

Aerosol Flame Deposition 법에 의해 제조된 Er 첨가 Sodium Borosilicate 유리박막의 식각특성에 관한 연구

박강희 · 정형곤* · 이정우* · 이철중* · 박현수 · 문종하**

전남대학교 세라믹공학과

*전남대학교 물리학과

**전남대학교 신소재연구소

(1999년 6월 7일 접수)

Etching Characteristics of Er-doped Sodium Borosilicate Glass Film Fabricated by Aerosol Flame Deposition Method

Kang Hee Park, Hyung Gon Chung*, Jeong Woo Lee*, Hyung Jong Lee*,
Hyun Soo Park and Jong Ha Moon**

Department of Ceramics Eng., Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

*Department of Physics, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

**Advanced Materials Research Center, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

(Received June 7, 1999)

초 록

반응성 이온 에칭(RIE: reactive ion etching)을 이용하여 Er이 첨가된 평판형 광도파로용 Sodium Borosilicate 유리박막의 식각특성을 조사하였다. 식각률은 RF 전력이 증가함에 따라 증가하였으나, 공정압력이 증가함에 따라 감소하였다. C₂F₆ 유량과 O₂ 첨가량의 증가와 함께 식각률이 증가하였으나, 임계점(C₂F₆ 7.5 sccm, O₂ 20%) 이상에서는 다시 감소하였다. C₂F₆ 유량 7.5 sccm, O₂ 첨가량 20%, RF power 270 W, 압력 150 mTorr 조건에서 식각률은 180 Å/min이었다. 이상의 최적 공정조건으로 식각한 후 975°C에서 30분 동안 열처리함으로써 광도파로 측벽의 거칠기가 현저히 개선된 평판형 광도파로가 제작되었다.

ABSTRACT

The etching characteristics of Er-doped sodium borosilicate glass film for the planar optical waveguides were investigated using reactive ion etching. The etch rate decreased as the pressure increased, but increased as the RF power increased. The etch rate increased as the flow rate of C₂F₆ gas and the amount of O₂ addition increased, but decreased over critical point(C₂F₆ 7.5 sccm, O₂ 20%). The etch rate was 180 Å/min under C₂F₆ 7.5 sccm, O₂ 20%, RF power 270 W, pressure 150 mTorr. With this optimum etching condition and subsequent heat treatment at 975°C for 30 minutes, planar optical waveguides having improved sidewall roughness were fabricated successfully.

Key words : Planar optical waveguides, Er-doped sodium borosilicate, Reactive ion etching, Heat treatment

1. 서 론

최근 FTTH(fiber to the home)를 위한 가입자 광선로망의 개발 및 초고속도 WDM(wavelength division multiplexer) 통신망 개발과 더불어 평판형 광증폭기 소자의 중요성이 더욱 커지고 있다. 유리를 이용한 평판형 광도파로 소자의 제작에 관한 연구는 화염기수분해(FHD),¹⁾ 화학증착(CVD),²⁾ 이온교환,³⁾ 이온침투,⁴⁾ 스퍼터링,⁵⁾ 졸-겔법⁶⁾ 등에 의해 이루어지고 있다. 이들 방법 중 가장 광손실이 적은 방법은 CVD(chemical vapor deposition)와 FHD(flame

hydrolysis deposition)로 알려져 있다. CVD나 FHD에 의해 제작되는 유리의 굴절률은 광섬유와 비슷하여 광손실이 매우 적다. 그러나 CVD 방법으로는 두꺼운 유리 박막을 얻을 수 없으며, FHD 방법으로는 유리박막과 기판으로 사용되는 실리콘 기판과의 열팽창계수 차이로 인해 실리콘 기판이 변형되거나 유리박막에 응력이 유기되어 복굴절을 일으킨다. 또한 휘발성이 매우 높은 염화물을 사용해야 하므로 유리의 조성이 매우 제한적이다. 따라서 이들의 단점을 보완하기 위해서는 광소자 재료로서 실리콘 기판과 열팽창계수가 비슷한 sodium borosilicate계⁷⁾의 유리

박막이 바람직하다. 증기압이 낮은 Na, Er 등과 같은 알칼리나 희토류 원소를 함유한 sodium borosilicate계 유리박막은 AFD(aerosol flame deposition) 법이나 스퍼터링법에 의해 제조가 가능하며, sodium borosilicate계에 Er이 첨가된 유리박막은 매우 우수한 광증폭특성을 보인다.

본 연구에서는 EDPA(Er doped planar amplifier) 제작을 목적으로 AFD 법에 의해 실리콘 기판 위에 sodium borosilicate 계의 버퍼층과 Er이 첨가된 코어층의 유리박막을 제작하였다. AFD 방법은 FHD 방법에 비해 유리조성의 선택에 제한이 없으며, 실리콘 기판과 비슷한 열팽창 계수를 갖는 pyrex나 다성분계 유리박막을 얻을 수 있어 실리콘 기판의 휨이나 광도파로에서의 복굴절 현상으로 인한 광손실을 줄일 수 있다. 그러나 이 유리조성은 증기압이 낮은 알칼리(Na)나 희토류(Er) 원소를 포함하고 있기 때문에 광도파로 제작을 위한 건식식각이 매우 어렵다고 알려져 있다. 습식식각 또한 언더컷 현상의 진행으로 인해 선폭의 제어가 어렵고, 도파로 측벽에 줄무늬(striation) 자국을 발생시킴으로써 도파로 제작이 불가능하다.⁸⁾

Er이 첨가된 sodium borosilicate 유리박막에 정확한 선폭의 광도파로를 제작하기 위해서는 이방성 식각이 이루어져야 하며, 이러한 식각 방법으로는 주로 RIE (reactive ion etching),⁹⁾ ICP(inductively coupled plasma),¹⁰⁾ ECR(electron cyclotron resonance)¹¹⁾ 등의 건식식각 장비들이 사용되어 오고 있다. 그 중 RIE 장비는 고밀도 플라스마인 ICP나 ECR보다 낮은 식각률과 낮은 종횡비(aspect ratio)의 단점이 있지만, 그 값이 저렴하고 간단한 구조로 인해 주로 사용되어지고 있다. 본 연구에서는 광도파로 제작을 위해 RIE 장비를 사용하여 C₂F₆/O₂ 플라스마에서의 각 변수에 따른 식각 특성을 조사하였다. 또한 열처리에 의해 식각 후 거칠어진 도파로 측벽의 표면을 개선하고자 하였다

2. 실험 방법

Er이 첨가된 sodium borosilicate 유리박막의 평판형 광도파로 제작을 위해 n-type (100) 4인치 실리콘 기판을 사용하였다. 1200°C의 전기로에서 실리콘 기판 위에 두께 1 μm의 산화막을 증착시켰다. 증착된 산화막 위에 soot 상태의 산화 분말을 AFD 방법을 사용하여 증착한 후 1300°C의 전기로에서 열처리함으로써 74SiO₂-14B₂O₃-8Na₂O-4Al₂O₃ 조성의 버퍼층을 15 μm 정도의 두께로 형성시켰다. Er이 첨가된 산화분말을 버퍼층 위에 같은 방법으로 증착하고, 1200°C의 전기로에서 열처리함으로써 코어층을 형성시켰다. 코어층 유리의 조성은 72SiO₂-14B₂O₃-8Na₂O-6Al₂O₃+8 wt%Er₂O₃ 이었다.

RIE에 의한 Er이 첨가된 sodium borosilicate 유리박막의 식각특성을 파악하기 위하여 제작된 박막 위에 마

스크 물질로 Cr 막을 증착하였다. Cr 막의 증착은 RF sputtering system을 이용하였다. 스퍼터링은 2 mTorr의 압력에서 Ar 가스 30 sccm에 의해서 수행되었고, 이때 source power는 450 W였다. 이상의 조건에서 Cr의 증착률은 160 Å/min였다. 증착된 Cr의 두께는 3000 Å이었고, 4인치 웨이퍼 내에서 증착 두께의 균일도는 약 99.1%였다. 증착 두께는 α-step에 의해 측정되었다.

증착된 Cr 막 위에 스피ن 코터를 사용하여 감광막(AZ5214E)을 도포하였다. 이때 회전속도는 2000 rpm이고, 수행시간은 60초였다. 감광막에 남아있는 용제를 증발시키고, 접착도를 향상하기 위해 감광막이 도포된 웨이퍼를 hot plate에서 115°C, 3분간 soft baking하였다. Baking된 웨이퍼는 정확한 선폭을 위해 ORIEL 83210 mask alignment fixture를 사용하여 vacuum contact을 하였다. 노광은 1000 W Hg-Xe lamp를 사용하였다. 이때 광량은 4.85 mW/cm²이며 노광 시간은 60초이다. 노광 후 식각되어야 할 부분에 존재하는 감광막의 제거를 위해 노광된 웨이퍼를 현상하였다. 현상은 NMD-W (2.38%)용액에서 immersion 방법을 사용하였고, 60초 동안 수행되었다. 잔여 용제를 제거하여 감광막을 건조시키고 기판에 대한 접착도를 증가시키기 위해 현상된 웨이퍼를 hot plate에서 115°C, 5분간 hard baking하였다.

Cr 마스크 패턴제작은 MAKHC4(HNO₃ 15.10-17.10%) 용액을 사용하여 습식식각으로 수행되었다. 식각 시간은 8분 정도 소요되었다. Cr 마스크 위에 감광막은 photo resist stripper (ACT-1)을 사용하여 제거하였다.

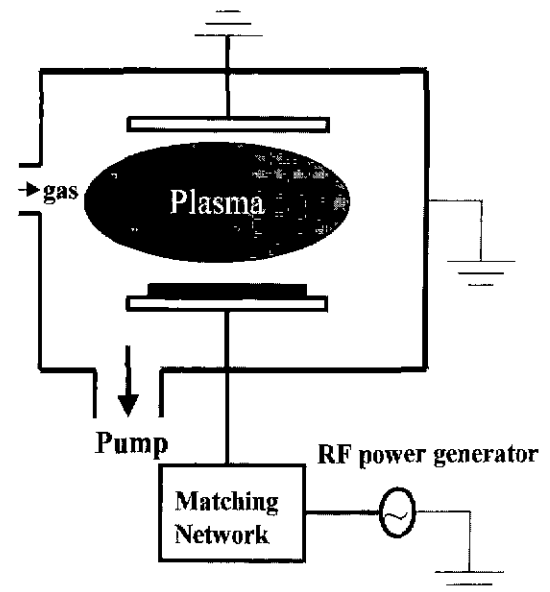


Fig. 1. Schematic diagram of reactive ion etching equipment.

광막 제거 후 패턴이 형성된 4인치 웨이퍼를 3×3 cm²의 크기로 잘라 RIE 방법에 의해 C₂F₆/O₂ 가스 플라즈마 하에서 식각 공정을 수행하였다. RIE 장비는 Fig. 1과 같이 평행한 평판 전극으로 구성되어 있고 하부 전극에 시료를 올려 놓는다. 상부 전극은 접지되어 있으며 하부 전극은 matching box를 통하여 350 W 용량의 RF(13.56 MHz) power supply에 연결되어 있다. 본 연구에서는 RIE의 공정 변수에 따른 식각특성을 추출하기 위하여 압력, C₂F₆ 가스의 유량, O₂ 가스의 첨가량, RF 전력 등을 변화시켰다.

먼저 압력은 150, 200, 250, 300 mTorr로 변화시켰고, C₂F₆ 가스의 유량을 5, 10, 15, 20 sccm으로 변화시켰으며, O₂ 가스의 첨가량을 식각률이 가장 높은 C₂F₆ 가스의 유량에 대해 0, 10, 20, 30, 40, 50%로 변화시켰다. 또한 RF 전력을 150, 180, 210, 240, 270 W로 변화시켰다. 공정 시간은 식각률을 구하기 위해서 종료점까지 식각하지 않고 120분으로 고정하였다. 식각률은 Cr 마스크를 MAKHC4 용액으로 제거한 후 α-step에 의해 측정되었다. 이상의 실험 결과를 기초로 하여 최적 공정조건을 수립하였다.

위에서 언급한 photolithography 공정에 의해 Cr 마스크의 패턴을 제작하였고, 최적화된 식각 공정조건에서 도파로를 형성한 후 Cr 마스크는 MAKHC4 용액을 사용하여 제거하였다.

식각 후 거친 표면과 측벽의 거칠기의 향상을 관찰하기 위해 RIE에 의해 식각된 코어 도파로를 전기로에서 950, 975, 1000, 1015°C로 각각 30분씩 열처리하였다. 식각된 표면과 도파로 측벽의 거칠기는 SEM으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

Er이 첨가된 sodium borosilicate 코어층의 건식식각

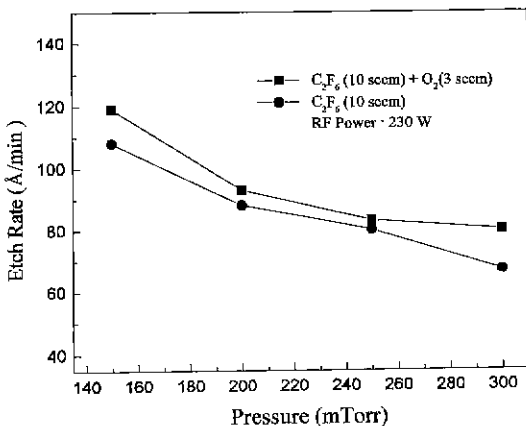


Fig. 2. Etch rate change as a function of pressure at 230 W.

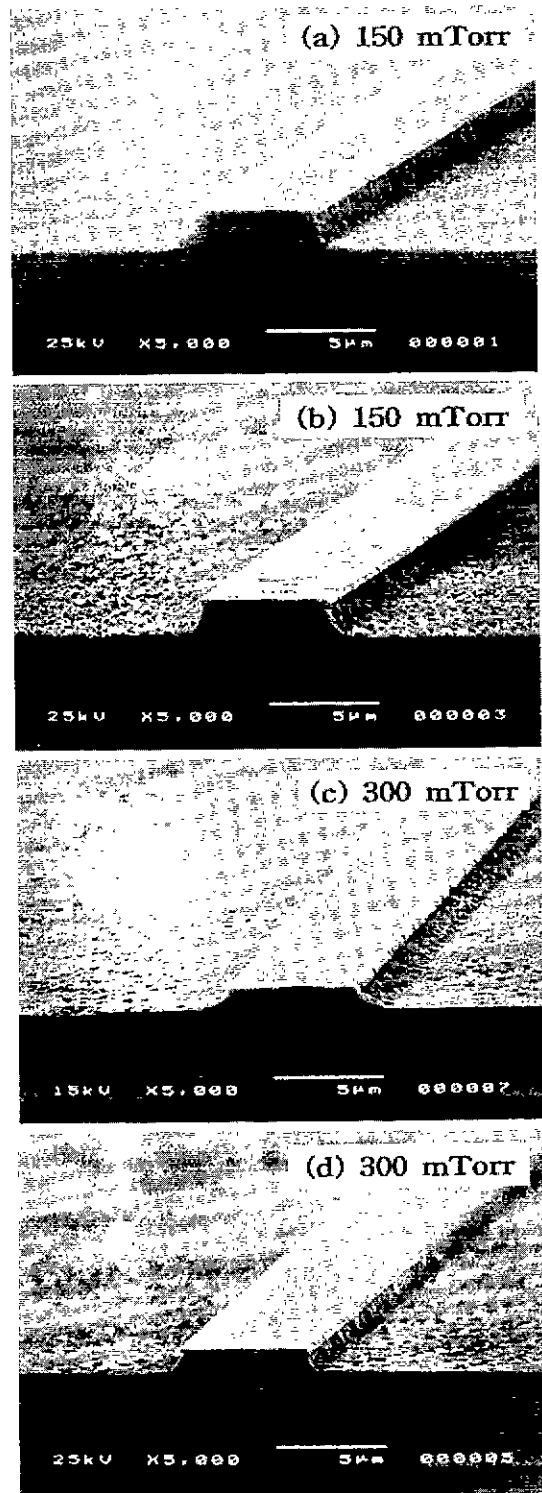


Fig. 3. SEM micrographs showing etched profiles as a function of pressure at 230 W : (a) and (c) C₂F₆ 10 sccm . (b) and (d) C₂F₆ 10 sccm + O₂ 3 sccm.

공정에서 공정변수에 따른 식각률의 변화를 알아보았다. 식각공정에서 식각률에 영향을 주는 중요한 변수로는 공정 압력, 식각 가스(C_2F_6)의 유량, O_2 가스의 첨가량, RF 전력 등이 있다. 먼저 공정 압력에 대한 식각률의 변화를 조사하기 위하여 압력을 150, 200, 250, 300 mTorr로 변화시켰다. 이때 RF 전력은 230 W, C_2F_6/O_2 가스의 혼합비는 10 sccm/0 sccm와 10 sccm/3 sccm으로 하였다. 압력에 따른 식각률의 변화는 Fig 2에 나타난 바와 같은데, 압력이 증가함에 따라 대체적으로 식각률은 감소함을 알 수 있다. 압력이 증가할수록 식각률이 감소하는 이유는 압력이 증가함에 따라 이온의 밀도는 증가하나 sheath 전위가 감소하여 이온충돌 에너지가 저하되기 때문이다. 또한 압력의 증가로 인해 식각공정에서 생성된 부산물들이 휘발하지 못하고 산란 등에 의한 재증착으로 식각률이 감소될 수도 있다. 또한 같은 압력조건에서 O_2 가스를 첨가하지 않았을 때 보다 첨가했을 때 식각률이 향상됨을 알 수 있었다. 그러나 Fig. 3에서 O_2 가스를 첨가했을 경우에 피식각물의 표면이 더 거칠어졌음을 알 수 있었고, 약간의 언더컷(undercut) 현상이 진행됨을 관찰하였다.

다음은 C_2F_6 가스의 유량에 따른 식각률의 변화를 조사하였다. 공정 압력은 150 mTorr, RF 전력은 210 W로 고정하였으며, 공정은 120분간 행하였다. 먼저 C_2F_6 의 유량을 5, 10, 15, 20 sccm으로 변화시켰다. Fig. 4와 5에서 알 수 있듯이 식각률은 유량이 증가함에 따라 증가를 보이다 7.5 sccm 이상에서는 감소함을 보였다. 임계점 이하에서의 유량의 증가가 플라즈마 내의 불소 농도를 증가시킴으로써 식각률이 급격히 증가하였으나, 임계점 이상에서의 유량의 증가는 챔버 내의 압력을 일정하게 유지하기 위해 펌핑 속도를 증가시키게 되고, 이로 인해 플라즈마 내에서 생성된 이온과 라디칼 등이 식

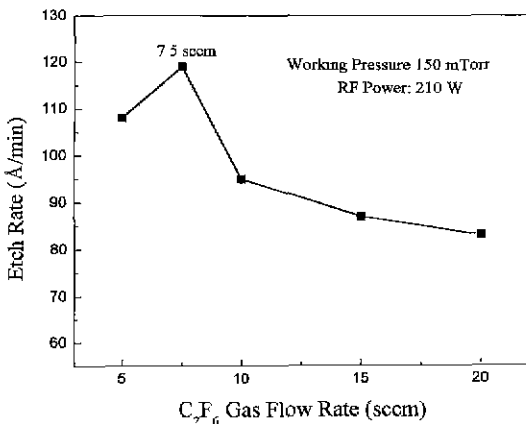


Fig. 4. Etch rate change as a function of C_2F_6 flow rate at 210 W, 150 mTorr.

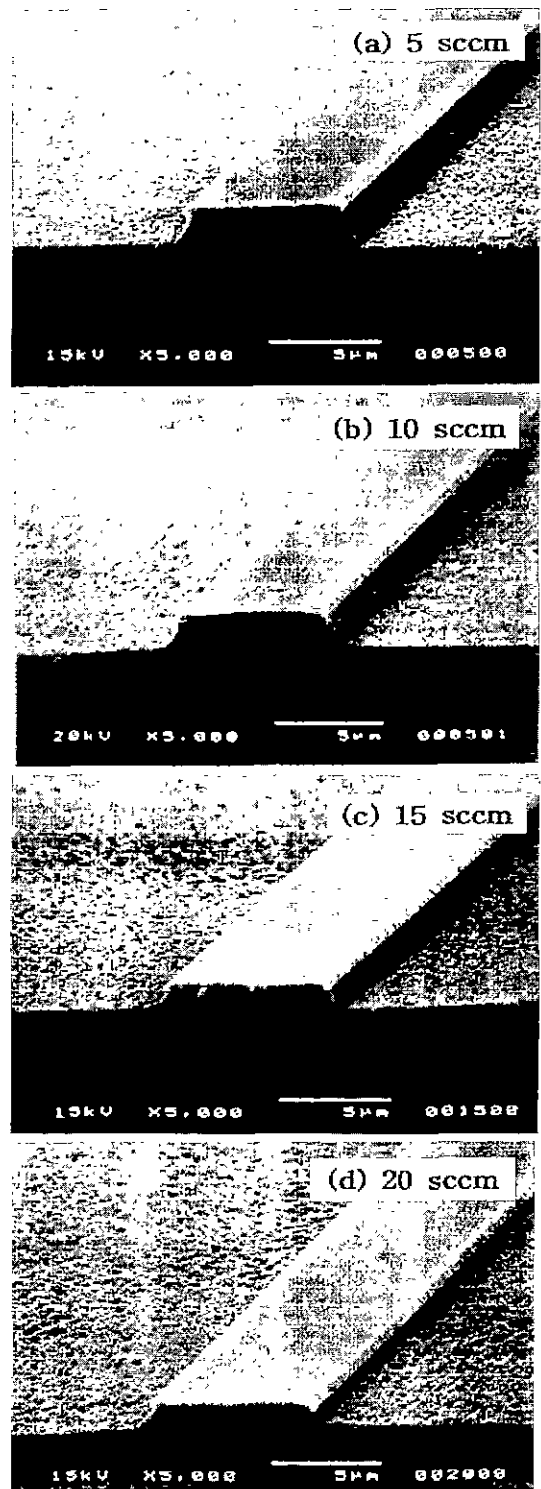


Fig. 5. SEM micrographs showing etched profiles as a function of C_2F_6 flow rate at 210 W, 150 mTorr. (a) 5 sccm, (b) 10 sccm, (c) 15 sccm and (d) 20 sccm.

각 반응에 참여하는 체류시간을 짧게 함으로써 식각률이 저하된 것으로 사료된다.

일반적으로 탄소와 불소가 함유되어 있는 가스의 식각 반응에서는 폴리머의 형성과 식각이 동시에 일어난다고 알려져 있다. 불소를 함유한 C_2F_6 , CF_4 등의 가스는 건식식각시 플라즈마 내에서 탄소와 불소의 이온 혹은 라디칼 등으로 분해되어지며, 탄소와 불소의 결합에 의해 폴리머가 형성된다. 따라서 O_2 의 첨가는 휘발성 기체인 CO , CO_2 , COF_2 등의 기체를 생성함으로써 폴리머 형성을 억제하고, 식각에 참여하는 불소의 농도를 증가시켜 식각률을 향상시킨다.¹²⁾

본 연구에서는 O_2 의 첨가량에 따른 식각률의 변화를 알아보기 위해서 압력 150 mTorr, RF 전력 210 W, C_2F_6 유량 7.5 sccm, 공정시간은 120분으로 고정하고 O_2 를 C_2F_6 가스의 0, 10, 20, 30, 40, 50% 첨가하였다. O_2 의 첨가량에 따른 식각률의 변화는 Fig. 6과 7에 나타내었다. O_2 의 첨가량이 증가할수록 식각률이 증가하였으나, 첨가량이 20% 이상에서는 감소하였다. 과도한 O_2 를 첨가했을 경우 유량의 증가로 인해 이온과 라디칼 등의 체류시간이 짧아지며, 또한 식각으로 노출된 피식각물의 표면에 산소의 화학적 흡착이 일어나고, 식각에 참여하는 불소 원자가 흡착된 산소를 탈착시키는데 소비되어짐으로써 식각률이 저하된다.¹³⁾

다음으로 RF 전력의 증가에 따른 식각률의 변화를 조사하였다. RF 전력의 증가는 sheath 전위를 증가시키고, 플라즈마 내에서의 전자 밀도를 증가시켜 중성입자와의 충돌 빈도수를 증가시킨다. 이러한 충돌 빈도수의 증가는 플라즈마 내에 존재하는 입자의 분해를 가속시켜 이온의 밀도를 증가시킨다. 또한 셀프바이어스 전압(self-bias voltage)을 크게 하여 이온 충격에너지를 증가시킴으로써 표면에서 물질의 이탈속도를 빠르게 하여 식각률이

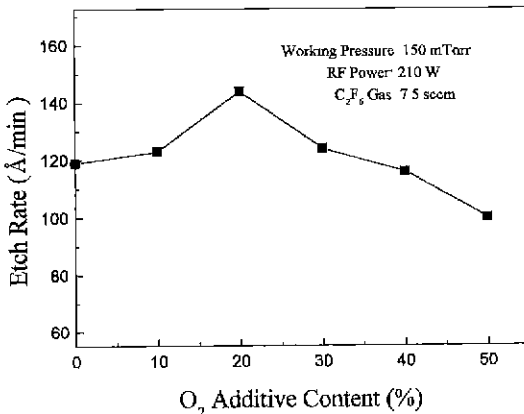


Fig. 6. Etch rate change as a function of additive O_2 content at 210 W, 150 mTorr, C_2F_6 7.5 sccm.

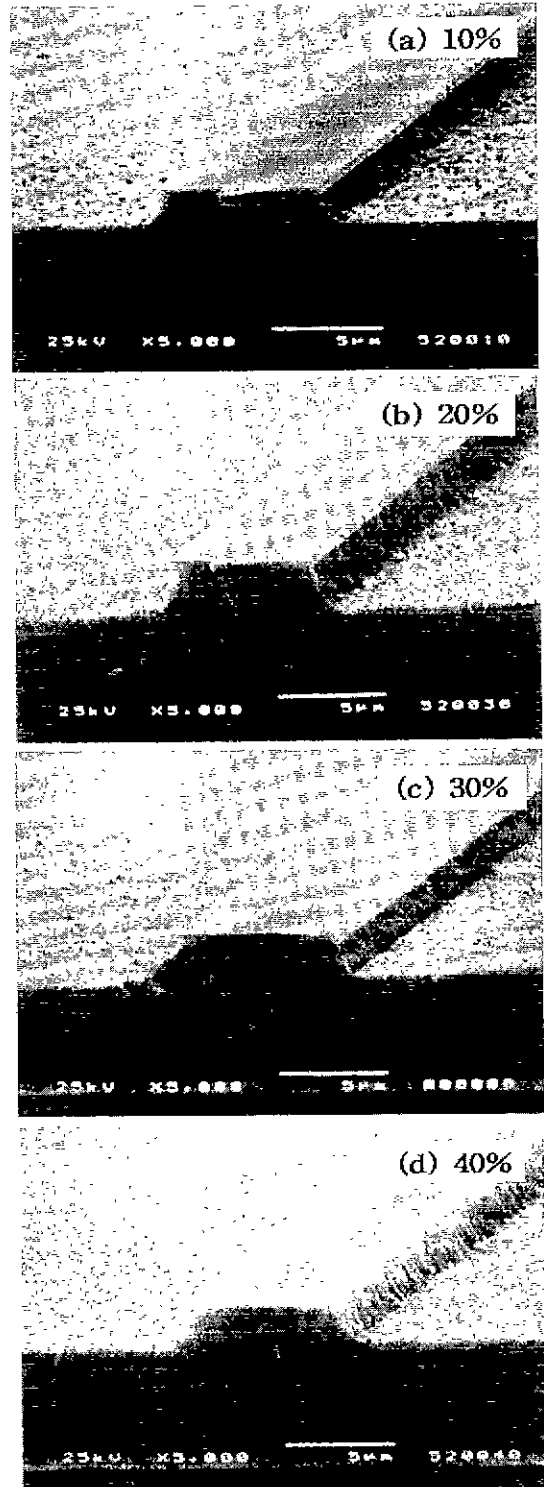


Fig. 7. SEM micrographs showing etched profiles as a function of additive O_2 content at 210 W, 150 mTorr, C_2F_6 7.5 sccm : (a) 0%, (b) 10%, (c) 20% and (d) 30%

증가되는 것으로 알려져 있다. 또한 셀프바이어스 전압의 증가와 함께 폴리머의 두께가 감소한다.¹⁴⁾ 셀프바이어스 전압은 RF 전력의 증가에 따라 증가하는데 이러한 이유는 RF 전력이 증가하면 RF의 최대 최소간의 크기차이가 증가하며 전자와 양이온 전류의 차가 더욱 증가하게 된다. 이를 보상하여 평균전류가 '0'이 되기 위해서는 셀프바이어스 전압은 더욱더 큰 음의 값을 갖게 된다.¹⁵⁾

본 연구에서는 RF의 전력이 식각 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 공정변수에 따른 경향성 실험에서 최대 식각률을 보인 압력: 150 mTorr, C₂F₆ 유량; 7.5 sccm, O₂ 가스 첨가량; 20%으로 고정하고 120분간 공정을 수행하였다. 이때 RF 전력은 각각 150, 180, 210, 240, 270 W로 변화시켰다. 본 실험에서도 Fig. 8에 나타난 바와 같이 RF 전력이 증가할수록 식각률이 단조 증가함을 보였다. 그러나 RF 전력이 증가함에 따라 마스크 가장자리의 침식(erosion)이 진행되었고 표면이 더 거칠어졌음을 Fig. 9에서 알 수 있었다.

Er이 첨가된 sodium borosilicate 코이층의 RIE에 의한 최적 식각 공정조건은 각 변수에서 최대 식각률을 보인 조건으로 각각 선택되었다. 압력 150 mTorr, C₂F₆의 가스 유량 7.5 sccm, O₂ 첨가량 20%, RF 전력 270 W의 최적 조건에서 식각률 180 Å/min을 얻었다. Sodium borosilicate 코이층의 조성 중에는 증기압이 낮은 Na와 Er 등의 알칼리와 희토류 원소가 포함되어 있다. 최적 조건에서도 낮은 식각률을 보이는 이유는 이러한 알칼리나 희토류 원소가 RIE의 식각 부산물로서 휘발하지 못하고 재증착되어짐으로써, 탄소와 불소로 형성된 폴리머와 함께 식각률을 감소시킨 것으로 사료된다. 또한 가스와 압력의 변화에 따른 식각률의 변화가 미미하고, RF 전력의 증가에 따라 급격히 식각률이 증가하는 것은 실제 식각 반응이 라디칼 등에 의한 화학반응보다는 이온충돌에 의한 물리적 스퍼터링에 의해 주로 일어나기 때문이라고

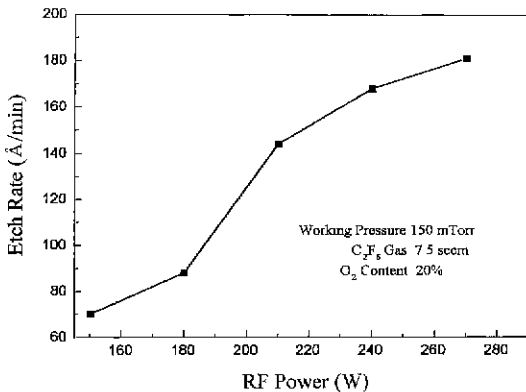


Fig. 8. Etch rate change as a function of RF power at 150 mTorr, C₂F₆ 7.5 sccm, O₂ 20%.

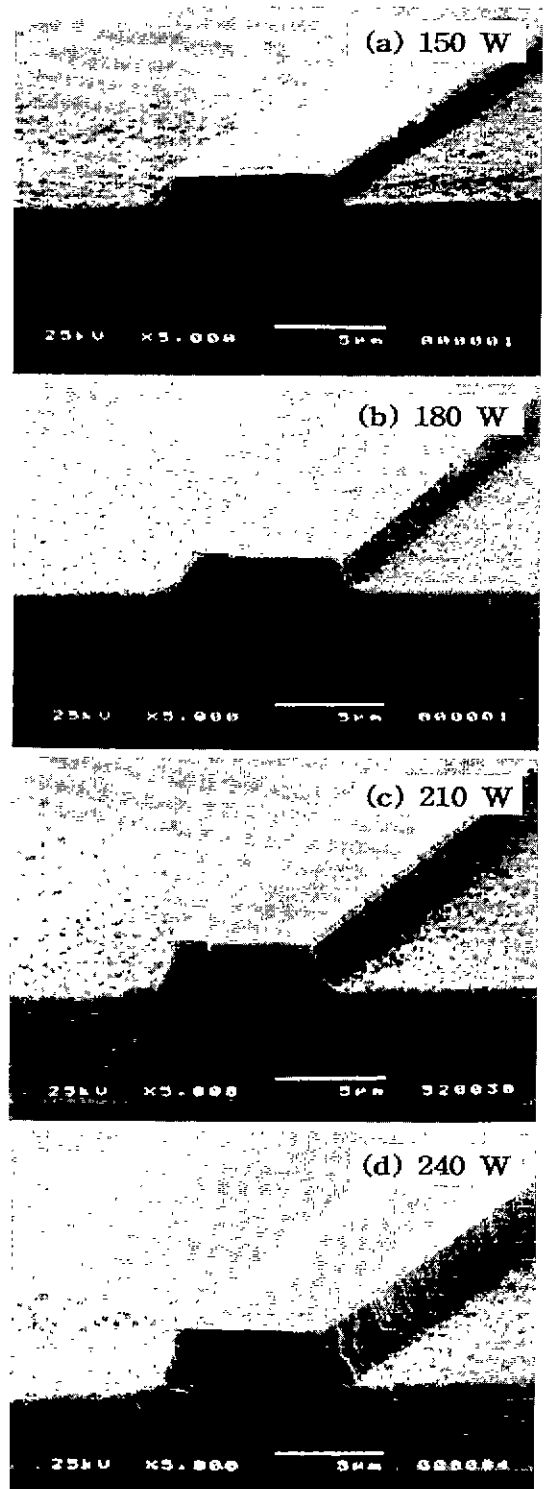


Fig. 9. SEM micrographs showing etched profiles as a function of RF power at 150 mTorr, C₂F₆ 7.5 sccm, O₂ 20% : (a) 150 W, (b) 180 W, (c) 210 W and (d) 240 W

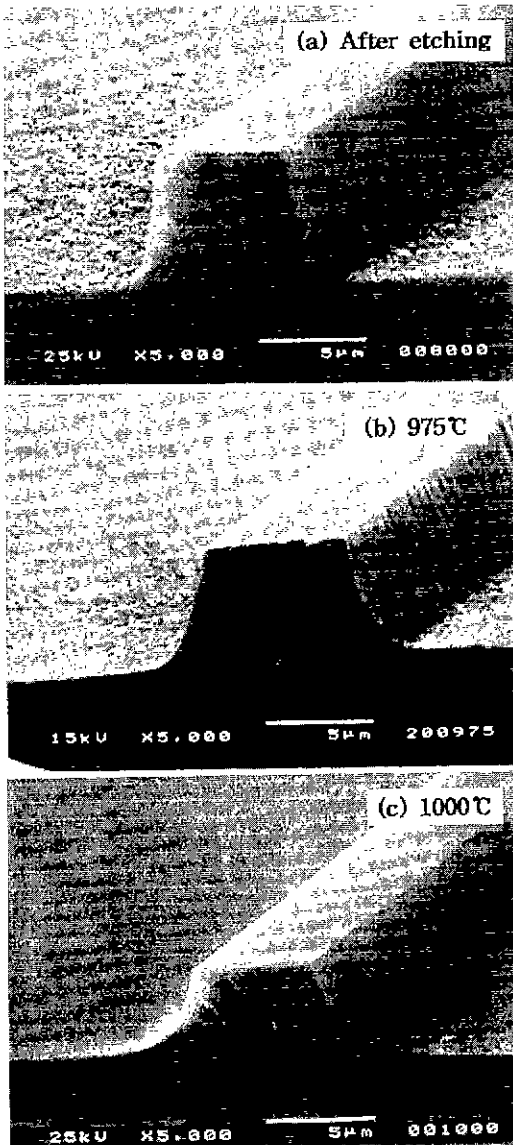


Fig. 10. SEM micrographs showing profile change with temperature of heat treatment : (a) after etching, (b) 975°C and (c) 1000°C.

생각된다. 이온 충돌에 의한 물리적 반응은 피식각물의 표면을 거칠게 한다. Fig. 10(a)는 최적 공정조건에서 식각된 도파로이며, 도파로 측벽 표면이 거칠어졌음을 알 수 있다. 이것은 식각이 장시간 이온충돌에 의해 진행되면서 마스크 가장자리의 침식으로 인해 기인된 것으로 추측된다. 이러한 측벽 표면의 거칠기는 광이 도파로를 따라 진행되어질 때 산란에 의한 광손실을 일으킨다. 따라서 열처리 과정을 통하여 도파로 측벽의 표면 거칠기를 개선하고자 하였다. Fig. 10(b), (c)는 전기로에서

975, 1000°C로 각각 30분 동안 열처리한 후 관찰된 도파로의 단면 사진이다. 식각된 도파로의 열처리 과정에서 975°C일 때 측벽의 표면이 미려해짐을 알 수 있었고, 1000°C 이상에서는 도파로 측벽의 표면 거칠기는 현저히 개선은 되었으나, 도파로 형태가 무너져버림이 관찰되었다. 이러한 현상은 식각 후 상부층(upper clad)의 적정 열처리 온도가 1000°C 미만에서 이루어져야 함을 예측할 수 있게 해준다.

4. 결 론

본 연구에서는 AFD 법에 의해 Er이 첨가된 sodium borosilicate 유리박막의 광도파로 제작을 위해 RIE를 이용한 식각특성을 알아보았다. 식각공정에서의 각 변수들과 식각 후 열처리 온도에 따른 결과를 다음과 같이 얻었다.

1. 공정압력이 증가함에 따라 식각률은 감소하였고, 150 mTon에서 가장 높은 식각률을 보였다. O₂를 첨가했을 때가 첨가하지 않았을 때보다 높은 식각률을 보였다.
2. C₂F₆의 가스유량이 증가함에 따라 식각률은 임계점(7.5 sccm)까지는 증가한 후, 그 이 상에서는 감소하였다.
3. O₂의 첨가량이 증가함에 따라 식각률이 증가함을 보였으나, 임계점(20%) 이상에서는 감소하였다.
4. RF 전력은 본 식각공정에서 가장 큰 변수로 작용하였으며, 전력이 증가할수록 식각률이 증가하였다.
5. 식각으로 인해 거칠어진 표면과 도파로 측벽의 거칠기는 975°C에서 30분 동안 열처리 함으로써 개선되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(97-0300-03-01-3)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCE

1. M. Kawachi, "Silica Waveguide on Silicon and Their Application to Integrated Optic Components," *Opt. Q. Elec.*, **22**, 391-416 (1990)
2. T. Valette and J.P. Jadot, "Si-based Integrated Optics Technologies," *Solid State Tech.*, Feb, 69-75 (1989).
3. N. A. Sanford, K. J. Malone and D. R. Larson, "Integrated-Optic Laser Fabricated by Field-Assisted Ion Exchange in Neodymium-Doped Soda-Lime-Silicate Glass," *Opt. Lett.*, **15**, 366-368 (1990).
4. P. W. Leech and M. C. Ridgway, "Waveguides Fabricated in Fused Silica by Germanium Ion Implantation at Vary-ing Doses," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **392**, 255-260 (1995).

5. N. Imoto, N. Shimizu, H. Mori and M. Ikeda, "Sputtered Silica Waveguides with an Embedded Three-dimensional Structure" *J. Light. Tech.*, **LT-1**(1), 289-294 (1993).
6. R. R. A. Syms and A. S. Holmes, "Reflow and Burial of Channel Waveguides Formed in Sol-Gel Glass on Si Substrates," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, **3**(9), Sept., 1077-1079 (1993).
7. E. M Rabinovich, A. J. Bruce, N. A Kopylov and P. L. Trevor, "Multicomponent Glasses from Particulate Gels," *J. Non-Cryst. Solids*, **160**, 126-143 (1993).
8. J. V. Gates, A. J. Bruce, J. Shmulovich, Y. H. Wong, G. Nykolak, M. R. X. Barros and R. Ghosh, "Fabrication of Er-Doped Glass Films as used in Planar Optical Waveguides," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **392**, 209-216 (1995).
9. B. Chapman, Glow Discharge Process, pp. 322-325, John Wiley & Sons, New York, 1980.
10. 장홍영, 반도체 공정플라즈마, 물리학과 첨단기술, **7**(9), 17-26 (1998).
11. J. Asmussen, T. A Grotjohn, P. U. Mak and M. A. Perrin, "The Design and Application Electron Cyclotron Resonance Discharges," *IEEE Trans. Plas. Sci.*, **25**(6), 1196-1221 (1997).
12. B. Chapman, Glow Discharge Processes, pp. 307-321, John Wiley & Sons, New York, 1980.
13. D. M. Manos and D. L. Flamm, Plasma Etching An Introduction, pp. 131-138, Academic Press, New York, 1989.
14. 권광호, 박형호, 이수민, 강성준, 권오준, 김보우, 성영권, "CHF₃/C₂F₆ 플라즈마에 의한 실리콘 표면 잔류막의 특성," *한국진공학회지*, **1**(1), 145-152, (1992).
15. 황기용, 김성철, 서용운, "CF₄ 플라즈마를 이용한 전식 식각에 관한 연구," *전기학회논문지*, **36**(11), 22-27 (1987).