

As 이온이 주입된 단결정 실리콘(100)의 전기적 활성화 연구

이동건·문영희·손정식·김동렬·배인호·김말문·
한병국*·정광화**

영남대학교 물리학과, *경산대학교 물리학과, **한국 표준과학연구원
(1995년 1월 27일 접수)

Study on Electrical Activation of As Ion Implanted Si(100)

D. K. Lee, Y. H. Mun, J. S. Son, D. Y. Kim, I. H. Bae, M. M. Kim,
B. K. Han* and K. H. Chung**

Department of Physics, Yeungnam University, Kyongsan, 712-749

**Department of Physics, Kyongsan University, Kyongsan, 712-240*

***Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon, 305-606*

(Received January 27, 1995)

요 약 - Hall 효과 측정을 이용하여 As⁺이 주입된 단결정 실리콘의 열처리 조건에 따른 활성화 과정을 연구하였다. 주입된 이온의 농도 분포는 SIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy)와 SUPREM IV 모의 실험으로 조사하였다. 열처리 온도가 증가함에 따라 활성층의 전자 면 농도 증가가 뚜렷이 나타났으며, Hall 이동도의 온도 의존성 측정으로 주입된 도우즈에 따라 이온 주입층의 활성화에 필요한 열처리 온도가 달라져야함을 알 수 있었다. 그리고, 접합 손실전류의 감소는 800°C (30분)의 열처리에서 현저하게 나타났다.

Abstract - We studied activation process of As⁺ implanted Si(100) according to annealing conditions by using Hall effect measurement. Depth profiles were measured by SIMS(secondary ion mass spectroscopy) and SUPREM IV computer simulation. It was found that sheet carrier concentration become different clearly in proportion to the increasing of annealing temperature, and that the annealing temperature has to vary according to dose for activation of implanted layer by measuring temperature dependence of Hall mobility. And, decreasing of junction leakage current was shown clearly above 800°C (30 min).

1. 서 론

반도체 소자 개발에 있어서 주된 관심은 소자의 고속화와 고밀도 집적화 그리고, 전력 소비량을 줄이는 것이었다. 이러한 목적을 위한 소자의 최적화는 고농도 이온 주입에 의해 얇은 접합의 구조를 만듦으로써 가능해 진다.

Gibbons 등의 보고에 의하면, 이온 주입시 생성되는 시편의 손상 밀도가 주입된 불순물의 활성화에 영향을 준다[1-5]. Miyao에 의하면, 주입되는 이온의 채널링

현상이 일어나는 부분은 손상이 적게 일어나고, 이 부분들에 남아있는 이온들은 500°C 이하의 열처리에서 쉽게 활성화되어 지며, 심하게 손상을 입은 비정질 영역에서 이온들은 약 600°C 근처의 열처리에 의해서 재결정화 과정(Epitaxial-Regrowth Mechanism)을 통하여 활성화시킬 수 있다[6]. 또한, 주입된 불순물들은 약 900°C 의 온도에서 30분 간의 열처리에 의해 거의 완전하게 전기적으로 활성화되어질 수 있다[7]. 특히, 최근에 개발된 급속 열처리(RTA: Rapid Thermal Annealing)법은 furnace 열처리에 비해 시편의 온도를

빠른 시간에 상승시키는 열처리 과정으로 과도한 확산없이 불순물을 전기적으로 활성화시킬 수 있다[8, 9].

본 실험에서는 단결정 Si(100)에 As 이온을 주입하여 열처리에 따른 재결정화와 활성화 과정을 조사하였다. 이온 주입된 시편들에 대한 SIMS 측정과 SUPREM IV 모의 실험 결과들을 비교하였으며, furnace 열처리 및 RTA 처리한 시편들에 대해서 Hall 효과 측정으로 주입된 불순물의 전기적 활성화를 조사하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 기판은 비저항이 $5 \sim 9 \Omega \cdot \text{cm}$ 이며, B이 도핑된, 5 inch, p-type Si(100)이었다. n^+ 층을 형성하기 위해 "350DE, Varian" 이온 주입기를 사용하였으며, 주입된 이온은 5가의 As^+ 이었다. 이온 주입은 60 keV의 에너지에서 $2 \times 10^{14} \text{ atoms/cm}^2$ 과 $1 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^2$ 의 도우즈로 이루어졌다. 주입되는 이온의 채널링 현상을 줄이기 위하여 기판과 주입되는 이온 빔은 7° 로 tilting하였다. 또한, 자체 열처리 효과를 없애기 위하여 이온 주입동안 실온을 유지하였다. 이온 주입되기 전에 주입된 이온의 깊이에 따른 농도 분포를 SUPREM IV 모의 실험으로 조사하였으며, 이온 주입후 시편의 깊이에 따른 농도 분포와 열처리에 따른 주입된 이온의 거동을 SIMS로 측정하여 SUPREM IV와 비교하였다. 이온 주입후, 측정 용도에 따라 알맞게 절단된 시편들은 HF 용액으로 자연산화막을 제거한 후 $400^\circ\text{C} \sim 950^\circ\text{C}$ 까지 30분간 furnace 열처리하였으며, 900°C 에서 15, 30, 60초간 RTA 처리하였다. 이온 주입된 층의 열처리에 따른 재결정화 과정과 활성화 과정을 조사하기 위해, 표면 비저항 측정과 Hall 효과 측정을 하였다. 주입된 이온의 Hall 효과 측정을 위해 시편들은 전면의 각 모서리에 Au를 1000\AA 의 두께로 진공 증착하여 400°C , 10분간 metalization한 후 지름이 0.2 mm인 금실로 In을 사용하여 lead 선을 만들었다. 실험에 사용된 Hall 장치는 인가 전류를 $10 \mu\text{A}$ 로, 인가 자장을 $\pm 5000 \text{ G}$ 로 하였다. 고정 측정온도는 77K와 300K로 하였으며, 온도 의존성을 관찰하기 위하여 77K에서 400K 까지 측정 온도를 변화시켰다. n^+p mesa 다이오우드의 접합 손실전류의 측정을 통해 접합영역의 결합

감소에 대해 조사하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 1은 furnace 열처리와 RTA 처리에 따른 주입된 이온의 깊이에 따른 농도 분포를 보여준다. (a)와 (b)는 SUPREM IV에 의한 모의 실험 결과이고 (c)와 (d)는 SIMS 측정에 의해 나타난 결과이다. 그림 1에서 보이는 것과 같이 열처리에 의한 주입 이온의 거동에서, SIMS 측정에서는 R_p 와 약 1700\AA 근처에서의 과도 확산을 모두 볼 수 있지만, SUPREM IV 모의 실험에서는 R_p 근처에서의 과도 확산만이 관찰된다. 고농도 이온 주입의 열처리에 있어서 R_p 근처에서의 과도 확산이 이온 주입시 형성되는 결합들과 관계가 있는 것으로 알려지고 있다[10,11]. 또한, 이온 주입에 의한 손상과 더불어 열처리에 따른 격자 회복시 나타나는 이차 결합 즉, 점 결합과 dislocation loop들이 이 영역 근처에서 나타나며 특히, 빈자리의 이동에 의한 불순물의 과도 확산이 그 원인들이라 생각된다[12, 13]. 이러한 결합들은 불순물의 활성화와 소자의 동작시 캐리어 전송에 영향을 미치게 된다. R_p 에서의 최고 농도는 $2.5 \times 10^{20} \text{ atoms/cm}^3$ 였으며, 열처리되지 않은 시편의 날카로운 peak가 900°C , 30분간의 열처리에 의해 완만한 농선을 만들면서 R_p 근처에서 최고 농도의 저하와 더불어 표면층과 시편 내부로 확산됨을

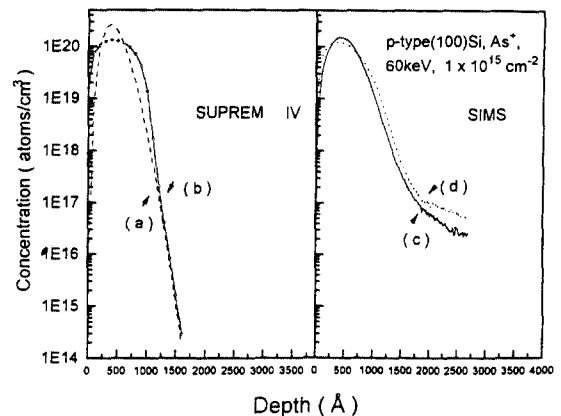


Fig. 1. Profile of carrier concentration for a dose of $1 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^2$.

(a) as-implanted, SUPREM IV (b) 900°C , 30 min. SUPREM IV (c) as-implanted, SIMS (d) 900°C , 15s. SIMS

볼 수 있다. 이러한 과정과 더불어 시편에 주입되어진 불순물들은 재결정화 과정을 통해 silicon 격자 내에 위치하게 되고, 이온 주입되어진 층은 전기적으로 활성화될 것이다.

Van Der Pauw법으로 이온 주입층의 활성화를 조사하기 위해 표면 비저항 및 Hall 효과를 측정을 하였다. 이온 주입한 시편에 있어서의 Hall 효과와 표면 비저항의 측정은 다음의 원인으로 인해 약간의 영향을 받는다. 그것은 캐리어 농도 n 이 깊이에 따라 변하고 그에 따라 이동도 μ 가 변하기 때문이다. 그러므로, 측정되어지는 면 농도 N_s 와 Hall 이동도 μ_{EFF} 는 가중 평균이 되어, $\mu_{EFF} = \mu$ 가 된다. 따라서, 다음의 식에서 r 은 1이 된다[10].

$$N_2 = n_i R_p = \frac{r}{R_s q}$$

여기서, R_s 는 표면 비저항이며, 산란인자 $r = \mu_H / \mu$ 는 Hall 이동도($\mu_{EFF} = R_{SH} / \rho_s$)와 conductivity 이동도 ($\mu = 1 / \epsilon N_s \rho_s$)의 비이다.

그림 2는 RTA처리에 의한 불순물의 활성화에 관계된 이동도와 면 농도의 변화를 보여 주고 있다. 측정되어진 Hall 이동도와 면 농도의 값은 30초 이상에서 약 1×10^{15} atoms/cm²으로 나타났다. 이러한 값은, Tsien 등에 의한 As 이온 주입된 실리콘에 대한

CO₂ laser 열처리의 결과인 1.45×10^{15} atoms/cm²과 유사한 값이다[14]. 이것은 주입 도우즈와 거의 같은 값이며, 열처리 시간의 증가로 인한 더 이상의 면 농도의 증가는 볼 수 없다. 이러한 사실은 900°C에서의 고체 용해도가 그림 2에서 처럼 약 1.5×10^{15} atoms/cm²을 넘지 않으며, RTA 처리 시간은 불순물 활성화에 기여하는 면에서 거의 같은 효과를 나타낼 수 있다. 이 온도에서의 열처리 시간의 증가는 오히려 불순물의 확산을 일으키게 되어 얇은 접합을 위해서는 아무런 도움이 되지 못한다. 주입된 이온의 활성화와 불순물의 불필요한 확산을 막기 위하여 여러가지 방법들이 시도되고 있다[15, 16].

그림 3과 4는 30 분의 열처리를 한 시편들에 대한 Hall 측정 결과이다. 그림 3은 측정 온도 77K에서의 이동도와 면 농도 그리고 표면 비저항을 나타낸다. 일반적으로 n⁺p접합으로 형성되어진 독립된 층에 대한 표면 비저항 측정에 있어서 비저항 값이 $\rho_H < 10^4 \Omega/\square$ 로 나타나면 p-n접합이 잘 이루어진 것으로 간주하게 된다[10]. 600°C 이상에서 2×10^{14} atoms/cm²으로 주입된 (a)의 경우 비저항이 약 350 Ω/\square 인데 반해, (b)의 1×10^{15} atoms/cm²으로 주입된 시편의 표면 비저항은 약 100 Ω/\square 로 주입된 도우즈에 따라

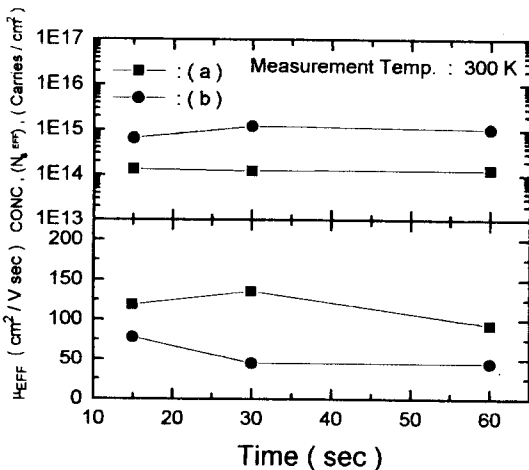


Fig. 2. Dependence of mobility and sheet carrier concentration on the Rapid Thermal Annealing at 900°C, for silicon samples implanted with 60 keV arsenic ions. (a) 2×10^{14} atoms/cm² (b) 1×10^{15} atoms/cm².

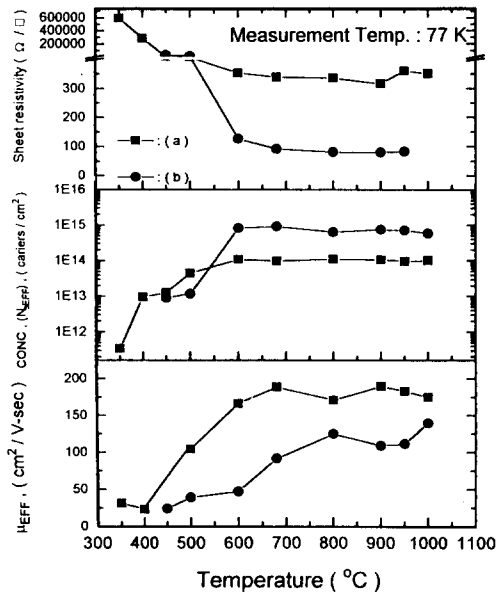


Fig. 3. Annealing behavior of arsenic(30 min). (a) $2 \times 10^{14}/\text{cm}^2$, 60 keV (b) $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$, 60 keV

표면 비저항의 차가 크게 남을 알 수 있다. 측정된 면 밀도는 600°C 이상에서 주입된 이온의 도우즈와 거의 같게 나타난다. 500°C 에서부터 두 시편 모두 이동도 값이 증가하는 것을 볼 수 있으며, 2×10^{14} atoms/cm²의 경우 680°C 까지 1×10^{15} atoms/cm²의 경우 800°C 까지 증가하고 있다. 이온주입에 의해 비정질화된 시편의 열처리를 하는 경우에 있어 고상 성장이 일어나는 온도는 약 500~700°C 사이이다[7]. 그러므로, 이 온도 범위에서 열처리에 의해 나타나는 이동도의 증가는 주입된 이온의 재결정화 과정으로 볼 수 있다. 700°C 이상의 온도에서 이동도 값은 포화되며, 이는 주입된 이온이 이 온도 이상에서 재결정화와 더불어 전기적 활성화가 일어나고 있음을 의미한다. 450~500°C 로 열처리한 시편에 대해서는 2×10^{14} atoms/cm²으로 주입한 경우가 1×10^{15} atoms/cm²인 경우보다 면 농도 값이 오히려 높게 나오는 것을 볼 수 있다. 이것으로 임계 비정질 농도 이하로 주입된 경우, 주입층의 비정질화가 완전하게 일어나지 않는 것으로 보여지며, Raman 측정에서의 주입된 층의 결정성 회복 연구에서도 잘 나타나 있다[17].

반도체 내에서 캐리어의 이동도는 온도에 크게 영향을 받게 된다. 고 농도로 도핑된 실리콘의 경우, 저온 영역에서는 불순물 산란에 의한 영향이 지배적으로 나타나며, 고온으로 올라갈수록 격자 산란에 의한 영향이 지배적으로 나타난다. As 이온 주입에 의한 경우, 주입된 층의 완전 비정질화가 일어나기 시작하는 도우즈가 1×10^{15} atoms/cm²~ 1×10^{16} atoms/cm²으로 나타났다[15,17]. 특히, 2×10^{14} atoms/cm²으로 주입된 as-implant 상태의 시편은 비정질층과 결정층이 공존하는 것으로 사려된다[17]. 본 실험에서는 이러한 두 가지의 상 즉, 2×10^{14} atoms/cm²의 완전 비정질이 이루어지지 않는 도우즈로 주입한 경우와 1×10^{15} atoms/cm²의 완전 비정질이 이루어지는 도우즈로 주입한 경우에 대한 각각의 재결정화가 일어나는 온도인 680°C 와 주입된 이온이 활성화되는 온도인 900°C 에 대한 Hall 이동도의 온도 의존성에 대하여 조사하였다. 그림 4에서 2×10^{14} atoms/cm²으로 주입한 경우에 있어서는 680°C 와 900°C 의 결과가 온도에 관계없이 거의 같은 경향을 보였다. 그러나, 오히려 보다 고농도의 이온 주입을 한 1×10^{15} atoms/cm²의 경우에는 격자 산란 현상만 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 위의 시편들에 대한 결과에서 볼 수 있듯이 완전 비

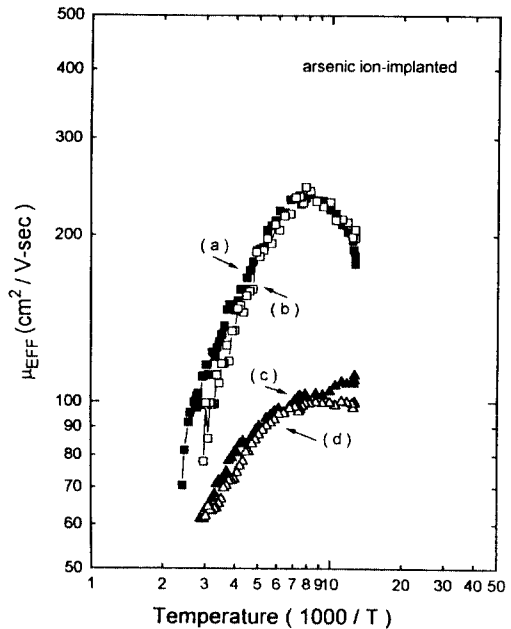


Fig. 4. Temperature dependence of μ_{EFF} for 4 silicon samples annealed(30 min) to 680°C (fill) and 900°C (open).

(a) : ■, (b) : □→ 2×10^{14} atoms/cm² (c) : ▲, (d) : △→ 1×10^{15} atoms/cm²

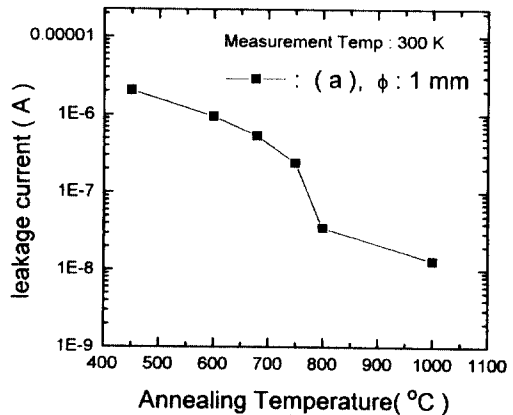


Fig. 5. Junction leakage current for samples.

(a) 2×10^{14} atoms/cm², 60 keV

정질이 이루어지지 않는 도우즈의 이온 주입에 있어서는 680°C 의 저온 열처리에서 재결정화와 더불어 활성화가 이미 많이 일어나고 있음을 알 수 있다. 1×10^{15} atoms/cm²으로 주입된 시편의 경우에 있어서는 77K 근처에서 680°C 에서 열처리된 시편보다 900°C 에

서 열처리된 시편의 기울기가 완만해지는 것으로 보아 이 온도에서 어느 정도 활성화가 이루어진 것으로 보여진다. 주입된 이온의 완전한 활성화를 위해서는 보다 고온에서 열처리할 필요성이 있다고 생각된다.

이온 주입에 의해 형성된 n^+p 접합의 손실전류를 측정된 결과는 그림 5이다. 그림에서 손실전류가 750 °C 까지 서서히 감소하다가 800 °C 부터는 그 값이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 그림 3의 열처리에 따른 이동도의 변화에서 본 것과 유사한 결과이며 이 온도 이상에서 접합영역 근처의 결함들이 많이 줄어들었음을 알 수 있다. 이온 주입에 의해 형성된 주입층은 주입 초기에 원자간 충돌에 의해 많은 결함들을 생성하게 되며, 이러한 결함들은 p-n 접합의 전류전송에 있어 많은 손실전류를 생성하게 된다. 이온 주입된 층에 대한 이러한 결함들은 재결정화 과정을 통해 없애거나 또는 비활성적 영역들을 형성함으로써 손실전류를 감소시키게 된다[15].

4. 결 론

본 실험에서는 단결정 Si에 주입된 As 이온에 의해 형성된 이온 주입층의 열처리에 따른 전기적 활성화에 대해 조사하였다. 이온 주입에 의해 형성된 n^+ 층의 깊이에 따른 농도 분포에서 SUPREM IV의 모의 실험에서는 R_p 근처의 확산이 열처리한 후에 관찰되었으며, SIMS 측정으로는 위의 결과 뿐만 아니라 tail 영역의 관찰과 열처리에 따른 확산을 관찰할 수 있었다. Hall 효과 측정을 이용한 열처리에 따른 주입층의 활성화 조사에서 900 °C에서의 RTA 처리 시간의 변화는 큰 차이가 나타나지 않았으며, furnace 열처리를 한 시편들은 500~700 °C에서 Hall 이동도가 증가하였다. 그리고, 열처리 온도가 증가할수록 활성화층의 전자 농도변화가 뚜렷하게 나타났다. Hall 이동도 및 면 농도의 온도 의존성에서 완전 비정질이 일어나지 않는 도우즈의 경우(2×10^{14} atoms/cm²), 30분의 680 °C와 900 °C 두 열처리를 한 시편에 대한 Hall 이동도의 온도 의존성은 격자 산란 및 불순물 산란이 나

타났으나, 비정질화가 일어나는 경우(1×10^{15} atoms/cm²)에는 격자 산란이 오히려 지배적으로 나타나며, 900 °C의 열처리를 한 경우 약간의 불순물 산란 현상이 77K 근처에서 나타난다. 접합 손실전류 측정에서 열처리 온도 증가에 따른 현저한 감소를 볼 수 있었으며, 이온 주입된 층의 활성화에도 불구하고 여전히 약간의 손실전류가 있음을 볼 수 있었다.

참고문헌

1. Y. D. Kim, H. Z. Hassond and R. B. Fair, *J. Electron. Mater.* **18**(2), 143 (1989).
2. J. F. Gibbons, *Proc. IEEE.* **60**, 1062 (1972).
3. M. Miyao, N. Natsuaki, N. Yoshihiro, M. Tamua and T. Tokuyama, *Jpn. J. Appl. Phys., Suppl.* **15**, 57 (1976).
4. T. Mitsuishi, Y. Sasaki, and H. Asami, *Jpn. J. Appl. Phys.* **16**, 367 (1977).
5. F. F. Morehead, B. L. Crowder and R. S. Title, *J. Appl. Phys.* **43**, 1112 (1972).
6. M. Miyao, N. Yoshihiro and T. Tokuyama, *J. Appl. Phys.* **49**(4), 2573 (1978).
7. W. K. Hofker in "VLSI Technology", 2nd ed. edited by S. M. Sze, (McGraw-Hill, New York, 1988), p.357.
8. R. Singh, *J. Appl. Phys.* **63**(8), R59 (1988).
9. T. E. Seidel, D. J. Lischner, C. S. Pai, R. V. Knoell, D. M. Mather and D. C. Jacobson, *Nuc. Instrum. Methods*, **B7/8**, 251 (1985).
10. N. G. E. Johansson and J. W. Mayer, *Solid-State Electron.* **13**, 317 (1970).
11. N. G. E. Johansson and J. W. Mayer, *Solid-State Electron.* **13**, 123 (1970).
12. A. Lietoila, J. F. Gibbons and T. W. Sigmon, *Appl. Phys. Lett.* **36**(9), 765 (1990).
13. R. B. Fair, J. J. Wortman and J. Liu, *J. Electrochem. Soc.* **131**(10), 2387 (1984).
14. P. H. Tsien, *J. Appl. Phys.* **53**(1), 663 (1982).
15. H. Ishiwara and S. Horita, *Jpn. J. Appl. Phys.* **24**(5), 568 (1985).
16. H. J. Gossmann, *J. Appl. Phys.* **74**(5), 3150 (1993).
17. 문영희, 한국진공학회 **3**(3), 341 (1994).