной

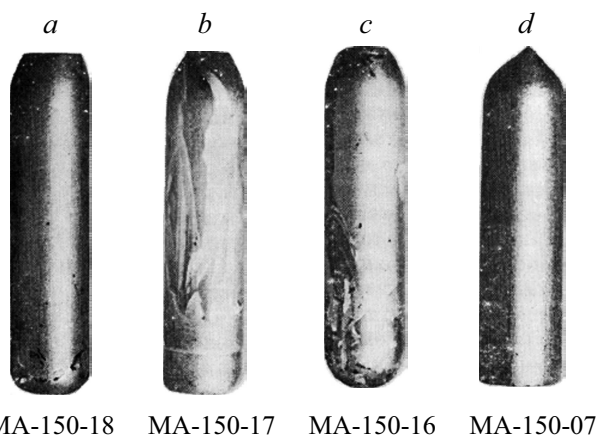


Рис. 3. Внешний вид кристаллов твердых растворов Ge–Si–Sb, полученных в условиях малой гравитации (*a, b, c*) и на Земле (*d*) [5,6].

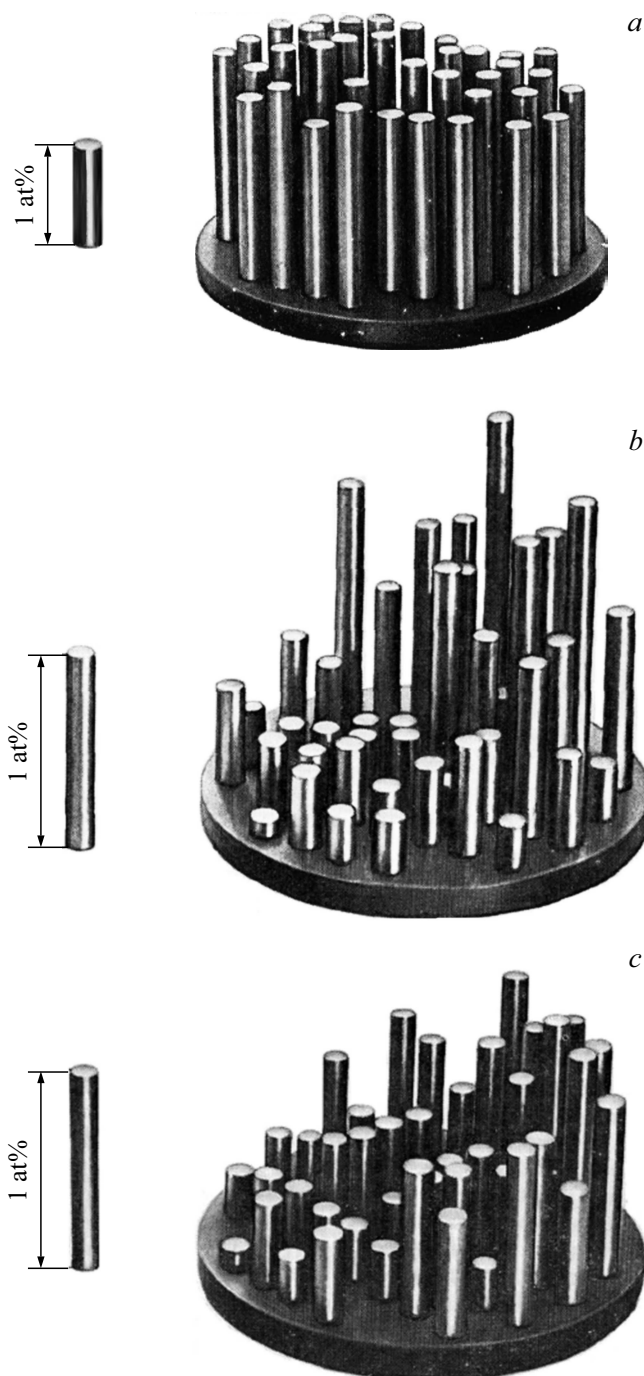


Рис. 4. Объемные модели распределения кремния в поперечных сечениях наземного кристалла (*a*) и полетного в начальной зоне (*b*) и середине (*c*) [7].

из боковых сторон слитков. Это перераспределение наблюдалось по всей длине кристаллов, но особенно выражено в начальной области кристаллизации и ослабевало по мере завершения кристаллизации расплава в ампулах. В кристалле с остатком затравки в области начала кристаллизации содержание Si на диаметрально противоположных краях сечения с максимальным и минимальным содержанием Si отличалось в 8 раз от 0.2

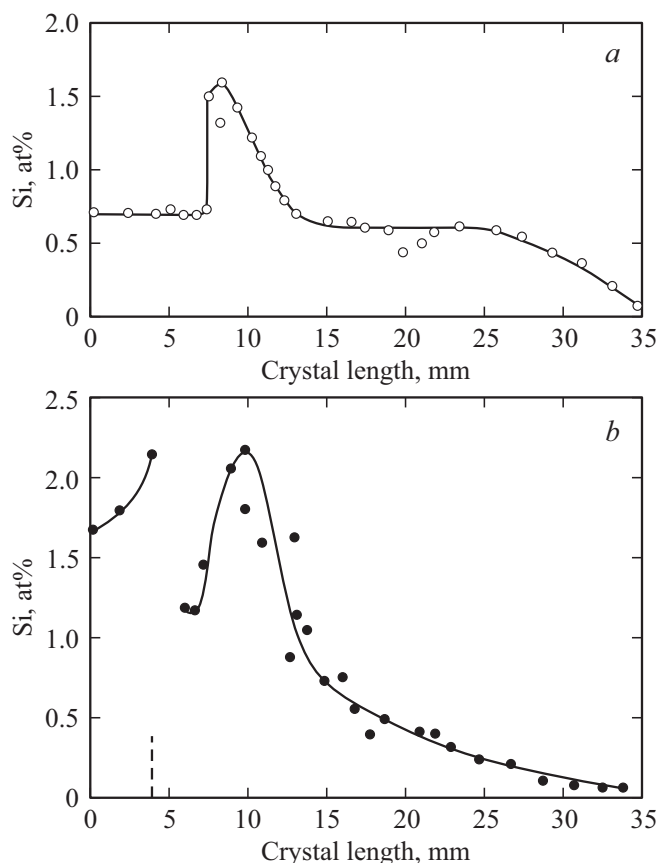


Рис. 5. Распределение кремния по длине кристаллов, полученных на затравку на Земле (а) и в полете (б) [5-7].

до 1.6 at.%, в средней части в 4 раза и минимально в конце слитка. Ослабление неоднородности происходило на фоне общего снижения концентрации Si в поперечных сечениях по мере удаления от начала кристаллизации расплава [5-7].

Распределение Si в продольных сечениях по длине наземного кристалла-аналога отвечало представлениям о нормальной направленной кристаллизации для коэффициента распределения примеси больше 1, рис. 5, а. Начальный участок кривой 1 отражал состав и уровень однородности исходного кристалла для слитка, сохранившего затравку. На границе затравки с расплавом концентрация кремния резко возросла, область начала кристаллизации являлась сильно напряженной, напряжения имели характер упругого сжатия, по мере удаления от затравки они быстро спадали. В кристалле, не сохранившем затравку, напряжения не были обнаружены, распределение кремния за исключением области затравки имело тот же характер.

В полетном кристалле распределение кремния было аномальным, что выразилось, главным образом, в изменении состава в затравке и начальной области кристаллизации, рис. 5, б. В связи с частичным плавлением затравки в ней возросла концентрация кремния, и это произошло не резко, скачком, как в наземном аналоге,

а плавно и на некотором расстоянии от предполагаемой границы перекристаллизации. Одновременно в этой области обнаружены упругие напряжения сжатия, соответствующие увеличению концентрации кремния.

Распределение Sb в поперечных сечениях полетного кристалла тоже носило аномальный характер. Как и в случае Si, концентрация Sb изменялась от одного края сечения к другому. Отношение максимального значения концентрации Sb к минимальному для диаметрально противоположных областей было около 3, рис. 6 [7]. В наземных кристаллах неоднородность распределения Sb была выражена слабо. Важно отметить, что в полетных кристаллах область максимального содержания Sb соответствовала области минимального содержания Si. Неоднородность распределения Sb в поперечных сечениях кристаллов наблюдалась по всей длине слитков и не зависела от того, являлись ли они монокристаллами или поликристаллами [7].

Реальная структура пластин была исследована методами рентгеновской дифракционной топографии и трансмиссионной электронной микроскопии в ФТИ им. А.Ф. Иоффе и металлографии в Институте металлургии им. А.А. Байкова [5-8].

Для структуры полетного кристалла характерно наличие дендритов в начальной зоне кристаллизации и ячеистой структуры в средней части, переходящей далее по длине кристалла в блочную структуру карандашного типа. Такая особенность структуры указывает на наличие концентрационного переохлаждения на фронте кристаллизации в процессе роста кристалла. При этом и дендриты, и ячеистая структура наблюдались лишь с одной стороны поперечных сечений, выражая сильную неоднородность в распределении элементов структуры поперечных сечений полетных слитков. В наземных аналогах неоднородность структуры была гораздо меньше.

Наиболее сильно отличался по структуре от наземного аналога полетный кристалл МА-150-17, сохранивший затравку. Начальная зона перекристаллизации в нем не

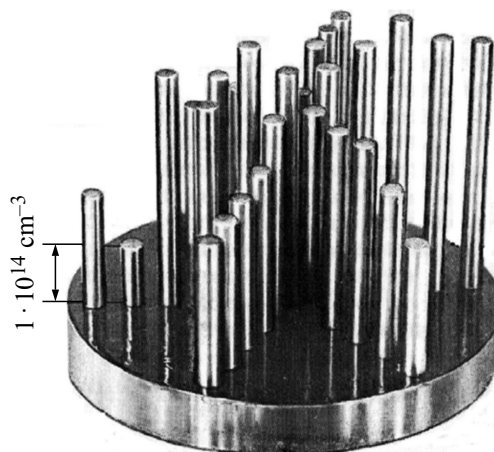


Рис. 6. Объемная модель распределения сурьмы в полетном кристалле [7].

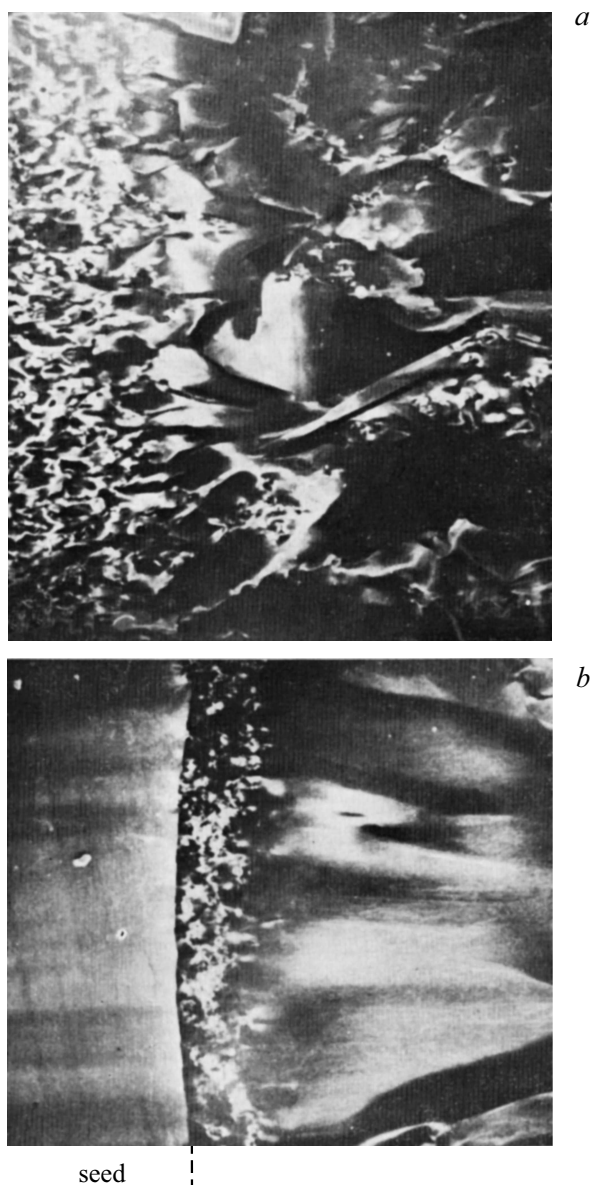


Рис. 7. Реальная структура области фронта кристаллизации полетного (а) и наземного (б) кристаллов. Пунктиром отмечено положение первичного фронта кристаллизации. Рентгеновские топограммы продольного сечения кристаллов [5,6].

имела резкой границы с затравкой, как это характерно для наземных кристаллов, рис. 7 [5–7]. Перекристаллизация начиналась в объеме самой затравки. При этом процесс изменения структуры затравки развивался несимметрично относительно продольной оси слитка. В кристалле можно указать диаметр, вдоль которого наблюдалась наибольшая неоднородность в распределении объемов, подвергнутых плавлению. Ни в одном полетном кристалле не наблюдалось микронеоднородности в виде полос роста. В целом структура полетных кристаллов была существенно неоднородней, чем в наземных кристаллах и коррелировала с распределением в них

компонентов твердого раствора Si и Sb как по длине, так и в поперечных сечениях. Этот вывод подтверждался и при электронно-микроскопическом исследовании кристаллов [6].

Таким образом, в полетных слитках твердого раствора Ge–Si–Sb было установлено несимметричное распределение компонентов в их поперечных сечениях, не зависевшее от того, являлись ли слитки монокристаллами или поликристаллами, а также от кристаллографической ориентации их продольной оси и наблюдавшееся по всей длине слитков. Это означало, что перед кристаллизацией расплав был неоднородным по составу, хотя исходное состояние расплава было однородным. Такой результат противоречил имеющимся представлениям о направленной кристаллизации, не согласовался с ранее полученными результатами на других кристаллах и стимулировал определение сил, приведших к данному явлению. Он привлек внимание исследователей.

Анализ полученных результатов привел к экспериментально установленному факту коллинеарности направления поперечной составляющей ликвации компонентов в кристаллах твердого раствора Ge–Si–Sb и переменного по величине вектора ускорения микрогравитации на борту космической станции „Союз–Аполлон“ и впервые позволил сделать фундаментальное заключение, что в динамических условиях, существующих на борту космических аппаратов, чрезвычайно малая по величине, перпендикулярная к направлению кристаллизации составляющая вектора микрогравитации является причиной нарушения симметрии процесса ликвации компонентов твердого раствора при направленной кристаллизации.

4. Объяснение полученных результатов

Физическая природа обнаруженного явления аномальной ликвации была объяснена впервые в работах [8,9]. В [8] это было сделано путем численного решения нестационарных уравнений естественной конвекции Навье–Стокса с использованием методов численного моделирования гидродинамики и тепломассопереноса в расплаве в условиях микрогравитации. Показано, что ликвация компонентов твердого раствора в поперечных сечениях кристаллов произошла в связи с тем, что в ампулах существовал одновихревой поток расплава ламинарного характера, омывающий фронт кристаллизации. Такой поток возникает при термогравитационной конвекции при наличии градиента температуры под действием на расплав микроускорений, существующих на борту космического аппарата. Двигаясь вдоль фронта кристаллизации, расплав в приграничной области постепенно обеднялся кремнием и обогащался сурьмой в соответствии со значениями их коэффициентов распределения (больше 1 в случае кремния и меньше 1 для сурьмы), и это проявилось в ликвации компонентов в поперечном сечении кристаллов.

Позже в результате гидродинамических исследований [10] было установлено существование ранее неизвестного гидродинамического эффекта образования концентрационной неоднородности в объеме расплава в условиях микрогравитации. В расплаве в зависимости от интенсивности течения в потоке, омывающем фронт кристаллизации, существуют градиенты концентрации не только вдоль, но и поперек направления роста кристалла.

В [11] была предложена аналитическая модель процесса ликвации легирующего компонента в поперечном сечении кристалла для стационарного режима направленной кристаллизации при наличии перед фронтом кристаллизации ламинарного одновихревого потока расплава. Модель учитывала характерную скорость движения расплава, скорость кристаллизации, диаметр слитка, коэффициенты распределения и диффузии легирующего компонента. Она удовлетворительно описывала установившуюся неоднородность распределения Si и Sb в поперечных сечениях слитков под действием микроускорений, хотя количественного совпадения с экспериментальными результатами достигнуто не было [12].

5. Сравнение с результатами технологических экспериментов на КА „Фотон“

С целью подтверждения экспериментально установленной причинно-следственной связи особенностей ликвации компонентов в кристаллах с особенностями микроускорений на борту космического комплекса „Союз–Аполлон“ специалистами Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова под руководством профессора В.С. Земскова была проведена серия экспериментов по направленной кристаллизации твердых растворов Si, Sb, In, Ga в Ge методом Бриджмена. Эксперименты выполнялись на искусственных спутниках Земли серии „Фотон“. Размеры ампул и температурные режимы были такими же, как на космическом комплексе „Союз–Аполлон“. Распределение примесей в полученных кристаллах было неоднородным, но выраженным слабее, чем на „Союз–Аполлон“, а направление ликвации в поперечных сечениях кристаллов изменялось по их длине. Это объяснялось сложным характером изменения остаточных микроускорений по величине и направлению на КА „Фотон“ в сравнении с „Союз–Аполлон“ [13], на котором микроускорения действовали всегда в одном направлении и направление ликвации не изменялось. Затем на КА „Фотон“ были проведены эксперименты по выращиванию кристаллов InSb(Te) методом бестигельной зонной плавки, в результате которых было установлено влияние медленно изменяющегося по направлению и величине вектора микроускорений на изменение течений и тепломассопереноса в расплаве. При этом обнаружено практически полное совпадение частот периодичности в слоистом

распределении легирующей примеси по длине кристаллов с частотами изменения квазипостоянных микроускорений, действующих на расплав в полете КА „Фотон“. Квазипостоянные микроускорения гравитационной и инерционной природы изменяли свою величину и/или направление с частотой не более чем 10^{-3} Hz, их величина составляла от 10^{-5} до $10^{-7}g_0$. Их вектор был переменным по величине и направлению, не совпадал с направлением кристаллизации расплава, и это можно считать одной из важнейших причин появления слоистой примесной микрон неоднородности (полос роста), а также асимметричной макрон неоднородности кристаллов по диаметру.

Технологические эксперименты по выращиванию кристаллов в условиях микрогравитации продолжались. Они были расширены за счет выращивания кристаллов многих полупроводниковых соединений GaSb, GaAs, CdTe и др. Были расширены и методы исследования кристаллов применением плосковолновой рентгеновской топографии, ядерного резонанса, синхротронного излучения.

6. Заключение

В целом проведение технологических экспериментов в условиях микрогравитации показало, что неконтролируемые квазипостоянные остаточные микроускорения с амплитудой более $10^{-7}g_0$, медленно меняющиеся по величине и направлению, являются теми неконтролируемыми причинами, которые приводят к непредсказуемым изменениям в гидродинамических процессах в расплавах. Кристаллизация как гетерогенная реакция чувствительна к этим изменениям. Анализ проведенных экспериментов привел к фундаментальному заключению: чрезвычайно малая по величине, перпендикулярная к направлению кристаллизации составляющая вектора ускорения силы тяжести является причиной нарушения симметрии процесса сегрегации примесей при направленной кристаллизации расплава [13]. Зависимость сегрегации примесей от остаточных микроускорений свидетельствовала о преобладании в расплавах конвективного массопереноса над диффузионным.

Остаточные микроускорения на КА практически не устранимы. С ними можно бороться, но это сложная техническая проблема. В целом технологическая среда, реализуемая на КА в условиях полета, оказалась сложнее имевшихся о ней представлений.

В настоящее время отношение к технологическим экспериментам в условиях микрогравитации и даже их цели несколько изменились. Считается, что для полупроводников цель экспериментов в условиях микрогравитации состоит не столько в создании космической технологии, сколько в получении новых знаний о процессах кристаллизации для совершенствования земных технологий, а также в получении эталонных образцов кристаллов в случае реализации диффузионного массопереноса без

внешних возмущений [14]. Определенные успехи в этой области уже есть. Ряд усовершенствований земных технологий на основе проведенных исследований привел к реализации условий, близких к диффузионному массопереносу при выращивании кристаллов GaSb(Te) с повышенными макро- и микрооднородностями [15]. Характеристики термоэлектрических преобразователей, выполненных на подложках из кристаллов с наиболее высокой однородностью свойств превосходили аналогичные характеристики других образцов. Наибольший интерес к выращиванию кристаллов на борту КА сейчас наблюдается к белкам (протеинам) [16].

С позиции сегодняшнего дня трудно переоценить значение эксперимента „Универсальная печь“ с твердым раствором Ge–Si–Sb на космическом комплексе „Союз–Аполлон“. Он признан классическим в плане понимания влияния остаточных микроускорений на борту КА на расплавы полупроводников [17]. Объяснение его результатов оказало влияние на дальнейшие эксперименты и исследования, выразившееся в углубленном изучении характеристик новой технологической среды, реализуемой в полете на КА, в обязательном оснащении КА акселерометрами, быстром развитии численных методов расчета массопереноса и моделировании на их основе будущих технологических экспериментов по выращиванию кристаллов, расширению типов выращиваемых кристаллов и методов их исследования.

Список литературы

- [1] A.F. Witt, H.C. Gatos, M. Lihtensteigeretal. J. Electrochem. Soc.: Solid State Sci. Technology **122**, 267 (1975).
- [2] J.T. Yue, F.W. Voltmer. J. Cryst. Growth. **29**, 329 (1975).
- [3] З. Чики, И.Л. Шульпина, И.Н. Белокурова. ФТТ **16**, 3700 (1974).
- [4] В.И. Сафаров, А.Н. Титков. ФТТ **14**, 458 (1972).
- [5] V.S. Zemskov, V.N. Kubasov, I.N. Belokurova, A.N. Titkov, I.L. Shulpina, V.I. Safarov, N.B. Guseva. In: Apollo-Soyuz Test Project. Summary Science Report. National Aeronautics and Space Administration (1977). V. 1. P. 539–554.
- [6] Л.И. Иванов, В.С. Земсков, В.Н. Кубасов, В.Н. Пименов, И.Н. Белокурова, К.П. Гуров, Е.В. Демина, А.Н. Титков, И.Л. Шульпина. Плавление, кристаллизация и формообразование в невесомости. Полупроводниковые материалы. Наука, М. (1979). Ч. 2. 255 с.
- [7] В.С. Земсков, А.Н. Титков, И.Н. Белокурова, И.Л. Шульпина, В.И. Сафаров, П.И. Кутовый. Физика и химия обработки материалов **5**, 135 (1977).
- [8] В.И. Полежаев, А.И. Федюшкин. Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа **3**, 11 (1980).
- [9] S.A. Nikitin, V.I. Polezhaev, A.I. Fedushkin. J. Cryst. Growth. **52**, 471 (1981).
- [10] В.И. Полежаев, М.С. Белло, Н.А. Вerezуб, К.Г. Дубовик, А.П. Лебедев, С.А. Никитин, Д.С. Павловский, А.И. Федюшкин. Конвективные процессы в невесомости. Наука, М. (1991). 240 с.
- [11] В.С. Земсков, И.Н. Белокурова, Д.М. Хавжу. Физика и химия обработки материалов **6**, 75 (1985).
- [12] И.Н. Белокурова, В.С. Земсков, А.Н. Титков, Д.М. Хавжу, В.В. Федоров. Физика и химия обработки материалов **6**, 61 (1990).
- [13] В.С. Земсков, М.Р. Раухман, В.П. Шалимов, А.В. Егоров, А.С. Сенченков, В.В. Сазонов. Космонавтика и ракетостроение. **4**, 49, 18 (2007).
- [14] И.Л. Шульпина, Б.Г. Захаров, Р.В. Парфеньев, И.И. Фарбштейн, Ю.А. Серебряков, И.А. Прохоров. ФТТ **54**, 1264 (2012).
- [15] Ю.А. Серебряков, В.С. Сидоров, И.А. Прохоров, Е.Н. Коробейникова, В.Н. Власов, В.К. Артемьев, В.И. Фоломеев, И.Л. Шульпина, Н.А. Паханов. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **7**, 49 (2014).
- [16] В.И. Стрелов, И.П. Куранова, Б.Г. Захаров, А.Э. Волошин. Кристаллография **59**, 864 (2014).
- [17] К.С. Елкин, А.И. Иванов, Л.О. Незнамова, В.О. Прудкогляд. Перспективы создания вакуумных и гравитационно-чувствительных технологий, использующих условия космического полета на околоземных орбитах. Исследование гравитационно-чувствительных явлений на борту отечественных космических аппаратов. „Возрождение“, М. (2013). 302 с.

Редактор Д.В. Жуманов