

Раздел V. Моделирование сложных систем

УДК 621.315.592

С.П. Малюков, В.И. Зайцев, С.Н. Нелина

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ЭЛЕКТРОПЕЧАХ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ЛЕЙКОСАПФИРА МЕТОДОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Структурное совершенство монокристаллов, выращиваемых искусственным путем, зависит от условий выращивания, создаваемых в кристаллизационной камере. С целью получения информации о тепловых условиях выращивания монокристаллов лейкосапфира было проведено детальное исследование температурного поля в камере и в системе расплав – кристалл лейкосапфира.

Температурное поле; рост; расплав; монокристалл; сапфир.

S.P. Malyukov, V.I. Zaycev, S.N. Nelina

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN CRYSTAL OF SAPPHIRE GROWTH BY HORIZONTAL DIRECTED CRYSTALLIZATION

The structural perfection of crystals growth by artificial way depends on growth conditions that created into crystallization chamber. The temperature field in the chamber and in the melt – crystal system was detail investigate to achieve information about thermal conditions of sapphire crystals growth.

Temperature field; growth; melt; crystal; sapphire.

Структурное совершенство монокристаллов, выращиваемых искусственным путем, зависит от условий выращивания, создаваемых в кристаллизационной камере, которые, в свою очередь, определяются конструкцией теплового узла и технологическими режимами роста. Для разработки и корректировки технологических режимов выращивания монокристаллов методом горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК), а также для возможности усовершенствования конструкции теплового узла необходимо иметь представление о распределении температуры в кристаллизационной камере в процессе выращивания [1].

С целью получения полной информации о тепловых условиях в тепловом узле кристаллизационной печи типа СЗВН было проведено детальное исследование температурного поля в системе расплав – кристалл и на всех, наиболее важных конструктивных элементах теплового узла электропечи. Первая серия экспериментов была проведена с выращенными кристаллами лейкосапфира, которые размещались в зоне отжига теплового узла таким образом, что хвостовая часть кристалла в молибденовом контейнере располагалась на выходе из нагревателя (т.е. совпадала со срезом крайнего правого витка нагревателя). Это положение кристалла соответствует окончанию стадии кристаллизации и началу стадии отжига. Для исследования формирования температурного поля в тепловом узле, а также величины перепада темпе-

ратуры по толщине кристалла на верхнем внутреннем экране и между контейнером и поддоном было установлено 8 вольфрам-рениевых термопар. Схема теплового узла и распределение термопар в нем представлены на рис. 1.

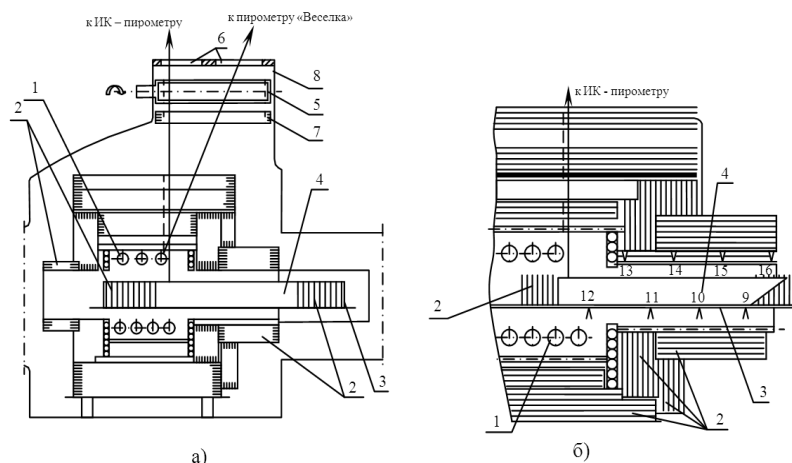


Рис. 1. Конструкция теплового узла установок «СЗВН-175» для экспериментальных исследований температурных полей: 1 – нагреватель; 2 – пакеты экранной изоляции; 3 – молибденовый поддон; 4 – контейнер с кристаллом; 5 – поворотный экран; 6 – смотровое окно из CaF_2 ; 7 – пакет поперечных экранов; 8 – дополнительный прямоугольный патрубок, 9-16 – термопары

Измерения проводились следующим образом. По достижении стационарного режима на определенном уровне мощности нагревателя температура на дне контейнера и экране фиксировалась по термопарам с помощью цифрового вольтметра В-7-23. Затем переходили на следующий уровень мощности. Измерения проводились на 5 уровнях мощности нагревателя от 10 до 27 кВт. При достижении 27,1 кВт хвостовая часть кристалла начинала плавиться, и в этот момент определялся сигнал пирометра на границе раздела фаз, то есть в каждом эксперименте определялась опорная точка градуировочной кривой – точка плавления лейкосапфира. Измерения проводились на двух кристаллах размером 35x175x250 мм и 35x210x350 мм.

На рис. 2 представлены температурные распределения на поверхности кристалла по его длине. Кривые 1-4 относятся к кристаллу, размером 35x175x250 мм, а кривые 1', 3' – к кристаллу размером 35x210x350 мм. Из приведенных графиков видно, что с ростом мощности характер кривых практически не изменяется. Однако при изменении размера кристалла (при переходе к большему размеру) характер температурного поля заметно меняется. При одном и том же уровне мощности величина температурного градиента в средней части большего кристалла оказывается выше, тогда как в носовой и хвостовой частях кристалла кривые температурного распределения подобны друг другу и отмечается лишь общее снижение температурного уровня на всей длине кристалла. Если принять, что среднее интегральное поглощение лейкосапфира K при данных температурах составляет $\sim 0,28 \text{ см}^{-1}$ [2], то видно, что наиболее существенное изменение температурного поля приходится на область, где достигаются условия оптически толстого слоя, т.е.

$K_d > 1$ ($d > 40$ мм) в направлении выращивания кристалла. В конкретных условиях при длине кристалла 320 мм носовая его часть выходит из патрубка на 50 мм, что приводит к резкому снижению его температуры и вследствие высокой прозрачности лейкосапфира, возрастает радиационный поток через кристалл.

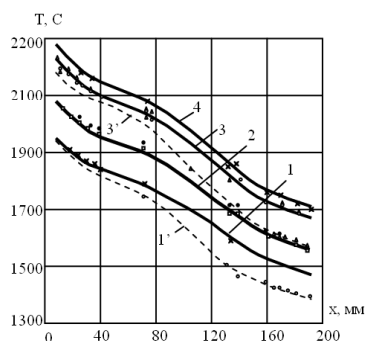


Рис. 2. Температурное распределение на поверхности кристалла лейкосапфира в зоне отжига: 1-4 – размеры кристалла 15x170x220; 1'-3' – размеры кристалла 25x170x320; 1,1' – 15,3 кВт; 2 – 19,5 кВт; 3;3' – 23,5 кВт; 4 – 27 кВт

Аналогичные изменения для кристаллов различного размера наблюдаются и в температурном распределении по дну контейнера и по верхнему экрану зоны отжига (рис. 3). Таким образом, подтверждается гипотеза о том, что в технологическом процессе ГНК закристаллизовавшаяся часть лейкосапфира работает как светопровод и определяющим является радиационный поток тепла по кристаллу в направлении выращивания.

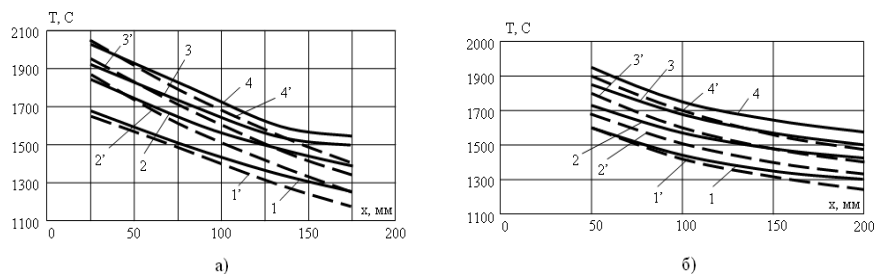


Рис. 3. Температурное распределение а) по дну контейнера и б) по внутренней поверхности экрана в зоне отжига в зависимости от мощности нагревателя. 1-4 – размеры кристалла 15x175x220 мм; 1'-4' – размеры кристалла 25x175x320 мм; 1, 1' – 10,81 кВт; 2, 2' – 15,30 кВт; 3, 3' – 23,5 кВт; 4, 4' – 27,5 кВт

Проведена также серия экспериментов с целью определения температуры нагревателя и ее изменения в зависимости от положения контейнера в тепловом узле, то есть влияние рабочего теплового пространства печи на условия теплообмена, а также выявления взаимосвязи температуры нагревателя с температурой изделия (шихта, расплав лейкосапфира, кристалл). Методика измерений сводилась к следующему. В тепловой узел установки (СЗВН-155) загружали контейнер с боем лейкосапфира. Контейнер устанавливали таким образом, что его хвостовая часть была на уровне крайнего правого витка нагревателя (см. рис. 1). На патрубке кол-

пака устанавливали цветовой пирометр, который мог перемещаться в горизонтальном направлении.

Температуру на поверхности кристалла измеряли с помощью ИК – пирометра частичного излучения. При достижении заданной мощности нагревателя давали выдержку до установления стационарного режима и измеряли цветовую температуру крайнего правого витка нагревателя и температуру на поверхности шихты непосредственно у крайнего правого витка нагревателя. Далее осуществляли переход на следующий уровень мощности и так до плавления боя кристаллов. На рис. 4 приводятся значения действительной температуры нагревателя, из которого видно, что с ростом мощности нагревателя его температура (кривая 1) и температура шихты (кривая 2) увеличивается примерно одинаково, причем, разница этих температур составляет $\sim 200-210^\circ\text{C}$. Это соотношение сохраняется до плавления шихты при мощности нагревателя 29,5 кВт.

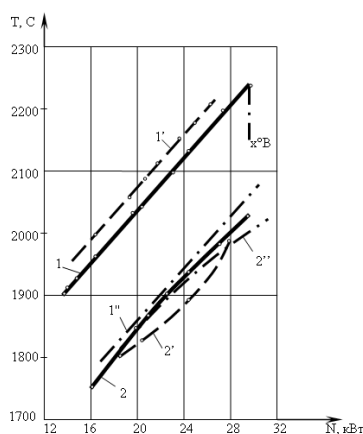


Рис. 4. Зависимость температуры нагревателя (1) и температуры на поверхности шихты (2) от мощности нагревателя (1); 2 – в стационарном режиме, 1'; 2' – при подъеме мощности со скоростью 18,6 кВт/ч, 1''; 2'' – при снижении мощности со скоростью 18,6 кВт/ч)

При этой мощности нагревателя (т.е. в процессе плавления лейкосапфира) зафиксирована температура на нагревателе и на поверхности шихты до установления стационарного режима. Измерения показали, что при этом вначале происходит резкое снижение температуры нагревателя (50°C за 10 мин) при относительно небольшом увеличении температуры расплава (15°C за 10 мин).

Далее процесс замедляется и в стационарном состоянии перепад температур на нагревателе и шихте составляет 100°C . Очевидно, что это связано с поглощением теплоты фазового перехода при плавлении лейкосапфира, а также изменением оптических характеристик лейкосапфира при плавлении. При дальнейшем увеличении мощности нагревателя эффект снижения температуры повторяется, правда в меньшей степени. Это происходит вследствие расширения зоны расплава, то есть расплавления новых порций шихты.

Установлена взаимосвязь между мощностью нагревателя, его температурой и температурой на поверхности шихты непосредственно у крайнего витка нагревателя при изменении мощности нагревателя со скоростью 18,6 кВт/ч. Эти данные представлены на рисунке (см. рис. 4) (кривые 1', 2'). Изменение температур на-

гревателя при этом происходит по линейному закону, температура же на поверхности шихты растет медленно из-за большой теплоемкости лейкосапфира и разница в температурах достигает 260° при $N=27,5$ кВт. При охлаждении выращенного кристалла, имеющего более высокую теплоемкость по отношению к теплоемкости нагревателя, температура нагревателя оказывается существенно ниже (кривая 1'), кристалл остывает медленнее (кривая 2'), и разность температур между ними уменьшается до 10° при $N=20$ кВт.

В работе исследовалось также влияние положения контейнера относительно нагревателя на его температуру (температуру крайнего правого витка) при проплавлении шихты и кристаллизации лейкосапфира при постоянной мощности нагревателя. Каждый раз при перемещении контейнера влево в нагреватель, температура нагревателя уменьшалась, что связано с проплавлением новых порций шихты. Однако в меньшей степени, так как при этом увеличивается температура расплава, а, следовательно, увеличивается и тепловой поток из зоны расплава, который в какой-то степени компенсирует тепловой поток от нагревателя на плавление шихты. При перемещении контейнера вправо от нагревателя (90-100 мм), то есть при кристаллизации лейкосапфира наблюдалась обратная картина: температура крайнего витка нагревателя возрастала на $35-40^\circ$ С при одновременном уменьшении температуры расплава на 20° С. В этом случае происходит выделение стефановского тепла в процессе кристаллизации материала, которое и «подогревает» нагреватель. На рисунке (см. рис. 4) приведены температуры нагревателя и кристалла (или расплава) в точке непосредственно около крайнего правого витка нагревателя в процессе кристаллизации лейкосапфира со скоростью 8 мм/ч при постоянной мощности нагревателя. Полученные результаты подтверждают высказанные выше предположения о характере влияния процесса плавления и кристаллизации на температуру нагревателя.

Из полученных результатов эксперимента наглядно видно, что на температуру нагревателя оказывает влияние целый ряд факторов, таких как положение контейнера в тепловом узле относительно нагревателя, вид шихты в контейнере и, как следствие, условия процесса ее проплавления и кристаллизации.

Выводы. Размер получаемого кристалла строго определяет размеры теплового узла. Кроме того, невозможно выращивание кристаллов различной длины по одной и той же технологической программе.

Процесс предплавильного нагрева установки должен осуществляться либо с малой скоростью поднятия мощности (практика показывает – 2,5-3 кВт/ч), либо, при использовании быстрого нагрева (10-16 кВт/ч) установки, перед кристаллизацией необходима выдержка установки (около 2 часов для теплового узла из Мо) при предполагаемом режиме плавления шихты. Это необходимо для стабилизации параметров теплового узла во избежание перегрева расплава в результате значительного превышения мощности, подаваемой на нагреватель для получения расплава.

Процесс кристаллизации ведется по программе, предусматривающей изменение мощности на протяжении кристаллизации в зависимости от положения контейнера относительно нагревателя [3], так как на различных этапах роста монокристалл ведет себя по-разному. С увеличением длины выращенного кристалла, увеличивается количество отводимого тепла через него, что также способствует общему снижению температуры нагревателя, поэтому для поддержания постоянных условий роста необходимо увеличение мощности нагревателя.

Быстрое снижение температуры нагревателя в процессе остывания приводит к значительному перепаду температур между кристаллом и окружающей средой и вызывает растрескивание кристалла уже на этапе охлаждения. Поэтому необходим определенный режим снижения мощности нагревателя учитывающий теплопроводность и размеры выращенного кристалла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Багдасаров Х.С., Горяинов Л.А., Белых И.Г.* Тепло- и массоперенос при выращивании монокристаллов направленной кристаллизацией. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 224 с.
2. *Лингарт Ю.К., Петров В.А., Тихонова Н.А.* Оптические свойства лейкосапфира при высоких температурах. 1. Область полупрозрачности // Теплофизика высоких температур. – 1982. – Т. 20, Ч. 1. – С. 872-880.
3. *Малюков С.П., Нелина С.Н.* Влияние изменения мощности нагревателя на качество монокристаллов лейкосапфира, выращиваемых методом горизонтально – направленной кристаллизации // 14-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2007»: Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2007. – С. 117.

Малюков Сергей Павлович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: kes@fep.tsure.ru.

347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

Тел.: 88634371603.

Кафедра конструирования электронных средств; заведующий кафедрой.

Malyukov Sergey Pavlovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: kes@fep.tsure.ru.

2, Shevchenko street, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634371603.

Department of Electronic Apparatuses Design; Department chair.

Зайцев Владимир Иванович

ООО «Завод «Кристалл».

E-mail: wonderkristall@narod.ru.

347900, г. Таганрог, ул. Лесная Биржа, 6.

Тел.: 88634383501.

Конструктор.

Zaycev Vladimir Ivanovich

Zavod Kristall Co. Ltd.

E-mail: wonderkristall@narod.ru.

6, Lesnaya Birzha street., Taganrog, 347900, Russia.

Phone: 88634383501.

Designer.

Нелина Светлана Николаевна

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: nelina76@mail.ru.

347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

Тел.: 88634371603.

Кафедра конструирования электронных средств; аспирантка.

Nelina Svetlana Nikolaevna

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: nelina76@mail.ru.

2, Shevchenko street, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634371603.

Department of Electronic Apparatuses Design; postgraduate student.

УДК 681.51.01

Е.Н. Целигорова

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОБАСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В статье рассматривается моделирование нестационарной системы управления с получением передаточной функции корректирующего устройства, обеспечивающего заданный переходный процесс на протяжении всего времени функционирования системы управления. Используется модифицированный метод корневого годографа, позволяющий строить годограф для передаточной функции с интервальными значениями коэффициентов.

Нестационарная система управления; корневой годограф; переходный процесс; передаточная функция с интервальными значениями коэффициентов; робастная устойчивость.

E.N. Tseligorova

MODELING ROBUST STABILITY NONSTATIONARY AUTOMATIC CONTROL

The article deals with simulation of nonstationary control systems to obtain the transfer function correcting device of a given transition process for as long as the operation management system. Used a modified method of the root hodograph, allowing cost locus for the transfer function with interval values of the coefficients.

Time-varying control system; root locus; the transition process; the transfer function with interval values of the coefficients; robust stability.

Введение. Исследование нестационарных систем как объектов управления достаточно сложная задача, обусловленная тем, что получаемая система дифференциальных уравнений является нелинейной. Для преодоления возникающих при этом математических трудностей линеаризуют систему нелинейных дифференциальных уравнений. Если при этом коэффициенты полученной системы уравнений изменяют свои значения по времени в достаточно малых величинах, то это позволяет использовать широко применяемый метод «замороженных» коэффициентов, привести систему дифференциальных уравнений к алгебраическим и исследовать систему, используя аппарат передаточных функций.

Целью данной работы является синтез передаточной функции корректирующего устройства, обеспечивающего заданный переходный процесс на протяжении всего времени работы.

Объект исследования. В качестве примера нестационарной системы рассмотрим некоторую систему автоматического управления с переменными коэффициентами.