

핫플레이트 소결에 의한 (n)GaAs에 Au-Pd-Ge계의 음성접촉 특성에 관한 연구

A Study on the Ohmic Contact Characteristics of Au-Pd-Ge System to (n)GaAs by Hot Plate Sintering

박창엽* · 남춘우** · 소지영*

(Chang-Yub Park · Choon-Woo Nahm · Ji-Young So)

요 약

n형 GaAs에 음성접촉을 형성함에 있어서 Au-Ge 공융합금을 용해시키는 alloying 보다는 sintering을 필요로 하는 Au-Pd-Ge계의 새로운 음성접촉을 도입하였다.

Au-Pd-Ge계의 최적의 음성조건을 조사하기 위하여 Au/Pd/Ge, Au/Ge/Pd, Au/Pd/Ge/Pd 그리고 Au/Pd/Au/Ge 음성접촉을 제조하였다.

비접촉저항을 조사하는데 있어서 sintering온도는 390℃에서 450℃사이였고 시간은 30초에서 6분 사이였다.

Au-Pd-Ge계의 비접촉저항은 alloying된 Au/Ni/AuGe 접촉의 그것에 필적할 만큼 낮았으며 특히, Au/Ge/Pd 접촉은 430℃, 3분의 sintering 조건에서 가장 낮은 $1.2 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 의 비접촉저항을 나타냈다.

Au/Ge/Pd 접촉의 표면형상 및 접촉패턴 가장자리는 450℃에서 2분이상 sintering된 접촉을 제외하고는 sintering 후에 as-deposited 상태와 다를 바가 없었다.

430℃, 3분 sintering에서 가장 낮은 비접촉저항을 나타낸 Au/Ge/Pd 접촉의 비접촉저항은 430℃에서 Ge/Pd 두께 변화에 비교적 변화가 적었다.

* 연세대학교 전기공학과

** 삼성전자 반도체 연구소 신소재팀.

ABSTRACT

We introduced here a new contact metallization scheme consisting of Au-Pd-Ge system which require sintering rather than alloying which consists of melting a Au-Ge eutectic in the ohmic contacts of n-type GaAs.

Au/Pd/Ge, Au/Ge/Pd, Au/Pd/Ge/Pd, and Au/Pd/Au/Ge sintered ohmic contacts were fabricated to investigate optimal ohmic conditions of Au-Pd-Ge system.

The ranges of the sintering temperature and time in the investigation of the specific contact resistance were 390°C to 450°C and 30 sec to 6 min, respectively. Au-Pd-Ge sintered contacts showed low specific contact resistances comparable to those of conventional Au/Ni/AuGe alloyed contact and among other things, particularly, it was found that Au/Ge/Pd contact marks the lowest specific contact resistance of $1.2 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ at 430°C for 3 min.

The surface morphology and the pattern edge of Au/Ge/Pd contact were similar to the as-deposited states after sintering except contact sintered at 450°C more than 2 min.

The specific contact resistance of Au/Ge/Pd contact at 430°C was found to be relatively insensitive to the Ge/Pd thickness variation.

1. 서 론

GaAs의 음성접촉은 소자특성에 많은 영향을 미치기 때문에 낮은 접촉저항을 나타내야 하고 또한 접촉특성이 안정되고 재현성이 있어야 한다.

지금까지는 주로 Braslau¹⁾ 등에 의해 처음으로 도입된 AuGe/Ni 음성접촉을 중심으로 금속층 두께, alloying 시간, 온도 등과 같은 변수들의 넓은 변화를 이용하여 음성접촉을 형성해 왔다.

Ni/AuGe/GaAs의 음성접촉 형성은 비교적 간단하고 낮은 접촉저항 ($\sim 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$)이 얻어지긴하나 짧은 alloying 시간으로 인해 최적점 조절이 어렵고 aging 때 열화가 수반되며 ball-up으로 인해 금속표면이 매끄럽지 못하다.²⁾ 그리고 alloying 후에 ball-up 및 β -AuGa 생성으로 접촉패턴의 가장자리가 분명하지가 않아 소오스와 게이트간의 일정한 거리가 요구되는 MESFET과 같은 GaAs 소자에서는 문제가 되기 때문에 다소 신뢰성 및 재현성이 떨어지는 등 몇가지의 단점을 내포

하고 있다.³⁾

최근에는 이러한 문제점을 해결하기 위해 이온주입과 Mo, W 등과 같은 고용점 금속을 써서 어닐링으로 음성접촉을 형성하기도 한다.³⁾

GaAs에 sintering으로 음성접촉을 형성하기 위해 Ge/Pd 접촉을 사용한 것은 Sinha⁴⁾ 등에 의해 처음으로 이루어졌다.

Sintering에 의한 음성접촉은 고상반응에 의해 이루어지는 것으로 액상반응에 의해 형성되는 alloying 보다는 더욱더 매끄러운 표면을 제공하는 것이 큰 장점이다.⁵⁾

본 논문에서는 기존의 상승 및 하강온도 특성이 완만한 스트립 히터 혹은 석영튜브로 (furnace)가 아닌 온도분포가 균일하고 재현성이 좋은 hot plate를 이용하여 sintering에 의한 Au-Pd-Ge 계의 음성접촉 특성을 조사하였다.

2. Au-Pd-Ge 계의 음성접촉

음성접촉을 형성함에 있어서 sintering의

최적온도 및 시간은 GaAs의 도핑준위에 의해 결정된다. 이러한 이유는 음성접촉을 형성하기 위해서는 sintering에 의한 금속학적 반응폭 (x_m)이 $M/(n)GaAs$ 접촉의 공핍층폭 (x_d)보다 크거나 같아져야 한다⁴⁾는 것과 관계되기 때문이다. 따라서 음성접촉이 형성되려면 $x_m \geq x_d$ 의 조건을 만족해야 하며 그러기 위해서는 1) GaAs의 표면농도가 아주 높거나 계면의 상호작용을 일으키는 alloying이나 sintering에 의해 표면의 고농도화가 이루어져야 하며, 2) 유효 장벽높이가 낮아야 하고, 3) 금속-반도체 계면은 금속학적으로 반응성이 강해야 한다. 조건 1), 2)는 x_d 를 최소화 3)은 x_m 을 최대화할 것이다.

AuGe/Ni 접촉에서는 AuGe가 공융점(360°C) 이상의 열적자극에 의해 GaAs와 반응하게 되는 액상상태에서 alloying이 이루어져 음성접촉이 형성되는 반면 Au-Pd-Ge 계 접촉에서는 공융합금이 없는 서로 다른 단일금속이 다층으로 구성된 접촉으로 sintering에 의해 고상상태에서 계면에 PdGe가 형성되어 음성접촉이 이루어진다.⁴⁾

Au-Pd-Ge 계 접촉을 저온 sintering하면 GaAs는 분해되지 않고 대개 Au-Pd-Ge 간에 반응만 일어나 Pd_2Ge , PdGe와 같은 germanide 복합물만 형성된다.^{5),6)} 따라서 GaAs와 극히 일부만 반응하는 상태가 되므로 음성접촉이 형성되지 않는다. Sintering 온도가 점점 증가하게 되면 계면에서 GaAs는 분해되어 Ga 원자와 As 원자의 외부확산(out-diffusion) 및 Pd와 Ge의 상호확산으로 인해 계면에서 Pd-Ga, Pd-As 복합물이 형성⁶⁾되며 또한 Ge는 Pd의 driving force로 인해 내부확산(in-diffusion)되어 도핑된다.

고온 sintering에서는 계면에서 Ga 원자,

As 원자, Ge 원자, Pd 원자의 운동에너지가 더욱 증가하여 상당량의 Ga의 외부확산으로 인해 Ga vacancy가 형성되고 또한 무시할 수 없을 정도의 As 손실도 수반된다. 아울러 Ge의 내부확산⁶⁾이 상당량에 이르게 되어 Ga vacancy와 치환하므로써 도핑효과가 크게 나타난다. 이렇게 되면 음성접촉이 형성된다.

3. 실험

3.1. 시편 제조

본 연구에 사용된 웨이퍼는 Cr이 도핑된 반절연성(100) GaAs 기판 위에 농도가 $10^{14}/cm^3$ 이하인 버퍼층(buffer layer) 및 그 위에 S의 농도가 $2.0 \times 10^{17}/cm^3$ 인 활성층(active layer) 그리고 그 위에 Si의 농도가 $1.5 \times 10^{18}/cm^3$ 인 접촉층(contact layer)로 구성되어 있다.

Trichlorethylene, acetone, methanol에 연속적으로 세척한 후 표면결함 및 산화막을 제거하기 위해 $H_3PO_4 : H_2O_2 : H_2O(3:1:50)$ 용액에 2분간 에칭하였다. 위 에칭용액으로 mesa pattern을 형성한 후 Az 5214 photoresist를 이용하여 lift-off pattern을 형성하였다.

금속을 증착하기전에 표면산화막을 제거하기 위해 $NH_4OH : H_2O(1:10)$ 용액에 15초간 담근(dipping) 후 N_2 로 건조되어졌으며 진공증착기의 진공도는 2×10^{-6} torr 이고 기판의 온도는 150°C로 일정하게 유지한 상태에서 텅스텐 보트를 이용하여 Ge, Pd, Au를 그림 1과 같이 시편의 금속층 구성에 따라 연속적으로 증착되어졌다. 시편을 acetone에 담구어 초음파 세척기를 이용해서 lift-off 하여 그림 1의 각 시편에 대해서 그림 2

	Sample A		Sample B
	Au (3000 Å)		Au (3000 Å)
(a)	Pd (300 Å)	(b)	Ge (300 Å)
	Ge (200 Å)		Pd (200 Å)
	(n)GaAs		(n)GaAs
	Sample C		Sample D
	Au (3000 Å)		Au (3000 Å)
(c)	Pd (300 Å)	(d)	Pd (300 Å)
	Ge (200 Å)		Au (1000 Å)
	Pd (50 Å)		Ge (200 Å)
	(n)GaAs		(n)GaAs

그림 1. 시편 A, B, C 그리고 D의 단면도
Fig 1. Cross sections of samples A, B, C, and D.

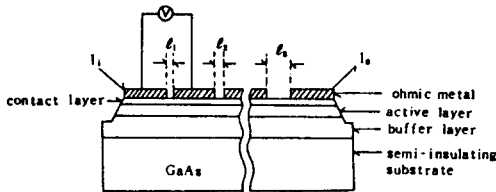


그림 2. 접촉저항 측정을 위한 모델 구성도
Fig 2. Transmission line model schematic for measurement of contact resistance.

와 같은 TLM(transmission line model) Pattern⁸⁾을 형성하였다.

각 시편은 N₂ 분위기의 hot plate 로 쇼트키접촉에서 음성접촉으로 전환과정을 살펴 보기 위해 250, 300, 350°C에서 10분간 sintering 되어졌고, 비접촉저항 특성을 조사하기 위해 390, 400, 430, 450°C에서 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6분 간격으로 sintering

되어졌다.

3.2. 측 정⁹⁾

음성접촉 특성은 그림 2에 나타난 바와 같이 음성접촉 패드폭(W)이 100 μm이고 패드 사이 거리(ℓ)가 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40 μm인 TLM pattern⁸⁾으로 부터 curve tracer로 구할 수 있다. 패드간의 전체 저항($R_T = 2R_c + R_s \frac{\ell}{W}$)을 거리의 함수로 플로팅(plotting)하여 저항축(R_T)의 교점($2R_c$)으로 부터 접촉사항(R_c)을 구하고 그리고 직선의 기울기(R_s/W)로 부터 sheet 저항(R_s)을 구하면 비접촉저항(r_c)을 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$r_c \triangleq \frac{(R_c W)^2}{R_s}$$

Sintering 된 시편의 표면은 광학현미경으로 부터 조사되어졌다.

4. 결과 및 고찰

(n)GaAs에 Au-Pd-Ge계의 음성접촉의 최적 조건을 조사하기 앞서 음성접촉과정을 살펴보기 위해 250, 300, 350°C에서 10분간 sintering 된 각 시편의 I-V 특성을 조사한 것이 그림 3이다.

그림 3에서 sintering 온도가 증가함에 따라 I-V 특성이 변하는 것을 알 수 있다. 각 시편마다 다소 차이는 있으나 GaAs 표면에 Ge 접촉이 공통인 시편 A와 D가 유사한 특성을 보이고 또한 Pd 접촉이 공통인 시편 B와 C가 유사한 특성을 보이고 있다.

250°C에서는 모든 시편이 비선형을 갖고 있다. 시편 B와 C는 300°C에서 음성접촉이 형성된 것으로 보아 계면에서 Pd과 GaAs의 반응으로 인해 Ga이 Pd층으로 외부확산하므

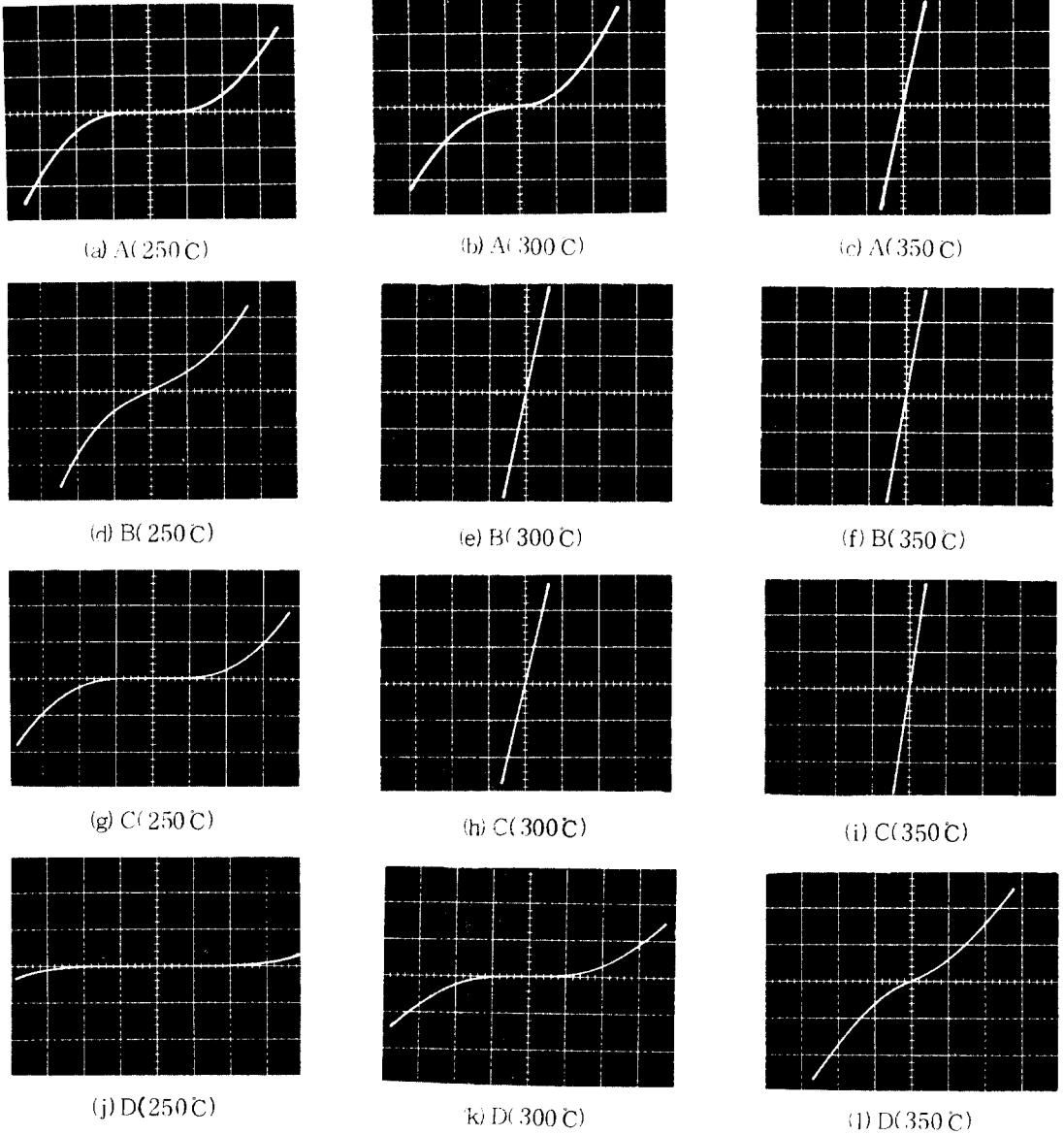


그림 3. 250°C와 350°C 사이에 10분 Sintering 된 시편 A, B, C, D의 ohmic 형성 과정에 대한 전류-전압 특성
 종축 : 20mA/div. 횡축 : 1V/div.

Fig 3. Current-voltage characteristics for ohmic formation process of sample A, B, C, and D sintered at between 250°C and 350°C for 10min.
 Vertical scale: 20mA/div
 Horizontal scale: 1V/div

로서 Pd 에 의한 상당량의 Ga vacancy 형성과 Ge 의 내부확산이 일어났음을 알 수 있다. 반면 시편 A와 D는 300°C에서 음성접촉이

형성되지 않았으며 시편 A는 350°C에서 음성접촉이 이루어졌으나 시편 D는 여전히 비선형성 상태이다. 이러한 사실로부터 GaAs

표면에 Ge 접촉인 경우, 300°C의 sintering 온도에서 Ga vacancy 형성이 용이하지 않음을 알 수 있으며 sintering 온도가 350°C인 경우에 상당량의 Pd이 Ge 층을 통과하여 Ga-As와 반응하므로써 시편 A는 음성접촉이 형성된 것으로 생각된다.

한편, 350°C의 sintering 온도에서도 시편 D가 음성접촉이 형성되지 못한 것은 360°C 이상에서 형성되는 AuGa^{10),11)}이 350°C에서 형성이 불충분하여 낮은 Ga vacancy 밀도와 더불어 Ge의 내부확산이 약하기 때문인 것으로 생각된다.

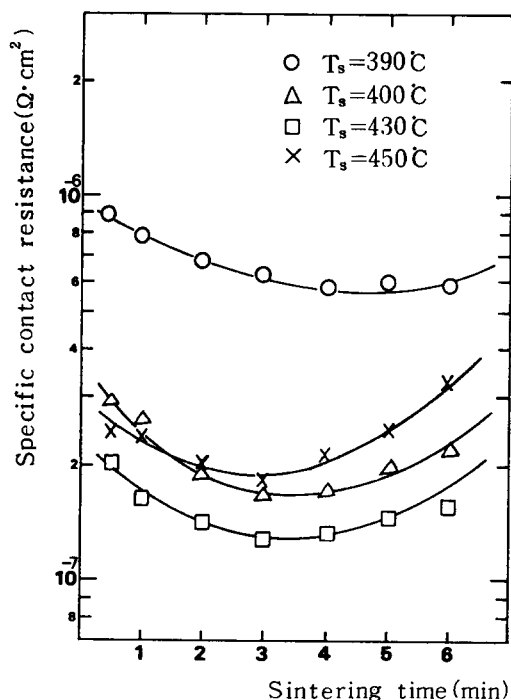


그림 4. 여러가지 sintering 온도에서 sintering 시간에 따른 시편 A의 접촉저항

Fig 4. Contact resistances of sample A with sintering time at various sintering temperatures.

그림 4는 시편 A인 Au/Pd/Ge 접촉의 비접촉저항(r_c) 특성을 나타낸 것으로 sintering 온도가 390°C인 경우에는 시간에 따라 r_c 가 감소하고 있으나 다른 sintering 온도에서 보다 높은 저항치를 보이고 있다. 이것은 이 온도에서 Pd이 Ge 층을 통하여 충분한 Ga vacancy를 형성하지 못하였을 뿐만 아니라 Pd에 의한 Ge의 내부확산이 약하기 때문인 것으로 생각된다.

Sintering 온도가 400, 430°C로 증가함에 따라 r_c 는 감소하다가 450°C에서는 오히려 증가하는 현상을 보이고 있다. 또한 400°C이상의 온도에서는 r_c 가 3분을 최저점으로 하여 "valley" 형태를 보이고 있다. r_c 는 sintering 온도와 시간의 의존성이 강하므로 초기에는 Pd에 의한 Ga의 외부확산이 As보다 강해 Ge이 Ga vacancy와 치환이 주가 되므로 도너의 증가를 가져와 r_c 가 감소하는 것으로 보인다. r_c 가 3분까지 감소하다가 그 이후부터는 As 손실이 커져 엑셉터가 증가하기 때문에 도너 감소효과로 인해 r_c 가 증가하는 것으로 생각된다.

r_c 가 430°C에서 최저점으로 하여 450°C이상일 때 r_c 가 증가하는 것은 sintering 시간이 3분을 최저로 하여 그 이후 시간이 증가함에 따라 나타나는 현상과 동일하기 때문인 것으로 생각된다. 그림 4에서 보는 바와 같이 시편 A의 최적 음성조건은 430°C에서 3분간 sintering 했을 때이며, r_c 는 $1.3 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 이다.

그림 5는 시편 B인 Au/Ge/Pd 접촉의 r_c 특성을 나타낸 것으로 GaAs 표면에 Pd가 접촉하므로써 Ge가 먼저 접촉한 시편 A보다 Ga vacancy 및 Ge과의 치환이 보다 더 용이하기 때문에 다소 낮은 r_c 가 얻어지지 않았나 생각된다.

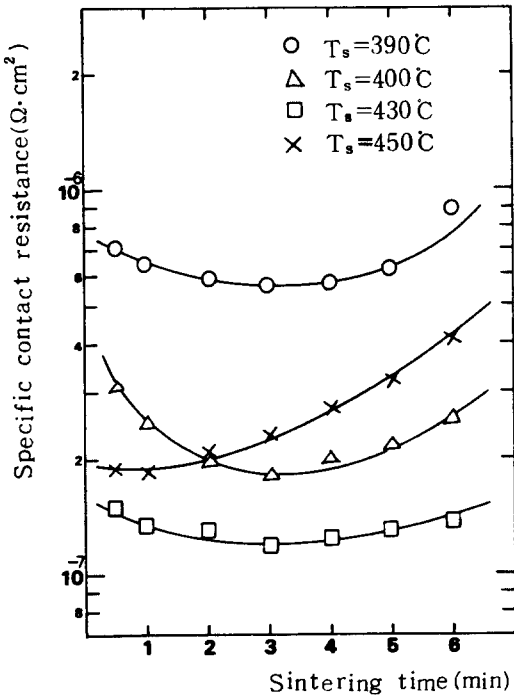


그림 5. 여러가지 sintering 온도에서 sintering 시간에 따른 시편 B의 접촉저항
Fig 5. Contact resistances of sample B with sintering time at various sintering temperatures.

430°C에서 sintering 했을 때 전체적으로 낮은 r_c 를 나타내 보이고 있으며 시간에 따른 r_c 변화폭이 $1.2 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 정도로서 대단히 낮기 때문에 sintering 시간의 제어가 용이할 것으로 보이며 재현성이 양호할 것으로 판단된다.

그림 6은 시편 A의 Ge 층과 GaAs 사이에 50Å의 Pd 층을 삽입한 시편 C인 Au/Pd/Ge/Pd 접촉의 r_c 특성을 나타낸 것으로 시편 A, B와는 아주 다른 특성을 보이고 있다. 그림 3의 300°C로부터 그림 6의 390°C 사이의 sintering 온도에서 시편 B와 유사한 특성을 보이고 있다. Sintering 온도가 390°C, 400°C인 경우에는 3분 sintering 했을 때 가

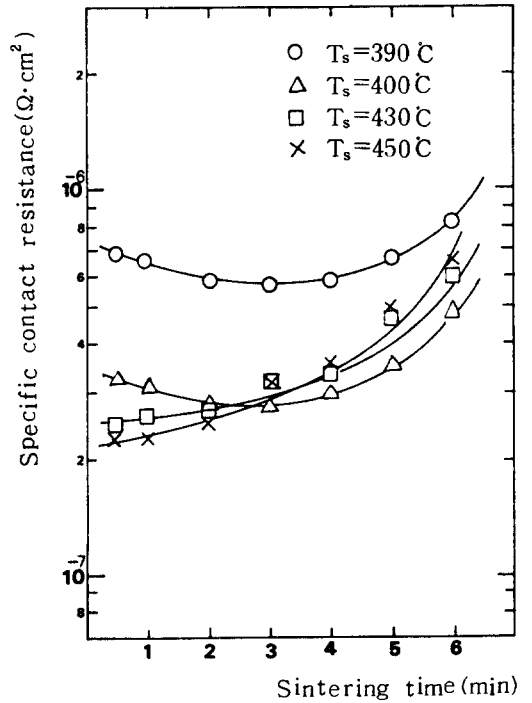


그림 6. 여러가지 sintering 온도에서 sintering 시간에 따른 시편 C의 접촉저항
Fig 6. Contact resistances of sample C with sintering time at various sintering temperatures.

장 낮은 r_c 를 나타내고 있으나 430°C, 450°C인 경우에는 30초에서 가장 낮은 r_c 를 보이고 있다.

Sintering 온도가 430°C, 450°C인 경우, 30초 이후 부터 계속적으로 r_c 가 증가하는 것은 이 온도범위에서 초기에는 50Å의 Pd 층에 의해 Ga vacancy 형성과 Ge의 내부확산이 급격히 일어나 표면농도가 증가하나 시간이 증가함에 따라 3000Å의 Pd과 2000Å의 Ge이 상호확산으로 인해 Ga vacancy 생성율이 Ge의 내부확산율보다 크고 아울러 As 손실이 증가하여 상대적으로 엑셉터의 증가율이 크기 때문인 것으로 판단된다. 이 접촉은 시편 A, B보다 저항이 높고 가장 낮은 r_c 를 얻는데 시

간이 너무 짧아 제어의 어려운점 등으로 보아 바람직하지 못하다.

그림 7은 시편 D인 Au/Pd/Au/Ge 접촉의 r_c 특성을 나타낸 것으로 시편 A, B, C와는 달리 450°C의 sintering 온도에서도 다른 온도에 비해 계속 Ge의 내부확산에 의한 GaAs의 표면농도가 증가하고 있음을 알 수 있다. GaAs 표면에 Ge 접촉인 시편 A와 비교해 보면, 그림 3에서 시편 D가 A보다 온도증가에 따라 접촉저항 감소율이 낮고 또한 그림 4와 7에서도 같은 온도 및 시간에서 시편 D가 A보다 저항 감소율이 낮다. 그러므로 Au의 Ga vacancy 형성 및 Ge의 내부확산에 대한 driving force가 Pd보다 약하기 때문

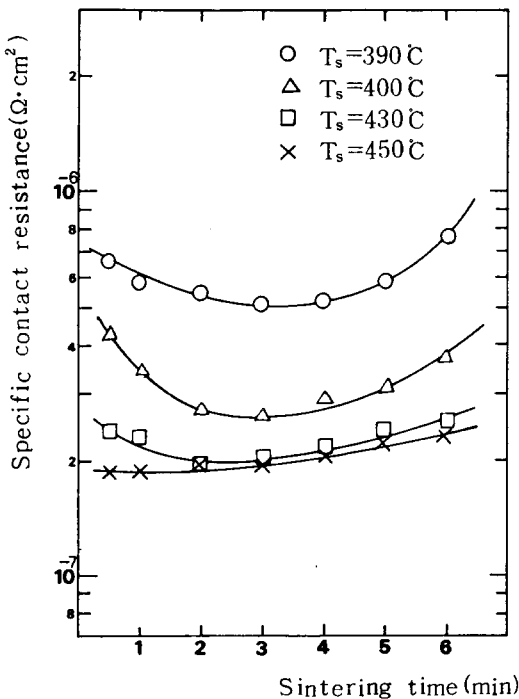


그림 7. 여러가지 sintering 온도에서 sintering 시간에 따른 시편 D의 접촉저항
 Fig 7. Contact resistances of sample D with sintering time at various sintering temperatures.

에 450°C에서도 Ga vacancy 형성에 비해 하여 Ge의 내부확산이 계속되는 것으로 보인다.

이 시편도 450°C에서 시간에 따라 r_c 변화 폭이 적음을 알 수 있다.

그림 8은 시편 B의 Ge/Pd 두께변화에 대한 r_c 를 나타낸 것으로 sintering 시간에 따라 r_c 의 변화가 미약함을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 Pd 및 Ge의 두께를 정확하게 제어할 필요가 없음을 알 수 있다.

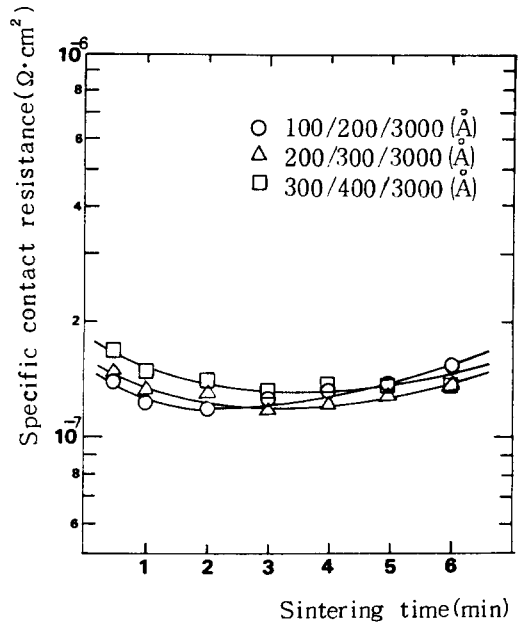


그림 8. 430°C에서 시편 B의 Pd/Ge 두께 변화에 대한 접촉저항
 Fig 8. Contact resistances for Pd/Ge thickness change of sample B at 430°C.

그림 9는 430°C에서 sintering 된 시편 B의 표면형상으로서 시간에 따라 표면의 변화가 없다. 이것은 그림 10에 나타난 바와 같이 400°C에서 alloying 된 Au/Ni/AuGe 접촉 표면과 비교하면 대단히 양호한 것이다. 450

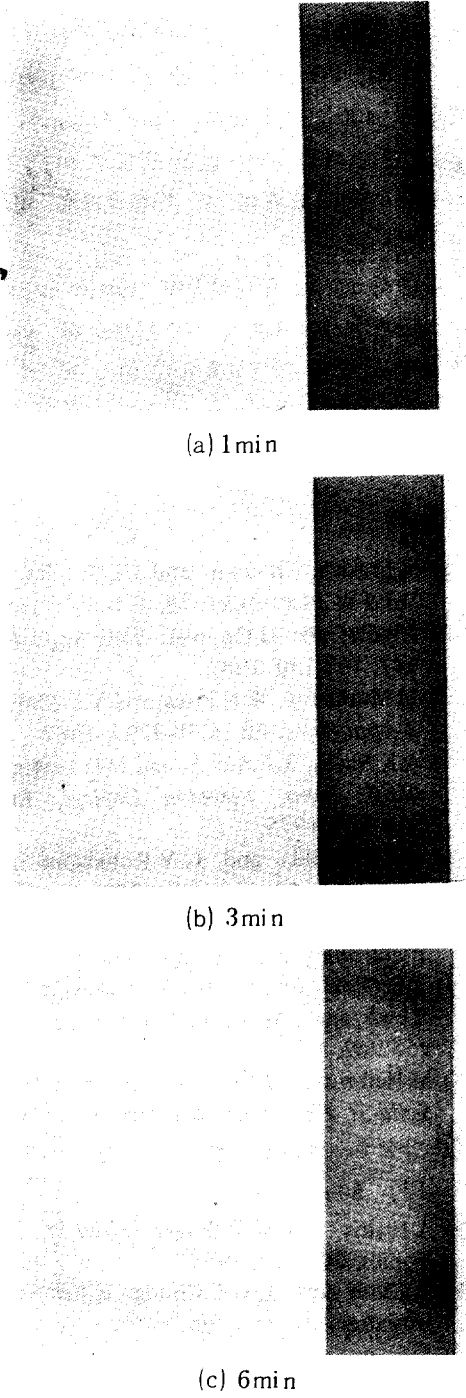


그림 9. 430°C에서 sintering 된 시편 B의 광학현미경 표면사진 (×800)
 Fig 9. Optical micrographs of sample B sintered at 430°C (×800).

C에서 sintering 했을 때는 GaAs 표면에 Ge 접촉이 공통인 시편 A, D는 그림 9와 동일한 표면이었으나 Pd 접촉이 공통인 시편 B, C sintering 온도 2분에서 그림 11과 같이 ball-up 현상이 나타나기 시작하였다. 그림 9에서 보다시피 패턴 가장자리도 명확함을 알 수 있다.

전체적으로 각 시편마다 최적의 음성조건에서는 표면형상이 아주 양호함을 알 수 있었다.

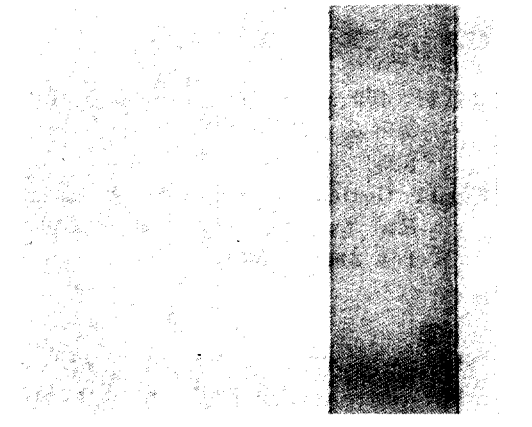
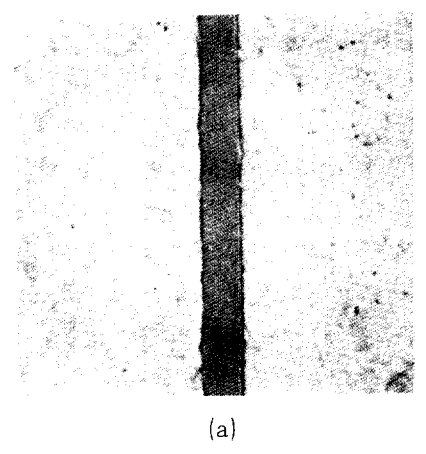


그림 10. 400°C에서 5분 sintering 된 Au/Ni/AuGe/GaAs의 광학현미경 표면사진 (×800)

Fig 10. Optical micrograph of Au/Ni/AuGe/GaAs sintered at 400°C for 5min (×800).



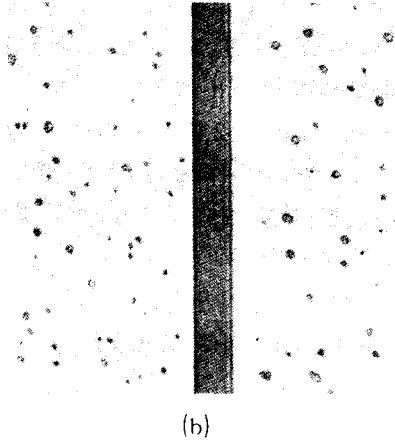


그림 11. 450°C에서 2분 sintering된 시편 B (a)와 C(b)의 광학현미경 표면사진 ($\times 800$)

Fig 11. Optical micrographs of sample B(a) and C(b) sintered at 450°C for 2min ($\times 800$).

5. 결 론

Hot plate 를 이용하여 n형 GaAs에 sintering 이 요구되는 Au-Pd-Ge 계의 음성접촉 형성의 최적조건을 구하기 위해 Au/Pd/Ge, Au/Ge/Pd, Au/Pd/Ge/Pd 그리고 Au/Pd/Au/Ge 로 구성되는 시편의 음성접촉 특성을 조사한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) Au-Pd-Ge 계의 음성접촉에서 비접촉 저항은 alloying 된 Au/Ni/AuGe 음성접촉의 그것과 필적할 만큼 낮았으며 그 중에서 특히 Au/Ge/Pd 접촉의 경우에 430°C에서 3분간 sintering 했을 때 가장 낮은 $1.2 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 의 비접촉저항을 나타내었다.

2) Au/Ge/Pd 접촉의 경우 가장 낮은 비접촉저항을 나타낸 430°C sintering 온도에서 시간에 따른 저항변화는 $1.2 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 시간의 의존성이 비교적 약했으며 또한 Ge/Pd 두께에 따른 저항변화도

적었다.

3) Au-Pd-Ge 계의 음성접촉에서의 표면형상은 430°C 이하에서는 sintering 되지 않은 표면과 다를 바가 없을 정도로 아주 매끄러웠다. 또한 접촉패턴의 가장자리로 명확하게 정의되었다.

따라서 GaAs 음성접촉에 sintering 에 의한 Au/Ge/Pd 접촉을 사용함으로써 GaAs 소자에 있어서 음성접촉의 신뢰성 및 재현성을 향상시킬 것으로 기대된다.

- 1) N.Braslau, J.B.Gunn, and J.L.Staples: *Solid-St. Electronics*, **10**, 381-383, 1987.
- 2) J.Willer and H.Oppoler: *Thin Solid Films*, **147**, 117-130, 1987.
- 3) M.Murakami, W.H.Price, and Y.C.Shih: *J.Appl.Phys.*, **62**, 3288-3294, 1987.
- 4) A.K.Sinha, T.E.Smith, and H.H.Levinstein: *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-22**, 218-224, 1975.
- 5) H.R.Grinolds and G.Y.Robinson: *Appl. Phys.Lett.*, **34**, 575-577, 1979.
- 6) H.R.Grinolds and G.Y.Robinson: *Soild-St. Electronics*, **23**, 973-985, 1980.
- 7) J.O.Olowolafe, P.S.Ho, H.J.Hovel, J.E.Lewis, and J.M.Woodall: *J.Appl.Phys.*, **50**, 955-962, 1979.
- 8) M.Heibrium, M.I.Nathan, and C.A.Chang: *Soild-St. Electronics*, **25**, 185-195, 1982.
- 9) 박창엽, 남춘우: 전기학회 논문지, <36>, 12, 50-55, 1987.
- 10) A.Iliadis and K.E.Singer: *Soild-St. Electronics*, **26**, 7-14, 1983.
- 11) T.I.Kim and D.D.L.Chung: *J.Vac.Sci.Technology*, **B4**, 762-768, 1986.