



황산염용액으로부터 전기도금 된 FCCL용 Cu 필름의 특성에 미치는 Cu 이온농도 및 첨가제의 영향

신동율, 박덕용, 구본급*
 한밭대학교 신소재공학부

Effect of Cu^{2+} Concentration and Additives on Properties of Electrodeposited Cu Thin Films for FCCL from Sulfate Baths

Dong-Yul Shin, Doek-Yong Park, Bon-Keup Koo*

Division of Advanced Materials Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

(Received August 7, 2009 ; revised September 28, 2009 ; accepted October 30, 2009)

Abstract

Nanocrystalline Cu thin films were electrodeposited from sulfate baths and investigated systematically the influences of Cu^{2+} concentration and additives on current efficiency, residual stress, surface morphology, and XRD patterns of electrodeposited Cu film. Current efficiency was nearly 100% at from 0.2 M to 1.0 M Cu^{2+} concentration, but it was linearly increased with Cu^{2+} concentration at less than 0.2 M. The residual stress was observed in range of 7.9 to 18.4 MPa and tensile stress mode. Dendritic and powdered form was obtained at below 0.1 M. As increased with Cu^{2+} concentration in solution, the main peak in the XRD pattern shifted (111) and (220) from (200). In the other hand, all about 100% current efficiency observed in all additive concentration systems, and residual stress observed in range of 20.4 to 26.3 MPa tensile stress. The condition 5(Ultra make-up - 10 ml/l, Ultra A - 0.5ml/l, Ultra B - 0.5 ml/l) was good surface morphology, and fcc(111) peak in XRD patterns increased with increasing additive concentration.

Keywords: FCCL, Electrodeposited, Sulfate bath, Current efficiency, Residual stress, Surface morphology

1. 서 론

연성인쇄회로기판(FPCB: Flexible Printed Circuit Board)의 원재료로 사용되고 있는 연성동박적층필름(FCCL: Flexible Cu Clad Laminate)은 LCD, PDP, OLED 구동용 IC package film의 핵심소재로서, FCCL에 회로패턴을 형성한 후 액정 드라이브 IC를 패키징하여 LCD패널과 FPCB 회로 부품 상호간의 전기적인 신호를 연결해 주는 역할을 한다. FCCL은 유전체인 폴리이미드(PI: polyimide)층과 에폭시나 아크릴로 이루어진 접착제 층 및 회로가 형성되는 동박(copper thin film) 층의 세 부분으로 구성되어 있는 3층 FCCL과, PI 층과 동박 층이 접착

제 없이 구성되어 있는 2층 FCCL의 두 가지로 구분된다. 2층 FCCL은 주로 LCD, OLED에 적용되는 COF 용으로 사용되고, 3층 FCCL은 PDP에 적용되는 TAB이나 휴대폰에 주로 사용된다. 최근에는 2층 FCCL(casting 방식)도 휴대폰에 적용되고 있다. 2층 FCCL은 다시 스퍼터링 방식, 캐스팅 방식, 라미네이션 방식으로 구분할 수 있으며, LCD 패널에는 스퍼터링 방식이, 휴대폰이나 기타 제품에는 캐스팅방식이 적용되고 있다. LCD 패널 업체들은 가격 경쟁력 확보를 위해서 캐스팅방식의 FCCL을 적용하고자 많은 노력을 기울이고 있으나, fine pitch를 설계하기가 어렵고 수율이 안정적이지 못해 스퍼터링 방식의 FCCL을 적용하고 있으며, 이러한 추세는 당분간 변함이 없을 것으로 보인다. 왜냐하면 대형 LCD TV를 생산하기 위해서는 가격경쟁력

*Corresponding author. E-mail : koobk@hanbat.ac.kr

확보 차원에서 LDI(LCD drive IC)수를 줄여야 하고 이를 위해서는 회로선 폭을 25 μm 이하로 줄여야 하는 난제가 남아 있는데, 이에 적합한 방식이 바로 스퍼터링 방식의 FCCL이기 때문이다. 스퍼터링 방식의 FCCL 제조 방법은 유전체인 PI층 위에 스퍼터링법을 이용하여 seed layer를 형성하고, 그 위에 전기도금공정을 이용하여 Cu를 전착하게 된다. 이러한 FCCL은 Cu층의 두께를 2~30 μm 까지 자유롭게 조절할 수 있기 때문에, 넓은 적용범위 뿐만 아니라 미세회로의 구현이 가능하여 차기 연성(flexible) 디스플레이의 구동을 위한 소재로 적용이 크게 확대될 것으로 전망되고 있다¹⁾.

PI에 Cu 필름을 전착시키는 방법으로는 CVD(chemical vapor deposition), PVD(physical vapor deposition), 무전해도금, 전기도금 등의 방법이 있다. 이중 전기도금 공정은 낮은 전착온도, 두께 조절의 용이, 낮은 제조비용, 빠른 전착속도, 복잡한 형상의 물체에 전착 가능성 등의 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 장점을 바탕으로 전기도금공정은 최근에 IC chip, 자기기록매체, FCCL 등의 다양한 분야에 사용되고 있다.

본 연구에서는 차세대 flexible 소재에 다양하게 사용되고 있는 FCCL 제조에 사용되는 Cu 박막을 도금용액 중의 Cu^{2+} 농도, 첨가제 양을 달리하여 제조한 후 도금막의 잔류응력, 표면 형상, 미세구조 및 전기화학적 특성에 미치는 도금용액 중의 Cu^{2+} 농도 및 첨가제 양의 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

전기도금공정을 이용하여 FCCL 제조용 Cu 필름을 제조하기 위하여 본 실험에 사용된 Cu 전기도금용액의 조성 및 도금조건들을 표 1에 나타내었다. 본 실험에서 사용된 실험장치의 개략도는 이미 제출된 논문에 나타내어져 있다²⁾. 본 실험에 사용된 도금용액은 1급 시약을 사용하여 제조하였으며, 각각의 화공약품을 소수 셋째 자리까지 측량

Table 1. Composition of sulfate baths and experimental conditions

$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.1~1 M
H_2SO_4	0.7 M
HCl	0 or 0.1 m//l
Current density	20 $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$
pH	0.34
Temperature	Room temp.
Agitation	No stirring

Table 2. Conditions of additives in the sulfate baths

Additives	Conditions						
	1	2	3	4	5	6	7
Ultra m.u. (m//l)	2	4	6	8	10	15	20
Ultra A (m//l)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1
Ultra B (m//l)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1

하여 초순수(de-ionized water)에 용해하여 혼합시켰다. 도금용액 중 금속구리이온(Cu^{2+}) 공급원으로서 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 를 사용하였으며, supporting electrolyte로서 H_2SO_4 를 사용하였다. pH 조절을 위해 NaOH 또는 H_2SO_4 를 사용하였으며, 표면 형상 변화를 관찰하기 위하여 표 2와 같이 첨가제를 첨가하였다. 양극으로는 금속 Cu판이 사용되었다. 도금된 Cu의 잔류응력(residual stress)을 측정하기 위하여, 일정한 도금 표면적(7.74 cm^2)을 갖는 Copper test strip(PN 1194, Specialty Testing & Development Co.)을 음극으로 사용하였다²⁾. 이 Copper test strip은 도금된 Cu의 잔류응력을 측정하기 위하여 두 개의 다리로 구성되어 있으며, 각각 다리의 한쪽 면은 폴리머로 라미네이션 하지 않았고, 다른 한쪽 면은 도금되는 것을 방지하기 위하여 폴리머로 라미네이션을 하였다. 도금 전, 음극으로 사용된 Copper test strip을 ethyl alcohol로 3분 동안 탈지하였고, 산화 스케일을 제거하기 위하여 2분 동안 10 vol.% H_2SO_4 에서 산세 하였으며, 초순수를 이용하여 수세 하였다. 전기도금은 도금용액을 전기도금 과정 중에 교반하지 않았으며, 상온에서 실시하였다. 음극 전류 효율은 전기도금 실험 전과 후에 측정된 무게 차이로부터 계산되었다²⁾. 본 실험에 사용된 current source로는 EG&G PAR Potentiostat/Galvanostat Model 263A를 사용하였다.

도금용액 내 Cu^{2+} 농도 변화의 영향을 알아보기 위해, H_2SO_4 를 0.7 M, 도금용액 pH를 0.34, 전류밀도를 20 $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, 도금시간을 1000 sec의 조건으로 일정하게 유지한 상태에서, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 를 0.1~1 M로 변화시켜 도금을 실시하였다. 또한 도금용액 내 첨가제(ATOTECH, Ultra m.u., Ultra A 및 Ultra B) 농도 변화의 영향을 관찰하기 위하여, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 를 1 M, H_2SO_4 를 0.7 M, HCl 0.1 m//l, 도금용액 pH를 0.34, 전류밀도를 20 $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, 도금시간을 1000 sec의 조건으로 일정하게 유지한 채, 첨가제 양을 표 2와 같은 조건으로 변화시켜 도금을 실시하였다.

표 1 및 2의 조건들에 따라 얻어진 전기도금된 Cu 필름의 응력을 측정하였으며, 표면 형상을 관찰하기 위해 SEM(Model JSM-6300, JEOL Ltd.)을

사용하였다. 또한 전기도금 된 Cu 필름의 미세조직을 분석하기 위하여 XRD(Model D/MAX 2500H, RIKAKU)를 사용하였다. XRD 분석 조건은 0.03°/sec, 30~100°의 2θ 범위에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 도금용액 내 Cu²⁺ 농도 변화의 영향

Cu 필름의 전기도금 시, 도금용액 내의 Cu²⁺ 농도 변화에 따른 전기도금 특성 변화를 관찰하기 위해 Cu의 이온 농도를 0.1 M로부터 1 M까지 변화를 주었다. 도금용액 내 Cu²⁺ 농도 이외, 다른 조건의 경우 H₂SO₄ 농도는 0.7 M, 전류밀도는 20 mA · cm⁻², pH는 0.34, 상온, 무교반, 도금시간은 1000 sec(도금 두께 : 약 7.5 μm)로 일정하게 하였다.

Sulfate 도금용액으로부터의 Cu 필름을 전기도금할 때, 도금용액 중의 Cu²⁺ 농도 변화에 따른 Cu 필름의 전류효율 변화를 그림 1에 나타내었다. 0.1 M Cu²⁺ 농도의 경우, 전류효율은 약 43%로 측정되었으며, 0.2 M 이상의 경우 거의 100%의 전류효율을 나타내었다. 이러한 결과는 0.2 M 이상의 농도의 경우, Cu²⁺ 농도의 증가로 인한 도금용액의 전도도가 증가가 전류효율에 미치는 영향이 거의 없음을 의미한다. Sulfate 도금용액으로부터 전기도금 된 Cu에서 Cu 도금용액 중의 CuSO₄ · 5H₂O의 농도가 60 g · liter⁻¹(0.24 M) 이하인 경우 전류효율이 감소된다고 보고되었다³⁻⁶⁾. 본 연구에서도 도금용액 내의 Cu²⁺ 농도가 0.2 M 이하인 경우 전류효율의 급격한 감소가 발생하는 것으로 관찰되는 유사한 경향을 얻을 수 있었다. 0.2 M 이하의 Cu²⁺ 농도의 경우, 전기도금 시 음극표면에서 2개의 전자를 공급받아 Cu²⁺이 금속 Cu로 환원될 때 이용할 수 있는 Cu 이온 수가 도금용액 내 낮은 Cu²⁺ 농도로 인해 음극 표면 근처에서 작기 때문이다. 즉 일정한 전류밀도

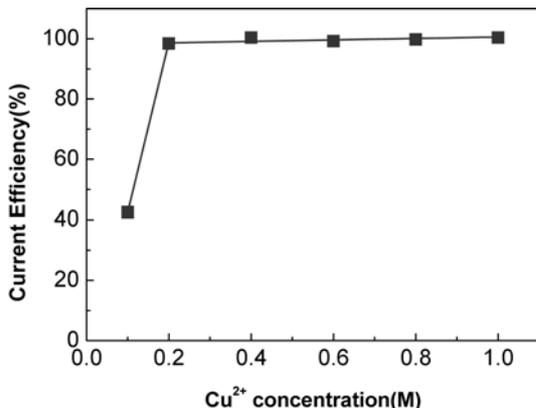


Fig. 1. Current efficiency of electrodeposited Cu film as a function of Cu ion concentrations.

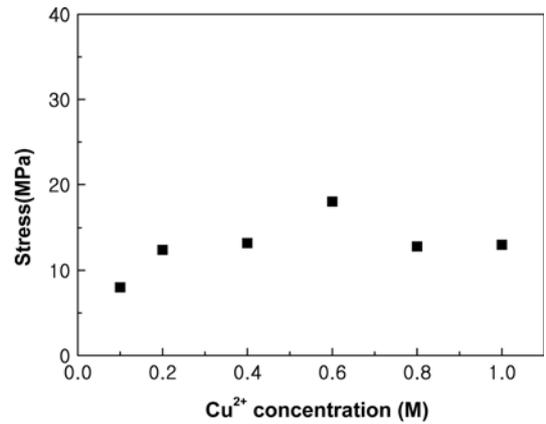
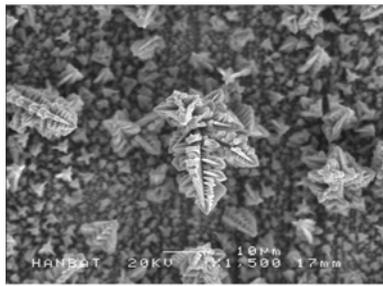


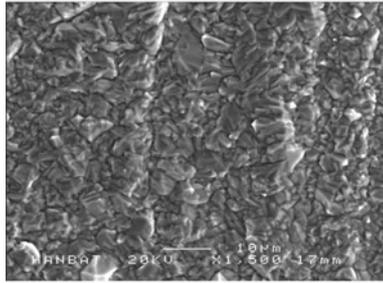
Fig. 2. Residual stress of electrodeposited Cu film as a function of Cu ion concentrations.

로 전기도금할 때, 음극으로부터 가까운 거리에 있는 Cu²⁺들이 고갈된 후, 일정한 도금속도를 유지하기 위해서는 보다 먼 거리에 있는 Cu²⁺이 음극 방향으로 이동하여 음극에 환원되는 확산 지배과정(diffusion control process)이기 때문이다. Sulfate 도금용액으로부터 전기도금 시 Cu²⁺ 농도 변화에 따른 Cu 필름의 잔류응력 변화를 그림 2에 나타내었다. 잔류응력은 약 8 MPa에서 약 18 MPa의 범위로 측정되었으며, Cu²⁺ 농도가 가장 낮은 0.1 M에서 가장 낮은 약 8 MPa의 잔류응력이 측정되었다.

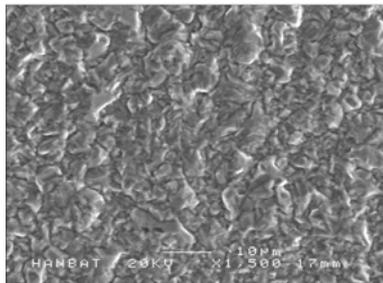
도금용액 내 Cu²⁺ 농도변화에 따른 전기도금 된 Cu 필름의 표면형상 변화를 그림 3에 나타내었다. 0.1 M Cu²⁺ 농도의 조건에서는 Cu 필름의 변색 및 분말형태의 필름이 형성됨이 관찰되었다. 이는 도금용액 내에 전기도금에 이용할 수 있는 Cu²⁺ 농도가 너무 낮아서 발생한 결과로 판단되며, Cu²⁺ 농도를 0.2 M 이상으로 증가시킨 경우에는 분말형태의 필름이나 필름의 변색은 관찰되지 않았다. CuSO₄ 농도가 0.1 M, H₂SO₄ 농도가 0.5 M인 sulfate 도금용액에서 전류밀도의 변화에 따라 전기도금 된 Cu 필름 형상이 치밀한 형상으로부터 분말모양을 한(powdery) 형상으로 천이된다고 보고되었다⁷⁾. 즉 전기도금 용액 내에 Cu²⁺ 농도가 낮은 경우, 전류밀도(10 mA · cm⁻² 이상)가 낮을수록 치밀한 Cu 필름이 만들어지며, 전류밀도가 높을수록(10 mA · cm⁻² 이하) powdery 한 형태의 Cu 필름이 형성됨이 보고되었다. 따라서 본 연구에서 사용된 도금조건은 0.1 M CuSO₄ · 5H₂O, 0.7 M H₂SO₄, 20 mA · cm⁻²의 전류밀도 조건이므로 powdery Cu 필름이 형성되는 것은 앞선 연구 결과와 잘 일치한다고 사료된다. 따라서 이러한 표면 형상의 천이는 도금용액 중의 Cu²⁺ 농도 및 전류밀도에 강하게 의존함을 의미한다. 0.2 M CuSO₄ · 5H₂O 이상의 농도



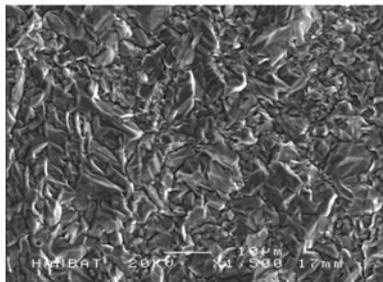
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3. Surface morphologies of electrodeposited Cu film with various Cu ion concentrations in bath solutions : (a) 0.1 M, (b) 0.2 M, (c) 0.6 M, (d) 1 M.

의 경우, 도금용액 내의 Cu^{2+} 농도가 충분하여 확산지배공정 상태로부터 벗어날 수 있기 때문이라 할 수 있다. 또한 0.1 M Cu^{2+} 농도에서 SEM을 통하여 표면형상을 관찰한 결과로부터 표면형상이 rough할수록 Cu 필름의 잔류응력 값이 낮아진다는 것을 알 수 있다. 한편 0.6 M의 Cu^{2+} 농도에서 제조된 Cu 필름은 약 18 MPa의 잔류응력 값을 나타내었다.

그림 4에 Cu^{2+} 농도 변화에 따른 XRD pattern 변화를 나타내었다. Cuthbertson⁸⁾ 이 보고한 결과와 같이, 본 연구에서도 Cu^{2+} 농도 변화에 따라 fcc(111),

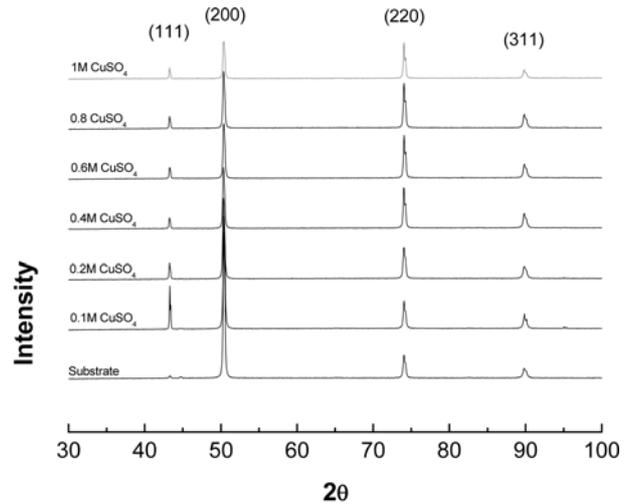


Fig. 4. XRD patterns of electrodeposited Cu film with various Cu ion concentrations in the baths solution.

Table 3. Grain size of Cu film varied with Cu Ion concentrations in the solutions

Cu^{2+} (M)	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Grain size (nm)	50	41	41	39	44	36

fcc(200), fcc(220), fcc(311) 피크들이 관찰되었으며, substrate Cu의 결정방향에 영향을 받음을 알 수 있다. 그러나 Cu^{2+} 농도가 낮은 경우에는 도금용액 pH 변화 경우와는 달리 fcc(111) 방향의 강도가 증가함을 관찰할 수 있다. 따라서 상대적으로 낮은 전류밀도($20 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$)에서 Cu 필름은 fcc(111) 및 fcc(220) 방향으로 성장하는 것으로 판단된다. 표 3에 나타난 바와 같이 fcc(111) 피크들로부터 계산된 결정립 크기는 36~50 nm의 범위를 갖으며, 변색과 수지상 및 분말형태의 필름이 제조되는 0.1 M Cu^{2+} 농도 조건에서 가장 큰 50 nm의 결정립 크기를 갖는 것으로 계산되었다.

3.2 첨가제 농도 변화의 영향

전기도금 용액 내의 첨가제 양의 변화에 따른 전기도금 특성 변화를 관찰하기 위한 첨가제 변화 조건을 표 2에 나타내었다. 첨가제는 3가지 종류(Ultra m.u., Ultra A, Ultra B)를 동일한 비율(Ultra A 및 B=Ultra m.u./20)로 변화시켰다. 첨가제의 양의 변화 이외에는, Cu^{2+} 농도는 1 M, H_2SO_4 농도는 0.7 M, 전류밀도는 $20 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, pH는 0.34, 상온, 무교반, 도금시간은 1000 sec(도금두께 : 약 $7.5 \mu\text{m}$)로 고정하여 실시하였다. 첨가제 양의 변화에 따른 전류효율 변화는 Cu^{2+} 농도 변화(0.1 M 경우 제외) 경우와 마찬가지로 첨가제의 양과는 관계없이 대부분의 경우 약 100%의 전류효율을 나타냈다. 이는 첨

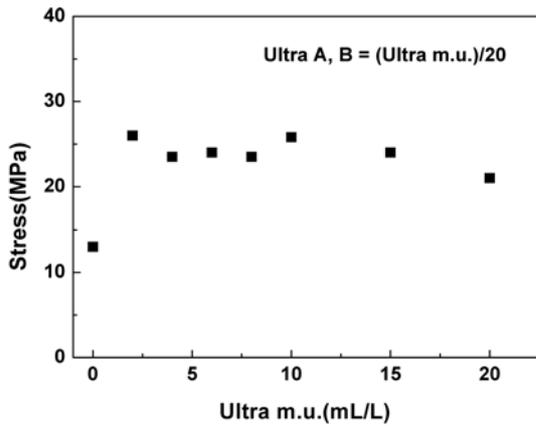
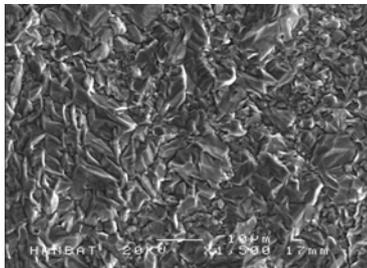
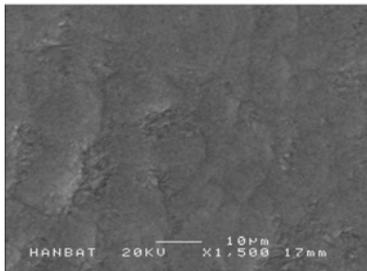


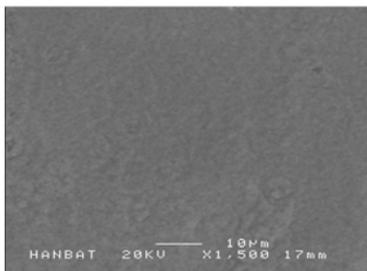
Fig. 5. Residual stress of Cu thin film as a function of additive concentrations.



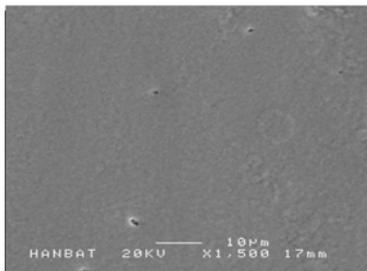
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6. Surface morphology of electrodeposited Cu film at various additive conditions : (a) No additive, (b) condition 1, (c) condition 5, (d) condition 6.

가제 양과 상관없이 전기도금 용액 내에 전기도금에 이용할 Cu^{2+} 농도가 충분하기 때문이다. 첨가제 농도에 따른 Cu 필름의 잔류응력 변화를 그림 5에 나타내었다. 전기도금 된 Cu 필름의 잔류응력은 약 20 MPa로부터 약 26 MPa의 범위로서 모두 인장응력모드를 나타냈다. 그림 5에 나타난 바와 같이 첨가제 조건 1의 경우 약 26 MPa로서 가장 높은 잔류응력을 나타냈으며, 조건 7에서 약 20 MPa로 가장 낮게 나타났다. 첨가제를 넣은 조건의 경우, 평균 잔류응력은 약 23 MPa로서 첨가제를 넣지 않은 경우의 평균 잔류응력 값(13 MPa)보다 약 10 MPa 정도의 높은 잔류응력을 나타내었다.

첨가제농도에 따른 Cu 필름의 표면형상 변화를 그림 6에 나타냈다. 첨가제를 첨가한 경우(그림 6(b-d))에 첨가하지 않은 경우(그림 6(a))보다 표면형상이 매우 smooth해지는 것을 관찰할 수 있으며, 첨가제 첨가조건 5(그림 6(c))의 경우가 가장 smooth한 표면을 나타냈다. 그러나 첨가제 농도를 더 높이는 경우(조건 6 및 7)는 표면에 핀홀(pin hole)이 많이 발생하였다. 따라서 최적의 첨가제 양이 존재하며, 일반적으로 첨가제를 구성하고 있는 화학성분은 첨가제 제조사의 비밀사항이기 때문에, 첨가제를 이용하여 전기도금 시 표면 형상 및 스트레스 등과 같은 전기도금 특성에 어떻게 영향을 미치는지를 판단하는 데는 한계가 있다. 본 연구에서는 첨가제의 유·무에 따라 표면형상은 큰 차이를 나타냈으며, 첨가제를 첨가하지 않은 조건에서는 평균 13 MPa의 잔류응력을, 첨가제를 첨가한 경우에는 평균 23 MPa의 잔류응력을 나타내어 10 MPa 정도의 차이를 나타냈다. 따라서 도금용액 내 Cu^{2+} 농도 및 위의 결과로부터 표면 형상이 smooth할수록

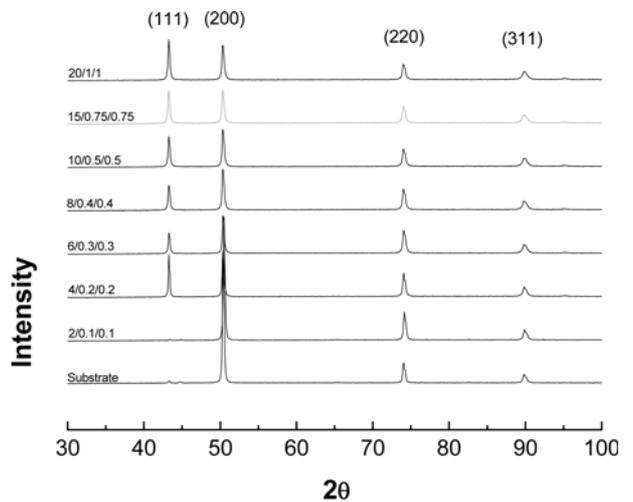


Fig. 7. XRD patterns of electrodeposited Cu film at various Cu ion concentrations in the baths solution.

Table 4. Grain size of Cu film varied with additives concentrations in the solutions

Ultra m.u (ml/l)	2	4	6	8	10	15	20
Grain size (nm)	35	38	33	30	32	30	33

잔류응력은 높고, 표면형상이 rough할수록 잔류응력은 낮아지는 것으로 판단된다. 따라서 sulfate 도금용액으로부터 전기도금 된 Cu 필름의 잔류응력은 도금용액 내 Cu^{2+} 농도뿐만 아니라 표면형상에도 의존한다고 제안할 수 있을 것이다.

그림 7에 첨가제 농도에 따른 Cu 필름의 XRD 패턴의 변화를 나타내었다. 첨가제 양을 증가시킨 경우 fcc(220)의 경우는 변화가 적었으나, fcc(111) 피크의 강도는 상당히 증가하였다. 따라서 첨가제를 첨가한 경우 잔류응력과 XRD 패턴과의 관계로부터 판단해보면, sulfate 전기도금 용액에서 fcc(111) 피크의 강도가 증가할수록 전기도금 된 Cu 필름의 잔류응력이 증가하는 것으로 판단된다. fcc(111) 피크로부터 계산된 결정립 크기는 평균 34 nm를 나타냈으며, 다른 조건(전류밀도, pH, Cu^{2+} 농도)에 비해 상대적으로 작은 결정립 크기를 나타냈으며(표 4), 결정립 미세화 효과가 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

Sulfate 도금용액으로부터 전기도금공정에 의해 제조된 Cu 필름에서 도금용액 내 Cu^{2+} 농도, 첨가제 농도 등의 변화에 따른 전류효율, 잔류응력, 표면형상, XRD 패턴의 변화에 대한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Sulfate 도금용액으로 전기도금 시 전류효율은 0.1 M Cu^{2+} 농도를 가지는 경우를 제외하고 나머지 조건에서는 거의 100%의 전류효율을 나타내었다. 잔류응력은 모든 조건에서 인장응력 모드를 나타냈고, 첨가제를 넣지 않은 조건에서는 약 13 MPa의

잔류응력을 나타내었으며, 첨가제를 넣은 조건에서는 약 23 MPa를 나타냈다. 0.1 M Cu^{2+} 농도를 갖는 도금용액에서는 수지상과 분말 형태의 표면 형상을 나타내었고, 첨가제를 함유한 도금용액으로부터 제조된 Cu 필름은 smooth한 표면 형상을 나타내었다. XRD 분석 결과로부터 모든 조건에서 fcc(111), fcc(200), fcc(220), fcc(311) 피크들이 관찰되었고, 도금용액 내의 Cu^{2+} 농도 변화에 따라 fcc(111) 및 fcc(220) 피크 강도가 증가 하였으며, 첨가제 양의 변화에 따라서는 fcc(111) 피크의 강도가 증가하였다. Sulfate 도금 용액으로부터 전기도금 된 Cu 필름의 잔류응력은 표면형상 및 XRD pattern과 관련이 있는 것으로 판단되며, 표면형상이 smooth 할수록 잔류응력이 증가하고, fcc(111) 피크의 강도가 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. D. H. Lee, Polymer (Korea), 11 (1987) 206.
2. D.-Y. Park, K. S. Park, J. M. Ko, D.-H. Cho, S. H. Lim, W. Y. Kim, B. Y. Yoo, N. V. Myung, J. Electrochem. Soc., 153 (2006) C814.
3. M. Schlesinger, M. Paunovic, Modern Electroplating, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., (2000) 63.
4. V. A. Lamb, C. E. Johnson, D. R. Valentine, J. Electrochem. Soc., 117 (1970) 291C.
5. V. A. Lamb, C. E. Johnson, D. R. Valentine, J. Electrochem. Soc., 117 (1970) 341C.
6. V. A. Lamb, C. E. Johnson, D. R. Valentine, J. Electrochem. Soc., 117 (1970) 381C.
7. C. W. Tobias ed., Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering, Vol. 2, Interscience Publishers a division of John Wiley & Sons, Inc., New York, (1962) 53.
8. J. W. Cuthbertson, Trans. Electrochem. Soc., 77 (1940) 157.