

고밀도 C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 광학적 및 전기적 특성

권혁규* · 유상현* · 김준현** · 김창구*,†

*아주대학교 화학공학과, 에너지시스템학과
16499 경기도 수원시 영통구 월드컵로 206

**성균관대학교 화학공학과

16419 경기도 수원시 장안구 서부로 2066

(2021년 1월 25일 접수, 2021년 2월 2일 수정본 접수, 2021년 2월 6일 채택)

Optical and Electrical Characteristics of Fluorocarbon Films Deposited in a High-Density C_4F_8 Plasma

Hyeokkyu Kwon*, Sanghyun You*, Jun-Hyun Kim** and Chang-Koo Kim*,†

*Department of Chemical Engineering and Department of Energy Systems Research, Ajou University,
Worldcup-ro 206, Yeongtong-gu, Suwon, 16499, Korea

**School of Chemical Engineering, SungKyunKwan University, Seobu-ro 2066, Jangan-gu, Suwon, 16419, Korea
(Received 25 January 2021; Received in revised form 2 February 2021; Accepted 6 February 2021)

요 약

고밀도 C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 광학적 및 전기적 특성을 소스파워와 압력을 변화하며 분석하였다. 고밀도 C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 F/C 비율은 2단계 증착 메커니즘의 작용으로 소스파워가 증가할수록 증가하였고 압력이 증가할수록 감소하였다. 고밀도 C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 F/C 비율 변화는 불화탄소막의 광학적 및 전기적 특성 변화에 직접적으로 영향을 끼쳤다. 즉, 불화탄소막의 굴절률은 F/C 비율 변화 양상과는 달리 소스파워가 증가할수록 감소하였고 압력이 증가할수록 증가하였는데 이는 F/C 비율이 증가할수록 전자분극작용이 억제되고 불화탄소막의 망상조직이 약화되어 굴절률이 감소하기 때문이었다. 불화탄소막의 비저항은 F/C 비율 변화와 같이 소스파워가 증가할수록 증가하였고 압력이 증가할수록 감소하였는데 이는 F/C 비율이 증가할수록 주변 전자들을 반발하려는 경향이 강해져서 비저항이 증가하기 때문이었다. 고밀도 C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 F/C 비율 조절로 불화탄소막의 광학적 및 전기적 특성을 직접적으로 변화할 수 있으므로 불화탄소막이 반도체소자제조공정에서 저 유전상수 물질 대체용으로 가능할 수 있음이 예상된다.

Abstract – Optical and electrical characteristics of the fluorocarbon films deposited in a high-density C_4F_8 plasma under various source powers and pressures were investigated. The F/C ratio of the fluorocarbon film deposited in a high-density C_4F_8 plasma increased with increasing source power and decreasing pressure due to two-step deposition mechanism. The change in the F/C ratio of the film directly affected the optical and electrical characteristics of the fluorocarbon films deposited in a high-density C_4F_8 plasma. The refractive index of the fluorocarbon film increased with decreasing source power and increasing pressure contrary to the dependence of the film's F/C ratio on the source power and pressure. This was because the increase in the F/C ratio suppressed electronic polarization and weakened the network structures of the film. The resistivity of the fluorocarbon film showed the same behavior as its F/C ratio. In other words, the resistivity increased with increasing source power and decreasing pressure, resulting from stronger repulsion of electrons at higher F/C ratios. This work offers the feasibility of the use of the fluorocarbon films deposited in a high-density C_4F_8 plasma as an alternative to low dielectric constant materials because the optical and electrical properties of the fluorocarbon film can be directly controlled by its F/C ratio.

Key words: Fluorocarbon film, High-density plasma, F/C ratio, Refractive index, Resistivity

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: changkoo@ajou.ac.kr

‡This article is dedicated to Prof. In Seok Kang on the occasion of his retirement from Pohang University of Science and Technology.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

C_4F_8 , C_4F_6 , CF_4 등과 같은 불화탄소 플라즈마(fluorocarbon plasma)는 반도체소자제조공정에서 SiO_2 나 Si_3N_4 박막을 식각(etching)할 때 주로 사용된다[1-4]. 또한 불화탄소 플라즈마의 화학적 식각 특성 때문에 불화탄소 플라즈마는 클리닝(cleaning)에도 이용된다[5].

불화탄소 플라즈마에 노출된 기판의 표면 위에는 불화탄소막(fluorocarbon film)이 형성되는데 이러한 불화탄소막은 주로 패턴이 있는 박막 식각 시 패턴 벽면의 보호막으로 이용된다. 최근 들어서는 불화탄소막의 독특한 특성 때문에 보호막 이외에 다른 목적으로도 불화탄소막에 대한 연구가 진행되고 있다. 예를 들어 불화탄소막은 소수성이 매우 높아서 수분 차단막으로 사용될 수 있다. 또한 불화탄소막은 유전상수(dielectric constant, k)가 낮으면서도 열적 안정성이 우수하고 기계적 강도가 강하며 인접한 층들과의 응착력이 높아서, 불화탄소막은 저 유전상수(low- k) 물질로도 연구가 활발히 진행되고 있다[6-8].

불화탄소 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 특성은 불화탄소막의 불소(F) 대 탄소(C) 비율 즉 F/C 비율에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. Agraham 등은 C_2HF_5/Ar 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 유전상수는 증착온도가 증가할수록 그리고 압력이 감소할수록 증가한다고 보고하였는데 이는 증착온도가 증가할수록 그리고 압력이 감소할수록 불화탄소막의 F/C 비율이 감소하기 때문이라고 주장하였다[9]. Valentini 등은 RF (radio frequency) 플라즈마와 RF-MW (radio frequency-microwave) 플라즈마를 사용하여 $CF_4/CH_4/Ar$ 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 특성을 조사하였다[10]. RF 플라즈마에서 증착된 불화탄소막이 RF-MW 플라즈마에서 증착된 불화탄소막보다 유전상수가 낮았으며, 이는 RF 플라즈마에서의 증착속도가 RF-MW 플라즈마에서의 경우보다 빨라 각 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 F/C 비율 차이가 생겼기 때문이라고 설명하였다. Jacobsohn 등은 C_2H_2/CF_4 를 이용하여 PECVD

(plasma enhanced chemical vapor deposition) 방법으로 증착된 불화탄소막의 구조적 형태와 기계적 특성을 조사하였는데 불화탄소막 내의 불소가 증가할수록 소수성이 증가하지만 내부 응력과 기계적 강도는 감소한다고 보고하였다[11].

이처럼 불화탄소 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 유전상수, 기계적 강도, 소수성에 대한 F/C 비율의 영향은 보고되었지만, 불화탄소막의 광학적 특성이나 전기적 특성에 대한 F/C 비율의 의존성은 거의 보고되지 않았다. 불화탄소막이 저 유전상수 물질로 관심을 받고 있는데 불화탄소막이 반도체제조공정에서 기존의 저 유전상수 물질을 대체하려면 불화탄소막의 광학적 특성이나 전기적 특성이 잘 조절되어야 한다. 그러므로 불화탄소 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 광학적 및 전기적 특성이 공정 조건에 따라서 어떻게 변화하는지에 대한 연구가 필요하다.

이 연구에서는 고밀도 C_4F_8 플라즈마에서 불화탄소막이 증착될 때 소스파워(source power)와 압력 변화에 따른 불화탄소막의 광학적 및 전기적 특성을 관찰하였다. 불화탄소막의 광학적 및 전기적 특성은 각각 불화탄소막의 굴절률(refractive index)과 비저항(resistivity)의 변화로 나타내었다. 이러한 불화탄소막의 광학적 및 전기적 특성은 불화탄소막의 F/C 비율 변화로 설명하였다.

2. 실험

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 고밀도 플라즈마를 발생할 수 있는 유도결합 플라즈마(inductively coupled plasma, ICP) 시스템의 개략도이다. 플라즈마는 나선형의 유도코일(induction coil)을 통해 주파수가 13.56 MHz인 rf (radio frequency) 파워를 공급함으로써 발생되었다. 유도코일은 외경이 1/4 inch인 구리 튜브였고 유도코일 안쪽에 배치된 절연창(dielectric window)은 두께가 20 mm인 퀴츠(quartz)로 제작되었다. 시료(sample)는 스테인레스 스틸(stainless-steel) 재질의 전극(cathode electrode)에 부착되었고, 이 전극에는 소스파워와는 독립적으로 바이어스 파워(bias power)가 인가될 수

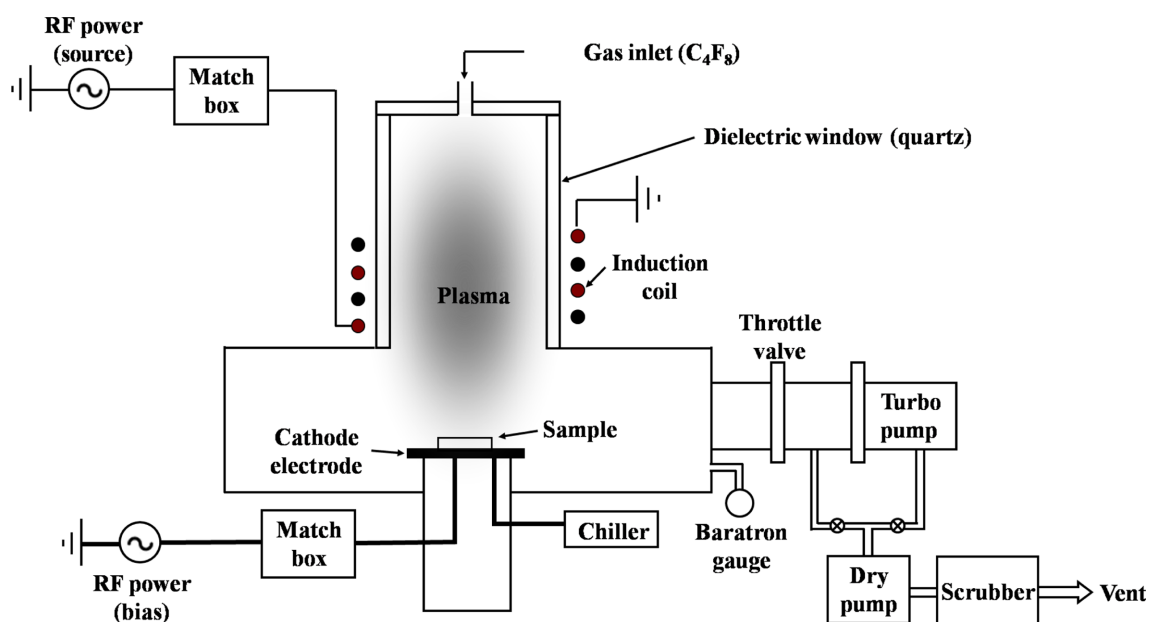


Fig. 1. Schematic of the inductively coupled plasma system for the deposition of fluorocarbon films.

있도록 하였다.

반응기의 내부 직경은 200 mm이고 전극의 지름은 120 mm이었다. 방전가스(discharge gas)는 반응기 상부에서 유입되었고 가스의 유속은 유속조절기(mass flow controller, model 427, MKS)로 조절되었다. 반응기 내의 압력은 바라트론 게이지(Baratron gage, model 627B, MKS)로 측정되었으며, 스로틀밸브(throttle valve, model 653B, MKS)로 조절되었다. 전극 온도는 항온순환수조장치(model RW-3025G, 제이오테크)를 이용하여 일정하게 유지되었다. 펌프에서 배출된 가스는 가스세정기(scrubber)에서 희석된 후 송풍기를 통해 대기로 배출되었다.

실험에 사용된 시료는 p-type silicon (100) 웨이퍼를 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 의 정사각형으로 절단한 기판(substrate)이었다. 이 시료에 은반죽(silver paste)을 바른 후 전극 위에 고정시켰다.

Silicon 시료 위에 불화탄소막을 증착하기 위하여 ICP 반응기 상부에 C_4F_8 를 유입하여 플라즈마를 방전하였다. 소스파워와 압력에 따른 불화탄소막의 광학적 및 전기적 특성을 살펴보기 위하여 소스파워는 100에서 400 W까지, 그리고 압력은 10에서 40 mTorr까지 변화시켰다. 모든 조건에서 C_4F_8 의 유속은 20 sccm이었고 바이어스 전압(bias voltage)은 0 Volt였다. 또한, 전극온도는 5°C 로 일정하게 유지되었다. 박막의 증착시간은 모든 조건에서 박막의 두께가 1000 Å이 되도록 조절하였다.

Silicon 시료 위에 증착된 불화탄소막의 두께와 굴절률은 thickness-meter (K-MAX, Spectra-thick 2000 Deluxe)로 측정하였다. 불화탄

소막의 조성은 XPS (X-ray photoelectron spectroscopy)를 이용하여 분석하였다. C_4F_8 플라즈마에서 발생하는 라디칼(radical)의 상대적인 농도는 OES (optical emission spectroscopy)로 관찰하였다. 불화탄소막의 비저항은 impedance analyzer (HP, 4194A)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

공정조건에 따라 C_4F_8 고밀도 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 조성을 파악하기 위하여 소스파워(100 ~ 400 W)와 압력(10 ~ 40 mTorr)을 변화하며 XPS 분석을 실시하였다. Fig. 2는 대표적으로 저파워/저압(100 W/10 mTorr), 고파워/저압(400 W/10 mTorr), 저파워/고압(100 W/40 mTorr), 고파워/고압(400 W/40 mTorr)에서 증착된 불화탄소막의 carbon 1s XPS 스펙트럼이다. Fig. 2에서 Gaussian 함수를 이용한 각 peak의 분리는 얇은 선으로 표시되었다. C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 XPS 스펙트럼에서 모두 C-CF_x (288.0 eV), CF (290.3 eV), CF₂ (292.4 eV), CF₃ (294.5 eV)의 peak가 보이는데 각 peak의 세기는 불화탄소막 증착 조건에 따라 달랐다. 고파워/저압에서 증착된 불화탄소막의 XPS 스펙트럼에서는 CF₂ peak의 세기가 가장 강했다. CF₂ peak의 세기는 소스파워가 작아지거나 압력이 높아지면 약해졌고, 저파워/고압에서는 C-CF_x, CF, CF₂, CF₃ peak의 세기가 비슷한 수준이 되었다.

이를 명확히 분석하기 위하여 XPS 스펙트럼에서 분리된 peak의

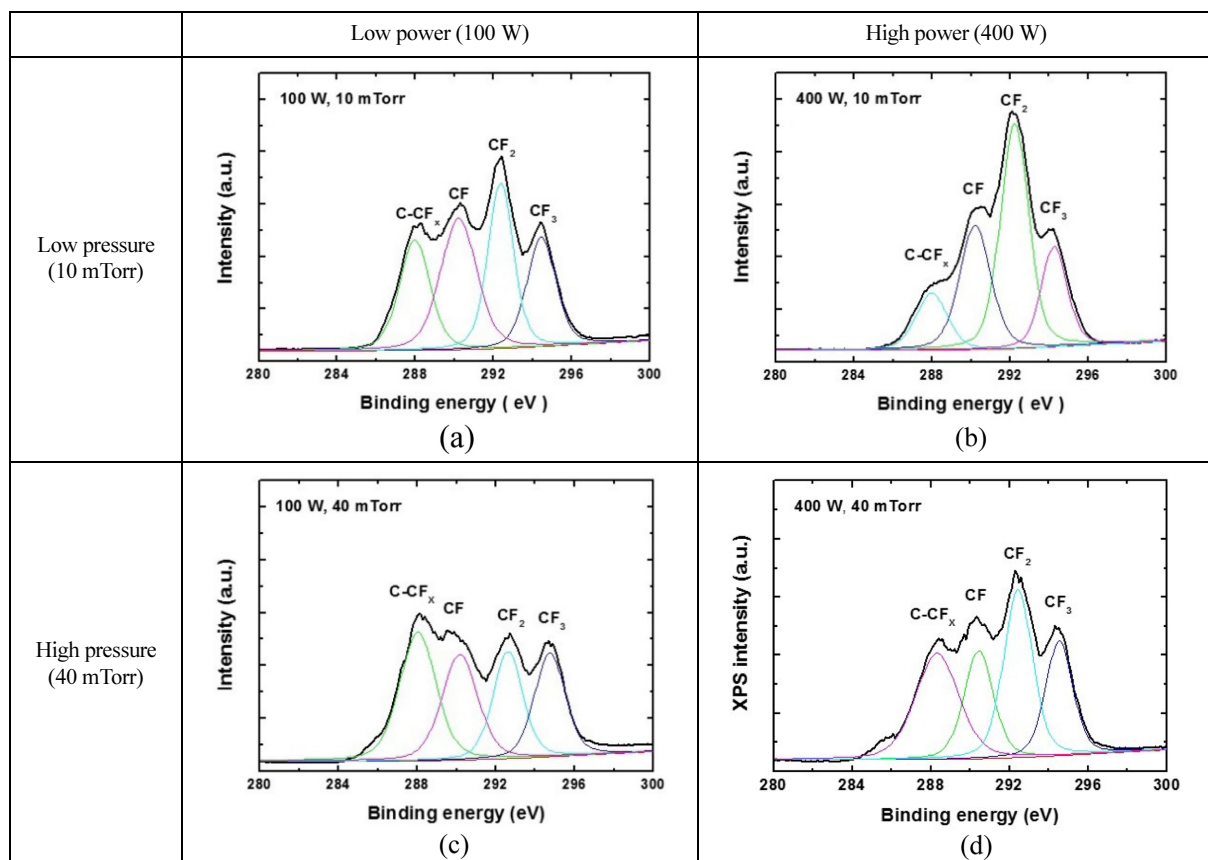


Fig. 2. Carbon 1s XPS spectra of the fluorocarbon films deposited in high-density C_4F_8 plasmas at (a) low power (100 W)/low pressure (10 mTorr), (b) high power (400 W)/low pressure (10 mTorr), (c) low power (100 W)/high pressure (40 mTorr), and (d) high power (400 W)/high pressure (40 mTorr). The deconvolution of the spectra was represented as thin lines.

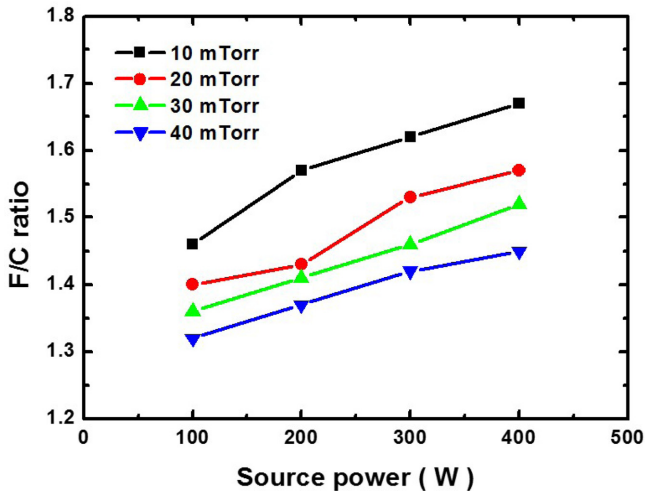


Fig. 3. F/C ratio of the fluorocarbon films deposited in high-density C₄F₈ plasmas as functions of source power and pressure.

면적으로 불화탄소막의 F/C 비율을 구했다. F/C 비율은 식 (1)을 이용하여 계산하였다[12].

$$F/C = \frac{\text{Area}(CF) + 2 \times \text{Area}(CF_2) + 3 \times \text{Area}(CF_3)}{\text{Area}(C-CF_x) + \text{Area}(CF) + \text{Area}(CF_2) + \text{Area}(CF_3)}$$

여기서 Area(C-CF_x), Area(CF), Area(CF₂), Area(CF₃)는 각각 C-CF_x, CF, CF₂, CF₃ peak의 면적이다. Fig. 3은 압력과 소스파워를 변화하며 고밀도 C₄F₈ 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 F/C 비율을 나타낸다. C₄F₈ 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 F/C 비율은 소스파워가 증가할수록 증가하였고 압력이 증가할수록 감소하여 본 연구의 소스파워와 압력조건에서 F/C 비율은 1.32 ~ 1.67 범위에 있었다.

C₄F₈ 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 F/C 비율에 대한 소스파워와 압력에 대한 영향을 파악하기 위하여 소스파워(100 ~ 400 W)와 압력(10 ~ 40 mTorr)을 변화하며 C₄F₈ 플라즈마에서 발생하는 라디칼(radical)의 상대적인 농도를 OES로 측정하였다. 여러 공정 조건 중에서 대표적으로 고파워/저압(400 W/10 mTorr)과 저파워/고압(100 W/40 mTorr)에서 발생된 고밀도 C₄F₈ 플라즈마의 OES 스펙트럼을 Fig. 4에 나타내었다. 고파워/저압에서는 C₂, C₃와 같이

분해가 매우 여러 번 이루어진 형태의 생성물이 가장 많았다. 이는 소스파워가 증가할수록 플라즈마 밀도가 높고 압력이 낮을수록 전자온도가 높아 고파워/저압에서는 전자충돌에 의한 C₄F₈의 분해가 활발히 일어났기 때문이다. 반면에 저파워/고압에서는 C₄F₈의 분해가 활발하지 않아 1차분해 혹은 2차분해에 의하여 생성되는 CF₂가 가장 많았다. 또한 C₄F₈가 활발히 분해되는 고파워/저압에서의 F 라디칼은 저파워/고압에서의 F 라디칼보다 상대적으로 많았다.

OES 스펙트럼과 이 OES를 측정된 조건에서 증착된 불화탄소막의 XPS 스펙트럼을 비교해 보면 흥미로운 점을 관찰할 수 있다. 고파워/저압(400 W/10 mTorr)에서 증착된 불화탄소막은 CF₂ peak 세기가 가장 강했던 반면(Fig. 2(b))이 조건에서 발생된 플라즈마는 CF₂ 보다 분해가 많이 이루어진 C₂나 C₃가 제일 많았다(Fig. 4(a)). 또한, 저파워/고압(100 W/40 mTorr)에서 증착된 불화탄소막은 CF₂ peak 세기가 다른 라디칼의 peak 세기와 비슷한 수준이었으나(Fig. 2(c))이 조건에서 발생된 플라즈마는 CF₂가 제일 많았다(Fig. 4(b)). 이는 Labelle 등이 제안한 2단계 증착 메커니즘(two-step deposition mechanism)에서 기인한다고 할 수 있다. 그들은 불화탄소막이 증착될 때 먼저 탄소가 풍부한 불화탄소막이 증착되고 이후 이 불화탄소막이 F 라디칼로 불화(fluorinated)된다고 하였다[13]. 고파워/저압에서는 저파워/고압에서 보다 F 라디칼이 상대적으로 더 많아서 불화탄소막의 불화가 더 많이 일어났고 이로 인하여 고파워/저압에서 증착된 불화탄소막 저파워/고압에서 증착된 불화탄소막 보다 F/C 비율이 높았다. 아울러 이 2단계 증착 메커니즘에 의하여 Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼 불화탄소막의 F/C 비율은 소스파워가 증가할수록 그리고 압력이 감소할수록 증가하였다고 할 수 있다.

C₄F₈ 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 광학적 특성을 알아보기 위하여 불화탄소막의 굴절률을 측정하였다. Fig. 5에 고밀도 C₄F₈ 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 굴절률을 소스파워와 압력에 따라 도시하였다. 불화탄소막의 굴절률은 소스파워가 증가할수록 감소하였고, 반면에 압력이 증가할수록 증가하였다. 이러한 결과는 불화탄소막의 F/C 비율 변화로부터 비롯된 것으로 판단된다. 불화탄소막의 F/C 비율이 높을수록 F 함량이 증가하여 불화탄소막 내의 C-C 결합은 감소하고 C-F 결합이 증가한다. F와 C의 전자분극상수는 각각 0.557과 1.76으로 불화탄소막 내에 전자분극상

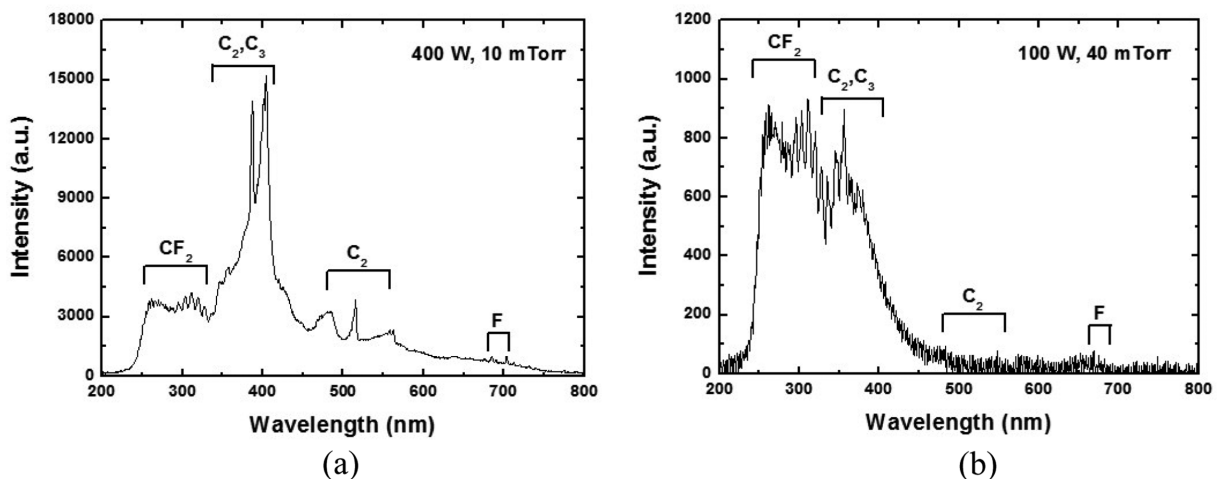


Fig. 4. Optical emission spectra of high-density C₄F₈ plasmas at (a) high power (400 W)/low pressure (10 mTorr) and (b) low power (100 W)/high pressure (40 mTorr).

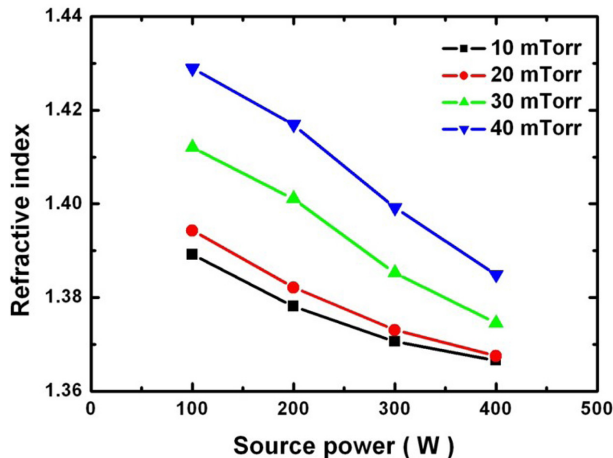


Fig. 5. Refractive index of the fluorocarbon films deposited in high-density C_4F_8 plasmas as functions of source power and pressure.

수가 작은 F의 성분비가 증가할수록 전자분극작용이 억제되기 때문에 불화탄소막의 굴절률이 감소한다[14]. 또한 F는 불화탄소막의 가교결합(crosslinking)을 종결하여 불화탄소막의 망상조직(network structure)을 약하게 만들고 이로 인하여 불화탄소막의 굴절률이 감소한다. 앞서 보았듯이 C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 F/C 비율은 소스파워가 증가할수록 그리고 압력이 감소할수록 증가하였기 때문에 이 불화탄소막의 굴절률은 소스파워가 증가할수록 그리고 압력이 감소할수록 감소하였다.

고밀도 C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 전기적 특성은 불화탄소막의 비저항을 측정하여 알아보았다. Fig. 6은 소스파워와 압력에 따른 불화탄소막의 비저항이다. 본 연구에서 적용되는 공정 조건하에서 C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 고유저항은 0.22에서 0.63 $\Omega\cdot m$ 까지 변화하였다. 또한 불화탄소막의 비저항은 소스파워가 증가할수록 그리고 압력이 감소할수록 증가하였다. 이와 같이 고밀도 C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 비저항이 소스파워와 압력에 따라 변화하는 양상은 Fig. 3에서 보았던 고밀도 C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 소스파워와 압력변화에 따른 F/C 비율의 의존도와 일치한다.

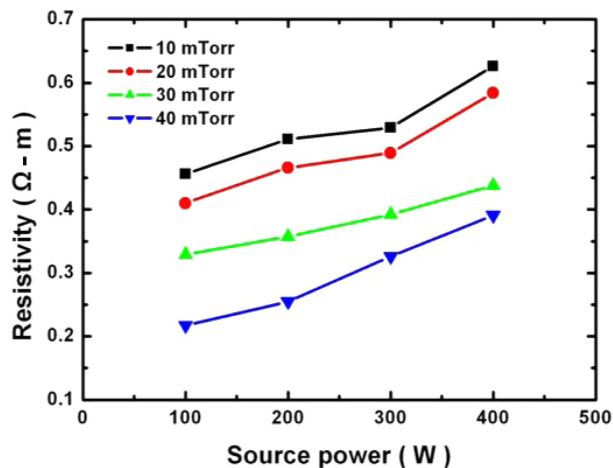


Fig. 6. Resistivity of the fluorocarbon films deposited in high-density C_4F_8 plasmas as functions of source power and pressure.

불화탄소막의 F/C 비율이 증가할수록 C-C 결합은 감소하고 C-F 결합은 증가하는데 이때 F와 C의 전기음성도(electronegativity)는 각각 4.0과 2.5로 F의 전기음성도가 더 크다[36]. 따라서 불화탄소막 내에 전기음성도가 큰 F의 성분비가 증가할수록 즉, F/C 비율이 증가할수록 주변 전자들을 반발하려는 경향이 강해져서 불화탄소막의 비저항은 증가한다[15]. 이처럼 C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 F/C 비율은 불화탄소막의 전기적 특성과도 밀접한 연관이 있다.

4. 결 론

고밀도 C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 특성을 파악하기 위하여 소스파워와 압력에 따라 불화탄소막의 광학적 및 전기적 성질을 분석하였다. 고밀도 C_4F_8 플라즈마의 OES 측정 결과 고파워/저압(400 W/10 mTorr)에서는 C_2 , C_3 와 같이 분해가 매우 여러 번 이루어진 형태의 생성물이 가장 많았던 반면에 저파워/고압(100 W/40 mTorr)에서는 1차분해 혹은 2차분해에 의하여 생성되는 CF_2 가 가장 많았다. 이는 소스파워가 증가할수록 플라즈마 밀도가 높고 압력이 낮을수록 전자온도가 높아 고파워/저압에서는 전자충돌에 의한 C_4F_8 의 분해가 활발히 일어났기 때문이었다. 이로 인하여 C_4F_8 가 활발히 분해되는 고파워/저압에서의 F 라디칼은 저파워/고압에 비해 상대적으로 많았다.

OES 결과와는 대조적으로 고밀도 C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 XPS 스펙트럼은 고파워/저압에서 CF_2 의 peak 세기가 가장 강했고 소스파워가 작아지거나 압력이 높아질수록 CF_2 의 peak 세기가 약해져서 저파워/고압에서는 CF_2 의 peak 세기가 다른 peak의 세기와 비슷하였다. 이는 불화탄소막이 2단계 증착 메커니즘에 의해 증착되었기 때문이었으며 이로 인해 고밀도 C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 F/C 비율은 소스파워가 증가할수록 증가하였고 압력이 증가할수록 감소하였다.

고밀도 C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 F/C 비율은 불화탄소막의 광학적 및 전기적 성질에도 영향을 끼쳤다. 불화탄소막의 굴절률은 소스파워가 증가할수록 감소하였고 압력이 증가할수록 증가하였다. 이는 소스파워가 증가할수록 그리고 압력이 감소할수록 F/C 비율이 증가, 즉 F 함량이 증가하여 전자분극작용이 억제되고 불화탄소막의 망상조직이 약화되어 굴절률이 감소하기 때문이었다. 한편, 불화탄소막의 비저항은 소스파워가 증가할수록 증가하였고 압력이 증가할수록 감소하여 소스파워와 압력에 따른 불화탄소막의 F/C 비율 의존도와 일치하였다. 이는 불화탄소막 내에 전기음성도가 큰 F의 성분비가 증가할수록, 즉 F/C 비율이 증가할수록 주변 전자들을 반발하려는 경향이 강해져서 불화탄소막의 비저항이 증가하기 때문이었다.

이 연구를 통하여 고밀도 C_4F_8 플라즈마에서 증착된 불화탄소막의 F/C 비율을 조절함으로써 불화탄소막의 광학적 및 전기적 특성이 변화될 수 있음이 제시되었다.

감 사

이 연구는 한국연구재단의 중견연구지원사업(과제번호 2018R1A2B6002410)과 경기도의 경기도 지역협력연구센터사업(GRRC아주2016B03, 광-의료 융합기술 연구센터)의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

- Kim, J.-H. and Kim, C.-K., "Si₃N₄ Etch Rates at Various Ion-Incidence Angles in High-Density CF₄, CHF₃, and C₂F₆ Plasmas," *Korean J. Chem. Eng.*, **37**, 374-379(2021).
- Kim, J.-H., Cho, S.-W. and Kim, C.-K., "Angular Dependence of Si₃N₄ Etching in C₄F₆/CH₂F₂/O₂/Ar Plasmas," *Chem. Eng. Technol.*, **40**, 2251-2256(2017).
- Kim, J.-H., Cho, S.-W., Park, C. J., Chae, H. and Kim, C.-K., "Angular Dependences of SiO₂ Etch Rates at Different Bias Voltages in CF₄, C₂F₆, and C₄F₈ Plasmas," *Thin Solid Films*, **637**, 43-48(2017).
- Cho, S.-W., Kim, C.-K., Lee, J.-K., Moon, S. H. and Chae, H., "Angular Dependences of SiO₂ Etch Rates in C₄F₆/O₂/Ar and C₄F₆/CH₂F₂/O₂/Ar Plasmas," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **30**, 051301-1-051301-6(2012).
- Ullal, S. J., Singh, H., Daugherty, J., Vahedi, V. and Aydil, E. S., "Maintaining Reproducible Plasma Reactor Wall Conditions: SF₆ Plasma Cleaning of Films Deposited on Chamber Walls During Cl₂/O₂ Plasma Etching of Si," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **20**, 1195-1201 (2002).
- Yang, G. H., Oh, S. W., Kang, E. T. and Neoh, K. G., "Plasma Polymerization and Deposition of Linear, Cyclic and Aromatic Fluorocarbons on (100)-Oriented Single Crystal Silicon Substrates," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **20**, 1955-1963(2002).
- Han, L. M., Timmons, R. B. and Lee, W. W., "Pulsed Plasma Polymerization of an Aromatic Perfluorocarbon Monomer: Formation of Low Dielectric Constant, High Thermal Stability Films," *J. Vac. Sci. Technol. B*, **18**, 799-804(2000).
- Shirafuji, T., Nishimura, Y. and Tachibana, K., "Plasma Polymerization of Fluorocarbon Thin Films on High Temperature Substrate and Its Application to Low-k Film," *Thin Solid Films*, **515**, 4111-4115(2007).
- Agraharam, S., Hess, D. W., Kohl, P. A. and Allen, S. A. B., "Electrical Properties and Temperature-Humidity Studies of Fluorocarbon Films Deposited from Pentafluoroethane/Argon Plasmas," *J. Electrochem. Soc.*, **148**, F102-F107(2001).
- Valentini, L., Braca, E., Kenny, J. M., Lozzi, L. and Santucci, S., "Influence of Plasma Source Frequency on Composition and Density of Fluorinated Amorphous Carbon Thin Films," *Mater. Lett.*, **51**, 514-518(2001).
- Jacobsohn, L. G., Maia da Costa, M. E. H., Trava-Airoldi, V. J. and Freire Jr, F. L., "Hard Amorphous Carbon-Fluorine Films Deposited by PECVD Using C₂H₂-CF₄ Gas Mixtures as Precursor Atmospheres," *Diam. Relat. Mat.*, **12**, 2037-2041(2003).
- Standaert, T. E. F. M., Hedlund, C., Joseph, E. A., Oehrlein, G. S. and Dalton, T. J., "Role of Fluorocarbon Film Formation in the Etching of Silicon, Silicon Dioxide, Silicon Nitride, and Amorphous Hydrogenated Silicon Carbide," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **22**, 53-60(2004).
- Labelle, C. B., Donnelly, V. M., Bogart, G. R., Opila, R. L. and Kornblit, A., "Investigation of Fluorocarbon Plasma Deposition from c-C₄F₈ for Use as Passivation During Deep Silicon Etching," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **22**, 2500-2507(2004).
- Valentini, L., Braca, E., Kenny, J. M., Lozzi, L. and Santucci, S., "Fluorinated Amorphous Carbon Thin Films: Analysis of the Role of the Plasma Source Frequency on the Structural and Optical Properties," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **19**, 2168-2173(2001).
- Endo, K., Shinoda, K. and Tatsumi, T., "Plasma Deposition of Low-Dielectric-Constant Fluorinated Amorphous Carbon," *J. Appl. Phys.*, **86**, 2739-2745(1999).