

циента преломления структуры и значительному искажению волнового фронта, что снижает оптическое качество кристалла. Для уменьшения величины искажения волнового фронта мы применяли: «мягкий» отжиг кристаллов при высоких температурах, что способствовало снятию термических напряжений структуры; стабильное поддержание температуры расплава при выращивании кристаллов, что уменьшало примесную полосчатость; создавали условия выращивания, при которых примесь равномерно распределялась по длине кристалла.

В результате проведенных исследований нами была разработана технология получения лазерных кристаллов: $\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$, $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$, $\text{Mg}_2\text{SiO}_4:\text{Cr}^{4+}$, $\text{BeAl}_6\text{O}_{10}:\text{Cr}^{3+}$ высокого оптического качества, их суммарные оптические потери составляли $0,001\text{см}^{-1}$, искажение волнового фронта на длине кристалла – 120 мм было равным $0,5-0,7 \lambda$ ($\lambda=632,8\text{нм}$).

Наши кристаллы $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ использовались в европейском проекте, в установке для получения термоядерного синтеза.

Список литературы

1. T.Maiman, Nature 187(1960)493
2. J.E.Geusic et al., Yttrium gallium and gadolinium garnets. Appl.Phys. Lett. 4(10) (1964) 182.
3. P.Sorokin, M.J.Stevenson. Phys.Rev.Lett. 5(1960) 557.
4. В.Н. Матросов, Г.В. Букин, А.А.Годовиков. Способ получения монокристаллов. А.С. №607362, 1976, 5с.
5. V.Petrice, S.K.Gayen, R.R. Alfano et al. Appl.Phys.Lett., 1988, v.52, №13, p.1040-1042.
6. P.F. Multon. Ti-Doped Sapphire Tunable Solid-State Laser. "Optics News", 1982, vol.8, №6, p.9.
7. В.Н. Матросов, А.И. Алимбиев, Т.А. Матросова и другие. Фазовая диаграмма $\text{BeO}-\text{Al}_2\text{O}_3$, выращивание и спектроскопические свойства кристаллов $\text{BeAl}_6\text{O}_{10}:\text{Cr}^{3+}$ (Ti^{3+} , Ni^{2+}). Тезисы докладов IX Национальной конференции по росту кристаллов 16-20 октября 2000г., Москва, с.53.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ФОРМОЙ ФРОНТА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Матросов В.Н., Матросова Т.А., Пестряков Е.В.

*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь,
info@solix-crystal.com*

Фронт кристаллизации (ФК) – это граница раздела двух фаз: жидкой (расплав) и твердой (кристалл), которая образуется при выращивании кристаллов. Все важные процессы формирования структуры кристалла происходят на этой границе, поэтому очень важно знать не только форму этой границы, но и целенаправленно управлять ею на протяжении всего технологического процесса выращивания кристалла. До недавнего времени считалось, что если на протяжении всего процесса поддерживать постоянным диаметр кристалла, то можно получить кристаллы высокого оптического качества. Были созданы системы, поддерживающие постоянным диаметр кристалла, но качество кристаллов не улучшилось. Дальнейшие исследования показали, что очень важно контролировать форму ФК и управлять ею. В процессе выращивания кристалла ФК может быть: выпуклым, плоским и вогнутым. В зависимости от формы ФК изменяется коэффициент распределения примеси в кристалле, что вызывает поперечную полосчатость. На примесных полосах изменяется коэффициент преломления среды, что приводит к увеличению искажения волнового фронта луча и уменьшению КПД лазера. Чтобы избавиться от примесных полос, необходимо на протяжении всего процесса выращивания ФК не изменять форму.

Для этого мы разработали систему, которая позволяла контролировать форму ФК и управлять ею. В качестве датчиков использовались: система взвешивания тигля с чувствительностью, равной 10 миллиграммам и катушка отбора мощности. Датчиками обратной связи для расчета геометрии кристалла и расчета уровней сигналов управления мощностью нагрева и скоростью вращения служили весовой датчик и датчик скорости вытягивания кристалла.

Разработанная программа учитывала левитацию и силу поверхностного натяжения расплава.

В автоматическом режиме выращивания кристаллов система контролировала и управляла: мгновенным углом разращивания кристалла, радиусом кристалла, второй производной веса по времени.

Идея контроля формы ФК заключалась в том, что при плоском ФК вторая производная веса по времени равна нулю. Если ФК переходит к выпуклой форме, то вторая производная не равна нулю и имеет знак плюс, при вогнутом ФК – знак минус.

Сигнал разбаланса поступает в систему автоматического управления процессом, которая имеет два контура реагирования: контур управления мощностью нагрева и контур регулирования скоростью вращения кристалла. Они отличаются постоянной времени, если у контура мощности она составляет несколько десятков минут, то у контура вращения кристалла она равна 2-3 минутам.

Исследования показали, что введение контура регулирования скоростью вращения кристалла позволило оперативно реагировать на нарушение тепловых условий в зоне ФК. Для этого потребовалось создание системы управления скоростью вращения с дискретизацией изменения скорости менее 0,005 об/мин и обработкой поступающей информации процесса со временем реакции менее 10 микросекунд.

Форма ФК связана со второй производной веса по времени, радиусом кристалла и отклонением угла разращивания от заданного. Наиболее чувствительным параметром оказался уход угла разращивания от заданного. При его положительном значении ФК стремится к выпуклой форме, а при его отрицательной величине ФК стремится принять вогнутую форму.

Система автоматического регулирования позволяет распределить меру воздействия на отклонение параметра между мощностью и скоростью вращения кристалла. Например, на скорость вращения установлено 15% управления, а на мощность – 85%. Это означает, что при отклонении параметра в первую очередь начнет работать малоинерционный контур регулирования – вращение кристалла, и если он не приведет систему в равновесие, то включится канал управления мощностью.

Разработанная система очень гибкая, с помощью множества коэффициентов она позволяет плавно изменять все параметры процесса прямо во время выращивания кристаллов и находить оптимальные условия для данного процесса кристаллизации. На монитор постоянно выводятся все параметры процесса в виде графиков. Это дает возможность контролировать ситуацию и при необходимости вмешиваться в нее.

В кристаллах александрита, выращенных с применением данной системы, практически отсутствовала примесная полосчатость, несмотря на высокий коэффициент распределения хрома, равный двум.

Созданная система автоматического поддержания формы ФК при выращивании кристаллов методом Чохральского позволяет поддерживать форму ФК постоянной на протяжении всего процесса выращивания кристаллов. При этом практически исчезает примесная полосчатость, и искажение волнового фронта в лазерных элементах, изготовленных из кристаллов, уменьшается от 2λ до $0,4-0,7\lambda$, что приводит к круглому пятну излучения лазера, в котором отсутствуют горячие точки. Все это способствует увеличению КПД лазеров и стабильной их работе.