

# 미세구조 분석을 이용한 저밀도 결함을 가진 GaN계 반도체 연구

조형균

동아대학교 금속공학과

## The study of GaN-based semiconductors with low-defect density by microstructural characterization

Hyung Koun Cho

Dong-A Univ.

### Abstract

We have investigated the microstructural analysis of epitaxial lateral overgrowth (ELO), pendeoepitaxy (PE), and superlattice structures used as technology for the reduction of structural defects like dislocation in nitride semiconductors using transmission electron microscopy. We confirmed that the regrowth process such as ELO and PE is very effective technique on the reduction of threading dislocation (less than  $10^6/\text{cm}^2$ ) in the specific area. However, to decrease the defect density in the whole nitride films and the suppress the generation of defect by regrowth, we should find the optimized conditions. Besides, the process using double PE and AlGaIn/GaN superlattice structure showed no effect on the defect reduction up to now.

**Key Words** : 질화물, ELO, PE, TEM, 초격자

### 1. 서 론

최근에 청색, 녹색 발광 다이오드와 레이저 다이오드로 많은 연구 대상이 되고 있는 질화물 반도체는 GaN, InN, AlN 3종류의 이원계 화합물로 구성되어 있다. 이들로 구성된 InGaIn, AlGaIn 삼원계 및 InAlGaIn 사원계 화합물은 조성에 따라 1.9eV부터 6.2eV에 이르는 밴드갭을 포함하고 있다 [1]. 그러나 질화물 반도체는 GaN 기판의 제작이 어렵고, 격자 상수가 정합인 기판이 존재하지 않기 때문에 사파이어, Si, GaAs, SiC 등의 격자상수 불일치를 보이는 기판 위에 성장을 하고 있다. 이 중에서 경제적인 측면 및 물성적인 면에서 가장 효율이 좋은 사파이어 기판을 주로 이용하고 있다.

그러나 사파이어 기판과 질화물 반도체 사이에는 격자상수 및 화학적인 성분 원소의 불일치 등으로 인해 GaN 박막의 결정학적인 품질은 크게

저하되어, 통과전위(threading dislocation), 적층결함(stacking fault), 역영역 경계면 (inversion domain) 등의 결함이 생성된다 [2]. 이러한 결함들은 결국 소자의 수명 및 효율에 큰 영향을 주어 고효율 및 고휘도 발광소자의 구현을 위해서는 이들 결함의 제어 기술 및 분석 기술은 매우 중요한 부분이다 [3].

질화물 반도체의 결함 밀도를 감소시키기 위해 최근에는 재성장 방법을 통한 공정의 도입을 통하여 전위밀도를 감소시키는 연구를 수행하고 있다. 대표적으로 epitaxial lateral overgrowth (ELO or LEO) 또는 pendeoepitaxy (PE) 등의 방법을 활용하여  $10^6/\text{cm}^2$  보다 적은 전위 밀도를 갖는 질화물 박막을 성장하게 되었다 [4]. 또한, 기존의 III-V족 화합물 반도체에서 도입되었던 초격자 구조의 활용이 제안되었고, 두꺼운 질화물 반도체의 성장 중

에 저온 핵생성층을 다시 여러 번 반복적으로 성장하는 공정도 이용하고 있다. 이와 같은 연구의 체계적이고 입체적인 연구를 수행하기 위해서는 박막에 존재하는 결함에 대한 각 공정들의 영향을 평가하여야 한다. 특히, ELO나 pendeoepitaxy와 같은 선택적인 재성장 방법을 통한 국부적인 영역에서의 결함 밀도의 감소를 이용한 소자의 제작을 위해서는 각각의 공정 변수에 의한 선택적인 재성장 영역에서의 결함들의 변화를 체계적으로 연구할 필요성이 있다.

본 연구에서는 결함의 감소를 위하여 제안되고 있는 각 공정들에 대한 전위의 영향에 대해 미세구조적으로 평가하고, 공정들에 대한 장단점을 연구하였다.

## 2. 실험

본 연구에 사용된 시편은 모두 (0001) 사파이어 기판위에 유기금속 기상화학 증착 방법(MOCVD)으로 성된 시료들을 이용하였다. 시료들은 3가지의 종류로 구성이 되어 있다. 첫 번째로 ELO 공정에 의해 재성장된 질화물 반도체 시료의 미세구조를 분석하였다. 이 경우 사용된 유전체 박막은  $\text{SiN}_x$ 를 이용하였다. 두 번째로 PE에 의해 제작된 시료를 연구하였다. 이 때 사용된 PE 공정은 한번의 PE와 두 번의 PE 공정을 이용하였다. 세 번째로 50주기로 구성된 GaN/AlGaIn 초격자 구조를 이용한 시료의 결함에 대해 연구하였다.

TEM은 시편을 파괴적으로 제작하기 때문에, 본래 시편이 가지고 있는 정보를 시편 준비과정 중에 유지하기 위한 노력이 필수적이다. 기계적 연마는 썩기 형태의 시편을 제작하기 위하여 세 개의 발을 가진 트라이포드 연마기를 가지고 수행하였다. 세라믹 재료이며 삼방정계 구조를 가지고 있는 사파이어 기판은  $30\mu\text{m}$  이하로 연마되면 쉽게 깨지는 경향을 가지고 있어 기계적 연마 및 딥플 과정이 상당히 어렵다. 썩기 형태로 시편을 제작하게 되면 두꺼운 부분이 얇은 부분을 지탱하는 역할을 함으로서 끝부분만 매우 얇게 연마를 수행할 수 있어, 뒤이은 이온 빔 연마 공정을 매우 짧게 마칠 수 있다. 이온 빔 연마 공정에서는 회전 조절(rotation modulation)을 주는 방법을 이용하였다. 이미 이러한 방법이 연속적인 이온 빔 연마 공정

보다 스퍼터링 효율 차이로 인한 두께 단차 문제를 줄이는데 매우 우수한 효과가 있다는 것이 알려져 있다.

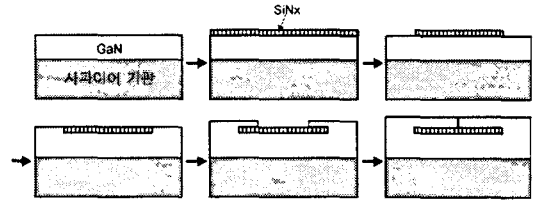


그림 1.  $\text{SiN}_x$  유전층을 이용하여 제작하는 ELO 공정의 순서도.

## 3. 결과 및 고찰

우선  $\text{SiN}_x$ 를 이용한 재성장 방법에 대한 미세구조를 분석하였다. 본 공정은 우선적으로 GaN 박막을 성장한 후,  $\text{SiN}_x$  유전체를 성장하여 패턴을 해서 일부 유전체 막을 식각한 후, 다시 GaN 층을 재성장하는 공정을 수행한다(그림 1). 이때 기판으로부터 연속적으로 박막의 표면으로 전파되는 결함들 중,  $\text{SiN}_x$  유전체가 있는 부분(mask 영역)은 유전체 박막이 전위가 전파를 하지 못하도록 장벽 역할을 하고, 유전체가 없는 부분(window 영역)에서는 결함들이 계속적으로 성장이 된다. 이 경우 mask 영역에서의 전위 밀도는  $10^6/\text{cm}^2$  이하로 감소하게 된다. 그림 1은 ELO 공정의 각 단계별 형태를 보여주는 그림이다. 그림 2는 ELO 공정에서 성장 시간에 따른 미세구조를 보여주는 TEM 단면 사진이다. 그림 2(a)는 재성장이 진행된 초기에 이미지 사진으로 mask 영역이 GaN 층으로 봉합되기 전의 모습이다. 그림에서 보듯이 mask 영역은 전위가 전파되지 않는 것을 보여준다. 그림 2(b)는 완전히 mask 영역에서 GaN 층으로 봉합이 진행된 후의 모습으로 오직 window 영역에서만 전위가 관찰됨을 확인할 수 있다. 그림 2(c)와 (d)는 mask와 window 영역에서의 전위밀도를 보여주는 TEM 평면 사진이다. mask 영역에서는 거의 전위가 관찰되지 않음을 확인할 수 있다. 결국 ELO 공정은 전위밀도 감소에 매우 효과적이라는 것을 확인할 수 있다. 그러나 window 영역에서의 전위밀도 감소를 위해서는 성장 속도의 조절을 이용한 window 영역에서의 전위들의 구부러짐 현상

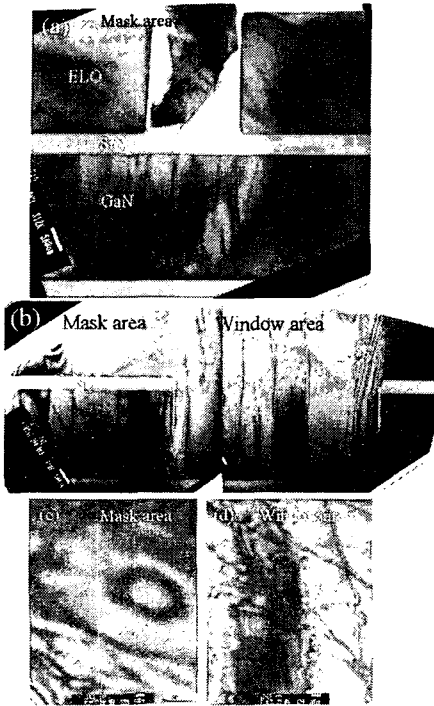


그림 2. (a) 재성장의 초기 단계로 mask 영역이 봉합되기 전의 단면 이미지. (b) 완전한 봉합이 이루어진 후의 ELO 구조 단면 이미지. 완전 봉합 후 (c) mask 영역과 (d) window 영역에서 관찰한 평면 이미지. mask 영역에서의 전위밀도 감소가 관찰된다.

을 유도해야 한다. 즉, 측면 성장을 촉진시킬 경우 전위는 표면에너지를 낮추기 위해 성장 면에 평행하게 (0001)면에 놓이게 되어 표면 쪽으로 전파되는 전위의 수를 줄여 줄 것이다.

다음으로 PE 공정에 대하여 미세구조를 분석하였다. PE 공정은 ELO와 마찬가지로 재성장을 이용하는 공정으로, 이때는 유전체를 식각하여 패턴을 만드는 것이 아니고 GaN 층을 식각을 하여 패턴을 형성하게 된다. 그림 3은 PE 공정에 대한 순서를 보여주고 있다. 우선 GaN 층을 성장한 후, GaN 층의 일부를 선택적으로 기판까지 식각을 수행한다. 그리고 GaN 층을 재성장하게 된다. 이 공정의 특징은 재성장의 초기에 식각이 되어 노출된 사파이어 기판보다 패턴되지 않은 GaN 부분에서 우선적으로 성장이 되어, 식각된 부분에서는 사파

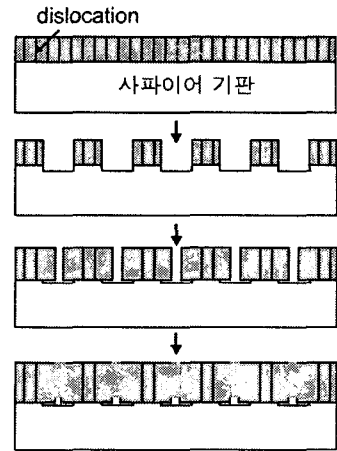


그림 3. PE 공정의 순서도.



그림 4. PE에 의해 제작된 GaN 에피층.

이어 기판과 GaN 층 사이에는 접합이 되지 않아 격자 상수 불일치로 인한 결함이 발생되지 않게 된다(그림 4). 오직 GaN 층위에 재성장된 GaN 부분에서만 전위가 관찰되게 된다. 결국 ELO와 마찬가지로 PE 공정도 전위 밀도의 감소에 매우 효과적이라는 것을 확인할 수 있다. 특히, ELO와는 달리 유전체 박막  $\text{SiN}_x$  층이 없어도 효과적이라는 장점이 있다. 그러나 측면 성장의 촉진에 의해 식각된 부분의 중앙위치에서 봉합이 발생하게 되는데(그림 4), 이때 봉합영역을 중심으로 양쪽 부분의 방향관계 불일치가 일어나는 경우가 증가한다.

앞의 결과에서 보듯이 PE 공정에서도 일부 전위는 수직 방향으로 표면까지 전파되게 된다. 특히 식각되지 않은 부위의 전위가 대부분 전파가 진행된다. 따라서 PE 공정을 두 번 수행할 경우 이러한 문제를 크게 감소시킬 수 있다. 즉, 앞서서 첫 번째 PE 공정에서 식각을 하지 않은 부분을 패턴

을 통해 식각을 수행하고 재성장을 하기 되면 이번에는 앞서서 전파되었던 전위들이 제거될 것으로 예상할 수 있다(그림 5(a)). 이와 같은 공정을 이중 PE(double PE)라 한다. 그러나 이중 PE는 재성장된 부분과 GaN층 사이에서 새로운 전위를 발생하는 문제점을 가지고 있다. 그림 5는 이중 PE를 수행한 결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 이중 PE에 의해 새로운 결함들이 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 아직까지 이중 PE 공정은 효과적인 전위 감소의 역할을 수행하지 못하고 있다. 그러나 앞으로 지속적인 연구를 통해 이중 PE 공정을 최적화 시키면 시편 전체에 걸쳐 작은 전위밀도를 기대할 수 있을 것이다.



그림 5. (a) 이중 PE에 의해 제작된 GaN 에피층의 TEM 이미지. (b) AlGaIn/GaN 초격자 구조를 포함한 필름의 TEM 이미지.

마지막으로 GaN/AlGaIn 초격자 구조를 이용한 연구를 수행하였다. 본 방법은 III-V족 화합물 반도체에서 성공했던 것으로 질화물 반도체에도 적용하였다. 초격자 구조는 각 층간의 계면에 격자 상수 차이로 인한 변형이 작용하게 되는데, 이때 통과하던 전위는 변형에 의해 구부러짐을 유도하게 되어 표면으로 전파되는 전위들 간에 반응을 촉진시키기 위해 고안되었다. 질화물 반도체의 전위는 대부분 기판에서 표면까지 구부러짐 없이 전파되기 때문에 전위간의 반응이 일어날 확률이 매우 희박하다. 따라서 본 방법은 이론적으로 매우 효과

적으로 전위들 간의 반응을 일으킬 수 있을 것으로 기대되었다. 그림 5(b)는 50주기의 초격자 GaN/AlGaIn 층을 이용한 구조에서 미세구조 결과이다. 그림에서 보듯이 실제로 이러한 초격자 구조는 전위들의 방향을 변화시키는데 그다지 효과적이지 못함을 보여주고 있다. 즉, 대부분의 전위는 별 영향을 받지 않고 표면까지 그대로 전파되고 있음을 볼 수 있다. 따라서 현재까지 초격자를 이용한 전위밀도의 감소는 ELO나 PE 공정만큼 효과적이지 못함을 확인하였다.

#### 4. 결론

질화물 반도체에서 결함을 제거하기 위한 공정으로 사용되는 ELO, PE, 초격자 구조에 대하여 TEM을 이용하여 미세구조 분석을 수행하였다. 재성장 공정에 의하여 전위밀도를 상당히 많이 감소하였다. 앞으로 각 공정에 대한 세분화된 연구를 통해 저밀도 결함을 가진 질화물 반도체를 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2002-041-D00238).

#### 참고 문헌

- [1] S. Nakamura and G. Fasol, "The Blue Laser Diode", Springer, Berlin, 1997.
- [2] S. C. Binari and H. C. Dietrich, in "GaN and Related Materials", edited by S. J. Pearton (Gordon and Breach, New York, 1997). pp. 509-534.
- [3] J. E. Northrup and L. T. Romano, in "Gallium Nitride and Related Semiconductors", edited by J. H. Edgar, S. Strite, I. Akasaki, H. Amano, and C. Wetzel (INSPEC, Stevenage, U.K., 1999), Vol. 23, Chap. A7.2, pp. 213-22
- [4] A. Sakai, H. Sunakawa, and A. Usui, Appl. Phys. Lett. Vol. 73, p. 481, 1998.