

다층 금속선 형성을 위한 신공정 개발에 관한 연구

朱 承 基

서울대학교 工科大学 金屬工學科

I. 서 론

반도체 소자 제조시 집적회로를 완성시키기 위해서는 평면 공정으로 형성된 각 소자들을 전기적으로 서로 연결시켜 주어야 하는데 이런 공정들을 배선 공정 또는 금속선 형성 공정이라고 한다. 일반적인 금속선 형성은 1) 금속과 실리콘의 접촉, 2) 게이트 접촉, 3) 칩의 여러 점들간의 접촉, 4) 패키징과 이셈블리 작업에 적합한 접속 패드 형성으로 나뉜다.¹⁾ 반도체 소자 기술의 발전으로 이제 대단위 집적회로(VLSI)에서 초 고집적회로(ULSI)의 시대로 바뀌어 가고 있으며 이에 따른 소자 크기의 감소로 회로의 층상 구조도 복잡해져 전기적 성능과 신뢰도를 향상시킬 수 있는 새로운 금속선 형성 재료와 공정 기술에 대한 요구가 증대되고 있다.

소자 크기 감소로 인해 배선의 전류 밀도가 증가하는데, 표면의 소자 크기가 k 의 비율로 감소된다면 흐르는 전류도 같은 비율로 감소하지만 배선의 단면적은 k^2 의 비율로 감소하므로 단위 면적당의 전류, 즉 전류 밀도는 k 배만큼 증가하게 된다.²⁾ 이러한 전류 밀도의 증가는 배선에서의 전압 강하를 유발하므로 인가된 외부 전압의 일부만이 실제 소자 구동에 사용된다. 이러한 손실을 최대한 줄이기 위해서는 배선 재료의 비저항을 줄이는 것이 중요하다. 배선 재료의 선택시 고려하여야 할 것은 이외에도 오믹접촉 형성 가능성, 기관과의 접착성 등 여러가지이다.³⁾ 그러나 이와 같은 조건들을 모두 만족시킬 수 있는 재료는 없기 때문에 비교적 많은 조건을 충족시키는 알루미늄과 알루미늄 합금이 지금까지 널리 쓰이고 있다. 하지만 배선에 대한 요구 조건들이 점차 엄격해지면서 알루미늄 사용의 한계가 극명해지고 있으며 다른 대체 재료의 탐색도 계속되고 있다.⁴⁾

배선 재료의 저항을 줄이고 칩의 유효면적을 늘리는 방안으로 다층 금속선 형성 구조가 제안되고 있다.⁵⁾⁶⁾ 다층 금속선 형성은 그림1에 보인 바와 같이 금속 배선이 수직 방향으로도 연결되어 여러 층의 금속 배선을 사용할 수 있다.⁷⁾

여러 층의 금속 배선 사이에는 절연층으로서 저온 유전체 박막이 사용되며 이 유전체 박막에 접촉창을 내어 두 층을 서로 연결시킨다. 그러나 이런 다층 금속선 형성법에도 여러가지 문제가 있는데 주로 증착, 사진식각, 금속선의 성질등과 관련이 있다. 금속선으로 사용되는 재료에 따라 다른 박막의 형성 온도가 제한을 받게되며 다층 금속선 형성 기술의 가장 큰 문제점으로는 등각 계단 도포성 및 바이어 홀 충전(via hole plugging)을 들 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 등각 계단 도포성이 우수하며 증착 조건의 조정에 의해 선택적 증착이 가능한 금속의 화학 증착법에 대한 연구가 활발히 진행되고

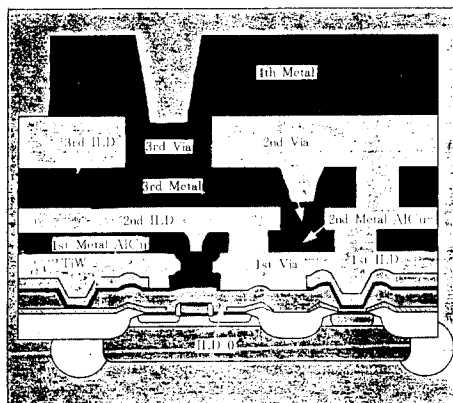


그림 1. 다층 금속선 형성 모형도

있다. (7)(8)(9)(10)

II. 화학 증착법에 의한 금속선 형성

화학 증착법은 한가지 또는 여러가지 기상의 물질을 반응시켜 기판위에 고상의 박막을 입히는 방법으로 대표적인 증착방법은 열분해, 환원, 산화, 가수 분해, 불균형화 또는 이들의 조합 반응이며 일반적으로 기판 표면이 촉매로 작용한다.¹¹⁾ 화학 증착법은 금속, 합금, 화합물, 반도체 또는 절연체 박막도 증착할 수 있어 매우 다양한 활용성을 가지고 있다. 반도체 제조 산업에서 실리콘과 산화물, 질화물등 절연체의 화학 증착은 이미 확고히 정립되어 있지만 화학 증착법에 의한 금속선 형성은 아직 적절한 증착 조건이 확립되어 있지 않은 실정이다.

최근 들어 집적 회로의 집적도가 급격히 향상되면서 좁고 수직인 접촉창과 바이어 그리고 표면의 요철로 인해 증착층의 균일성이 매우 나빠지게 되었다. 이러한 점은 $1\mu\text{m}$ 이하의 접촉창을 연결하는 미세한 배선이나 다층 배선, 깊이 $1\mu\text{m}$, 직경 $1\mu\text{m}$ 정도의 바이어에 있어서 더욱 심각해진다. 열증착이나 스퍼터링과 같은 직시형 (line-of-sight) 방법으로는 기판 모양에 따른 음영 효과로 국부적인 두께 불균일을 피할 수 없다. 그러나 화학 증착법의 경우 표면의 촉매 작용으로 반응이 진행되고 핵생성과 성장이 기판 표면의 방향에 관계없이 진행되기 때문에 그림 2에 나타난 것처럼 기판의 모양에 무관하게 기판의 모든

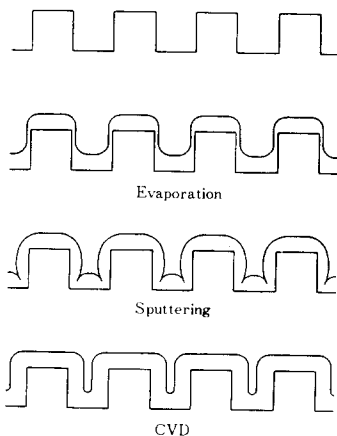


그림 2. 각종 증착법에 따른 박막형성 모형도

면에 균일한 두께의 박막을 형성하는 등각 계단 도포성을 가지게 된다.¹²⁾

이러한 균일한 도포로 인해 금속막이 충분히 두껍게 증착된다면 박막 평탄화의 중요한 단계인 접촉창이나 바이어의 충전이 가능하며 이로 인해 다층 배선 공정을 쉽게 이룰 수 있게 된다.

금속의 화학 증착법은 박막이 금속 유기물의 열분해나 금속 할로젠화물의 환원등에 의해 형성되므로 고순도의 반응 물질을 사용할 경우 높은 화학적 순도를 가지는 박막을 얻을 수 있으며 반응 온도와 압력을 변화시켜 박막의 결정립 크기나 박막의 응력 등 미세 구조를 비교적 쉽게 넓은 범위에 걸쳐 조절할 수 있는 장점이 있다. 특히 감압하에서의 화학 증착법은 증착막의 평화도가 우수하고 한 배치내의 각 웨이퍼간 두께 균일성이 좋아 높은 생산성을 보이므로 최근의 금속 화학 증착공정은 대부분 저압 화학 증착법을 사용하고 있다.¹³⁾

이처럼 화학 증착법에 의한 금속선 형성은 증착막의 등각 계단 도포성 때문에 매우 중요한 위치를 차지하고 있고 특히 미세한 배선에서 그 우수성을 잘 나타내고 있다. 또한 선택적 증착이 가능하며 패터닝 단계를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 다층 금속선 형성시 필수적인 평탄화를 쉽게 이룰 수 있어 지금까지는 텅스텐 저압 화학 증착법이 이러한 용도로 많이 연구되어 왔다.^{7,8,14)} 그러나 텅스텐은 비저항이 크고 반응 물질이 텅스텐의 할로젠화물이므로 반응 부산물에 의해 AlF_3 등이 생성되어 알루미늄 배선과의 높은 접촉 저항을 나타내며 선택적 증착시 실리콘 소모로 인한 신뢰성 문제와 과충전 문제로 인해 실제 공정의 적용에 장애가 남아 있다.

이에 비해 알루미늄 화학 증착법은 우수한 등각 도포성으로 서브 마이크론 구조에서의 접촉창과 바이어 충전의 소재로 이상적일 뿐만 아니라 낮은 전기적 저항과 실리콘 또는 산화물과 좋은 접착성을 가지고 있고 플러깅과 배선을 같은 재료로 할 수 있다는 장점이 있어 다층 금속선 형성을 통한 고집적 소자의 금속선 형성법에 적합하다.

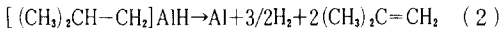
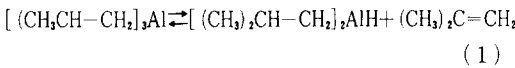
III. 알루미늄 화학 증착법

화학 증착법에 의한 금속선 형성 공정에 대한 연구가 시작된 것은 최근의 일이며 이들도 텅스텐, 몰리브덴등 내화 금속의 화학 증착에 집중되어 왔다.

특히 저압 화학 증착법에 의한 텅스텐의 선택적 증착에 관해서는 많은 진전이 있었다. 알루미늄 화학 증착에 관한 연구는 1980년대에 들어서 시작되었으며 본고에서는 알루미늄의 소스가 되는 반응 물질을 중심으로 화학 증착에 관해 기술하고자 한다.

1. TIBA의 열분해

TIBA (TriisobutylAluminum)는 상온에서 0.8g/cm³의 밀도를 갖는 맑은 무색의 액체로서 융점은 -6°C이고 0.1 torr 압력에서 비등점은 40°C이다. TIBA는 열분해를 통해 알루미늄으로 분해되며 이때 다음과 같은 반응을 따르는 것으로 알려져 있다.^{15),16)}



반응 (1)은 50°C-150°C 까지의 온도에서 일어나며 이 동안 TIBA가 DIBA로 분해되면서 이소부틸렌 가스를 방출한다. 반응 (2)는 DIBA의 분해반응으로 약 120°C에서부터 진행되며 실질적인 반응 속도를 나타내는 것은 220°C 이상의 온도에서부터이다.

TIBA는 가장 작은 분기 연쇄 알킬로서 탄소함유가 적은 고순도 박막을 얻을 수 있으며 증기압이 높고 증착온도가 낮아 가장 유망한 반응 물질로 여겨지고 있어 알루미늄의 화학 증착시 가장 많이 이용되어 왔다. 저압 화학 증착법에서 일반적인 알루미늄 박막 증착조건은 기판 온도가 260°C, TIBA의 압력이 200 mtorr일 때 분당 200Å의 증착속도를 나타내는 것으로 알려져 있다. 표 1에 TIBA를 이용한 일반적인 증착 조건 및 그에 따른 특징을 나타내었다.^{11), 13), 17), 19), 20), 21), 22), 23)}

실리콘 기판을 아무런 처리를 하지 않은 채 TIBA와 반응시키면 증착된 알루미늄 박막의 표면이 매우 거칠기 때문에 박막 증착 전에 화학 증착법에 의해

표 1. TIBA를 이용한 알루미늄 막의 증착 조건

| | 증착조건 | Lower | 최적 | Higher |
|---------|--------------|--------------------|----------|-------------------|
| 기판 온도 | 220-360°C | 증착이 안됨 | 260°C | 증착속도 낮음 선택성 상실 |
| TIBA 압력 | 100-500mtorr | 증착속도가 낮음 | 200mtorr | -- |
| TIBA 유량 | 10-50scm | 균일성 떨어짐 증착속도 낮음 | 20scm | -- |
| 증착 속도 | 100-500Å/min | -- | 200Å/min | -- |

티타늄 초 박막층을 증착함으로써 기판 표면에서 알루미늄 핵생성을 활성화시켜 표면을 매끄럽게 할 수 있다. 알루미늄 금속선의 치명적 단점인 전기적 원자 이동 현상을 감소시키기 위해 알루미늄 증착전 구리 합금을 스퍼터링 함으로써 알루미늄 화학 증착중 알루미늄 박막내로 구리의 확산에 의해 알루미늄-구리 합금을 형성하였다²¹⁾ 얇은 접합 깊이에서 문제가 되는 실리콘과의 합금으로 인한 스파이킹 현상도 사일레인을 실리콘 소스로하여 알루미늄-실리콘 합금을 증착하기도 한다.¹⁸⁾ 이때 사일레인-수소 혼합 가스를 사용하게 되면 수소가 증착막 표면에서 실리콘이 수지 상으로 성장하는 것을 억제하여 매끈하고 균일하게 분포된 알루미늄-실리콘 합금을 얻을 수 있다. TIBA를 이용한 알루미늄 화학 증착 공정의 일례를 표2에 나타내었다.¹³⁾

표 2. 알루미늄 화학 증착공정 예

| 공 정 | 시 간(분) |
|------------------------|--------|
| 웨이퍼 정입 | 10 |
| 펌핑 | 5 |
| 가열 및 H ₂ 유입 | 5 |
| 펌핑 | 5 |
| TiCl ₄ 처리 | 1 |
| 펌핑 | 5 |
| 알루미늄 증착 | 25-50 |
| 펌핑 | 1 |
| N ₂ 유입 | 1 |

2. TMA, TMAA의 열분해

알루미늄의 화학 증착에는 주로 알루미늄 알킬이 사용되는데 TIBA이외에는 TMA가 가장 많이 사용되고 있다.^{24),25),26)} TMA (TriMethylAluminum)는 기상에서 보통 다중합체로 존재하며 열분해에 의해 가장 약한 결합인 Al-C 결합이 끊어지면서 알루미늄이 증착된다. Biswas²⁴⁾는 초 고순도 수소를 TMA를 통해 흘려 TMA 기체를 얻은 뒤 수소를 반응 가스로 하여 증착조에 TMA 기체를 유입시켰다. 증착 온도를 350°C에서 500°C까지 변화시켜 500Å에서 수 μm까지의 균일한 두께를 가진 박막을 얻었다. MPCVD (Magnetron Plasma CVD)를^{25),26)} 이용하여 알루미늄을 증착시킨 경우 증착된 알루미늄은 탄소를 함유하고 있었으며 플라즈마의 강도가 증가함에 따라 그 함량이 급속히 감소한 것으로 보아 Al(CH₃)₃의 형태로 존재하던 탄소가 고밀도 플라즈마에 의해 알루미

늄과 메탄으로 분리된 것으로 추정되며 이에 따라 박막의 전기 저항도 감소하였다. Beach등은^[27] TMAA (TriMethylAmine-Alane)를 사용하여 온벽 저압 화학 증착에서 실리콘/실리콘 산화물/폴리마이드 기판에 알루미늄을 증착하였다. 증착 속도가 기판 온도 160°C, 기체 압력 300mtorr의 조건에서 분당 4000Å으로 TIBA의 경우에 비해 매우 큰 값을 보였으나 증착된 막의 표면은 매우 거칠었다.

3. AlCl₃의 불균형화

AlCl₃의 불균형화를 이용한 알루미늄 증착법에선 AlCl₃를 이용한다.^[28] AlCl₃는 열분해나 치환, 환원 반응으로 금속상의 알루미늄을 얻을 수는 없으나 고온에서 용융 상태의 알루미늄과 반응하여 AlCl을 형성하며 낮은 온도에서 Al과 AlCl₃로 불균형화가 일어난다. 이렇게 얻어진 알루미늄은 불균일한 핵생성과 성장으로 연속적인 박막을 형성하지 못하는 단점이 있어 실제 공정에의 적용은 불투명하다.

4. 알루미늄의 선택적 증착

금속의 선택적 증착은 점차로 고집적화 되어 가고 있는 반도체 제조에 있어 매우 중요한 공정이다. 특히, 다층 금속선 공정을 서두르고 있는 시점에서 사진 식각 공정을 줄일 수 있는 자기 정렬 공정(self aligned process)과 함께 금속의 선택적 증착에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며 텅스텐과 몰리브덴에 관해서는 많은 진전이 있었다.

Amazawa는^[19] 그림3에 나타난 것처럼 웨이퍼 앞뒤 면에 열원을 부착시킨 양벽 화학 증착기로 두 가열체의 온도를 개별적으로 조절하여 냉벽, 온벽 및 초 온벽 화학 증착 조건에서 증착막의 상태를 조사하였다.

온벽 화학 증착 조건의 경우 매끄럽고 연속적인 박막을 얻었으며 초 온벽 범위에서 선택적 증착이

이루어짐을 알았는데 절연체와 금속간의 표면 에너지 차이로 인한 핵생성 밀도 차이에 의해 증착의 선택성이 나타나는 것으로 추정하였다.

Mantell은^[29] 실리콘 표면에서 TIBA의 화학 증착에 대한 산소의 역할을 조사하였다. 실리콘 산화물이 환원되면서 나오는 산소가 알루미늄과 반응하여 얇은 알루미늄 산화물-탄소층을 형성하므로 산소가 알루미늄 박막의 핵생성을 방해하는 역할을 하고 있으며 이에 의해 알루미늄 증착의 선택성이 나타나는 것으로 설명하였다. 알루미늄 박막의 핵생성시 핵생성 활성화 에너지 차이로 선택적 증착을 설명하기도 한다.^{[22][29][30][31]} 알루미늄과 구리, 티타늄의 경우 1eV 이하인데 반해 실리콘 산화물에선 4eV나 되므로 실리콘 산화물 위에선 알루미늄의 핵생성이 거의 일어나지 않는다는 것이다.

Laser를 이용하여 직접 묘화 또는 투영의 방법으로 알루미늄 씨앗층을 형성한 후 씨앗층에서만 선택적으로 알루미늄을 증착하는 방법도 있다. Cacouris등은^[30] laser로 광분해에 의해 부분적으로 500Å 가량의 알루미늄 씨앗층을 형성한 뒤 온도를 올려 열화학 증착법으로 선택적 알루미늄을 증착하였다. 알루미늄 박막 성장시 선택성의 상실은 주로 기판과 기체의 오염에 의한 것으로 나타났으며 160°C 부근의 온도에서 재현성 있게 선택적 증착이 이루어졌다.

IV. 맺음말

반도체 소자의 집적도가 향상되면서 소자 크기의 축소와 함께 다층 금속선 형성, 3차원 수직 집적 등의 새로운 공정 개발이 요구되고 있다. 특히 초 고집적 소자의 시대로 들어서면서 신뢰성 있는 금속선 형성이 보다 중요한 문제로 등장하게 되었다.

그러나 금속선의 폭이 좁아지고 접촉창의 깊이가 깊어지면서 기하학적 음영에 의해 기존의 직시형 증착법의 적용이 불가능해져 가고 있으며 향후 소자 제조시 필연적인 다층 금속선 형성의 최대 과제인 등각 계단 도포성 및 선택적 증착을 이루기 위하여 새로운 공정 개발이 요구되고 있다. 이에 알루미늄 저압 화학 증착법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재까지의 결과, 완벽한 등각 계단 도포성을 보이는 저압 화학 증착 알루미늄 박막은 화학적 순도, 접착성, 비저항과 접촉 저항에서도 뛰어난 특성을 보였으며 실제 공정에 쓰이는 건식 식각, 패터닝, 외

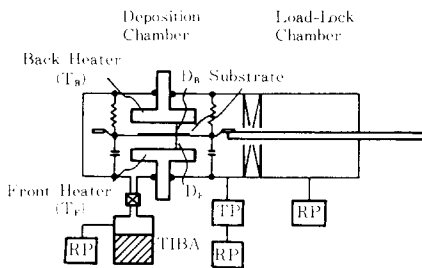



그림 3. 양벽 저압 화학 증착기의 모형도

부 연결 접속성정도 우수해 전체 소자 특성에 아무런 하자도 발생하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 알루미늄 금속선의 과제인 전기적 이동 현상에 대한 저항력과 알루미늄/실리콘 계면의 상호 확산문제에 대한 보완이 필요하다.

參 考 文 獻

- [1] G.E. McGuire, *Semiconductor Materials and Process Handbook*, Noyes Publication, p. 438, 1988.
- [2] Ref. 1, p. 587.
- [3] S.M. Sze, *VLSI Technology*, 2nd ED, McGraw Hill, p. 373, 1988.
- [4] Pei-Lin Pai & Chiu H. Ting, "Copper as the future interconnection materials," *VMIC*, pp. 258-264, 1989.
- [5] Andrew Nagy and John Helbert, "Planarized Inorganic Interlevel Dielectric for Multilevel Metallization-Part I," *Solid State Technology*, pp. 53-56, Jan. 1991.
- [6] R.R. Uttecht and R.M. Geffken, "A Four-Level-Metal Fully Planarized for High Performance Application Specific Circuits," *VMIC*, pp. 20-26, 1991.
- [7] E.K. Broadbent and W.T. Stacy, "Selective Tungsten Processing by LPCVD," *Solid State Technology*, pp. 51-59, Dec. 1985.
- [8] D.R. Bradbury and T.I. Kamins, "Effect of surface on selective deposition of CVD W films," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 133, no. 6, pp. 1214-1217, 1986.
- [9] N. Lifshitz et al, "Selective molybdenum deposition by LPCVD," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 134, no. 8, pp. 2061-2067, 1987.
- [10] D. Temple and A. Reisman, "CVD of copper from copper (II) Hexafluoroacetylacetonate," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 136, no. 11, pp. 3525-3529, 1989.
- [11] M.L. Green and R.A. Levy, "Chemical Vapor Deposition of Metals for Integrated Circuit Applications," *J. Metals*, pp. 63-71, June 1985.
- [12] J. Kanicki et al., *Plasma Processing*, MRS, p. 167, 1986.
- [13] R.A. Levy et al, "Characterization of LPCVD Aluminum for VLSI Processing," *J. Electrochem. Soc.*, vol.131, no. 9, pp. 2175-2182, 1984.
- [14] 류창섭 외, "텅스텐의 저압 화학 증착시 기체 유입량이 증착층의 선택성과 면저항에 미치는 영향," 대한금속학회지, 제27권, 제11호 pp. 995 - 1001, 1989.
- [15] K. Ziegler et al, "Herstellung von Aluniu-malkyler und Dialkylaluminiumhydriden," *Angew. Chem.*, vol. 67, no. 16, p. 424, 1955.
- [16] K. Ziegler et al, "Eine Moglichkeit zur ausschlieβlich chemischen Raffination von Aluminium," *Angew Chem.*, vol. 67, p. 424, 1955.
- [17] H.W. Piekaar et al, "LPCVD of Aluminum in a batch-type load-locked multi-chamber processing system," *VMIC*, pp. 122-128, 1989.
- [18] M.J. Cooke et al, "LPCVD of Aluminum and Al-Si Alloys for Semiconductor Metallization," *Solid State Tech.*, no. 12, pp. 62-65, 1982.
- [19] T. Amazawa et al, "Selective Growth of Aluminum using a Novel CVD System," *IEDM*, pp. 442-445, 1988.
- [20] R.A. Levy and M.L. Green, "LPCVD of Tungsten and Aluminum for VLSI Application," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 134, no. 2, pp. 37c-49c, 1987.
- [21] L.F. Tz. Kwakman et al, "The Incorporation of Copper in CVD Aluminum by Diffusion from In-situ Sputtered Sources," *VMIC*, pp. 282-288, 1990.
- [22] K.P. Cheung et al., "Improved CVD Aluminum Deposition Using In-situ Sputtered Nucleation Layers," *VMIC*, pp. 303-309, 1990.
- [23] 주승기 외, "초고집적소자 제조를 위한 LPCVD 알루미늄에 관한 연구," 연구보고서(2차년도), 한국전자통신연구소, 1991.
- [24] D.R. Biswas et al, "Vapor phase decomposition of aluminum film on quartz substrate", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 130, no. 1, pp. 234-236, 1983.
- [25] T. Kato and T. Ito, "CVD of aluminum enhanced by magnetron plasma," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 135, no. 2, pp. 455-459, 1988.
- [26] T. Kato et al, "In-situ Carbon-doped Aluminum Metallization for VLSI/ULSI Interconnections," *IEDM*, pp. 459-461,

- 1988.
- [27] D.B. Beach et al, "CVD of Aluminum from Trimethylamine-alane," *J. Vac. Sci. Technol.*, A7(5), pp. 3177-3188, 1989.
- [28] R.A. Levy et al, "Properties of LPCVD aluminum films produced by disproportionation of aluminum monochloride," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 132, no. 2, pp. 457-463, 1985.
- [29] D.A. Mantell, "The Role of Oxygen in CVD Nucleation Barriers of TIBA on Silicon," *J. Vac. Sci. Tech.*, A7(3), pp. 630-633, 1989.
- [30] T. Cacouris et al, "Resistless Patterning of Aluminum," *VMIC*, pp. 268-274, 1990. 

筆者紹介



朱 承 基

1952年 9月 4日生

1975年 서울대학교 공과대학 금속공학과(학사)

1980年 Stanford 재료공학과(석사)

1983年 Stanford 재료공학과(박사)

1983年~1984年 National Semiconductor, Senior Engineer

1984年~1986年 Fairchild Semiconductor, Research Staff

1986年~현재 서울대학교 공과대학 금속공학과 부교수