

принимается излучение кольцевыми $p - n$ -переходами, и ограничено только методами современной фотолитографической технологии изготовления $p - n$ -переходов, т.е. размеров r_i и R_i , пределом фокусировки ρ_0 зондирующего излучения и коэффициентом углового увеличения K оптической системы. Повышенная температурная чувствительность метода обусловлена тем, что фотодиод принимает тепловое излучение расходящейся тепловой волны, "перехватывая" его кольцевыми $p - n$ -переходами во всем азимутальном угле $\Psi = 2\pi$, что эквивалентно приему сигнала с большой площади излучающей поверхности.

Список литературы

- [1] Nordal P.E., Kanstad S.O. // Phys. Scripta. 1979. Vol. 20. P. 659-662.
- [2] Leung W.P., Tam A.C. // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. N 1. P. 153-161.
- [3] Cielo P. // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. N 1. P. 230-234.
- [4] Neale R. // Electron. Eng. 1986. Vol. 58. N 719. P. 113-114, 117.
- [5] Лыков А.В. // Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
- [6] Туринов В.И. // Электронная техника. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. 1984. № 1. С. 88-98.

Научно-производственное
объединение "Исток"
Фрязино
Московская область

Поступило в Редакцию
17 июня 1991 г.

05;12
© 1992

Журнал технической физики, т. 62, в. 8, 1992

КОНТРОЛЬ НАПРАВЛЕНИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАСПЛАВА НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ПРЯМОГО ВЧ ПЛАВЛЕНИЯ В ХОЛОДНОМ КОНТЕЙНЕРЕ

*В.И.Александров, В.П.Войццицкий, Е.Е.Ломонова,
В.В.Осико, Н.П.Ханеев*

Введение

В настоящее время для выращивания монокристаллов простых и сложных оксидов широко применяется метод направленной кристаллизации в холодном контейнере [1]. Определяющую роль в создании оптимальных условий кристаллизации играет предшествующий ей процесс формирования ванны расплава. В работе [2] изучалось влияние на этот процесс порозности исходной шихты и удельной мощности, выделяющейся в расплаве, которые определяют направления распространения расплава. Информация о том, в каких направлениях движется расплав на начальной стадии плавления, важна для оперативного управления ВЧ генератором и для определения режима загрузки в расплав дополнительных порций материала. Особенно это существенно при плавлении новых материалов, когда стоит задача создания устойчивой ванны расплава.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы рассмотреть начальный этап процесса плавления (до подхода расплава к стенке или дну холодного контейнера) и показать возможность контроля на этом этапе направления распространения расплава.

Методика эксперимента

Исследование проводили на установке "Кристалл-401" с индуктором диаметром 250 мм и медным водоохлаждаемым контейнером диаметром 190 мм и высотой 350 мм. В работе использовали два стандартных вида шихты ZrO_2 , различающиеся размерами зерен и их агрегированностью. Шихтой заполняли определенный объем холодного контейнера (XK). При этом порозность одной шихты $\varepsilon_1 = 0.78$, а второй — $\varepsilon_2 = 0.86$.

Все плавки проводились при одинаковых, кроме ε , начальных условиях: режиме работы генератора, положении XK и стартового металла относительно индуктора, весе и степени компактности стартового металла. Схема загрузки XK представлена на рис. 3,а.

Методика определения массы расплава (M) в процессе наплавления, регистрации параметров работы генератора, определения мощностей потерь через дно ($P_{дн}$) и стенку ($P_{ст}$) XK , а также выделяющейся в расплаве мощности (P_p) подробно изложена в работе [2].

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 и 2 приведены временные зависимости P_p , $P_{ст}$, $P_{дн}$ и M (соответственно кривые 1-4), полученные в результате плавления шихты с ε_1 (рис. 1) и ε_2 (рис. 2). Характерные для процесса плавления моменты показаны точками на временной оси (рис. 1, 2): 1 — начало снижения $P_{дн}$ (точка B), 2 — начало линейного роста P_p и M (точка B), 3 — окончание линейного роста P_p и M (точка D). Кроме этих общих для обоих экспериментов моментов на рис. 1, 2, показаны точками Γ моменты, характерные только для каждого данного эксперимента, а также вспомогательная точка A (рис. 1). Ход полученных кривых, как показано ниже, связан с характером распространения расплава. На рис. 3, 4 приведены схемы распространения расплава, полученные из экспериментов. На них точками A , B , D (рис. 1) соответствуют рис. 3,б,в,г, а точкам B , Γ , D (рис. 2) — рис. 4,а,б,в.

После включения установки, $P_{ст}$ и $P_{дн}$ начинают быстро расти (рис. 1, 2, и кривые 2, 3) и затем выходят на определенный уровень. На этом этапе ход кривых 2 и 3 полностью совпадает с ходом аналогичных кривых при работе ненагруженного генератора (так называемый режим холостого хода генератора) при тех же его рабочих параметрах и положении XK относительно индуктора, т.е. нагрев XK в это время происходит за счет затухания в его секциях переменного электромагнитного поля. Выделяющаяся при этом мощность — мощность собственных потерь холодного контейнера складывается в данном случае из мощностей собственных потерь дна и стенки XK . Некоторое понижение $P_{ст}$ после достижения максимального на этом отрезке времени значения связано с прогревом генератора (P_p в это время также понижается). Дальнейший

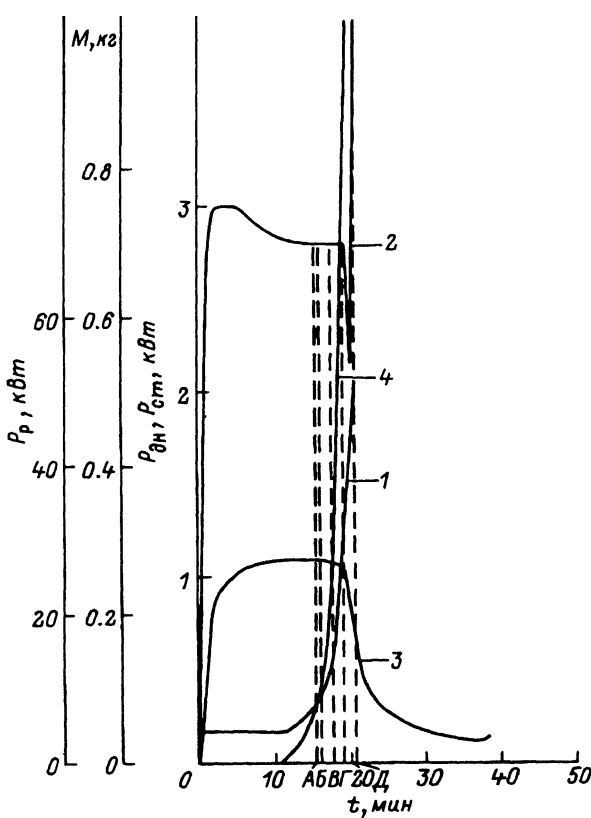


Рис. 1. Временные зависимости выделяющейся в расплаве мощности, мощностей потерь на стенке и дне ХК и массы расплава при плавлении шихты с ϵ_1 .
 1 — P_p , 2 — $P_{ст1}$, 3 — $P_{дн1}$, 4 — M_1 .

ход кривых 2 и 3 в первом эксперименте (рис. 1) отличен от хода аналогичных кривых во втором эксперименте (рис. 2). Различаются в этих экспериментах также и характеры кривых M и P_p . Чтобы объяснить это, необходимо рассмотреть схемы распространения расплава (рис. 3, 4) с привлечением такого параметра, как коэффициент заполнения окна индуктора расплавом k_3 [3].

Снижение мощности собственных потерь ХК при появлении расплава объясняется перераспределением мощности P_p вследствие лучшего, чем у контейнера, сцепления расплава с магнитным потоком, что обусловлено огромной разницей удельных электрических сопротивлений расплава и меди контейнера, отношение которых равно $10^5 - 10^6$ [3]. Коэффициент

$$k_3 = \frac{S_B}{S_H - S_K n}$$

где S_B — площадь максимального горизонтального сечения ванны расплава, S_H — площадь окна индуктора, S_K — площадь горизонтального сечения одной из секций контейнера, n — число секций.

С увеличением k_3 увеличивается потокосцепление с ванной (поток рассеяния в зазоре индуктора уменьшается), повышается значение $\cos \varphi$

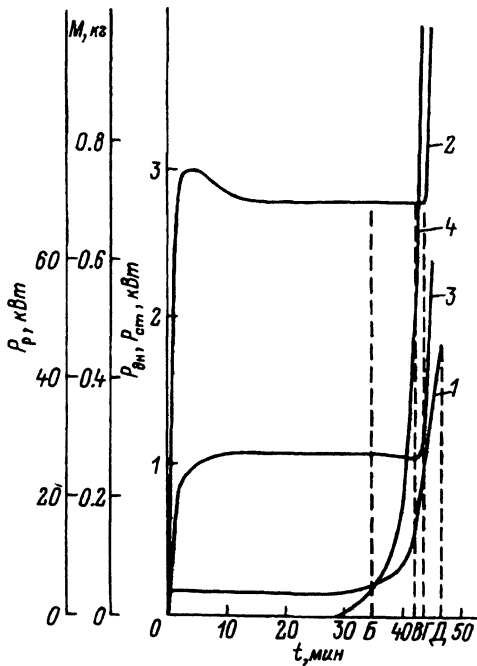


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, с ϵ_2 .
 1 — $P_{ст2}$, 2 — $P_{ст2}$, 3 — $P_{дн2}$, 4 — M_2 .

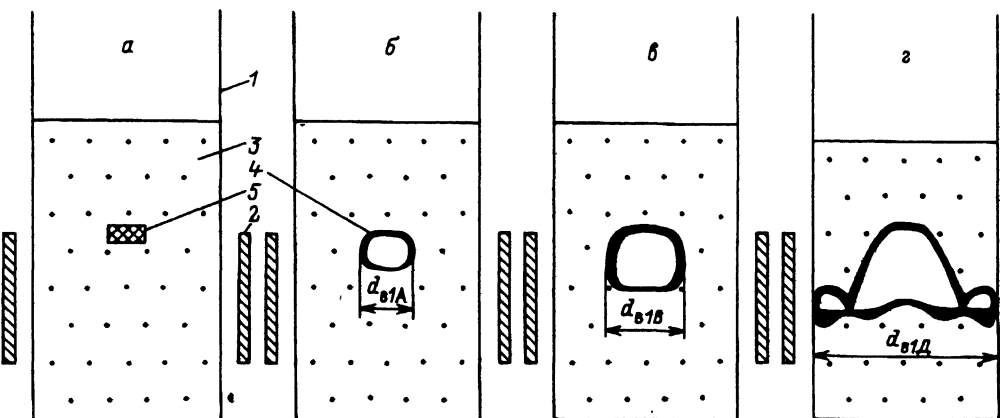


Рис. 3. Схемы начальной загрузки ХК (а) и распространения расплава при плавлении шихты с ϵ_1 (б-г).

1 — контейнер, 2 — индуктор, 3 — шихта, 4 — расплав, 5 — стартовый металл.

(коэффициент мощности индуктора) и, следовательно, возрастает P_p . Так как в обоих рассматриваемых экспериментах $S_{и}$, $S_{к}$ и n постоянны, то k_3 зависит только от $S_{в}$, которая определялась экспериментально по наибольшему диаметру горизонтального сечения ванны расплава $d_{вД}$ (рис. 3, 4).

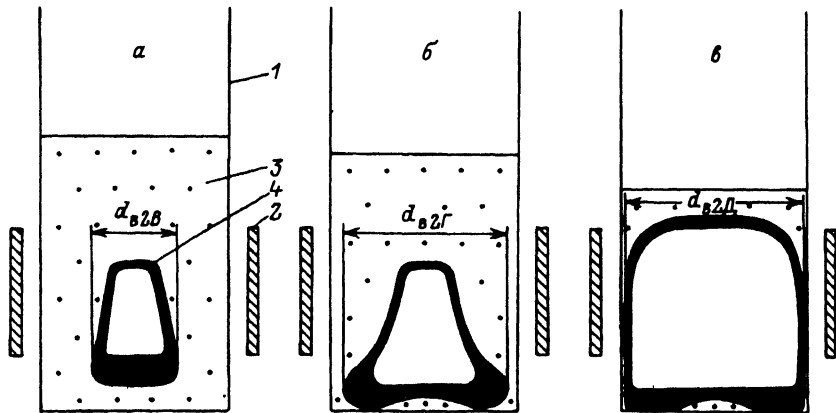


Рис. 4. Схема распространения расплава при плавении шихты с ϵ_2 .
1-4 — то же, что и на рис. 3.

Начало плавения шихты в обоих экспериментах совпадает с началом роста мощности, выделяющейся в расплаве. До этого момента происходит лишь процесс нагрева и окисления стартового металла и разогрева окружающей его шихты. При этом не происходит уменьшения собственных потерь XK , поскольку удельные электрические сопротивления стартового металла и меди сравнимы.

В первом эксперименте, как видно из рис. 3, расплав распространяется преимущественно по горизонтали и k_3 быстро растет. В момент времени A (рис. 1), т.е. перед началом снижения $P_{дн1}$ (кривая 3), $d_{в1A} \approx 0.07$ м, следовательно, $k_{31A} \approx 0.09$. В момент B (рис. 1), предшествующий быстрому линейному падению $P_{дн1}$ и $P_{ст1}$ (кривая 2), $d_{в1B} \approx 0.9$ м, а $k_{31B} \approx 0.15$. Резкое увеличение $P_{ст1}$ вызвано уже теплоотводом от расплава, вошедшего в соприкосновение со стенкой XK . Из рис. 3,2 (которому соответствует момент D на рис. 1) видно, что расплав к этому моменту уже некоторое время находится в контакте со стенкой XK , о чем свидетельствует образовавшаяся у стенки кольцеобразная ванна расплава. Очевидно, что коэффициент $k_{31D} \approx 0.65$ является максимальным для данной конфигурации индуктора и XK , так как гарнисаж имеет толщину порядка долей миллиметра. Таким образом, потокослепление с расплавом, с которого начинается снижение собственных потерь на дне XK , достигается при $k_3 > k_{31A}$, а на стенке (и быстрое линейное на дне) — при $k_{31D} > k_{31B}$ (причем, по всей видимости, ближе к k_{31D}). Следует также отметить, что по достижении $k_{3\max}$ (k_{31D} мощность $P_{дн1}$ опять уменьшается нелинейно).

Тот факт, что расплав не оказывал теплового воздействия на стенку XK до соприкосновения с ней, обусловлен его еще относительно малой массой, очень низкой теплопроводностью ZrO_2 и большой скоростью распространения расплава в горизонтальном направлении. При этом ванна расплава имеет малую глубину, и поэтому, хотя $P_{ст1}$ после контакта расплава со стенкой растет, $P_{дн1}$ продолжает в это время падать за счет уменьшения собственных потерь, несмотря на то, что $P_{р1}$ растет. Это свидетельствует о том, что собственные потери уменьшаются из-за увеличения массы (глубины) расплава, так как k_3 уже максимален. Отсюда следует, что, по-видимому, собственные потери на стенке XK тоже

уменьшаются, но это снижение скрыто ростом $P_{ст1}$, вызванным теплоотводом от расплава. После достижения минимального значения $P_{дн1}$ также начинает возрастать, так как к этому времени расплав приблизился к дну XK и имеет значительную массу — около 40% от массы загрузки.

При плавлении шихты с ε_2 расплав, как видно из рис. 4, преимущественно распространяется по вертикали, т.е. k_3 увеличивается много медленнее, чем в первом эксперименте. Поэтому нелинейное снижение мощности собственных потерь на дне XK (рис. 2, кривая 3), начавшееся в момент времени B , более длительно. Этим объясняется и меньшая скорость нарастания $P_{р2}$ и M_2 (рис. 2, кривые 1 и 4). Кроме того, M_2 увеличивается медленнее, чем M_1 , на начальном этапе (до момента B), поскольку $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ (по этой же причине плавление шихты во втором эксперименте начинается позже).

В момент времени B максимальный диаметр горизонтального сечения ванны расплава находится на уровне нижнего края индуктора и имеет диаметр 0,09 м, т.е. $k_{31B} = k_{32B}$, следовательно, и $P_{р1B} = P_{р2B}$, однако M_{2B} значительно больше M_{1B} (рис. 1 и 2). Поэтому, а также из-за приближения расплава к дну XK вскоре начинается увеличение $P_{дн2}$, вызванное теплоотводом от расплава, которое в момент времени Γ переходит в быстрый линейный рост. Начинаясь в этот момент линейные участки кривых $P_{р2}$ и $P_{ст2}$ имеют меньший наклон, чем у аналогичных участков кривых $P_{р1}$ и $P_{ст1}$, так как, очевидно, расплав медленнее приближается к стенке XK . Значение $P_{р2д}$ меньше, чем $P_{р1д}$, из-за того, что толщина гарнисажа в момент времени D (рис. 4в составляет около 3 мм, следовательно, $k_{32д} \approx 0.61$, а относительно малые изменения k_3 приводят к существенному изменению $\cos \varphi$ [3]. На самом деле можно считать, что значение $k_{32д}$ еще меньше, поскольку, как показано ниже, начиная с момента B , потокосцепление с расплавом уменьшается. Получается, что при меньшей мощности, выделяющейся в расплаве, образуется большая его масса, т.е. во втором эксперименте плавление идет более эффективно. Причины этого, а также различия в направлениях распространения расплава при плавлении шихты с разными ε рассмотрены в [2].

Резких падений $P_{дн2}$ и $P_{ст2}$ подобными падениям $P_{дн1}$ и $P_{ст1}$ не происходит потому, что расплав имеет уже большую массу к тому времени, когда он подходит к стенке. Кроме того, как видно из рис. 4б, расплав опускается ниже индуктора и, следовательно, сцепление расплава с магнитным потоком уменьшается. В этом случае не достигается необходимое для резкого снижения собственных потерь потокосцепление с ванной расплава до того, как расплав начинает оказывать сильное тепловое влияние на XK . Таким образом, поток тепла от расплава скрывает снижение собственных потерь XK еще сильнее, чем в первом эксперименте.

По оценке, приведенной в [3], выделяющаяся в стенке и дне XK мощность составляет 1–2% от P_p (когда ванна расплава уже сформирована) и при расчетах ею можно пренебрегать. Однако на начальном этапе величина собственных потерь XK достаточно велика (а ее отношение к P_p практически равно единице), и поэтому можно, регистрируя их изменения, связанные с изменениями максимального диаметра расплава, определять основное направление, в котором распространяется расплав на начальной стадии плавления. Описанные выше два примера плавления наиболее часто реализуются на практике, особенно первый. Фактически же они являются крайними случаями, между которыми могут наблюдаться и промежуточные, т.е. при движении расплава по горизонтали

и вертикали с близкими скоростями. Тогда соответственно изменяются и характеры кривых $P_{\text{дн}}$ и $P_{\text{ст}}$. Кроме того, если плавление идет по типу второго эксперимента, но дно XK находится на значительном расстоянии от расплава, то $P_{\text{ст}}$ изменяется подобно $P_{\text{ст}2}$, а $P_{\text{дн}}$ — подобно $P_{\text{дн}1}$.

Контроль преимущественного направления распространения расплава позволяет выбрать на начальном этапе плавления оптимальные режимы работы генератора и загрузки в XK дополнительных порций материала, что дает возможность получать ванны расплава с необходимыми параметрами. Таким образом, результаты этой работы позволяют осознанно и, следовательно, более точно управлять процессом плавления, что особенно важно при попытках создания устойчивых ванн расплавов новых материалов.

Выводы

Экспериментально рассмотрен начальный этап процесса плавления и показана связь между величиной собственных потерь холодного контейнера и коэффициентом заполнения окна индуктора расплавом, что дает возможность контролировать по изменению собственных потерь направления распространения расплава.

Показано, что медленное снижение собственных потерь на дне и стенке начинаются по достижении определенных значений k_3 ($k_3 \approx 0.09$ и значения, близкого к $k_{3\text{max}} = 0.65$, соответственно для данных индуктора, контейнера и удельного электрического сопротивления расплава).

Список литературы

- [1] Александров В.И., Осико В.В., Проторов А.М., Татаринцев В.М. // Успехи химии. 1978. Т. 47. № 3. С. 385–427.
- [2] Александров В.И., Войццкий В.П., Ломонова Е.Е., Осико В.В., Ханеев Н.П. // Препринт ИОФАН. № 74. М., 1989.
- [3] Петров Ю.Б. // Индукционная плавки окислов. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 104 с.

Институт общей физики
Москва

Поступило в Редакцию
28 июня 1991 г.