

반도체 산업용 AlN 소재 개발

글 _ 이성민, 김도경*

요업(세라믹)기술원 엔지니어링세라믹본부, *한국과학기술원 신소재공학부

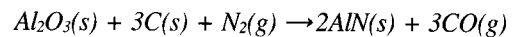
1. 서론

이론 열전도도가 320 W/mK에 달하는 질화알루미늄(AIN)은 고열전도를 가지는 대표적인 세라믹 소재로 반도체 생산공정의 다양한 분야에서 주목받고 있다. 특히 AIN 소재는 열팽창계수가 실리콘과 유사하고 할로젠 플라즈마에 대하여 높은 저항성을 보여주기 때문에 반도체 공정장비용 소재로서 응용이 확대되고 있다. 최근에는 반도체 소자의 선폭이 수십 nm 이하로 줄어들어 따라 증착 및 식각공정에서 신속한 승온, 냉각과 더불어 웨이퍼의 온도를 위치에 따라 균일하게 제어하는 것이 장비

용 소재의 핵심요소가 되고 있다. 또한 2012년부터 예정되어 있는 대면적 450 mm 실리콘 웨이퍼의 도입으로 인해 웨이퍼상에서 온도 균일도를 확보하는 것이 매우 중요한 이슈가 되고 있다.

Fig. 1은 AIN 소재가 사용되는 대표적인 반도체 장비용 부품을 보여주고 있다. AIN 소재가 히터와 정전척에 사용되는 경우 웨이퍼의 균일한 온도분포를 확보하기 위하여 소재의 높은 열전도도가 요구된다. 동시에 웨이퍼 착탈에 필요한 고전압을 내부전극에 인가하기 때문에 AIN 유전층의 전기적 특성을 제어하는 것이 필요하다. 한편 고열전도도인 AIN 소재가 CVD 장치의 가스 노즐에 적용될 경우 CVD 공정챔버에 투입되는 반응성 가스의 활성도를 증가시킬 수 있기 때문에 노즐용 소재로 AIN 소재의 채용이 확대되고 있다. 이외에도 AIN 소재의 우수한 내플라즈마성을 활용하여 링, 플레이트 등과 같은 장비용 내부 부품으로도 AIN이 널리 사용되고 있다.

현재 반도체 산업에서 상용으로 사용되는 대부분의 AIN 원료소재는 Al₂O₃ 전구체를 질소분위기에서 carbothermal reduction 공정을 통하여 처리하여 제조되고 있다. Carbothermal reduction 공정을 간단히 나타내면 다음과 같다.^{1,2)}



상기의 공정을 통하여 AIN 분말을 제조하게 되는 경우 잔류하는 탄소량을 적절히 제어하면서도 전구체의 산소량을 완전히 제거하기 어려운 문제가 있다. 따라서 상용 고품질 AIN 분말은 약 0.8 wt% 이상의 산소를 포함

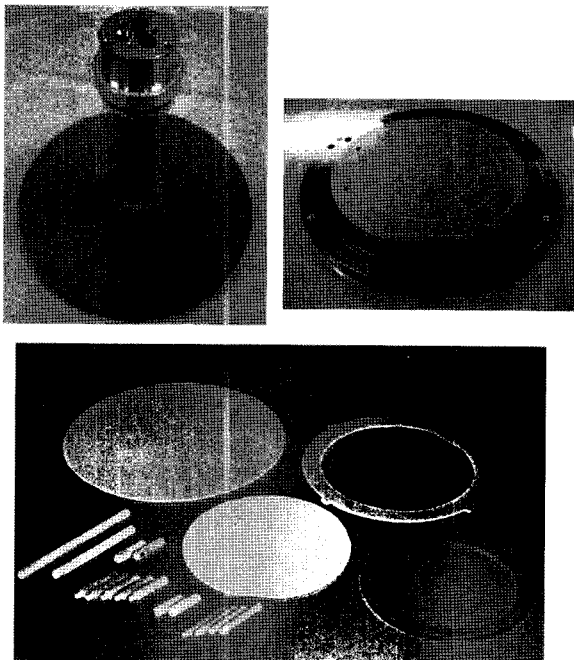
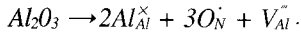


Fig. 1. AIN 소재가 적용된 반도체 공정장비용 부품: 정전척, 히터, 노즐, 링, 플레이트(출처: 솔믹스, 코미코).

하고 있으며 이 산소는 AlN 분말의 표면뿐만 아니라 AlN 분말의 내부에도 존재하게 된다. Slack 등에 따르면 산소는 다음과 같은 반응을 통하여 AlN 입자내로 용해 되는 것으로 알려져 있다.³⁾



따라서 잔존하는 산소는 AlN 격자내에 높은 농도의 점결함을 생성하고 이것이 AlN의 열전도도 및 전기전도도에 주요한 영향을 미치게 된다.

AlN 분말에 포함된 산소는 Y_2O_3 등과 같은 소결조제와 반응하여 치밀화를 촉진시키는데 중요한 역할을 한다. 예를 들어 0.85 wt%의 산소는 약 1.8 wt%에 해당하는 Al_2O_3 의 역할을 할 수 있다. 따라서 분말 공정중의 AlN 분말의 추가적인 산화를 배제한다면, AlN 소결과정의 액상형성 온도가 Y_2O_3 소결조제의 함량에 따라 크게 달라지게 된다. Fig. 2에서와 같이 1 wt%의 Y_2O_3 소결조제가 첨가된 경우 소결과정 중의 액상형성 온도가 1760 °C가 되는 반면에 5 wt%가 첨가된 경우 1875°C 이상이 된다. 따라서 소결조제의 함량에 따라 소결조건이 크게

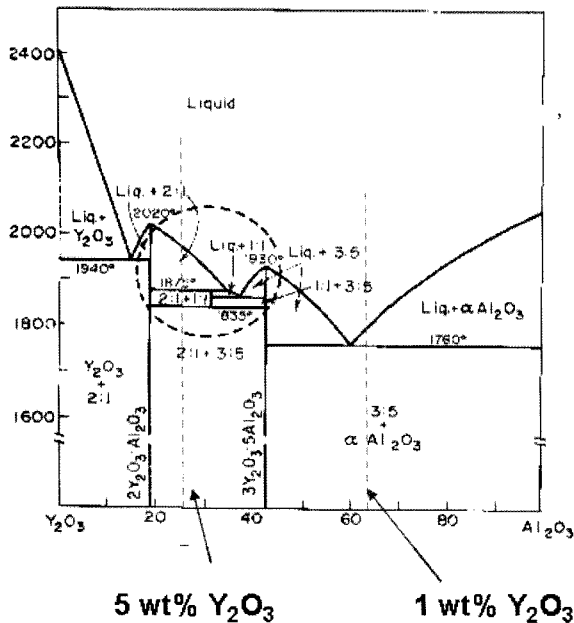


Fig. 2. Al₂O₃-Y₂O₃ 상태도와 Y₂O₃ 첨가량에 따른 소결조제의 가상적 조성위치.

달라질 뿐만 아니라 그에 따른 미세구조 또한 크게 변화하게 된다.

2. AlN 소재의 고열전도도화

AlN 소재의 열전도도는 크게 두 가지 요소로 결정된다. 하나는 높은 열전도도를 가지는 AlN 결정입자이며, 다른 하나는 소결 조제와 반응하여 생성된 낮은 열전도도를 가지는 이차상이다. AlN의 소결과정에서 소결 조제는 AlN 입자의 Al₂O₃와 결합하여 산화물계 이차상을 형성함으로써 AlN 격자내의 산소에 기인한 결함을 줄이고 AlN 입자의 열전도도를 향상시킨다. 그러나 입계에 형성된 이차상은 그 자체로서 낮은 열전도도를 가지고 있기 때문에 소결체 전체의 열전도도를 낮추는 역할 또한 하게 된다. 따라서 고열전도도를 달성하려면 AlN 결정립의 열전도도를 높이면서도, 낮은 열전도도를 갖는 이차상을 줄이거나 제어하는 방법이 필요하다.

AlN 입자자체의 주요한 결함으로는 질소 원자 자리에 산소가 치환된 점결함, 알루미늄자리의 공공, 그리고 두 결함의 복합체 등이 있으며 추가로 Si, C과 같은 AlN 입자내에 고용이 이루어지는 불순물을 들 수 있다. 실험적으로 AlN 격자 내의 산소 농도에 따라 이러한 결함의 다양한 형태가 보고되고 있다.^{4,5)} 이러한 AlN 격자 내에 결함은 격자 내의 열을 전달하는 포논을 산란시켜 AlN 결정립의 열전도도를 감소시킴으로 고순도 원료의 사용,

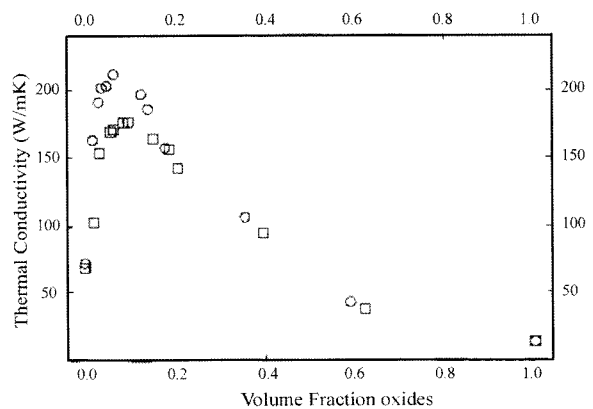


Fig. 3. AlN에서 이차상의 부피분율에 따른 열전도도 (1850°C, - □ 100 분 ○ 1000 분).⁶⁾

소결조제의 사용으로 인한 산소의 제거 등이 필요하게 된다.

그러나 소결조제의 과도한 사용은 오히려 소결체의 열전도도를 낮추는 역할을 한다. 소결조제의 양이 많아질수록 AlN 결정입자의 열전도도는 높아지지만 낮은 열전도도를 갖는 이차상이 많이 형성됨으로 소결조제의 양에 따라 열전도도가 증가하였다가 감소하는 경향이 나타난다. Fig. 3에 Y₂O₃를 소결조제로 사용한 AlN 세라믹스에서 소결조제의 양에 따라 생성된 이차상의 부피 분율에 따른 열전도도의 변화를 나타내었다.⁶⁾

고열전도도를 얻기 위하여 이차상의 양뿐만 아니라 이차상의 형상을 조절하는 연구도 이루어졌다. Kim 등은 고열전도도 AlN 세라믹스를 얻기 위하여 열전도도가 낮은 이차상의 형상을 조절하였다.⁷⁾ Y₂O₃를 소결조제로 사용하여 1900°C에서 2시간 소결한 AlN 시편을 60°C/min의 빠른 속도로 냉각하면 이차상이 서로 연결되는 미세구조가 나타난다. 하지만 3°C/min의 느린 속도로 냉각하면 이차상이 결정립 모서리에 고립되는 미세구조가 나타난다. 이는 고상-액상 계면 에너지와 고상-고상 계면 에

Table 1. 1800°C 에서 소결한 후 1900°C에서 열처리한 시편의 산소 및 이트륨 농도, 입계상, 열전도도⁹⁾

	1800°C for 1 h	1900°C for 20 h	1900°C for 100 h
Oxygen (grain)	0.29 mass%	0.14 mass%	0.02 mass%
Yttrium	4.11 mass%	0.20 mass%	0.03 mass%
Grain-boundary phases(s) present	Al ₂ Y ₄ O ₉ , Y ₂ O ₃	None	None
Thermal conductivity (W/mK)	148	220	272

너지의 온도에 따른 변화에 의하여 이차상의 이면각이 달라지는 현상을 이용한 것이다.

Fig. 4는 이차상이 서로 연결된 미세구조와 이차상이 결정립의 모서리에 고립된 미세구조를 나타내었다. 또한 소결조제로 사용한 Y₂O₃의 양에 따른 AlN 소재의 열전도도를 Fig. 4의 (c)에 나타내었다. 1900°C에서 2시간 소결한 후 빠르게 냉각한 시편은 소결조제의 양에 따라 150~170 W/mK의 열전도도를 나타내는데 비하여 같은 조건으로 소결한 후 천천히 냉각하여 이차상이 고립된 미세구조를 갖는 AlN은 170~190W/mK의 높은 열전도도를 나타내었다. 이는 이차상의 형상이 AlN 세라믹스의 열전도도에 큰 영향을 끼치는 것을 잘 보여주고 있다.

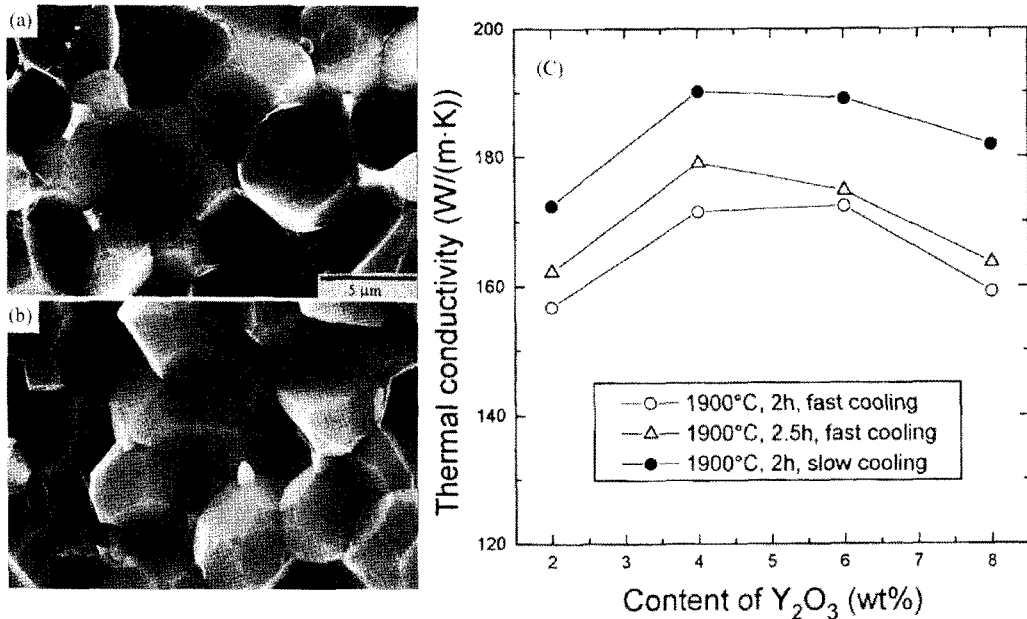


Fig. 4. AlN 시편의 SEM 미세구조 사진 (a) 이차상이 서로 연결된 구조 (b) 이차상이 결정립 모서리에 고립된 구조, (c) 각 미세구조별 소결조제의 양에 따른 열전도도⁷⁾

AlN 세라믹스에서 장시간 열처리 공정을 통해 이차상을 제거함으로써 고열전도도를 달성하는 연구가 많이 진행되어 왔다. 환원 분위기 혹은 질소 분위기에서의 장시간 열처리는 AlN 격자 내의 산소 농도를 낮추어 열전도도를 높이며, 이차상 또는 입계에 존재하는 비정질의 필름을 제거하여 매우 높은 열전도도를 가능하게 한다. Ichinose는 Y_2O_3 소결조제를 이용하여 소결한 AlN 시편을 탄소환원 분위기에서 장시간 열처리하여 고열전도도 AlN 세라믹스를 제조하였다.⁸⁾ 1800°C에서 1시간 소결한 AlN 시편의 열전도도는 약 155 W/mK를 나타내었으며, 이 시편을 1600°C에서 환원 탄소 가스 분위기로 최대 64시간 동안 열처리 하여 250 W/mK의 열전도도를 얻었다. Nakano 등은 Y_2O_3 를 소결조제로 질소분위기의 1800°C에서 1시간 소결한 AlN 세라믹스를 질소분위기의 1900°C에서 20시간, 100시간 열처리하였다.⁹⁾ 열처리 시간이 늘어날수록 이차상의 양이 줄어들고 100시간 열처리한 시편의 경우 이차상을 찾아볼 수 없었다. 또한 입계에 존재하는 비정질 필름의 두께도 열처리 시간이 늘어남에 따라 감소하는 결과를 보여주었다. 동시에 AlN

결정립의 산소 농도는 열처리 시간이 늘어남에 따라 큰 폭으로 감소하였다(Table 1). 그러나 장시간 후열처리 공정을 활용한 고열전도도 세라믹스를 제조하는 방법은 경제성에는 많은 문제점을 가지고 있기 때문에 경제적인 새로운 방법의 개발이 필요한 실정이다.

AlN 세라믹의 열전도도를 효과적으로 향상시키기 위하여 소결조제의 크기효과에 대한 연구가 이루어졌다. 소결조제는 AlN 세라믹스의 소결에 주로 사용되는 Y_2O_3 분말을 사용하였으며, 사용한 Y_2O_3 분말을 Fig. 5의 (a), (b)에 나타내었다. Fig. 5의 (a) 분말은 상용 Y_2O_3 분말로 판상형태의 1~10 μm 의 크기를 가지고 있으며 (b) 분말은 나노 Y_2O_3 분말로 구상형태의 5~10 nm 크기를 나타내었다. 실험에 사용된 AlN 분말의 크기는 약 200~500 nm 정도로 AlN 분말을 소결조제와 혼합하였을 때, 나노 Y_2O_3 분말은 AlN 분말 사이에 고루 퍼져 있는 형태를 가지나, 상용 Y_2O_3 분말을 사용한 경우 큰 덩어리의 Y_2O_3 분말 사이에 AlN 분말이 붙어 있는 형태를 나타내었다. 1~7 wt%의 Y_2O_3 소결조제와 혼합한 AlN 분말을 질소 분위기에서 1900°C에서 3시간 동안 소결하여 미세

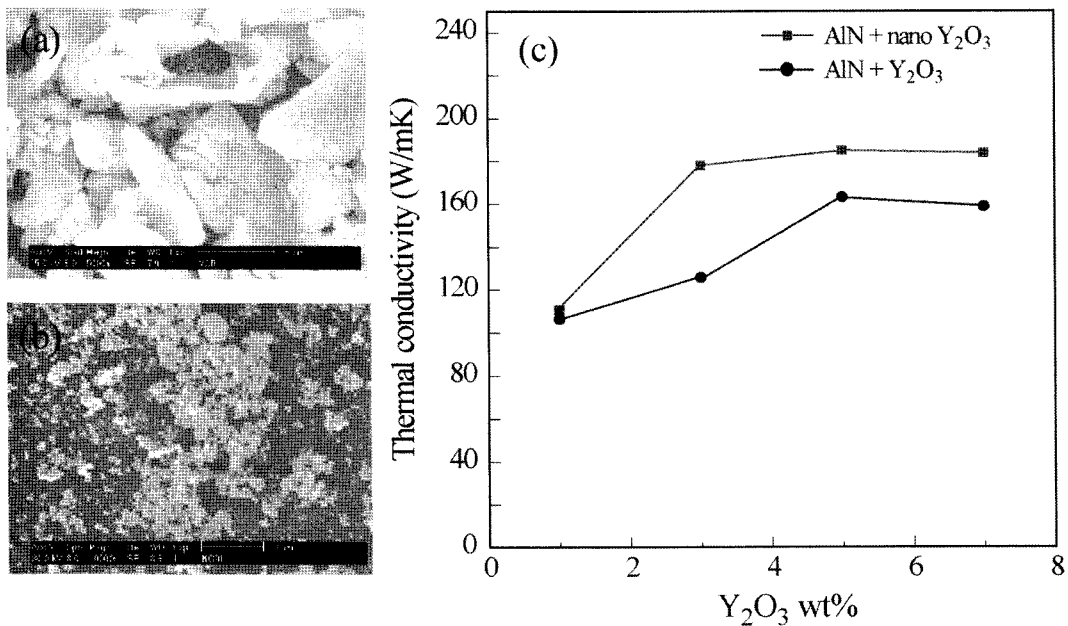


Fig. 5. 소결조제로 사용한 Y_2O_3 분말의 주사전자현미경사진 (a) 상용 Y_2O_3 분말, (b) 나노 Y_2O_3 분말, (c) 각 조건에서 소결한 AlN 세라믹스의 열전도도

구조와 열전도도를 측정하였다. 나노 Y_2O_3 분말을 사용한 AlN 시편의 경우 이차상이 AlN 결정립 주위에 고르게 퍼져있으나, 상용 Y_2O_3 분말을 사용한 시편은 이차상이 부분적으로 뭉쳐있는 형태를 보였다. 각 조건에서의 열전도도를 측정한 결과 나노 Y_2O_3 분말을 사용한 경우 최대 50%의 열전도도 향상을 나타내었고, 3~7 wt%의 나노 Y_2O_3 첨가시 약 180~185 W/mK의 높은 열전도도를 얻을 수 있었다.

3. AlN세라믹스의 전기전도도 제어

지금까지 대부분의 AlN 연구는 열전도도 향상에 집중되었으며 AlN 소재의 전기적 특성에 대한 연구는 매우 미진한 형편이었다. AlN을 히터, 정전척 등과 같은 능동 부품에 응용하기 위하여서는 소재의 전기적 특성에 대한 이해가 필요하다. 이 경우 AlN 소재 내부에 금속 전극을 매설하고 전류를 흘려 웨이퍼를 가열하거나, 웨이퍼를 균일하고 안정되게 탈착하기 위하여 전극에 고전압을 인가하여 정전기적인 힘을 사용하기 때문이다.

정전기력을 이용한 대표적인 웨이퍼 고정 기구로는 쿨롱법과 존슨-라백법이 알려져 있다(Fig. 6).^{10,11)} 쿨롱법은 웨이퍼와 금속전극사이에 $10^{15} \Omega\text{-cm}$ 고저항 유전체가 존재하고 1000~2000V의 고전압을 금속전극에 인가함에 따라 정전기력에 의한 힘으로 웨이퍼를 고정하는 방법이다. 이와 비교하여 존슨-라백법은 $10^8 \sim 10^{12} \Omega\text{-cm}$ 정도의

비저항을 갖는 유전체를 사용하고 금속전극에 수백 V의 전압을 인가하여 웨이퍼를 고정하게 된다. 한편 AlN 히터와 같은 경우에는 유전체 내부에 배선된 금속전극패턴에 전류가 흐름에 따라 발열이 일어나게 되며 유전체의 저항이 낮은 경우 누설전류가 과도하게 발생하는 문제가 발생된다. 따라서 AlN 소재를 히터와 정전척 등의 용도에 적용하기 위하여서는 수백~2000V의 고전압 조건에서 AlN소재의 비저항을 $10^8 \sim 10^{16} \Omega\text{-cm}$ 범위에서 제어하는 것이 필요하다. 특히 400°C 이상이면 AlN 소재의 저항이 급격히 낮아지는데 이를 극복하고 히터 등의 용도로 활용하기 위하여서는 AlN 소재의 고온 비저항을 확보하는 것이 필수적이다.

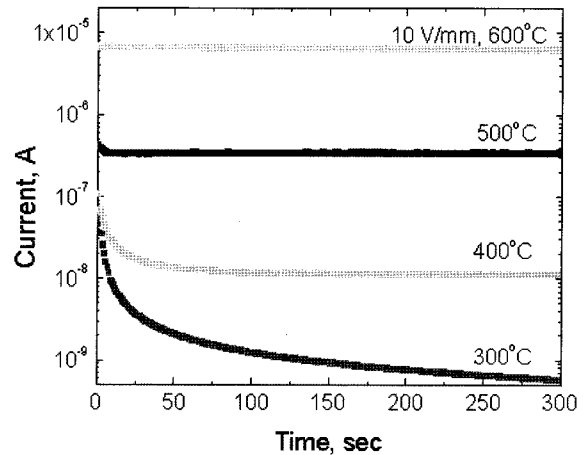


Fig. 7. 1 wt% Y_2O_3 가 첨가된 AlN의 측정온도의 변화와 측정시간에 따른 전류변화.¹²⁾

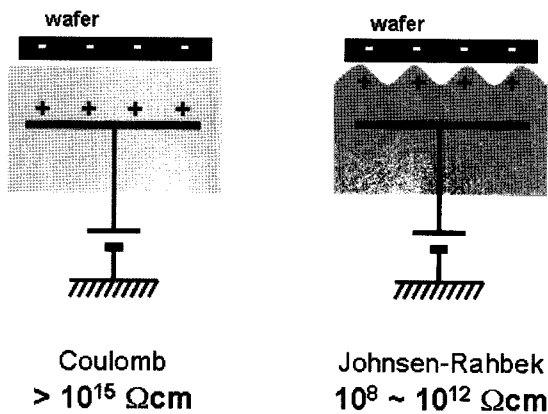


Fig. 6. 대표적인 정전척의 동작기구.

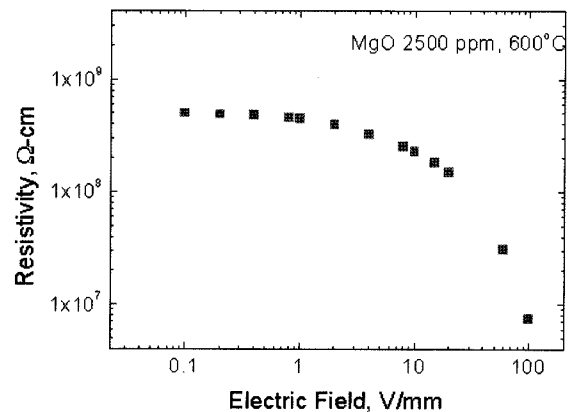


Fig. 8. 1 wt% Y_2O_3 (2500ppm MgO)가 첨가된 AlN의 전계강도에 따른 60초후 비저항 변화.

Fig. 7은 1 wt% Y_2O_3 가 첨가된 시험편을 1850°C에서 소결한 후 10 V/mm의 전계하에서 측정 온도에 따른 전류의 변화를 관찰한 것이다. 측정시간이 경과할수록 시험편의 전류량이 감소하는 것이 관찰되었고 측정온도가 높을수록 일정한 전류값에 빨리 도달하였다. 즉 소재의 비저항은 측정온도, 측정시간에 따라 크게 달라진다. 측정시간에 따른 전류의 변화는 일반적으로 전자 전도도와 함께 이온 전도도를 동시에 가지는 소재에서 나타나는 현상으로 금속전극이 이온 전달을 차단하여 시험편 내에 이온에 의한 공간전하분극(space polarization)이 일어나기 때문이다. AlN 소재의 경우 이온 전달이 가능한 점결함으로 산소치환 점결함, 질소공공을 들 수 있는데 이중 질소공공이 이온전도의 주 전하전달자로서 가능성이 높다.

한편 AlN 소재의 비저항은 측정 전압에도 크게 의존한다. Fig. 8은 전압인가 후 60 초가 지났을 때의 전류를 기준으로 비저항을 계산하였을 때 측정전계의 크기에 따라 비저항이 변화하는 모습을 보여주고 있다. 일반적인 AlN 소재는 측정전압이 높을수록 낮은 비저항을 보이고, 비저항이 낮은 소재일수록 비저항의 변화폭이 크다. 이러한 특성 변화정도를 다음식의 비선형계수 α 로 표시한다.

$$I = kV^\alpha$$

여기서 I 는 전류, V 는 전압, k 는 상수이다. 만약 일반

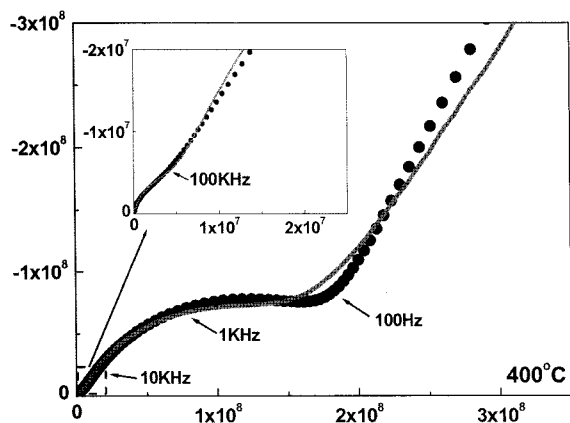


Fig. 9. AlN 소재의 impedance spectroscopy 해석: 5 wt% Y_2O_3 첨가, 1750°C 3h 소결.¹⁴⁾

적인 저항체라면 α 가 1의 값을 가지나 AlN 소재의 경우 1~4 정도의 범위에서 다양한 값을 가지고 있다.¹³⁾

따라서 AlN 소재에서 DC 비저항을 정의하고 값들을 비교하기 위하여서는 명확한 측정 기준이 필요하다. 즉 측정전계의 크기를 명시하고 측정을 개시한 후 얼마의 시간이 경과하였을 때의 전류값으로 저항을 계산하였는지 명시할 필요가 있다. 만약 측정 조건이 동일하지 않다면 비저항 값을 그대로 비교하기 어렵다. 일반적인 절연체의 경우 250, 500 V/mm의 전계를 사용하며 측정 개시 60초 이후의 전류값으로 DC 비저항을 계산하고 비교한다.

AlN 소재가 가지는 또 한 가지 특징으로는 입자자체의 저항뿐만 아니라 입계의 저항 또한 중요한 점이다. 만약 AlN 세라믹스가 입자에 의한 저항만이 나타난다면

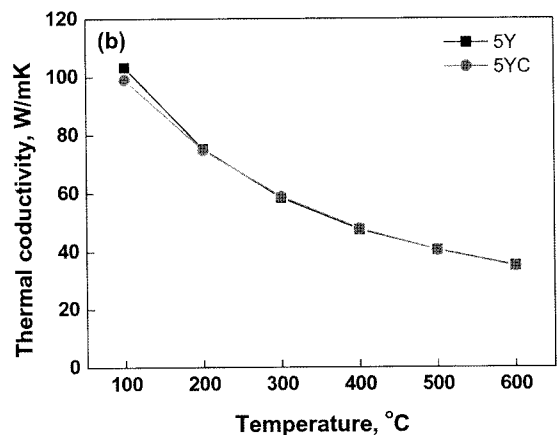
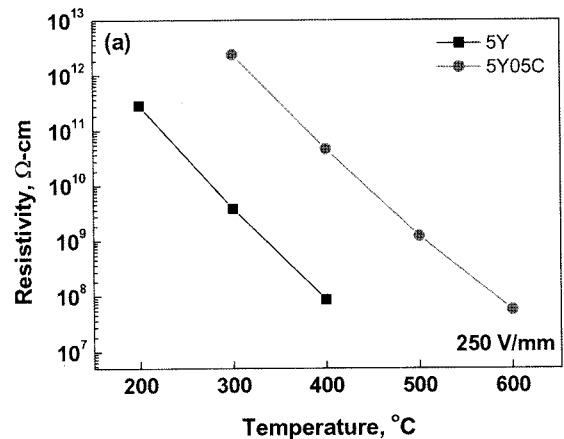


Fig. 10. Y_2O_3 가 첨가된 AlN 소재의 DC 비저항 및 열전도도 : 5Y(5 wt% Y_2O_3), 5YC(5 wt% Y_2O_3 + 0.5 wt% C, carbothermal reduction).¹⁴⁾

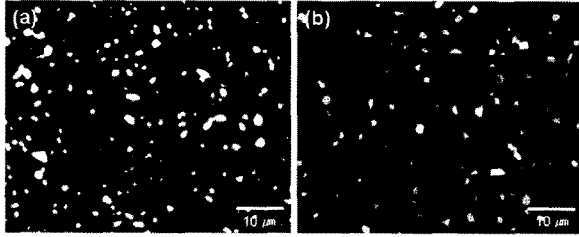


Fig. 11. Y_2O_3 가 첨가된 AlN 소재의 미세구조: (a) 5Y(5 wt% Y_2O_3), (b) 5YC(5 wt% Y_2O_3 +0.5 wt% C, carbothermal reduction).¹⁴⁾

impedance spectroscopy의 고주파영역에서 입자내의 질소 공공의 이온 전도도에 의한 R-C 회로의 성분과 저주파영역에서 전자전도도에 의하여 전극에서 나타나는 R-C 회로에 의한 성분만이 나타나야 한다. 그러나 대부분의 AlN에서 그 사이에 하나의 R-C 성분이 더 나타나게 되는데 이는 입계에 의한 결과라고 추정된다(Fig. 9).

5 wt% Y_2O_3 가 첨가되고 1750°C에서 소결된 AlN의 경우 impedance spectroscopy로부터 입자내의 이온전도도와 소결체 전체의 전자전도도를 대략적으로 구별할 수 있는데 이온전도도가 전자전도도 보다 월등히 높은 것으로 나타났다. 따라서 AlN 소재의 고저항을 달성하기 위하여는 AlN 소재의 결합화학을 이해할 필요가 있다.

Fig. 10은 AlN의 고저항을 달성하기 위한 최근의 시도를 나타낸 것이다. AlN의 분말 성형과정중에 미량의 탄소를 첨가하고 소결과정중에 1400°C에서 carbothermal reduction을 유도함으로써 열전도도의 저하없이 고저항을 달성하였다. 이와 같이 carbothermal reduction을 이용한 소재는 분말 공정중에 들어간 산소가 제거되고 결과적으로 산화물의 양이 줄어들게 됨으로 이차상의 양 또한 감소하게 된다. 이차상은 그 자체로서 열전도도 저하의 원인이 됨으로 carbothermal reduction은 열전도도 향상에도 기여할 수 있을 것이다. 특히 이차상의 양이 줄어들어 따라 AlN 소재가 플라즈마에 노출되었을 때 내식각성이 높은 yttrium-aluminate계 이차상이 선택적으로 표면에 노출됨으로써 오염입자가 발생하는 원인을 줄일 수 있다. 5 wt% Y_2O_3 를 첨가하였을 때 carbothermal reduction의 유무에 따른 미세구조의 차이를 Fig. 11에

나타내었다. Carbothermal reduction의 도입이 입계상의 양을 감소시키는데 크게 영향을 주었음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고열전도도를 특징으로 하는 AlN 소재의 열적 전기적 특성을 향상시키는 방법을 찾고자하였다. 열 및 전기적 특성은 모두 AlN 입자내에 존재하는 점결함에 크게 의존한다는 점에서는 공통점이 있다. AlN의 가장 일반적인 점결함으로는 질소공공을 들 수 있고 이는 산소가 질소자리에 치환됨에 따라 발생하게 된다. 따라서 AlN의 열적 전기적 특성을 향상시키기 위하여서는 AlN 입자자체의 산소의 함량을 제어하는 것이 매우 중요하다. 동시에 저열전도도를 가지는 입계상의 양과 형상을 제어함으로써 추가적인 열전도도 향상을 기대할 수 있다. 그러나 AlN 소재의 점결함에 대한 제어와 입계상이 전기적, 열적인 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 아직까지 충분하지 않은 실정으로 향후 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 기술보고서는 지식경제부 소재원천기술개발사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. H. U. Joo and W. S. Jung, *J. Mater. Process. Technol.*, 204 498-501 (2008).
2. S. Xi, X. Liu, P. Li and J. Zhou, *J. Alloys Compd.*, 457 452-456 (2008).
3. G. A. Slack, R. A. Tanzill, P. O. Pohl and J. W. Vandersande, *J. Phys. Chem. Solids*, 48, 641 (1987).
4. L. E. McNeil, M. Grimsditch, and R. H. French, *J. Am. Ceram. Soc.*, 76, 1132 (1993).
5. R. A. Youngman and J. H. Harris, *J. Am. Ceram. Soc.*, 73, 3238 (1990).
6. T. B. Jackson, A. V. Virkar, K. L. More, R. B. Dinwiddie, Jr., and R. A. Cutler, *J. Am. Ceram. Soc.*, 80 [6] 1421-35 (1997).



7. W. J. Kim, D. K. Kim, and C. H. Kim, J. Am. Ceram. Soc., 79 [4] 1066-72 (1996).
8. N. Ichinose, Mater. Chem. Phys., 42 176-180 (1995).
9. H. Nakano, K. Watari, and K. Urabe, J. Eur. Ceram. Soc., 23 1761-68 (2003).
10. R. Atkinson, Brit. J. Appl. Phys., 2 [2] 325-32 (1969).
11. T. Watnabe, T. Kitabayashi and C. Nakayama, J. Appl. Phys., 2 [2] 2145-50 (1992).
12. W. J. Lee, H. T. Kim and S. M. Lee, J. Kor. Ceram. Soc., 45 [1] 69-74 (2008).
13. 출원번호 10-2003-0024640, 대한민국특허청.
14. H. S. Kim, J. M. Chae, Y. S. Oh, H. T. Kim, K. B. Shim and S. M. Lee, Submitted to Ceramics Int. (2009).

●● 이성민



- 1999년 한국과학기술원 재료공학과 박사
- 1999년-2001년 (주)대구텍 선임연구원
- 2001년-현재 요업(세라믹)기술원

●● 김도경



- 1984년 한국과학기술원 재료공학과 박사
- 1987년-1994년 국방과학연구소
- 1997년-1998년 미국 표준연구원(NIST) 객원연구원
- 1994년-현재 KAIST 재료공학과 조교수, 부교수, 교수
- 2005년-2007년 KAIST 나노기술연구소 소장
- 2007년-2008년 미국 Univ. of California Berkeley, 방문교수