

## ESTUDIO EN LOS HORNOS DE BRIDGMAN

*F. Chejne*

*T. Ragimova*

*H. Cortés*

*Universidad de Antioquia*

*Universidad Pontificia Bolivariana Medellín*

---

### Resumen

Se ha realizado el cálculo teórico de las características de los hornos de Bridgman para el estado transitorio y estacionario. Se determinó teórica y experimentalmente el gradiente de temperatura y el tiempo de respuesta para diferentes diseños de los hornos. Se encontró que los datos experimentales coinciden bastante bien con los datos teóricos.

### Abstract

The Theoretical calculations have been made for the characteristics on a Bridgman furnace, for both transient and stationary states. The temperature gradient and the time response was calculated theoretically and measured experimentally. It is found that experimental data are good agreement with the theoretical calculations.

### Introducción

El presente artículo está dedicado al estudio de las características de los hornos de Bridgman, tales como el gradiente de temperatura y el tiempo de respuesta de los hornos, con respecto a su diseño.

Los hornos de Bridgman tienen forma cilíndrica y se pueden colocar, dependiendo de su aplicación, horizontal o verticalmente. Se emplean para el crecimiento de monocristales semiconductores tales como Ge, Si y compuestos de los grupos III-V y II-VI, etc.

El método de crecimiento de Bridgman es bastante conocido (1,2) y consiste en el descenso de una ampolla de cuarzo a través de un horno vertical. El horno posee un gradiente de temperatura tal que en su parte superior es mayor que en su parte inferior. los monocristales crecen en el interior de la ampolla a partir de la fase líquida. La rata de crecimiento depende de la velocidad de descenso de la ampolla a través del horno, esta velocidad es del orden de 0.5 mm/h, ver Fig. 1.

La calidad del monocristal crecido depende fuertemente del perfil del horno, y este a su vez depende de su diseño y construcción.

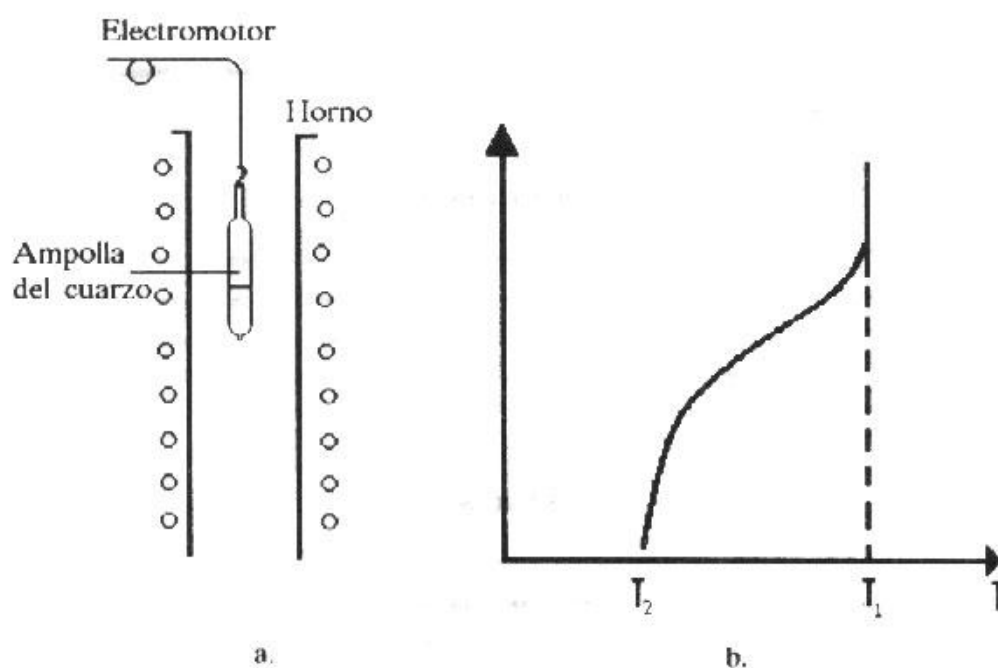


Fig. 1. a) Método de Bridgman. b) Gradiente de temperatura del horno.

## Diseño y construcción de los hornos

Fueron diseñados y cosntruidos varios hornos cilíndricos, los acuales se utilizan en el crecimiento de monocristales por el método de Bridgman. Igual-

mente es posible crecer con ellos policristales y superconductores, pero con la diferencia que en este caso los hornos deben estar en posición horizontal.

El núcleo de los hornos es un tubo de cuarzo alrededor del cual se ha enrollado una resistencia denominada Kantal 18, la cual actúa como elemento calefactor. El enrollamiento puede ser básicamente de dos formas: tipo lisa o tipo espiral. En la primera, la resistencia se coloca directamente sobre el tubo de cuarzo en su forma normal, mientras que con la segunda se hace inicialmente una espiral de 3 o 4 mm de radio y luego se hace con el fin de colocar mayor resistencia en un área menor.

Sobre la resistencia se deposita una capa de cemento cerámico el cual posee altas características refractarias. El cemento cerámico cumple la función de impedir el contacto de las espiras entre sí, y garantizar que el espacio entre ellas no varíe. La separación entre espiras se denomina el "paso". Al cambiar el paso se varía el perfil de temperatura del horno. Finalmente se coloca una capa de material aislante, en nuestro caso lana cerámica. El aislamiento es necesario para conservar el calor y así mantener el perfil de temperatura fijo durante largo tiempo. En la parte exterior del aislamiento se coloca una chaqueta de aluminio cuyo espesor es de 0.8 mm, y tiene como función proteger el aislamiento, dar forma compacta al horno y hacerlo más manejable.

Los hornos fueron construidos con diferente número de espiras, y diferentes pasos con el fin de obtener distintos gradientes.

El proceso de crecimiento de monocristales requiere de un gradiente de temperatura bastante estable durante todo el tiempo de crecimiento, que aproximadamente es de 29 días. Para estabilizar el gradiente de temperatura se emplea un sistema de control que amortigua las fluctuaciones de la temperatura en el horno. Para el estudio de los hornos se utilizó un termopar tipo J de Cromel-Alumel.

## **Estado transitorio del horno**

Con el fin de hallar las características, tales como el gradiente de temperatura y el tiempo de respuesta con respecto a su diseño, se hace un análisis teórico sobre transferencia de calor en los hornos cilíndricos.

La transferencia de calor en un horno puede presentarse en tres formas diferentes: conducción, convección y radiación (3, 4). En muchos procesos de transferencia de calor, la temperatura del sistema depende del tiempo.

Tal es el caso durante el enfriamiento y calentamiento. En el caso de interés, este estado corresponde a la etapa de calentamiento y se llama estado transitorio.

Par calcular la dependencia de la temperatura con respecto el tiempo, se hace un balance de energía del horno, como muestra la Fig. 2.

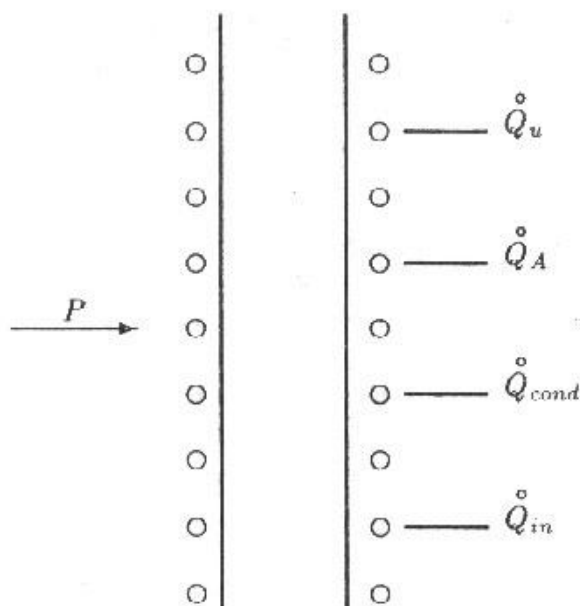


Fig. 2. Balance de Energía del horno.

La ecuación de balance es:

$$P = \dot{Q}_U + \dot{Q}_A + \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{in} \quad (1)$$

Donde  $P$  es la energía entregada por unidad de tiempo y se llama potencia suministrada;  $Q_U$  es la energía útil;  $Q_A$  es la energía almacenada en el aislamiento;  $Q_{cond}$  es la energía conducida por el aislamiento y  $Q_{in}$  es la energía interna del calefactor por unidad de tiempo.

Reemplazando los valores de los términos de la ecuación (1), con  $Q_U$  igual a cero ya que los hornos fueron caracterizados sin muestras adentro, se tiene:

$$I^2 R_a(1 + a_R T) = U A_R T + \frac{m_a C_a dT}{F dt} + mC \frac{dt}{dt} \quad (2)$$

donde  $T$  es la temperatura y  $t$  es el tiempo;  $a_R$  es el coeficiente de variación de la resistencia con la temperatura;  $I$  es la corriente;  $R_a$  es la resistencia

del alambre;  $A_R$  es el área interior del horno;  $U = K/\ln(r_0/r_1)$  es un parámetro que depende de la conductividad térmica  $K$  del aislamiento y de los radios interior  $r_0$  y el exterior  $r_1$  del horno;  $m_a$  es la masa del aislamiento;  $C_a$  es la capacidad calorífica del aislamiento;  $F$  es un factor que se halla experimentalmente, el cual da cuenta de la fracción de masa de aislamiento que almacena energía a la temperatura  $T$ ;  $m$  es la masa del alambre y  $C$  es la capacidad calorífica del alambre.

Haciendo algunos cambios en la ecuación (2) se obtiene:

$$\frac{mC + m_a C_a / F}{U A_R - I^2 R_a a_R} \frac{dT}{dt} + T = \frac{I^2 R_a}{U A_R - I^2 R_a a_R} \quad (3)$$

Definiendo

$$\frac{mC + m_a C_a / F}{U A_R - I^2 R_a a_R} = \tau \quad (4)$$

$$\frac{I^2 R_a}{U A_R - I^2 R_a a_R} = T_{est} \quad (5)$$

se tiene que

$$\tau \frac{dT}{dt} + T = T_{est} \quad (6)$$

solución a esta ecuación diferencial tiene la forma

$$T = T_{est}(1 - \exp(-t/\tau)) \quad (7)$$

donde  $\tau$  es el tiempo de respuesta del horno y  $T_{est}$  es la temperatura de estabilización del horno.

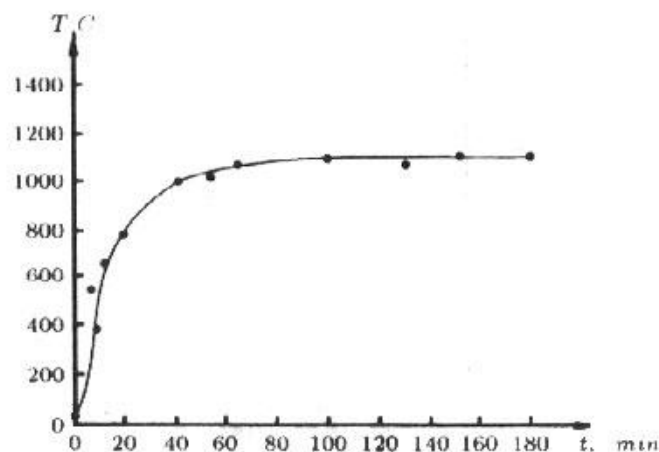


Fig. 3. Curva del estado transitorio: resultados teóricos (continua), resultados experimentales (puntos).

En la Fig. 3 se muestra la dependencia de la temperatura con el tiempo. Como se observa de la figura, los puntos experimentales coinciden bastante bien con los cálculos teóricos hechos con la ecuación (7). De este tipo de curvas se determinó: el tiempo de respuesta del horno, y la temperatura de estabilización  $T_{est}$ . Estas dos características de los hornos dependen no solamente de su diseño y de los materiales utilizados en su construcción, sino también de la potencia suministrada, Fig. 4 y 5.

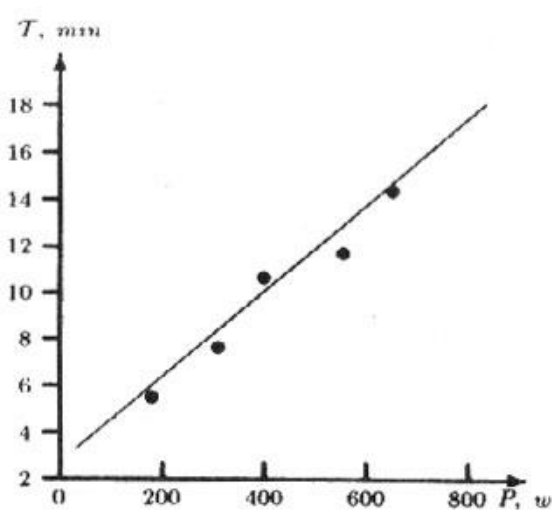


Fig. 4. Tiempo de respuesta del horno respecto la potencia suministrada.

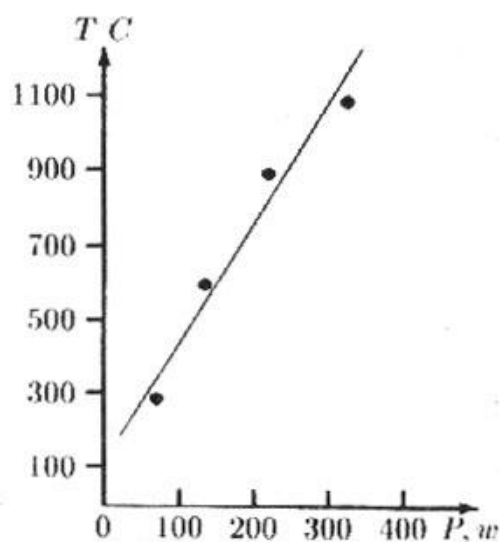


Fig. 5. Temperatura de estabilización respecto a la potencia suministrada al horno.

El tiempo de respuesta del horno corresponde al tiempo que gasta el horno para alcanzar el 62% de la máxima temperatura, o sea, la temperatura de estabilización.

## Estado estacionario del horno

El estado estacionario del horno es un estado en el cual la temperatura del horno no es función del tiempo. Para determinar el gradiente de temperatura del horno fue desarrollado un modelo teórico basado en el balance de energía del horno.

El perfil del horno depende de su diseño. Se construyeron hornos con un diseño especial para poder comparar los cálculos teóricos con los experimentales. En la Fig. 6a se muestra uno de estos hornos.

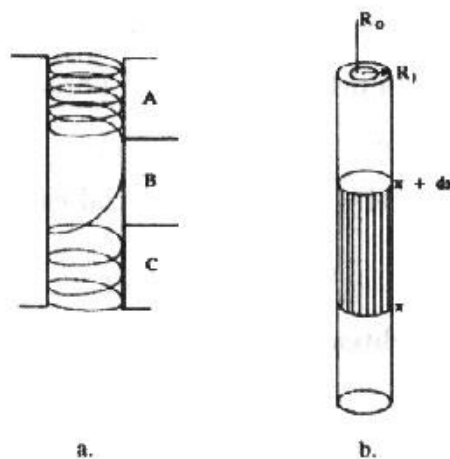


Fig. 6. a) Esquema del horno diseñado con las zonas A, B y C.  
b) Diferencial del horno.

En las zonas A y C el arrollamiento de la resistencia fue hecho con un paso constante, pero distinto. La zona B no tiene arrollamiento, únicamente una sola espira del alambre que conecta las zonas A y C. La parte B es la zona de temperatura, donde existe el gradiente. Las resistencias del alambre en las zonas A y C son diferentes.

Calculemos la transferencia de calor en un diferencial del horno desde el punto  $x$  al punto  $x + dx$  (Fig. 6b.).

El calor conducido en el punto  $x$ , es

$$\dot{Q}_x = -K A_T \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

El calor conducido en el punto  $x + dx$ , es

$$\dot{Q}_{x+dx} = \dot{Q}_x + \frac{dQ_x}{dx} = -K A_T \frac{dT}{dx} - K A_T \frac{d^2T}{dx^2} dx \quad (9)$$

donde:

$T$ : temperatura del horno en el punto  $x$ .

$A_T$  :  $\pi(r_1^2 - r_0^2)$  : área transversal del horno.

La energía disipada al medio por radiación y convección es

$$\dot{Q}_T = h_T A_L (T - T_a) \quad (10)$$

$h_T$ : coeficiente total de transferencia por convección y radiación.

$A_L = 2\pi r_1 dx$ : área lateral del diferencial del horno.

$T_a$ : temperatura ambiente.

El balance de energía en el elemento diferencial entre  $x$  y  $x + dx$  es

$$\dot{Q}_x = \dot{Q}_{x+dx} + \dot{Q}_T \quad (11)$$

reemplazando términos obtenemos:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = m^2(T - T_a) \quad (12)$$

donde,

$$m^2 = \frac{2h_T r_1}{K(r_1 - r_0)} \quad (13)$$

La solución a (12) es:

$$T - T_a = C_1 e^{-mx} + C_2 e^{mx} \quad (14)$$

donde  $C_1$  y  $C_2$  son constantes que dependen de las condiciones de frontera y de tipo de aislamiento. Cuando,

$$x = 0, \quad T = T_0, \quad T_0 - T_a = C_1 + C_2$$

$$x = L, \quad T = T_1, \quad T_1 - T_a = C_1 e^{-mL} + C_2 e^{mL}$$



Resolviendo este sistema de ecuaciones para  $C_1$  y  $C_2$  obtenemos lo siguiente,

$$T - T_a = \left( \frac{(T_0 - T_a)e^{mL} - (T_L - T_a)}{2 \operatorname{sen} h(mL)} \right) e^{-mx} + \left( \frac{(T_L - T_a) - (T_0 - T_a)e^{mL}}{2 \operatorname{sen} h(mL)} \right) e^{mx}$$

Esta ecuación demuestra la variación de temperatura a lo largo del horno, o sea su gradiente de temperatura. En la Fig. 7 se puede observar como se cambia la temperatura a lo largo del horno para el diseño mostrado en la Fig. 6. Como se ve, los cálculos teóricos coinciden bastante bien con las medidas experimentales.

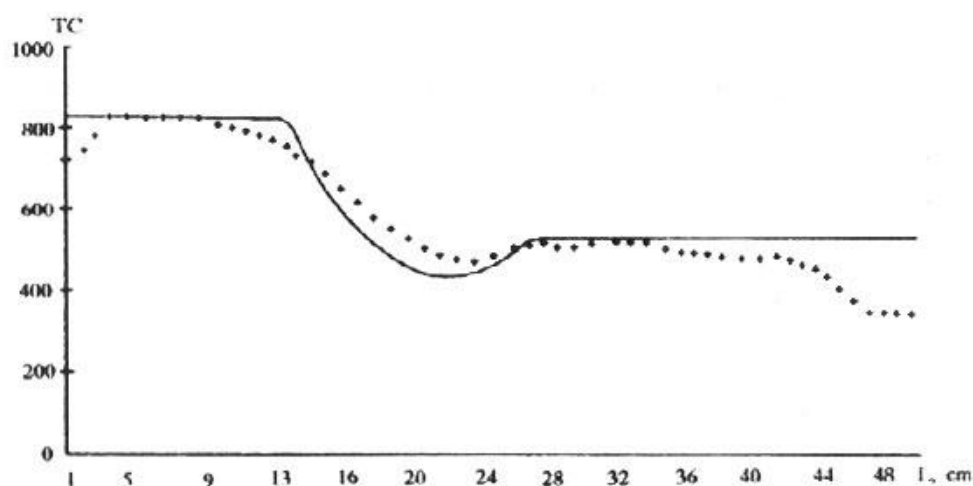


Fig. 7. Perfil de temperatura de horno para el diseño de la Fig. 6. Cálculos teóricos: línea continua. Resultados experimentales: línea punteada.

Para el estudio experimental del estado estacionario del horno se usó un control de temperatura que asegura la estabilización con una exactitud de  $3^\circ$ . Fueron medidos los gradientes de temperatura de los hornos con distintos diseños. Los calculados del perfil teóricos fueron hechos con la ecuación (16), teniendo en cuenta todas las constantes de los materiales utilizados.

## Conclusiones y Discusiones

Los modelos teóricos del estado transitorio y estacionario del funcionamiento del horno están basados en los conceptos de transferencia de calor.

Los cálculos teóricos y las medidas experimentales coinciden bastante bien, tanto para el estado transitorio como para el estacionario.

En los hornos diseñados, el tiempo de respuesta y la temperatura de estabilización dependen de los materiales utilizados y de la potencia suministrada.

## Referencias

V. Fano, R. Pergolari, L. Zanotti, Y. Mater . *Sci.* 14 (1979). 535.

K. Kinoshita, K. Sugii, Y . *Cristal Growth.* 67 (1984) 375.

Ineropera, Frank; P, David; P. Dewith. *Fundamentals of Heat Transfer.* New York, 1981.

B.V. Karlekar , *Transferencia de Calor.* México. 1983.