

논문 16-12-8

기판과 성장조건에 따른 질화탄소막의 결정성장 특성

Crystalline Properties of Carbon Nitride Films According to Substrates and Growth Conditions

이지공*, 이성필

(Ji Gong Lee* and Sung Pil Lee)

Abstract

Crystalline carbon nitride films have been deposited by RF reactive magnetron sputtering system with negative DC bias. The carbon nitride films deposited on various substrates showed α -C₃N₄, β -C₃N₄ and lonsdaleite structures through XRD and FTIR. We can find the grain growth of hexagonal structure from SEM photographs, which is coincident with the theoretical carbon nitride unit cell. When nitrogen gas ratio is 70 % and RF power is 200 W, the growth rate of carbon nitride film on quartz substrate is about 2.1 $\mu\text{m/hr}$.

Key Words : Carbon nitride films, RF magnetron sputter, Si wafer, Alumina

1. 서론

1989년 Liu와 Cohen[1]에 의해 β -Si₃N₄와 같은 구조를 가지는 공유결합 상태의 β -C₃N₄의 합성 가능성과 그 특성에 관한 이론적인 논문이 발표된 이후, 수많은 학자들이 이 물질을 합성하기 위해 많은 노력을 기울여 왔다. DeVries[2]는 1997년까지 발표된 질화탄소막(carbon nitride)에 관한 400여 편의 논문을 조사한 적이 있으며, 최근까지도 많은 연구가 진행되고 있다. 이처럼 많은 학자들이 질화탄소막의 합성에 관심을 기울이는 것은 이 물질이 가지는 뛰어난 물리·화학적 특성 때문이다. 이론적으로 질화탄소막은 다이아몬드를 능가하거나 유사한 체적 강성률(bulk modulus)을 가지며, 낮은 압축률, 높은 소리의 전파속도 및 열 전도 특성 등이 예상되었다[1]. 뿐만 아니라 높은 에너지

밴드 갭과 강한 절연특성을 가질 수 있고[3], 결정성 질화탄소막(β -C₃N₄)이 형성되면 화학적으로도 매우 안정한 물질이 될 수 있을 것이다. 이와 같이 뛰어난 물리·화학적 특성은 다이아몬드를 대체할 많은 산업응용 분야와 정밀측정 및 가공장치에 이용될 수 있고, 또한 반도체 응용분야 및 박막 분야에도 획기적인 기술 진보를 가져 올 수 있다. 특히, 질화탄소막은 실리콘 산화막 없이 실리콘 표면에 성장이 가능하기 때문에 GaN의 버퍼 층으로 이용하여 발광소자의 중요한 재료가 될 수 있고, 높은 열전도율 역시 반도체 공정의 좋은 보호막 역할을 할 수 있다[4].

그러나 지금까지 본 물질을 합성하기 위하여 다양한 방법으로 연구가 수행되었지만 크게 인정할 만한 결과는 아직 얻지 못했다. Matsumoto[5]는 1999년까지 결정성을 주장하는 70여 편의 연구논문을 조사한 결과 대부분 비정질 상태이었고, 결정성이 있어도 결정의 크기가 나노 단위이거나 국소적인 영역에 불과 한 것으로 평가하였다. 뿐만 아니라, 질화탄소막에 관한 그의 모든 리뷰논문에서도 결정성 질화탄소막의 합성 성공여부에 대해서는 대체로 부정적인 결론을 내리고 있다[2, 5, 8].

* : 경남대학교 전기전자공학부
(경남 마산시 위영동 449,
Fax: 055-249 2839

Corresponding Author : ariel98@mail.kyungnam.ac.kr
2003년 4월 21일 접수, 2003년 5월 27일 1차 심사완료,
2003년 7월 2일 최종 심사완료

β - C_3N_4 를 합성하기 위해 거의 모든 박막 제조 공정을 통해 시도되었다. 그 중에서 결정성 질화막의 형성에 좋은 결과가 보고 된 대표적인 방법으로는 스퍼터링[9-11], 화학 기상증착법(CVD)[12, 13], 레이저 에블레이션법[14,15] 등이 있다. 그러나 발표된 자료는 대부분 외국논문이며, 국내연구자료 [4,11,16,17]는 매우 미비한 실정이다.

본 연구에서는 질화탄소막을 형성하기 위하여 막 질이 치밀하고 저온에서 성막이 가능한 반응성 RF 마그네트론 스퍼터링 장치를 이용하였다. 특히 기존 스퍼터링 시스템은 기관만을 가열하였으나 본 시스템에서는 챔버 전체를 가열하여 챔버 내부에 균일한 온도를 유지할 수 있으며, 기관 전역에 동일한 열에너지를 공급할 수 있게 하였다. 성막된 막의 결정성을 확인하기 위해 엑스선 회절 분석기(X-Ray Diffractometer, XRD), 막막의 화학적 결합구조를 분석하기 위하여 푸리에 변환 적외선 분광기(Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)와 표면상태와 두께를 측정하기 위해 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)과 알파 스텝을 사용하였다.

2. 실험

기관 조건에 따른 CN막의 형성 특성을 관찰하기 위하여 Al_2O_3 , 석영, Si 웨이퍼 기관을 준비하였다. 모든 기관은 초음파 세척기를 이용하여 세척을 하였고 특히 실리콘 웨이퍼는 7:1 BHF 용액에 담구어 천연 산화막(native oxide)을 제거한 후 세척하였다. 기관은 타겟과 5 ~ 10 cm 사이에서 거리 조절이 가능하게 하였고, 챔버와 함께 점지가 되거나 따로 직류 바이어스 단자와 연결할 수 있도록 하였다. Si 기관은 붕소가 도핑된 p형(100)을 사용하였다. 타겟은 고순도(99.999%)의 3인치 그라파이트를 사용하였고, 반응성 기스와 스퍼터링 기스로 각각 99.999%의 질소와 아르곤을 사용하였다. 그림 1은 본 실험에서 사용된 RF 마그네트론 스퍼터링 장치의 구조이다.

메인 밸브를 연 후 챔버 히터를 동작시켜 챔버 내 온도를 원하는 값(100 ~ 300 °C)으로 유지시켰다. 챔버 히터를 고 진공에서 동작시킨 것은 지진 공상 상태에서 남아있는 오염원이나 산소와의 반응을 줄이기 위해서이다. 특히 챔버 벽면의 온도를 100 °C 이상으로 유지함으로써 수분을 증발시켜 CN막 내부에서 불순물로 작용할 수 있는 수소의 유입을

최소화하였다. MFC를 통해 아르곤을 유입하고 예비 스퍼터링을 하였다. 스퍼터링이 완료되면 열팽창률의 차이에 의한 크랙이나 변형을 방지하기 위하여 2 단계로 서서히 챔버를 냉각시키고, 대기압으로 맞추기 위해서는 질소 가스를 주입하였다. CN막 증착이 완료된 시료들은 측정 조건에 알맞게 가공 변형하여 막의 특성을 분석하였다. 본 실험과정을 도식화하면 그림 2와 같다.

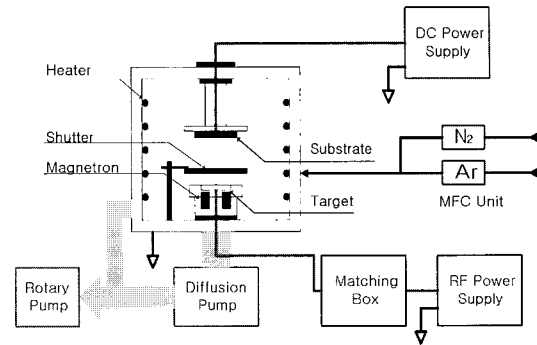


그림 1. 반응성 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템의 개략도.

Fig. 1. The schematic diagram of RF reactive magnetron sputtering system.

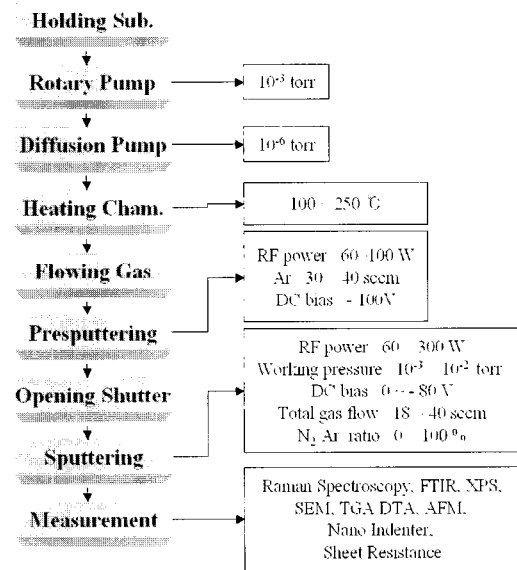


그림 2. 실험순서의 흐름도.

Fig. 2. Flows of experimental procedure.

3. 결과 및 고찰

3.1 XRD 분석

XRD 분석법은 β - C_3N_4 의 결정성을 확인하기 위해서 이론적인 계산과 실질적인 분석 장비로 많이 이용되었다. 지금까지 ICDD(International Centre for Diffraction Data)의 JCPDS에 등록된 육방정계 구조의 β - C_3N_4 회절 패턴은 4개가 있다(50-0845, 50-1249, 50-1250, 50-1512)[9, 18, 19]. 그러나 β - C_3N_4 는 아직까지 이론적 수준의 물질이므로 각각의 데이터를 상호간 또는 이론적 결과 값[5, 19]들 사이에는 일치점보다 차이점이 더 많이 발견된다. 본 실험에서도 상기 인용된 데이터를 참조하여 결과를 비교하였다. 사용된 장비는 X' Pert APD System(Philips, Netherland)이었다.

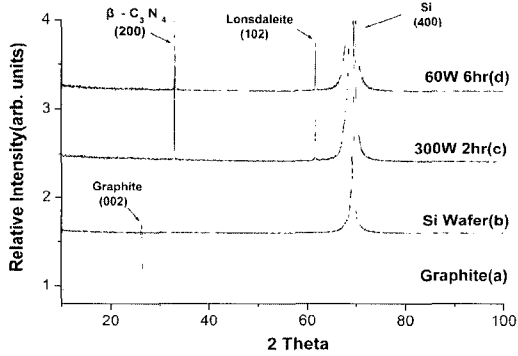


그림 3. 실리콘 기판위에 성장된 CN막의 XRD 패턴: (a) 그래파이트, (b) Si 웨이퍼, (c) CN 막(300 W, 2 hr) 및 (d) CN 막(60 W, 6 hr).

Fig. 3. XRD patterns of CN films on the Si wafer: (a) pure graphite, (b) Si wafer, (c) as deposited CN films at 300 W, 2 hr and (d) as deposited CN films at 60 W, 6 hr.

그림 3은 실리콘 기판 위에 성장된 질화탄소막의 X 선 회절 패턴이다. 비교를 위해 사용한 그래파이트의 패턴(그림 3(a))과 막 성장전의 실리콘 웨이퍼 패턴(그림 3(b))도 나타내었다. 그림 3(b)의 69.19°에 나타난 피크는 1.3569 Å의 d spacing을 갖는 실리콘 (400) 결정면의 피크이다. 그림 3(c)와 3(d)는 300 W의 RF 전력에서 2시간 동안, 60 W의 RF 전력에서 6시간 동안 각각 증착된 샘플의 회절 패턴이다. 이때 챔버의 온도는 모두 200 °C로

하였다. 두 샘플 모두 32.533°(PDF 50-1512)와 61.852°(PDF 19-0268) 부근에서 β - C_3N_4 (200)와 lonsdaleite(102)의 피크가 검출되었다. 그래파이트 피크는 두 샘플 모두에서 전혀 나타나지 않았다. 즉, 증착된 CN막은 완전히 화학적으로 반응하였음을 알 수 있다. 그림 3에서 보는 바와 같이 RF 전력과 시간에 따른 회절 패턴은 큰 차이가 없으므로 나타났다. 60 W에서 6시간 스퍼터링한 샘플에서 lonsdaleite 피크의 강도가 조금 높게 나타났다. 즉 합성된 막이 결정성을 가지기 위해서는 결함을 줄이고, 화학 양론적으로 결함을 하기 위한 충분한 시간이 필요하기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 Raman 및 FTIR 분석

CN막의 결합 상태와 분자구조를 확인하기 위하여 FTIR과 라만 분광기를 사용하였다. 본 연구에서는 합성된 물질을 확인하기 위하여 Zhang 등 [20]에 의해 계산된 데이터를 이용하였다. 그림 4는 알루미늄 기판 위에 성장한 질화탄소막의 라만 스펙트럼이다. 막의 성장조건은 RF 전력이 130 W, 챔버 내 질소 가스의 비가 75 %, 그리고 증착 시간이 2시간 30분이다. 이때 기판과의 거리는 10 cm이며 챔버는 가열하지 않았다. 그림 4에 나타난 결과와 같이 765 cm^{-1} 부근에서 α - C_3N_4 의 피크가 발견되었고, C≡N과 nitrile group에 해당하는 피크도 나타났다. 2000 cm^{-1} 의 높은 피크는 알루미늄 기판의 영향으로 생각된다. 이때 막의 두께는 3.08 μm 이었으며, 성장률을 계산하면 1.23 $\mu m/hr$ 정도가 된다.

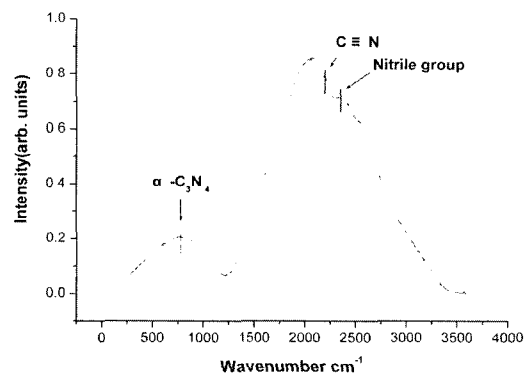


그림 4. 알루미늄 기판 위에 성장된 질화탄소막의 라만 흡수 스펙트럼.

Fig. 4. Raman spectrum of carbon nitride film deposited on Al_2O_3 substrate.

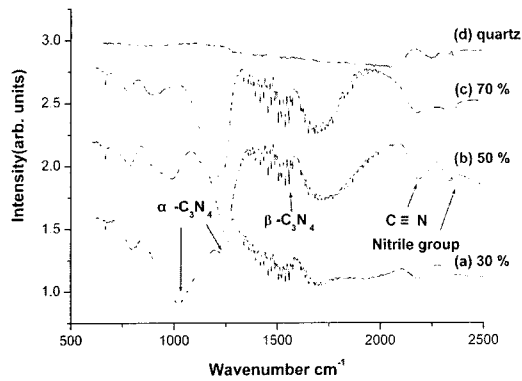


그림 5. 석영 기판 위에 성장한 질화탄소막의 FTIR 흡수 스펙트럼.

Fig. 5. FTIR spectrum of carbon nitride films deposited on quartz substrate.

그림 5는 200 W의 RF 파워와 60 V의 DC 바이어스를 인가하여 석영 기판위에 1시간 동안 질소농도에 따라 증착한 질화탄소막의 반사형 FTIR 흡수 패턴이다. 성장된 막의 두께는 질소농도가 30%에서 70%로 증가할 때 농도에 비례하여 1.26 μm 에서 2.11 μm 로 증가하였다. 막의 비교를 위해 막을 증착하지 않은 석영기판의 분석결과도 함께 나타내었다(그림 5(d)). 질소농도가 50% 이상의 샘플 즉 그림 5(b), 5(c)에서 모두 $\beta\text{-C}_3\text{N}_4$ 의 흡수 파장인 1529 cm^{-1} 의 피크가 나타났다. 또한 그림

5(d)를 제외한 모든 샘플들이 $\alpha\text{-C}_3\text{N}_4$ 와 $\beta\text{-C}_3\text{N}_4$ 의 흡수파장이 집중되어 있는 1500 cm^{-1} 부근에 피크들이 볼려 있다($\alpha\text{-C}_3\text{N}_4$: 1257, 1285, 1316, 1336, 1344, 1374 cm^{-1} , $\beta\text{-C}_3\text{N}_4$: 1338, 1448, 1529 cm^{-1}). 질소농도가 70%에서 30%로 낮아질수록 $\alpha\text{-C}_3\text{N}_4$ 의 피크인 1257 cm^{-1} 로 근접하며 50% 이하에서 1011 cm^{-1} 의 피크가 점점 강하게 나타났다. 그림 5(a), 5(b), 5(c) 모두에 나타나는 669 cm^{-1} 과 760 cm^{-1} 부근의 피크는 이론치의 오차 값을 감안할 때 681 cm^{-1} 와 753 cm^{-1} 에 해당되는 $\alpha\text{-C}_3\text{N}_4$ 피크로 추정된다. 비교를 위해 사용된 그림 5(d)는 주목할 만한 피크가 발견되지 않았다. 질소농도가 30% 쪽으로 낮아질수록 $\alpha\text{-C}_3\text{N}_4$ 의 결정성이 강하게 나타났고, 70% 쪽으로 증가할수록 $\beta\text{-C}_3\text{N}_4$ 의 결정성이 강해졌다.

3.3 SEM 표면분석 및 두께측정

주사전자현미경(SEM)을 사용하여 막의 표면 및 측면 구조를 관찰하였다. 두께측정을 위해서는 알파 스텝을 사용하였고, 이를 SEM 측면사진을 통해 계산된 두께와 비교 확인하였다. 분석을 위해 ABT-32(TOPCON, Japan)와 Alpha-step 500(KLA-Tencor, U.S.A)을 사용하였다. 그림 6은 실리콘 웨이퍼 위에 질소와 아르곤의 혼합 가스 중 질소의 농도를 0%에서 100%까지 변화시키면서 형성된 CN막의 사진이다. 증착 조건은 RF 전력이 300 W, 직류 바이어스가 80 V, 증착 시간은 30 분 그리고 챔버 온도는 150 $^{\circ}\text{C}$ 로 하였다. 그림 6에

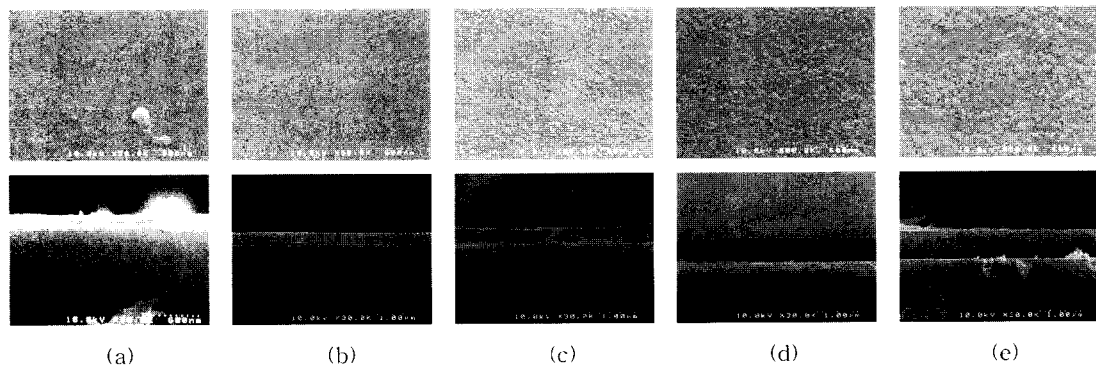


그림 6. 질소농도에 따른 질화탄소막의 표면과 측면의 SEM사진: (a) Ar 100%, (b) N₂ 10%, (c) N₂ 30%, (d) N₂ 70% 및 (e) N₂ 100%.

Fig. 6. SEM photographs of surface and cross section of CN films as different N₂ ratio: (a) Ar 100%, (b) N₂ 10%, (c) N₂ 30%, (d) N₂ 70% and (e) N₂ 100%.

서 나타나듯이 질소의 양이 증가할수록 표면의 결정립 크기가 증가하고 막의 두께도 증가함을 알 수 있다. 알파 스텝을 이용하여 분석한 결과에서도 동일한 경향을 확인할 수 있다(그림 7). 질소농도가 증가할수록 막의 두께가 증가하는 것은 아르곤에 의한 물리적 스퍼터링보다 질소가스와의 반응성 스퍼터링이 더 지배적인 것으로 해석할 수 있다. 즉, 질소 비율이 증가할수록 스퍼터된 탄소 입자와 이온화된 질소와의 반응성 스퍼터링이 더 지배적으로 일어나 막 성장률이 증가하고 결정립의 성장도 크게 나타난 것이다. 이 결과는 그림 5에서 살펴본 석영기판위에 성장된 샘플에서도 확인이 되었으며, Kusano[21]등의 연구결과와도 일치한다.

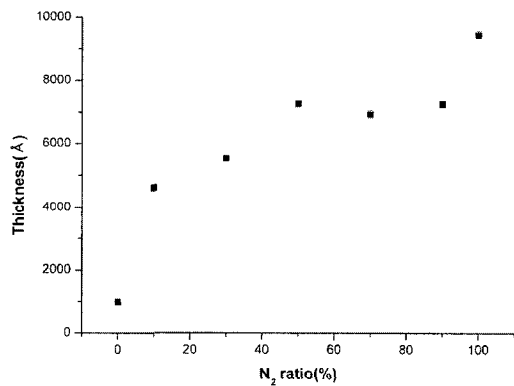


그림 7. 질소농도에 따른 질화탄소막의 두께.
Fig. 7. Thickness of CN films as different N₂ ratio.

그림 8은 질소가스의 비율 70% 하고, 300 W의 파워로 1시간 동안 스퍼터링하여 알루미늄 기판 위에 성장한 질화탄소막의 표면(a) 및 측면(b) 사진이다. 이때 직류 전압은 인가되지 않았으며, 기판은 챔버와 함께 접지시켰다. 챔버는 200 °C로 가열하였으며, 기판과 타겟간의 거리는 6 cm로 하였다. 그림 8(a)에서 나타나듯이 결정립 모서리가 120°의 각을 지닌 육각형 형태와 유사하다. 즉 알루미늄 위에 성장한 질화탄소막은 육방정계 구조와 유사한 특정한 결정성을 지닌 것으로 사료된다. 결정립의 크기는 약 2.5 μm로 관측되지만, 일부 결정립들은 서로 만나지 않으면서 성장하였다. 측면을 1만 배로 찍은 그림 8(b)를 통해 약 2 μm 두께의 질화탄소막이 성장되었음을 알 수 있다. 그림 8(b)에서 나타난 2 μm/hr와 그림 5에서 나타난

2.11 μm/hr의 질화탄소막 성장률은 기존에 보고된 자료와 비교해 볼 때 매우 높은 성장률이다[9-15]. 이는 높은 전력(200 W ~ 300 W)과 낮은 기판 에칭의 결과로 생각된다. 특히 알루미늄 기판이나 석영 기판은 부도체이므로 기판 바이어스를 인가하여도 기판 에칭의 영향은 실리콘 기판에 비해 낮게 나타났다. 알루미늄 위에 성장한 질화탄소막은 접착력도 높았으며, 스퍼터 중 발생한 중간층의 모양도 뚜렷하게 나타났다. 이는 알루미늄과 질화탄소막이 화학적으로 결합을 하여 중간층을 형성하고 이로 인해 화학적으로 강한 접착력이 생긴 것으로 생각된다. 또한 알루미늄의 거친 표면이 접착력을 높이는데 도움이 되었을 것으로 생각된다.

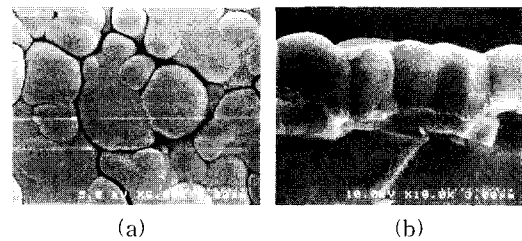


그림 8. 알루미늄 기판 위에 성장한 질화탄소막의 SEM사진: (a) 표면 (b) 측면.
Fig. 8. SEM photographs of CN film on Al₂O₃: (a) surface and (b) cross section.

4. 결 론

본 연구에서는 RF 마그네트론 반응성 스퍼터링 장치를 이용하여 기판의 종류, RF 파워, 직류바이어스, 질소와 아르곤의 비, 챔버의 온도, 박막 증착 시간 등 다양한 조건하에서 결정성 질화탄소막을 성장하고 그 특성을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) XRD 회절패턴 분석 결과 실리콘 웨이퍼 위에 증착된 박막에서 32.533°와 61.852°부근의 β-C₃N₄(200) 피크와 lonsdaleite(102) 피크가 검출되었다.
- 2) FTIR 분석결과 석영기판위에 성장한 박막에서 결정성 질화탄소막을 증명하는 β-C₃N₄의 피크와 α-C₃N₄의 적외선 흡수 파장대의 피크가 모두 나타났으며, 질소농도가 70%로 증가할수록 β상이 증가하고 30%로 감소할수록 α상이 강해졌다.

- 3) SEM을 통한 표면 분석결과 120°각을 갖는 육방정계 결정립 성장이 확인되었다.
- 4) 막의 성장률은 부도체인 알루미늄 기판과 석영 기판이 실리콘 기판에서 보다 더 높게 나타났으며, 알루미늄 기판에 성장한 질화탄소막은 중간층의 형성이 뚜렷하게 나타났다.
- 4) 질소량에 따른 막의 성장률 변화는 질소의 양이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다.
- 5) 질소가스 비율 70 %로 하고 200 W의 전력으로 석영기판 위에 성장된 결정성 질화탄소막의 성장률은 약 2.1 $\mu\text{m/hr}$ 로 매우 높은 성장률을 나타내었다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 경남대학교 학술논문게재연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사할 드립니다.

참고 문헌

- [1] A. Y. Liu and M. L. Cohen, "Prediction of new low compressibility solids", *Science*, Vol. 245, p. 841, 1989.
- [2] R. C. DeVries, "Inventory on innovative research : the case of C_3N_4 ", *Mater. Res. Innovations*, Vol. 1, p. 161, 1997.
- [3] J. L. Corkill and M. L. Cohen, "Calculated quasiparticle band gap of $\beta\text{-C}_3\text{N}_4$ ", *Physical Review B*, Vol. 48, No. 23, p. 17622, 1993.
- [4] 이성필, Shaestagir Chowdhury, "페닝 소스 스퍼터링 장치를 이용한 결정성 질화탄소막의 성장 및 물리적 특성", *센서학회지*, 9권, 3호, p. 96, 2000.
- [5] S. Matsumoto, E.-Q. Xie, and F. Izumi, "On the validity of the formation of crystalline carbon nitrides, C_3N_4 ", *Diamond and Related Materials*, Vol. 8, p. 1175, 1999.
- [6] C. M. Sung and M. Sung, "Carbon nitride and other speculative superhard materials", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 43, p. 1, 1996.
- [7] S. Muhl and J. M. Mendez, "A review of the preparation of carbon nitride films", *Diamond and Related Materials*, Vol. 8, p.

- 1809, 1999.
- [8] D. Marton, K. J. Boyd, and J. W. Rabalais, "Synthesis of carbon nitride" *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 9, No. 27, p. 3527, 1995.
- [9] K. M. Yu, M. L. Cohen, E. E. Haller, W. L. Hansen, A. Y. Liu, and I. C. Wu, "Observation of crystalline C_3N_4 ", *Phys. Rev. B: Condens. Matter*, Vol. 49, No. 7, p. 5034, 1994.
- [10] M. Y. Chen, X. Lin, V. P. Dravid, Y. W. chung, M. S. Wong, and W. D. Sproul, "Growth and characterization of C-N thin films", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 54/55, p. 360, 1992.
- [11] 이성필, 강종봉, "반응성 스퍼터링으로 성장된 결정성 질화탄소막의 기계적 특성", *전기전자재료학회논문지*, 15권, 2호, p. 147, 2002.
- [12] H. Han and B. J. Feldman, "Structural and optical properties of amorphous carbon nitride", *Solid State Commun.*, Vol. 65, p. 921, 1988.
- [13] D. W. Wu, W. Fan, H. X. Guo, M. B. He, X. Q. Meng, and X. J. Fan, "X-ray diffraction analysis on the RF-CVD deposited carbon nitride films", *Solid State Commun.*, Vol. 103, No. 3, p. 193, 1997.
- [14] P. Gonzalez, R. Soto, E. G. Parada, X. Redondas, S. Chiussi, J. Serra, J. Pou, B. Leon, and M. Percz-Amor, "Carbon nitride films prepared by excimer laser ablation", *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 109/110, p. 380, 1997.
- [15] C. W. Ong, X. -A. Zhao, Y. C. Tsang, C. L. Choy, and P. W. Chan, "Effects of substrate temperature on the structure and properties of reactive pulsed laser deposited CN_x films", *Thin Solid Films*, Vol. 280, p. 1, 1996.
- [16] 김종일, "고전압 방전 플라즈마에 의한 질화탄소막 증착시 플라즈마 영역에 가한 레이저 예블레이션의 효과", *전기전자재료학회논문지*, 15권, 6호 p. 551, 2002.
- [17] 김종일, 배선기, "결정성 질화탄소 박막의 합성과 그 특성해석", *전기전자재료학회논문지*, 14권, 10호, p. 835, 2001.
- [18] Y. A. Li, S. Su, H. S. Li, and W. Y. Luo,

"Polycrystalline carbon nitride β -C₃N₄ films synthesized by radio frequency magnetron sputtering", J. Mater. Sci. Lett., Vol. 17, p. 31, 1998.

- [19] J. P. Riviere, D. Texier, J. Delafond, M. Jaonen, E. L. Mathe, and J. Chanmont, "Formation of the crystalline β -C₃N₄ phase by dual ion beam sputtering deposition", Materials Letters, Vol. 22, p. 115, 1995.
- [20] Y. Zhang and Y. Gu, "Fourier transform infrared and Raman spectroscopy studies on α and β -C₃N₄ films", Philosophical Magazine Letters, Vol. 81, No. 7, p. 505, 2001.
- [21] Y. Kusano, J. E. Evetts, R. E. Somekh, and I. M. Hutchings, "Properties of carbon nitride films deposited by magnetron sputtering", Thin Solid Films, Vol. 332, p. 56, 1998.