

폴리우레탄 패드를 이용한 기계-화학 연마공정에서 사파이어 웨이퍼 표면 전위

황성원* (전북대원)* · 신귀수 · 김근주 · 서남섭(전북대)

Zeta-potential in CMP process of sapphire wafer on poly-urethane pad

Sung Won Hwang, Gwi Su Shin, Keunjoo Kim and Nam Sup Suh

Key Words: Sapphire wafer(사파이어 웨이퍼), CMP process(기계-화학 연마공정), DCXD(이중 X-선 결정회절), zeta-potential(표면전위)

Abstract : The sapphire wafer for blue light emitting device was manufactured by the implementation of the chemical and mechanical polishing process. The surface polishing of crystalline sapphire wafer was characterized by zeta potential measurement. The reduction process with the alkali slurry provides the surface chemical reaction with sapphire atoms. The poly-urethane pad also provides the frictional force to take out the chemically-reacted surface layers. The surface roughness was measured by the atomic force microscope and the crystalline quality was characterized by the double crystal X-ray diffraction analysis.

1. 서 론

최근 충전연색 광소자의 기술개발이 급속히 발전하여 다양한 분야에 광범위하게 활용되고 있다. 특히 청색 LED용 질화물계 반도체인 GaN처럼 에너지 밴드 갭이 넓은 반도체 소재는 박막을 성장할 경우에 높은 열에너지를 수반한다. 이러한 청색 계통의 광소자용 결정을 성장하기에는 고온 성장동안 결정구조를 유지시킬 수 있는 재료를 기판으로 사용하여야 하며, 또한 기판과 박막과는 결정의 격자상수가 적절히 일치되어야만 두 물질사이의 계면에서 변형 응력을 적게 받고 준동형의 격자간의 정합을 이룰 수 있다. 하지만 GaN 박막을 성장하는데 있어 적절한 기판이 없

어 격자간의 부정합이 13.6%나 되는 사파이어 기판을 사용하고 있으며, 이러한 7:8의 격자간의 평균적인 배치로 이루어지는 기하학적 부정합에서 결정 성장이 가능하게 하기 위해서는 사파이어 기판 표면의 결정성 확보가 필요하다^[1]. 이러한 표면광택도 확보 공정에 사용되는 평탄화 공정기술은 소자의 집적도를 향상시키고, 생산된 칩의 구조적인 신뢰를 실현하는 중요한 기술이 되고 있다.

본 연구에서는 폴리우레탄 패드위에서 사파이어 웨이퍼의 기계-화학적 연마(chemical and mechanical polishing: CMP)^{[2],[3]}공정을 수행하였다. 슬러리와 사파이어 계면의 표면전위를 전위를 측정하기 위해 전기영동광산란법을 사용하였으며^[4], 가공면의 기계적 특성을 파악하기 위하여 C(0006)결정면의 회절 peak에 대한 이중 X-선 결정회절(double crystal X-ray diffraction: DCXD) 측정 과 원자힘 현미경(atomic force microscope: AFM)으로 표면조도 특성을 정량화하였다.

전북대학교 기계공학과

*E-mail:kkim@mail.chonbuk.ac.kr

TEL: (063) 270-2317 FAX: (063) 270-2315

2. CMP 연마 메카니즘

사파이어 웨이퍼 제작에 있어서 기판의 연마공정이 마무리된 후에 길보기에는 거울 면의 광택이 나더라도 미세한 흠집(scratch)이 표면식각(etching) 공정을 수행하여 보면 검출되는 등, 사파이어 기판위에 증착되는 반도체 박막의 초기 상태의 결정성장에 영향을 미치게 된다. 반도체 단결정 박막이 형성되려면 원자층 형태의 성장에 있어서 사파이어 웨이퍼의 가공면이 원자층 수준의 평탄면을 필요로 하며 따라서 초정밀 평탄화 기술이 반도체 박막성장에서 중요하게 인식되고 있다. 기계-화학적 연마방식이 1980년 대 말 IBM사를 통해 도입되었으며,^[5] CMP 연마 가공 원리는 Fig. 1과 같이 CMP 공정에서는 웨이퍼는 패드와 슬러리에 의해 연마되어지고 패드가 부착되어진 연마 테이블은 단순 회전운동만을 하고 헤드부는 회전운동과 요동운동을 동시에 실시하며 일정한 압력으로 가압을 하게 된다. 웨이퍼는 표면장력 또는 진공에 의해서 헤드부에 장착이 되어지고 헤드부의 자체하중과 가해지는 압력에 의해 웨이퍼 표면과 패드는 접촉하게 된다 이 접촉면사이의 미세한 틈 사이로 가공액인 슬러리가 유동하게 되어 슬러리 내의 연마입자와 패드의 표면돌기에 의해 기계적인 제거작용이 이루어지고 슬러리 내의 화학성분에 의해서 화학적인 제거작용이 이루어진다. CMP공정에서는 패드와 웨이퍼간의 가압력에 의해 디바이스 돌출부의 상부에서부터 접촉이 이루어지고 이 부분에 압력이 집중되어 상대적으로 높은 표면제거 속도를 가지게 되어 가공이 진행되어질수록 돌출부가 줄어들어 웨이퍼 전체표면에 걸쳐 균일한 평탄화가 진행되어진다^[6].

연질의 연마입자를 함유한 화학액을 첨가시킨 CMP 메카니즘을 간단히 요약하면,

1. 슬러리와 공작물의 실제 접촉점에서 고상반응이 생기고 이 반응층이 마찰력으로 인해 탈락한다.

2. 가공분위기에 의해 급속히 반응하여 웨이퍼 표면에 산화층 또는 수화층이 형성되고 이 생성층 위에서 1과 마찬가지로 고상반응과 반응층 제거가 이루어진다.

3. 연질의 연마입자가 촉매로 작용을 하여 웨이퍼 표면의 산화를 촉진하고 이 산화층이 연마

입자의 마멸현상에 의해 제거된다.^[7]

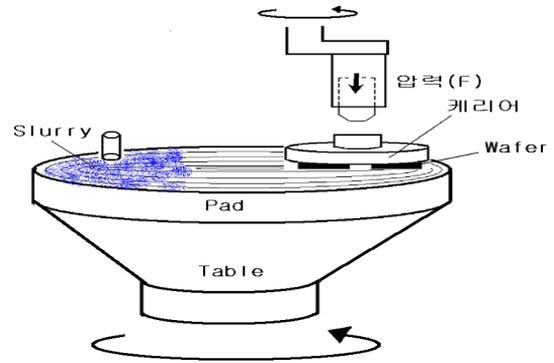


Fig .1 Schematic model of CMP process.

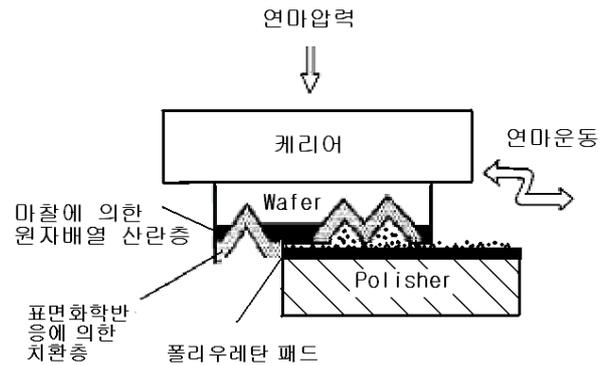


Fig. 2 Mechanism of CMP planarization.

Fig. 2와 같이 연마패드와 사파이어 웨이퍼 사이에 연마입자가 현탁 혼입된 연마액(Slurry)을 공급하여 압력을 가한 상태에서, 서로 상대운동으로 연마 가공되어지는 메카니즘을 갖는다. 이러한 연마과정은 Preston의 식으로 표현되어진다.^[8]

$$M(\mu\text{m}/\text{min}) = \eta \cdot p \cdot v \quad (1)$$

식 (1)에서 M은 표면이 제거되는 절삭속도이고, p는 접촉면의 가공압력이고 v는 웨이퍼와 패드의 상대속도이다. η는 가공 조건으로 정해지는 상수로 Preston계수이다. 화학적 작용이 복합된 기계-화학적 연마에서는 Preston계수 η에 의해서 표면

제거 속도가 크게 변동되어진다⁹⁾¹⁰⁾.

패턴의 철부에는 높은 가공 압력이 걸려 상대적으로 높은 속도로 제거된다. 철부 부위가 가공되어 가면서 접촉면적은 늘어나게 되어 실질적으로는 가공 압력이 감소하여 가공 속도도 감소하여 간다. 그렇지만 거시적으로는 웨이퍼 표면 전체에서의 가공 속도는 일정상태가 된다.

3. 실험방법

Fig. 3은 폴리우레탄 패드의 SEM 사진으로서 직경 20-25 μm 의 세사를 압착시킨 패드이다. 와이어 사이에 있는 공극사이로 절삭된 칩이나 슬러리가 침투되어 표면접촉율을 감소시키게 되며 일정기간 사용후에는 드레싱을 요한다. 사용하는 슬러리가 염기성이어서 사파이어표면에서 화학반응을 일으키고 연마될 때에 떨어져 나온 칩이나 미립자와 착염을 형성할 수도 있어 알갱이를 형성하게 된다.



Fig. 3 SEM image of the surface of poly-urethane pad.

Fig. 4는 전기영동광산란 레이저도플러법의 광학계 개략도로서 10mW He-Ne 레이저를 광원으로 하며, 거울면 M1, M2와 편홀 P1, P2는 전기영동셀 C를 중심으로 회전하는 고니오미터상에 있다(ELS 8000, OTSUKA). 산란각은 스텝모터에 의해 5~22도의 범위안에서 0.1도의 정밀도로 스캔 가능하다. 기준광은 반투과 거울 HM1에서 반사되어 모듈레이터 거울 MD에서 반사하여 회전되는 거울 M3 및 반투과 거울 HM2에서 산란광과 혼합되어 관전자 증배관 PM에 의해 검출

된다.

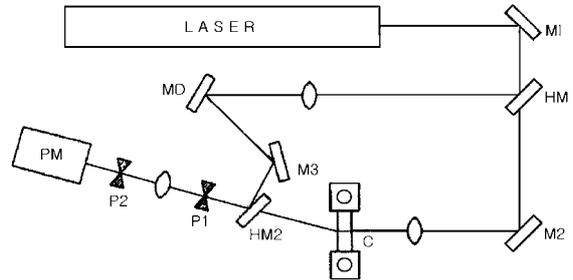


Fig. 4 Schematic diagram of optical measurement system.

전기장에 의해 영동하고 있는 입자에 레이저 광을 쏘면 입자로부터 산란광은 도플러 효과에 의해 주파수가 천이하며 이는 입자의 속도에 비례하고 영동속도를 측정하게 된다. 측정된 산란광의 천이로부터 입자가 갖는 제타 전위(zeta potential)에 분포를 구할 수 있다. 실제 입자는 전기장 방향으로 직진하는 것이 아니며 브라운 운동을 하며 영동하고 있다.

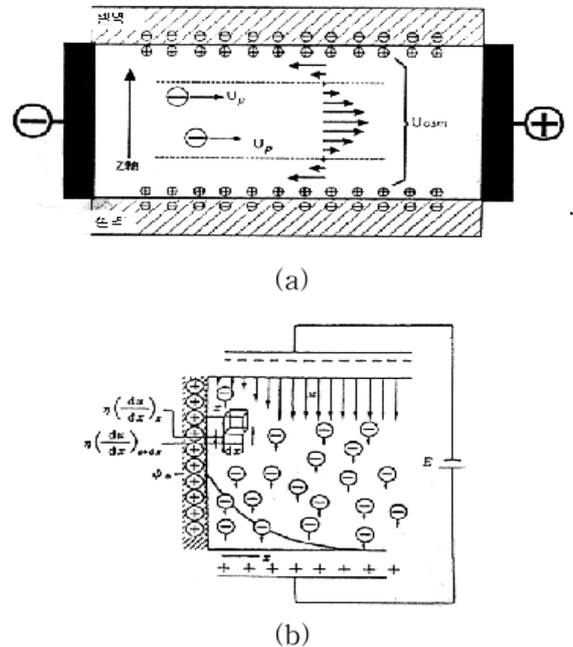


Fig. 5 Models of ion current flow at the interface between solid and solution: (a) electrophoresis and (b) ion dispersion.

Fig. 5는 전기영동산란에 의한 제타전위의 분포를 나타낸 것으로서 (a)는 표면에 전기 이중층을 가지는 고체 표면에 외부에서 전기장을 계면

에 평행하게 작용시키면 이때 고체표면은 정지하고 있으며 용액층에 층류가 발생하여 유량속도 분포가 발생하게 된다. 이때에 전기력과 점성력은 균형을 잃게 되어 전기 침투류에 효과가 나타난다. (b)는 이러한 불균형에 의한 제타 전위를 형성할때의 이온의 분포 상태를 나타내고 있다.

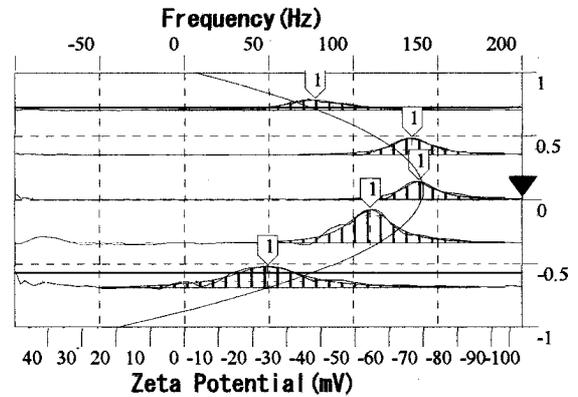
또한 기계적인 결정특성으로 폴리싱된 사파이어 웨이퍼 표면의 잔류 응력 (residual stress)에 의한 표면결함(surface defect) 및 변위량을 알기 위해서 극소적인 C(0006)회절 피크점 부근에서 회절세기를 정밀 측정하기 위해 X-선 빔을 더욱 정렬시킬 필요가 있으며, X-선을 2번 결정편(Ge)에 회절시켜 빔을 정렬시킨 다음, 시료에 이중결정 X-선 회절(DCXD) 실험을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

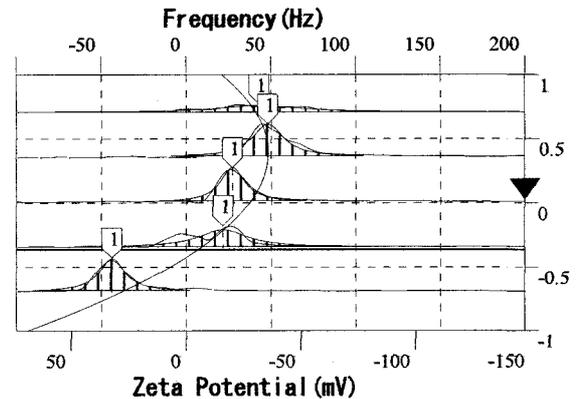
표면광택의 폴리싱(polishing)공정은 기계적으로 래핑된 표면의 조도를 원자적으로 평탄하게 하기 위한 경우로 Fig. 3과 같이 폴리우레탄 패드 위에서 표면흡착성이 우수한 수용액(surfactant)을 이용하여 화학반응을 고려한 기계-화학적 연마를 수행한다. 현탁 수용액(slurry) 속에 $0.007\mu\text{m}$ 크기의 silica (SiO_2) 콜로이드(colloid)상태의 미립연마제 (abrasive particle) 2-10 wt%와 증류수 (de-ionized water), pH stabilizer, 계면활성용 surfactant를 넣어 가공하게 된다.

Fig. 6은 기계-화학적 연마가공에서 웨이퍼 및 슬러리의 표면 전위를 전기영동광산란법으로 측정된 결과로서 슬러리의 표면전위는 -37.05mV 이며, 폴리싱된 사파이어 표면의 표준 전위는 -4.89mV 이다. 염기성인 슬러리를 이용하여 표면의 폴리싱 공정을 수행한 경우의 사파이어의 표면전위는 대략 -29.73mV 로 음이온 전위를 갖는 웨이퍼 면에서 양이온 활성제를 첨가하면 해리된 활성제 양이온이 고체면에 흡착되기 시작하여 흡착층을 형성하고 표면전위가 감소되는 현상을 갖는다. 따라서 폴리싱 공정에서 slurry 용액 pH를 안정화시켜, 연마입자가 갖는 표면 전위 (Zeta potential: ζ)의 음이온 장벽의 크기를 극대화함으로써 전기적 반발력에 의해 입자들의 분산을 촉진시킬 수 있다. 실리카 콜로이드 경우 NaOH,

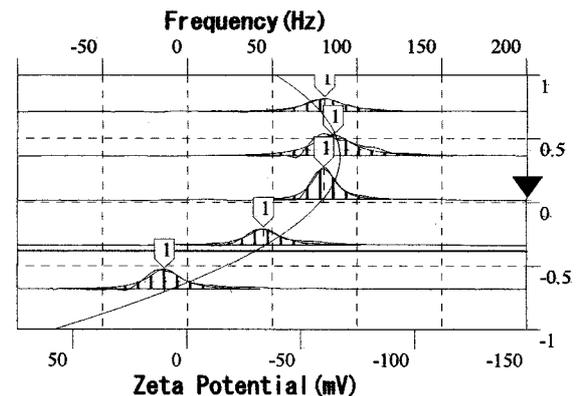
KOH, NH_4OH , NaOCl 등의 염기성의 물질이 분산을 촉진하며 주로 사용된다.^{[11],[12]}



(a) Slurry



(b) Sapphire surface(Standard solution)



(c) Sapphire surface(Slurry solution)

Fig. 6 Electrophoretic zeta potentials for slurry solution and standard solution.

Fig. 7은 연마 및 폴리싱 공정 후 세정한 표면의 시료에서의 조도에 따른 회절된 X-선의 세기를 나타내는 스펙트럼으로 사파이어 기판의 이중각도가 41.73° 인 C(0006)면에서 일어나는 회절

피크의 반폭치(FWHM)으로서 76 arcsec를 나타낸다. Table 1은 폴리싱을 수행한 여러시료에 반폭치로서 표면조도가 거칠수록 반폭치가 증가하며 63~89 arcsec 영역의 비교적 큰 수치를 나타냄을 알 수 있다. 이는 조도가 클수록 표면의 접 표면적이 커지고 회절각의 산포가 증가됨을 알 수 있다. 조도에 따른 미세 결정간의 깨진 금(crack)이나 전위(dislocation)밀도가 매우 높음을 의미한다.

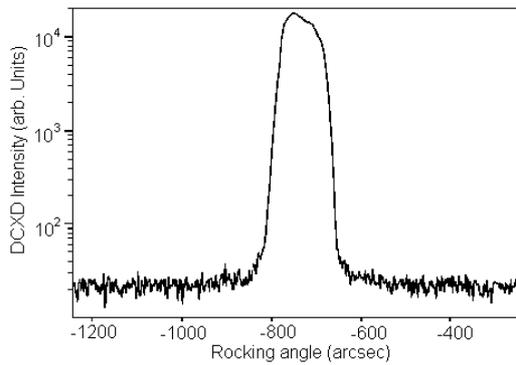


Fig. 7 DCXD spectrum of Al₂O₃ C(0006) after polishing.

X-선 평가와 표면 전위밀도 측정은 C면(0006)에서의 회절 스펙트럼으로부터 사파이어 웨이퍼를 정량적으로 평가할 수 있으며, 결정내의 전위결함이 이 반폭치에 비례하고 전위밀도는 다음 식으로 표현된다.^[13]

$$\rho_D = \frac{\Delta^2}{9b^2} \quad (2)$$

여기서 $\rho_D(\text{cm}^{-2})$ 는 전위밀도이고, Δ 는 반폭치(radian), b ($a[1120]=4.765 \text{ \AA}$)는 선단형 전위(edge-type dislocation)의 Burgers 벡터이다. 박막내의 전위밀도는 각각 $0.59 \times 10^6/\text{cm}^2$ 을 나타낸다. 이는 표면 식각 관찰에 의한 결과보다 다소 적은 전위밀도를 보이며, 이러한 전위밀도의 차이는 기계적인 연마공정에 의한 결함의 진행에 기인될 수 있음을 의미한다.

사파이어 기관의 표면 조도를 원자힘 현미경(AFM)으로 측정하였으며, 웨이퍼의 한점을 선택하여 스캔면적이 $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ 인 국소적 미세표면의 거칠기를 확인하였다. Fig. 8은 사파이어 웨이퍼 표면의 AFM 이미지를 나타낸 것으로 최고봉과

최저곡 사이의 최대조도 차이가 14.5Å이며 중간 조도는 7.5Å이고 평균조도는 1.0Å을 나타내고 있다.

Table 1. FWHM of DCXD spectra for polished sapphire wafers

| Sample | FWHM (arcsec) |
|--------|---------------|
| F 10 | 88.9 |
| F 5 | 82.6 |
| G 5 | 76.2 |
| G 2 | 72.5 |
| G 8 | 69.3 |
| A 1 | 63.4 |

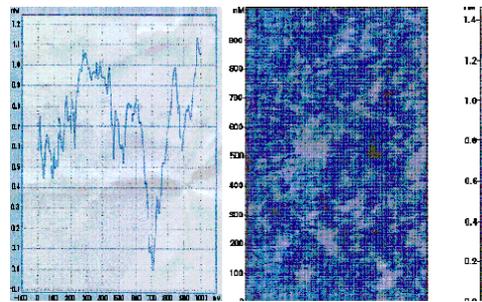


Fig. 8 AFM image of the surface of sapphire wafer.

사파이어 기관 표면 평탄도 평가는 Fig. 9와 같이 웨이퍼 위에 광학원두를 놓은 상태에서 555nm의 단색광을 입사시키면 뉴턴링의 간섭무늬 상이 나타난다. 웨이퍼가 가공으로 인해 웨이퍼의 중심부가 불룩하게 곡율이 존재하며 가장자리부위가 중심부보다는 얇아지면서 마모율이 크게 됨을 알 수 있다. 또한 줄 간격이 동심원형으로 부분적인 흠집이나 요철부위가 없이 연마되어 있음을 알 수 있다.



Fig. 9 The optical interference pattern of sapphire wafer

5. 결 론

청색광소자용 기판으로 사용하기 위한 사파이어 웨이퍼를 기계-화학적인 연마 가공하여 사파이어 웨이퍼 가공 최적 조건을 연구하였다.

기계-화학적인 연마 공정을 수행한 웨이퍼 표면으로부터 이중결정 X-선 결정회절에 의한 반폭치는 63~89 arcsec의 영역의 비교적 큰 수치를 갖으며, 표면이 기계적인 스트레스에 의해 결정성이 손상됨을 알 수 있었다.

사파이어 웨이퍼의 평탄도는 뉴턴링 간섭상의 존재로 웨이퍼의 자장자리가 중심부보다 마모율이 큰 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2002년도 전북대학교의 지원 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) K. Kim and J.-C. Koh, 2000, "GaN epitaxial growths on chemically and mechanically polished sapphire wafers grown by Bridgeman method", Journal of the Korea Association of Crystal Growth 10 (5), 350.
- (2) P. H. Singger, 1992(Mar.), Semiconductor International, p 44.
- (3) W. C. O'mara, 1994(Jul.), Semiconductor International, p 140.
- (4) Technical report, LS-1003, 2002, "Principle of Electrophoretic Light Scattering", OTSUKA ELECTRONICS.
- (5) S. Pennington and S. Luce, 1992, VMIC Conference, pp 168-172.
- (6) H.-D. Jung, 1996, "Ultra precision machining technology for ULSI chip fabrication", Journal of the Korea Society of Mechanical Engineers, 36 (3), pp 221-230.
- (7) H.-I. Jung, 2000 "Effects of Film Type on CMP Characteristics", A master's thesis of Hanyang University.
- (8) F. W. Preston, 1927, "The Theory and design of plate glass polishing machines", J. Soc. of Glass Tech., pp 214-256.
- (9) L. M. Cook, 1990, J. Non-cryst. solids, 120, p 152.
- (10) C.-W. Lin, B.-T. Dai, and C.-F. Yeb, 1995, J. Electrochem. Soc. 142 (9), p 3098.
- (11) A. Papoulis, 1965, "Probability, Random Variables and Stochastic Processes", McGraw-Hill, New York.
- (12) H. W. Gutsche and J. W. Moody, 1978, "Polishing of sapphire with colloidal silica", J. Electrochem. Soc. (125), 136.
- (13) K. Kim and C. B. Park, 1998, "The Effect of Geometrical Misfit Dislocation on Formation of Microstructure and Photoluminescence of Wurtzite GaN/Al₂O₃(0001) Films Grown by Low Pressure Metal-Organic Chemical Vapor Deposition," Thin Solid Films (330), 139.