

## BaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계 고온 용액으로부터 성장된 NdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 단결정의 표면구조와 X-선 Topography

정선태 · 강진기 · 김정환 · 정수진

서울대학교 무기재료공학과

(1993년 11월 29일 접수)

### Surface Structure and X-ray Topography of NdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> Single Crystals Grown from High Temperature Solution of BaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> System

S. T. Jung, J. K. Kang, J. H. Kim and S. J. Chung

Department of Inorganic Materials Engineering, Seoul National University

(Received November 29, 1993)

#### 요 약

표면구조와 X-선 topography 관찰을 통하여 BaB<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 용제를 사용하여 TSSG 방법으로 육성된 NAB 단결정의 성장기구를 고찰하였다. 광학현미경으로 결정표면을 관찰하였고, X-ray topography로 성장내력과 결정내에 분포하는 결함들에 대하여 고찰하였다. {001} 면은 이차원 핵생성에 의한 성장이 지배적이고, [111]과 [111̄] 면에서는 나선형 전위에 의한 성장이 냉각속도가 줄어들수록 지배적이었다. {010} 면에서는 a축에 평행하게 발달해있는 표면 줄무늬만 관찰되었다. NAB의 성장영역은 {001}, {111}, {010}, {021}, [111̄]로 나누어 성장하였다. {001} 면사이에 많이 분포하는 포유물의 생성과정에 관하여 고찰하였다.

#### ABSTRACT

By surface structure and X-ray topographic observation, growth mechanism of NAB single crystal grown by TSSG technique using a BaB<sub>4</sub>O<sub>7</sub> flux was studied. Surface structure of grown crystals were investigated by optical microscope. Growth history and crystal defects included within grown crystal were investigated using X-ray topography. The {001} faces were grown by 2-D nucleation growth. As decreasing cooling rate, growth mechanism of {111} and [111̄] was changed from 2-D nucleation growth to the growth by screw dislocation. Only surface striations developed parallel to a-axis were observed on {010} faces. Growth sector of NAB crystals were divided into {001}, {111}, {010}, {021}, [111̄]. The inclusion which was usually trapped between {001} faces was investigated.

#### 1. 서 론

NdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>(NAB)는 우수한 광특성과 기계적 특성으로 인하여 소형 고체 레이저로서 연구 개발되고 있는 물질이다<sup>1,2</sup>. NAB 소형 고체 레이저 개발에 있어서 선행되어야 할 과제는 단결정 육성 기술의 확립이다. NAB 단결정 육성을 위한 많은 연구가 이루어져 왔지만<sup>3-6</sup>, 아직까지 양질의 대형 NAB 단결정 육성기술은 확립되지 않은 상태이다. NAB는 1180°C 이상에서는 헤리되기 때문에 양질의 대형 단결정을 육성 시키기 위해서는 적합한 용제를 사용하여 TSSG 방법으로 육성시키는

것이 현재의 기술로는 가장 좋은 방법이다. 그러므로 TSSG 방법으로 NAB 단결정 육성시 용액에 담긴 증착이 어떤 성장기구로 성장되는지를 연구하는 것은 결함이 적은 단결정을 육성시키는데 적용될 수 있을 것이다. 결정성장은 새로운 원자나 분자, 화합물 등이 결정에 붙어서 일어난다. 성장이 계속되기 위해서는 성장 단위가 결정 표면에 붙을 수 있는 자리가 제공되어야 한다. 성장단위가 붙을 수 있는 자리를 제공하는 결정면은 거친 면과, 매끄러운 면으로 나눌 수 있다<sup>7</sup>. NAB 단결정은 외형이 잘 발달하는 매끄러운 면들로 이루어져 있다. 매끈한 면에서의 성장은 이차원 핵생성 기구에

의해 결정 표면에 계단을 형성하고 이 계단의 진행에 의해 한 층이 완전히 성장하고 그 위에 다시 같은 과정이 반복되어 성장이 진행된다. 그러나 표면에 나선형 전위가 존재할 경우는 이 나선형 전위가 계단을 계속 제공하기 때문에 이차원 핵생성 기구에서와 같이 처음에 핵생성하는데 필요한 활성화 에너지는 필요하지 않다. 따라서 낮은 과포화도에서는 나선형 전위에 의한 성장이 지배적이고 과포화도가 커질수록 이차원 핵생성이 쉽게 되므로 이차원 핵생성 기구에 의한 성장이 지배적이 된다<sup>7)</sup>. 이러한 성장기구 이외에도 성장 단위가 붙을 수 있는 자리를 제공하는 방법은 쌍정에 의한 성장과 아결정입계(sub-grain boundary)에 의한 성장등이 알려져 있다<sup>8)</sup>. 이들에 의한 성장은 앞서 설명한 성장기구보다도 성장 단위가 붙을 수 있는 더 많은 자리를 제공하기 때문에 성장속도가 빠른 것이 특징이다.

BaB<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 용제를 사용하여 TSSG 방법으로 결정육성시, 육성된 NAB 결정의 공간군은 C2/c, 격자상수는 a=7.279(8) Å, b=9.370(6) Å, c=11.139(4) Å, β=103.35(5)°로 보고되었<sup>9)</sup>, 육성조건에 따라 약간의 차이는 있지만 주로 발달하는 면은 {001}, {010}, {111}, {11 $\bar{1}$ }, {021} 등이고, 빠르게 성장하는 방향은 <10 $\bar{1}$ > 인 것으로 알려져 있다. 아직 NAB에 대한 성장기구는 보고되어 있지 않지만 종자정의 방향이 <10 $\bar{1}$ >인 경우에는 <10 $\bar{1}$ >을 3회 축으로하는 회전 쌍정이 형성되는 경향이 있고 쌍정형성시 더 빠른 성장을 하는 것으로 보고되었다. NAB 단결정 육성시 발생하는 문제점은 포유물의 혼입과 벽개면의 존재<sup>9)</sup>로 알려져있기 때문에 포유물의 생성과정에 대한 연구도 성장기구에 대한 고찰과 함께 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 BaB<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 용제를 사용하여 TSSG 방법으로 육성된 NAB 단결정의 성장기구, 포유물의 생성과정에 관하여 반사 편광 현미경과 X-ray topography를 사용하여 고찰하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에 사용된 결정은 용액의 냉각속도와 종자정의 방향을 변화시켜가며 육성시킨 결정들이다. BaB<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 용제를 사용하여 용제 : NAB = 44 : 56(wt%)의 조성에서 TSSG 방법으로 육성시켰다<sup>1)</sup>. 종자정의 방향은 <100>, <010>, <001>, <201>로 변화시켰고, 용액의 냉각속도는 2~7°C/day로 변화시켜가며 NAB 단결정을 육성시켰다.

결정육성이 완료된 후 어떤 성장기구로 성장했는가를

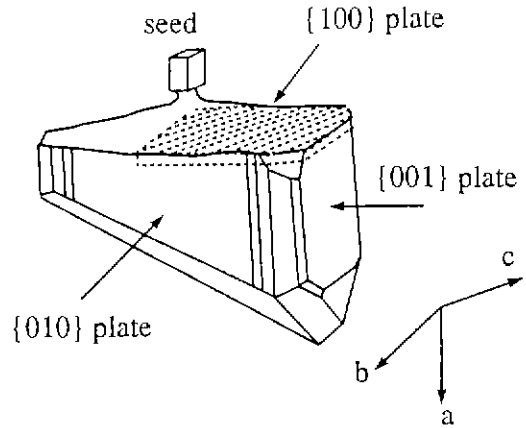


Fig. 1. Sample preparation of {100}, {010} and {001} plates from NAB crystal grown from BaB<sub>4</sub>O<sub>7</sub> flux with <100> seed.

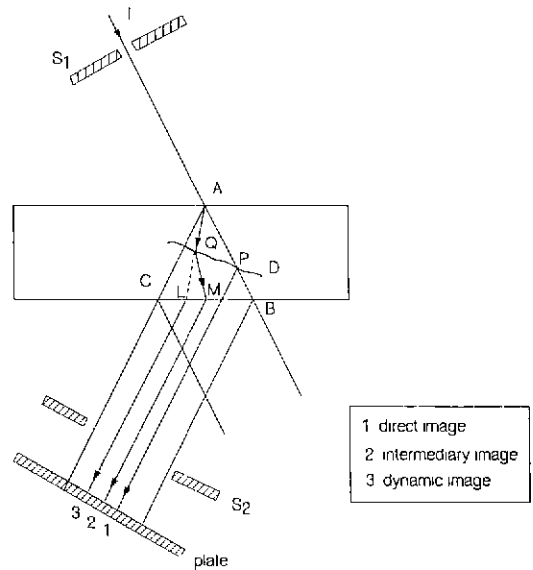


Fig. 2. Principle of X-ray topography<sup>11)</sup>.  
D: dislocation, S1, S2: slit

알아보기 위해 성장된 단결정의 {001}, {010}, {111}, {11 $\bar{1}$ } 면들의 표면구조를 반사 편광현미경을 이용하여 관찰하였다. 결정표면의 높낮이는 촛점을 변화시키고, 음영을 만들어 확인하였다.

성장된 결정의 표면을 반사현미경으로 관찰한 후에 종자정의 방향이 <100>, 냉각속도가 2.4°C/day인 육성 조건에서 육성된 NAB 단결정을 Fig. 1에 나타낸 바와

같이 (100), (010), (001) 면에 평행하게 결정을 절단한 후 0.3~0.4 mm의 두께로 표민 면마하였다. X-ray topography는 단파장의 X-ray를 결정내부로 투과시켜 결정내부에 존재하는 결함에 의한 이상회절을 필름에 기록함으로써 결정성장과정과 결정전체의 결함의 분포 등을 알 수 있다<sup>10)</sup>. Fig. 2에 본 실험에서 사용한 Lang technique의 원리를 도식적으로 나타내었다. X-선의 회절에 의해 D로 표시된 전위의 상이 필름에 기록된다. 본 연구에서는 Lang technique을 사용하여 파장이 0.7107인 Mo-K $\alpha$ 선으로 촬영하였고, 회절강도가 강한 (004), (040), (200) 회절을 이용하여 촬영하였다. X-ray topography에서 관찰되는 포유물과 결함들의 조성을 알아보기 위하여 EDXS(Energy dispersive X-ray Spectroscopy)로 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 반사현미경에 의한 {001} 면의 표면관찰과 성장 기구고찰

성장된 후에 변형되지 않은 결정 표면구조는 결정 성장이 끝나기 직전의 성장 과정을 반영하므로, {001}, {010}, {111}과 { $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ } 면의 성장 기구를 알아보기 위하여 결정의 표면을 관찰하였다. {001} 면의 표면사진을 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에 나타낸 그림은 용액의 냉각속도가 2.4°C/day로 동일하고, 종자정의 방향이 각각 [100], [001] 면에 수직인 방향이었다. 두 경우 모두 모서리에서 면의 중심쪽으로 성장한 계단이 잘 발달해 있지만 (a)의 경우는 안정된 성장 표면을 보이고 있는 반면에 (b)의 경우에는 면의 중심부에서 성장이 멈춰있는 것이 관찰되어진다. 2차원 핵생성에 의한 성장이 지배적인 경우 성장계단이 결정의 모서리에서 안쪽으로 잘 발달해 가는 표면구조를 나타낸다<sup>7)</sup>.

이차원 핵생성에 의해 성장 계단을 생성하고 이 성장 계단이 결정면에 수평 방향으로 이동하여 일어나는 경우, 다면체 결정의 면이 균일하게 성장하기 위해서는 면의 수직 방향으로의 농도 구배가 일정해야 하므로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\left. \frac{\partial N}{\partial n} \right|_{\text{interface}} = q = \text{const.} \quad (1)$$

이를 이용하여 다면체 결정 주위의 확산 장(field)을 구하면, 모서리 부근에서 과포화도가 가장 크고 중심에서 가장 낮게 나타난다<sup>12)</sup>. 그러므로 이차원 핵생성 기구로

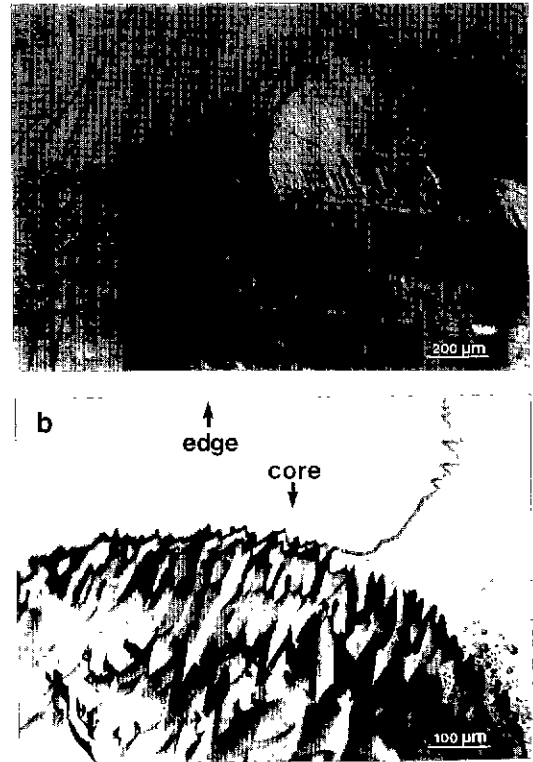


Fig. 3. Surface structure of {001} faces.  
(a) cooling rate: 2.4°C/day, seed direction: <100>  
(b) cooling rate: 2.4°C/day, seed direction: <001>

결정성장시에는 2차원 핵이 결정의 모서리에서 생성되어 면의 중심쪽으로 성장하게 된다. 결정면상의 위치에 따라서 과포화도가 불균일해도 면이 안정하게 성장하기 위해서는 성장자리를 제공하는 성장계단의 밀도가 면의 중심에서 가장크게 분포해야 한다<sup>13)</sup>. 면의 성장속도는 과포화도와 반응계수의 곱으로 나타낼 수 있다. 반응계수는 성장계단의 밀도에 비례하는 값이다. 그러므로 면 중심에서 과포화도가 낮더라도 성장계단의 밀도가 커지면 반응계수가 커져서 안정한 성장이 이루어진다. 그러나 과포화도가 증가하여 면 중심에서의 성장계단의 밀도가 커지면 반응계수가 최대가되고, 그 이상으로 과포화도가 커지면 과포화도의 불균일성을 상쇄하지 못하게 된다. 이 경우에는 면의 중심 부분의 성장 속도가 모서리 부분의 성장 속도보다 느리므로, 결정면 중심이 오목하게 패이게 되는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 3-(b)에 나타낸 것과 같이 면의 중심 부분이 패이는 현상은 냉각속도가 4.8°C/day 이상이거나, 종자정의

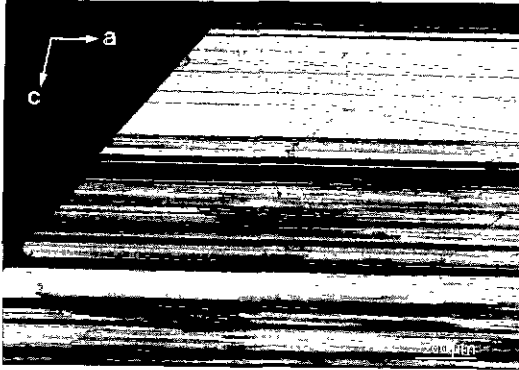


Fig. 4. Surface structure of {010} face: shows only surface striations.

방향을 c면에 수직으로 하여 육성시킨 결정의 밑 부분에서 관찰되었고, 냉각속도를 2.4°C/day 이하로 하고, 종자정의 방향을 <100>, <201> 방향으로 하는 경우에는 관찰 되지않았다. 냉각속도가 큰 경우에는 과포화도가 크기때문이고, 종자정의 방향이 c면에 수직인 경우는 용액내에 넓게 발달하는 {001} 면 주위에 불안정한 계면이 형성되기 때문인 것으로 생각된다. 그러므로 과포화도의 불균일성이 냉각속도와 종자정의 방향에 따른 용액의 흐름에 의해 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다.

### 3.2. 반사현미경에 의한 {010}, {111}, {11 $\bar{1}$ } 면의 표면관찰과 성장기구고찰

{001} 면의 표면구조가 성장계단으로 이루어진 것과는 달리, {010} 면의 표면에서는 성장계단, 성장구릉은 관찰되지않고 표면줄무늬(surface striation)만이 관찰되어진다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 표면 줄 무늬들이 a축에 평행하게 일정한 간격으로 발달해 있음을 알 수 있다. 줄무늬 사이의 사이간격은 대략 10 μm~100 μm 정도였다. 용액의 냉각속도가 클수록 깊고 굵게 발달하였다. 이러한 표면 줄무늬의 생성원인으로는 조성의 불균일, 온도의 유동 등 외적 요인과 원자들의 결합력과 같은 결정 내부적인 요인들로 설명하고 있다<sup>10)</sup>. NAB 단결정의 경우에는 육성된 모든 결정의 {010} 표면에서 표면 줄무늬를 관찰하였다. 그러므로 내부적인 요인에 의한 것이라 생각되어진다.

2차원 핵생성기구와 함께 중요한 성장기구의 하나인 나선형전위에 의한 성장이 {111} 면과 {11 $\bar{1}$ } 면의 결정표면에서 관찰되었다. {111} 면의 표면사진을 Fig. 5에 나타내었다. 일반적으로 큰 과포화도에서는 이차원 핵생성 기구에 의한 성장이 일어나고, 작은 과포화도에서는

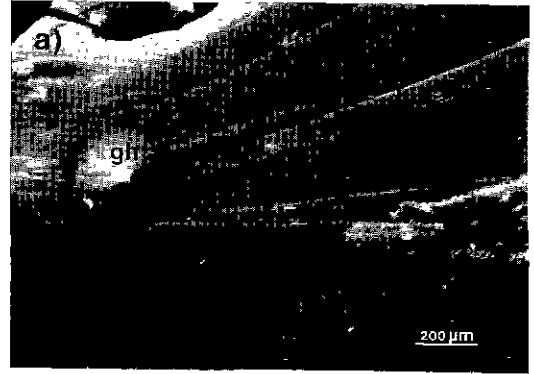


Fig. 5. Growth hillocks and growth steps of {111} faces

gh: growth hillock, gs: growth step, (a) cooling rate: 4.8°C/day, seed direction: <201>, (b) cooling rate: 2.4°C/day, seed direction, <201>

나선형 전위 기구에 의한 성장이 지배적이다. Fig. 5-(a)는 냉각속도가 4.8°C/day일 때이고, (b)는 2.4°C/day일 때의 표면사진이다. 냉각속도가 큰 (a)의 경우에 성장구릉도 관찰되지만 (b)의 경우보다 성장 계단이 더 넓고 뚜렷하게 발달해 있고, 냉각속도가 2.4°C/day인 경우는 성장구릉이 많이 관찰되어진다. 성장 구릉은 결정 표면의 나선형 전위나, 결합, 응력 등에 의해 쉽게 이차원 핵이 생길 수 있는 곳에 생성되며<sup>15)</sup>, 이런 구릉이 많이 존재한다는 것은 Burton, Cabrera, Frank<sup>16)</sup>가 제안한 나선형 전위에 의한 성장 기구가 주요하게 작용한다는 것을 의미하는 것이다.

### 3.3. X-선 topography 관찰과 NAB의 성장영역에 관한 고찰

종자정을 포함한 {100} 면의 X-ray topography를 Fig. 6에 제시하였다. (004), (040) 회절을 사용하여 촬영하였

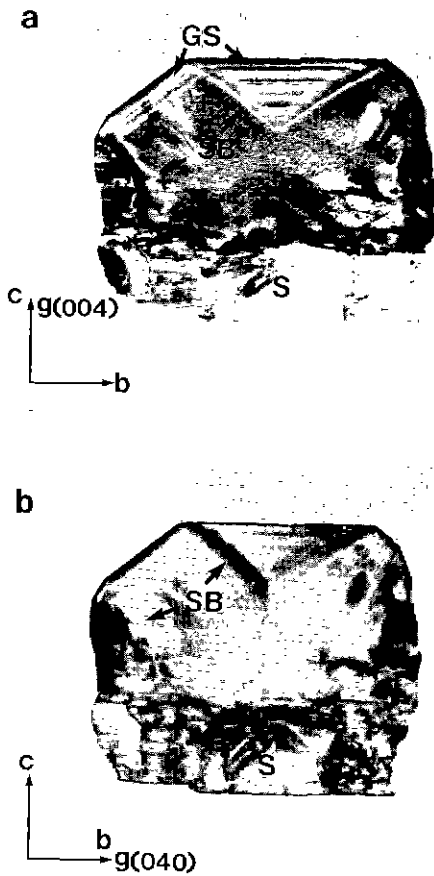


Fig. 6. X-ray topographs of {100} plate.  
(a) g(004), (b) g(040)-GS: growth striation, SB: sector boundary, S: seed crystal

다. 종자정으로부터 결정이 성장되어나간 모습을 전체적으로 잘 보여주고 있다. 종자정 주위에는 포유물과 균열등 많은 결함이 분포하고, 성장되어 갈수록 결함의 분포가 작아지는 것을 알 수 있다. 성장된 NAB 결정의 {100} 면은 Fig. 7에 나타난 바와 같이 종자정과 5개의 성장 영역으로 나뉘어진다. {111} 면과 {001} 면의 성장 영역은 넓게 나타나지만, {010}의 성장 영역은 좁게 발달하고 표면 줄무늬 주위로 응력이 많이 분포해있는 것을 알 수 있다. {111} 면과 {001} 면들의 성장영역 안에서는 각 면들에 평행하게 성장 줄무늬(growth striation)가 관찰되었다. 성장 줄무늬는 성장시 발생하는 과포화도나 조성의 불균일에 의하여 발생한다고 알려져 있다<sup>17)</sup>. EDXS로 조성분석 결과 큰 조성의 불균일은 발견되지 않았다. (111) 과 (001) 면의 성장영역에서 관찰되어지는 성장 줄무늬는 (004) 회절에서는 뚜렷이 나타

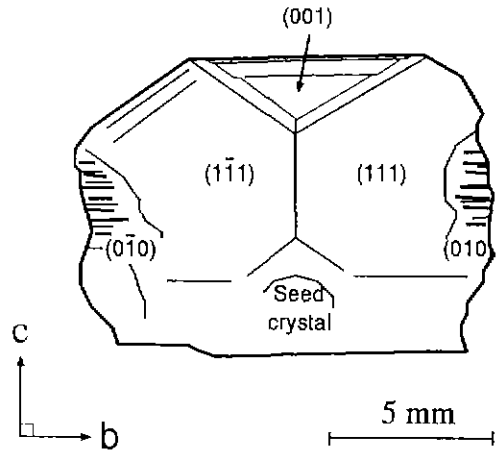


Fig. 7. Schematic diagram of growth sectors of {100} plate.

나고, (040) 회절에는 거의 나타나지 않았다. X-ray topography에서 회절 벡터와 결함 벡터가 수직인 경우는 소멸되므로, 성장 줄무늬는 (040)에 거의 수직한 결함 벡터를 갖고 있음을 알 수 있다. {001} 면의 topography 사진을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8-(a)는 (200) 회절을 사용하여 촬영한 topography 사진이고, (b)의 경우는 성장영역을 도식적으로 나타낸 것이다. {100} 면의 topography 사진에서와 같이 {001} 면도 여러개의 성장영역으로 나뉘어져 있음을 알 수 있었다. {111}, {021}, {001} 성장 영역으로 나눌 수 있다. {001}과 {021} 면의 성장영역에서는 주로 성장 줄무늬가 관찰되고, {111} 면의 성장영역에서는 성장 줄무늬는 관찰되지 않고, 전위(dislocation)들이 많이 관찰되었다. 여러 회절을 사용하여 {111}에 존재하는 전위들의 특성을 알아보았다. {111} 면의 성장영역에서 관찰되는 D1은 나선형 전위(screw dislocation)이고, {111} 면의 성장영역에서 관찰되는 많은 전위들은 칼날전위(edge dislocation)와 나선형 전위가 복합적으로 존재하고 있음을 알 수 있었다. {010} 면의 topography를 Fig. 9에 나타내었다. 성장영역이나 전위 등은 관찰되지 않고 포유물과 응력이 많이 분포해 있었으며, 이는 a축에 평행하게 형성되는 표면줄무늬와 관련이 있는 것으로 생각된다.

### 3.4. 포유물의 생성과정에 대한 고찰

NAB 단결정 육성시 큰 문제점은 포유물이 많이 발생하는 것이다<sup>18)</sup>. X-선 topography 관찰결과 특히 {001} 면에 평행한 포유물이 많이 관찰되었고, 냉각속도가 클

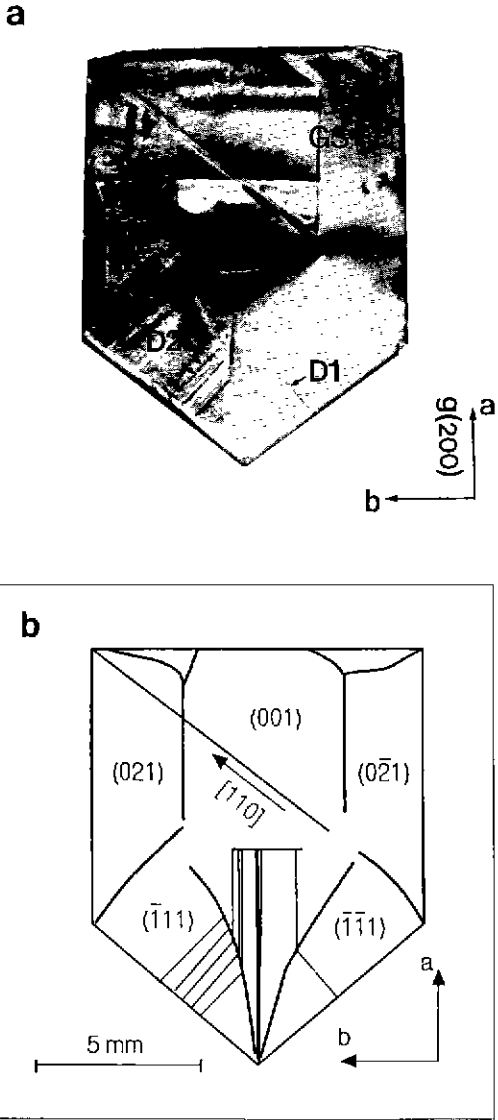


Fig. 8. X-ray topographs of {001} plate. (a)  $g(200)$ , GB: growth striation, SB: sector boundary, D1: screw dislocation, D2: screw and edge dislocation, (b) schematic diagram of growth sector

때 {111} 면에서도 많이 관찰되었다. 이러한 포유물의 조성을 EDXS로 분석한 결과 용체의 조성임을 알 수 있었다. 이들 포유물의 생성과정을 다음과 같이 생각해 볼 수 있다.

성장된 결정의 표면사진과 X-ray topography로부터 {001} 면의 성장은 2차원 핵생성에 의해 일어나고, [111]

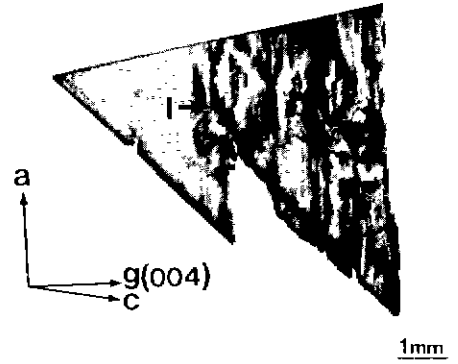


Fig. 9. X-ray topographs of {010} plate.  $g(004)$ , I: inclusion

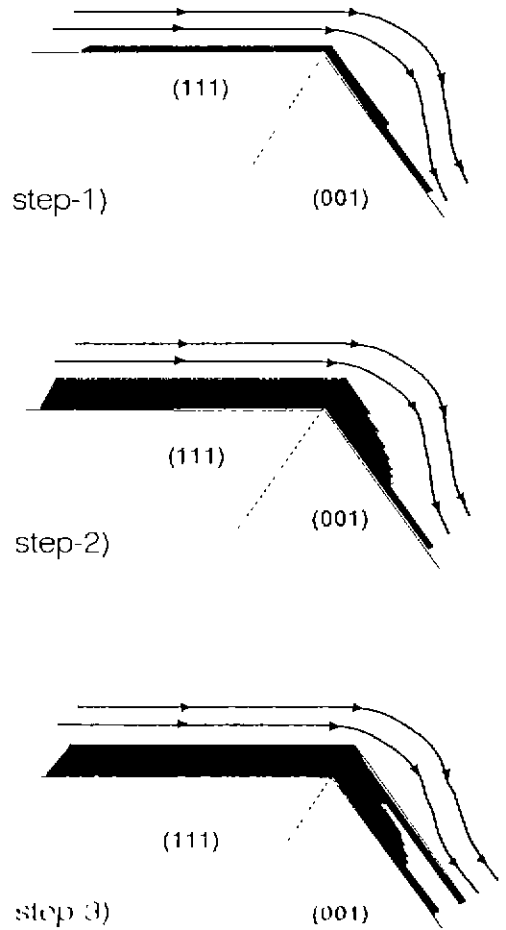


Fig. 10. Trapping steps of inclusion caused by local variation of supersaturation.

면은 나선형전위와 2차원 핵생성에 의한 성장이 동시에 발생하지만 냉각속도가 클 때는 2차원 핵생성에 의한 성장이 지배적인 것을 알 수 있었다. 포유물이 주로 많이 관찰되는 {001} 면의 경우 Fig. 10에 나타난 바와 같이 모서리에서 핵이 생성되어 면의 중심쪽으로 성장해 들어간다(step1→step2). 이때 과냉각된 용액 중에 장소에 따른 온도변동이 있으면 국부적으로 과냉각이 임계치에 이르게 되는 부분이 발생하고 이 부분이 빠르게 성장하게 되어 포유물이 형성된다(step 3). {111} 면의 경우도 면 성장이 지배적인 과포화도에서 국부적인 과포화도가 임계치를 넘는 경우 포유물이 형성되는 것으로 설명할 수 있다. 그러므로 NAB 단결정 성장에서 포유물이 발생하는 주된 원인은 성장표면에서의 과포화도가 불균일하기 때문이다. 이 불균일성을 감소시키는 방법으로는 전체적인 과포화도를 낮추는 방법과 과도한 과포화도 구배의 발생을 억제하는 것이다. 과포화도를 낮추는 방법은 안정된 성장을 위해 좋은 방법이지만, 이는 온도안정성에 의해 한계가 있으며, 또한 생산성을 낮추는 문제가 생긴다. 그러므로 용액의 흐름을 조절하여 용액을 균일화함으로써 국부적인 과포화도 불균일의 발생을 억제하는 방법을 병행해야 할 것이다.

#### 4. 결 론

BaB<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 용체를 사용하여 TSSG 방법으로 육성시킨 NAB 단결정의 {001}, {111}, {11 $\bar{1}$ }, {021}, {010} 면들의 각 표면을 반사현미경으로 관찰하고, {100}, {010}, {001} 면에 평행한 면의 X-ray topography로 성장기구를 고찰하였다.

종자정을 용액에 담근 초기에는 계면의 불안정성으로 인하여 포유물과 균열이 많이 관찰되나, 성장이 진행될수록 결함의 수는 줄어들었다. 성장이 진행될수록 성장도중 발생하는 국부적인 과냉각도의 불균일로 인하여 포유물이 형성되고 이러한 포유물은 주로 이차원 핵생성이 지배적인 {001} 면에 평행하게 많이 포획되었고, 과냉각도가 큰 경우에는 {111} 면들 사이에서도 생성되었다. 포유물은 미세균열의 원인으로 작용하고, 전위의 발생지로 작용하였다. 성장시 포유물로부터 발생한 전위중 나선형전위는 새로운 성장단위의 자리를 제공함으로써 성장을 촉진시키는 역할을 하였다. {111} 면의 성장영역에서는 전위들이 많이 관찰되었고, {111} 면의 표면구조에서도 성장구릉이 많이 관찰되었다. 그러므로 {111} 면의 성장은 나선형 전위에 의한 성장이 지배적임을 알 수 있었다. 성장이 진행함에 따라 {111} 면의

성장영역이 크게 발달하였고 {111}, {001}, {021} 면들의 성장영역에서는 성장에 의한 줄무늬가 형성되었다. {111} 면의 결정표면에서는 성장구릉과 성장계단이 동시에 관찰되었고, {001}과 {021} 면들의 표면에서는 모서리에서 면의 중심으로 성장하는 성장계단이 관찰되었다. 그러므로 {111} 면은 나선형 전위에 의한 성장과 2차원 핵생성에 의한 성장이 함께 일어나고, {001} 면과 {021} 면들은 2차원 핵생성에 의한 결정성장이 지배적임을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구의 일부는 과학재단의 우수연구센터인 서울대학교 신소재 박막가공 및 결정성장 연구센터의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

#### REFERENCES

1. H. Y-P Hong and K. Dwight, "Crystal Structure and Fluorescence Lifetime of NdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>, a Promising Laser Materials," *Mat. Res. Bull.*, **9**, 1661 (1974).
2. G. Huber, "Miniature Neodymium Lasers," *Current Topics in Materials Science*, Vol. 4, ed. E. Kaldis, 1 (1980).
3. F. Lutz, M. Leiss and J. Muller, "Epitaxy of NdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> for Thin Film Miniature Lasers," *J. Cryst. Growth*, **47**, 130 (1979).
4. C. Chen. "Relationship Between Crystal Growth, Structure and Spectral Characteristics of NdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> with Order-Disorder Structure," *J. Cryst. Growth*, **89**, 295 (1988).
5. 정선태, 강진기, 김정환, 정수진, "소형고체 레이저용 NdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 단결정 육성," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **30**(8), 648-656 (1993).
6. J. Kumar, M. Thirumavalavan, F.D. Gnanam, P. Ramasamy and G. Bocelli, "Growth, Morphological and Structural Investigations of Neodymium Aluminum Borate Crystals from Different Flux Systems," *J Cryst Growth*, **100**, 651 (1990).
7. "Crystal Growth from High Temperature Solutions," edited by D. Elwell and H.J. Scheel, Academic Press/London New York San Francisco, 143-151 (1975).
8. "Crystal Growth from High Temperature Solutions," edited by D. Elwell and H.J. Scheel, Academic Press/London New York San Francisco, 189-198 (1975).
9. S.T. Jung, J.K. Kang and S.J. Chung, "Crystal Growth and X-ray Topography of NdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>," *J. Cryst. Gro-*

- with* (submitted).
10. A.R. Lang, "Techniques and Interpretation in X-ray Topography," *Diffraction and Imaging Techniques in Material Science*, eds. S. Amelincks, R. Gevers and J. van Landuyt, North-Holland Publishing Company, 623-714 (1978).
  11. A. Autier, "Contrast of Images in X-ray Topography," *Diffraction and Imaging Techniques in Material Science*, eds. S. Amelincks, R. Gevers and J. van Landuyt, North-Holland Publishing Company, 738 (1978).
  12. T. Kuroda, T. Irisawa and A. Ookawa, "Transition from Polyhedral to Dendritic Morphology," *Morphology of Crystals (Part A)*, Edited by I. Sunagawa, Terra Scientific Publishing Company/Tokyo, 323-325 (1987).
  13. A.A. Chernov, "Mass and Heat Transport, Growth Shape and Their Stability," *Modern Crystallography III*, Ed. by A.A. Chernov, Springer/Berlin, 216-219 (1984)/
  14. I. Sunagawa, "Morphology of Minerals", *Morphology of Crystals (Part B)*, Ed. by I. Sunagawa, Terra Scientific Publishing Company/Tokyo, 547-554 (1987).
  15. W. van Erk, H.J.G.J. van Hoek-martens, and G. Bartels, "The Effect of Substrate Orientation on the Growth Kinetics of Garnet Liquid Phase Epitaxy," *J. Cryst Growth*, **48**, 621 (1980).
  16. Burton, W.K, Cabrera, N. and Frank, F.C., "The Growth of Crystals and the Equilibrium Structure of their Surfaces," *Phil Tran.*, **A243**, 299 (1951).
  17. H. Klapper, in; *Characterization of Crystal Growth Defects by X-ray Methods*, Eds. B.K. Tanner and D.K. Brown. Plenum, New York, 133 (1980).