

반응성 스퍼터링으로 제조한 MIS 소자용 AlN 절연박막의 전기전도 메커니즘

論 文

56-4-16

Electrical Conduction Mechanism of AlN Insulator thin Film Fabricated by Reactive Sputtering Method for the Application of MIS Device

秋 順 男[†] · 朴 正 哲^{*} · 權 廷 烈^{**} · 李 憲 用^{***}

(Soon-Nam Chu · Jung-Cheul Park · Jung-Youl Kwon · Heon-Yong Lee)

Abstract - We have studied the variable conditions of reactive sputtering to prepare AlN thin film. The leakage current showed below 10^{-9} A/cm² at the deposition temperature of 250°C and 300°C in the field of 0.1 MV/cm, and it was gradually increased and to be saturated in 0.2 MV/cm. The C-V characteristics of the above mentioned deposition temperature conditions showed a deep depletion phenomenon at inversion region. The C-V characteristics showed similarly under the DC power conditions of 100 and 150 W but were degraded at 200W. When the DC power was 100, 200, and 300 W the dielectric breakdown phenomenon was shown in 2.8, 3.2 and 5.2 MV/cm, respectively. It was found that AlN film was dominated by Poole-Frenkel conduction mechanism.

Key Words : AlN thin film, leakage current, Poole-Frenkel conduction mechanism

1. 서 론

질화알루미늄(AlN)은 알루미늄과 질소원자가 공유결합을 한 육방형의 Würtzite 결정구조의 비금속 질화물로서 매우 높은 열전도도($k=2$ W/cm·K), 낮은 열팽창계수($\sim 10 \times 10^{-6}$ /K), 매우 큰 전기저항($>10^{13}$ Ω·cm), 적당한 유전특성(8.5 ± 0.2) 및 기계적 강도 등의 특성을 갖기 때문에 반도체 소자의 기판, 절연재료, 내열재료 및 광전재료 등으로 많은 응용이 되고 있다. 또한 넓은 에너지 금지대폭(6.2eV)을 가진 III-V족 화합물반도체로서 절연성이 크고, 광 투과성이 좋기 때문에 보호막으로써의 장점을 가지고 있다. 따라서 이러한 특성을 이용한 소자의 제조 및 물성에 관한 연구가 많이 진행되고 있다.

MIS 소자에서의 AlN은 절연막으로 응용이 기대되고 있는데, 이것은 AlN의 열팽창계수가 Si 이나 GaAs 기판과 유사하기 때문에, 열응력의 유발이 거의 없고, 또한 다른 절연막(Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiO_2 , $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$, Ta_2O_5 등)에 비하여 높은 열전도도를 가지기 때문에 단위시간당의 방열처리가 문제되는 반도체 소자에 응용이 되고 있다. AlN 박막을 이와 같은 MIS 소자의 절연막으로 이용하기 위해서는 높은 C-V 특성과 높은 절연파괴전압 특성을 갖는 고밀도의 비정질막이 요구되며, 특히 GaAs와 같은 화합물 반도체에서는 낮은 증착 온도가 필수적이다.

AlN 박막의 제조방법은 금속 유기체 화학 증착법

(MOCVD)과 플라즈마 화학 증착법(PECVD) 등의 공정이 개발됨에 따라 증착속도의 향상, 박막 내에 잔류하는 산소 함량의 감소와 더불어 상당히 향상되었다.[1-4]

또한 마그네트론 스퍼터링,[5,6] 이온 플레이팅,[7] 이온 주입법,[8] 이중 이온빔 증착법[9,10] 등의 물리 증착법(PVD)에 의해 c-축 배향성이 강한 다결정질 AlN 박막의 합성이 보고되어 왔다. 그러나 지금까지 보고되어 온 AlN 박막의 에피택셜 성장은 1000°C가 넘는 고온 공정을 필요로 하고 있어 소자 제조를 위한 적정 공정 온도(약 600°C 이하)를 지나치게 넘어서고 있어 낮은 온도에서 AlN 박막을 제조할 수 있는 반응성 스퍼터링법이 많이 사용되고 있다. 스퍼터링시에는 초기진공도, 스퍼터링 가스와 잔류가스, 스퍼터링 압력, DC/RF 전력 그리고 기판온도와 같은 여러 가지 변수들이 있으므로 이를 최적화하는 것이 중요하다. 특히 GaAs MIS 소자 제조시 증착온도와 DC 전력은 소자의 전기 전도기구 특성에 영향을 줄 것으로 예측되는데 이에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 저온에서 제작이 가능한 반응성 스퍼터링법으로 Al/AlN/GaAs 커패시터를 제조할 때 증착온도와 DC 전력에 따른 전기적특성과 전기전도기구에 대해 고찰하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 시편은 비저항 값이 $0.78 \sim 4$ Ω·cm의 값을 갖는 n-type (100) 방향의 갈륨비소 웨이퍼를 사용하였다. 갈륨비소 웨이퍼는 아세톤과 에틸알콜에서 각각 10분간 초음파세척 처리를 한 후 자연 산화막을 제거하기 위하여 HCl 용액에 10분간 처리한 후 질소가스를 이용하여 송풍 건조하였다. 타겟 표면에 형성된 불순물(주로 산화물)과 초기의 불안정한 상태의 플라즈마를 안정화시키기 위하여 아르곤과 아르곤+질소분위기에서 각각 10분과 20분씩 예비 스

[†] 교신저자, 正會員 : 暎園大 工大 電氣 · 消防學部 副教授
E-mail : snchu@kwc.ac.kr

^{*} 非 會 員 : 暎園大 電子 · 情報通信工學部 教授

^{**} 正 會 員 : 明知大 工大 電氣工學科 研究員

^{***} 正 會 員 : 明知大 工大 電氣工學科 教授

接受日字 : 2006年 11月 30日

最終完了 : 2007年 1月 20日

퍼터링을 하였으며 그 후에 AlN박막을 증착하였다. 위의 스퍼터링 조건을 표 1에 나타내었다. I-V 특성은 pA Meter/DC Voltage Source(HP Model 4145B), C-V 특성은 C-V Meter(HP 4192A LF IMPEDANCE ANALYZER)를 이용하여 측정하였다.

표 1 AlN 박막의 증착 조건

Table 1 Deposition condition of AlN thin film.

타겟	Aluminum(5N, 3inch)
타겟-기판 거리	8.5cm
초기진공도	3.0×10^{-6} Torr
DC 전력	100~200W
스퍼터링 압력	5mTorr
기판온도	200~300℃
총 가스 유량비	8sccm(Ar:4sccm+N ₂ :4sccm)

3. 결과 및 고찰

그림 1은 증착온도 변화에 따른 누설전류밀도변화를 나타낸 것이다. 인가전압 변화에 따른 변화를 살펴보면, 250℃, 300℃에서 증착된 AlN박막의 경우 0.1MV/cm까지는 10^{-9} A/cm² 이하의 낮은 누설전류 특성을 나타내고, 0.2 MV/cm 이상에서는 서서히 증가하다가 포화되는 현상을 보이고 있다. 200℃에서 증착된 AlN박막의 경우를 보면, 0.5MV/cm까지는 서서히 누설전류가 증가하다가 0.5 MV/cm 이상에서는 전계변화에 따라서 급격히 누설전류가 증가하는 현상을 보이고 있음을 알 수 있다. 절연막과 GaAs의 계면에서는 격자의 약 12 % 부정합과 결함의 단절로 인한 땀글링결함(dangling bond), 불순물 등으로 계면트랩위치(interface trap site) 등이 존재하게 되는데, 터널링에 의하여 전도가 이루어지는 경우 계면트랩위치에 이들이 포집되어 이들이 포화하는 동안 누설전류는 포집되어 일정한 값을 가지게 된다. 이는 200℃에서 증착된 AlN박막의 경우, 계면에 다양한 계면상태가 연속적으로 존재하여 금지대역이 뚜렷이 정의되지 않고 연속적인 모양을 가지는 비정질상이기 때문에 사료된다. 200℃에서 증착된 AlN 박막에 비해 250℃와 300℃에서 증착된 AlN 박막은 구조배열이 잘 되어 전기적 특성이 향상된 것으로 보이나, 300℃에서는 GaAs 기판의 특성상 비소가 휘발되어 격자결함이 일어나 박막의 질이 다소 저하된 것으로 사료된다.

그림 2는 200℃, 250℃, 300℃의 증착온도에서 제조된 AlN박막의 C-V특성곡선을 보인 것이다. C-V특성곡선의 특징을 살펴보면 양(+)의 플랫폼전압을 가지고 인가전압에 따라 시계방향의 이력(clockwise hysteresis)을 가지고 있는 것으로 나타났다.

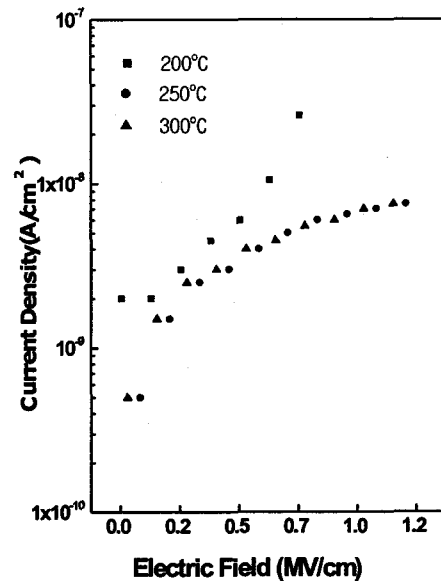


그림 1 증착온도 변화에 따른 I-V 특성곡선
(DC 전력 : 150W)

Fig. 1 The characteristic I-V curves at the different deposition temperature (DC power : 150W)

증착온도에 따른 C-V특성은 반전영역에서 깊은 공핍(deep depletion) 현상이 나타남을 볼 수 있다. 이는 AlN박막을 통해 전하주입이 우세함을 나타내는 현상이다.

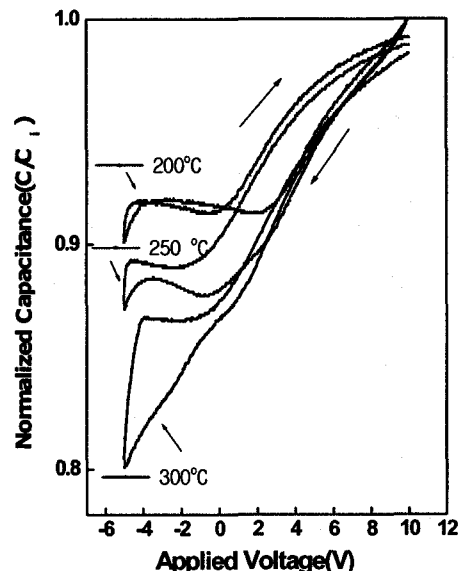


그림 2 온도변화에 따른 C-V 곡선(DC 전력 : 150W)

Fig. 2 C-V curve variation as a function of temperature(DC power : 150W)

그림 3은 인가전압 1MV/cm에서 측정된 전류밀도로부터 계산된 증착온도에 따른 저항률($\rho_s = E/J(\Omega \cdot \text{cm})$)의 변화를 보인 것이다. GaAs 기판 위에 증착된 AlN 박막의 두께는 200℃, 250℃, 300℃에서 각각 859Å, 864Å, 836Å 이었다. 300℃의 경우에 200℃와 250℃와 비교하여 히스테리시스가 작은 것을 볼 수 있으며, 기울기가 다소 가파른 것을 볼 수 있다. 증착온도가 증가함에 따라 저항률이 250℃까지 변화가 없다가, 250℃ 이상에서는 서서히 저항률이 증가하는 것은 증착온도가 증착박막의 굴절률[11, 12], 구조 그리고 증착률 등에 영향을 미치므로 절연박막의 저항률에 변화를 가져오는 것으로 사료된다. 이는 그림 3에서 보인 것 같이 300℃에서 증착된 AlN박막의 저항률이 다소 높게 나타나는 것과 관계가 있다. 마찬가지로 200℃에서 증착된 AlN박막의 경우는 완만한 기울기를 가지고 히스테리시스가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 절연체-반도체 계면에서 산소와 같은 불순물에 의한 표면대(surface band)에 pinning의 원인이 되는 높은 계면상태밀도의 존재와 고정전하밀도, 트랩된 전하밀도의 존재에 기인한다고 볼 수 있다.

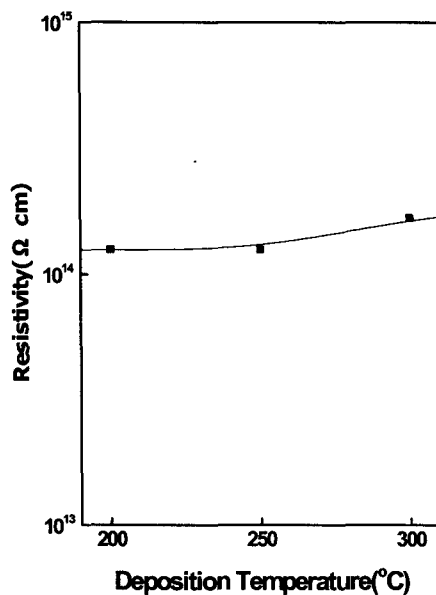


그림 3 증착온도 변화에 따른 저항률-온도 특성곡선

Fig. 3 The characteristic Resistivity-Temperature curves at the different deposition temperature

그림 4는 서로 다른 DC 전력에서 증착된 AlN박막의 전계에 따른 누설전류 특성을 보여주고 있다. 100W에서 증착한 AlN박막의 경우 0.1MV/cm에서 10^{-8} A/cm²의 누설전류 특성이 나타나고, 반면에 150W와 200W에서 증착한 경우는 0.1MV/cm에서 10^{-9} A/cm² 이하의 누설전류특성이 나타남을 볼 수 있다. DC 전력 변화에 따른 위와 같은 특성의 차이는 증착물의 차이에 의한 박막내의 불순물 함량의 변화와 구조적인 변화에 의해 나타나는 것으로 볼 수 있다. DC 전력이 낮아짐에 따라 증착률이 낮아지고, 따라서 타겟 표면 위에 불순물이나 챔버 내에 존재하는 불순물이 박막에 증착되어

박막 내에 불순물 함량이 증가하게 될 것이다. 따라서 100W에서 증착된 AlN박막은 150W, 200W에서 증착된 박막에 비해 낮은 전계에서 다소 높은 누설전류 특성을 보여주고 있다.

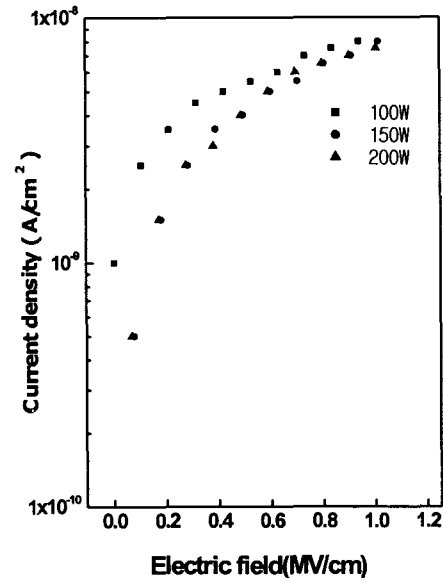


그림 4 DC 전력에 따른 I-V 특성곡선

(기판 온도 : 250℃)

Fig. 4 The characteristic I-V curves at the different DC power (Sub. tem.: 250℃)

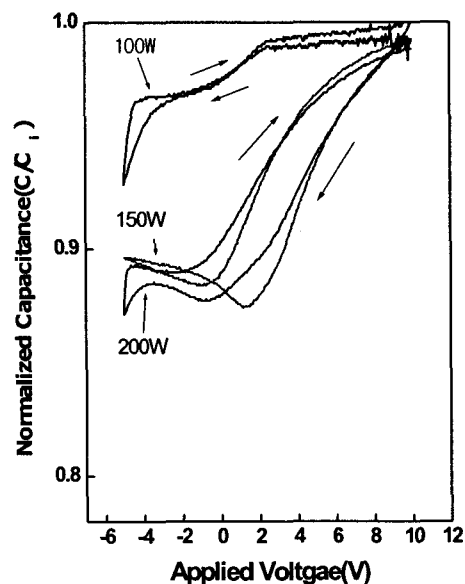


그림 5 DC 전력에 따른 C-V 특성곡선

(기판 온도 : 250℃)

Fig. 5 C-V curve variation as a function of DC power (Sub. tem. : 250℃)

그림 5는 DC 전력의 변화에 따른 AlN박막의 C-V특성을 보인 것이다. DC 전력에 따른 C-V 특성에서 100W, 150W의 경우에 반전영역에서 깊은 공핍(deep depletion) 현상이 관찰되고 있으나 200W에서는 다소 이러한 현상이 감소하였음이 관찰되고 있다. 이는 기판에서 매우 낮은 캐리어의 발생률에 기인하는 것으로서 DC 전력에 따라 결정구조와 증착물의 변화에 의하여 나타나는 현상으로 해석이 가능하다. 또한 100W에서 증착된 AlN박막의 경우 반전과 축적에서 커패시턴스 값의 차이가 매우 작음을 나타나고 있다. DC 전력이 증가함에 따라 히스테리시스가 증가하는 것이 관찰되고 있는데 이는 200W에서 증착된 AlN박막이 100W, 150W에서 증착된 것보다 스트레스를 더 많이 받아서 나타나는 현상으로 사료된다.

그림 1과 그림 4는 증착온도 변화와 DC 전력에 따른 전류밀도 측정 결과에서 증착온도와 DC 전력은 AlN박막의 누설전류 특성에 영향을 미치고 있음을 알 수 있는데, 이것은 증착온도와 DC 전력이 박막 내에 산소와 탄소 같은 불순물함량과 결정구조에 영향을 주어서 나타나는 현상으로 판단된다. AlN박막의 증착조건에 따른 I-V 특성곡선의 변화는 증착조건에 따라서 전도기구가 변화하는 것을 암시한다. 절연막의 누설전류는 정공에 의한 것보다는 전자의 이동에 의해서 발생한다. 이는 정공이 절연막의 가전자대(valence band)로 이동할 때 넘어야 할 에너지 장벽이 전자가 전도대(conduction band)로 이동할 때 에너지장벽 보다 높기 때문이다. 인가전압 변화에 따른 전자의 이동은 거시적으로 누설전류 특성으로 나타나므로 전류-전압 특성 곡선으로부터 전도기구를 알 수 있다. 절연막의 전기전도 기구 연구는 여러 연구자들의 모델링에 의해 제시된 식들을 근거로 전압변화에 따른 전류밀도를 고찰함으로써 이루어졌다.[11]

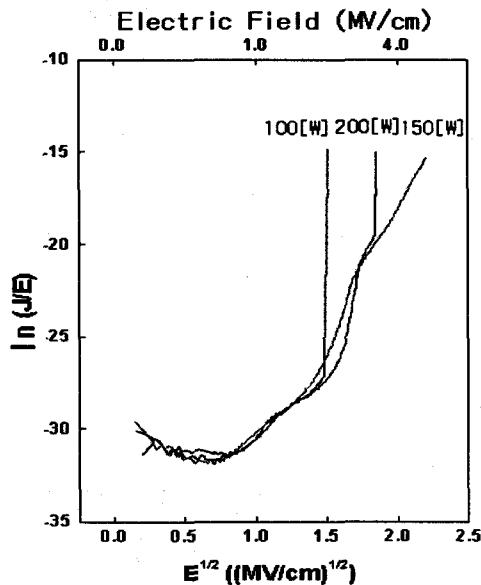


그림 6 DC 전력에 따른 Pool-Frenkel 전도기구 plot(기판 온도: 250℃)

Fig. 6 Pool-Frenkel conduction plot at the different DC power(Sub. temp.: 250℃)

AlN박막의 전기전도기구는 Poole-Frenkel 전도에 의해 주로 일어나고 있다. Poole-Frenkel 전도에서는 전자가 절연막 내에 존재하는 트랩위치(trap site)에서 트랩(trap)과 detrapping 과정을 통해 이동하게 되는데 이때 전류밀도 식은 다음과 같이 주어진다.

$$J = A_1 E \exp\left(-\frac{E_t A_2 \epsilon^{1/2} E^{1/2}}{KT}\right) \quad (1)$$

여기서 ϵ 은 절연막의 유전 상수 값을, A_1 과 A_2 는 비례상수 값을 나타낸다. 식 (1)에서 $\ln(J/E)$ 와 $E^{1/2}$ 는 비례관계가 있게 된다.

그림 6은 증착온도 250℃에서 DC 전력에 따른 AlN박막의 $\ln(J/E)$ vs. $E^{1/2}$ 상호관계를 보여주고 있다. 1MV/cm 이상에서 전류는 전계의 세기에 비례하여 증가함을 보이고 있고, DC 전력이 100W, 150W, 200W인 경우, 각각 2.8, 5.2, 3.2MV/cm에서 절연파괴현상이 나타났다. 이로부터 $\ln(J/E)$ 가 $E^{1/2}$ 에 비례함을 나타내므로 AlN막은 Poole-Frenkel 전도기구에 의해 지배됨을 알 수 있다.

4. 결 론

반응성 스퍼터링법으로 증착한 AlN박막을 전기적 특성을 조사 해 본 결과,

- (1) 250℃, 300℃에서 증착된 AlN박막의 경우 0.1MV/cm까지는 10^{-9}A/cm^2 이하의 낮은 누설전류 특성을 나타내고, 0.2MV/cm 이상에서는 서서히 증가하다가 포화되는 현상을 보이고 있다.
- (2) 증착온도에 따른 C-V특성은 반전영역에서 깊은 공핍(deep depletion) 현상이 나타남을 볼 수 있다. 이는 AlN박막을 통해 전하주입이 우세함을 나타내는 현상이다.
- (3) 100W에서 증착한 AlN박막의 경우 0.1MV/cm에서 10^{-8}A/cm^2 의 누설전류특성이 나타나고, 반면에 150W와 200W에서 증착한 경우는 0.1MV/cm에서 10^{-9}A/cm^2 이하의 누설전류특성이 나타남을 볼 수 있다.
- (4) DC 전력에 따른 C-V 특성에서 100W, 150W의 경우에 반전영역에서 깊은공핍(deep depletion) 현상이 관찰되고 있으나 200W에서는 다소 이러한 현상이 감소하였음이 관찰되고 있다.
- (5) $\ln(J/E)$ 가 $E^{1/2}$ 에 비례함을 나타내므로 AlN막은 Poole-Frenkel 전도기구에 의해 지배됨을 알 수 있다.

위의 전도기구 고찰결과로부터 반응성 스퍼터링법으로 증착한 AlN박막의 전도기구는 절연막내의 트랩에 의해 전자가 trap-detrapping 되는 Poole-Frenkel 전도기구의 지배를 받게 됨을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] G.R. Kile and K.M. Lakin, "Composit thin film UHF bulk acoustic wave resonators on gallium arsenide", Proc. IEEE Symp. Ultrasonics, Vol.14, p.495, 1983
- [2] K. Tsubouchi, K. Sugai, and M. Koshiba, "Zeor temperature coefficient surface-acoustic-wave device using epitaxial aluminium nitride films", Proc. IEEE, Symp., Ultrasonics, Vol.14, p.340(1983).
- [3] M. Matloubian and M. Gershienzon, "MOCVD epitaxial growth of single crystal GaN, AlN, and AlxGa1-xN", J. Electron. Master. Vol.14, p.633, 1985
- [4] H.M. Manasevit, F.M. Erdmann, and W.I. Simpson, "The use of metalorganics in the preparation of semiconductor materials", J. Electrochem. Soc., Vol.118, p.1864, 1971
- [5] T. Shiosaki, T. Yamamoto, T. Oda, and A. Kawabata, "Low temperature growth of piezoelectric AlN film by reactive planar magnetron sputtering", Appl. Phys. Lett., Vol.36(8), p.643, 1980
- [6] K.T. oninaga, S. Iwamura, Y. Shintari, and O.Tada, "High-energy particles in AlN film preparation by reactive sputtering technique", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.22, p.418(1983).
- [7] Y. Murayama, K. Kashiwagi, and M. Kikuchi, "Aluminium nitride films by rf reactive ion-plating", J. Vac. Sci. Technol., Vol.17(4), p.769, 1980
- [8] B. Rauschenbach, A. Kilitsch, and E. Richter, "Formation of AlN by nitrogen ion implantation" Thin Solid Films, Vol.109, p.37, 1983
- [9] J.M.E. Harper, J.J. Cuomo, and H.T.G. Hentzell, "Synthesis of compound thin film by dual ion beam deposition. I. Experimental approach", J. Appl. Phys., Vol.58(1), p.550, 1985
- [10] H.T.G. Hentzell, J.M.E. Harper, and J.J. Cuomo, "Synthesis of compound thin film by dual ion beam deposition. II. properties of aluminium nitride films", J. Appl. Phys., Vol.58, p.3703, 1985
- [11] R. G. Gordon, D. M. Hoffman, U. Riaz, J. Mater. Res., Vol.6, P. 5(1991)
- [12] W. J. Meng, J. A. Sell, G. L. Eesely, T. A. Perry, J. Appl. Phys., Vol. 74, P. 2411, 1993
- [13] S. D. Bernstein, T. Y. Wong, and R. W. Tustison, J. Vac. Sci. Technol., Vol.A 17(2), p.571, 1999

저 자 소 개

추 순 남 (秋 順 男)



1953년 1월 10일생. 1976년 명지대 전자공학과 졸업(학사). 1984년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사), 2002년 경원대학교 전기전자공학부 졸업(공학박), 1993년~2006년 경원전문대학 교수 2007년~현재 경원대학교 전기소방공학부 교수
Tel : 031-750-8614
Fax : 031-750-8619
E-mail : snchu@kwc.ac.kr

박 정 철 (朴 正 哲)



1964년 4월 10일생. 1988년 명지대 전자공학과 졸업(학사), 1991년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사), 2000년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박), 1993년~2006년 경원전문대학 교수 2007년~현재 경원대학교 전자정보통신공학부 교수
Tel : 031-750-8754
Fax : 031-750-8759
E-mail : jcpark@kwc.ac.kr

권 정 열 (權 廷 烈)



1963년5월 17일생. 1991년 명지대 전기공학과 졸업(학사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
Tel : 031-285-7821
E-mail : illbul@korea.com

이 헌 용 (李 憲 用)



1949년 7월 25일생. 1983년 고려대 전기공학과 졸업(공학박). 1992. 9 - 1994. 7. 영국 Sheffield대 전기전자공학과 연구교수. 1979.3~현재 명지대학교 전기공학과 교수.
Tel : 031-330-6360
Fax : 031-330-6355
E-mail : hylee@mju.ac.kr