

Poly·Si-SiO₂를 통한 저농도 붕소 확산

(Boron Diffusion of Low Concentration through Poly·Si-SiO₂)

金正會*, 朱炳權*, 金鐵柱*

(Jung-Hoe Kim, Byeong-Kwon Ju and Chul-Ju Kim)

要 約

CVD-BN을 이용한 저농도 붕소확산을 위하여 poly·Si-SiO₂를 통한 실리콘으로의 붕소확산을 실험하였다. BN으로부터 실리콘으로 붕소를 직접 확산시킨 결과, SiO₂를 통해 확산시킨 결과와 poly·Si-SiO₂를 통해 확산시킨 결과를 비교하여 보았다. poly·Si-SiO₂를 통한 확산의 경우 실리콘내의 붕소표면농도 $C_s \cong 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 정도인 저농도 확산을 얻을 수 있었으며, 이때 유리화합물은 발생하지 않았다.

Abstract

Boron diffusion into silicon through poly·Si-SiO₂ was carried out for the diffusion with low concentration using CVD-BN. The result of direct boron diffusion from BN into silicon and that of boron diffusion through SiO₂ from BN into silicon was compared with the result of boron diffusion through poly·Si-SiO₂ from BN into silicon. In the case of boron diffusion through poly Si-SiO₂, the low concentration diffusion was obtained, that is the boron surface concentration in silicon $C_s \cong 10^{16} \text{Cm}^{-3}$, and the glassy compounds were not seen.

I. 서 론

반도체 기술에 있어서 3가 불순물 확산원으로는 붕소가 가장 많이 이용되고 있다. 붕소를 실리콘에 확산하는 확산원에는 B₂O₃^{1,2)}, B-doped SiO₂¹³⁾, CVD-BSG⁴⁾ (Chemical Vapor Deposited-Borosilicate Glass)와 CVD-BN⁵⁻¹¹⁾ (Boron Nitride)등이 있는데, 최근에는 붕소확산원과 동시에 passivation 역할을 하여 p-MOS등의 소자제작에 유리한^{6,11)} CVD-BN을 이용한 확산에 대해 많은 연구가 진행되고 있다.

CVD-BN을 이용한 붕소확산에 대하여는, M. Hirayama⁵⁾가 비정질 BN막과 poly·BN막을 이용하여 붕소를 확산하였는데, 비정질 BN막은 700°C ~ 1200°C의 확

산온도에서 분해되어 확산의 재현성이 없음이 보고되었다. 한편 얇은 BN막과 BN막의 산화에 의한 BSG를 이용한 저농도 확산에 대한 보고에서도 확산의 재현성은 좋지 않았다. M. Hirayama가 보고한 BN의 분해문제를 해결하기 위해 K. Shono⁶⁾는 BN위에 Si₃N₄를 덮어 확산시키는 모형을 제안하였다. 그리하여 붕소의 표면농도 C_s의 재현성을 얻었으나 이는 $C_s > 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 인 고농도 확산일 경우에만 적용되었다. C. Kim⁷⁾은 고온에서 증착(deposition)된 BN막을 사용하여 C_s를 $2 \times 10^{20} \sim 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 까지 조절할 수 있음을 보였다. 한편, SiO₂를 통한 붕소의 확산에 대해 S. Horieuchi⁸⁾와 W. Muench⁹⁾등이 2단계 확산모형을 제시하고 저농도 확산을 얻었으나 이때는 SiO₂의 유리화¹⁰⁾를 막지 못했다.

본 연구에서는 SiO₂의 유리화를 막고, 저농도 붕소 확산을 얻기위해 CVD-BN을 이용하여 poly·Si-SiO₂를 통한 확산을 실험하였다. 실험결과를 Si으로 직접

*正會員, 서울市立大學 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Seoul City Univ.)
接受日字: 1986年 9月 3日

확산한 결과, SiO₂를 통해 확산한 결과와 비교하였으며, poly·Si-SiO₂를 통한 확산모형을 2 경계 확산모형으로 등가적으로 해석하고 실험결과와 비교 검토하였다.

II. 실험방법

CVD-BN을 이용한 붕소 확산실험을 위해 CVD 장비로 BN, Si₃N₄와 poly silicon(poly·Si)을 증착(deposition)하였다. 본 실험에 사용된 CVD장치에 대하여는 이미 발표한 바 있다.¹¹⁾ 반응관내의 graphite susceptor위에 시료를 올려놓고 r. f. generator(400KHz, 3KW)를 이용하여 가열하면서 반응개스를 흘려주어 박막을 증착시켰다. 사용한 반응관의 크기는 20×40×400mm이고, 웨이퍼는 방향이 (100)인 n형(phosphorous-doped)으로 비저항은 4~8Ωcm이고 N_d≒ 2×10¹⁵cm⁻³인 경면연마된 웨이퍼이다. 시료의 크기는 3인치 웨이퍼를 잘라 35×40mm이고 두께는 450μm이다. CVD장치의 반응개스는 B₂H₆와 SiH₄를 질소에 각각 1%, 5%로 희석시킨 것과 NH₃를 이용하였고, 캐리어 개스로는 질소를 이용하였다.

박막의 증착은 CVD-BN의 경우 온도 500℃와 780℃에서 1000Å 증착하였으며, 이때의 B₂H₆와 NH₃의 분압은 각각 0.032torr, 4.43torr이었다. poly·Si은 CVD 방법으로 750℃에서 3000Å을 증착하였으며, 이때의 SiH₄의 분압은 0.317torr이었다. 열 산화막은 1050℃, dry-O₂분위기에서 500Å 성장시켰다. CVD-Si₃N₄는 passivation¹⁴⁾으로 800℃에서 1000Å 증착시켰다. 이때의 SiH₄와 NH₃의 분압은 각각 0.317torr, 6.33torr이었다. 캐리어개스인 질소는 12ℓ/min 공급하였다.

붕소의 확산은 그림 1의 (a)~(d)와 같이 네 가지방법을 비교하여 실험하였다. 그림 1의 (a)와 (b)는 각각 500℃와 780℃에서 증착한 BN에서 실리콘으로 직접 확산한 경우이며, (c)는 780℃에서 증착한 BN에서 열산화막 500Å을 통하여 실리콘에 확산하였다. 그림 1의(d)는 780℃에서 증착한 BN에서 poly·Si 3000Å과 열산화막 500Å을 통하여 확산한 경우이다. 각 시료들은 Si₃N₄ 1000Å으로 passivation한 다음 전기로를 이용하여 1200℃, N₂분위기에서 1~20시간동안 확산하였다.

확산후 Si₃N₄와 poly·Si은 conc. HF로, BN은 H₃PO₄(160℃ 가열)로 에칭하였다. 특히 SiO₂를 에칭할 때는 완충에칭용액으로 하였는데, 이때 SiO₂의 에칭특성으로 SiO₂의 유리화를 관찰하였다.¹⁵⁾ 확산층의 sheet resistance(R_s)는 four-point probe법을 이용하여 측정하였고,¹³⁾ 확산깊이(x_j)는 spherical drill법과 stain

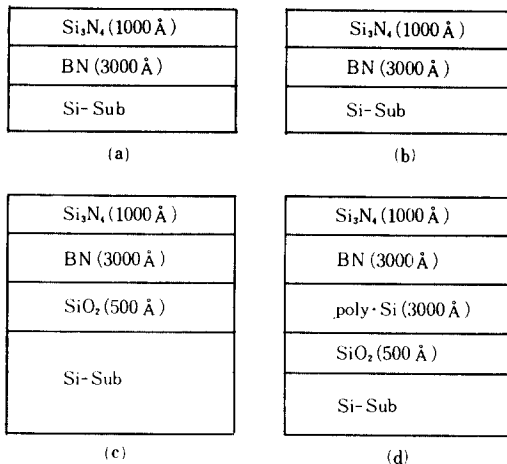


그림 1. 각 시료에 대한 단면도

- (a) 시료 1 Si₃N₄-BN(500℃ 석출)-Si
- (b) 시료 2 Si₃N₄-BN(780℃ 석출)-Si
- (c) 시료 3 Si₃N₄-BN(780℃ 석출)-SiO₂-Si
- (d) 시료 4 Si₃N₄-BN(780℃ 석출)-poly·Si-SiO₂-Si

Fig. 1. Cross-section of each samples.

- (a) Sample1 Si₃N₄-BN(deposited at 500℃)-Si.
- (b) Sample2 Si₃N₄-BN(deposited at 780℃)-Si.
- (c) Sample3 Si₃N₄-BN(deposited at 780℃)-SiO₂-Si.
- (d) Sample4 Si₃N₄-BN(deposited at 780℃)-poly·Si-SiO₂-Si.

기술을 이용하여 측정하였다.¹⁴⁾ 시료의 확산profile은 spreading 저항법으로 측정하였다.^{15),16)}

III. 결과 및 검토

시료 1~시료 4의 확산실험에 대한 결과를 그림 2와 그림 3에 보였다. 그림 2는 확산시간에 대한 p-n접합깊이(x_j)의 측정치를 나타낸 것으로, BN에서 실리콘으로 직접 확산한 시료 1(a)과 시료 2(b)는 확산시간에 대해 선형적으로 변함을 알 수 있다. BN에서 SiO₂를 통해 실리콘으로 확산한 시료 3(c)의 x_j는 확산초기에서 시료 2의 x_j에 비해 크게 차이가 나나 2시간 이후에는 거의 비슷한 결과를 보인다. poly·Si-SiO₂를 통해 확산한 시료 4(d)는 시료 2나 시료 3에 비해 x_j가 매우 적으나, 확산시간에 대한 x_j가 초기에 급격히 변함을 알 수 있고 점차로 기울기가 완만하여져서 선형적으로 되어감을 추정할 수 있다.

그림 3은 확산시간에 대한 sheet resistance(R_s) 측정치를 나타냈고, x_j와 R_s를 이용하여 계산한 실리콘

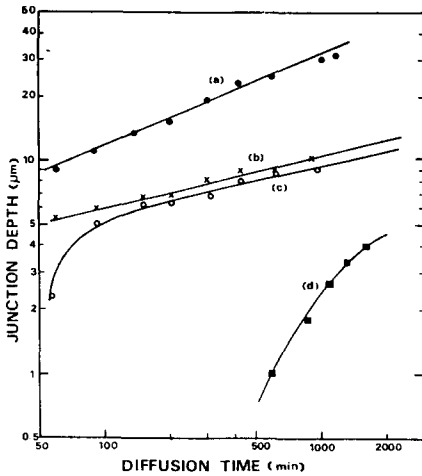


그림 2. 확산시간에 대한 접합깊이
(a) 시료 1 (b) 시료 2
(c) 시료 3 (d) 시료 4

Fig. 2. Junction depth versus diffusion time.
(a) Sample 1, (b) Sample 2,
(c) Sample 3, (d) Sample 4.

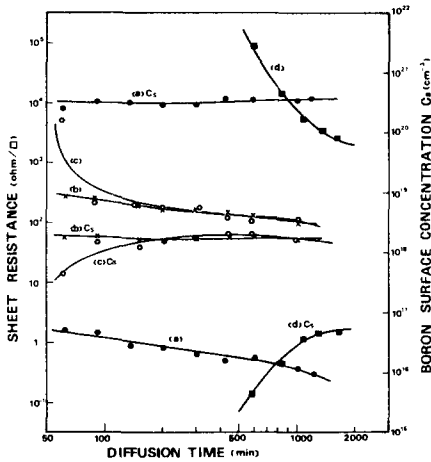


그림 3. 확산시간에 대한 sheet resistance와 붕소표면농도
(a) 시료 1 (b) 시료 2
(c) 시료 3 (d) 시료 4

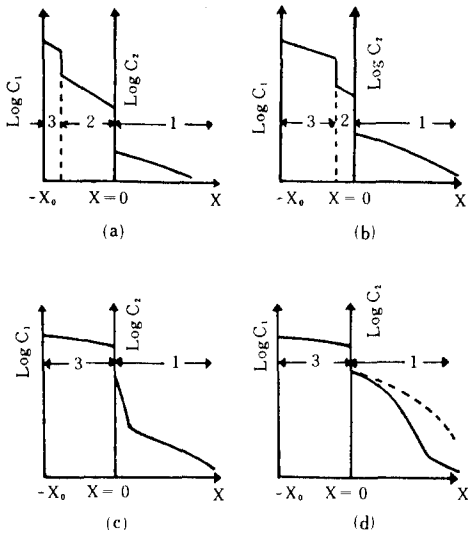
Fig. 3. Sheet resistance and boron surface concentration versus diffusion time.
(a) Sample 1, (b) Sample 2,
(c) Sample 3, (d) Sample 4.

의 붕소표면농도(C_s)를 보였다. 여기서 (a)~(d)는 각각 시료 1~4에 해당한다. C_s 에 대하여 살펴보면, BN을 각각 500°C, 780°C에서 증착하고 실리콘에 직접 화

산한 시료 1과 시료 2는 각각 $C_s = 2 \sim 4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, $C_s = 3 \sim 8 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 로 일정한 값을 가짐을 알 수 있다. 이들 두 값의 차이는 BN증착온도의 차이에 있음이 알려져 있다.^{15,17} 한편 BN에서 SiO₂를 통해 확산한 시료 3의 C_s 는 확산초기를 제외하고는 BN에서 실리콘으로 직접 확산한 시료 2의 C_s 와 거의 같음을 알 수 있다. 그러나 poly·Si-SiO₂를 통해 확산한 시료 4의 C_s 값은 확산시간에 따라 계속 증가하다가 20시간 이상에서는 $C_s \approx 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 정도로 상당히 일정하여짐을 알 수 있다.

CVD-BN에서 SiO₂를 통한 확산에 대해 살펴보면 그림 4와 같다. SiO₂를 통해 붕소를 확산시킬 경우 붕소 원자와 SiO₂가 결합하여 붕소유리가 형성되며, 확산이 진행됨에 따라 계속 성장한다.^{18,19} 그림 4는 Horiuchi¹⁸ 등이 고안한 모형으로 확산시간이 길어짐에 따라 붕소 유리층의 막 두께는 증가하고 유리화되지 않은 SiO₂의 막 두께는 감소한다. 붕소유리층의 붕소농도는 매우 높기 때문에 유리화되지 않은 SiO₂의 막이 얇아질수록 실리콘표면의 붕소농도는 커지고, SiO₂의 마스크작용은 감소하며, SiO₂층이 완전히 유리화되었을 때 실리콘 표면농도 C_s 는 급격히 증가하게 된다.^{14,19} 즉 시료 3의 경우는 SiO₂층의 마스크작용 상실로 인해 확산시간이 길어짐에 따라 시료 2와 거의 같은 C_s 를 갖게 된다.

시료 4의 poly·Si-SiO₂를 통한 확산에 대해 살펴보면 다음과 같다. C. Kim¹⁷ 등은 BN의 조성비, 증착온도와 확산온도 등을 조절하여 CVD-BN을 실리콘에 직접 확산하였을 때 C_s 가 $2 \times 10^{18} \sim 2 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 까지 조절됨을 보였다. 즉 780°C에서 증착한 BN막을 1200°C에서 확산시키면 $C_s \approx 2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 을 얻는데, 이는 시료 2에서 얻은 결과와 일치한다. 여기서 SiO₂위에 증착한 poly·Si의 grain이 충분히 크고, poly·Si에서의 붕소확산메카니즘이 단결정 실리콘과 등가적으로 취급될 수 있다면, poly·Si을 통한 확산을 $C_s \approx 2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 정도로 제어할 수 있다. 그러므로 poly·Si-SiO₂를 통한 확산을 할 경우 SiO₂내의 붕소유리의 성장은 매우 천천히 이루어지며 그림 4의 (a) 상태가 장시간 지속된다. 여기서 확산시 붕소유리의 성장이 SiO₂두께에 비해 무시될 수 있고, 붕소유리와 SiO₂경계를 고려할 필요가 없다는 것과, poly·Si을 단결정 실리콘과 등가적인 상태라 하고 그 막두께가 얇을 경우($\approx 3000 \text{Å}$) poly·Si내를 붕소가 확산하여 표면농도와 SiO₂경계농도가 거의 같아질 때까지 걸리는 시간이 짧아 무시할 수 있다는 가정이 성립하면¹⁸ 그림 5와 같은 2경계확산모형¹⁸ (Two boundary diffusion model)이 성립된다.



- 1 : Silicon
- 2 : Silicon oxide
- 3 : Glassy compound
- C_1 : Boron concentration in silicon oxide
- C_2 : Boron concentration in silicon
- X_0 : Silicon oxide thickness

그림 4. “유리화합물”의 성장에 따른 붕소농도의 변화

- (a) 확산초기
- (b) 유리화합물이 감지할 수 있을 만큼의 두께로 성장했을 때
- (c) 산화층이 유리화합물로 완전히 바뀐 직후
- (d) 층의 변환 후 상당한 시간동안 확산시킨 경우

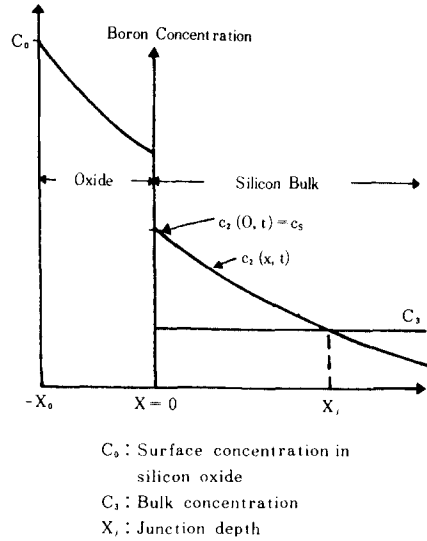
Fig. 4. Change of concentration profile of boron with growth of the “glassy compound”.

- (a) Beginning of the diffusion.
- (b) When the glassy compound grown to an appreciable thickness.
- (c) Just after the whole conversion of the unreacted oxide into the glassy compound.
- (d) Diffusion for considerable time after the whole conversion.

그림 5는 막 두께가 x_0 인 SiO_2 가 실리콘 위에 위치하는 1차원 모형이다. 경계는 $x = 0$ 와 $x = -x_0$ 이며 이 모형은 산화막에 직접 붕소원자를 확산시키는 방법과 같다. 붕소농도는 거리 x 와 시간 t 의 함수로 SiO_2 내에서는 $C_1(x, t)$ 로, 실리콘내에서는 $C_2(x, t)$ 로 표현하고 SiO_2 와 실리콘내에서의 확산계수를 D_1, D_2 로 나타내면 각각의 매질내의 붕소농도분포는 다음의 확산방정식으로 주어진다.⁽⁸⁾

$$D_1 \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} = \frac{\partial C_1}{\partial t} \quad (-x_0 < x < 0) \quad (1)$$

$$D_2 \frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2} = \frac{\partial C_2}{\partial t} \quad (x > 0) \quad (2)$$



- C_0 : Surface concentration in silicon oxide
- C_1 : Bulk concentration
- X_j : Junction depth

그림 5. 2 경계 확산모형으로 나타낸 SiO_2 와 Si내의 붕소농도

Fig. 5. Boron concentration distribution in silicon oxide and in silicon for the two boundary diffusion model.

초기조건과 경계조건은

$$C_1 = C_2 = 0 \quad (x > -x_0, t = 0) \quad (3)$$

$$mC_1 = C_0 = \text{const} \quad (x = -x_0, t > 0) \quad (4)$$

$$mC_1 = C_2 = C_s \quad (x = 0, t > 0) \quad (5)$$

$$D_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} = D_2 \frac{\partial C_2}{\partial x} \quad (x = 0, t > 0) \quad (6)$$

여기서 m 은 SiO_2 와 실리콘 경계면에서의 붕소분리 계수이다. 확산방정식의 해는

$$C_1(x, t) = C_0 \sum_{n=0}^{\infty} \left[\alpha^n \text{erfc} \frac{(2n+1)x_0 + x}{2\sqrt{D_1 t}} - \alpha \text{erfc} \frac{(2n+1)x_0 - x}{2\sqrt{D_1 t}} \right] \quad (-x_0 < x < 0) \quad (7)$$

$$C_2(x, t) = m(1-\alpha) C_0 \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \text{erfc} \frac{(2n+1)x_0 + rx}{2\sqrt{D_1 t}} \quad (x > 0) \quad (8)$$

여기서 $r = \sqrt{D_1/D_2}$, $\alpha = (m-r)/(m+r)$ 이다. 붕소의 실리콘 표면농도 (C_s)는 $C_2(0, t)$ 로 나타낼 수 있고, C_s 를 normalized oxide thickness $x_0/2\sqrt{D_1 t}$ 의 함수로 나타낼 때 $x_0/2\sqrt{D_1 t} \geq 0.7$ 인 경우 C_s 는 erfc 급수 1항에 근사되며, p-n접합깊이 (x_j)가 결정되면 bulk의 농도는 $C_s = C_2(x_j, t)$ 로 되고, (8)식에 의해 산화막 두께 x_0 와 x_j 관계가 구해진다.

$$x_0 + rx_j = 2\sqrt{D_1 t} \arcc \left[\text{erfc} \frac{C_s}{m(1-\alpha) C_0} \right] \quad (9)$$

(9)식은 $t = 0$ 에서 $r = -x_0/x$,

$$D_1 = r^2 \cdot D_2 \quad (10)$$

로 r 과 D_1 혹은 D_2 가 구해진다. 그러므로 poly·Si-SiO₂를 통한 확산결과를 2경계 확산모형의 해석과 비교하면 다음과 같다. x_j 를 확산시간 \sqrt{t} 의 함수로 나타내면 그림 6으로 된다. 즉 x_j 가 \sqrt{t} 에 선형적으로 비례함을 알 수 있으며, (9)식의 근사가 정확하며 우변이 상수인 것을 알 수 있다. 또한 시료2와 시료4의 실험에서, 붕소확산profile을 구하여 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 검은 점은 BN에서 실리콘으로 직접 확산한 시료2의 붕소농도 profile이고, 흰 점은 BN에서 poly·Si-SiO₂를 통하여 확산한 시료4의 붕소농도 profile이다.

시료2의 확산profile에서 실리콘 내의 붕소확산계수 D_2 를 구한다. BN에서 실리콘 내로 확산된 붕소농도가 $C_s \leq 9 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 일 경우 이 profile은 확산층의 접합부를 제외하고는 상보오차함수 (complementary error function)에 일치함이 알려져 있다.^(14,15)

$$C(x, t) = C_s \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_2 t}}\right) \quad (12)$$

여기서 $C_B = C(x_j, t)$ 로 놓으면 D_2 가 구해진다.

$$D_2 = \frac{1}{t} \left[\frac{x_j}{2 \text{erfc}^{-1}(C_B/C_s)} \right]^2 \quad (13)$$

이때 $C_B = 2.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, $C_s = 2.2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, $x_j = 12 \mu\text{m}$, $t = 22 \text{hr}$ 이라하면 $D_2 = 8.2 \times 10^{-13} \text{cm}^2/\text{sec}$ 가 구해진다. 여기서 구한 D_2 는 확산온도 1200°C에서의 실리콘의 고유확산계수 $D_1 = 1.4 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{sec}$ 보다 낮다. 이는 붕소의 C_s 가 고유캐리어농도 $n_1 = 2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 보다 적기때문에 생기는 지연효과에 기인한다.⁽¹⁰⁾ D_2 를 (12)식에 대입

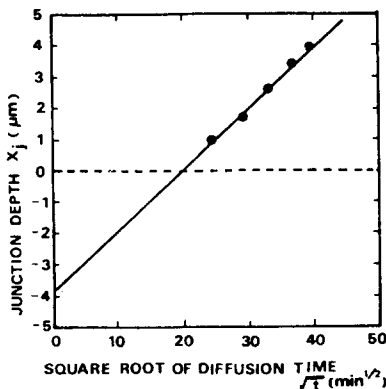


그림 6. 확산시간의 제곱근의 함수로 나타낸 p-n 접합깊이
Fig. 6. p-n junction depth as a function of square root of diffusion time.

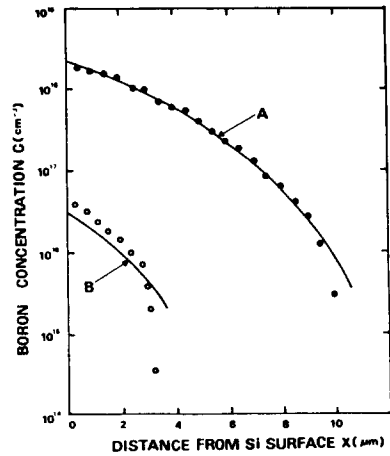


그림 7. 붕소확산 profile (22시간)
검은점 : 시료 2 (BN-Si)
흰 점 : 시료 4 (BN-poly·Si-SiO₂-Si)
곡선A : (14) 식
곡선B : (15) 식

Fig. 7. Boron diffusion profiles (22hours)
Black dots : sample 2 (BN-Si)
White dots : sample 4 (BN-poly·Si-SiO₂-Si)
Solid curve A : E_q (14)
Solid curve B : E_q (15)

하면

$$C(x) = 2.2 \times 10^{16} \text{erfc}(2.0 \times 10^3 x) \quad (14)$$

로 되며 그림 7의 곡선A에 나타내었다. 이는 실험치 (black dots)와 잘 일치함을 알 수 있다. SiO₂의 붕소확산계수 D_1 을 구하기 위해 $t = 0$ 에서 (10)식을 이용하면 그림 6에 의해 $r = -500 \times 10^{-10} / -3.8 \times 10^{-6} = 1.32 \times 10^{-2}$ 이 된다. (11)식에 의해 $D_1 = 1.42 \times 10^{-16} \text{cm}^2/\text{sec}$ 로 된다. 위의 값들을 이용하여 poly·Si-SiO₂의 두막을 통한 확산에서 실리콘내의 확산profile을 구하면 다음과 같다. poly·Si 표면과 poly·Si-SiO₂ 경계에서의 붕소농도는 같고 BN에서 실리콘에 직접 붕소를 확산한 경우의 실리콘표면 붕소농도 $C_{s0} = 2.2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 이며, (8)식에서 SiO₂와 실리콘경계면에서의 붕소분리계수 $m = 0.5$, $C_0 = 4.4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 이라하여⁽¹⁹⁾ 이론적인 곡선을 구하면

$$C_2(x) = 1.13 \times 10^{17} \sum_{n=0}^{\infty} 0.95^n \text{erfc}[1.49 \times 10^3 \times \{ (2n+1) \times 500 \times 10^{-8} + 1.32 \times 10^{-2} \times x \}] \quad (15)$$

로 되며 그림 7의 곡선B로 나타내었다. 이것은 측정치 (white dots)와 일치하고 있음을 알 수 있다. 이것은 poly·Si-SiO₂를 통한 확산모형이 2경계확산모형으로 해석가능하고, 따라서 붕소유리의 성장이 SiO₂ 막두께에

대해 무시될 수 있고, SiO₂가 유리화되지 않음을 알 수 있으며, 이는 확산후 SiO₂를 에칭할 때 SiO₂가 깨끗이 에칭되었던 결과와 일치한다.

IV. 결 론

CVD-BN을 이용하여 poly·Si-SiO₂를 통해 실리콘으로 확산함으로써 저농도 붕소 확산을 얻었다. 1200℃에서 10~25시간 확산한 결과 BN에서 실리콘으로 직접 확산했을 경우에는 C_s=10¹⁸~10²⁰cm⁻³을 얻었고, BN에서 SiO₂를 통하여 확산한 결과 C_s≃10¹⁸cm⁻³을 얻었으나, BN에서 poly·Si-SiO₂를 통하여 확산한 결과 C_s≃10¹⁶cm⁻³을 얻었고, 이때 SiO₂가 유리화 되지 않음을 확인하였다. 또한 이 확산을 간단한 2 경계 확산모형으로 나타내고 실험치와 비교하여 일치함을 보였다.

參 考 文 獻

- [1] A.D. Kurtz and R. Yee, "Diffusion of boron into silicon", *J. of Appl. Physics*, vol. 31, no. 2, pp. 303-305, 1960.
- [2] G.L. Vick and K.M. Whittle, "Solid Solubility and Diffusion Coefficients of Boron in Silicon", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 116, no. 8, pp. 1142-1144, 1969.
- [3] M.L. Barry and P. Olfson, "Doped oxides as diffusion sources", *J. of Electrochem. Soc.*, vol. 116, no. 6, pp. 854-860, 1969.
- [4] D.M. Brown and P.R. Kennicott, "Glass source B diffusion in Si and SiO₂", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 118, no. 2, pp. 293-300, 1971.
- [5] M. Hirayama and K. Shono, "CVD-BN for boron diffusion in Si and its application to Si devices", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 122, no. 12, pp. 1671-1676, 1975.
- [6] K. Shono, et al. "Boron diffusion into Si from CVD-BN covered with Si₃N₄ and application to master slice p-MOS IC", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 127, no. 7, pp. 1546-1550, 1980.
- [7] C. Kim, et al. "Chemical vapor-deposited boron nitride film on silicon as a boron diffusion source", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 131, no. 6, pp. 1384-1388, 1984.
- [8] S. Horiuchi and J. Yamaguchi, "Diffusion of boron in silicon through oxide layer", *Japanese J. of Appl. Phys.*, vol. 1, no. 6, pp. 314-323, 1962.
- [9] W. Muench and C. Gessert, "Low surface concentration of boron in silicon by diffusion through silicon dioxide", *J. Electrochem. soc.*, vol. 122, no. 12, pp. 1685-1689, 1975.
- [10] C. Kim, "Retardation of boron diffusion in silicon", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 131, no. 4, pp. 885-887, 1984.
- [11] C. Kim, K. Shono, "Measurement of electrical resistivity of CVD-BN passivation film from gate charge decay time of a MOS transistor", *Japanese J. of Appl. Phys.* vol. 20, no. 10, pp. 1901-1905, 1982.
- [12] 김정희, 김철주, "고주파 발전기를 이용한 CVD 장치의 제작 및 평가" 대한전자공학회 추계종합 학술대회 논문집, vol. 8, no. 2, pp. 69-71, 1985.
- [13] F.M. Smiths, "Measurement of sheet resistivities with the four-point probe", *Bell System Technical Journal*, vol. 37, no. 3, pp. 711-718, 1958.
- [14] B. McDonald and A. Goetzberger, "Measurement of the depth of diffused layer in silicon by the grooving method", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 109, no. 2, pp. 141-144, 1962.
- [15] R.G. Mazur and D.H. Dickey, "A spreading resistance technique for resistivity measurements on silicon", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 113, no. 3, pp. 255-260, 1966.
- [16] Y. Iida, et al, "Impurity profile measurements of thin epitaxial wafer by multilayer spreading resistance analysis", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 124, no. 7, pp. 1118-1121, 1977.
- [17] S.P. Murarka, et al, "Effect of growth parameters on the CVD of boron nitride and phosphorus-doped boron nitride", *J. Electrochem. Soc.* vol. 126, no. 11, pp. 1951-1957, 1979.
- [18] R.B. Fair, "Boron diffusion in silicon-concentration and orientation dependence, background effects, and profile estimation", *J. Electrochem. Soc.* vol. 122, no. 6, pp. 800-805, 1975.
- [19] A.S. Grove, *Physics and Technology of Semiconductor Devices*, Wiley, New York, pp. 43-83, 1967. *