

이온화클러스터빔 증착법에 의한 구리 박막의 반도체 접촉구 메움 향상에 관한 연구

백 민 · 손기황 · 김도진

충남대학교 재료공학과
(1998년 1월 14일)

Improvement of semiconductor contact hole filling of Copper by ionized cluster beam deposition technique

Min Back, Ki Wang Son, and Do-jin Kim

Department of Materials Engineering, Chungnam National University,
Taejon 305-764, Korea

(Received January 14, 1998)

요 약 - 반도체 접촉구를 메우기 위하여 소오스의 직진성을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 이온화클러스터빔 증착법을 이용하는 동시에 셀의 구조를 개선하여 직진성 향상을 도모하였다. 중성클러스터 만으로 구리를 증착할 경우 직진성은 매우 우수하였으나 소오스의 표면 이동이 적어 박막은 주상형으로 성장하며 측벽에의 증착은 거의 일어나지 않았으며 성장에 따라 그림자효과로 인한 단차에서의 벽개가 관찰되었다. 그러나, 가속전압을 인가하여 전하를 띤 클러스터를 형성시켜 증착하였을 때 주상형 성장 모드는 사라졌으며, 직경 0.5 μm , aspect ratio 2의 접촉구에서 완벽한 바닥면의 도포성을 나타내었고, 측벽에의 증착성도 향상되어 막의 연결성이 개선되었다. 이로써 이온화 클러스터빔 증착법이 직진성을 향상시켜 작은 접촉구의 메움을 향상시킬 수 있는 물리적 증착 방법임을 확인하였다.

Abstract - A study to improve filling of semiconductor contact holes by enhancement of the directionality of the source beams has been undertaken. The collimation of source beams was improved by the ionized cluster beam deposition technique with modification of the cell geometry. The collimation tested with neutral cluster beam was excellent. But, the Cu films were grown in a columnar mode due to the lack of surface mobility of the impinged clusters. A shadow effect also caused cleavage and consequent discontinuity at the steps as films grow. By applying acceleration voltage, the columnar growth in a contact hole of 0.5 μm diameter and 1 μm height disappeared and considerable coverage at the side wall of the contacts as well as perfect bottom coverage were observed. These are all due to the assistants of the accelerated ionized clusters with high kinetic energy. Thus we demonstrated that the ICB deposition technique can be used to completely fill sub-half-micron contact holes with high aspect ratio.

1. 서 론

반도체 소자의 크기 축소와 고집적화는 반마이크론미터 이하의 금속 배선 선폭과 접촉구(contact hole), 그리고 다층배선 기술을 요구하게 되었다. 이러한 새로운 요구는 이전에 널리 사용되었던 알루미늄을 기본으로 하는 금속 박막의 한계를 가져왔고, 그 대체재로서 구리가

가장 먼저 대상으로 연구되게 되었다. 구리는 Al 합금을 비하여 비저항이 낮고 electromigration[1], stress migration[2]에 대한 저항성이 뛰어나서 지난 수년간 Al 합금을 대체할 배선재료로 꾸준히 연구되어 왔다.

배선 기술에서 선폭과 접촉구, 또는 via의 축소에 따라 배선의 연속성을 확보하는 것이 중요한 문제 중의 하나인데, Al을 스퍼터링 등의 물리적 증착 방법으로 증착

시킬 경우 aspect ratio가 증가함에 따라 접촉구 입구에서의 스텝커버리지(step coverage)가 심각히 손상된다. 이를 해결하기 위한 대표적인 기법은 CVD 방법에 의한 텅스텐플러그 형성, 또는 Al 리플로우(reflow) 방법 등이다[3]. 그러나 이들 방법들의 단점으로써 복잡한 공정 단계나 500°C 이상의 열처리에 수반되는 공정상의 문제점들이 지적되고 있다. 한편, 현재 가장 성숙되어 널리 사용되고 있는 기술인 스퍼터링 방법을 사용할 경우 수직으로 패터된 접촉구에서 측벽에의 스텝커버리지 뿐만 아니라 바닥면의 도포성도 나빠며, 이를 해결하기 위하여 접촉구와 수직인 방향으로 입사하는 소오스만을 증착시키기 위한 소위 수직집속(collimation) 방법이 개발되었다. 이 방법에 의하여 접촉구 바닥면의 증착률을 증대시킬 수 있으나, 전체 소오스 중 실제 증착에 기여하는 수율이 1/10 이하인 것으로 조사되어 증착 효율성이 낮은 것으로 발표되어 있다[4].

이온화클러스터빔(ionized cluster beam : ICB) 증착법[5,6]은 100~1000개의 원자가 뭉쳐 형성된 클러스터를 이온화시킨후 전기장 내에서 가속시킴으로써 원자에 운동에너지를 공급함으로써 박막 증착에 이점을 얻는 방법이다. 보통 전자의 충돌에 의한 클러스터의 이온화율은 보통 십여 %를 넘지 않는 것으로 알려져 있으나[7,8], 큰 운동에너지를 가진 이온화된 클러스터의 영향으로 저온 증착이 가능하고, 고밀도 박막을 얻을 수 있으며, 접촉층과의 부착력이 우수하고, 스텝커버리지가 향상되는 등의 이점들이 있는 것으로 발표되고 있고[6], 이들은 모두 금속 박막 증착에 유용하게 작용하는 요소들이다.

본 연구의 목적은 이상의 여러 가지 이점을 가진 ICB 증착법을 이용하여 반마이크론미터 이하의 작은 접촉구를 기공 없이 메우고자 하는 것이다. 이렇게 하면 한가지 금속을 사용한 일회의 금속 증착 공정을 통하여 접촉구나 via의 메움 공정을 수행할 수 있기 때문인데, 이 경우 배선 공정의 단순화를 이룰 수 있어 반도체 생산의 경제성, 신뢰성, 수율 등의 문제에서 얻는 이득이 매우 클것이 예상되기 때문이다.

필자들이 기본적으로 착안한 점은 소오스가 노즐을 튀어나오며 단열 팽창할 때 소오스는 초음속의 초기 속도를 갖게되며 아울러 노즐 구조에 의해 뛰어난 직진성을 갖게된다는 점이다. 전하를 띤 클러스터가 가속전압을 인가할 경우 전기장 분포에 의해 직진성이 보장되는 한편 전자와 충돌하지 않아 전하를 띠지 못하는 중성

클러스터는 전기장의 영향을 받지 않으므로 부분적으로는 산란을 통해 직진성을 유지하지 못하게 된다. 이들은 전극판에 포집되거나 전극판과 충돌 후 방향을 바꾸게 된다. 그래서 셀의 전극판 구조를 개선하여 중성 클러스터를 수직집속시켜 직진성이 향상되도록 고안하였다. 즉, 10 cm 길이의 전극부가 원통형 터널을 형성하도록 하여 일종의 collimator 역할을 수행할 수 있도록 한 것이다. 이렇게 전하를 띤 클러스터와 더불어 중성 클러스터의 직진성을 향상시킴으로써 큰 aspect ratio의 작은 접촉구에서 바닥의 도포성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대하였다.

2. ICB 셀의 제작 및 실험방법

본 연구에 사용된 ICB 셀은 $\sim 10^{-8}$ torr의 고진공에 장착하였다. Fig. 1에 보인 ICB 셀은 소오스 가열부와 전극부로 나누어져 있다. 도가니 가열을 위한 열선은 텅스텐(W) 선을 상하로 왕복하며 형성시켰고, 고온에서 열선의 자중에 의한 뒤틀림을 방지하기 위하여 상하 양끝에 세라믹 가이드를 설치하였다. 이렇게 함으로써 1800°C 이상으로 가열되는 열선과 세라믹의 반응을 억제시키고, 세라믹으로부터의 탈착 가스를 극소화 시켰다. 전극판은 Ta, Mo, stainless steel 등으로 형성된 판재와 선재를 조합하여 구성하였다. 도가니는 고밀도 카본

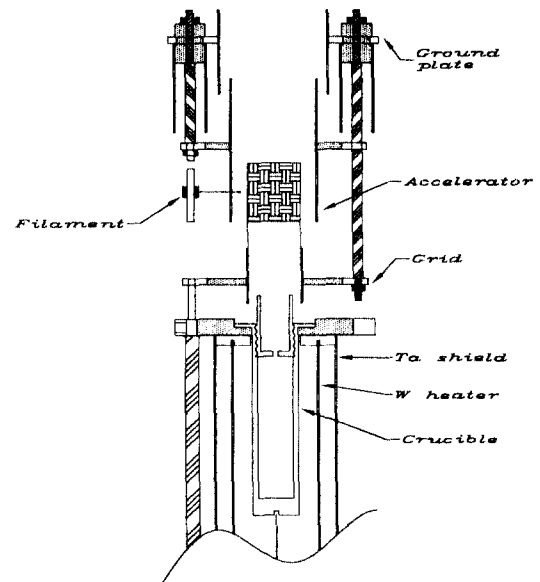


Fig. 1. 이온화클러스터빔 셀의 개략도.

(graphite)을 가공하여 제조하였는데, 도가니에 제작한 노즐은 길이(L)와 직경(D)이 각각 2~3 mm와 2~3 mm로 하여 $D/L=1\sim 1.5$ 의 기하학적 구성을 갖도록 하였다. 전극부 몸체는 아래로부터 그리드, 가속전극 및 이온화전극, 필라멘트로 구성되어 있다. 전자 방출을 위한 필라멘트로는 0.3 mm 직경의 텅스텐 선을 사용하였고, 그 둘레는 필라멘트에 의한 열방사를 차단하기 위하여 Ta 관으로 둘러싸는데, 가속전극을 겹하고 있다. 전자의 가속 충돌을 위한 그리드는 Ta 선으로 제작하여 전극부 중앙에 위치해 있는데, 그리드전압은 가속전압 위에 인가하게 된다. 그리고 제일 상단부에는 접지전극이 위치해 있다.

본 실험실에서 설계 제작한 셀의 특징은 i) 4.5인치 Conflat flange(CFF) 포트에 장입할 수 있는 비교적 작은 크기의 셀인 점과 ii) 컨트롤 회로를 단순화한 점이다. 기존의 셀들은 대부분 8인치 CFF의 넓은 공간을 사용하고 있다. 그 이유는 필라멘트의 경험에 의하면 전극간 절연물이 소오스의 산란에 의해 오염되는 것을 방지하기 위한 목적이 제일 크다고 추측된다. 그러나 이렇게 큰 셀을 사용할 경우 여러 개의 셀을 동시에 장착할 때 진공 챔버가 비대해지므로 일차적으로 경제성에 문제가 된다. 그런데 여러 개의 셀을 동시에 장착할 수 있어야 각종 화합물 박막의 증착을 실험할 수 있어서 ICB 증착법의 활용성이 확대될 수 있다고 볼 때 소형 ICB 셀의 개발은 매우 필요한 일로 사료된다. 본 셀의 경우 도가니부와 전극부를 일체형으로 제작함으로써 전체 셀의 부피를 축소시킬 수 있었다. 그러나 이로 인하여 소오스의 산란에 의한 전극간 부도체의 오염도가 증가하게 된다. 본 셀의 경우 상대적으로 오염도가 가장 낮은 전극 최상단에만 부도체를 설치하도록 구조를 개선함으로써 이 문제점을 극복하였다. 또 기존의 셀 컨트롤러는 전극부의 필라멘트, 그리드 뿐만 아니라, 도가니 가열을 위한 텅스텐 필라멘트도 가속전압 위에 떠있다. 이렇게 함으로써 이온화된 클러스터의 탈출을 보장하고자 한 것으로 보인다. 그러나 본 셀의 경우 전극부와 도가니 가열부의 컨트롤러를 분리시켰고, 도가니를 단순히 접지 준위에서 가열하도록 단순화시켰다.

그런데 본 연구에서는 특히 셀의 구조를 클러스터가 기관을 향하여 방향성을 갖도록 구조를 개선하였다. 전극들을 단순한 수평 평판으로 제작하지 않고, 모든 전극에 원통형 Ta 관을 이어 달아서 노즐을 튀어나온 소오스가 원통관의 가이드를 통해 직진성이 향상되도록 도

모하였다. 그런데 이러한 전극판 구조의 개선은 특히 상대적으로 양이 더 많은 중성 클러스터의 직진성 향상에 중요하다. 이온화된 클러스터의 경우는 전하를 띠고 있으므로 가속전압에 의하여 직진성이 자동적으로 확보되지만, 중성 클러스터의 경우는 전기장의 영향을 받지 않게 되므로 초기 진행 방향을 유지하려고 할 것이다. 원통형 전극판은 수직 방향으로부터 각도를 가지고 벗어나는 중성 클러스터를 포집하거나 진행 방향을 바꿔 줌으로써 원통형 전극부를 벗어나는 클러스터는 우수한 직진성을 확보하게 될 것으로 기대된다. 전극부의 총 길이가 10 cm이므로, 이 길이를 통과한 클러스터는 기관에 수직에 가까운 각도로 입사하게 된다. 그런데 스퍼터링 증착에서는 수직집속기에 의해 수직 방향 이외의 각도로 진행되는 모든 소오스를 포집하여 전체 소오스 양의 90% 이상이 유실되는데 반하여[4] ICB 증착에서는 그 손실이 훨씬 적을 것으로 기대된다. 왜냐하면 ICB의 경우는 이미 우수한 소오스의 직진성을 확보하고 있고 일부 산란되는 소오스에 대한 수직집속 기능이 가해지기 때문이다.

사용한 가속전압은 0~3 kV이며, 그리드 전압은 700 V까지 인가시켰고, 이 때 그리드 전류는 ~300 mA 정도였다. 소오스로는 99.999% 순도의 구리로서 pellet 형을 사용하였고, 도가니 온도는 1700~1850°C로 변화시켰다. 이 온도는 전자충돌(electron bombardment) 방법을 쓰지 않고 단순 저항 가열 방법에 의한 온도로는 매우 높은 온도이다. 도가니를 이 온도로 가열하여 증착할 때 챔버 내의 진공도는 $\sim 10^{-6}$ 정도였다. 증착에 사용한 패턴은 실리콘 산화막에 직경 0.5~1 μm , 길이 1~2 μm 인 aspect ratio 1~4의 접촉구가 연속적으로 형성된 주사전자현미경(SEM) 관찰용 패턴이다. 기관의 접촉구 패턴 제작은 현대전자(주)와 ETRI에 제작 의뢰하였다. 증착 두께는 α -step과 SEM을 이용하여 측정하였고, 증착층의 표면 미세구조와 단면의 미세구조는 SEM으로 분석하였다. 또 4-point probe를 이용하여 구리 박막의 비저항을 측정하였다.

클러스터의 크기 분포는 조사하지 못하였으며, 현재 경제적인 조사 방법을 고안 중이다. 그러나 클러스터의 이온화 여부는 클러스터가 기관에 충돌하며 흐르는 전류(substrate current)를 측정하여 확인하였는데 기관을 전기적으로 고립시켜 기관에 부딪치는 이온전류를 측정할 수 있도록 하였다. 기관의 면적은 30 cm^2 이다. 기관과 노즐 사이의 거리는 25 cm이며, 전극부는 10 cm로써

셀의 선단으로부터 기관까지는 15 cm이다. 기관을 클러스터의 진행 방향에 수직하도록 위치하여 클러스터가 좁은 접촉구바닥 까지 도달하도록 하였다. 기관과 셀 사이의 클러스터가 통과하는 공간에 4 cm×3 cm 크기의 SUS 판 두개가 서로 마주보도록 편향극판(deflector)을 설치하여 클러스터가 극판 사이를 통과하도록 하였다. 즉 양 극판에 교류전압을 인가시키면, 그 사이를 통과하는 전하를 띤 클러스터는 진행 방향 (종방향)과 수직인 전기장의 영향을 받아 횡방향 변위를 일으키며 통과하게 된다. 그런데 그 변위는 클러스터의 전하량과 질량에 따라 변하게 된다. 주어진 전하량에서 적은 개수의 Cu 원자가 모여 형성된 작은 질량의 클러스터는 주어진 전압 하에서 상대적으로 큰 변위를 일으키게 되어 편향극판에 포집되면 기관에 도달하지 못하게 될 것이다. 그러나 큰 질량의 경우에는 횡방향 변위를 일으키며 진행하지만 변위가 작아 편향극판에 포집되지 않고 기관에 도

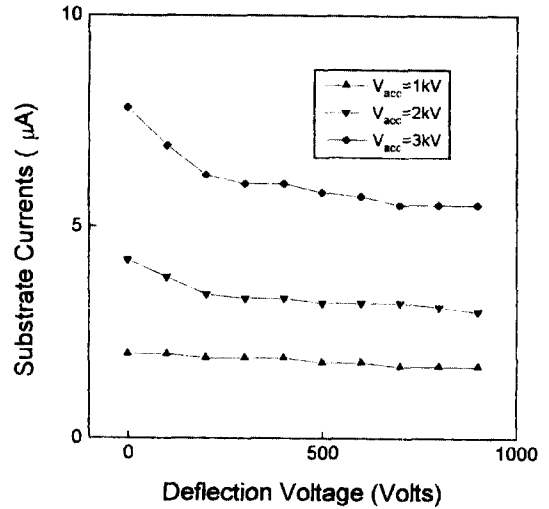
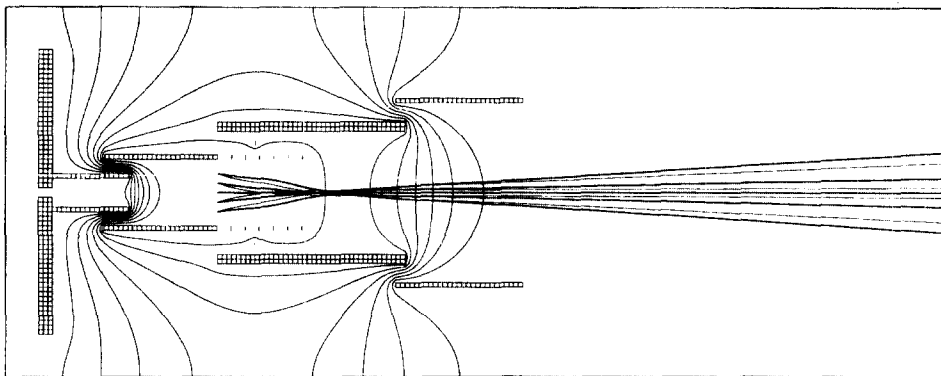
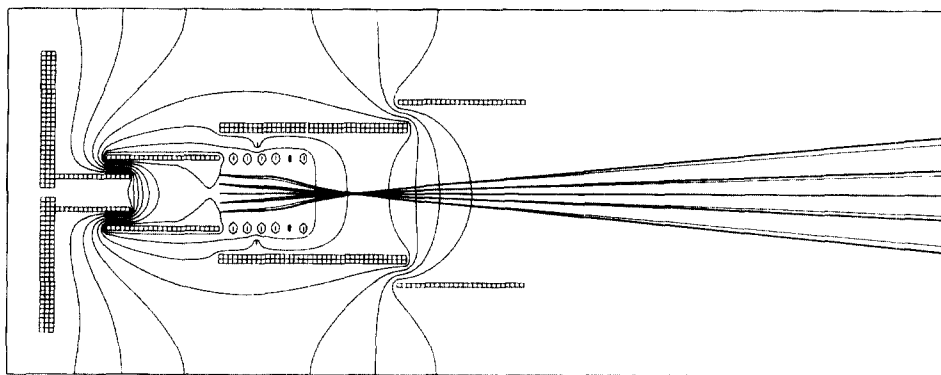


Fig. 2. 서로 다른 가속전압에서 편향전압 변화에 따른 기관전류의 변화.



(a)



(b)

Fig. 3. 구리원자 10개(가늘실선) 및 100개(굵은실선)로 구성된 이온화된 클러스터의 가속전압 하에서의 궤적. (a) 가속전압 1 kV, (b) 가속전압 3 kV. 곡선은 등전위선

달하게 되어 기관 전류를 형성하게 될 것이다.

Fig. 2는 여러 가지 가속 전압하에서 편향극관의 전압에 따라 기관 전류의 변화를 조사한 결과이다. 편향전압이 영일 때 가속전압의 증가에 따라 기관전류가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이 때 모든 전하를 띤 클러스터는 기관에 도달하여 주어진 전류값을 나타낼 것인데, 전류는 전하밀도와 입자의 운동 속도에 비례한다. 그런데 클러스터의 양과 분포는 도가니의 구조와 온도로 정해지므로 일정하며, 전하의 밀도는 이온화 조건에 의해 정해지므로 역시 일정하다. 따라서 그림의 경우처럼 가속 전압만을 변수로 하여 실험한 경우 비록 속도가 증가하게 되더라도 전하의 공급율은 한정되어 있으므로 그 유속(flux)은 유한하여 가속전압 증가에 의한 속도 증가로써 기관전류의 변화를 설명하기 어렵다.

그런데 가속전압의 변화에 따라 전극부 내부에서의 전위 분포와 함께 전하의 궤적이 변화함을 Fig. 3에 예시하였다. 이는 SIMION 모사기로 조사한 결과인데 실험한 셀 구조와 전위값을 사용하였고, 클러스터의 초기 속도는 700 m/s로 가정하였다. 실제 이온화되는 위치에 따라 궤도가 변할 것이므로, 본 모사는 상대적으로만 이해되어야 할 것이다. 그러나 그 기본적인 경향만은 위치가 변화하여도 같으므로 정성적으로 받아들여질 수 있다. Fig. 3(a)는 가속전압 1 kV에서, 3(b)는 가속전압 3 kV에서 10개 (가는선) 및 100개 (굵은선) 원자로 구성된 클러스터의 운동 궤적을 모사한 것이다. 큰 가속전압에서 클러스터의 집속이 강화되는 경향을 알 수 있다. 그리고 작은 질량의 클러스터는 큰 질량의 클러스터에 비하여 가속전압의 증가에 따른 집속 각도의 변화가 크다. 따라서 기관 하부에서의 클러스터의 크기 분포는 가속전압이 증가할수록 작은 클러스터가 큰 클러스터보다 상대적으로 많이 존재하게 될 것이다. 따라서 Fig. 2에서 편향전압 영에서의 기관전류 값을 비교할 때 큰 가속전압에서 큰 기관전류를 나타내는 원인은 가속전압 증가에 따라 이온화된 클러스터가 집속되며 기관 하부에서 이온화 클러스터의 유효밀도가 증가하기 때문이다. 또 같은 이유로 각 가속전압에서 수렴하는 기관전류 값은 큰 가속전압에서 크다.

한편 편향전압이 증가할수록 작은 편향전압에서 기관전류가 감소하며 나중에 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보이고 있다. 단순화한 계산 결과 가속전압 1 kV, 편향전압 1 kV에서 클러스터는 크기에 따라 편향판에 포집되기 위한 변위의 40~70%에 해당하는 편향 변위를

일으키는 것으로 밝혀졌다. 즉 편향극관 사이를 지나는 클러스터 중 편향판에 가까운 일부 클러스터만이 편향극관에 포집된다. Fig. 3에서 보였듯이 가속전압이 증가할수록 기관전류가 증가하는데 상대적으로 작은 클러스터에 의한 기여 증가가 크다. 따라서 Fig. 2에서 보듯이 큰 가속전압에서는 상대적으로 큰 입자속도에도 불구하고 편향전압에 포집되는 작은 클러스터의 수가 많아서 큰 기관전류의 감소를 보이는 것으로 판단된다. 한편 낮은 가속전압에서는 상대적으로 작은 클러스터의 수가 적어서 기관전류의 감소폭은 작게 된다. 편향극관 중심부를 지나는 클러스터, 특히 큰 질량의 클러스터는 편향전압 증가에도 불구하고 기관에 도달하며 기관전류 감소율이 현저히 작아지게 된다. 이 경우 클러스터의 크기 분포는 Ag와 Al에서 보인 이중 피크 모양의 분포를 나타낼 수 있다[8]. 이상의 실험 결과로 볼 때 여러 가지 크기를 갖는 클러스터가 확연히 존재하며, 또 이온화되어 전하를 띠고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4와 5는 기관의 온도를 변화시키면서 증착한 구리 박막의 표면 SEM 사진이다. 구리 도가니는 1800°C

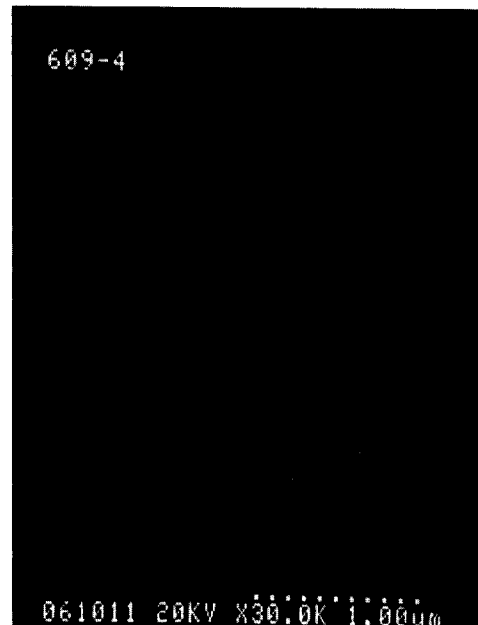


Fig. 4. 상온에서 증착한 구리 박막의 표면 SEM 사진.

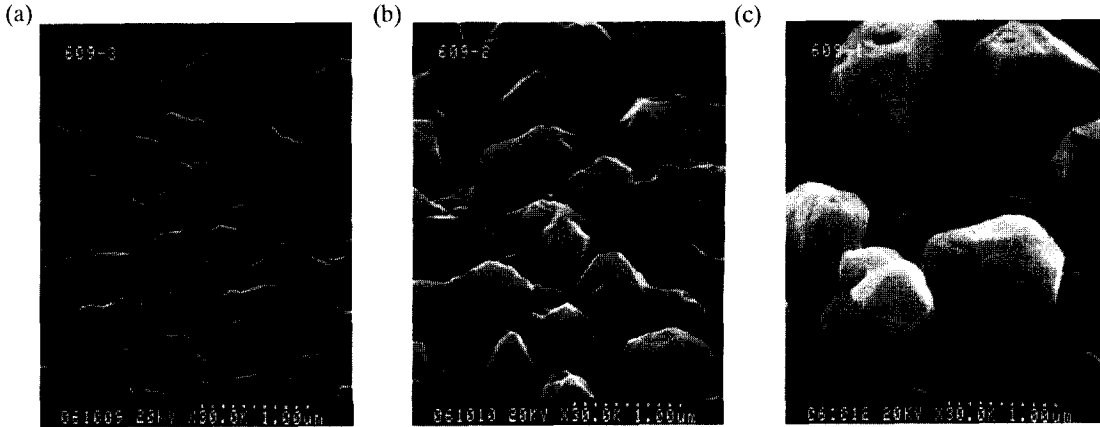


Fig. 5. 증착온도 (a) 200°C, (b) 300°C, 그리고 (c) 400°C에서 증착한 구리 박막의 표면 SEM 사진.

로 가열하였고, 증착시간은 1시간이다. 가속전압은 900~1000 V, 그리드 전압은 700 V로 인가하고 측정된 기관 전류는 5~8 μA 정도였다. Fig. 4는 상온에서 증착한 표면사진인데, 육안으로 관찰했을 때는 매우 반짝이는 금속성 표면을 나타내었다. 구분되는 입자의 크기는 $\sim 0.15 \mu\text{m}$ 직경으로 균일한 증착을 보여주고 있다. 상온에서 증착한 시편의 비저항을 측정했을 때 사용한 가속 전압에 큰 상관 없이 $\sim 2.0 \mu\Omega\text{-cm}$ 정도의 값을 보여 다른 방법으로 증착한 구리박막의 비저항치와 비슷한 것을 알 수 있다[9].

그런데 기관의 온도를 200, 300, 400°C로 유지하며 증착했을 때의 표면 상태는 크게 변화하였다. (Fig. 5(a)) 200°C에서는 $\sim 0.5 \mu\text{m}$ 크기의 결정립이 서로 연결되어 있으나, (b) 300°C에서는 $\sim 0.7 \mu\text{m}$ 크기로 결정립 사이의 연결이 많이 끊어지고 있으며, (c) 400°C에서는 $\sim 1.0 \mu\text{m}$ 정도 크기의 구형 결정립이 독립적으로 성장하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이에 따라 표면의 요철은 심화되며 육안으로 관찰했을 때 뿌연 구리빛으로 보인다. 또 온도가 높을수록 결정립의 우선 결정 방향이 뚜렷해지는 경향이 있다. 결론적으로 기관온도의 상승에 따라 몇몇 주된 핵으로부터 커다란 구형의 결정립으로 성장하면서 조대해지며, 결정립 사이의 연결성이 약화되는 경향을 보이고 있다. 온도 상승에 따른 결정립의 조대화 와 함께 보여주고 있는 결정립의 구형화는 구리와 실리콘 산화막의 wetting 또는 접촉이 좋지 않다는 사실을 반증하는 것으로 판단된다[10]. 이들 결정립의 크기가 조대화하면서 측정된 비저항치도 같이 증가하는 것을 Fig. 6에서 관찰할 수 있다. 300°C에서의 급격한 비저항치 증

가는 결정립간의 연결성이 와해되면서 전류의 통로가 길어지고 단면적이 좁아지는 효과 때문으로 설명된다.

이상의 실험으로부터 반마이크론미터 이하의 크기를 가지는 접촉구를 만들기 위해서는 기관 온도의 상승을 최대한 억제해야 한다는 결론에 도달하였다. 왜냐하면 200°C 이상에서 $0.5 \mu\text{m}$ 이상 크기의 결정립이 접촉구의 입구에 위치하게 되면 이 결정립에 의한 그림자 효과 (shadow effect)로 인하여 접촉구의 바닥 배움이 불가능해 질 것이기 때문이다. Fig. 7은 기관온도 200°C, 가속 전압 820 V에서 직경 $0.5 \mu\text{m}$, aspect ratio 2인 접촉구에 증착한 결과인데, 접촉구 입구에서 수평 방향으로 결정립 성장이 일어나고 있는 예를 보여주고 있다. 이 이후 계속 증착을 시도할 경우 접촉구의 입구는 곧 막히게

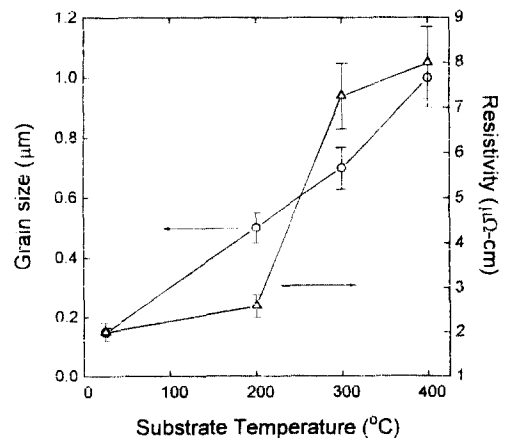


Fig. 6. 증착온도 변화에 따른 결정립의 크기 및 비저항 변화.

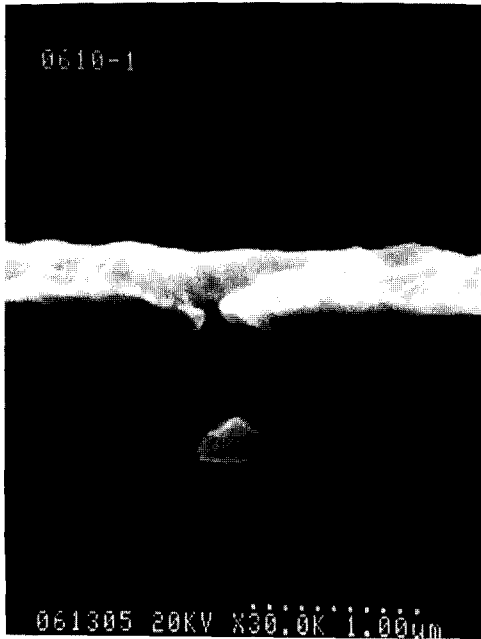


Fig. 7. 접촉구 입구에서 횡방향으로 성장한 결정립.

되고 내부에는 빈 공간이 형성될 것을 예측할 수 있다. 이러한 국부적인 결정 성장은 웨이퍼 상에서 예측할 수 없이 발생할 것이므로 반도체 공정에 응용할 수 없는 조건이다. 따라서 이후의 모든 실험은 기판온도를 상온에 유지한 채 실험하였다.

Fig. 8은 aspect ratio 1, 직경 $1\ \mu\text{m}$ 의 접촉구에 중성의 클러스터만으로 증착한 단면 사진이다. 전체적으로 접촉구가 채워졌으며 바닥 도포율(접촉구 바닥의 박막 두께/평면 박막 두께의 비)은 1이고, 접촉구마다 매움의 균일성도 우수한 것을 확인하였다. 소오스의 우수한 직진성에 의한 완전한 바닥 도포율은 이온화클러스터빔 증착법에서 얻을 수 있는 초음속의 소오스 속도와 수직 집속성을 향상시킨 셀의 구조로부터 결과된 것이다. 주상형으로 성장한 모습이 확연히 나타나 있으며, 이는 웨이퍼 상에 도달한 클러스터가 웨이퍼 표면에서의 긴 거리 이동 없이 그 자리에서 그대로 성장하였다는 것을 시사해 준다. 이는 그다지 높지 않은 기판 온도에서 일어나는 박막성장의 전형적인 형태이기도 하다[11]. 그런데 증착 시간이 경과하면서 접촉구 입구 위의 평면에서 증착 되는 박막의 측면 성장이 점점 두드러지며 접촉구 입구를 가리게 된다. 이에 의한 그림자 효과로 인하여 주상의 단면적이 점점 좁아지고, 주상의 성장 방향이 정

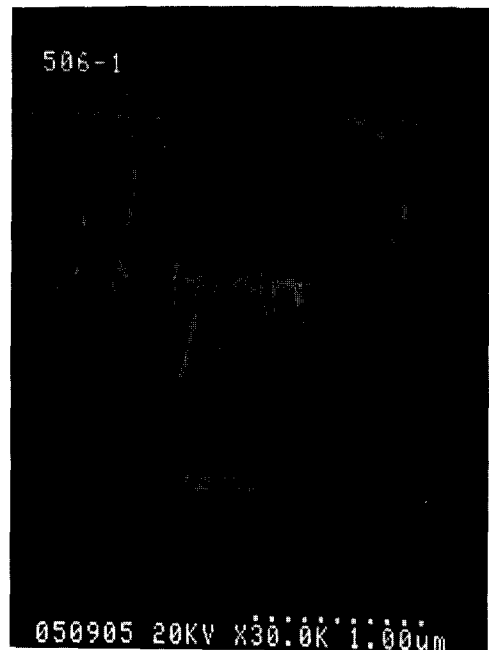


Fig. 8. 상온에서 직경 $1\ \mu\text{m}$, 깊이 $1\ \mu\text{m}$ 의 접촉구에 중성 클러스터빔으로 증착한 단면 사진.

방향에 대하여 각도를 가지고 가운데 방향으로 기울어져 있는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 성장 모습은 해당 층의 증착 시점에 형성되었을 solid angle을 간접적으로 관찰할 수 있게 해준다. 이러한 그림자 효과의 결과로 인하여 평면층에 증착된 구리 박막과 접촉구 내부의 주상과의 사이에 벽개를 보이고 있으며, 두 부분의 연결 상태가 매우 취약한 것을 고배율 SEM 사진으로 확인할 수 있었다. 이상의 실험 결과로 판단할 때, 수직집속 형으로 개선된 셀 구조를 사용함으로써 매우 우수한 직진성을 갖는 소오스 분포를 형성시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 또한 중성 클러스터의 초기속도 만으로는 그림자 효과를 제거할 만큼 충분히 클러스터의 표면 이동도를 향상시킬 수 없고, 이로 인하여 단차에서 벽개가 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 aspect ratio 2, 직경 $0.5\ \mu\text{m}$ 의 접촉구에 가속 전압 $1\ \text{kV}$ 를 인가하여 증착한 접촉구의 단면 사진인데, 특히 본 패턴은 Fig. 8의 경우에 비하여 접촉구의 직경도 작고, aspect ratio도 큰 접촉구에 증착한 결과임을 주시해야 한다. Fig. 8에서 소오스의 증착 방향을 나타내 주던 주상형의 성장 형태를 여기서는 관찰할 수 없다. 또, 주상형으로 증착한 평면의 오목도푹한 표면에 비하

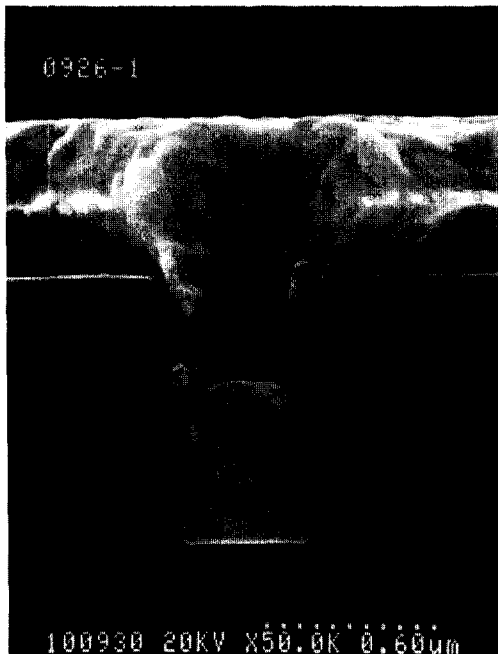


Fig. 9. 상온에서 가속전압 1 kV를 사용하여 직경 0.5 μm , 깊이 1 μm 의 접촉구에 증착한 단면 사진.

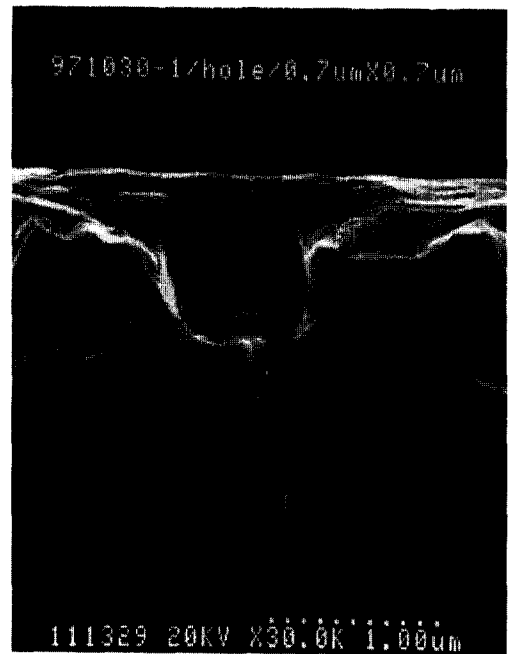


Fig. 10. 상온에서 가속전압 2 kV를 사용하여 직경 0.5 μm , 깊이 1 μm 의 접촉구에 증착한 단면 사진.

여 평면은 아주 매끄럽다. 또 ICB 증착법의 큰 수직 방향성에도 불구하고 접촉구의 측벽에도 상당한 양의 소오스가 증착 되고 있는 사실과 접촉구 입구 주변에 그림자 효과를 유도할 만한 특별한 결정 성장이나 튀어나움을 볼 수 없다. 우선 수상형 성장 형태가 보이지 않고 측벽에 증착되는 양상은 표면에 도달한 클러스터가 고착되기 전에 웨이퍼 표면을 이동했다는 것을 말해준다. 물론 이러한 효과는 양적으로는 수 %에 지나지 않지만 이온화된 클러스터가 가속되어 표면에 부딪치면서 주위에 도달한 중성 클러스터에 운동에너지를 공급하고, 운동에너지를 공급 받은 중성 클러스터가 상대적으로 긴 표면거리를 이동하였기 때문이다. 또 이온화된 클러스터의 충돌로 인한 스퍼터링 효과도 표면을 매끄럽게 하고 국부적인 결정립의 우선 성장을 방해하는데 기여했을 것으로 보인다.

가속전압을 2 kV로 증가시키고 충분히 두껍게 증착시킨 후의 단면사진을 Fig. 10에서 보여주고 있는데, 완벽하게 메워진 직경 0.5 μm 의 접촉구를 확인할 수 있다. 이온화 클러스터의 운동량 증가로 인하여 증착 표면은 더욱 매끄럽고, 접촉구 측면의 오토평탄한 모습도 사라졌으며, 구리 박막이 벽개 없이 잘 연결된 상태를 확

인할 수 있다. 이 결과는 수직집속 방법을 사용한 스퍼터링 방법으로 0.7 μm 의 접촉구를 메운 구리 박막의 증착 상태보다 우수한 매립도를 나타낸다[4]. 또 Ito 등 [12]은 ICB 방법으로 접촉구에 TiN 층의 증착을 시도한 바 있는데, 그 목적상 접촉구를 두껍게 전부 메우는 것을 시도하지 않았으며 접촉구 측면에 경사가 있음에도 불구하고 바닥도포율도 본 연구 결과 보다 좋지 않았다. 결론적으로 aspect ratio 2, 직경 0.5 μm 의 접촉구의 매립을 위하여 직진성을 향상시키는 동시에 운동량이 큰 이온화된 클러스터의 도움을 받을 필요가 있음을 확인할 수 있다. 이로써 ICB 증착법으로써 마이크로미터 이하의 aspect ratio가 큰 접촉구의 바닥 도포성을 향상시키며 완벽하게 메울 수 있는 가능성을 제시하였다.

4. 결 론

이온화클러스터빔 증착법을 이용하여 0.5 μm 직경의 접촉구를 메우는 연구를 시도하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 이온화클러스터빔 증착법은 초음속의 클러스터 속도와 우수한 소오스의 방향성을 갖도록 제작한 셀 전

극판의 도움으로 작은 접촉구를 향한 소오스의 직진성을 향상시켜 바닥면의 도포성을 향상시킬 수 있는 증착 방법이다.

(2) 구리 증착시 기판온도를 높일 경우 결정립의 성장이 일어나며, 300°C 이상에서 산화막과의 나쁜 *wettability*로 인한 구형화로 인하여 결정립간 연결이 와해되는 경향이 있고, 이는 전기적으로 비저항 값의 급격한 증대로 나타난다.

(3) 중성클러스터로 구리를 증착할 경우 직진성은 매우 우수하나 표면 이동도가 작아 증착이 진행됨에 따라 주상형으로 성장하고, 그림자 효과가 점점 강해지며 단차에서 벽개를 형성하여 불연속적인 박막을 형성하게 된다.

(4) 가속전압을 1 kV 이상으로 인가하였을 때 이온화된 클러스터의 영향으로 중성클러스터의 증착 양상인 주상형 성장 모드는 사라졌다. 특별한 그림자효과를 관찰할 수 없었고, 완전한 바닥면의 도포성을 나타내었으며 접촉구 내 측벽에의 증착으로 박막간의 연결성도 향상되었다.

(5) 이온화 클러스터빔 증착법은 직진성을 향상시켜 바닥 메움을 실현시킬 수 있는 물리적 증착 방법으로 반마이크론미터 이하의 작은 접촉구에서도 그 가능성이 기대된다.

감사의 글

본 논문은 교육부 학술연구조성비 (ISRC 95-E-4008) 와 차세대 반도체기반기술 개발사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또 웨이퍼 패턴을 제공해 준 현대전자(주) 및 ETRI, SEM 사진 촬영에 협조해 주신

KMAC(주) 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. S. Vaidya and A. K. Sinha, *Thin Solid Films* **75**, 253 (1981).
2. K. Hinode, M. Owada, T. Nishida, and K. Munkai, *J. Vac. Sci. Technol.* **B 5**, 518 (1987).
3. C. S. Park, S. I. Lee, J. H. Park, J. H. Sohn, D. Chin, and J.G. Lee, *Proc. VMIC Conf.*, p. 326, 1991.
4. S. M. Rossnegal, D. Mikalsen, H. Kinoshita and J. J. Kuomo, *J. Vac. Sci. Technol.* **A 9**, 261 (1991).
5. T. Takagi, I. Yamada, and A. Sasaki, *J. Vac. Sci. Technol.* **12**, 1129 (1975).
6. T. Takagi, *Ionized-cluster beam deposition and epitaxy*, Noyes Publ., Park Ridge, U.S.A., 1988.
7. K. Matsubara, I. Yamada, N. Nagao, K. Tominaga, and T. Takagi, *Surf. Sci.* **86**, 290 (1979).
8. I. Yamada, H. Usui, and T. Takagi, *J. Phys. Chem.* **91**, 2463 (1987).
9. T. T. Kudas and M. J. Hampden-Smith eds., *The chemistry of metal CVD*, p. 211, VCH Publ., Weinheim, U.S.A., 1994.
10. S. R. Wilson, C. J. Tracy, and J. L. Freeman, Jr. eds., *Handbook of multilevel metallization for integrated circuits*, p. 189, Noyes Publ., Park Ridge, U.S.A., 1993.
11. R. F. Bunshah ed., *Handbook of deposition technologies for films and coatings*, p. 210, Noyes Publ., Park Ridge, U.S.A., 1994.
12. H. Ito, N. Kajita, H. Yoshida, and T. Ina, *Jap. J. Appl. Phys.* **31**, 4396 (1992).