

수직온도구배 성장 공법을 적용한 갈륨비소 잉곳 성장 기술 연구

박영태¹, 박현범^{2,†}

¹(주)아이오지

²군산대학교 기계공학부

A Study on GaAs Ingot Growth Technique Applied to VGF(Vertical gradient freeze) Growth Method

Youngtae Park¹, Hyunbum Park^{2,†}

¹IIOG Co., LTD

²Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University

Abstract

The various GaAs panel are applied widening for aircraft and aerospace structures. This study presented technology for the growth of large-diameter GaAs ingots greater than 4 inches through numerical analysis using temperature control technology. In this work, proposes manufacturing technology adapted to various temperature and environmental changes through temperature simulation. With the development of ingot technology, the possibility of future application increased by obtaining expected results with minor deviation.

초 록

항공기 및 우주 구조물에 갈륨비소 기관은 다양하게 적용된다. 본 연구에서 온도 제어기술을 활용하여 수치해석을 통해 4인치 이상의 대구경 갈륨비소 잉곳의 성장에 관한 기술을 제시하였다. 본 연구를 통해 온도 시뮬레이션 기술을 기반으로 다양한 온도 변화와 주위 환경의 변화에 따른 제작 기술을 확보하였다. 잉곳 기술 개발을 통하여 편차가 작은 특성 결과를 도출하여 향후 적용 가능성을 최대화 하였다.

Key Words : GaAs(갈륨비소), Ingot(잉곳), Crystal(결정), Growth(성장)

1. 서 론

항공기 및 우주 구조물에는 다양한 마이크로 LED가 적용된다. 마이크로 LED에 사용되는 갈륨비소(GaAs) 기관은 초소형 소자 성능에 직접적인 영향을 미치는 저결함 밀도를 가지는 기관이다. 저결함 밀도를 갖는 갈륨비소 기관의 개발은 매우 중요한 요소이다. 온도 구배와 성장속도, 주위 환경 변화에 따른 쌍점(Twin),

다결정(Poly) 등의 불량 발생률이 매우 높기 때문에 제품의 품질 개선 및 생산성 향상을 위해서 기존의 축적된 기술 데이터를 기반으로 성장온도 구배와 성장속도, 환경 등의 데이터를 분석하고 학습을 통한 불량발생을 줄일 수 있는 히터(Heater)를 적용한 연구가 필요하다.

다양한 갈륨비소 기관을 기반으로 하는 마이크로 LED 시장 확장으로 인해서 갈륨비소 기관 시장은 2017년 1,765억원에서 2023년 4,709억원으로 증가할 것으로 예상되고 있으며, 2023년까지 적색 마이크로

Received: Apr. 03, 2022 Revised: Jun. 26, 2022 Accepted: Jul. 05, 2022

† Corresponding Author

Tel: +82-63-469-4729, E-mail: swordship@kunsan.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

갈륨비소 기관 시장은 2017년 594억원에서 2023년 1,792억원으로 연 33.6%의 고성장이 진행될 것으로 예상되어진다. 갈륨비소 기관은 전자이동속도가 빠르고 고주파 특성이 있어서 고속 동작 소자, 이동 및 위성통신으로 활용될 수 있다. 크기를 분석해보면 생산 효율 측면에서 4~6인치 웨이퍼 시장이 주류를 이루고 있다. 따라서 4~6인치 갈륨비소 기관의 최적화된 생산 기술이 필요하다.

본 연구에서는 국내외 선행 연구를 분석하였다. H. Weimann 등은 2인치의 갈륨비소 결정 성장에 관한 수치해석 시뮬레이션 연구를 수행하였다[1]. B. Birkmann 등은 3인치 및 4인치의 갈륨비소 성장에 대한 연구를 수행하였다[2]. J. Amon 등은 컴퓨터 기반으로 3인치 저전위 밀도인 갈륨비소의 성장에 대한 연구를 수행하였다[3]. Christiane F. 등은 반도체 결정 성장에 대한 자기장의 영향에 대한 연구를 수행하였다[4]. 정현수 등은 갈륨비소 반도체에서 열접합량으로 계산된 전자의 확산계수 특성에 대한 연구를 수행하였다[5]. 권영세는 갈륨비소 반도체 공정기술 개발에 관한 전반적인 연구를 수행하였다[6]. 따라서 본 연구에서는 선행 연구를 분석하여 4인치 VGF 잉곳 공정에서의 쌍점 및 다 결정 발생률 상승 문제를 개선하고자 하였다. 수직온도구배(VGF) 공법으로 진행되는 갈륨비소의 성장은 히터의 온도내부의 균일한 제어가 필수요소이며, 온도 구배와 잉곳의 성장 속도에 따른 불량률이 2~3인치에 비해서 불량 발생률이 2배 이상 증가한다. 4인치 공정의 경우 웨이퍼 크기가 더 커질 경우 고액상계면에서의 온도 수평이 되도록 제어가 어려워지기 때문에 불량발생률이 높아진다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위한 잉곳 기술 개발 연구를 수행하였다.

2. 갈륨비소 잉곳 성장 및 결과 분석

갈륨비소의 단결정을 제조하는 방법은 수직온도구배(Vertical gradient freeze: VGF)성장방법과 액상밀봉-췌크랄스키(Liquid encapsulated czochralski: LEC) 성장방법으로 분류되고 있다. 과거에는 생산 수율 및 대규격화에 장점 등으로 인하여 LEC법에 의한 단결정

성장이 주류를 이루었으나, 최근에는 고품위 단결정 잉곳 요구로 인하여 현재는 수직온도구배 성장법에 의한 단결정성장이 주류를 이루고 있다. 다양한 분야에서 수직온도구배법에 의한 성장 방법을 적용하여 제작된 제품을 선호하는 이유는 저결함 밀도 및 낮은 스트레스로 인해 제품 수명이 오래갈 수 있는 장점이 있다는 것이다.

본 연구에서 적용하고자하는 마이크로 LED용 갈륨비소 기관은 초소형 소자 성능에 직접적인 영향을 미치는 저결함 밀도를 가지는 기관 개발이 중요하며, 온도 구배와 성장속도, 주위 환경 변화에 따른 쌍점, 다결정 등의 불량 발생률이 매우 높기 때문에 제품의 품질 개선 및 생산성 향상을 위해서 기존의 축적된 기술 데이터를 기반으로 성장온도 구배와 성장속도, 환경 등의 데이터를 분석하고 학습을 통한 불량발생을 줄일 수 있는 히터를 적용한 장비의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 성장구간별 온도 구배와 성장 속도 제어를 통한 성능이 우수한 갈륨비소 단결정 성장법을 개발하였다. 성장에 영향을 주는 온도 기울기와 결정성의 관계는 다음과 같다. 온도 구배 증가시 계면에서의 열응력을 크게 받으므로 전위 밀도가 커지고 고액계면의 형상을 평탄하게 만들어 준다. 온도 구배가 작으면 열응력이 작아져 전위 밀도는 감소하나 고액계면의 형상이 오목한 형상(Concave)이 되어 쌍점이나 다결정의 발생을 초래한다. 또한 성장의 영향을 주는 다른 큰 요인은 성장 속도이다. 이러한 결정성의 영향을 주는 온도구배와 성장 속도의 이론적 관계는 다음과 같다.

$$f = \frac{1}{\Delta Hv} (K_s \frac{dT_s}{dx} - K_l \frac{dT_l}{dx}) \quad (1)$$

여기서, ΔHv 는 갈륨비소 응고 잠열이다. K_s , K_l 은 고상(0.062W/Cm deg), 액상((0.5+0.2) K_l 또는 (0.5-0.2) K_l)의 열전도율이다. $\frac{dT_s}{dx}$ 및 $\frac{dT_l}{dx}$ 는 온도 기울기다.

$$f \approx \frac{K_s}{2\Delta H_v} \frac{dT}{dx} = 0.0288 \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

f 는 윗 식으로 도출되는데 윗 식을 실제 공정에 적용하기에는 매우 긴 공정 시간이 소요되므로 본 연구에서는 실험 데이터를 이용하여 계산식에 비해 6배~10배 정도의 성장 속도를 적용하여 공정에 사용하였다. 본 연구에서 위와 같이 단결정 인자들을 이용하여 각 부위별 특성에 따라 적절한 온도 구배와 성장속도를 적용하여 고품위 단결정을 얻어 내었다.

잉곳 성장을 통해 제작되는 갈륨비소 단결정 단면 형상의 개념도를 Fig 1에 제시하였다. A 영역은 고액계면의 형상의 불안정성으로 기인하여 쌍점이나 다결정의 생성이 빈발한 이유로 이를 억제하기 위해 고액계면 형상을 보다 평탄하게 가져가기 위해 큰 온도 구배와 이에 대한 이론적 계산식에 근거하여 열응력을 최소화 하면서도 계면의 평탄화를 유지할 수 있는 성장 속도를 주어 성장을 시키는 영역이다. B영역은 Cone의 성장 부위를 지나 Body의 성장시에는 Cone 부위에 비해 쌍점의 발생 빈도가 현격히 낮아지므로 성장 속도를 증가하여 공정 시간을 대폭 감소시킬 수 있다. 하지만 이러한 성장 속도의 변화가 큰 폭으로 변화 되면 고액계면 형상의 불균형을 가져와 다결정의 생성이나 열응력에 의한 전위 밀도의 증가를 가져오므로 열응력을 최소화 하며 공정 시간 단축을 위해 A와 C의 중간 정도의 성장 속도와 이에 Cone 부위의 동일 온도구배를 적용하여 공정을 진행 시킨다. C 영역은 성장 속도를 Cone 부위에 2~3배 정도 증가 시키며 이에 따라 고액계면 형상이 볼록한 형상(Convex)으로 형성 되므로 이를 평탄화하게 하며 또한 전위밀도를 낮추어 주기 위해 Cone 부위보다 작은 온도 구배를 적용한다. D 영역은 성장이 마무리 되는 부분으로서 End Effect가 발생하므로 성장 속도가 빠르면 이 부위에서는 큰 열응력이 발생하므로 전위 밀도가 증가한다. 따라서 이를 억제하기 위해 이 부위에서는 작은 성장속도(Cone과 동일)를 이용하며 이에 대한 구배는 작아진 구배를 그대로 적용하여 진행한다.

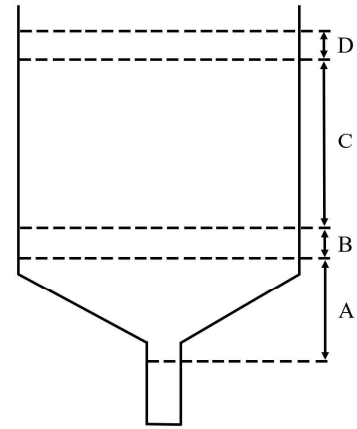


Fig. 1 Conceptual Configuration by Ingot Growth

본 연구에서 잉곳 성장을 위한 히터 설계를 수행하였다. 내부 온도 측정을 통해 온도 시뮬레이션 모델을 개발하고 최적화된 히터를 설계하였다. 고체/액체 경계면에서의 계면에 따라서 가장 이상적인 계면을 유지하여 성장하고 Concave 계면이 발생되지 않도록 온도를 제어할 수 있는 장치를 구상하였다. Concave 계면이 발생할 경우 성장되는 방향과 열팽창되는 부분의 차이로 인해서 쌍점 및 다결정 발생이 형성되어지므로 이를 최소화 할 수 있는 온도 구배 조건을 도출하였다. 잉곳 성장 과정에서 Concave가 발생하는 개념 형상을 Fig. 2에 제시하였다. 본 연구에서는 온도 시뮬레이션을 통해 갈륨비소 4인치 잉곳 성장 진행 과정을 모사하고 Fig. 2에 제시한 바와 같이 히터의 적용 조건을 검토하여 최적의 히터 위치를 결정하였다.

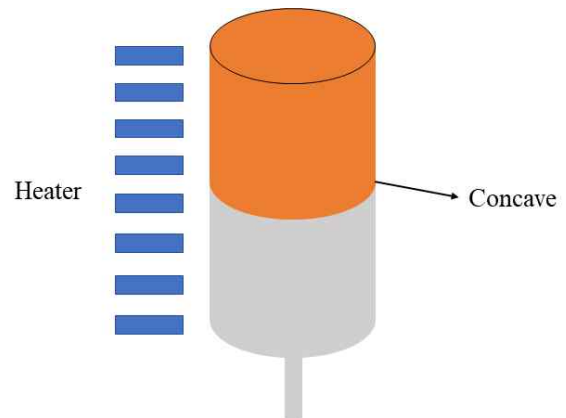


Fig. 2 Concave of Ingot Growth

온도 시뮬레이션을 위해 열전단 특성에서 가장 중요한 요소인 수직 방향에 대한 갈륨비소의 원하는 온도 분포를 형성시킬 수 있는 각 히터의 열량과 열전단 경로의 적절함을 검토하고 외부 케이스의 단열 능력을 고려하였다. 온도 시뮬레이션 결과 A 영역에서 $3^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 온도 구배를 갖도록 하였으며 그에 상응한 성장 속도는 약 $2.8\text{mm}/\text{hr}$ 이나 실험적인 결과 이에 1/2로 낮추어도 고액계면은 평탄하게 유지되며 열응력은 감소되어 이 부위에서 고품위 단결정을 얻을 수 있는 것으로 검토되었다. B 영역에서는 $2\text{mm}/\text{hr}$ 로 성장 속도를 증가 하였으며 고액계면의 형상이 계속 Convex해지는 것을 막기 위해 평탄화를 위해 온도구배를 $2.5^{\circ}\text{C}/\text{Cm}$ 감소 시켜 준다. C 영역에서는 성장 속도를 $3\text{mm}/\text{hr}$ 로 증가 시키고 온도 구배를 다시 $2^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 감소시켜 잉곳 뒷부분의 열응력 발생을 최소화 시킬수 있도록 적용하였다. 온도 시뮬레이션을 통해 최종 설계된 히터의 상단부 형상은 Fig. 3과 같다.

본 연구를 통해 잉곳 성장로 히터를 설계하여 최종 제작된 장비 형상은 Fig. 4에 제시하였다. 온도 제어장치와 히터를 장착한 잉곳 성장로이다.

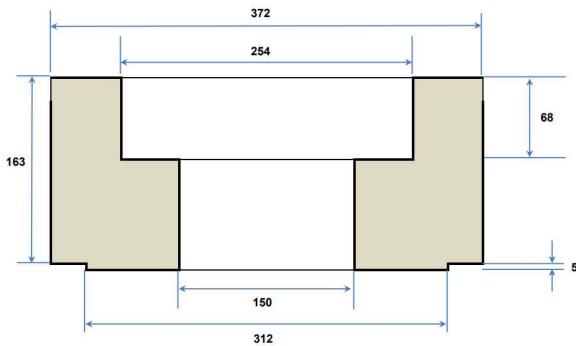


Fig. 3 Design Result of Upper Part of Heater



Fig. 4 Ingot Equipment of VGF Technique

설계된 잉곳 성장로 장비를 활용하여 갈륨비소 잉곳 성장을 통해 최종 4인치 결정체를 제작하였다. 본 장비는 히터의 내경이 150mm, 내부온도 제어 1238°C 이상, 히터의 제어 위치는 8구역으로 설계되었으며, 제작 크기는 4인치 까지 가능하도록 제작되었다. 본 장비를 활용하여 제작된 갈륨비소 잉곳을 가공하여 4인치 기판을 최종 완성하였다. Fig. 5는 본 연구를 통해 제작된 갈륨비소 잉곳 결정체를 보여주고 있다. 잉곳의 위치별 Carrier 농도 측정 진행결과 $0.5\sim 7.0\times 10^{17}\text{cc}/\text{cm}^2$ 특성의 결과치를 얻을 수 있었으며, 일반적으로 $0.5\sim 30\times 10^{17}\text{cc}/\text{cm}^2$ 에 비해서 편차가 적은 특성을 도출하였다.



Fig. 5 Manufacture of GaAs Ingot

3. 결 론

본 연구에서 온도 시뮬레이션을 통해 결정 성장 온도 제어기술을 이용하여 4인치 대구경 갈륨비소 잉곳의 성장에 대한 연구를 수행하였다. 온도 시뮬레이션 기술을 기반으로 주위 환경의 변화에 따른 온도 변화에 민감하게 대처할 수 있는 기술을 개발하였으며, 쌍점, 다결정 등의 불량 발생을 최소화하고 성장 진행시 고체/액체 계면상의 최적 조건 확보가 가능하다는 것을 제시하였다. 본 연구 결과를 활용하여 고품위의 EPD(Etched Pit Density) 특성이 500개/cm² 이하의 LD급 품질의 잉곳 성장 결과를 도출할 수 있는 것으로 검증하였다.

후 기

본 과제는 전라북도 R&D지원사업의 지원(RA2021-01-C4-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] H. Weimann, J. amom, Th. Jung G. Muller, "Numerical Simulation of the Growth of 2" Diameter GaAs Crystal by the Vertical Gradient Freeze Technique," *Journal of Crystal Growth*, Vol. 180, pp. 560-565, 1997.
- [2] B. Birkmann, M. Rasp, J. Stenzenberger, G. MuKller, "Growth of 3" and 4" gallium arsenide crystals by the vertical gradient freeze (VGF) method," *Journal of Crystal Growth*, Vol. 211, pp. 157-162, 2000.
- [3] J. Amon, P. Berwian, G. Muller, "Computer-Assisted Growth of Low-EPD GaAs with 3" Diameter by the Vertical Gradient-Freeze Technique," *Journal of Crystal Growth*, Vol. 198/199, pp. 361-366, 1999.
- [4] Christiane Frank-Rotsch, Natasha Dropka, Frank-Michael Kießling, and Peter Rudolph, "Semiconductor Crystal Growth under the Influence of Magnetic Fields," *Crystal Research and*

Technology, Vol. 55, pp. 1900115, 2020.

- [5] Hyunsu Jenung, Kiyong Lee, "An Investigation of the Characteristics of Electron Diffusion Coefficients in GaAs by Noise Calculation Method," *Proceeding of Summer Conference on The Korean Institute of Communications and Information Sciences*, pp. 14-18, 1993.
- [6] Youngse Kwon, "A Study on the Development of the Process Technology of GaAs Semiconductor," *Proceeding of The Korean Institute of Communications and Information Sciences*, pp. 17-27, 1987.