

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی

دوره ترمین

کارگاه آنلاین
بررسی مقابله ای متون (مقدماتی)

دوره ترمین

کارگاه آنلاین
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی

دوره ترمین

کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو

اثر خواص اپتیکی مذاب $Gd_3Ga_5O_{12}$ بر الگوی جریان همرفت در بوته چوکرالسکی

فایض^۱، رضا^۱؛ مشهودی، مجید^۱؛ نجفی، فرزاد^۲؛ برزن، محمد^۱

^۱ پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده لیزر و اپتیک، صندوق پستی ۱۱۳۶۵-۱۴۸۱۶

^۲ پژوهشگاه صنعت نفت، صندوق پستی ۱۴۶۶۵-۱۳۷

چکیده

در این گزارش، نتایج شبیه‌سازی عددی میدان‌های جریان همرفت و دما برای تحقیق در نقش خواص اپتیکی در هیدرودینامیک شاره چوکرالسکی بررسی شده است. در این مدل، بنابراین، مذاب اکسید نیمه‌شفاف و پهنای اپتیکی آن، کمیت محدود و متغیری فرض شده و شار گرمای تابش حجمی در معادله انرژی لحاظ شده است. در مذاب چوکرالسکی، گرادیان شعاعی دما نقش موثری ایفا می‌کند و الگوی همرفت شاره به شدت نسبی نیروهای شناوری و نیروهای دورانی بستگی دارد. نشان داده می‌شود که با افزایش ضریب جذب مذاب، حوزه تأثیر نیروهای دورانی محدود می‌شود و جریان طبیعی بر الگوی همرفت شاره تسلط می‌یابد. با کاهش پهنای اپتیکی مذاب، سهم تابش (نسبت به هدایت) در انتقال حرارت افزایش یافته و جریان همرفت جبری نقش تعیین‌کننده‌ای در هیدرودینامیک شاره ایفا می‌کند.

Influence of the optical properties of $Gd_3Ga_5O_{12}$ melt on the convective flow pattern in a Czochralski crucible

Faiez, Reza¹; Mashhoudi, Majid¹; Najafi, Farzad²; Barzan, Mohammad¹

¹ Solid State Lasers Department, Laser & Optics Research School, Tehran 11365-8486, Iran

² Research Institute of Petroleum Industry, Tehran 14665-137, Iran

Abstract

A numerical study was carried out to investigate the effect of optical properties on the flow and thermal fields in a Czochralski oxide melt. In the present model, the optical thickness of semitransparent melt is assumed to be varied over a wide range of values, and the internal radiative heat flux appears in the equation of energy. In a Czochralski melt, the radial temperature gradient plays a vital role, and the convective flow pattern depends on the relative strength of the buoyancy and rotational forces. It is shown that increasing the absorption coefficient of the melt, the natural convection enhances and plays a dominant role in the formation of the flow pattern. The rotational forces have a remarkable effect on the melt hydrodynamics when the optical thickness of the fluid is lowered to some extent and, hence, the internal radiation contributes more (with respect to conduction) in heat transfer in melt.

PACS No. 47

گیرند [۲]، نقش موثری در انتقال حرارت و الگوی میدان جریان مذاب ایفا می‌کند [۳]. صرفنظر از نیروی تنش سطحی سیال، الگوی میدان جریان تحت تأثیر متقابل جریان همرفت طبیعی (ناشی از نیروهای شناوری) و جریان همرفت جبری (به دلیل دوران بلور حول محور تقارن) شکل می‌گیرد. در صفحه (r, z)

مقدمه

پژوهش‌های تجربی نشان داده‌اند که به دلیل نیمه‌شفاف بودن اکسیدها در برابر تابش گرمایی [۱]، خواص اپتیکی آنان (ضریب شکست n ، ضریب جذب a و ضریب پراکندگی σ_s)، که به نحو قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر یون‌های آلاینش (*dopant*) قرار می-

مخروطی شکل (فاقد حجم) در دمای ثابت $T_x = T_{mp}$ یکی از مرزهای شاره چوکراسکی محسوب می‌شود که از نقطه نظر اپتیکی، مانند دیواره‌های داخلی بوته، مات و خاکستری است. ضرایب گسیل $\epsilon_x = 0.9$ و $\epsilon_w = 0.5$ به ترتیب برای فصل مشترک دو فاز و دیواره‌های بوته لحاظ شده‌اند. اختلاف دمای شعاعی $\Delta T_{max} = 72 K$ شدت جریان همرفت طبیعی برابر $Gr = 8.218 \times 10^4$ را تأمین می‌کند. کف بوته آدیاباتیکی و دمای سطح جانبی آن برابر $T_w = T_{mp} + \Delta T_{max}$ است. دوران فصل مشترک مخروطی حول محور تقارن این نظام، جریان جبری به شدت $Re = 114.73(\Omega)$ تولید می‌کند که به ازای $\Omega^* = 2.5 \text{ rad/s}$ به $Re^* = Gr^{1/2}$ منتهی می‌شود. در شرایط $Re \geq Re^*$ نیروهای دورانی غالب بر نیروی شناوری به ظهور ناپایداری در میدان جریان و نوسان‌های دما در جبهه انجماد می‌انجامد. از نسبت سهم هدایت به سهم تابش در انتقال حرارت [۴]،

$$N_R = \alpha \lambda_l / 4 \sigma_B T_{mp} \cong 2.66 \times 10^{-3} (\alpha m^{-1}) \quad (1)$$

که در آن λ_l ضریب هدایت حرارتی مذاب و σ_B ثابت استفان-بولتزمن است، می‌توان انتظار داشت که مکانیسم RHT درون شاره آستانه تحولات مربوط به ناپایداری جریان را تحت تأثیر قرار دهد. از معادله (۱) آشکار است که با کاهش ضریب جذب مذاب $(a < 376 \text{ m}^{-1})$ نقش RHT در انتقال حرارت افزایش خواهد یافت. ضریب شکست مذاب $n(\lambda)$ با $\lambda_{max} = 1432.5 \text{ nm}$ (قانون $Wien$)، از رابطه $Sellmeier$

$$n^2 = 1 + S \lambda^2 / (\lambda^2 - \lambda_0^2), S = 2.734, \lambda_0 = 132.1 \text{ nm} \quad (2)$$

تقریب می‌شود. به ازای $n = 1.938$ از معادلات $Spuckler-Siegel$ [۶] ضرایب تراگسیل سطح نیمه شفاف (فاقد حجم و دارای پهنای اپتیکی برابر صفر) مذاب برای هر کدام از دو رویه آن، تعیین می‌شود:

$$\tau_{ext} = 1 - \rho_{ext} = 0.85, \tau_{int} = 1 - \rho_{int} = 0.23 \quad (3)$$

در این روابط ρ_{ext} و ρ_{int} ضرایب بازتاب سطح مذاب، به ترتیب، برای پرتو فرودی از محیط با دمای ثابت $T_a = T_{mp}$ و برای پرتو فرودی از درون مذاب به دمای ΔT_{max} تعیین می‌شوند.

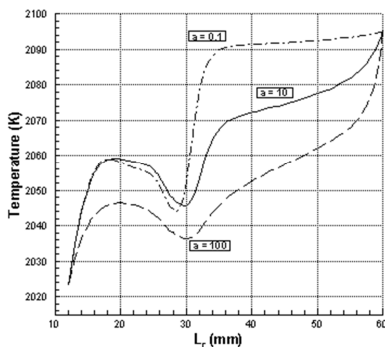
مختصات استوانه‌ای، و در نیمه سمت چپ بوته چوکراسکی، نیروهای شناوری یک سلول همرفت طبیعی ساعت‌گرد (ccw) را تولید می‌کنند. شدت این جریان با عدد گراشف، $Gr = g \beta \Delta T_{max} L^3 / \nu^2$ که در آن g ، β و ν به ترتیب شتاب ثقل، ضریب انبساط حجمی و گرانشی سیال است و طول مشخصه L برابر شعاع بوته r_c لحاظ می‌شود. $\Delta T_{max} = T_w - T_{mp}$ به معنی تفاضل دمای دیواره بوته و نقطه ذوب اکسید، $T_{mp} = 2023 K$ است. دوران بلوری به شعاع r_x ، به علت نیروی گریز از مرکز، به تشکیل سلول همرفت ثانوی (موسوم به جریان جبری) پادساعت‌گرد (ccw) در همسایگی فصل مشترک دو فاز منجر می‌شود که با افزایش سرعت زاویه‌ای Ω (rad/s) در ستونی از مذاب زیر بلور در حال چرخش توسعه می‌یابد. شدت جریان همرفت جبری با عدد رینولدر، $Re = r_x^2 \Omega / \nu$ تعریف می‌شود. نسبت Gr/Re^2 و همچنین نقطه تماس لایه تنش برشی بین این دو جریان با مرزهای شاره چوکراسکی دارای اهمیت فنی است.

هدف این مدل‌سازی عددی، تحقق در اثر سازوکار RHT [۷] درونی مذاب نیمه‌شفاف $Gd_3Ga_5O_{12}$ بر میدان جریان همرفت و الگوی توزیع دما در یک بوته باز چوکراسکی است. این سازوکار طبعاً به خواص اپتیکی سیال و ضرایب گسیل مرزهای آن بستگی دارد. شرایط ظهور الگوی ویژه‌ای در میدان دما، موسوم به باریکه سرد دوار [۴] زیر فصل مشترک دو فاز مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این نظام، این باریکه سرد از ناحیه پیرامونی بلور در جهت بردار شتاب ثقل به سمت بخش مرکزی کف بوته فروریزش می‌کند. انکشاف این باریکه سرد به افت و خیزهای دما و در نتیجه ناپایداری جبهه انجماد و نقصان‌های شبکه بلوری می‌انجامد. بنابراین، مطالعه شرایط ظهور چنین ساختاری در میدان دما، دارای اهمیت است.

تعریف مدل، معادلات حاکم و شرایط مرزی

محاسبات مدل بوته باز استوانه‌ای ($120 \times 60 \text{ mm}^2$) در این گزارش بر مبنای داده‌های ترموفیزیکی مذاب $Gd_3Ga_5O_{12}$ در مرجع [۵] انجام گرفته است. بلور در حال رشد ($r_x = 28.5 \text{ mm}$) به یک فصل مشترک کاو به سمت مذاب کاهش یافته است. این سطح

2.78 و $Re = Gr^{1/2}$ با کاهش ضریب جذب سیال، a شیب تغییرات شعاعی دما در فاصله بین دیواره بوته $T_w = 2095 K$ و $r = 60 mm$ و ارتفاع هلالی ($r \sim 34 mm$) به شدت کاهش می یابد (شکل ۱). متناظر با $a_1 > a_2 > a_3$ ، بنابراین بیشینه تابع جریان همرفت $\psi_{max} (g/s)$ از $\psi_1 = 4.50$ به $\psi_2 = 3.08$ و $\psi_3 = 1.54$ نیز افت می کند. هرچه پهنای اپتیکی مذاب افزایش یابد، مسافتی که فوتون گسیل یافته از یک سطح (برابر $1/a$) جذب می شود، کاهش یافته، رفتار جهت دار تابش تضعیف و اندرکنش پرتوها تقویت می شود. این، بدین معنی است که به ازای ضریب جذب بزرگتر (a_1) سازوکار RHT پدیده ای جایگزیده (در همسایگی دیواره بوته) است و به محض فاصله گرفتن از دیواره بوته، دمای مذاب با شیب تندتری کاهش می یابد و در نتیجه گرادیان شعاعی بزرگتر و همرفت طبیعی شدیدتری ($\psi_1 = 4.5 g/s$) حاصل می شود. شرایط اپتیکی مذاب، شیوه توزیع ΔT_{max} را تغییر می دهد. به طوری که با کاهش ضریب جذب و شدت یافتن خصلت جهت دار آن، دمای سیال در نواحی دورتر از مبدأ گسیل تابش حرارتی (دیواره بوته) افزایش و در نتیجه گرادیان دما و سرعت شعاعی u_r در این فاصله ($34 < r (mm) < 60$) کاهش می یابد. $u_r < 0$ متعلق به جریان همرفت طبیعی است و بنابراین، با نزدیک شدن به ناحیه هلالی (حوزه عمل نیروهای دورانی)، سرعت شعاعی جریان تغییر علامت می دهد.



شکل ۱: تغییرات دما روی خط L_r به فاصله $3 mm$ زیر سطح آزاد مذاب

$$\Omega = 2.5 \text{ rad/s}$$

تحولات شدید الگوی میدان جریان همرفت ($Gr = 8.218 \times 10^4$ و $Re = Gr^{1/2}$) و میدان دما در شکل (۲) صرفاً ناشی از

برای یک شماره تراکم ناپذیر نیوتنی، معادلات پیوستگی و مومنتم به ترتیب زیر بیان می شوند:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (4)$$

$$\rho_o(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho_o \mathbf{g}[1 - \beta(T - T_o)] \quad (5)$$

که در آن بردار سرعت جریان سیال در مختصات استوانه ای، T ، P و μ به ترتیب فشار، دما و گرانیوی دینامیک مذاب و $\mathbf{g} = (0, 0, 9.81 \text{ m/s}^2)$ بردار شتاب ثقل است. معادله انرژی (مستقل از زمان) به صورت زیر بقای انرژی در این سیال را تبیین می کند:

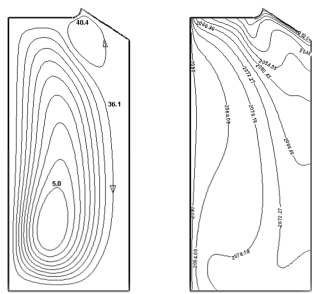
$$\rho C_p [\nabla \cdot (\mathbf{u}T)] = \lambda \nabla^2 T - \nabla \cdot \mathbf{q}_R \quad (6)$$

در این معادله، C_p و λ به ترتیب گرمای ویژه و ضریب هدایت حرارتی مذاب و q_R شار گرمای تابشی آن است. معادلات (۶-۸) به روش حجم محدود (FVM) حل شده اند و شار گرمای تابشی بر پایه تقریب $DOM [V]$ محاسبه شده است.

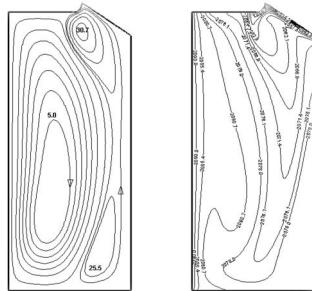
برای سرعت جریان در دیواره بوته ($T = T_w$) و کف آدیاباتیک آن ($\partial T / \partial z = 0$) شرط مرزی $\mathbf{u} = 0$ در جبهه انجماد (سطح جانبی مخروط $T = T_{mp}$) شرایط $u_r = u_z = 0$ و $u_\theta = r_x \Omega$ برقرار است. سطح آزاد شماره با شرایط $\partial u_r / \partial z = \partial u_\theta / \partial z = 0$ ، $u_z = 0$ (فقدان تنش سطح یا نیروی مارانگونی) تعریف می شود و به استثنای بخش هلالی آن (به ارتفاع $h_m = 4.5 mm$) شرط مرزی $\partial T / \partial r = 0$ برقرار است. وجود ارتفاع هلالی در همسایگی جبهه انجماد، این امکان را فراهم می آورد که علاوه بر $\partial T / \partial z$ ، گرادیان شعاعی دما نیز در انتقال حرارت از سطح مذاب به محیط ($T = T_a$) نقش ایفا می کند. در این محاسبات، سطح آزاد مذاب نیمه شفاف فرض شده، و بنابراین شرط مرزی $\partial T / \partial z = 0$ [۸] برقرار است.

نتایج محاسبات مدل چوکراسکی

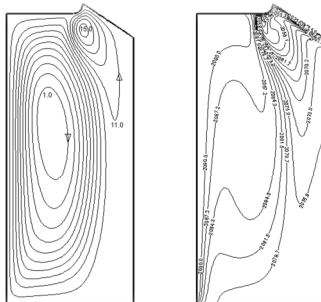
شرایطی که در آن تقارن محوری مفروض جریان همرفت تحت تأثیر ناپایداری دینامیک شماره تضعیف شده و نشانه های آغاز یک رفتار تناوبی ظاهر می شود، برای مذاب $G G G$ با عدد پرانتل $Pr = 4.69$ در یک مدل دوبعدی بررسی می شود. نمودار تغییرات دما و سرعت شعاعی روی یک خط افقی L_r ($3 mm$ زیر سطح آزاد مذاب) نشان می دهد که در شرایط متفاوت $Gr/Re^2 =$



$$a = 100 \text{ m}^{-1}$$



$$a = 10 \text{ m}^{-1}$$



$$a = 0.1 \text{ m}^{-1}$$

شکل ۲: تغییرات میدانهای جریان و دما به ازای مقادیر مختلف ضریب جذب

مرجع‌ها

- [1] G. A. Kobzev and V. A. Petrov; "Measurement of thermal radiation and optical properties of refractory oxides and their melts under CO₂ laser radiation heating"; *Thermochimica Acta* 218 (1993) 291-304.
- [2] A. Polity, D. Schwabe, L. Ackermann, K. Dupre; "Transmission spectra of crystals at elevated temperatures for the calculation of internal radiation heat transport during crystal growth"; *Cryst. Res. Technol.* 38 (2003) 874-880.
- [3] T. Tsukada, M. Kobayashi, C. Jing, N. Imaishi; "Numerical simulation of Cz crystal growth of oxides"; *Fluid Dynamics and Material Processing (FDMP)* 1 (2005) 45-62.
- [4] M. Taitel, D. Schwabe, A. Yu. Gelfgat; "Experimental and computational study of the flow instabilities in a model of Czochralski growth"; *J. Cryst. Growth.* 310 (2008) 1343-1348.
- [5] N. Crnograc and N. Wilke; "Measurement of physical properties of D₂ScO₃ melt"; *Cryst. Res. Technol.* 44 (2009) 581-589.
- [6] C. M. Spuckler and R. Siegel; "Refractive index effects on radiative behavior of a heated absorbing-emitting layer"; *Thermophys. Heat Transfer* 6 (1992) 596-604.
- [7] M. Kobayashi, T. Tsukada, M. Hozawa; "Effect of internal radiative heat transfer on the convection in Cz oxide melt"; *J. Cryst. Growth* 180 (1997) 157-166.

تغییر ضریب جذب مذاب است. به ازای $a_1 = 100 \text{ m}^{-1}$ انرژی تابشی فرودی بر سطح جانبی استوانه، توسط شماره در نزدیکی لبه بوته، و برای مذاب شفاف تر ($a_2 = 10 \text{ m}^{-1}$) در نواحی مرکزی شماره جذب می شود و در نتیجه دمای این نواحی را افزایش می دهد. این جابجایی حوزه گرم مذاب به افزایش شار خروجی گرما از سطح جانبی مخروط (جبهه انجماد) منتهی می شود. به ازای $a_1 = 100 \text{ m}^{-1}$ نسبت Q_x/Q_w برابر 18٪ و برای $a_2 = 10 \text{ m}^{-1}$ این نسبت برابر 30٪ است. کاهش شدیدتر ضریب جذب ($a_3 = 0.1 \text{ m}^{-1}$) تغییرات جزئی در نسبت شار خروجی به شار گرمای ورودی ایجاد می کند. این افزایش قابل ملاحظه Q_x/Q_w (متناسب با کاهش ضریب جذب a_1 به a_2) با کاهش شدید پهنای لایه مرزی دمایی δ_T از 8 mm به 4.6 mm و افزایش گرادیان محوری دما در نزدیکی یال مخروط از 25 K/cm به حدود 100 K/cm می انجامد. در نتیجه این تحولات، لایه ناپایداری از مذاب در همسایگی جبهه مخروطی تولید می شود که در آن سیال سرد بالای لایه گرم قرار گرفته است. در این مدل (مستقل از زمان) فروریزش "باریکه سرد" برای $a = 10 \text{ m}^{-1}$ تا کف بوته مشاهده می شود. توجه کنید که با کاهش آهنگ چرخش بلور، Ω از 2.5 (متناظر با $\text{Re} = \text{Gr}^{1/2}$) به 1.5 چنین تحولی دیده نمی شود. حل معادلات حاکم بر جریان همرفت و معادله گرما به صورت وابسته به زمان (نشان داده نشده است) شکل گیری این باریکه سرد و تغییرات آن را که به جدا شدن این باریکه می انجامد، آشکار خواهد ساخت. کل این فرآیند تناوبی است. با کاهش شدیدتر ضریب جذب ($a_3 = 0.1 \text{ m}^{-1}$) ورتکس سلول همرفت طبیعی از نزدیکی کف بوته به نزدیکی سطح آزاد مذاب تغییر موقعیت می دهد. تراکم همدمها که درست در گوشه بوته و الگوی موجی شکل ایزوترمها در بخش وسیعی از مذاب ($a = 0.1 \text{ m}^{-1}$) مشاهده می شود. کاهش ضریب جذب به کاهش دمای مذاب و در نتیجه تضعیف ناپایداری لایه سرد بر روی لایه گرم (*unstable stratification*) انجامیده است.

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی

توجه: بررسی مقاله ای متون (مقدماتی)

کارگاه آنلاین
بررسی مقابله ای متون (مقدماتی)

PROPOSAL
پروپوزال

توجه: پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی

کارگاه آنلاین
پروپوزال نویسی و پایان نامه نویسی

ISI
Scopus

توجه: آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو

کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو