

論文

論文68-5-3-2

VVC 다이오드의 試作研究 (I)

(Fabrication of Silicon Voltage Variable Capacitance Diode—(I))

鄭 萬 永 *
(Chung, Man Yung)

朴 桂 永 **
(Park, Ke Young)

要 約

超階段型(Hyperabrupt) p-n接合에서 接合容量의 印加電壓에 依한 變化率이 不純物分布에 따라 變化하는 性質을 利用하여 可變容量다이오드의 最適設計方法을 誘導하고 標準放送受信用 라디오의 同調用 可變容量실리콘 다이오드를 設計하였고 이다이오드의 製作方法에 關하여 研究하였다. 이때 도너 및 액셉터 不純物로서는 안치모니 및 알루미늄을 眞空蒸着한後 高温擴散爐에 넣어 處理하므로써 願하는 分布를 얻으려 하였다.

ABSTRACT

This report is concerned with the optimum design of hyper-abrupt p-n junction silicon diode and fabrication of this diode usable for electrical tuning application. Impurity profile in the junction was assumed to be an exponential function. With this assumption, an optimum criterion for designing standard AM radio tuning capacitor was derived. In the diffusion process, after aluminum and antimony as impurities were deposited in vacuum on a P-type silicon wafer, the diffusion was followed by loading the wafer into the high temperature furnace.

I. 序 論

실리콘 p-n接合 다이오드에서 接合容量(Transition Capacitance)이 이接合의 兩端의 逆方向 印加電壓에 따라서 變化하는 性質을 利用하여 電壓變化容量다이오드(Voltage Variable Capacitance Diode; 이하 VVC Diode라함)를 設計製作한다. p-n接合을 構成할 때 不純物分布를 超階段型(Hyperabrupt)으로 하므로써 容量의 電壓에 對한 變化率을 아주크게 調節할 수있다. 이 다이오드는 FM 및 TV 受像機, 發振器의 自動周波數 調節回路, FM變調器, 自動튜너(Auto tuner)等 그應用範圍가 매우 넓다. 本研究에서는 이러한것

가운데서도 가장 容量變化率이 커야할 AM 라디오의 同調用 可變容量 다이오드를 製作하는데 必要한 技術을 開發하고자 한다. 따라서 印加電壓 10볼트(Volt) 未滿에서 容量値가 10PF에서 210PF 되는 다이오드를 製作하여야 한다. 따라서 이렇게 큰 容量變化比를 갖는 VVC를 設計하기 위한 理論的인 近似法과 實際 製作된 다이오드의 特性과의 關係를 밝혀서 再現性이 있는 製作方法을 確立하려고 한다. 여기서 製作方法은 P型 실리콘에 酸化硅素膜을 成長시키고 Photoresist를 利用하여 윈도우(Window)를 만든後 알루미늄(Al) 및 안치모니(Sb) 金屬을 高溫液狀에서 擴散하는 方法을 擇하였다. 그러나 이方法은 表面濃度의 正確한 調節이 困難함을 發見하였고 다른 方法으로서 三鹽化보론(BCl_3) 및 五酸化磷(P_2O_5)을 使用한 氣體擴散(Gaseous Diffusion)에 依하여 實現하려 하였다. 이 製作技術은 많은

*, **韓國科學技術研究所 電子裝置研究室 Korea Institute of Science and Technology, Electronic Devices Laboratory

經驗을 要求하는것이 特徴이라 할수 있으므로 各過程에서의 處理 技術의 開發이 重要하다고 할수 있다.

II VVC다이오드의 設計

가. 不純物分布의 設計

高溫不純物擴散法에 依하여 二重擴散을 할때 실리콘 內에서의 不純物分布는 (1)式과 같이 誤差 函數 (Complementary Error Function)에 따른다.

$$N(y) = N_a \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{D_a \cdot t}}\right) - N_a \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{D_d \cdot t}}\right) - N_b \dots \dots (1)$$

- 단 y : 실리콘表面에서 부터의 距離
- Nd : y=0에서 도너 (Donar) 濃度
- Na : y=0에서 액셉터 (Acceptor) 濃度
- Nb : 실리콘웨이퍼 (Wafer)의 不純物濃度
- Dd : 擴散溫度에서 도너의 擴散係數
- Da : 擴散溫度에서 액셉터의 擴散係數
- t : 擴散時間

여기서 도너와 액셉터의 擴散時間이 같고 도너의 擴散係數가 액셉터의 擴散係數에 比하여 훨씬 작으며 $N_d \gg N_a$ 이면 (1)式의 方程式은 그림 (1)과 같은 分布가 된다 그림 (1)에서 도너不純物の 濃度는 액셉터의 그것에 比하여 매우 크고 아주 얇

은 接合 깊이를 가졌으므로 이 不純物分布는 다음과 같은 指數函數로 近似시킬수 있다⁽²⁾

$$N_a(x) = N_{ao} \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_e}\right) + N_b \quad (x \geq 0) \dots (2)$$

단 $N_a(x)$: 接合으로 부터 거리x에 있어서의 不純物濃度

N_{ao} : 接合表面에서의 有效不純物濃度

N_b : 擴散前의 실리콘의 不純物濃度

L_e : 擴散距離 即 不純物濃도가 1/e되는 距離

이 不純物分布는 p-n接合面에 垂直으로 一次元的으로만 擴散이 이루어지고 이接合에서 一方의 不純物濃度(여기서는 도너不純物)가 매우 높아서 空乏層 (Depletion Layer)이 不純物濃도가 낮은 方向(여기서는 액셉터層)으로만 展開될때에 該當된다.

한편 $x \leq 0$ 인 部分 즉 도너部分에서의 不純物濃度는 一定하다고 假定한다.

$$N_a(x) = N_a \quad (x < 0) \dots \dots \dots (3)$$

(1)式과 (2), (3)式을 比較하여 보면 N_b 는 擴散前 실리콘웨이퍼의 比抵抗이고 擴散距離 L_e 는

$$L_e = \sqrt{D_a \cdot t} \dots \dots \dots (4)$$

로 近似된다 여기서 (1)式의 各項에서 不純濃도가 表面不純濃도의 1/e되는 距離는 表面에서 $1.3\sqrt{D_a \cdot t}$ 되는 點이나 (2)式을 (1)式에 近似시

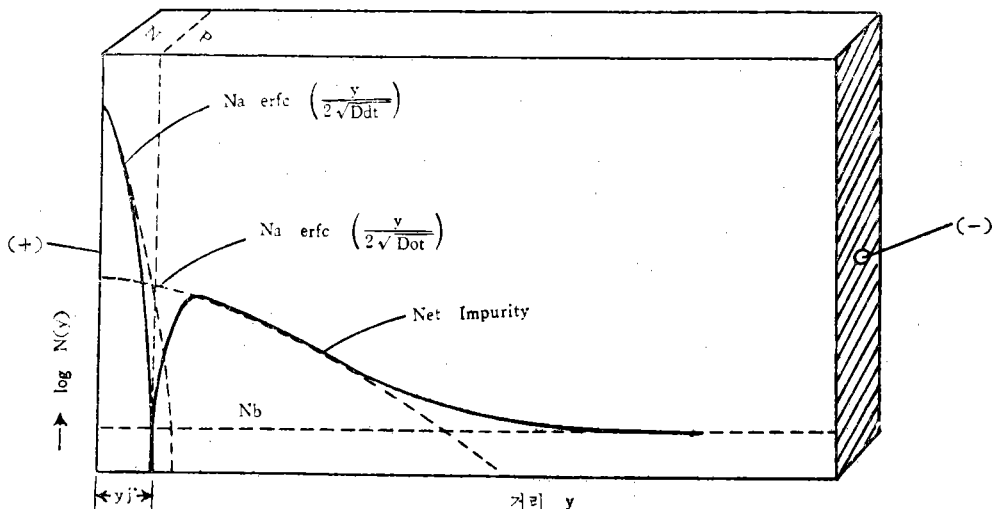


그림 1. 擴散된 不純物分布
Fig 1. Diffused Impurity Profile

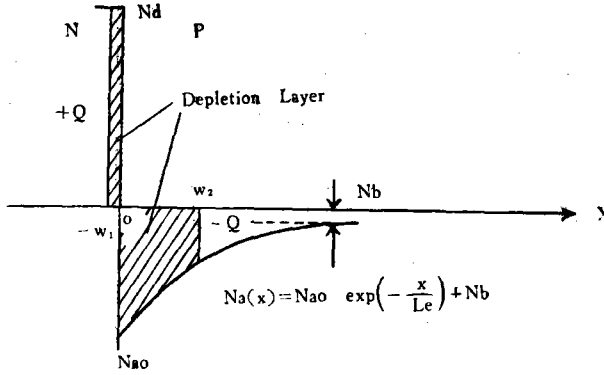


그림 2. 近似的 接合面の 不純物分布

Fig 2. Impurity profile of hyperabrupt p-n junction

킬때 (4)식과 같이 놓으므로써 誤差가 더 적음
을 알았다.

電壓容量關係式을 求하기 爲해서 Poission 方
程式에 (2)식, (3)식을 代入하면

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{P(x)}{\epsilon}$$

$$= \frac{qN_{ao}}{\epsilon} \left\{ \exp\left(-\frac{x}{Le}\right) + \frac{N_b}{N_{ao}} \right\}; x \leq 0 \quad (5a)$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{P(x)}{\epsilon} = -\frac{q(N_b)}{\epsilon}; x \geq 0 \quad (5b)$$

단 V: x에서의 電位

$$q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_s \quad \text{이다}$$

여기서 境界條件

$$x = -W_1 \text{에서}$$

$$V = 0, \quad \frac{dV}{dx} = 0 \quad (6a, b)$$

$$x = W_2 \text{에서}$$

$$V = -(V_a + \phi_2) \quad (7a)$$

$$E(W_2) = -\left[\frac{dV}{dx} \right]_{x=W_2} = \left[\frac{d\phi}{dx} \right]_{x=W_2} \quad (7b)$$

但 $\phi =$ 接合表面과 點x와의 擴散電位差이고 電
壓의 符號는 다이오드의 順方向을 正(+)으로 하
였다 空乏層으로 因한 擴散電位差 $\phi(W_2)$ 는

$$\phi(W_2) = \phi_2 = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{N_a N_{ao}}{n_i^2} \left(-\frac{W_2}{Le} \right) + \frac{N_b}{N_{ao}} \right] \quad (8)$$

但 (n_i : 眞性半導體의 電子密度(실
리콘인 경우 300°K 에서 $1.5 \times 10^{16} \text{ atoms/m}^3$)

k: Boltzman 常數, $8.616 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
이다 $N_d \gg N_{ao}$ 및 $N_d \gg N_b$ 인 條件下에

$$\text{서는 } C \approx \frac{\epsilon}{W_2} \quad (9)$$

가 成立하므로 (6), (7)식의 境界條件을
넣어 (5)식의 微分方程式의 解를 求하
고 (9)식을 代入하면 (10)식의 電壓容
量關係式을 얻는다.

$$V + \phi = -\frac{qN_{ao}Le^2}{\epsilon} \left\{ 1 - \left(1 + \frac{\epsilon}{LeC} \right) \right.$$

$$\left. \exp\left(\frac{\epsilon}{LeC}\right) + \frac{1}{2} \frac{N_b}{N_{ao}} \left(\frac{\epsilon}{LeC}\right)^2 \right\} \quad (10)$$

단

$$\phi = \frac{kT}{q} \left[\ln \left\{ \frac{N_b N_{ao}}{n_i^2} \left\{ \exp\left(-\frac{\epsilon}{LeC}\right) + \frac{N_b}{N_{ao}} \right\} \right. \right.$$

$$\left. + \left(\frac{\epsilon}{LeC}\right) \frac{\exp(-\epsilon/LeC)}{\exp(-\epsilon/LeC) + N_b/N_{ao}} \right] \quad (11)$$

(10)식의 關係式을 그림3으로 圖示하였다.

(11)식의 擴散電位差方程式은 다음과 같이 고쳐
쓸수 있다.

$$\phi = \phi_0 - \Delta\phi \quad (12)$$

$$\phi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_{ao}}{n_i^2} \left(1 + \frac{N_b}{N_{ao}} \right) \quad (13)$$

$$\Delta\phi = -\frac{kT}{q} \left[\ln \left\{ \frac{\exp(-\epsilon/LeC) + N_b/N_{ao}}{1 + N_b/N_{ao}} \right\} \right.$$

$$\left. + \left(\frac{\epsilon}{LeC}\right) \frac{\exp(-\epsilon/LeC)}{\exp(\epsilon/LeC) + N_b/N_{ao}} \right] \quad (14)$$

여기서 ϕ_0 는 도너不純物濃도가 N_{ao} 이고 액셉
터 不純物濃도가 $N_{ao} + N_b$ 로 一定할때 p-n 接
合의 擴散電位差에 該當하고 $\Delta\phi$ 는 액셉터의 不
純物濃도가 指數函數의으로 減少하여 N_b 에 接近
하는 影響이다. 우리가 實際로 使用하는 다이오
드의 範圍에서는 $\Delta\phi$ 는 無視할수 있으므로*(2)

$$\phi = \phi_0 \quad (15)$$

(13)식의 擴散電位差를 그림4에 圖示하였다.

그림3, 그림4의 두 圖表로부터 要求하는 VVC
다이오드를 設計할수 있다. 本研究에서 製作하

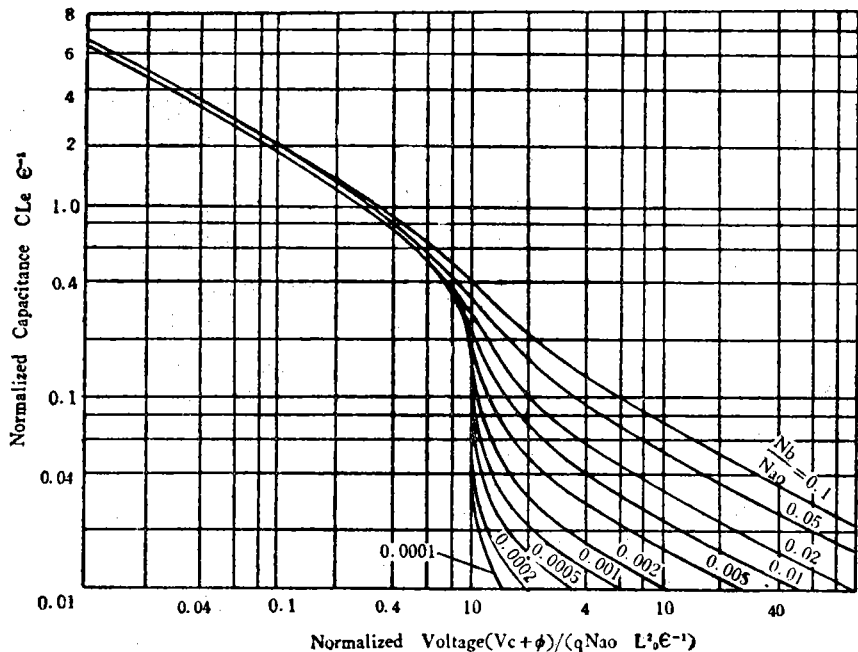


그림 3. 超階段型 다이오드의 理論的 電壓-容量特性

Fig. 3. Theoretical Voltage-Capacitance Characteristics of hyperabrupt p-n Junction diode

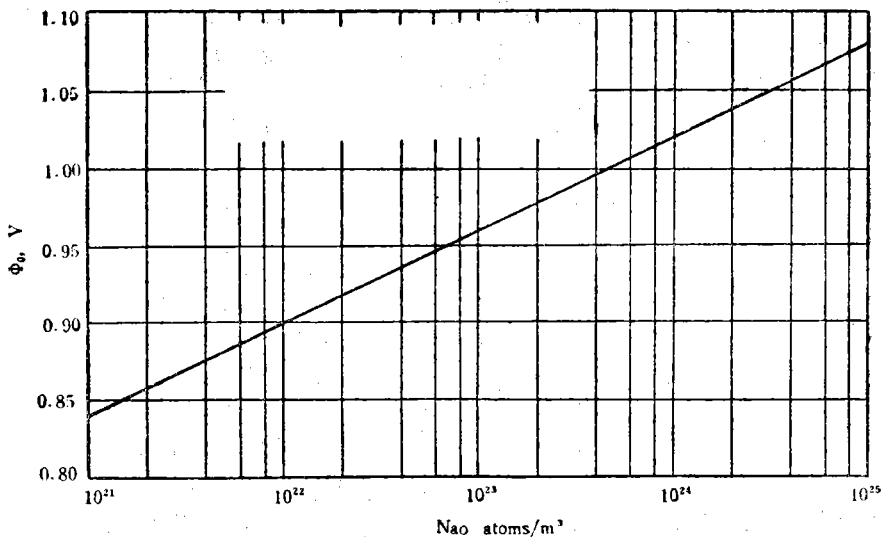


그림 4. 超階段型 接合의 擴散電位差

Fig. 4. Diffusion potential of hyperabrupt p-n junction diode

러는 다이오드의 設計基準은 다음과 같다.

1. 印加電壓 2.5 Volt-9 Volt
2. 靜電容量 210 pF-10.5 pF

따라서 最大電壓對 最小電壓의 比는 3.6이고 이 때 最大容量對 最小容量의 比는 20 이된다. 이 두 條件을 滿足시키는 電壓容量特性을 그림3에서 찾

아보던 그림5와 같이 된다 그림5로부터

$$N_b/N_{ao}=0.0015 \dots\dots\dots (16)$$

로 된다 이때 실리콘웨이퍼는 P型 33 ohm-cm의 比抵抗을 갖인것을 使用하였으므로 單位體積當 不純物濃度 N_b 는

$$N_b=4 \times 10^{14} \text{atoms/cm}^3 \dots\dots\dots (17)$$

이다. (比抵抗 33 ohm-cm의 실리콘웨이퍼를 擇한 理由는 後에 說明함) (16), (17) 式으로 부터 N_{ao} 는

$$N_{ao}=2.7 \times 10^{17} \text{atoms/cm}^3$$

이고 이때에 擴散電位差 ϕ 는 그림4에 依하여

$$\phi \approx \phi_0 = 0.955 \text{ volt} \dots\dots\dots (18)$$

이다, 그림5에서

$$N.V = 0.56 = 2.5 / (qN_{ao}Le^2 \epsilon^{-1})$$

$$\therefore Le = 0.1 \text{ 미크론} (\mu) \dots\dots\dots (19)$$

$$N.C = 0.6 = \frac{CLe}{\epsilon}$$

$$\therefore C = 605 \text{ pF/mm}^2$$

$$\therefore \text{接合面積} = \frac{210}{605} \approx 0.345 \text{ mm}^2$$

接合面을 圓型으로 만들던 그半徑 r 은

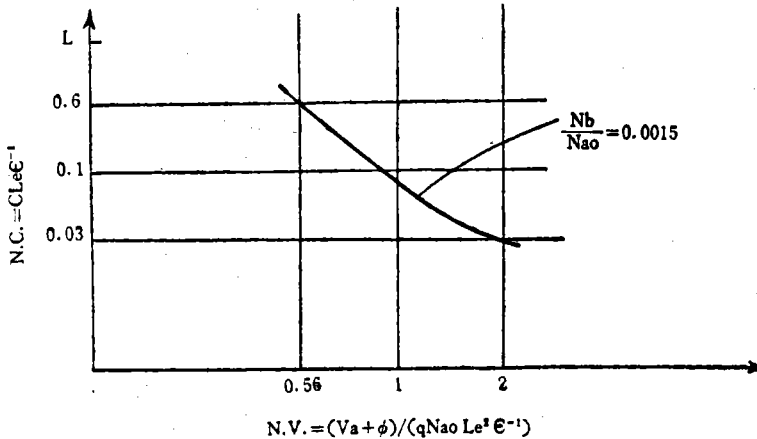


그림5 그림4의 說明
Fig. 5. Illustration of Fig. 4.

$$r = 0.33 \text{ mm} \dots\dots\dots (20)$$

即 接合面의 半徑을 0.33mm로 하고 액셉터 不純物分布를 그림6과 같이 設計하면 願하는 電壓容量特性을 얻을수 있다. 그림6에서 印加電壓이 零(Zero)일때 空乏層의 넓이는 0.77μ , 2.5Volt일때 0.175μ , 10.5Volt일때 3.5μ 으로 推定된다.

한편 不純物分布에서 擴散距離 Le 에 따라서 이 다이오드의 接合容量이 變化하는 모양을 그림7에 圖示하였다. 이 그림은 (10)式에 $N_{ao} = 2.7 \times 10^{17}$, $N_b = 10^{13} \sim 10^{16} \text{atoms/cm}^3$ 을 代入하고 $V=0$ 일때 擴散距離 Le 와 單位面積當容量 C 의 關係로부터 얻은 曲線이다. 여기서 擴散距離가 커질수록 最大容量은 커짐을 알수있다. 그러나 擴散距離가 커지면 最大容量 對 最小容量의 比가 적어

진다. 그림8에 N_b 를 파라메타로 하여 擴散距離와 單位面積當容量 $C=60 \text{ pF}$ 되는 印加電壓과의 關係를 圖示하였다. 이 그림에서 擴散距離가 커지면 印加電壓도 따라서 增加한다. 여기서 印加電壓 10Volt以下에서 動作하는 VVC 다이오드를 製作할때는 比抵抗이 $\rho=5 \text{ ohm-cm}$ 以上인 실리콘웨이퍼를 使用하여야 함을 알수있다 이 比抵抗值가 增加하면 接合容量 60 pF/mm^2 되는 印加電壓은 增加하게 되고 N_{ao}/N_b 比가 같으면 相對的으로 N_{ao} 도 增加하게 되므로 p-n接合의 브렉다운 電壓에 依하여 制限을 받게 된다.

나. VVC다이오드Q의 特性

다이오드의 等價回路는 그림9와 같다 여기서 導線의 인덕탄스는 使用周波數가 낮으므로 無視하였다.

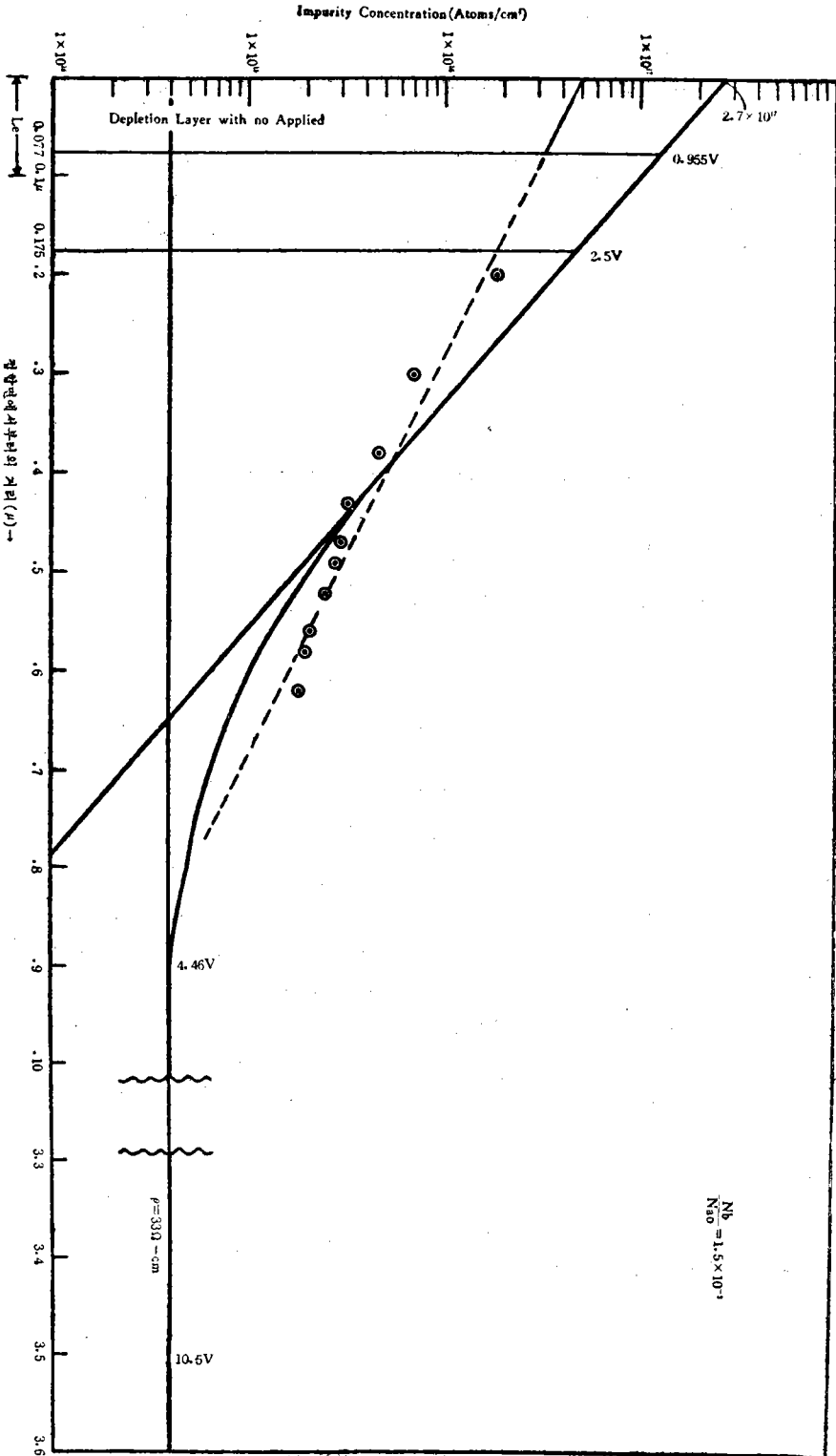


그림 6. 設計된 VVC다이오드의 不純物分布(굵은선), 試驗製作된 다이오드의 不純物分布(점선)
 Fig.6. Desirable Impurity Profile of the VVC Diode(Bold line), Impurity Profile of the Sample Diode (Dotted Line)

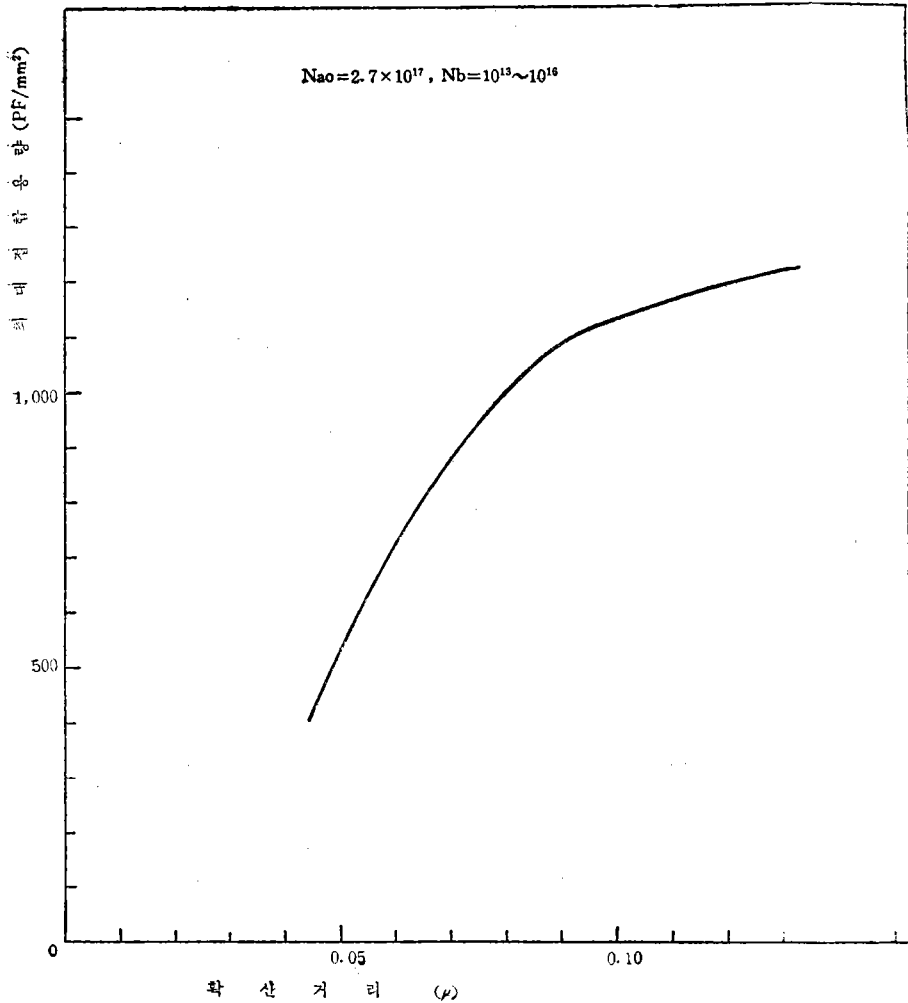


그림7. 擴散距離對 接合容量曲線
Fig7. Junction Capacitance vs Diffusion Length

$$Q = \frac{\omega C_j R_j^2}{R_s + R_j + \omega^2 C_j^2 R_s R_j^2}$$

$$\doteq \frac{1}{(1/\omega C_j R_j) + \omega C_j R_s} \dots\dots\dots (21)$$

中波帶 以上에서는 $\omega C_j R_j \gg 1$ 이므로

$$Q \doteq \frac{1}{\omega C_j R_s} \dots\dots\dots (22)$$

여기서 R_s 는 近似的으로 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$R_s = \rho \frac{l}{S}$$

단 ρ : 베이스層的의 比抵抗

l : 空乏層端으로부터 오음믹接觸點까지의

距離

S : 接合面積

印加電壓 V_a 일때의 空乏層의 넓이를 W_2 , p-n 接合面부터 오음믹接觸點까지의 距離를 W 라하고 易動度(Mobility)가 不純物濃度에 關係없이 一定하다고하면

$$R_s = \frac{1}{S} \int_{W_2}^W \frac{1}{q\mu \{ N_{ao} \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_e}\right) + N_b \}} dx$$

$$= \frac{1}{q\mu S} \left[\frac{W - W_2}{N_b} + \frac{L_e}{N_b} \ln \frac{\frac{N_b}{N_{ao}} + e^{-w/L_e}}{\frac{N_b}{N_{ao}} + e^{-w_2/L_e}} \right] \dots\dots\dots (24)$$

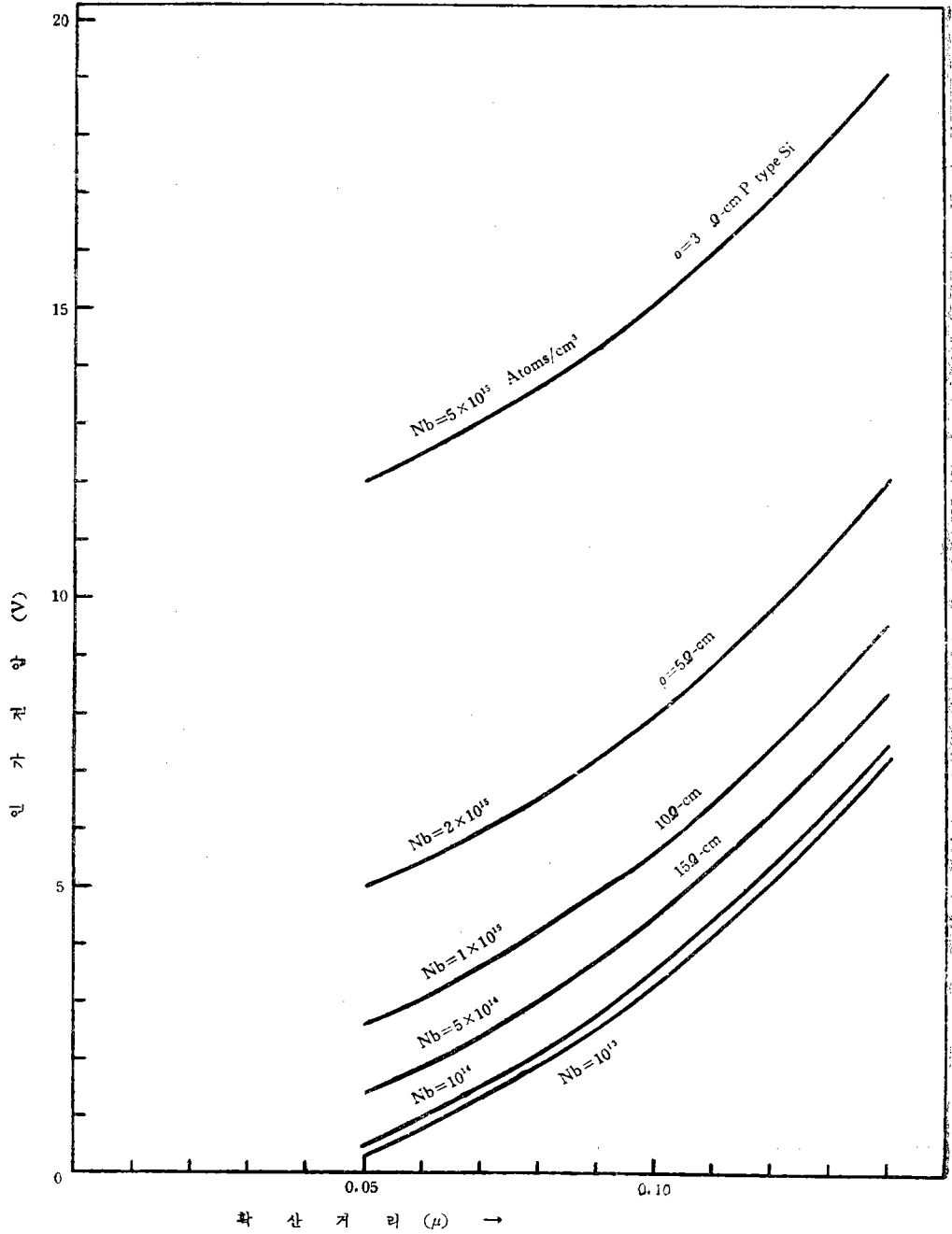


그림8. 擴散距離對 印加電壓曲線

Fig8. Applied Voltage vs. Diffusion Length

$W, W_2 \gg Le$ 일 때 (24)式은

$$R_s = \frac{1}{q\mu S} \left[\frac{W - W_2}{N_b} \right] \dots\dots\dots (25)$$

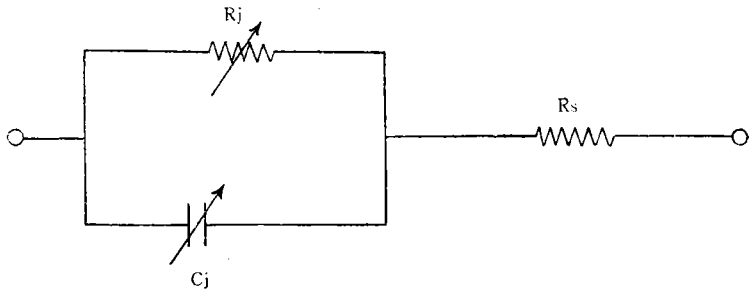
(23)式과 (25)式은 같은 形式으로 表現되었다
一般的으로 $W \gg W_2$ 이므로

$$R_s = \frac{1}{q\mu N_b} \cdot \frac{W}{S} \dots\dots\dots (26)$$

로 表示된다 以上에서 Q를 높이기 爲해서는 R_s 를 적게하고 R_s 를 적게하기 爲해서는 N_b 를 크게 하여야 된다는 結論이 된다. 그러나 N_b 를 增加시키면 주어진 印加電壓範圍에서 最大容量 對 最小容量의 比가 멀어지게 된다. 따라서 N_b 는 이 두가지 因子를 考慮하여 決定하여야 한다. 다른方法으로는 에피택셜(Epitaxial) 실리콘웨이퍼를 使用하는 것이다. 그림6에서 比抵抗이 매우 낮은 실리콘웨이퍼에 比抵抗이 높은 3.5μ 의 에피택셜 層을 成長한후 이層에 擴散處理하여 p-n接합을

만들게되면 매우 높은 Q의 VVC 다이오드를 얻을 수 있다.

以上에서 設計한 不純物分布를 實現하는 製作方法으로서는 ①合金擴散法 ②二重擴散法 ③에피택셜 成長法의 세가지方法이 있다. 本 研究에서는 擴散係數가 다른 도너不純物과 액셉터不純物을 眞空蒸着한후 高溫度에서 擴散시키므로서 願하는 不純物分布를 實現하려 하였다. 即 比抵抗 33 ohm-cm ($N_b=4 \times 10^{14}$)인 P型 실리콘웨이퍼의 表面에 酸化실리콘皮膜을 成長시킨後 Phot-Resist 方法으로 半徑 0.3mm인 윈도우(window)를 만들고 그위에 액셉터不純物로서 알루미늄(Al)을 도너不純物로서 안치모니(Sb)를 眞空蒸着 시킨후 擴散處理한다. 그후 알루미늄을 蒸着시키고 다이싱(Dicing), 다이어태칭(Die Attaching), 와이어본딩(Wire Bonding), 캡핑(Capping) 順으로 製作한다.



C_j =접합용량 R_s =직렬저항 R_j =누진저항

그림9. VVC다이오드의 等價回路
Fig9. Equivalent Circuit of VVC Diode

Ⅱ 알루미늄(Al) 안치모니(Sb)의 蒸着

P型 실리콘웨이퍼위에 도너不純物로서는 알루미늄(Al) 액셉터不純物로서는 안치모니(Sb)를 擴散시켜 超階段型 p-n接합을 만든다 適當量의 알루미늄과 안치모니를 실리콘웨이퍼의 表面에 眞空蒸着한 後 高溫度에서 加熱하여 이 金屬元素들이 윈도우를 通하여 실리콘表面에서 함께 溶

解되어 液狀(Liquid State)를 이루게된다. 이 液狀에서 析出(Segregation) 現象에 의하여 不純物은 固狀(Solid Phase)의 실리콘속으로 擴散하게된다. 따라서 固狀실리콘속의 不純物濃度는 液狀에서의 不純物濃度에 依하여 決定되고 液狀의 不純物濃度는 眞空蒸着한 不純物의 量에 依하여 決定된다. 또 不純物濃度の 分布는 擴散溫度와 擴散時間에 依하여 調節할수 있다. 여기서 는 앞에서 設計한 不純物分布를 實現하는데 必

要한 不純物의 量을 決定한다. 이 量을 決定하는 데는 다음 두가지를 假定하였다.

1. 各金屬元素 不純物은 溶解된 後에도 그 體積比가 變化하지 않는다.
2. N_{ao} , N_{al} 에 關聯된 金屬元素의 分布係數 (Distribution Coefficient)는 두 金屬合金 (Binary Alloy)의 경우와 같다.

1.의 假定은 液狀에서 不純物元素의 比重을 實測할수 없기 때문이고 2.의 假定은 다른 金屬合金에서 도너와 액셉터 不純物의 分布係數가 아직 發表되지 않았기 때문이다. 前章의 不純物 分布 設計結果는

$$N_{ao}=2.7 \times 10^{16} \text{ atoms/cm}^3 \dots\dots\dots (27)$$

$$L_e=0.1 \text{ Micron} \dots\dots\dots (28)$$

이다 여기서 N_{ao} 는 알루미늄의 실리콘表面에서의 濃도가 된다 不純物擴散溫度를 950°C 로 한다면 이 溫度에서의 分布係數는 各各

$$K_{Al}=4.75 \times 10^{-4} \text{ (알루미늄)} \dots\dots\dots (29)$$

$$K_{Sb}=1.1 \times 10^{-3} \text{ (안치모니)} \dots\dots\dots (36)$$

따라서 液狀에서의 알루미늄濃도 N_{Al} 은

$$N_{Al} = \frac{N_{ao}}{K_{Al}} = \frac{2.7 \times 10^{23}}{4.75 \times 10^{-4}}$$

$$= 5.7 \times 10^{26} \text{ atoms/m}^3 \dots\dots\dots (31)$$

이어야 한다 그런데 알루미늄의 單位體積當 原子의 數는 $5.98 \times 10^{28} \text{ atoms/m}^3$ 이므로 알루미늄이 차지하는 體積比率 V_{Al} 은

$$V_{Al} = \frac{N_{Al}}{N_{Al}^*} = \frac{5.7 \times 10^{26}}{5.98 \times 10^{28}}$$

$$= 9.5 \times 10^{-3} = 0.01 \dots\dots\dots (32)$$

단 N_{Al}^* : 알루미늄元素의 單位體積當 原子數이다. 안치모니의 濃도는 알루미늄의 濃도에 比하여 充分히 커야하므로 실리콘에서 안치모니의 固溶度 (Solid Solubility)가 許容하는 範圍內에서 큰 値를 갖도록한다 따라서 알루미늄이 차지하는 體積比率를 除外한 $1 - 0.01 = 0.99$ 部分을 안치모니가 차지하도록 한다. 한편 알루미늄과 안치모니 그리고 실리콘이 함께 液狀에서 存在하므로 실리콘의 一部도 역시 液狀으로 녹아 들어가게 된다. 알루미늄에 依하여 溶解되는 실리콘의 量은 알루미늄의 量이 매우 적으므로 無視할수 있고 안치모니의 影響만 考慮하면 된다. 以上을

數式으로 表示하면

$$\frac{N_{Sb}}{N_{Sb}^*} + \frac{N_{Si}}{N_{Si}^*} = 1 - \frac{N_{Al}}{N_{Al}^*} \dots\dots\dots (33)$$

단 N_{Sb} =液狀에서의 안치모니 濃度

N_{Si} =液狀에서의 실리콘 濃度

N_{Sb}^* : 안치모니元素의 單位體積當 原子數
 $= 3.24 \times 10^{28} \text{ atoms/m}^3$

N_{Si}^* : 실리콘元素의 單位體積當 原子數
 $= 5.15 \times 10^{28} \text{ atoms/m}^3$

안치모니-실리콘의 狀態圖 (Phasediagram)에 依하면 溫度 950°C 에서 이 合金溶液의 原子濃度 比率는

$$\frac{N_{Sb}}{N_{Si}} = \frac{95}{5} = 19 \dots\dots\dots (34)$$

(33)式에 (34)式의 關係式을 代入하여 N_{Si} 및 N_{Sb} 값을 求하면

$$N_{Si} = 0.164 \times 10^{28} \text{ atoms/m}^3 \dots\dots\dots (35)$$

$$N_{Sb} = 3.1 \times 10^{23} \text{ atoms/m}^3 \dots\dots\dots (36)$$

그러므로 液體에서의 各 金屬元素의 原子數 比率는

$$N_{Al} : N_{Sb} : N_{Si} = 1 : 54.5 : 2.87 \dots\dots\dots (37)$$

이다 따라서 알루미늄과 안치모니의 比率는

$$\text{알루미늄} : \text{안치모니} = 1 : 246 \text{ (무게비)} \dots\dots\dots (38)$$

$$= 1 : 100 \text{ (體積比)} \dots\dots\dots (39)$$

이때 固狀실리콘 表面에서 안치모니原子 濃度を 計算하여 보면 (30)式, (36)式에서

$$N_a = N_{Sb} \times K_{Sb} = 3.1 \times 10^{23} \times 1.1 \times 10^{-3}$$

$$= 3.41 \times 10^{20} \text{ atoms/m}^3 \dots\dots\dots (40)$$

이다 한편 안치모니의 最大固溶度는 590°C 에서 약 $5 \times 10^{25} \text{ atoms/m}^3$ 이므로 (40)式의 값은 適當하다 할 수 있다.

실리콘웨이퍼 表面에 蒸着한 알루미늄과 안치모니의 體積比率는 (39)式과 같이 1:100이 이르기까지 알루미늄 50\AA , 안치모니 5000\AA 을 蒸着시켰다. 이 量은 실제 擴散過程에서 擴散되는 量보다 훨씬 많은 量이므로 擴散이 끝난후 一部는 空氣中으로 蒸發하고 나머지는 表面에 合金으로 存在할것이 豫想된다.

IV 不純物擴散過程

가. 不純物擴散

앞에서 說明한 바와같이 실리콘表面에 알루미늄, 안티모니, 실리콘이 高溫度에서 溶解되어 合金液狀이 形成되면 析出(Segregation) 現象에 依하여 알루미늄과 안티모니의 原子가 실리콘 固體속으로 擴散되어 들어가게 된다. 擴散速度는 擴散物質의 擴散係數(Diffusion Coefficient)와 擴散物質의 原子密度의 勾配에 依하여 決定된다 이 擴散作用에 依한 不純物分布는 誤差函數를 따른다.

즉 一次元方向으로만 擴散되는 簡單한 경우에 不純物分布 $N(x, t)$ 는

$$N(x, t) = N_0 \cdot \text{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \dots \dots \dots (41)$$

단 $N(x, t)$: 시간 t 일때 表面으로 부터 x 에서의 不純物 濃度

N_0 : 表面에서의 不純物濃度

D : 擴散係數

t : 擴散時間

$$\text{erfc } U = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_U^{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda$$

로 表示된다. ^{*) (3)}

單位時間當 실리콘 表面을 通하여 擴散되어 들어가는 不純物原子數는

$$J(t) = -D \frac{\partial N}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{DN_0}{\sqrt{\pi Dt}} \text{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \\ = N_0 \sqrt{\frac{D}{\pi t}} \dots \dots \dots (42)$$

이므로 時間의 自乘根에 反比率한다. 時間 t 동안 擴散하였다면 이때 擴散된 不純物原子의 總數는

$$Q = \int_0^t J(t) dt = 2N_0 \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \dots \dots \dots (43)$$

로 表示된다 即 擴散된 不純物의 量은 擴散時間의 自乘根에 比例한다.

擴散된 不純物의 分布方程式 (41)式은 前述한

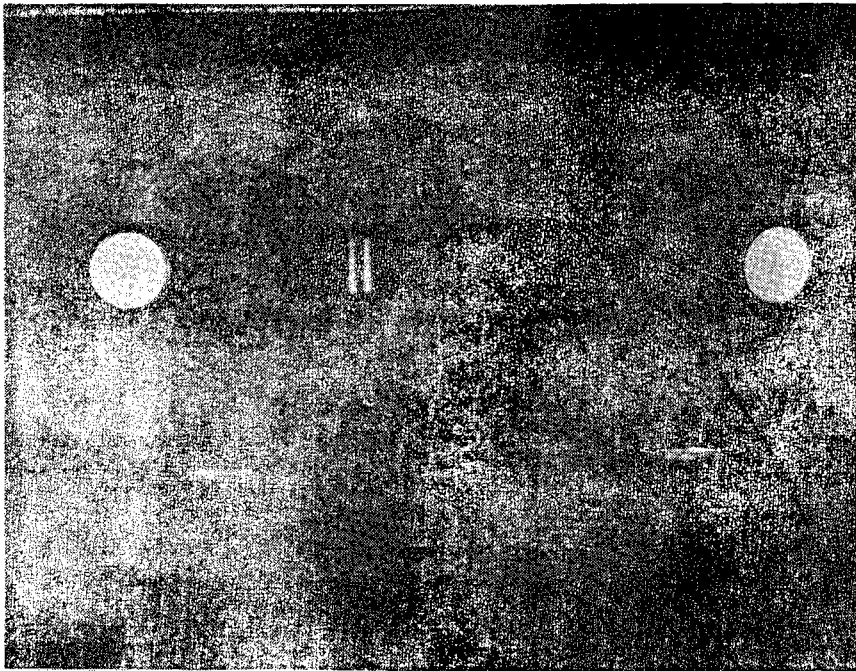


사진1. TO-5 캔과 試作品
Photo1. TO-5 Can and VVC Diode made in this study

바와 같이 다음과 같이 指數函數로 近似시킬 수 있다.

$$N(x) = N_0 \text{erfc} \left(-\frac{x}{L_e} \right) \dots \dots \dots (44)$$

$$L_e = \sqrt{D \cdot t} \dots \dots \dots (45)$$

단 L_e : 擴散距離

그러므로 願하는 不純物分布를 얻기 爲해서는 이에 該當하는 擴散距離와 擴散係數를 (45)式에 代入하여 擴散時間을 求한다

나. 擴散溫度 및 時間

(41)式에서 알수있는 바와같이 不純物分布는 擴散係數 D 와 擴散時間 t 의 積의 函數로 나타난

다. 그런데 擴散係數 D 는 擴散溫度 T 의 指數函數로 나타나므로 높은 溫度에서 짧은 時間 擴散한것과 比較的 낮은 溫度에서 오래동안 擴散한 것은 같은 不純物分布를 갖는다 그러나 實際過程에서는 가장 適合한 溫度가 存在하게 된다. 本研究에서는 擴散溫度 T 를

$$T=950^{\circ}\text{C} \dots\dots\dots (46)$$

로 하였다. 이 溫度에서 各 不純物の 擴散係數 D_a, D_d 는

$$D_a=10^{-17}\text{m}^2/\text{sec} \text{ (알루미늄)} \dots\dots\dots (47)$$

$$D_d=2 \times 10^{-19}\text{m}^2/\text{sec} \text{ (안티모니)} \dots\dots\dots (48)$$

이다.

(47)式과 (28)式을 (45)式에 代入하여 擴散時間 t 를 求하면 $t=1000\text{秒}=16.7\text{分}$ 이다.

實際 不純物分布는 指數函數와 差가 있으므로 擴散時間을

$$t=20\text{分} \dots\dots\dots (49)$$

로 하였다. 이 擴散過程에서 擴散되는 알루미늄의 量을 決定하여 보면 (43)式에 依하여

$$Q_{A_1}=2N_0\sqrt{D_a t/\pi}=3.05 \times 10^{16}\text{Atoms}$$

$$\therefore Q_{A_1}=2.28\mu\text{gm} \dots\dots\dots (50)$$

이 된다.

V 測 定

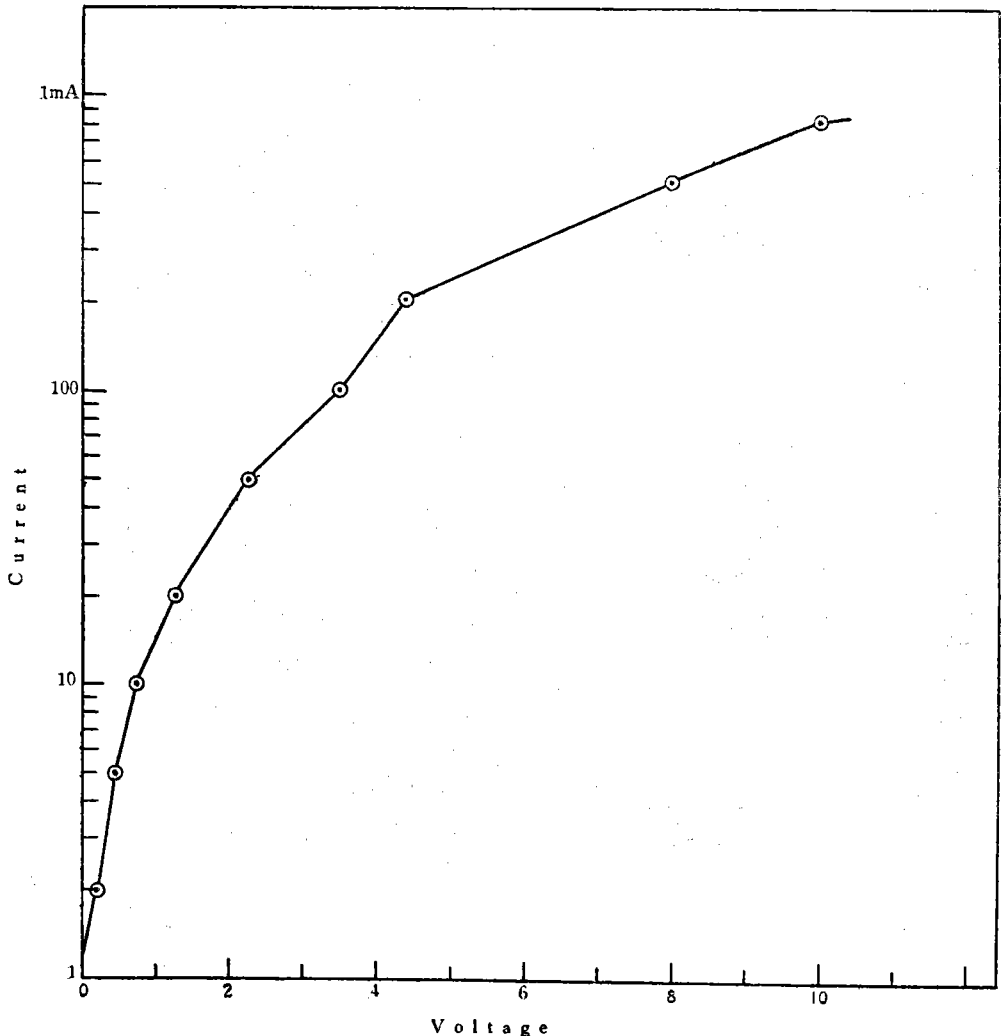


그림11. 試作다이오드의 逆方向 特性
Fig11. Reverse Characterisucs of the VVC Diode made in this study

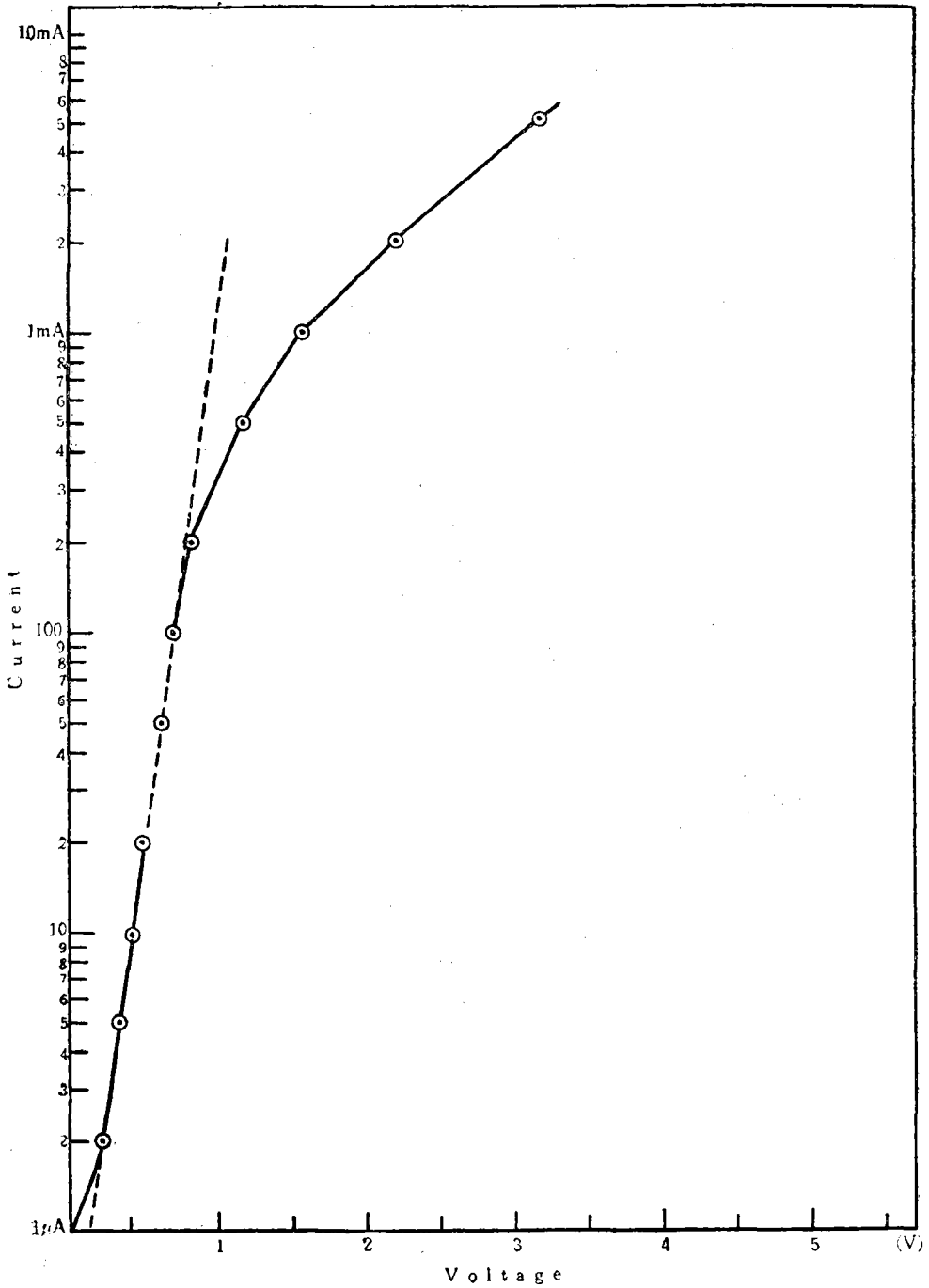


그림10. 試作다이오드의 順方向 特性
 Fig10. Forward Characteristics of the VVC Diode made in this study

製作技術上の問題가 아직 完全히 解決되지 못한 故에 VVC 다이오드를 試驗製作해 보았다. 우선 이 다이오드의 順方向特性을 보면 그림10과 같다. 다이오드의 電壓-電流의 理論的 關係式은 順方向에서

$$I = I_s \cdot \exp\left(\frac{qV}{\eta KT}\right) \dots\dots\dots (51)$$

$$= I_s \exp\left(\frac{V}{0.026\eta}\right) (300^\circ K에서) \dots (52)$$

$$\therefore \log I = \log I_s + \frac{V}{0.026\eta} \log e$$

$$\therefore m = \frac{\log e}{0.026\eta} \dots\dots\dots (56)$$

한편 그림10에서 m을 測定하면

$$m = \frac{2}{0.512} \dots\dots\dots (57)$$

(56)式과 (57)式에서 η 를 求하면

$$\eta = 4.34 \dots\dots\dots (59)$$

로 되어 順方向抵抗値가 매우 크게 나타나고 있

過程에서 願하는 不純物以外的 元素가 함께 擴散되어 들어 갔기 때문에 推定하고 있다. 따라서 純度가 높은 試藥을 使用하고 製造過程의 再整理 깃터링(Gettering) 方法을 導入하면 보다 좋은 特性을 얻을 수 있을 것으로 思慮된다. 그림11에 이 다이오드의 電流-電壓特性의 逆方向特性에서 電流値가 漸次的으로 增加하기 때문에 電壓을 正確하게 말할수는 없으나 電流値가 急增加하는 領域은 40V以上이므로 p-n接合面에서의 엑셉터 不純物濃度 N_{ao} 의 값이 豫想值보다 적다고 볼수 있다.

試作品 다이오드의 電壓-容量特性은 표1과 같다. 이 特性에서 電壓 10Volt 範圍까지에서 靜電容量値의 變化率이 約 3.3倍 밖에 보이지 않았었다. C. Van Opdorp의 方法*⁽⁵⁾에 의하여 엑셉터 不純物分布를 電壓-容量關係 實測値에서부터 求하여 보면 다음과 같다.

그림2에서 空乏層에 있는 엑셉터 不純物의 量은 單位面積當

$$Q_A = -q \int_0^x N_A(x) dx \dots\dots\dots (56)$$

(56)式을 微分하면

$$\frac{dQ_A}{dx} = -qN_A(x) \dots\dots\dots (57)$$

한편 接合容量 C는 定義에 依하여

$$C = \frac{dQ_A}{dV} \dots\dots\dots (58)$$

(60), (61), (62)式에서

$$\frac{dV}{dx} = \frac{q}{\epsilon} N_A(x) \cdot x \dots\dots\dots (59)$$

$$C = \frac{\epsilon}{x} \dots\dots\dots (60)$$

으로 表示되므로 (59), (60)式에서

$$N_A(x) = \frac{C^3}{q\epsilon} \left(\frac{dC}{dV}\right)^{-1} \dots\dots\dots (61)$$

로 된다 표1의 測定値를 (59)式, (60)式에 依하여 얻은 不純物分布는 표2와 같다.

이 結果를 처음設計値와 比較하여 그림6에 그려보면 點線과 같이 近似시킬수 있다 여기서 表面에서의 엑셉터 濃度 및 擴散距離를 推定하여 보면 各各

$$N_{a0} = 5 \times 10^{16} \text{ atoms/cm}^3 \dots\dots\dots (62)$$

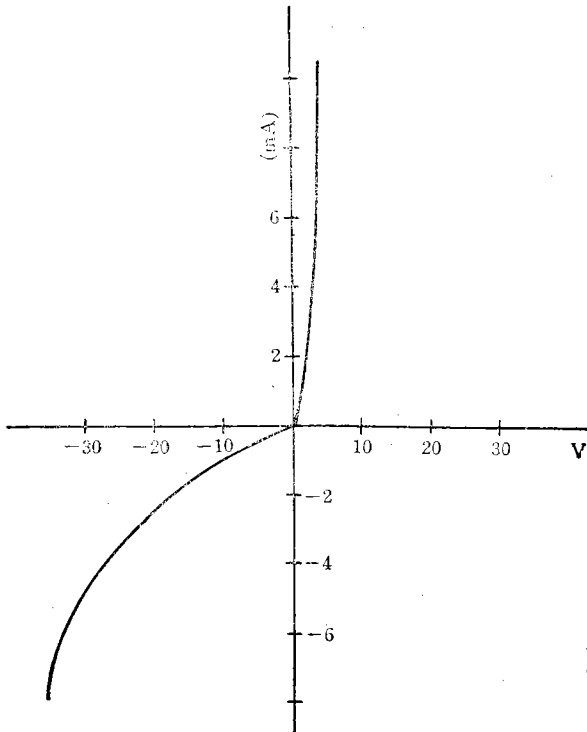


그림12. 試作다이오드의 電流電壓特性
Fig12. Current vs. Voltage of the Sample Diode
다. 逆方向特性을 보면 그림11과 같이 예리한 逆(Zenor) 特性을 얻지 못했다 이 原因은 擴散

표1. 試作品 VVC 다이오드의 電壓容量 特性

인가전압 V		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
시작품 No.												
정전용량 (PF)	1	207	122	98	88	80	74	70	65	63	58	55
	2	184	120	95	85	79	74	70	65	62	58	55
	3	161	115	94	82.5	78	74	70	66	64	62	59
	평균	184	119	96	83.2	79	74	70	65.3	63	59.3	56.3

표2 試作品 VVC 다이오드의 不純物分布(추정치)

전압 (Volt)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
용량 (PF)	184	119	96	85.2	79	74	70	65.3	63	59.3	56.3
거리(μ) $x = \frac{e}{C}$	0.20	0.31	0.38	0.43	0.46	0.49	0.52	0.56	0.58	0.62	
$N_a(x)$ atoms/cm ³	18.6×10^{16}	7.0×10^{16}	4.7×10^{16}	3.6×10^{16}	3×10^{16}	2.8×10^{16}	2.5×10^{16}	2.1×10^{16}	2.0×10^{16}	1.7×10^{16}	

$L_e \approx 0.18\mu$ (63)

이다 前述한바와 같이 N_{ao} 가 적어지면 브레이크 전압은 높아지나 용량값이 작어지고 L_e 가 증가하면 주어진 인가전압범위에서 最大容量 對 最小容量의 比가 減少하게 된다.

N_{ao} 가 豫想보다 줄어진 原因은 眞空蒸着한 不純物의 量이 실리콘속으로 擴散되어 들어가기 前에 그一部分이 蒸發하여 버린 것으로 思慮되므로 훨씬 많은량을 蒸着해야 할것같다. 擴散距離 L_e 가 豫想值 보다 約2倍 增加한 原因은 不純物의 擴散係수가 그 부團氣에 따라 多少 다르고 실리콘웨이퍼를 擴散爐에서 꺼내는 時間동안에도 擴散이 進行되기 爲므로 推測된다. 따라서 不純物의 表面濃도와 擴散距離는 數回 製作過程을 反復하므로써 調整이 可能하게 된다. 그러나 氣體二重擴散法을 使用하여 擴散處理할때는 不純物表面濃도와 擴散距離의 調整이 훨씬 簡單하게 可能함을 發見하였다. 따라서 本研究에서 이 擴散方法의 基礎자료를 樹立하였고 今後의 研究方向은 氣體二重擴散法으로 VVC 다이오드를 實用化하려한다.

VI 結 論

以上에서 報告한 바와 같이 本研究에서 VVC

다이오드를 設計, 製作하는데 必要한 基本資料, 設計方法및 設計上的 最適範圍를 求하여 AM放送受信 同調用 VVC다이오드를 設計하였고, 이 設計值에 付合된 다이오드의 製作技術을 開發하였다. 即 比抵抗이 33ohm-cm인 P型 실리콘웨이퍼에 超階段型(Hyperabrupt) p-n接合을 만든다 이 때 도너 原子의 表面濃도를 3.41×10^{17} atoms/cm³ p-n接合에서의 액셉터 原子의 濃도를 2.7×10^{17} atoms/cm³ 擴散距離를 0.1μ 으로 超階段型 p-n接合을 만들면 인가電壓 2.5~9 Volt 範圍에서 210PF~10.5PF範圍의 靜電容量을 얻을수있다 이 때 p-n接合의 브레이크 전압은 10volt*⁽⁷⁾ 程度로 豫測됨으로 動作範圍內에서는 安定하다 할수 있다. 이 다이오드의 製作方法은 도너 및 액셉터 不純物로서 안치모니와 알루미늄金屬을 실리콘 表面上에서 高溫으로 加熱하여 液狀混合物을 만드러 析出(Segregation) 現象에 依한 擴散作用에 利用하여 p-n接合을 實現하였다. 이 製作過程에서 眞空蒸着한 不純物의 量을 充分히 많게 하여 擴散中에 氣體로 不純物이 蒸發해 버리므로써 表面濃도가 줄어들지 않게 해야하고 不純物接合表面濃도 및 擴散距離는 製作時의 부團氣에 따라 實驗적으로 決定해야 함을 알았다. 高純度의 試藥을 使用하고 製作過程을 再整備하고

갯터링에 의해 나特性을 銳利하게 하면 完全한 VVC다이오드의 實現이 可能할것으로 思慮된다. 그러나 前述한바와 같이 이 製作方法은 不純物表面濃도와 擴散距離를 調整하는데 매우 어려웠고 實際 試作品에서도 容量最大値 對 最小의 比가

3밖에 얻지 못한것으로 미루어 氣體二重擴散方法으로 超階段p-n接合을 만드는것이 훨씬 쉬울 것임을 알았다.

따라서 今後의 VVC 다이오드 實用化研究은 이 氣體二重擴散方法으로 進行하려한다.

參 考 文 獻

- (1) A. Shimizu & Nishizawa; IRE Trans. Vol. ED-8, No.5 PP. 370—377 (Sept, 1961)
- (2) T. Sukegawa, et al; Solid-State Electronics, 6, pp.1-24 (1963)
- (3) Research Triangle Institute, Integrated Circuit Technology, Vol. 3, P. 409 (June, 1965)
- (4) ibid Vol. 4, p. 7 (Feb. 1964)
- (5) ibid Vol. 13, P. 27 (May, 1967)
- (6) C. Van Opdorp; Solid-State Electronics. Vol. 11 PP. 397—406 (1968)
- (7) Motorola; Integrated Circuit P. 67, McGraw-Hill (1965)
- (8) G. L. Schnable, et al.; IEEE Trans, Vol. ED-13., No. 12, pp. 896—900 (Dec., 1966)
- (9) T. Sukegawa., et al.; IEEE Trans., Vol. ED-13, No. 12, pp 988—991 (Dec, 1966)
- (10) Peter M. Norris, et al.; IEEE Trans., Vol BTR-13, No. 2, pp. 87—91 (July, 1967)
- (11) H. C. Nathanson, et al.; IEEE Trans., Vol. ED-10, pp 44—51 (Jan., 1963)
- (12) J. A. Cunningham and J. G. Havper.; Electronic Engineer, pp. 74—79 (Jan. 1967)
- (13) Takeshi Onuma, et al.; Japan Natinal Technical Report, Vol. 13, No. 4, pp. 268—276 (Aug., 1967)
- (14) M. H. Norwood & E. Shatz, IEEE Proc., Vol. 56, No. 5 (May, 1968)
- (15) W. Shockley; B. S. T. J., Vol. 28., pp. 435—450 (July. 1949)
- (16) H. Lawrence. et al; B. S. T. J., Vol. 39, pp. 389—403 (Mar., 1960)
- (17) Y. F. Chang; J. Appl. Phys., Vol 38, pp. 2148—2153 (April. 1967)
- (18) Electro-Technology, pp. 75—79 (April, 1968)