Stockbarger 法における坩堝支持法の 結晶成長に及ぼす影響

松下 徹・鈴木 国幹

(東京芝浦電気株式会社中央研究所)

Effect of Crucible Supporter on the Growth of Single Crystal by Stockbarger Method Technique

By

Toru MATSUSHITA and Kunimoto SUZUKI

(Central Research Laboratory, Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd. Kawasaki)

It was made clear through our experiments that in Stockbarger's technique those crucible supporters which prevented the crucible from cooling at its bottom, worked badly on the growth of single crystal. To avoid this inconvenience an experiment was carried out on suspending the crucible above the supporter, and it was found that the single crystal of alkali halides was more easily obtained in this method, even when impurities were highly contained in the sample. The reason was studied by measuring temperature of the crucible bottom and by observing the cooling process. The growth of single crystal may easily occur when there exists a certain distance between the supporter and the bottom. It was explained that when the distance between the supporter and the crucible bottom is too short, the cooling rate is not sufficiently rapid due to the thermal radiation from the supporter.

[Received Oct. 8, 1963]

I. 緒 言

熔融体から単結晶を成長させるためには各種の方法が用いられている。中でも温度勾配法、単結晶引上法、帯熔融法、坩堝（くるつば）降下法などが最も広く用いられている¹⁾。これらの方法にはそれぞれ長所、短所がありその方法に適した物質の単結晶製造に応用されている。

坩堝降下法の中で最も有名なものは Stockbarger 法²⁾であって、大きな光学用単結晶を工業的に大量に製造するのに用いられている すぐれた方法である。Stockbarger の用いた炉の原理図を 図-1 に示す。加熱炉は上下2段からなり、上段は結晶温度より高温に、下段は結晶

温度より低温に、それぞれ一定温度に保持する。その中間には熱遮断板があり、熱遮断板の中央には坩堝が通るだけの穴があけてある。坩堝には底が円錐形に尖ったものを用い、これを円錐形にくぼんだ坩堝台の上に乗せる。この台は下方からの操作で坩堝を昇降させることができる。

はじめ上段の炉中で坩堝を加熱して原料を熔融し、下段の炉に向かって徐々に降下させる。底の尖った部分が熱遮断板以下まで降下すると、この部分から結晶化が始まり、坩堝降下に伴って結晶は上方に向かって成長し、坩堝全体が単結晶になるまで成長させることができる。もちろん、この際坩堝降下速度が結晶成長速度より速ければ単結晶は得られない。この結晶成長速度は熔融体の粘度にも左右されるが、結晶を成長させるためには、析出した結晶を通して結晶化熱を外部に向かって奪う必要があるので、析出結晶の熱伝導度および坩堝の大きさなどにも左右される。しかし、熔融体の粘度、析出結晶の熱伝導度などは物質によって定まった値であり、坩堝の大きさは要求される結晶の大きさで決まってしまうので、いずれも自由に変えることができない。

図-1 に示す Stockbarger 法をそのままハロゲン化アルカリ単結晶製造に応用すると、坩堝降下速度をかなり遅くしなければ単結晶になりにくく、極端な場合には、降下速度を非常に遅くしても単結晶にならないことがわ

Fig. 1. Schematic view of Stockbarger's furnace.

かった。この実験では、ハロゲン化アルカリ単結晶製造の予備実験として行ない、主として坩堝支持法、坩堝降下速度などを変えて実験し、単結晶の得やすい条件を明らかにするために行った。

II. 単結晶製造実験

II.1 実験方法

原料ハロゲン化アルカリには主として低融点の沃化ソーダを用いた。坩堝には石英、パイコールガラス製などを用い、その大きさは直径 25 mm, 35 mm のもの 2 種類を用いた。坩堝の形状は図-2 に示すように平底のもの、底が円錐形に尖ったものの 2 種類を用いた。原料粉末を坩堝に充填して後、常圧のままかまたはロータリー真空ポンプで引きながら約 300°C に 8 時間加熱して吸着水分を充分除去し、図-2 に示す細管の部分で真空のまま封じ切って用いた。炉温度は上段中央で 700°C、下段中央で 500°C に保持した。この条件における炉内温度分布を図-3 に示す。坩堝を徐々に降下させる際には、ギヤ装置によって減速された耐熱鋼製のラック棒を用いたが、手動に切り換えると、必要に応じて自由に昇降させることができるようになっている。坩堝の底が上下両段の中央にある熱遮断板より 15~20 mm 上部に位置するようにした状態で坩堝を約 1 時間加熱して原料を完全に熔融し、処定の降下速度で坩堝を徐々に降下させた。

Fig. 2. Crucibles used in the experiment. (a) flat bottom (b) conical bottom.

Fig. 3. Temperature gradient of the furnace used.

II.2 平底坩堝使用の場合

坩堝台材質の熱伝導度の違いによる影響を調べるために行った。直径 25 mm の坩堝を常圧で封じて用い、降下速度 7.3~11 mm/hr の範囲で行なった。ラック棒の上に約 5 mm 厚さのイソライト煉瓦(珪藻土煉瓦)板を置き、その上に坩堝を乗せて降下させた場合と、イソライト煉瓦板の代わりに 1 mm 厚さの鉄板を用いた場合とで結晶成長模様が異なる。図-4(a) は前者の場合で、底部と周囲の部分が一応透明結晶となった。しかし中心部は白濁した多結晶からなっていて、底の透明結晶の部分はきわめて薄く、周囲の透明部はいくらか厚い。図-4(b) は鉄板を用いた場合であって、底部、周囲いず

れも透明部分の厚さがイソライト板を用いた場合よりも厚い。特に、新しい鉄板を用いた場合が厚く、場合によってはほとんど坩堝全体が単結晶となることもある。これに引きかえ、何回か繰返えして使用し、著しく酸化した鉄板を用いると、透明結晶部は薄くなる傾向がある。

II.3 円錐形底坩堝使用の場合

II.3.1 イソライト製台使用の場合 Stockbarger 法の場合と同様に、底が円錐形に尖った直径 35 mm の坩堝を常圧で封じて用い、図-5 に示すように円錐形にくぼんだイソライト煉瓦製の台の上に乗せて行なった。降下速度 4.4 mm/hr で坩堝を降下すると、図-5 に示すように底部と周囲が透明結晶となるが、底の尖った部分は透明結晶の厚さがきわめて薄い。

II.3.2 ニッケル支柱支持器具使用の場合 ここでは坩堝をすべて真空に封じて用いた。図-6 に示すように、幅の狭いニッケル帯で作った坩堝支持器具を用い、支持器具の下部から坩堝底までの高さ h を種々変化した場合における結晶成長状態を調べた。

$h=0$ なる場合に、径 25 mm または 35 mm の坩堝を用い、降下速度 3.7 mm/hr で降下すると大体単結晶になるが図-7(a) のように上部中央に白濁部を生ずることが多い。しかし沃化ソーダに不純物として少量の沃化タ

Fig. 4. Growing crystals of sodium iodide in case of using flat bottom crucibles (a) on an Isolute brick supporter and (b) on an iron plate supporter.

Fig. 5. Growing crystal in case of using a conical bottom crucible on an Isolute brick supporter.

Fig. 6. Thin-shaped nickel supporter for conical bottom crucibles.

リウムを添加すると、この程度の降下条件では単結晶にならない。沃土タリウムを約 0.8 % 添加して、 h 及び降下速度を変化して実験した結果を表-1 と図-7 に示す。表-1 と図-7 からわかるように、 $h=0$ で降下速度が 7.7 mm/hr, 7.3 mm/hr なる場合に当たる No.71 ~No. 73 では、図-7 (b),(c) に示すように底部に小気泡を生じ、

Fig. 7. Growing crystals under various conditions of supporting height h (mm) and lowering rate v (mm/hr) of the crucible.

Table 1. Effect of Lowering Rate and Supporting Height of Crucible on Crystal Growth.

No.	Lowering Rate of Crucible v (mm/hr)	Supporting Height h (mm)	Growing Crystals
71	7.7	0	Fig. 7 (b)
72	7.3	0	Fig. 7 (b)
73	7.3	0	Fig. 7 (c)
74	2.3	0	Fig. 7 (d)
75	2.2	0	Fig. 7 (e)
76	3.7	16	Fig. 7 (f)
77	2.3	43	Single Crystal
78	2.2	43	Single Crystal

これから、上方に向かって白濁部または空洞が延びている。同じ条件で降下速度を遅くし、2.3 mm/hr, 2.2 mm/hr とした場合に当たる No. 74, No. 75 では図-7 (d),(e) に示すように、白濁部がなくなり、空洞だけとなる。またこの場合には、底からの高さ 3~4 mm あたりから上部に向かって空洞が発生している。 $h=16$ mm で降下速度 3.7 mm/hr に当たる No. 76 では図-7 (f) に示すように、 $h=0$ の場合より高い位置にあたる底から約 8 mm あたりから白濁部を生じている。 $h=43$ mm に当たる No. 77, No. 78 の場合には白濁部、空洞共に消失して全体が透明な単結晶になった。特に、No. 78 では沃土タリウムを 2% 添加したにもかかわらず単結晶となった。

結論として言えることは、 h が大きいほど空洞または白濁部の発生しはじめる位置が上部に移動し、 h が充分大きければ空洞、白濁部共に消失して全体が透明な単結晶となる。また発生する空洞と白濁部との関係では、降下速度が速ければ白濁部を、遅ければ空洞を生じやすいことを示している。

II.4 考 察

II.4.1 平底坩堝使用の場合 坩堝が降下して図-8 (a) に示すように坩堝の底が熱遮断板の位置まで来ると坩堝の底の部分が結晶温度になり、ここから結晶化が始まる。結晶化しはじめた結晶を底部から上部に向かって

成長させるためには、坩堝の下にあるイソライト製の坩堝台を通して、下方に向かって結晶化熱を奪う必要がある。しかし、イソライト板は熱伝導が悪いためこの方向の冷却速度が遅くなって、この部分の結晶成長も著しく遅くなる。そのため、結晶がいくらかも成長しないうちに

Fig. 8. Illustration of cooling mechanism of the flat bottom crucible.

図-8(b) に示すように坩堝の底が熱遮断板より低い位置にくるまで坩堝が降下し、図中矢印で示した部分からも熱輻射により冷却がはじまるため、ここからも坩堝の中心に向かって結晶が成長しはじめる。同様にして坩堝降下が進行するにつれて、底からだけではなく上部周囲からも結晶が成長しはじめ、中央部に白濁多結晶部が残ることになる。そこでイソライトの代わりに、これより熱伝導のよい鉄板を用いると、底部からの熱伝導による冷却が容易になり、したがって、この部分の透明結晶部が厚くなることは当然であるものと考えられる。しかし、鉄板を通して下方のラック棒の方に熱が伝わることになるので、ラック棒そのものの冷却速度が問題になる。ラック棒は金属であるため熱伝導はかなりよいが、比熱が大きいのでそれほど速くは冷却しないものと考えられる。結論として、このラック棒が坩堝底からの冷却を妨げていることになる。

II.4.2 円錐形底坩堝使用の場合 イソライト煉瓦の台を用いた図-5 の場合には、平底坩堝を用いた図-8 における結果と同じ理由により中央部に不透明結晶部を生じやすい。

図-6 のニッケル製支柱を用いた場合には、坩堝底からの熱は主として輻射によって外部に伝わるものと考えられる。そこでラック棒上端から坩堝底までの距離 h が大きくなるほど底からの結晶成長がよくなり、坩堝全体が単結晶になりやすいので、この際もラック棒上部が坩堝底からの輻射熱を遮蔽し、底部からの冷却を妨害することが考えられる。この妨害作用を確かめるために次の実験を行なった。

III. 円錐形坩堝底からの伝熱の検討

III.1 測定方法

図-5 の支持方法と図-6 の支持器具を用いて坩堝を支持し、図-9 に示すように熱電対を取り付けて、坩堝底が熱遮断板より上部に位置するようにして、坩堝を加熱

Fig. 9. Measurement of temperature at the bottom of conical crucibles supported in the two manners as shown (a) in Fig. 5, and (b), (c) in Fig. 6 respectively, when lowered rapidly below the baffle-plate.

し、急激に熱遮断板の下まで坩堝を降下させて温度変化を測定した。坩堝降下の距離は、熱遮断板の位置を 0 とし、これから坩堝底までの距離を測定し、熱遮断板より上方を +、下方を - とし、+50 mm → -50 mm, +40 mm → -40 mm, +30 mm → -30 mm, +20 mm → -20 mm, +10 mm → -10 mm の 5 つの場合について実験した。またラック棒上端から坩堝底までの距離 h は 74 mm, 44 mm, 14 mm, 9 mm, 4 mm とし、イソライト台を用いた図-9 (a) の場合には $h=11$ mm とした。また、 $h=44$ mm の場合には図-9 (c) に示すように、坩堝内側で底の部分の温度も測定した。この際用いた炉の温度分布は図-3 と同じ条件とした。

III.2 測定結果

測定結果を時間-温度曲線 の形で図-10 に示す。これらの曲線から考えて、 h の値が大きいほど冷却速度が速く、イソライト台を用いた場合には冷却速度が著しく遅いことを示している。

III.3 測定値の計算

坩堝底からの冷却にあたり、伝熱機構としては熱伝導、熱輻射、対流などが考えられるが、これらのうちで

(g) $h=11$ mm (Isolite brick supporter)

Fig. 10. Cooling curves of the crucible bottom lowered rapidly below the baffle-plate.

The figures shown as $\pm 10, \pm 20, \dots$, express the distance of the crucible bottom measured from the position of the baffle-plate.

対流は一応起きないものと仮定して計算を進める。図-9における測定条件の場合はきわめて複雑であって、簡単な計算からでは伝熱の式は容易に得られない。そこで、式を単純化するためいろいろの仮定を設けて論ずることにする。外部温度 T となるところに物体を持ち来たした場合には、その物体は次式に従って温度が上昇または降下する³⁾。

$$\frac{dQ}{d\theta} = h_T A (T - t_s) \quad (1)$$

ここに、 Q は熱量、 θ は時間、 t_s は物体の表面温度、 A は表面積、 h_T は伝熱係数である。物体として金属からなった熱電対の球状熱接点を仮定すると、表面温度 t_s と内部温度 t とは大体等しくなるため、 $dQ = V \rho C_p dt$ と置くことができる。ただし、 V, ρ, C_p はそれぞれ物体の容積、密度、比熱を表す。この dQ の式を式 (1) に代入して積分すると、

$$\ln \frac{T - t_0}{T - t} = \frac{h_T A}{V \rho C_p} \cdot \theta \quad (2)$$

ここに、 t_0 は $\theta=0$ の場合の温度である。 h_T, A, V, ρ, C_p などをすべて定数とみなし、常用対数の形になおすと、式 (2) は、

$$\log \frac{t_0 - T}{t - T} = K \theta \quad (3)$$

ここに、 K は定数。この K の中には伝熱係数 h_T が含まれるが、もし伝熱が輻射による場合には、この係数は温度によって変化する。いま、輻射による伝熱係数を h_r とすると、

$$h_r = \frac{C(T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} \quad (4)$$

なる形で表わされる。ここに、 C は定数、 T_1, T_2 はそれぞれ物体 1、物体 2 の絶対温度である。この実験では、坩堝降下前後における温度変化が最大な場合で、 $680^\circ\text{C} \rightarrow 600^\circ\text{C}$ 、最小な場合で $640^\circ\text{C} \rightarrow 618^\circ\text{C}$ となるので、この値を用いて式 (4) から h_r を求めると、前者の場合で 1.06×10^9 C、後者で 0.996×10^9 C となり、大

体等しい値になるので、式 (3) における K もおよそ定数になるものと考えられる。

以上は金属からなった熱電対の球状熱接点を物体と仮定して計算したが、熱伝導のよくない物体の場合でも、平板状、円柱状、球状などの物体では、式 (3) と同様に $(t_0 - T)/(t - T)$ の対数と θ との間に比例関係が成立している³⁾。図-9 における測定では複雑な組み合わせからなっているが、いずれも比例関係の成立する場合の総合としてやはり式 (3) の関係が成立するものと考えられる。

式 (3) 中の T の値は不明であるが、炉内の温度が坩堝降下によって乱されないものと仮定し、坩堝降下後充分長時間経過後、測定温度が最低温度に落ち着いて一定温度になったところを T と仮定し、図-10 の値を用いて $\log \{(t_0 - T)/(t - T)\}$ と θ (分) との関係を求めると図-11 となる。

図からもわかるように、ほとんどの場合いずれも折れ

The distance of the crucible bottom from the position of baffle-plate before and after lowering.

Before After

—•— $+50 \rightarrow -50$
—•— $+40 \rightarrow -40$
—•— $+30 \rightarrow -30$
—•— $+20 \rightarrow -20$
—•— $+10 \rightarrow -10$

θ : time

t_0 : initial temperature of the crucible bottom

t : temperature of the crucible bottom at time θ

T : external temperature

(a) $h=74$ mm (b) $h=44$ mm (c) $h=14$ mm

(d) $h=9$ mm (e) $h=4$ mm (f) $h=44$ mm (Inside of crucible) (g) $h=11$ mm (Isolite brick supporter)Fig. 11. $\log \{(t_0 - T)/(t - T)\} - \theta$ Curves.

た直線となり、その折点は坩堝降下後1分～2分あたりにある。そこで、この折点の前後では冷却の機構が違っているものと考えられる。しかし、図-11 (a) に示す $h=74$ mm の場合および図-11 (f) に示す $h=44$ mm で坩堝内部の測定の場合にはこの折点が判然としない。折点の原因として考えられることは、はじめ坩堝の底が熱

輻射によって速かに冷却し、ラック棒上端の温度近くまで到達すると、逆にラック棒からの輻射の影響を受けることになるものと考えられる。坩堝底とラック棒上端と同じ温度になると、両者間には輻射熱の受授がなくなり、坩堝底から直下方向への輻射熱はラック棒によって完全に遮蔽され、ラック棒の冷却に伴ってわずかつ熱輻射が起こるものと考えられる。そこで、その後の冷却はラック棒の冷却速度に大きく左右されるため、かなり遅くなるものと考えられる。また、坩堝降下後約1分～2分までの $\log \{(t_0 - T)/(t - T)\} - \theta$ 曲線の傾斜は h が大きいほど大きい。すなわち、坩堝降下直後における冷却においてもラック棒による影響がかなり大きいのでこの時期においてもラック棒が坩堝底からの熱輻射をかなり妨害しているものと考えられる。したがって、坩堝底とラック棒との間の距離 h が大きくなるとその妨害作用が減少して、坩堝底からの冷却が速くなるものと考えられる。

イソライト台を使用した図-11 (g) の場合には、坩堝降下直後の冷却速度が著しく遅く、坩堝降下後1分～2分までは直線とならない。これはイソライトを通して坩堝底が冷却しはじめるまでにかかなりの時間を要することを示している。

$\log \{(t_0 - T)/(t - T)\} - \theta$ 曲線の中で、坩堝降下後1分～2分までの曲りを生ずる以前の部分の値から、傾斜すなわち式(3)における比例定数 K の値を求めると表-2 のようになる。ただし、イソライト台を用いた図-11 (g) の場合には、坩堝降下後1分～2分経過後はじめて直線となるので、その後の直線の部分の値から求め、図-11 (f) に示す坩堝内側の測定では、曲線が幾らか S 字

Table 2. Calculated Value of K and ω .

Lowering Distance of Crucible (mm)	h (mm)					Isolite Brick Supporter $h=11$ mm
	74	44	14	9	4	
+50 → -50	1.12	0.850	0.426	0.377	0.301	0.410
+40 → -40	1.14	0.913	0.485	0.378	0.319	0.452
+30 → -30	1.04	0.842	0.538	0.461	0.307	0.395
+20 → -20	1.15	0.835	0.529	0.498	0.399	0.412
+10 → -10	1.07	0.802	0.550	0.530	0.513	0.389
mean	1.10	0.848	0.525	0.449	0.368	0.408
$\omega (\times \pi)$	3.53	3.40	2.67	2.36	1.97	—

形になる傾向があるので、この場合は直線になるものとして K の値を求めた。表から、 K の値は h が大きいほど大きく、坩堝内側で測定した値は坩堝壁による冷却の遅れのために幾らか小さくなる傾向がある。また、イソライト台を用いた場合の K の値は非常に小さな値になっている。もし、坩堝降下後2分までの値を用いて K の値を求めると 0.0408 となり、1分までの値からはさらに小さな 0.0248 なる値が得られる。また表-2 中には比較のため、坩堝底の尖った先端を中心として、坩堝自体およびラック棒によって遮蔽された以外の部分の立体角 ω 、すなわち外部方向に向かって熱輻射の自由に行な

われる角度を計算して一緒に示してある。

表-2 の値を用いて、 h に対する K の値 (各坩堝降下距離において得られた値の平均値) の関係を求めると、図-12 に示すようにわずかに弯曲した曲線にな

る。また、坩堝底から Fig. 12. h - K and ω - K Curves. 上の熱は、上方に向かっては熱伝導により、下方に向かっては坩堝底よりも低温度のラック棒上端に輻射によって伝わることも一応考えられるが、比較のため自由に輻射の行なわれる角度である表中の立体角 ω と K との関係をプロットして図-12 中に同時に示してある。図で見ると、 ω および K の値が大きな範囲である右上の部分で ω の増加に比較して K の増加が著しい。すなわち、 h を大きくしてラック棒により坩堝底からの輻射熱が遮蔽される角度を減少し、したがって熱輻射の自由に行なわれる立体角 ω が増加すると K も増加するが、 K は立体角 ω の増加より以上に著しく大きくなる傾向にある。これは、図-3 に示すような温度勾配を有する炉を用いている関係から、 h が大きくなるほどラック棒上端の温度が坩堝底の温度に比較していっそう低くなるため、立体角 ω の方向だけでなくラック棒上端に対しても熱輻射が行なわれるようになることを示しているものと考えられる。このように、 h がある程度大きくなり、ラック棒の方向にも熱輻射が、自由に行なわれるようになると、 $\log\{(t_0 - T)/(t - T)\} - \theta$ 曲線には折点が生じなくなるものと考えられる。

Fig. 12. h - K and ω - K Curves.

IV. 結 言

イソライト煉瓦または鉄板製の坩堝台に乗せて坩堝を降下させると底部からの冷却が遅いため底部からの結晶成長が遅れ、降下に伴って坩堝の側壁からも結晶が成長しはじめるので、中心に白濁多結晶質の部分を生じやすい。この傾向は鉄板より熱伝導の悪いイソライト台を用いた場合が著しい。

坩堝底が円錐形に尖った先端を、ラック棒上端より h の高さの所に宙に浮かして支持した状態で降下させた場合には、 h が大きいほど中心に生ずる白濁部、空洞などが上方に移動し、遂には消失する。

坩堝降下後 1~2 分までの間では、式 (3) における $\log\{(t_0 - T)/(t - T)\}$ と θ との間に比例関係が成立し、その比例定数 K は h が大きくなるとともに増加する。

h が増加すると、坩堝底から自由に熱輻射の行なわれる立体角 ω も増加するが、 ω の増加以上に K の増加の方が著しい。その原因は、 h が大きくなるほどラック棒の上端が、温度の低い炉の下部の方に位置するようになり、したがってその温度も低くなるため、ラック棒の方向に対しても坩堝底からの熱輻射が行なわれるようになるためと考えられる。

直径 25 mm の坩堝を用い、 $h=43$ mm 以上、坩堝降下速度約 2 mm/hr とすると、坩堝全体が完全な単結晶となる。

本研究に際し、東京電器株式会社の石川朝邦氏には御指導を、東芝中央研究所の三浦勇三氏には多大の御援助を戴いた。ここに厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) H.E. Buckley. "Crystal Growth" (1951); 実験化学講座, 4 卷 (固体物理化学) p. 17-25 (1956)
- 2) D.C. Stockbarger. *Rev. Sci. Instr.*, **7** (1936); **10**, 205 (1939); *Dis. Farad. Soc.*, No. 5, 294, 299 (1949); *J. Opt. Soc. Amer.*, **2**, 416 (1937); **39**, 731 (1949)
- 3) 内田, 亀井, 八田. "化学工学" p. 97-100 (1940)

(10/8/63 受付)

MoSi₂-WSi₂ 二成分系の焼結

松 尾 重 友・久 保 富 太 郎

(東京芝浦電気株式会社中央研究所)

Sintering in the Binary System MoSi₂-WSi₂

By

Shigetomo MATSUO and Tomitaro KUBO

(Central Research Laboratory, Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd. Kawasaki)

MoSi₂ is electrically conductive and highly stable against oxidation, melts at 2,030°C and decomposes at 1,870°C in the presence of carbon. Thus the sintered product has been developed as a heating element which can be used up to 1,700°C in air. WSi₂ has the