

## EFG법에 의한 $\gamma$ - $6\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot \text{GeO}_2$ 단결정의 육성

김 호 건 · 유 건 종 · 宮 本 敬 \*

한양대학교 화학과, 서울, 133-791

\* 日本 大阪府立産業技術綜合研究所

## Growth of $\gamma$ - $6\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot \text{GeO}_2$ Single Crystals by EFG Method

Ho-Kun Kim, Kun-Jong Yoo and Kei-Miyamoto\*

Department of Chemistry, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

\*Osaka Research Institute for Industrial Technique, Osaka, 550, Japan

### 요 약

광기능소자로 응용성이 넓은 전기광학결정  $\gamma$ - $6\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot \text{GeO}_2$ (이하 BGO로 약칭)을 EFG(Edge-defined Film-fed Growth)법에 의하여 판상단결정으로 육성하는 기초적 조건을 조사하였고 얻어진 판상단결정의 characterization 및 평가를 행하였다. 본 연구에서 얻어진 최적성장조건은 온도구배가  $22^\circ\text{C}/\text{cm}$  이었고 인상속도는  $2.0\text{mm}/\text{h}$ 이었다.

결정성장 최적조건에서 육성된 BGO 결정은 제 2상의 석출이 없고 grain boundary가 존재하지 않으며 X선분석으로도 단결정임이 확인되었다. 육성된 판상단결정의 판면은 (100)면이었고 결정성장 방향은  $\langle 110 \rangle$ 이었다. 육성된 판상단결정은 편광현미경하에서는 pore, void, inclusion, striation 등의 성장결함이 없는 양질의 단결정이었으나 미세결함인 전위(dislocation)의 존재가 확인되었고 전위밀도는  $7.0 \times 10^5/\text{cm}^2$ 이었다.

### ABSTRACT

The fundamental conditions for growing  $\gamma$ - $6\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot \text{GeO}_2$  (BGO) single crystal plates by EFG (Edge-defined Film-fed Growth) method, were investigated and the characterization, quality test were carried out for obtained BGO single crystal plates. The optimum growing conditions determined in this study were as follows :

- temperature gradient :  $22^\circ\text{C}/\text{cm}$

- pulling rate : 2.0 mm/h.

BGO single crystal plates grown at the above optimum conditions did not include secondary phase or grain boundary and were confirmed as single crystals by X-ray analysis. It was found that the single crystal plates had (100) planes and  $\langle 100 \rangle$  growth direction. Growth defects, ie, pore, void, inclusion, striation, were not detected in the single crystal plate under polarizing microscope but dislocations (microscopic defect) were found and dislocation density was  $7.0 \times 10^5/\text{cm}^2$ .

## 1. 서 론

$r=6\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot \text{GeO}_2$  (약칭 BGO)는 전기광학적 기능을 가지는 결정으로서 체심입방정, 점군23에 속하는 Bismuth silenite족으로 높은 전기광학효과와 광전도성 및 선광성을 나타내기 때문에 image 가역 기록소자, volume hologram 소자 등의 광정보 처리소자로 응용할 수 있다[1-4]. EFG(Edge-defined Film-fed Growth)법은 일정한 형상을 가진 단결정(shaped single crystal)을 제조하는 방법중의 하나로서 1970년대 초에 개발된 비교적 새로운 단결정 성장 기술이다[5]. 이 방법은 용액에 seed crystal을 접촉시키고 이를 위로 끌어올리는 점에서는 Czochralski 법과 같으나, 용액중에 매우 좁은 틈새를 가진 die를 넣어서 모세관 현상에 의하여 die 속으로 들어온 용액에 seed crystal을 접촉시키는 것이 다르다. 이 방법에 의하면 용액은 die속의 틈새를 통하여만 공급되기 때문에 성장된 단결정은 틈새의 모양과 같은 형상을 가지게 된다. 따라서 이 방법에서 틈새의 모양을 변화시키면 여러가지 형태의 단결정을 얻을 수 있다[6,7]. 전기광학적 기능을 가지고 각종의 광정보처리소자로서 응용되는 단결정에 있어서는 면적이 넓은 판상의 시료를 제조하는 것이 많은 정보를 처리하는데 유리하고 또한 경제적이다. 현재 이러한 판상시료는 Czochralski법에 의하여 육성된 단결정 bow1을 절단하여 만들고 있으나 단결정 bow1의 직경을 크게 하는 것이 용이하지 않기 때문에 면적이 넓은 판상시료를 얻기가 어렵다. 이에 대하여 EFG법에 의하면 판상시료를 직접 용액으로부터

터 작성할 수 있고 die의 크기를 크게 하면 면적이 넓은 판상시료를 얻는 것도 가능하다. 따라서 EFG법은 특히 광정보 처리용 판상 단결정의 성장에 적합한 방법이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 EFG법에 의하여 전기광학적 기능을 가지며 광정보 처리용 소자로서 유용한 BGO 판상 단결정을 육성하고 얻어진 단결정의 characterization 및 품질평가를 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 성장장치

단결정 육성을 위한 인상기의 기본구조는 회전인상구동장치 및 control system으로 구성되어 있으며, 이 인상기의 회전수 범위는 0~60rpm, 인상속도범위는 1.0~20.0mm/h이다. 전기로는 저항체(canthal)발열식이며 after heating을 위하여 two zone으로 하였고 이를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 2에는 제작한 two zone furnace의 온도분포를 나타내었다. 전기로 온도 조절은 온도조절 분해능이 0.1°C이며 설정온도의 정밀도는  $\pm 0.3\%$ 인 program temperature controller(RKC Rex P-100)를 사용하였다. 판상단결정을 육성하기 위한 die는 모세관의 폭이 약 0.5mm이며 die선단의 형태는 판상결정의 성장이 용이하도록 오목한 형태로 만든 백금 die를 사용하였다. 백금 die의 형태는 Tatarchenko등의 논문을 참조하여 결정하였다[8]. 백금 die의 형태 및 size는 본 연구실에서 연구한 BSO 판상단결정 육성[10]시 사용한 것과 같다.

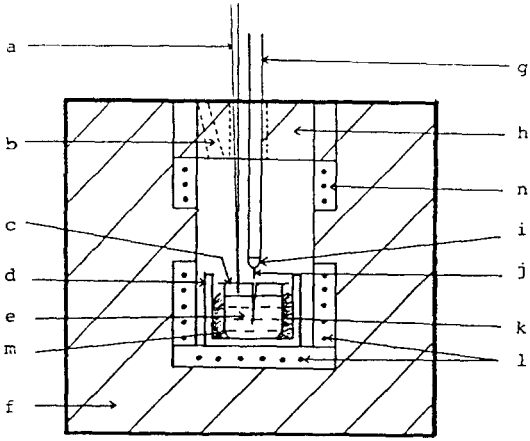


Fig. 1. Electric two zone furnace for EFG growing of BGO.

a : thermocouple, b : window, c : Pt die, d : alumina crucible, e : melt, f : refractory, g : seed holder, h : cover, i : Pt wire, j : seed crystal, k : Pt crucible, l : heating element, m : alumina powder, n : heating element.

## 2.2. 육성방법

### 2.2.1. Seed crystal 작성

99.99% 이상 순도의 시약  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 와  $\text{GeO}_2$ 를  $6\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot \text{GeO}_2$  조성(mol비)이 되도록 조합하여 전체 중량이 약 250g이 되도록 하였다. 이를 알루미늄 유발에서 충분히 혼합한 뒤 용량 50ml의 백금도가니에 넣고 이를 Fig. 1에 나타난 전기로 중에서 용융시켰다. 이때 thermocouple을 용액 표면에 접하도록 하여 용액 표면의 온도를 측정하였고 이 온도가 BGO 조성의 융점인  $930^\circ\text{C}$ 를 유지하도록 하였다[9]. 이 상태로 1시간 유지한 뒤 인상기의 시료 holder에 백금선을 매달고 백금선을 용액 표면에 접촉시켜서 BGO 단결정을 육성시켰다. 이때 인상속도는 5.0mm/h로 하고 회전속도는 30rpm으로 하였다. 그 결과 직경 3.1cm, 길이 3.9cm의 봉상단결정을 얻을 수 있었다. 이 단결정을 (100)면이 나오도록 절단하여 판면이 (100)면인 판상시료를 만들고 이를 seed crystal로 하였다.

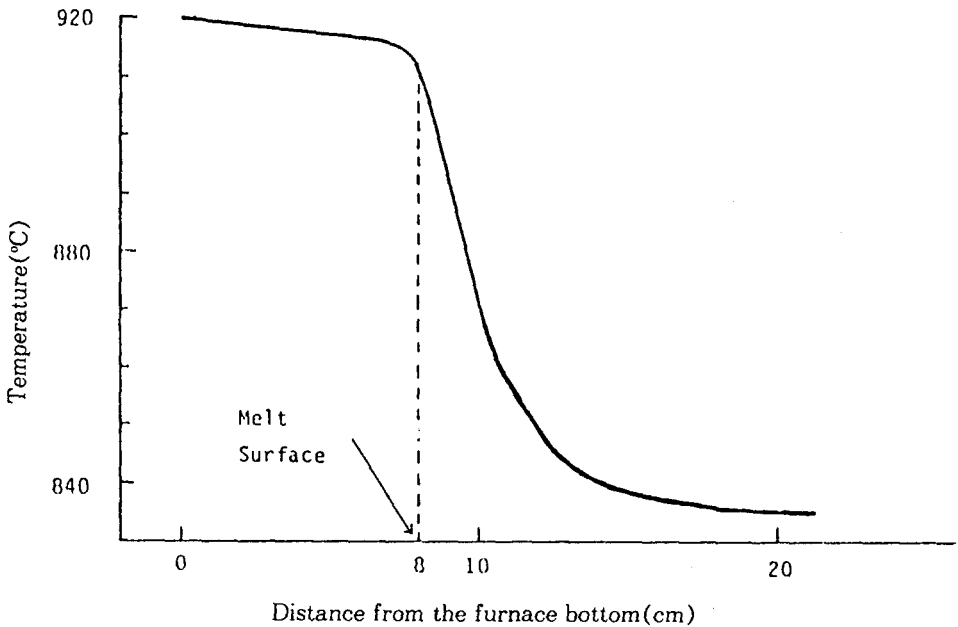


Fig. 2. Temperature profile of two zone furnace.

### 2.2.2. BGO 판상단결정 육성

BGO 판상단결정의 육성조건은 본 연구실에서 연구한 BSO 판상단결정 육성시의 최적육성조건을 참조하였다[10].

99.99% 이상 순도의 시약으로 조합한 BGO 조성의 batch 약 250g을 용량 50ml의 백금도가니에 넣고 도가니중에 백금 die를 설치한 뒤 이를 Fig. 1에 나타낸 전기로에서 용융시켰다. 이때 용액 표면의 온도는 940°C를 유지하게 하였고 용액 표면에서 백금 die 선단까지의 거리는 1.0mm이었다. 용융된 상태로 1시간 유지한 뒤 백금 die를 통하여 올라온 용액에 seed 결정을 접촉시키고 이를 일정한 속도로 인상시켰다. 이때 인상속도는 2.0mm/h로 하였다.

## 2.3. 육성된 결정의 characterization 및 평가

### 2.3.1. Characterization

육성된 결정의 일부를 분쇄하여 분말 X선 회절(powder XRD)에 의하여 석출결정상을 확인(identification)하였다. 판상결정의 판면에 대한 Laue X선 분석에 의하여 단결정성을 확인하고 판면의 면지수를 확인하였다.

### 2.3.2. 평가

#### 가. 거시적 결함 조사

육성된 결정의 편광현미경 관찰을 통하여 pore, inclusion 등의 분포상황을 조사하고 striation, thermal strain 등의 성장결함의 존재여부를 확인하였다.

#### 나. 미시적 결함

육성된 판상 결정의 양면을 광학연마한 뒤 19% HCl 수용액에 3초간 침적하여 etching시키고 이를 금속현미경으로 관찰하여 etch pit를 조사하였다. 또한 etch pit의 수와 결정의 면적으로부터 전위밀도(dislocation density)를 산출

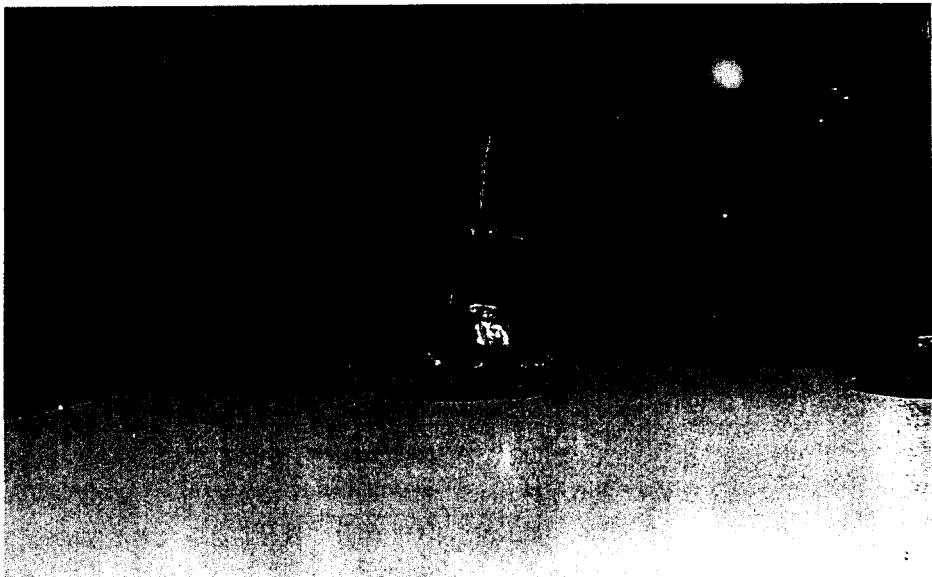


Fig. 3. BGO single crystal grown for seed crystal.

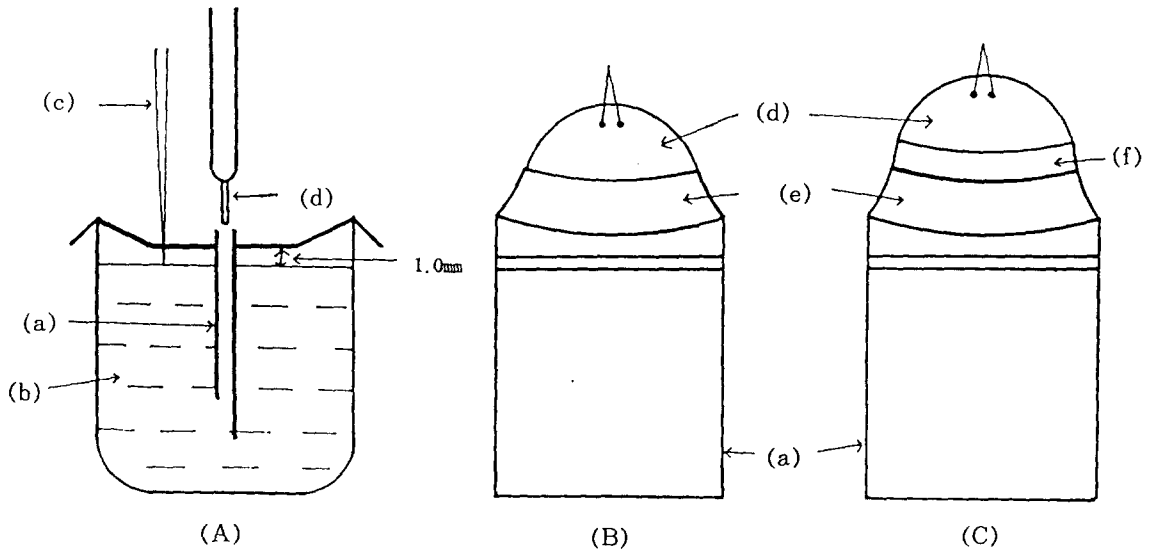


Fig. 4. Setting of Pt crucible and die (A), Schematic growing process of BGO single plate (B), (C).

(a) Pt die, (b) melt, (c) thermocouple, (d) crystal. (e) melt zone, (f) solidified crystal

하였다.

#### 다. 광투과율 측정

육성된 판상결정의 양면을 광학연마하여 두께 0.5mm의 시료를 만들고 이 시료의 광투과율을 UV(Perkin Elmer Lambda 7) 및 IR(Perkin Elmer model 1430) spectrophotometer를 이용하여 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. Seed Crystal

결정인상속도 5.0mm/h, 회전속도 30rpm에 의하여 육성된 BGO seed crystal을 Fig. 3에 나타내었고, 이 결정의 성장방향에 수직인 절단면에 대한 Back Laue X선분석 결과 <211> 방향으로 성장한 단결정임이 확인되었다. 이 단결정으로부터 (100)면이 나오도록 절단하여 만든 판상시료에 대한 etching 실험결과 전위

밀도가  $1.0 \times 10^4 / \text{cm}^2$ 임이 확인되었다.

#### 3.2. 판상단결정의 육성

본 연구에서는, 전술한 바와 같이 BSO 판상단결정의 최적육성조건을 참조하여 인상속도 2.0mm/h, 용액표면으로부터 die 선단의 높이를 1.0mm로 하고 two zone furnace를 사용하였다 [10]. 단, 이때 용액 표면의 온도는 BSO의 경우보다 약 30°C 높은 940°C로 유지시켰다. 이와 같은 육성조건에서 Fig. 4와 같이 안정된 melt zone이 형성되었고 melt의 공급이 충분히 이루어지면서 판상결정이 정상상태로 육성되었다. 또한 판상결정을 전기로에서 꺼낼 때 crack이 발생하는 경우가 없었으므로 after heating조건이 적당함을 확인하였다. 육성된 판상결정을 Fig. 5에 나타내었다.

two zone furnace의 온도구배 측정치(Fig. 2)는 22°C/cm 이었고 전기로 상부에서는 840°C

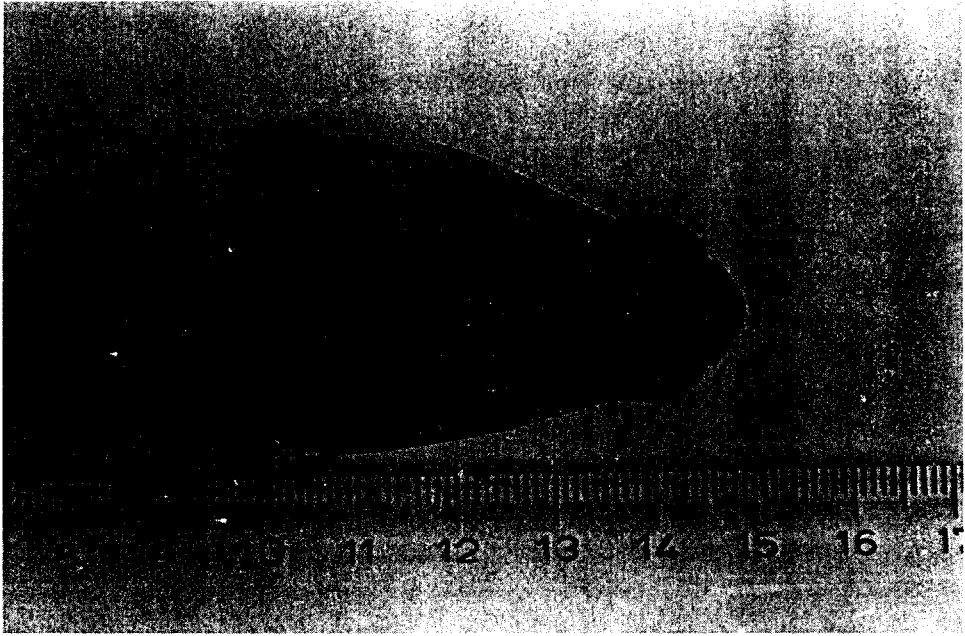


Fig. 5. BGO single crystal plate grown by EFG method (pulling rate 2.0mm/h).

로부터 서서히 낮아지는 온도분포를 보였다. 따라서 이 경우에는 성장된 결정이 급격히 냉각되지 않고 판상결정의 상하부위에 따른 온도차가 적기 때문에 결정에 부가되는 thermal stress가 상당히 완화될 것으로 추정되었다. 한편 BSO 판상결정육성의 경우[10]는 one zone furnace를 사용하였고 이 때 전기로의 온도는 상부에서 급격히 낮아지는 분포를 보였다. 따라서 육성된 결정이 급격히 냉각되므로 결정중에 crack이 발생하였다.

EFG법에서는 Cz법과 달리 결정을 회전시키지 않으므로 결정성장 중 용액의 균질성 유지가 어렵고, 고-액 계면 부근에 조성적 과냉각 영역이 형성되기 쉽다. 조성적 과냉각 영역이 형성되면 결정이 cellular 상으로 성장하므로 결정중에 pore, inclusion 등이 혼입되어 양질의 단결정을 얻을 수 없다. 고-액 계면 부근에 조성적 과냉각 영역이 형성되지 않고 결정이

plane front로 성장하기 위한 조건은 다음식에 의하여 주어진다.

$$\frac{G}{R} \geq \frac{M_L C_0 (1-k)}{k D_L}$$

여기서  $G$ 는 고-액 계면의 온도구배,  $R$ 은 인상속도(결정성장속도),  $M_L$ 은 액상선구배,  $C_0$ 는 용액조성,  $k$ 는 고-액 분배계수이며  $D_L$ 은 용액의 확산계수이다. 위 식으로부터 결정중에 inclusion 등을 포함하지 않는 양질의 단결정을 얻으려면  $G/R$ 의 값을 크게 해 줄 필요가 있다. 따라서 결정 육성시에는 온도구배를 크게 하거나 인상속도를 느리게 하는 것이 양질의 단결정을 얻는데 유리하다. 본 연구의 경우에 온도구배는  $22^\circ\text{C}/\text{cm}$ 이므로 조성적 과냉각이 일어나지 않기 위한  $G/R$ 의 값은  $110^\circ\text{C} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$ 인 것으로 계산되었다.

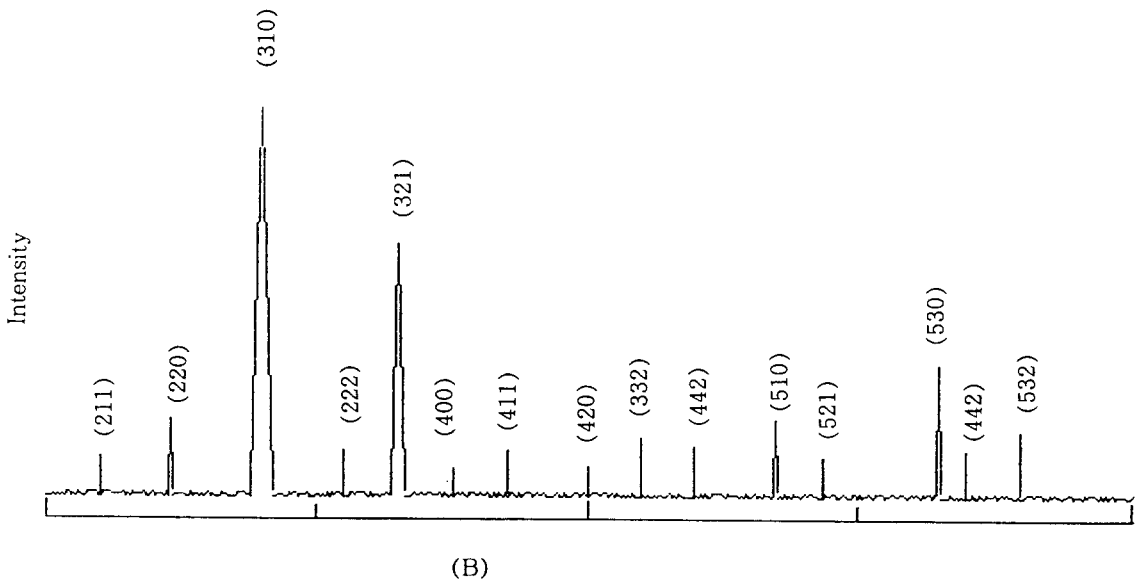
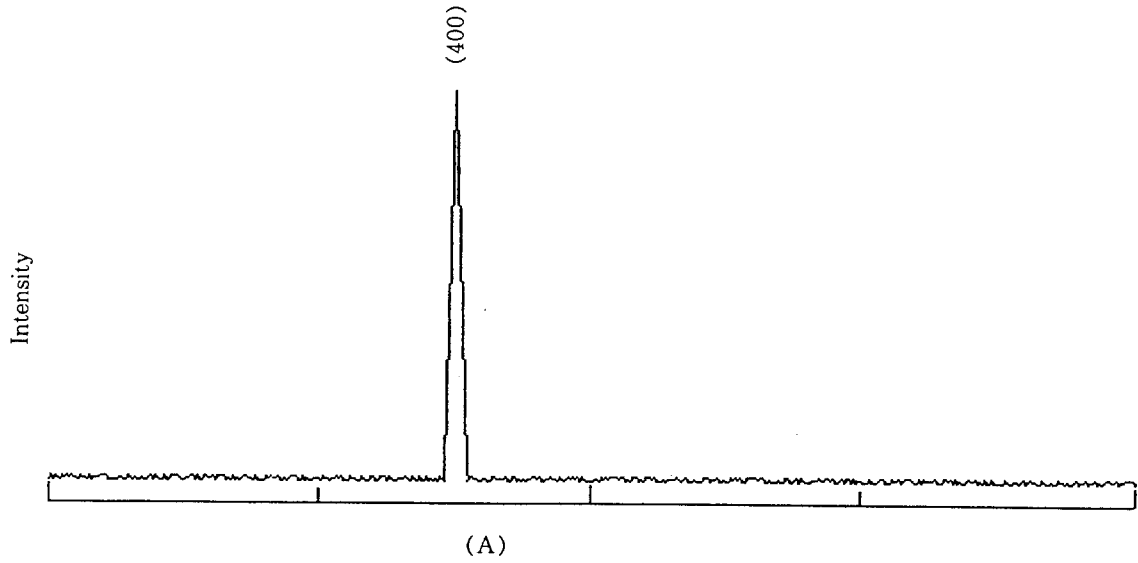


Fig. 6. X-ray diffraction patterns of BGO crystal plate (A) and crystal powders (B).

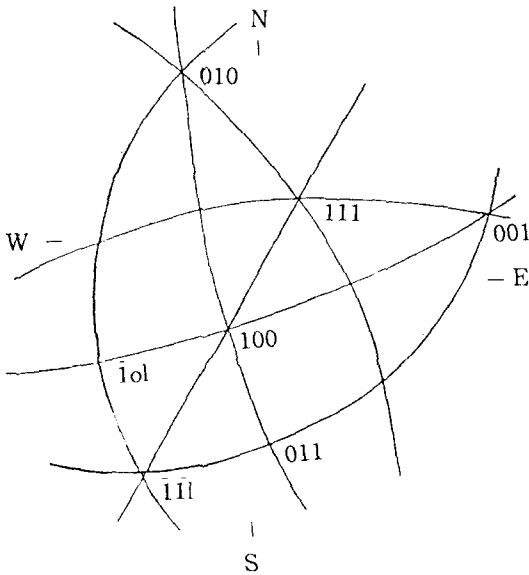
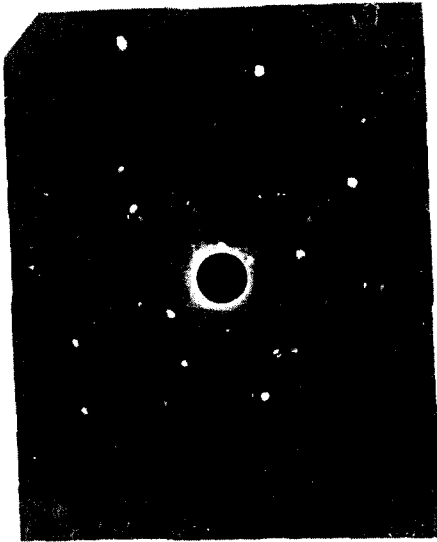


Fig. 7. Back Laue reflection pattern of BGO single crystal plate and growth direction determination by the Laue Technique.

### 3.3. 판상결정의 characterization 및 평가

2.2.2에 기술한 최적 육성조건에 의하여 육성된 판상결정에 대한 결과는 다음과 같다.

#### 3.3.1. X선 분석

BGO 결정의 분말 X선 회절분석 및 결정 판면에 대한 X선 회절분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 7에는 판상결정의 판면에 대한 back Laue reflection pattern을 나타내었다. Fig. 6와 Fig. 7로부터 결정중에는 BGO 이외의 결정상이 존재하지 않는 것과 결정 판면이 (100)면임이 확인되었다.

#### 3.3.2. 편광현미경 관찰

Fig. 8에 편광현미경 관찰에 이용한 BGO 판상시료(양면 광학연마, 두께 0.5mm)의 사진을 나타내었다. 이 시료를 편광현미경하에서 관찰한 결과 적어도 편광현미경하에서는 grain boundary가 발견되지 않았고 inclusion, void, pore, striation등의 성장결함도 관찰되지 않았다. 그러나 이 시료를 crossed nicol상태(소광상태)에서 관찰하면 광학적으로 불균질한 부분(하얀 부분)이 극히 일부 존재하는 것이 확인되었다. 이러한 부분은 시료중에 불규칙하게 존재하며 또한 이 부분에 inclusion등은 존재하지 않았다.

#### 3.3.3. Etching 및 전위밀도 계산

HCl에 의하여 etching실험을 한 BGO 판상시료의 금속현미경 사진을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에 보이는 etch pit 수로부터 전위밀도를 계산한 결과 평균전위밀도는  $7.0 \times 10^5/\text{cm}^2$ 이었다. Table 1에는 BGO의 전위밀도계산 data를 나타내었다.

본 연구에서 얻은 결정성장 최적 조건인 온도구배  $22^\circ\text{C}/\text{cm}$ , 인상속도  $2.0\text{mm}/\text{h}$ 에서 성장시킨 BGO 판상결정은 성장결함인 void, pore, inclusion, striation 등은 확인되지 않았으나 원자 order의 미세결함인 전위가 발견되었다. 전위의 생성원인은 여러가지가 있으나 중요한 것은 seed crystal로부터의 전파 및 성장 후 결정에 걸리는 thermal strain에 의한 것이다[11].



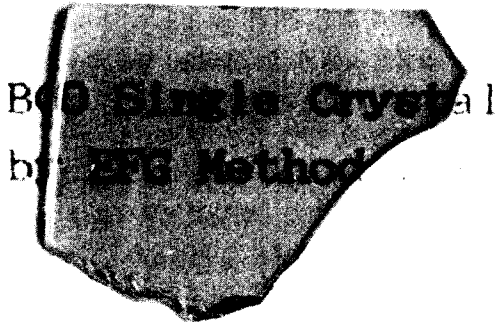


Fig. 8. Polished BGO single crystal plate (thickness 0.5mm).

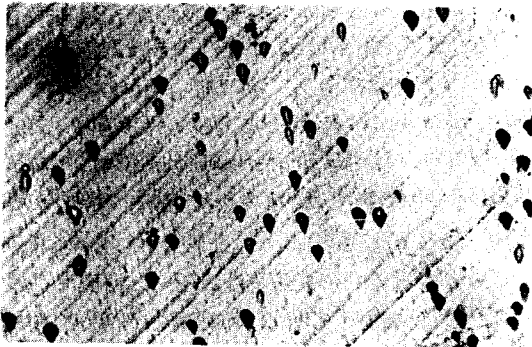


Fig. 9. Etch pits on (100) plane of BGO single crystal plate.

BGO의 seed crystal에서 확인한 전위밀도는  $10^4/cm^2$ 이었으나 성장시킨 판상결정의 전위밀도는  $7.0 \times 10^5/cm^2$ 로서 약간 증가한 것을 알 수 있었다. 이와 같은 사실은 seed crystal의 전위가 성장되는 판상결정에서 전달되고, 판상결정에서 새로운 전위가 발생했음을 의미한다. 새로운 전위의 생성원인은, after heating에 의해서도 annealing이 충분히 이루어지지 않아서 결정중에 thermal strain이 미약하게 걸렸기 때문으로 추정된다. 이는 결정판을 광학현미경의 소광상태에서 관찰하였을 때 미세한 광학적 불

Table 1. List of dislocation density of BGO.

Position	Dislocation Density ( $/cm^2$ )	Position	Dislocation Density ( $/cm^2$ )
1	$6.1 \times 10^5$	10	$8.7 \times 10^5$
2	$9.8 \times 10^5$	11	$5.0 \times 10^5$
3	$6.9 \times 10^5$	12	$7.3 \times 10^5$
4	$5.7 \times 10^5$	13	$7.5 \times 10^5$
5	$5.5 \times 10^5$	14	$9.6 \times 10^5$
6	$7.7 \times 10^5$	15	$8.7 \times 10^5$
7	$7.8 \times 10^5$	16	$5.7 \times 10^5$
8	$5.1 \times 10^5$	17	$2.9 \times 10^5$
9	$7.2 \times 10^5$	18	$8.8 \times 10^5$
Average	$7.0 \times 10^5$		

균질 부분이 확인되는 것으로 뒷받침된다. 그러나 전위의 발생에 대하여는 생성원인이 많기 때문에 보다 상세한 검토가 필요하다.

### 3.3.4. 광투과율

두께 0.5mm의 BGO 판상시료에 대한 광투과율 측정 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10으로부터 이 시료는  $0.9\mu m \sim 5.8\mu m$  파장역의 빛을 81% 투과시키는 것을 알 수 있다. 이는 Cz법에 의하여 육성된 양질의 BGO 단결정의 광투과율과 비슷한 값이다.

### 3.4. die선단(tip)의 형상과 판상결정 성장

die 선단의 geometry가 판상결정성장 안정성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Tatarchenko[8]가 meniscus이론에 의하여 설명한 model을 정성적으로 설명하면 다음과 같다. Fig. 11에 나타낸 바와 같이(Fig. 11(a)) 결정성장 초기에 die선단 상부에는 성장된 결정(solid), melt zone(liquid), 증기(gas)의 3상(phase)이 존재하며 이들간에 trijunction이 형성된다. Fig. 11에서  $\alpha$ 는 고체와 액체간 접촉각,  $\beta$ 는 액체와 기체간 접촉각을 나타내며  $\gamma$ 는

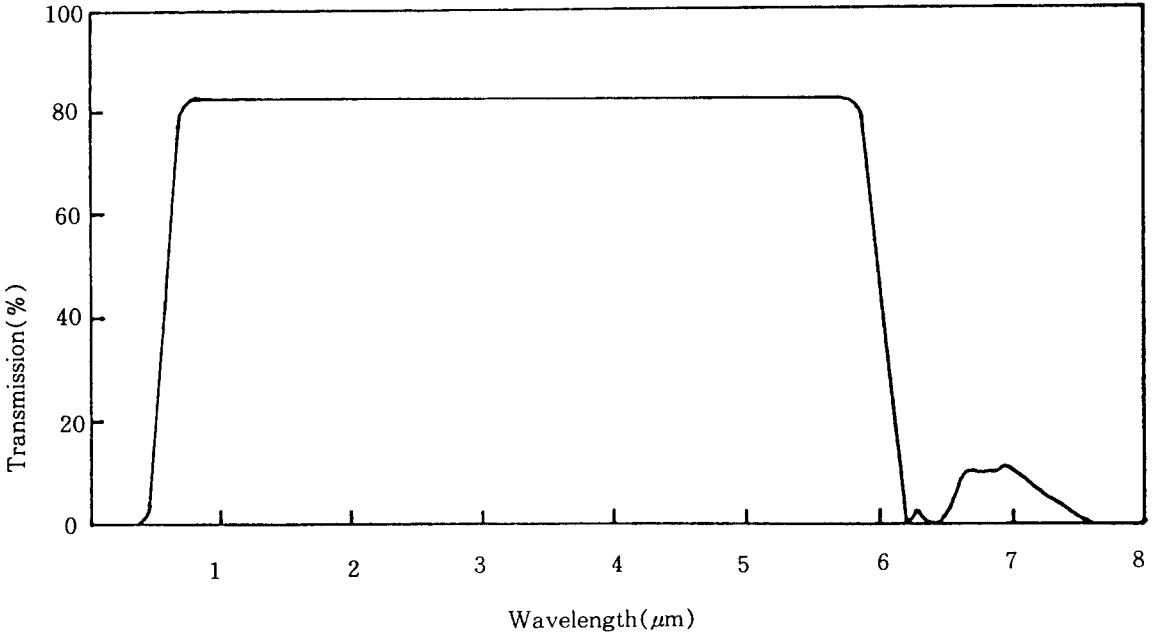


Fig. 10. Optical transmission of BGO single crystal plate (thickness 0.5mm).

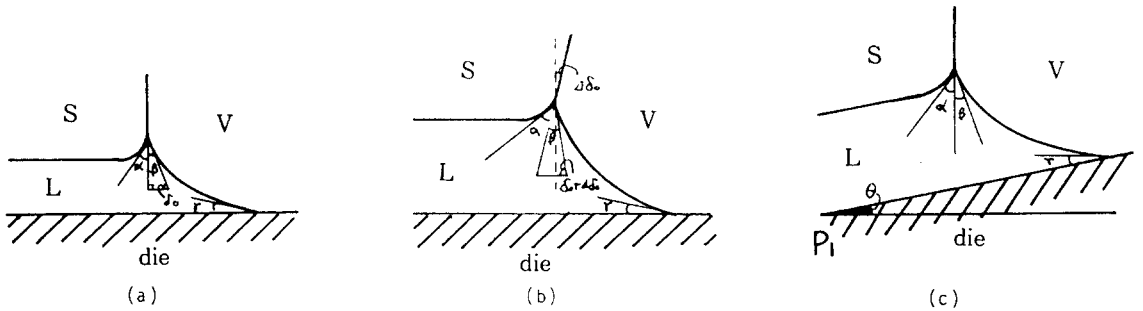


Fig. 11. Scheme of crystal growth condition at crystal-melt interface.

- a) growth using a planar die at high temperature gradient
- b) growth using a planar die at low temperature gradient
- c) growth an inclined die at low temperature gradient

die와 액체간의 접촉각을 나타낸다. 성장되는 결정이 한 종류로 일정하다면  $\alpha$ 가 일정하다고 근사할 수 있고(온도가 일정하다고 가정함) melt zone의 액체-기체간 곡률은 Laplace 모세관 방정식의 boundary problem의 해로서 결정되므로  $\beta$ 도 일정하며  $r$ 는 melt와 die의 wetting에 관한 것이므로 die재질이 결정되면 일정하다. die선단에서 성장하는 결정 끝까지의 거리(melt zone의 높이)는 고체-액체 열전도식에 의하여 정해지며 고-액 계면의 온도구배가 클 경우에는 이 거리가 작아지고 온도구배가 작을 경우에는 이 거리가 커지게 된다. Fig. 11(a)는 die선단이 평탄하고 고-액 계면의 온도구배가 클 경우의 결정성장 초기단계를 나타낸다. 이 경우에 판상결정이 성장하려면,

$$\beta + \delta_0 = \pi/2$$

의 관계가 성립해야 한다. 여기서  $\delta_0$ 는 melt의 curvature tangent와 수평선이 이루는 각도이다. Fig. 11(b)에 나타낸 것은 같은 flat die를 사용하고 온도구배가 작을 경우이다. 이 경우에는 melt zone의 높이가 높아지므로 Fig. 11(a)와 같은 형태로 판상결정이 성장한다면  $\beta$ 가 작아지고  $\delta_0$ 는  $4\delta_0$ 만큼 커진다. 따라서  $\beta$ 가 일정하게 유지하려면 결정성장 방향이 die선단에 수직하지 않고  $4\delta_0$ 만큼 기울어질 필요가 있다. 이것은 판상결정이 성장함에 따라서 결정의 넓이가 좁아짐을 뜻하며 판상결정이 일정한 넓이로 안정하게 성장할 수 없게 된다. 이 경우에 결정의 넓이가 좁아지는 속도( $d_i$ )는,

$$d_i = v \cdot 4\delta_0$$

로 표시되며  $v$ 는 결정인상속도이다. 위와 같이 선단의 형태가 평탄한 die를 사용하면 고-액 계면의 온도구배가 매우 클 경우에만 판상결정을 안정하게 육성시킬 수 있다. 한편 선단의 형태가 오목한(concave) die를 사용했을 경우

에는 die가  $\theta(\theta > 4\delta_0)$ 만큼 기울어져 있기 때문에 온도구배가 작을 경우에도 Fig. 11(a)의 geometry를 유지할 수 있고 따라서 일정한 넓이의 판상결정을 안정하게 육성시킬 수 있다. 본 연구에서 선단이 오목한 형태의 die를 사용한 것은 이와 같은 이유에 의한 것이다.

#### 4. 결론

연구 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 판상결정 육성의 가장 중요한 factor는 melt zone의 안정성이었다. melt zone이 안정하게 유지될 때 판상결정이 정상상태(steady state)로 육성되었다.
- 2) melt zone의 안정성을 유지하기 위하여 선단의 형태가 오목한(concave) die를 사용함으로써 일정한 넓이의 판상결정을 육성시킬 수 있었다.
- 3) EFG법에서는 상부가 낮고 하부가 높은 온도구배 하에서 결정을 육성시키므로 die선단의 높이를 가급적 용액 표면에 가깝게 하여 die선단의 온도를 높이면 die중에 용액 공급이 충분해져서 안정한 melt zone을 유지할 수 있었다. 가장 적합한 용액 선단의 높이는 용액으로부터 1.0mm이었다.
- 4) 온도구배와 인상속도는 고-액 계면의 형상을 일정하게 유지시키고 melt zone 중에 조성적 과냉각을 방지하여 성장결함이 없는 단결정을 육성시키는데 중요한 factor임을 알았다. 본 연구에서 얻은 최적온도구배는 22°C/cm이었고, 인상속도는 2.0mm/h이었다.
- 5) 판상단결정이 육성된 후 after heating조건이 불충분하면 결정에 crack이 발생하였다. 본 연구에서는 two zone furnace를 사용하여 결정이 성장된 후에도 800°C이상의 온도에서 유지되도록 함으로서 crack의 발생을 방지할 수 있었다.
- 6) 최적조건에서 육성된 BGO 판상결정은 판

면이 (100)면이고 성장방향이  $\langle 110 \rangle$ 인 단결정임이 확인되었다.

- 7) 육성된 BGO 판상단결정은 적어도 편광현미경하에서는 pore, void, inclusion, striation 등의 성장결함이 없는 양질의 단결정이었다. 미세결함인 전위(dislocation)의 존재가 확인되었고 전위밀도는  $7.0 \times 10^5/\text{cm}^2$ 이었다. 이러한 전위발생원인은 seed crystal로부터 전위의 이전 또는 결정성장후 걸리는 미세한 열응력에 의한 것으로 추정되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 1987년도 과학재단 목적기초연구 지원에 의한 것입니다. 이에 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참고문헌

- [ 1 ] S. C. Abrahams, P. B. Jamieson and J. L. Bernstein, J. Chem. Phys., 47 (1967) 4034.
- [ 2 ] E. R. Aldrich, H. L. Hou and M. L. Harvil, J. Appl. Phys., 42 (1971) 493.
- [ 3 ] R. A. Sprague and P. Nisenson, SPIE. Optical Information Processing 83 (1976) 51.
- [ 4 ] M. P. Petrov, S. I. Stepanov, T. G. Pencheva and V. V. Kulikov, Opt. Spectrosc. (USSR), 55 (1983) 192
- [ 5 ] H. E. Labbla, Jr. and A. I. Mlavsky, Mater. Res. Bull., 6 (1971) 571.
- [ 6 ] V. A. Borodin, T. A. Steriopolo and V. A. Tatarchenko, Proc. European Meeting on Crystal Growth '82, Materials for Electronics, Progur, August, (1982) p.320.
- [ 7 ] V. A. Borodin, V. V. Sidorov, T. A. Steriopolo and T. A. Tatarchenko, J. Crystal Growth, 82 (1987) 89.
- [ 8 ] V. A. Tatarchenko, J. Cryst. Growth, 37 (1977)272.
- [ 9 ] Ernest M. Levin and Robert S. Roth, J. Research N. B. S., 68A (1964) 197.
- [10] 김호전, 宮本敬, 한국결정성장학회지, 1 (1991) 26.
- [11] D. Hull and D. J. Bacon, "Introduction to Dislocations", 3rd ed., (Pergamon, Press1984) p. 78.