

Rapid와 Conventional Alloying 공정에 의한 GaAs Ohmic Contact의 특성 비교연구와 TLM의 새로운 해석 방법의 제안

(Comparison Studies on GaAs Ohmic Contacts Fabricated by Rapid and Conventional Alloying Process and New Analysis Method of TLM Patterns)

李 鎮 九*

(Jin Koo Rhee)

要 約

GaAs 집적회로 제작시 ohmic contact 공정은 매우 중요하다. Rapid와 conventional alloying 공정후, $R_{sm}=R_s$ 의 가정하에 specific contact resistivity를 측정하여 비교한 결과 rapid alloying 공정에 의한 ohmic contact의 특성 ($\rho_c=1.3\sim 3.3\times 10^{-7} \Omega\text{-cm}^2$)이 우월함을 알 수 있다. Rapid alloying 시의 집중적이고 복합적인 에너지 밀도에 의하여 ohmic contact의 특성이 향상된다고 사료된다. TLM pattern에서 적은 값의 end contact 저항 측정을 통한 specific contact resistivity 측정시 측정오차를 최소화하여 줄이기 위하여 normalized specific contact resistivity의 새로운 해석 방법을 제안 하였다. Rapid alloying 공정을 이용하면 GaAs 집적회로의 대량생산시 전체공정 시간을 크게 단축할 수 있다.

Abstract

Ohmic contact process for the fabrications of GaAs integrated circuits is very important. Specific contact resistivities, assuming $R_{sm}=R_s$, were measured after the rapid and the conventional alloying process, respectively. The results show that the characteristics of ohmic contact through the rapid alloying process is much better ($\Delta\rho_c=1.3\sim 3.3\times 10^{-7} \Omega\text{-m}^2$). This is probably due to intensive and compound energy densities during the rapid alloying process. New analysis method of TLM patterns viz. measurements of normalized specific contact resistivities are proposed to reduce measurement errors that could occur when measuring the small contact end resistances. The adoption of rapid alloying process for the mass production of GaAs integrated circuits could greatly reduce the total processing time.

I. 서 론

*正會員, 東國大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Dongguk Univ.)
接受日字: 1988年 7月 5日

최근에는 정보의 다양화, 대량화 및 고속화에 대응할 수 있는 시대적 요구를 충족 시킬 수 있는 새로운 반도체 재료와 집적회로에 대한 연구가 활발히

진행되고 있다.^[1] Gallium Arsenide (GaAs)를 이용한 집적회로 제작 공정중에서 가장 기본이 되고 중요한 공정은 ohmic contact 이다.^[2] 그리고 일반적으로 ohmic contact 제작후의 특성은 specific contact resistivity의 측정 분석에 있다. Specific contact resistivity의 측정은 Kelvin Resistors에 의한 방법,^[3,4] 또는 Transmission Line Model (TLM)^[5,6,7]에 의한 방법이 가장 많이 사용되고 있다.

본 논문에서는 먼저 conventional alloying과 rapid alloying 공정 후의 ohmic contact의 실험을 통하여 비교 검토하고, 종래의 specific contact resistivity의 측정오차를 줄이기 위하여 end contact resistance의 측정없이 normalized specific contact resistivity를 측정하여 ohmic contact의 특성을 분석하는 방법을 새로이 제안하였다.

II. TLM의 새로운 해석방법

Ohmic 금속 재료의 sheet resistance와 전류의 측정확산을 무시하고 그림 1(a)에 도시된 바와 같은 TLM pattern과 그림 1(a)의 등가회로에서 다음과 같은 미분방정식이 유도된다.^[8]

$$\frac{dV(x)}{dx} = -\frac{R_{sm}}{W} I(x) \tag{1}$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = -W \left(\frac{1}{\rho_{cm}} + j\omega C \right) V(x) \tag{2}$$

단, 여기서 V(x) 및 I(x)는 각각 전압 및 전류이고, ρ_{cm} 은 alloying 후의 변화된 specific contact resistivity ($\Omega - cm^2$), C는 분포용량 (F/cm^2), R_s 는 반도체 활성층의 sheet resistance, R_{sm} 은 metal-semiconductor contact 아래에서 alloying 후 변화된 sheet resistance 이고,^[9] ω 는 각 주파수이다.

미분방정식 (1)과 (2)의 해는 각각 다음과 같다.

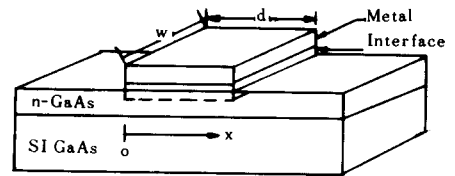
$$V(x) = A e^{-\gamma x} + B e^{+\gamma x} \tag{3}$$

$$I(x) = \frac{1}{z} (Ae^{-\gamma x} - B e^{+\gamma x}) \tag{4}$$

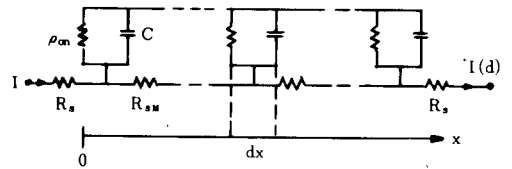
단, A와 B는 적분 상수이며 γ 와 z는 각기 propagation constant 및 특성 impedance 이다.

$$r = \left[\frac{R_{sm}}{\rho_{cm}} (1 + j\omega C \rho_{cm}) \right]^{1/2} \tag{5}$$

$$z = \frac{1}{W} \left[\frac{R_{sm} \rho_{cm}}{1 + j\omega C \rho_{cm}} \right]^{1/2} \tag{6}$$



(a)



(b)

그림 1. 전송선 모델

- (a) ohmic contact and
- (b) 등가 회로

Fig. 1. Transmission line model.

- (a) an ohmic contact and
- (b) an equivalent circuit of the contact.

DC 측정을 수행한 경우에 대해서 상기 식(5)와 (6)은 다음과 같이 된다.

$$\alpha = \frac{1}{L_{tm}} = \left(\frac{R_{sm}}{\rho_{cm}} \right)^{1/2} \tag{7}$$

$$z = \frac{1}{W} (R_{sm} \rho_{cm})^{1/2} \tag{8}$$

단, 여기서 L_{tm} 은 transfer length이다.^[4]

Contact resistance, R_c 는 식(3), (4) 및 $I(d) = 0$ 의 조건으로 부터 구하면 다음과 같다.

$$R_c = z \coth(\alpha d) \tag{9}$$

TLM pattern으로부터 ohmic contact의 각종 parameter들이 측정될 수 있다. 즉, 각기 서로 다른 길이, ℓ 의 변화에 대한 전 저항, R_t 는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.^[8]

$$R_t = 2 \frac{(R_{sm} \rho_{cm})^{1/2}}{W} \coth(\alpha d) + \frac{R_s}{W} \ell \tag{10}$$

식(9)를 식(10)에 대입하면 R_t 는 식(11)과 같다.

$$R_t = 2 \frac{(R_{sm} \rho_{cm})}{W} \coth(\alpha d) + \frac{R_s}{W} \ell \tag{11}$$

만약 $d > 2/\alpha$ 이면 식(11)은 다음과 같다.

$$R_t = 2 \frac{R_{sm} L_{tm}}{W} + \frac{R_s}{W} \ell \tag{12}$$

여기서 $R_{sm} = R_s$ 를 가정하면 식(12)는 다음과 같다.

$$R_t = 2 \frac{R_s L_t}{W} + \frac{R_s}{W} \ell \quad (13)$$

단, L_t 는 $R_{sm} = R_s$ 인 가정하의 transfer length 이다. 따라서, 식(13)을 도시하면 R_s 는 slope로부터 구할 수 있으며, transfer length는 $L_t = -\ell_x/2$ 로 용이하게 구할 수 있다. 이때 ℓ_x 는 $R_t = 0$ 일때의 ℓ 의 값이다. 그리고 $R_{sm} = R_s$ 로 가정한 경우의 specific contact resistivity, ρ_c 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho_c = R_s \left(\frac{\ell_x}{2} \right) \quad (14)$$

만약 $R_{sm} \neq R_s$ 인 경우의 specific contact resistivity, ρ_{cm} 은 다음과 같다.

$$\rho_{cm} = R_{sm} L_{tm}^2 \quad (15)$$

위와 같은 경우에는 일반적으로 TLM 측정으로부터 R_{sm} 과 L_{tm} 을 구하기 어렵기 때문에 contact end resistance를 측정하는 방법⁹⁾으로 ρ_{cm} 을 구하였다. 그러나 일반적으로 contact end resistance의 값이 수 Ω 이하로 매우 적기 때문에 측정시 포함되는 오차로 인하여 ρ_{cm} 의 정확한 측정이 어렵다. 따라서 이와같은 contact end resistance의 측정 오차로 인한 ρ_{cm} 의 측정 오차를 최소화 하기 위하여 다음과 같은 normalized된 ρ_{cm} 과 ρ_c 의 값을 비교하여 ohmic contact의 특성을 비교할 수 있다.

$$\frac{\rho_{cm}}{L_{tm}} = R_{sm} L_{tm} \quad (16)$$

또한

$$\frac{\rho_c}{L_t} = R_s L_t \quad (17)$$

III. 실험

GaAs wafer는 (100)으로 oriented된 semi-insulating으로써 3" wafer이다. GaAs wafer는 약 900Å의 Si_3N_4 가 deposit 되어 있다. n층은 $^{29}Si^+$ 이온을 선택적으로 주입하였으며, 이때 dose는 2.9×10^{12} atoms/cm², 주입 energy는 120KeV이다. 또한 GaAs 집적회로의 공정을 simulation 하기 위한 실험이므로 n⁺층은 n층과 같이 선택적으로 $^{29}Si^+$ 이온을 200KeV로 주입하였다. 이때 dose는 5×10^{13} atoms/cm²이다. 약 1600Å 정도의 SiO_2 를 Si_3N_4 위에 deposit한 다음에 800°C의 conventional furnace 내에서 20분간 annealing을 했다. Annealing은 furnace 내부에 90%의 N_2 와 10%의 H_2 로 구성된 forming gas가 계속적

으로 흐르는 상태에서 행하였다.

Annealing 후에 전 GaAs wafer 상에서 Silox를 제거하고 test pattern을 제작한다. 즉, ohmic contact을 만들기 위하여 Au:Ge(88:12) alloy를 약 1670Å의 두께로 GaAs 위에 deposit 하고 그 위에 약 330Å 정도의 Ni을 deposit 했다. 그후 lift-off 공정을 통하여 TLM을 제작한다.

Conventional alloying과 rapid alloying의 결과를 비교하기 위한 실험 단계이므로 여기서 3" wafer를 1/2로 나눈다. 이때 conventional furnace alloying 실험은 forming gas (90N₂:10H₂)를 15SCF/Hr로 계속 흘러주면서 450°C에서 90sec 간 alloying을 행하였다.

또한 rapid alloying 실험은 forming gas (90N₂:10H₂)를 2ℓ/min로 계속 흘러주면서 450°C에서 각기 20, 25 및 30sec 동안 행하였다. 또한 planar 집적회로의 공정을 simulation 하기 위한 실험이므로 planar 구조를 가능한 한 유지하기 위해서 약 1100Å 정도의 plasma Si_3N_4 를 deposit 한후에 Ti/Pt/Au(800Å/400Å/3200Å)의 gate metal을 lift-off 공정으로 측정용 TLM pattern을 제작했다.

IV. 측 정

Conventional alloying과 rapid alloying 공정에 의한 planar ohmic contact의 특성을 비교 검토하기 위하여 $R_{sm} = R_s$ 인 가정하에 TLM pattern에서 측정된 data를 그림 2에 대표적으로 도시 하였다. 그림 2에서 wafer 150C는 conventional alloying 공정에 의한 측정결과로서 3개의 3" 반쪽 wafer로부터 측정된

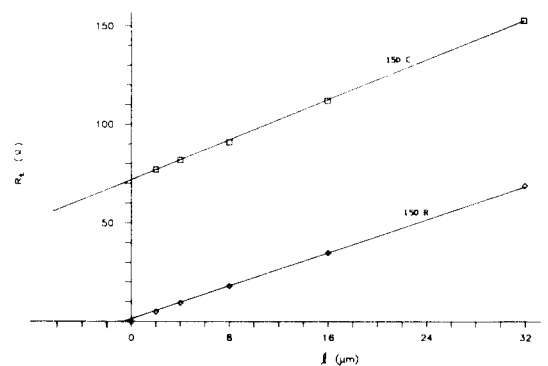


그림 2. Conventional alloying된 wafer 150C와 rapid alloying된 wafer 150R 측정 data

Fig. 2. Measured data on wafer 150C by conventional alloying and wafer 150R by rapid alloying, respectively.

specific contact resistivity data는 $3.9 \sim 4.5 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}^2$ 이다. 또한 그림 2에서 wafer 150R은 alloying 시간이 20sec인 rapid alloying 공정에 의한 ohmic contact의 측정 결과이다. TLM pattern에서 측정된 specific contact resistivity는 $4.2 \sim 4.5 \times 10^{-7} \Omega\text{-cm}^2$ 이다.

표 1은 conventional alloying과 rapid alloying 공정 후에 각기 측정된 specific contact resistivity를 비교하였다. 또한 표 1에서 sheet resistance, R_s 는 각기 TLM과 van der Pauw patterns을 이용하여 측정된 결과이며, 실질적인 측정의 정확도를 비교 검토하기 위하여 수록하였다.

표 2에서는 $R_{sm} \neq R_s$ 인 경우에 대하여 식(16)과 식(17)을 이용하여 normalized specific contact resistivity를 비교하였다. 이때 TLM pattern의 간격 $\ell=1, 2, 4, 8, 16, 32\mu\text{m}$ 이고 폭(W)와 길이(d)는 각기 $100\mu\text{m}$ 이다.

표 1. Conventional alloying(CA)과 rapid alloying(RA) 공정에 의한 측정치 비교
Table 1. Measured data after RA and CA respectively.

wafer	alloying 방법	$\rho_c (\Omega\text{-cm}^2)$	$R_s (\Omega/\square)$	
			TLM	van der pauw
150C	CA	$(4.1 \pm 0.1) \times 10^{-4}$	250 ± 19	254 ± 17
151C	CA	$(4.5 \pm 0.2) \times 10^{-4}$	252 ± 20	260 ± 20
152C	CA	$(3.9 \pm 0.2) \times 10^{-4}$	242 ± 18	245 ± 19
150R	RA	$(4.3 \pm 0.1) \times 10^{-7}$	215 ± 15	221 ± 16
151R	RA	$(4.5 \pm 0.2) \times 10^{-7}$	223 ± 16	230 ± 17
152R	RA	$(4.2 \pm 0.2) \times 10^{-7}$	215 ± 16	223 ± 16

표 2. Normalized specific contact resistivity의 비교

Table 2. Normalized specific contact resistivity after CA and RA.

wafer	alloying 방법	$R_{sm} L_{tm} (\Omega\text{-cm})$	$R_s L_s (\Omega\text{-cm})$
150C	CA	0.36	0.32
151C	CA	0.38	0.34
152C	CA	0.35	0.30
150R	RA	8.5×10^{-3}	8.3×10^{-3}
151R	RA	8.8×10^{-3}	8.4×10^{-3}
152R	RA	8.5×10^{-3}	8.2×10^{-3}

상기에서 기술한 바와같이 rapid alloying 공정에 의한 ohmic contact의 특성이 우월함을 증명하고 재현성을 확인하고 rapid alloying의 최적조건을 구하기 위하여 (100) oriented된 3" GaAs wafer 3개를 각기 rapid alloying 시간을 20, 25 및 30sec로 변화 시키면서 $R_{sm}=R_s$ 인 가정하에서 측정된 specific contact resistivity의 값을 표 3에 수록하였다. 측정된 specific contact resistivity는 $1.3 \sim 3.3 \times 10^{-7} \Omega\text{-cm}^2$ 의 범위에서 변화하고 있다.

또한 측정치의 정확성을 비교 검토하기 위해서 sheet resistance, R_s 를 TLM과 van der Pauw pattern에서 각기 측정된 값들도 표 3에 수록하였다. 표 4에는 $R_{sm} \neq R_s$ 인 경우에 대해서 normalized specific contact resistivity를 각각 수록하였다.

V. 결 론

Conventional alloying과 rapid alloying의 공정결과를 TLM patterns에서 측정된 data를 표 1과 표 2에서 비교하면 rapid alloying 공정에 의한 ohmic contact의 특성이 conventional alloying에 의한 ohmic contact

표 3. Rapid alloying 결과 측정치
Table 3. Measured data after rapid alloying process.

wafer	RA시간 (sec)	$\rho_c (\Omega\text{-cm}^2)$	$R_s (\Omega/\square)$	
			TLM	van der Pauw
206 R	20	$(3.3 \pm 0.1) \times 10^{-7}$	130 ± 10	132 ± 11
207 R	25	$(2.2 \pm 0.09) \times 10^{-7}$	146 ± 15	143 ± 12
208 R	30	$(1.5 \pm 0.1) \times 10^{-7}$	140 ± 13	146 ± 14
209 R	25	$(2.3 \pm 0.1) \times 10^{-7}$	145 ± 14	147 ± 15
210 R	30	$(1.3 \pm 0.1) \times 10^{-7}$	146 ± 15	152 ± 17

표 4. Normalized specific contact resistivity의 비교

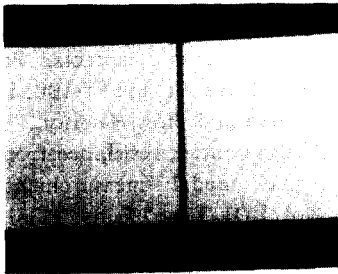
Table 4. Measured the normalized specific contact resistivities.

wafer	RA시간 (sec)	$R_{sm} L_{tm} (\Omega\text{-cm})$	$R_s L_s (\Omega\text{-cm})$
206R	20	7.0×10^{-3}	6.5×10^{-3}
207R	25	6.8×10^{-3}	5.8×10^{-3}
208R	30	6.0×10^{-3}	4.6×10^{-3}
209R	25	6.3×10^{-3}	5.8×10^{-3}
210R	30	5.0×10^{-3}	4.4×10^{-3}

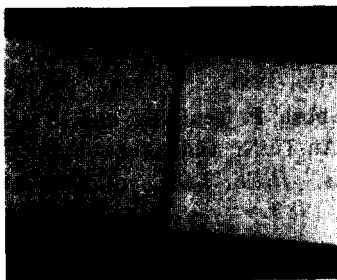
보다 특성이 매우 양호함을 알 수 있다. 그 이유는 Rapid alloying시의 집중적이고 복합적인 에너지 밀도에 의하여 ohmic contact의 특성이 향상된다고 사료된다. Ohmic metal의 표면을 그림 3의 microphotograph로 도시하였다.

그림 3 (a)는 conventional alloying 공정 (450°C, 90초) 결과와 그림 3(b)는 rapid alloying 공정 (450°C, 20초) 결과의 microphotograph를 각각 나타내었다. 그림 3 (a)와 (b)의 ohmic metal 표면 상태는 거의 비슷함을 알 수 있다.

Rapid alloying 공정시의 alloying 온도가 450°C 인 경우 최적 조건을 구하기 위해서 alloying 시간을 20, 25, 30sec로 변화시키면서 공정한 결과를 측정할 수 있는 specific contact resistivity data를 표 3에, normalized specific contact resistivity data를 표 4에 각기 수록하였다. 표 4에 수록된 normalized specific contact resistivity는 contact end resistance 측정시에 발생할 수 있는 측정 오차와 복잡한 측정 절차를 피할 수 있다. 또한 normalized specific contact resistivity의



(a)



(b)

그림 3. Ohmic metal surface의 비교(gap=4μm)
(a) wafer 150C와
(b) wafer 150R

Fig. 3. Smoothness of the ohmic metal surface (gap=4μm).
(a) wafer 150C and
(b) wafer 150R.

data만 비교하여도 ohmic contact의 특성을 쉽게 판단 할 수 있다.

본 rapid alloying의 실험 결과를 해석적으로 분석하기 위하여 specific contact resistivity와 alloying 시간에 대한 변화된 data를 그림 4에 도시하였다.

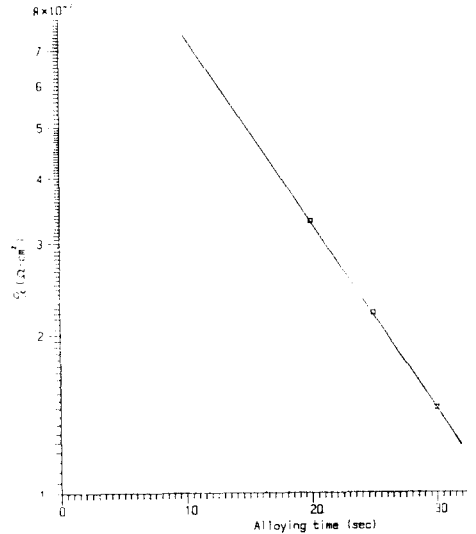


그림 4. Specific contact resistivity와 rapid alloying 시간과의 관계

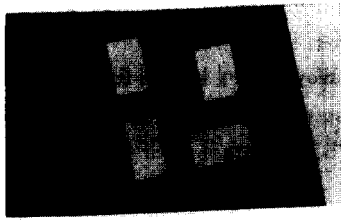
Fig. 4. Specific contact resistivity vs Rapid alloying time.

그림 4로 부터 rapid alloying 시간과 ρ_c와의 관계를 실험적으로 구하면 다음과 같다.¹¹⁾

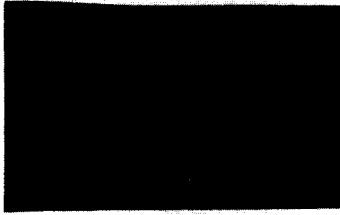
$$\rho_c = 1.7 \times 10^{-6} e^{-0.08t} \tag{18}$$

단, 여기서 t는 rapid alloying 시간이다.

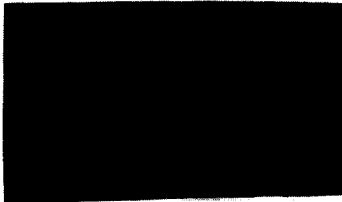
즉, alloying 시간이 길어질수록 specific contact resistivity는 감소함을 알 수 있다. 그리고 현재까지 발표된 ρ_c의 값을 검토해 보면 약 5 × 10⁻⁷ Ω-cm² 정도이다.¹¹⁾ 그러나 그림 5에 도시되어 있는 microphotograph에서 알 수 있는 바와 같이 alloying 시간이 길어질수록 metal의 이동이나 surface 상태가 고르지 못함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 rapid alloying의 온도가 450°C 이고 alloying 시간이 25sec인 경우가 planar 집적회로 공정에 사용될 수 있는 양호한 ohmic contact을 하기 위한 최적의 공정조건임을 알 수 있다. 또한 rapid alloying 공정을 이용하면 GaAs 집적회로를 대량으로 제작시에 전체 공정 시간을 크게 단축시킬 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 5 Ohmic metal surface의 비교

- (a) wafer 206R의 metal 표면
 (b) wafer 209R의 metal 표면과
 (c) wafer 210R의 metal 표면

Fig. 5. Smoothness of the ohmic metal surface ($50 \times 80 \mu\text{m}^2$ pattern).

- (a) wafer 206R.
 (b) wafer 209R and
 (c) wafer 210R.

參 考 文 獻

[1] 이진구, "통신용 초고속 반도체 소자", 한국통신 학회논문지, vol. 11, pp. 153-163, 1986.

- [2] B.L. Sharma, "Semiconductors and semi-metals," ed. by R.K. Williardson and A.C. Beer, vol. 15, pp. 1-38, Academic Press, 1981.
- [3] R.L. Gillenwater, M.J. Hafich, and G.Y. Robinson, "Extraction of the minimum specific contact resistivity using kelvin resistors", *IEEE, EDL*, vol. EDL-7, pp. 674-676, 1986.
- [4] W. Shockley, "Research and investigation of inverse epitaxial E.H.F power transistors," Report no. A1-TOR-64-207, September 1964, Air Force Atomic Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.
- [5] H.H. Berger, "Models for contacts to planar devices," *Solid-State Electron.*, vol. 15, pp. 145-158, 1972.
- [6] E. Yamaguchi, T. Nishioka and Y. Ohmachi, "Ohmic contacts to Si-implanted InP", *Solid-State Electron.*, vol. 24, pp. 263-265, 1981.
- [7] H.H. Berger, "Contact resistance and contact resistivity," *J. Electrochem., Soc.*, vol. 119, pp. 507-514, 1972.
- [8] H.B. Harrison, "Characterizing metal semiconductor ohmic contacts," *Proceedings of the IREE*, vol. 41, pp. 95-100, 1980.
- [9] G.K. Reeves and H.B. Harrison, "Obtaining the specific contact resistance from transmission line model measurements," *IEEE, EDL*, vol. EDL-3, no. 5, pp. 111-113, 1982.
- [10] 이진구, 정철희, 조승기, 김상명, 조희철, 이응호 및 성낙경, "GaAs 집적회로 공정개발을 위한 Rapid Alloying의 연구," 1988년도 반도체 재료 및 부품 연구회, 씨에이디 연구회 합동 학술발표회 논문집, 제 6 권 제 1 호, pp. 152-155, May, 1988.
- [11] C. Ghosh, P. Yenigalla, and K. Atkins, "Use of Au/Te/Ni films for ohmic contact to GaAs," *IEEE, EDL*, vol. EDL-4, pp. 301-302, 1983. *

著 者 紹 介

李 鎮 九 (正會員) 第25卷 第11號 參照
 현재 동국대학교 전자공학과
 부교수.