

삼중 이온주입기술에 의한 GaAs Varactor Diode 의 설계

○ 류 시찬, 조 광태, 이 진구, 윤 현보
 동국대학교 전자공학과

Design of GaAs Varactor Diode using
 triple Ion Implantation

Si-Chan Lyu, Gwang-Rae Jo, Jin-Koo Rhee, Hyun-Bo Yoon
 Dept. of Electronics, Dongguk University

ABSTRACT

Double Ion Implantation methods are used to improve the stiffness of carrier profiles, and then the analytical solutions to Poisson's equation are derived with summation of each carrier profile.

Numerical analyses are done using proper boundary conditions, and the results show that the improvement of voltage-dependent-capacitance ratio (C(1)/C(25)) is obtained up to 0.6.

The third ion implantation is for the enhancement of the Schottky barrier height.

1. 서 론

voltage-variable capacitor 를 만들기 위하여 이중확산(Double diffusion)(1), 이온주입(Ion implantation)(2), 이중 에피택셜 층(3),(4) 등의 제조기술로 hyperabrupt 접합을 형성시켜 Varactor diode 를 제조하여 주파수 체배기, 파라메트릭 증폭기, 튜너등에 사용되고 있다. GaAs varactor 를 이온주입기술로 제작할 경우, 3V 와 25V 에서의 용량비가 5.7 이고(5), 이중 에피택셜층을 형성시켜 만든 것의 용량비는 6 정도인 것이(6) 발표된 바 있다.

웨이퍼로서 GaAs 를 사용할 경우, 직렬저항은 낮아지고, 전자 이동도가 Si 이나 Ge 에 비하여 4-5 배 정도 크므로 차단주파수를 높일 수 있다.

본 논문에서는 용량비를 높이기 위하여 에피택셜층에 마스크를 통한 선택적 삼중 이온주입(selective triple ion implantation) 기술을

이용한 GaAs varactor diode의 새로운 설계법을 고찰 및 제안한다. 설계조건은 컴퓨터를 이용한 수치계산으로 검토되었으며, 그 결과 1V 와 25V 의 용량비가 0.6 로 개선되었다.

2. 설계모형 및 수치계산

삼중으로 이온주입시킬 경우, 전체 불순물 농도분포는 각각의 profile 을 합하는 것과 같으며 열적 평형 상태에서의 전위와 전계분포는 Poisson 방정식의 해를 구하면 얻을 수 있다.

도우핑 profile 을 Gaussian 분포로 가정하고, 정방형 마스크를 사용할 때, 주입된 이온의 삼차원적인 공간분포, $N(x, y, z)$ 는

$$N(x, y, z) = \left\{ N_{p1} \exp\left(-\frac{(z-R_{p1})^2}{2 \cdot \Delta R_{p1}^2}\right) + N_{p2} \exp\left(-\frac{(z-R_{p2})^2}{2 \cdot \Delta R_{p2}^2}\right) - N_{p3} \exp\left(-\frac{(z-R_{p3})^2}{2 \cdot \Delta R_{p3}^2}\right) + N_B \right\} \times \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-a}{\sqrt{2} \Delta x}\right) \right] \times \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{y-a}{\sqrt{2} \Delta y}\right) \right] \quad (1)$$

이 된다. 여기서

$$N_{p1} = \frac{N_{s1}}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_{p1}}$$

$$N_{p2} = \frac{N_{s2}}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_{p2}}$$

$$N_{p3} = \frac{N_{s3}}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_{p3}}$$

이며

$$\text{erfc}(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_t^{\infty} e^{-u^2} du$$

또한 z 는 웨이퍼의 깊이 방향, x 와 y 는 마스크와 평행한 방향이며, N_{s1} , N_{s2} , N_{s3} 는 단위 면적당 각각의 주입 이온 dose 수, $2a$ 는 마스크의 일변의 길이, N_B 는 에피텍셀층의 불순물 농도이다.

그리고 R_p 는 투사범위 (projected range), ΔR_p 는 투사표준편차 (projected standard deviation), Δx 와 Δy 는 x 와 y 방향의 측면표준편차 (lateral standard deviation) 이다.

측면분산 (lateral spreading) 방향으로 erfc 항의 적분값은 "1 (unity)" 이 되므로 z 방향의 전계분포만을 고려하면 되며, p 형의 제 3 이온주입은 varactor diode 의 Schottky barrier height 를 증가시켜주기 위하여 20 KeV 의 shallow 이온주입하였으므로 bulk 내의 carrier profile 에는 전혀 영향을 주지 않는다.

인가전압에 따른 공간전하영역의 변화는 Poisson 의 방정식에 $\phi(W) = V_{bi} - V$ 의 경계조건을 대입하여 풀면 된다. 즉,

$$\begin{aligned} V_{bi} - V = & \frac{q}{\epsilon_s} \left\{ N_{p1} \frac{\sqrt{2\pi}}{2 \Delta R_{p1}} \left(R_{p1} \text{erfc} \left(\frac{W-R_{p1}}{\sqrt{2} \Delta R_{p1}} \right) + R_{p1} \text{erfc} \left(\frac{R_{p1}}{\sqrt{2} \Delta R_{p1}} \right) \right) \right. \\ & - \frac{\sqrt{2\pi}}{\Delta R_{p1}} \left(\exp \left(-\frac{R_{p1}^2}{2 \Delta R_{p1}^2} \right) - \exp \left(-\frac{(W-R_{p1})^2}{2 \Delta R_{p1}^2} \right) \right) \\ & + N_{p2} \frac{\sqrt{2\pi}}{2 \Delta R_{p2}} \left(R_{p2} \text{erfc} \left(\frac{W-R_{p2}}{\sqrt{2} \Delta R_{p2}} \right) + R_{p2} \text{erfc} \left(\frac{R_{p2}}{\sqrt{2} \Delta R_{p2}} \right) \right) \\ & - \frac{\sqrt{2\pi}}{\Delta R_{p2}} \left(\exp \left(-\frac{R_{p2}^2}{2 \Delta R_{p2}^2} \right) - \exp \left(-\frac{(W-R_{p2})^2}{2 \Delta R_{p2}^2} \right) \right) \\ & \left. + N_B \left(\frac{W}{2} \right)^2 \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

여기서 $\text{erfc}(-t) = -\text{erfc}(t)$ 의 관계를 사용하며, V_{bi} 는 built-in 전압이고 V 는 인가전압이다.

단위면적당 용량은

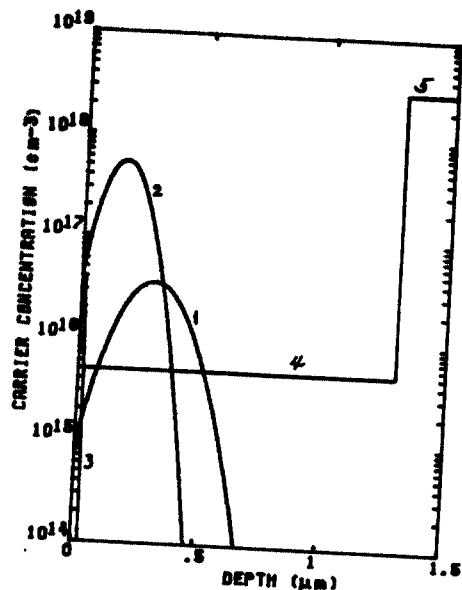
$$C = \frac{\epsilon_s}{W(V)} \quad [F/cm^2] \quad (3)$$

이며 $W(V)$ 는 식(2)에서와 같이 인가전압에 따른 공간전하층의 폭이다.

이상과 같은 관계식을 이용하여 수치계산을 할때 base material 은 GaAs 로 하고, substrate 의 불순물농도는 $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, epitaxial 층의 두께와 불순물농도는 각각 $1.2 \mu\text{m}$ 와 $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 으로 성장시킨다.

인가전압에 따른 용량비를 개선시키기 위한 급경사의 profile 특성을 얻고져 제 1 이온주입은 340 KeV (Si^+ , $R_p = 0.2985 \mu\text{m}$, $\Delta R_p = 0.109 \mu\text{m}$) (10) 의 조건으로 최대 불순물 농도는 $5.7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 이며, 제 2 이온주입은 190 KeV (Si^+ , $R_p = 0.1649 \mu\text{m}$, $\Delta R_p = 0.0725 \mu\text{m}$) (10) 일때 최대 불순물 농도는 $5.5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 이다. Schottky barrier 를 증가시키기 위해 제 3 이온주입은 20 KeV 의 P 형 불순물 (Zn^+ , $R_p = 0.0111 \mu\text{m}$, $\Delta R_p = 0.0061 \mu\text{m}$) (10) 을 주입시킨 것이다. 이때 표면근처에서의 n 형 불순물 농도는 $2-3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 이다.

위의 조건하에서 식 (1)을 컴퓨터로 계산한 결과 각각의 carrier profile 은 그림 1과 같으며, 전체 carrier profile 은 그림 2와 같다.



- 그림 1. 단계별 carrier profile
 (1) 제 1 이온주입, (2) 제 2 이온주입,
 (3) 제 3 이온주입 (4) bulk carrier 농도
 (5) substrate carrier 농도

- Fig1. carrier profile
 (1) 1st ion implantation
 (2) 2nd ion implantation
 (3) 3rd ion implantation
 (4) Bulk carrier concentration and
 (5) substrate carrier concentration

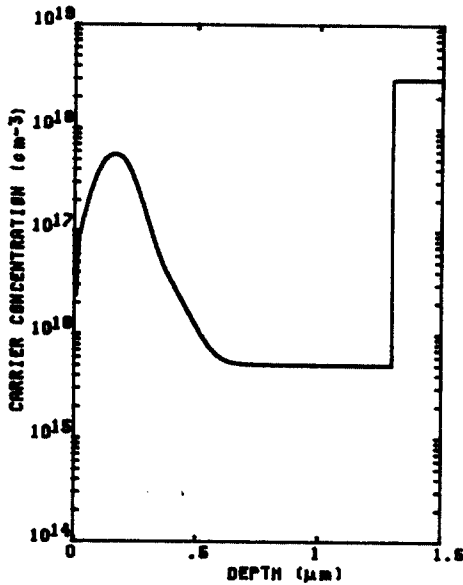


그림2. 전체 carrier profile
 Fig.2. Total carrier profile

그림3. 3차원의 전체 carrier profile
 Fig3. Three-dimensional carrier profile

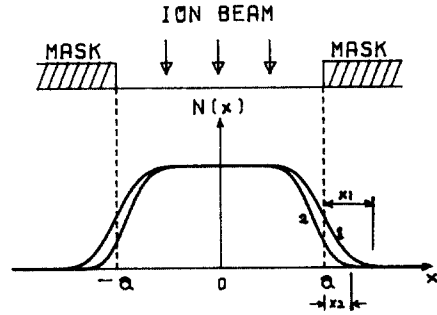
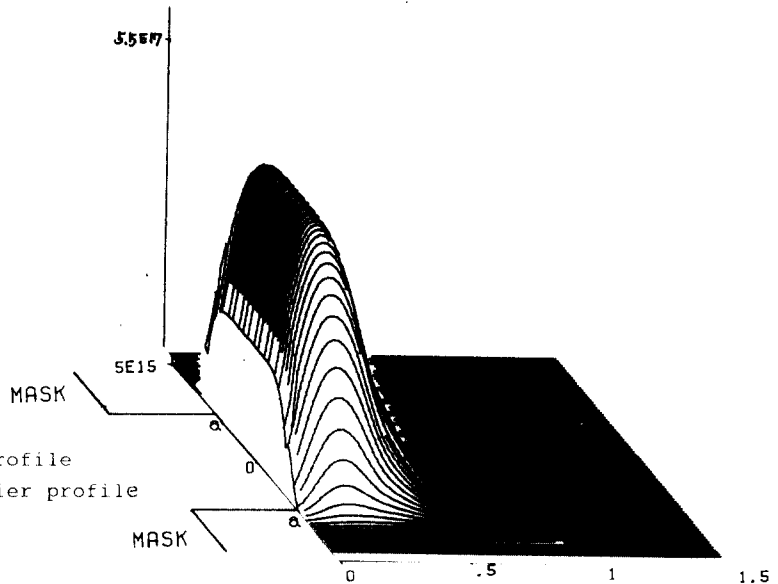


그림 4. 측면분산특성 (1) Slit 형 마스크, (2) 정방형 마스크. $x_1=3.1 \times 10^{-5}$ cm, $x_2=1.8 \times 10^{-5}$ cm

Fig4. Lateral spreading characteristics
 (1) Slit mask (2) square mask

그림2에서와 같이 전체적인 carrier profile의 기울기는 한번 이온주입하는 경우보다는 매우 크므로 용량비가 증가한다. 3차원 전체 carrier profile은 그림 3에 나타내었다.

Slit (7)와 정방형 마스크에 의한 측면분산 결과를 비교하면 그림 4에서 측면분산비가 약 1.72 이다. 그러므로 정방형 마스크의 이온주입에서의 측면분산이 훨씬 적어져서 집적회로를 제조할때 이웃소자에 미치는 영향이 줄어드는 이점이 있다.

식(2)에서 0V-30V까지의 인가전압에 따른 공간전하층의 폭의 변화는 그림 5에 나타내었고, 식(3)에 의한 용량과 전압의 관계를 그림 6에 도시하였다. 그림6에서와 같이 인가전압이 1V와 25V 일때의 용량비는 9.6가 된다.

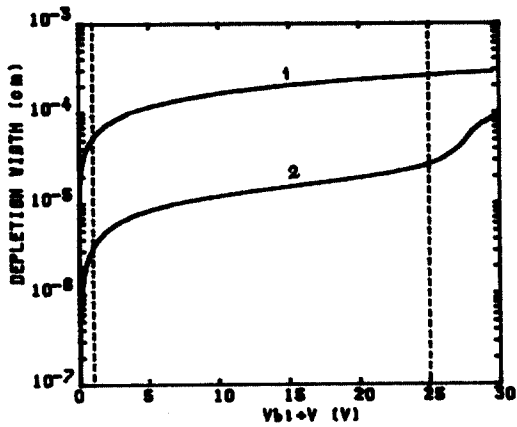


그림5. 인가전압에 따른 공간전하층의 변화
 (1) N_B 의 균일한 carrier concentration
 (2) 이중이온 주입된 carrier concentrations

Fig5. Depletion-width variation with applied voltages
 (1) uniform carrier concentration
 (2) double ion implanted carrier concentrations

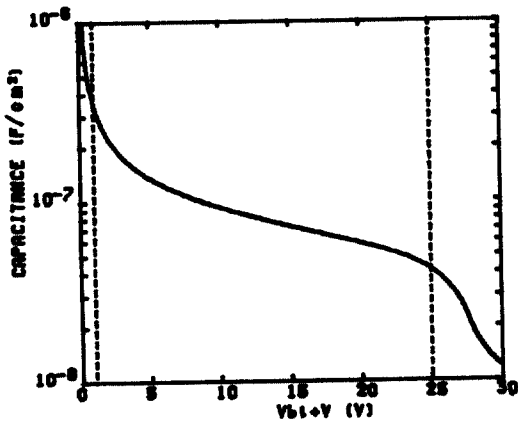


그림6. 삼중이온에 의한 용량대 전압특성

Fig6. Capacitance-Voltage characteristics for the triple ion implantations

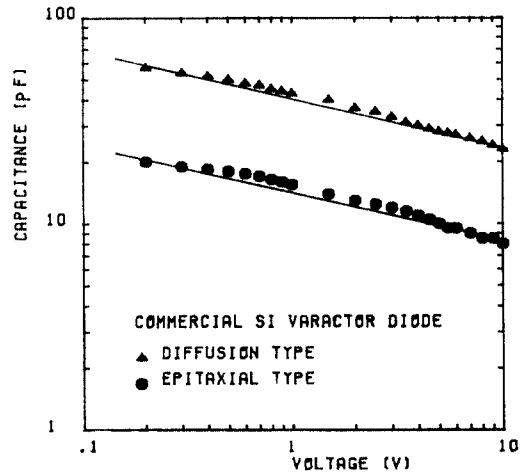


그림7. 상용 Silicon Varactor diode의 C-V 특성
 Fig7. C-V characteristics of the commercial Si Varactor diodes

3. 결과 검토

제안된 이중이온주입에 의한 carrier profile 을 컴퓨터로 계산한 결과, 1V 와 25V 일때 공간전하층의 폭과 단위면적당 용량은 각각 3.25×10^{-6} cm, 3.5×10^{-7} F/cm², 2.8×10^{-5} cm 와 4.08×10^{-8} F/cm² 이며 이 경우의 용량비 (C(1)/C(25))는 0.6이다. 또한 그림 7의 상용 Silicon Varactor 의 인가전압에 따른 용량의 추정된 결과를 도시하였고, 이 경우 용량비 (C(1)/C(10))는 약 1.9이다. Hara 등 (9) 에 의한 GaAs Varactor 의 용량비는 6이었다. 따라서 제안된 GaAs Varactor diode 는 주파수 동조범위를 확장시킬 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 제안된 삼중이온 주입에 의해 설계된 GaAs Varactor diode 는 carrier profile 특성이 급경사가 되므로 전압에 대한 용량비가 0.6로 크게 개선된다. 그리고 정방형 마스크를 사용하면 Slit 형 마스크일때 보다 측면분산이 약 72%가 감소 됨을 볼수 있다.

따라서 본 소자는 배율이 높은 주파수 체배기, 증

폭도가 개선되는 파라메트릭 증폭기, 주파수 동조 범
 위확장 등에 유용한 것이며 측면본산이 작으므로
 MMIC 등에 사용할 경우 상호간섭을 줄일 수 있는
 이점이 있다.

※ ※ 참고 문헌

- (1) J.J.Chang , J.H. Foster, and R.M.Ryder,
 "Semiconductor junction varactors with
 high voltages sensitivity." IEEE Trans,
 Electron Devices, Vol.ED-10,pp281-287,1963
- (2) R.A.Moline and G.F.Foxhall, "Ion implanted
 hyperabrupt junction Voltage variable capa-
 citiors, "IEEE Trans. Electron Devices,Vol
 ED-19,pp51-58,1963
- (3) G. Adams, "Junction capacitance switch ",
 IEEE Trans.Electron Devices,Vol ED-10,pp51-
 58, 1963
- (4) S. Nakanuma," Silicon variable capacitance
 diodes by low temperature epitaxial growth,
 "IEEE Trans Electron Devices, Vol ED-13.pp
 578-589,1966
- (5) I. Nikura, et al," GaAs varactor diodes for
 uhf to tuners fabricated by ion implantation",
 Electron Lett, Vol,14,pp 9-10,1978
- (6) T. Hara, et al," High-Q GaAs Varactor Diodes,
 "IEEE Trans.Electron Devices, Vol ED-25,
 pp 501-506,1978
- (7) Youich Akasaka and K. Horie,"Lateral spread
 of boron ions implanted in Silicon,"
 Appl. Phys. Lett.,Vol 21-. No.4,1972
- (8) S.M.Sze,"Physics of Semiconductor Devices,"
 2nd ed. Wiley,New York,1981
- (9) T. Hara, et al, "GaAs Varactor Tuners for
 UHF TV", IEEE Trans. on Consumer Electronics,
 CE-23, pp 433-439,1977