

Au/Nb/WN_x(Si)/GaAs Schottky 접합의 열안정성

정진영 · 고정현 · 안재환 · 김형준*

아주대학교 재료공학과

*홍익대학교 금속·재료공학과

Thermal Stability of Au/Nb/WN_x(Si)/GaAs Schottky Contacts

Jin Y. Chung, Kyung H. Ko, Jae H. Ahn and Hyung J. Kim*

Dept. of Materials Science and Engineering, Ajou University

*Dept. of Metallurgy and Materials Science, Hongik University

초 록 Microwave용 GaAs MESFET 소자에 적용가능한 Schottky 접합구조로서 Au/Nb/WN_x(Si) 다층박막의 특성을 평가하였다. WN_x 증착시 co-sputtering에 의하여 첨가된 실리콘은 열처리 과정 동안 GaAs/Schottky 계면으로 확산하며 이 과정은 sputtering damage의 회복이 활성화되는 700°C 이상에서 활발해진다. 계면으로 축적된 실리콘은 Ga와 As의 유효한 확산 경로를 차단함으로써 Ga와 As의 계면확산에 의한 특성 저하를 막을 수 있으며 독립적인 실리콘 층의 적층시와는 달리 Ga의 확산으로 인한 GaAs내의 carrier 농도 증가를 최소화할 수 있어서 WN_x와 같은 Schottky 접합 재료의 열적 안정특성의 향상을 기대할 수 있다. Au/Nb의 층을 적층시 Nb는 탈탈륨 등의 고용점 금속과 같이 sacrificial 형태의 확산방지막으로 작용하여 열적으로 안정하며 microwave용 소자에서 요구되는 낮은 비저항치($\sim 10^{-3} \Omega\text{-cm}$)를 유지할 수 있다.

Abstract Electrical characteristics of Au/Nb/WN_x(Si) multilayer Schottky contacts were evaluated for microwave GaAs MESFET device. Silicon incorporated during WN_x deposition diffused toward WN_x/GaAs interface and accumulated during heat treatment. This trend could be accelerated above 700°C by recovery process of sputter damage more active. Because silicon could effectively retard the interdiffusion of Ga as well as As via stuffing the diffusion channel inside of WN_x layer, it is expected that the thermal stability of Schottky barrier could be improved and the changes in the carrier concentration could be minimized. Niobium layer acts as a sacrificial type diffusion barrier to Au and thus provides thermally stable resistivity in the range of $\sim 10^{-3} \Omega\text{-cm}$.

1. 서 론

근래의 전자, 통신 산업 분야의 발전에 의하여 GaAs 반도체를 이용한 microwave용 MESFET소자의 이용이 증대되고 있다. 이 소자의 개발에 있어 자기정렬 과정을 이용한 FET의 제작은 가장 이상적인 공정으로 제안되고 있으나 이온 주입후의 후처리 공정에서 800°C 근처의 고온에 노출되어야 하므로 이에 대비하기 위하여 금속/GaAs Schottky contact의 특성 변화를 최소한으로 억제하는 열적 안정성을 확보하는 것이 중요하다^{1,2)}.

열처리 과정에서 Schottky contact의 특성

변화는 Schottky용 금속과 GaAs사이의 inter-diffusion이 원인으로 지적되고 있다. 따라서 금속의 실리사이드나 질화물을 Schottky 재료로 사용하여 열적안정성을 높이려는 많은 연구가 진행되어 오고 있다¹⁻⁵⁾. 그러나 Schottky 재료는 열적 안정성 이외에도 낮은 비저항과 미세한 patterning에 적합한 물성 등도 함께 갖추어야 게이트 재료로서 사용할 수 있으므로 소재의 선택에 있어서 많은 제한이 있다. 현재 주로 많이 응용되고 있는 소재는 티타늄, 텅스텐, 탄탈륨 등 고용점 transition 금속의 실리사이드나 질화물이다. 실리사이드의 경우에는 WSi나 TiWSi 등과 같은 재료의 계

이트 전극 특성이 연구되어 실제 공정에 사용되고 있으나 질화물에 대한 고찰이나 분석은 미흡하였다^{2,6)}. 본 연구에서는 그 중에서 열적 안정성이 비교적 우수한 것으로 알려진 질화 텅스텐(WN_x)을 게이트 재료로 사용하였고 특히 실리사이드 재료의 특성으로 알려진 실리콘에 의한 GaAs의 계면 확산 억제효과를⁷⁾ 첨가시키기 위하여 실리콘을 소량 첨가시킨 새로운 게이트 재료의 특성을 고찰하고자 하였다.

또한 질화텅스텐의 단점으로 알려진 큰 비저항은 10⁻⁵Ω-cm 범위의 낮은 비저항 목표값을 가지는 microwave용으로는 부적합하므로 Au 등의 전도성이 우수한 박막을 적층하여야 한다. 이 경우 후속 공정에서의 열처리 과정 중에서 발생할 수 있는 Au와 게이트재료의 계면 반응에 의한 비저항의 감소를 방지하기 위하여 확산 억제층을 삽입하는 방법이 사용될 수 있고^{8,9)} 본 연구에서는 확산 억제층으로 고용점 금속인 Nb를 사용하여 비저항의 열적 안정성 변화를 고찰하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 GaAs wafer 위에 전기적 물성의 측정을 위하여 carrier 농도가 1.5×10¹⁷/cm³이 되도록 doping한 n-type epitaxial 층을 MOCVD(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition)방법에 의해 성장시킨 기판을 사용하였다. Chamber에 기판을 장입하기 전에 세척 공정을 시행하였는데 우선 trichloroethylene, acetone, isopropyl alcohol의 순서로 각각 10분씩 초음파 세척을 하였고 그 후 탈이온수(deionized water, 18M·Ω)로 30초간 린스한 후 10% HCl에서 90초간의 에칭과 탈이온수에서 1분간의 린스를 행했다. 그 후 다시 isopropyl alcohol에서 2분간 초음파 세척을 한 후, 마지막으로 고순도 질소 가스(99.999%)을 사용하여 건조시켰다.

다이오드는 금속 마스크를 이용하여 넓이가 4×10⁻³cm²인 dot형태로 증착하는 방법으로 제작하였다. 박막의 증착은 reactive magnetron sputtering 방법을 이용하였는데 실험에서 사용된 sputter 장비는 3개의 타겟을 한꺼번에 co-sputtering 할 수 있게 제작된 것으로써 기판의 위치는 타겟 위에 놓이는 sputter-up 방식으로 되어 있다. 사용된 타겟 (Plas-

ma Materials사)의 순도는 99.9%이었다. 증착 조건은 초기 진공도를 4×10⁻⁶Torr 미만으로 동일하게 하였고 아르곤과 질소의 비는 3:1로 유지하였다. 증착막의 두께는 α-step(Tencor사) 측정치를 기준으로 WN_x 박막의 두께가 2000Å이 되게 하였으며 Schottky 층의 증착직후 진공을 깨지 않고 바로 확산방지막으로써 200Å 두께의 Nb층과 전도성 박막인 Au를 두께가 200 또는 2000Å이 되도록 연속적으로 증착하였다. 고온의 열처리에 dot 구역 이외의 GaAs기판에서 산화가 일어나는 것을 방지하기 위하여 금속 마스크를 제거한 뒤 기판전체를 silicon nitride막으로 capping하였고 이어서 자체 제작한 급속 열처리기(RTP)를 이용하여 400°C~800°C의 온도와 Ar+H₂(1%)의 혼합기체 분위기에서 온도별로 10분간 열처리를 하였다.

Schottky 접합의 전기적인 특성 분석으로 I-V방법에 의한 barrier height(Φ_b^{C-V})와 이상지수(ideality factor, n)측정 및 C-V방법에 의한 barrier height(Φ_b^{C-V})와 carrier concentration 등을 측정하였고 접합의 비저항은 4-point probe 방법을 사용하여 측정하였다. 다층박막의 계면 조성, 구조 및 상변화는 각각 AES depth-profile(Perkin Elmer사, THI-670)과 XRD분석법을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

소량의 실리콘(~8 at.%)이 함유된 WN_x 박막의 상은 XRD로 분석한 결과 W₂N의 단상으로 나타났고 텅스텐, 텅스텐 실리사이드 및 hcp결정을 가진 WN상의 존재는 나타나지 않았다.(Fig. 1) 이와 같은 결과는 본 연구에서와 같이 반응성 스퍼터링시 질소가 25% 이상으로 다량 첨가되었을 때 나타나는 보편적인 결과로서 Yamachishi 등의 연구 결과와 유사한 경향을 보인 것으로 생각된다⁶⁾.

Fig. 1의 XRD 결과에서 보면 W₂N의 격자상수는 as-deposit의 경우에 표준인 4.126Å보다 큰 4.244Å이지만 고온에서 열처리될수록 점차 감소하여 800°C의 경우에는 표준과 일치하는 경향을 보이며 이러한 격자상수의 감소는 700°C이상이 되면 급격히 일어남을 알 수 있다.(Fig. 2) 또한 AES depth-profile분석 결과에서도 800°C에서의 열처리 후에 W₂N

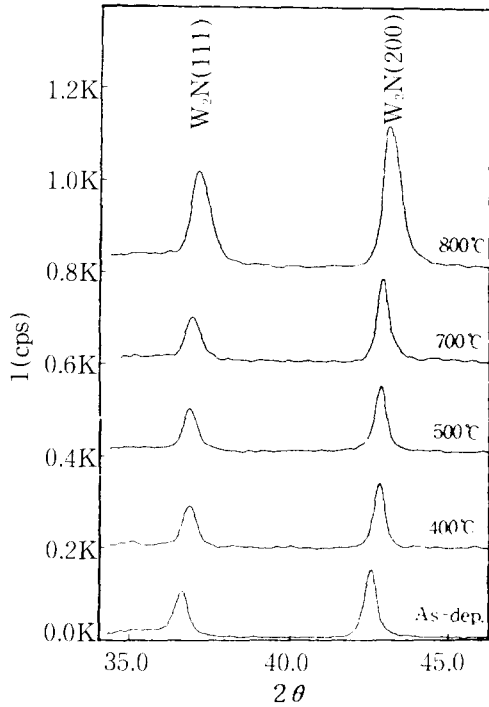


Fig. 1. XRD patterns of as-deposited and annealed (at 400~800°C) WN_x(Si added) films.(without Au/Nb films)

층안의 실리콘은 거의 GaAs와의 계면 쪽으로 이동하였음을 분명하게 알 수 있다.(Fig. 3) 이러한 결과들로부터 W₂N 층에서의 실리콘은 용해되어 격자상수를 증가시키지만 열처리가 되면 GaAs의 계면으로 이동하여 W₂N 격자가 원 상태로 회복된 것으로 생각할 수 있다. 왜냐하면 실리콘의 GaAs/W₂N 계면으로의 확산은 스퍼터링에 의하여 생성된 GaAs 기관의 표면 결함이 고온 열처리 과정에서 제거될 때 방출되는 과잉 점 결함에 의하여 진행된다고 추정할 수 있으며 이러한 표면 결함의 회복 과정은 700°C 이상의 고온에서 더욱 활발해지는 것으로 알려져 있으므로²⁶⁾ 이 온도 구간에서의 실리콘의 확산에 의한 격자 상수의 감소가 가속화되는 결과와 잘 부합되기 때문이다. Kuriyama 등은 게이트 금속과 GaAs사이에서 고온 공정에서 발생하는 상호 확산에 의한 특성 저하를 방지하기 위하여 게이트 금속과 기관 사이에 ~2.5nm두께의 얇은 실리콘 층을 증착하였고 그 결과 열처리시 실리콘은 As원자의 확산을 억제함으로써 계

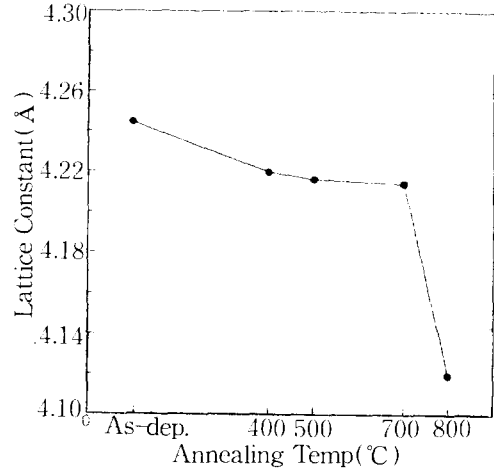


Fig. 2. Changes in lattice parameter of WN_x film during annealing at 400~800°C.

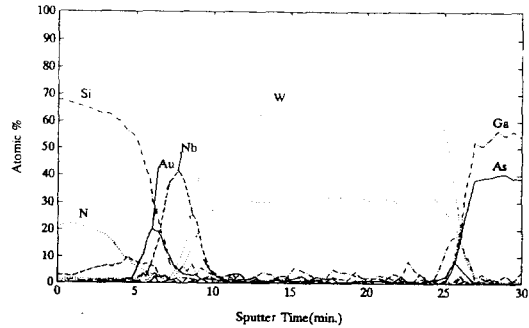


Fig. 3. AES depth profile of Au/Nb/WN_x/GaAs multi-layer after annealing at 800°C.

이트의 열적 안정성을 증진시킨다고 보고한 바 있다⁷⁾. 같은 관점에서 볼 때 본 실험에서 W₂N과 동시에 co-sputtering된 실리콘도 열처리 과정에서 가장 활성화된 확산 경로를 통하여 GaAs 계면으로 확산하여 응집되었으므로 게이트 특성의 열적 안정화에 기여할 수 있었을 것으로 판단되었다. Fig. 4에는 barrier height(Φ_b^1)와 ideality factor(n)의 열처리 온도에 따른 변화를 나타내었다. Yamagishi 등의 결과에서 처럼 WN_x접합의 경우에 700°C이하에서도 온도에 따라서 0.3eV정도의 비교적 급격한 barrier height의 변화를 보이는 것과 비교할 때 본 연구와 큰 변화가 없고 그 이상의 온도에서 약간의 증가를 보인다. 또한 이 때의 ideality factor(n)은 700°C 이상에서 약간 증가하지만 그 이하에서는 거의 일정하

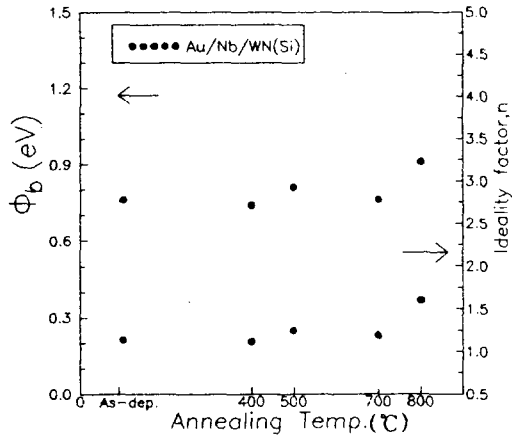


Fig. 4. Changes in barrier height and ideality factor of WN_x Schottky diode during annealing.

게 1.2정도의 안정한 값을 가지는 것으로 보아서 Schottky 접합 특성이 고온의 열처리 시까지 안정하고 우수하게 유지됨을 알 수 있다.

C-V 측정에 의한 carrier concentration은 800°C의 열처리 후에도 증착 이전과 비교하여 거의 변화하지 않은 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 이었다. 반면에 W/Si/GaAs순으로 다층 증착한 경우에는 열처리 동안 Ga 원자의 interdiffusion은 As원자와는 달리 효과적으로 제어되지 못하며 그 결과 Ga vacancy의 형성에 따른 n형 carrier 농도의 감소가 일어난다고 보고되었다⁷⁾. 따라서 본 연구에서와 같이 $WN_x(\text{Si})/\text{GaAs}$ 의 증착시에는 실리콘이 WN_x 층안에서 확산하는 과정에서 안정한 WN_x 상이 유지되며 실리콘의 형성이 되지 않은 것으로 보아서 결정입계 등 As원자 및 Ga원자의 이동 경로도 동시에 효과적으로 점유하게 될 것이며 그 결과 carrier농도의 변화가 거의 없는 것으로 생각된다. 결론적으로 실리콘을 WN_x 와 동시에 co-sputtering하는 경우는 실리콘에 의한 계면의 열적 안정성 증대와 아울러 carrier농도의 변화를 최소화할 수 있을 것으로 기대된다.

WN_x 에 의한 Schottky 접합을 그대로 사용할 경우보다 Au박막을 다층으로 형성하면 microwave device에서 요구하는 설계치인 $10^{-3} \Omega\text{-cm}$ 범위의 비저항을 가질 수 있다. 본 연구에서는 열처리의 Au의 WN_x 층으로의 침투 확산으로 인하여 비저항의 증가를 억제

하기 위한 확산방지막으로 고용점 금속인 Nb를 적용하였다. Fig. 3에 나타난 결과와 같이 800°C에서의 열처리 후에는 Nb층의 거의 전부에 걸쳐서 Au의 확산이 이루어진 것을 알 수 있다. XRD에 의하여 Au/확산방지막의 열처리 시 상의 변화를 관찰한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 증착 직후의 XRD 결과에서는 $2\theta = 35^\circ \sim 40^\circ$ 사이에서 $W_2N(100)$ peak와 Au (111) peak가 잘 분리되어 보이지만 열처리 온도가 증가할 수록 두 peak의 구별이 어려워진다. 이것은 열처리가 진행됨에 따라서 생성되는 상에 의한 peak가 WN 과 Au 두 peak 사이에서 검출되었기 때문인데 이 상은 Au가 Nb 층으로 확산하여 형성하는 Nb_3Au 의 금속간화합물인 것으로 판단된다. 즉, Au/Nb의 경우에는 sacrificial형의 확산방지막으로 널리 알려진 고용점 금속인 탄탈륨과 동일한 방식으로 Au를 금속간 화합물의 형태로 고착시킴으로서 비저항의 안정화에 기여하게됨을 알 수 있다⁹⁾. 금속간화합물의 형성은 Au의 확산을 방지하는 효과는 있으나 고유 비저항이 Au보다 크므로 열처리 과정에서 화합물의 형성이 계속 된다면 전체적인 비저항은 증가하게 된다. Fig. 6은 Au층을 200 Å과 2000 Å의 두께로 동일한 두께의 Nb층위에 증착하고 열처리한 후 각 다층 박막의 비저항을 열처리 온도의 함수로 측정한 결과이다. Au의 두께가 얇을 경우에는 Au가 금속간 화합물의 형성에 소모됨에 따라서 비저항이 점차 증가하며 거의 소모가 일어나는 고온에서는 비교적 안정하게됨을 알 수 있다. 반면에 Au층의 두께가 두꺼운 경우에는 잔여 Au의 양에 의하여 전체적인 비저항은 작아진다. 그러나 비저항은 온도의 증가에 따라서 계속적으로 증가하는 경향을 보이므로 금속간 화합물의 형성이 계속 진행됨을 알 수 있다. 현재 많이 사용되고 있는 TiN의 경우 stuffed barrier 형이므로 확산을 억제하기 위하여 비교적 두꺼운 $\sim 2000 \text{Å}$ 정도의 두께가 요구되는 것에 비하여 볼 때, Nb와 같은 sacrificial형 확산방지막을 사용하면 200 Å 정도의 비교적 얇은 두께의 박막으로도 Fig. 6에 나타난 것과 같이 고온의 열처리 후에도 $\sim 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ 범위의 비저항을 유지하는 것이 가능하다고 판단할 수 있다. 그러나 고온안정성을 위하여는 Au의

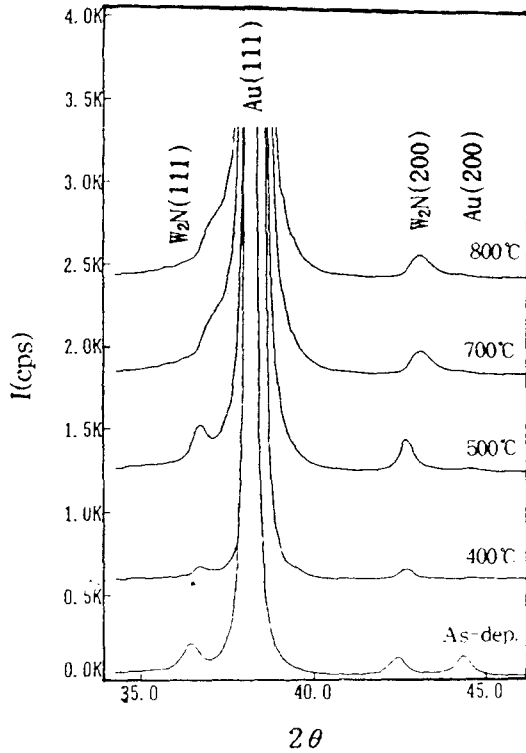


Fig. 5. XRD patterns of as-deposited and annealed (at 400~800°C) Au/Nb/WN_x multilayer.

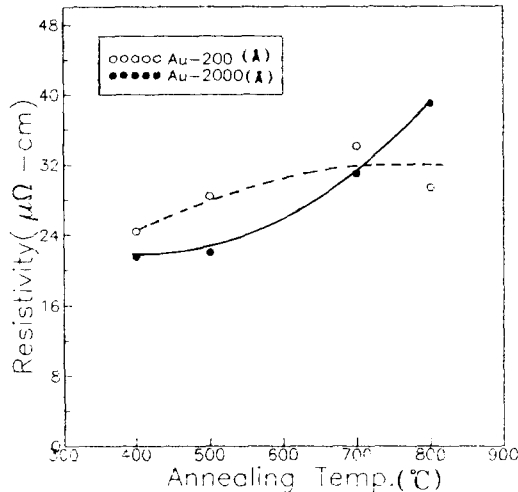


Fig. 6. Changes in resistivity of Au/Nb/WN_x multilayer with 200 and 2000 Å of Au films thickness during annealing.

두께도 얇게 조절하여주는 것이 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

GaAs 소자 용으로 Schottky층의 증착시 실리콘을 첨가하면 열처리 과정 동안 GaAs/Schottky 계면으로 확산하여 Ga과 As의 유효한 확산 경로를 차단함으로써 Ga과 As의 계면확산에 의한 특성 저하를 막을 수 있다. 이 방법은 Schottky/Si/GaAs 다층 박막의 경우와 달리 실리콘의 확산으로 인한 GaAs내의 carrier 농도 증가를 최소화할 수 있어서 WN_x와 같은 Schottky 접합 재료의 열적 안정특성의 향상을 기대할 수 있다. Au/Nb의 층을 적층하면 열적으로 안정하며 microwave용 소자에서 요구되는 낮은 비저항치를 얻을 수 있으며 이 경우 Nb는 탄탈륨 등의 고용점 금속과 같이 sacrificial 형태의 확산방지막으로 작용한다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. K.M. Yu, S.K. Cheung, T. Sands, J.M. Jaklevic, N.W. Cheung, and E.E. Haller, J. Appl. Phys., 60 (9), 3235 (1986)
2. H. Yamagishi, Jap. J. Appl. Phys., 23 (12), L895 (1984)
3. K. Matsumoto, N.Hashizume, H.Tanoue and T.Kanayama, Jap. J. Appl. Phys., 21 (6), L393 (1982)
4. K. Imamura, N.Yokoyama, T.Ohnishi, S. Suzuki, K.Nakai, H.Nishi and A.Shibatomi, Jap. J. Appl. Phys., 23 (5), L342, (1984)
5. Y-C. Shih, A.Callegari, M.Murakami, E.L. Wilkie, H.J.Hovel, C.C. Parks and K.D. Childs, J. Appl. Phys., 64 (4), 2113 (1988)
6. H.Yamagishi and Y. Yamamoto, Jap. Appl. Phys., 26 (1), 122, (1987)
7. Y. Kuriyama, S. Ohfuji and J. Nagano, J. Appl. Phys., 62 (4), 1318 (1987)
8. E. Kolawa F.C.T. So, J.L. Tandon and M-A. Nicolet, J. Electrochem. Soc., 134 (7) 1759 (1987)
9. M. Mändl, H. Hoffmann and P. Kücher, J. Appl. Phys., 68 (5), 2127 (1990)