

GaAs IMPATT 다이오드의 設計

韓國科學技術研究所

李

泰

鎬 譯

譯 注

本 論文은 1969 Wescon Technical Papers, Session 6 (1969. 8)에 게재된 金 貞圭박사의 "Computer Aided Design of GaAs Impatt Diodes"를 옮긴 것이다.

序 論

Si 및 Ge IMPATT 다이오드를 分析함에 있어 Misawa⁽¹⁾, Gummel 및 Scharfetter⁽²⁾, 등은 共通的으로 小信號에 依한 方法을 擇하고 있다.

GaAs의 경우에도 材料에 관한 定數들만 適當히 利用할 수 있다면 이 方法이 適用될 수 있다.

그러나 強電界에서의 GaAs의 正孔 流動 速度가 알려져 있지 않았으므로 GaAs Avalanche 다이오드에 對한 數值的인 解는 求할 수 없었다.

後에 GaAs IMPATT 다이오드의 研究가 開發됨에 따라⁽³⁾ 強電界 內의 正孔 流動 速度를 近似的으로 間接 測定할 수 있게 되었다.

그 以來 GaAs IMPATT 다이오드는 急速히 發展되었으며^(4,5), X-band에서 効率 13%, 出力 900mW 以上의 것을 얻게 되었다.

GaAs IMPATT 다이오드 動作 特性의 실측된 結果를 理解함에 도움이 될 수 있도록 本 論文은 設計에 對한 考察과 超短波 特性에 關하여 論議한다.

小信號에 對하여 GaAs 다이오드의 임피이던스와 Q를 算出하였으며 이때 絶緣破壞 電壓은 17, 36 및 58Volt로 하였고 正孔의 飽和 速度 近似值은 $2 \times 10^6 \text{cm/sec}$ 로 하였다.

對象의 接合 狀態는 階段(abrupt)p+n 接合으로 假定하였고 空間 電荷 領域에서의 電界는 實際의 것으로 하였다.

對象의 構造

分析에 있어 階段 p+n 接合을 가정한다. 확산 법에 依하여 GaAs Avalanche 다이오드를 製作할 때 가장 一般的으로 利用되는 것은 n-type 材料에 Zn을 확산시키는 方法인데 이때 形成되는 接合 狀態는 上記 假定과 一致한다.

그림 1에 内部 d-c 電界 |E|와 分析에 利用될 記號들을 보였다. 電流 J_n 과 J_p , 그리고 電界 E들은 正의 X 方向을 取한다. 電子와 正孔의 電離率(ionization rate)은 Sze와 Gibbons⁽⁶⁾에 依하면 다음 式으로 表示된다.

$$\alpha = 3.5 \times 10^6 e^{-\left(\frac{6.85 \times 10^5}{E}\right)^2}$$

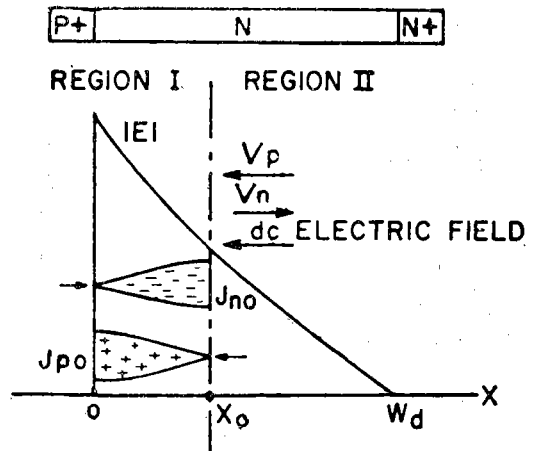


그림 1. p+n階段接合 GaAs Avalanche Diode의 개념도

對象 構造에서 電子沙汰領域과 流動領域이 뚜렷이 區別되지는 않는다.

그러나, 電離率이 電界에 對하여 指數的 關係에 있으므로 그림 1과 같이 다이오드를 두 領域으로 나누어 電子沙汰 增倍作用이 일어나는 部分과 단지 流動만이 있는 部分으로 區別할 수 있다. 만일 X_0 를 $0.4W_D$, 또는 그 以上으로 定하면 Region I에서는 電子沙汰 增倍作用과 流動이 共存하며, Region II에서는 流動이 主로 存在하는 것이 된다. 이 때 W_D 는 캐리어 欠乏層 全體의 두께이다.

Region I에서 發生한 正孔과 電子는 각각 p^+ 와 n^+ 쪽으로 움직이게 되는데 正孔은 電界가 매우 強한 領域($\geq 200KV/cm$)을 지나게 되므로 그 速度는 거의 飽和狀態에 이른다.

또한 電子의 流動 速度는 $10KV/cm$, 또는 그 以上에서 飽和되므로 이들 速度 v_n 및 v_p 는 이 경우에 있어서는 電界와 無關係한 것으로 假定할 수 있다.

分 析

Region I에서의 基本 方程式들은

$$\frac{1}{v_p} \frac{\partial \tilde{J}_p}{\partial t} = \frac{\partial \tilde{J}_p}{\partial x} + \alpha(\tilde{J}_n + \tilde{J}_p) \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{1}{v_n} \frac{\partial \tilde{J}_n}{\partial t} = -\frac{\partial \tilde{J}_n}{\partial x} + \alpha(\tilde{J}_n + \tilde{J}_p) \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{q}{\epsilon} N_D + \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\tilde{J}_n}{v_n} - \frac{\tilde{J}_p}{v_p} \right) \dots\dots\dots(3)$$

여기서 \tilde{J}_n 과 \tilde{J}_p 는 總 電子 및 正孔電流密度이며 N_D 는 n型의 不純物 密度이다.

Misawa⁽¹⁾에 依하여 밝혀진 바와 같이 이 量들은 d-c 成分과 $e^{i\omega t}$ 의 時變項을 包含하는 작은 a-c 成分으로 分解할 수 있다.

二次項을 無視하면 二組의 方程式들을 얻는다.

d-c 成分에 關해서는

$$0 = \frac{dJ_{p0}(x)}{dx} + \alpha(E_0)(J_{p0} + J_{n0}) \dots\dots\dots(4)$$

$$0 = \frac{dJ_{n0}(x)}{dx} - \alpha(E_0)(J_{p0} + J_{n0}) \dots\dots\dots(5)$$

$$0 = \frac{dE_0(x)}{dx} + \frac{q}{\epsilon} N_D + \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{J_{p0}}{v_p} - \frac{J_{n0}}{v_n} \right) \dots\dots\dots(6)$$

이 方程式들의 解와 階段 接合 GaAs 直流 特性은 다른 文獻에 나와있다⁽³⁾.

ac 成分에 對하여서는

$$0 = \frac{\partial \tilde{j}_p}{\partial x} - \left(\frac{i\omega}{v_p} - \alpha \right) \tilde{j}_p + \alpha \tilde{j}_n + \alpha' \tilde{E}_1 J_0 \dots\dots\dots(7)$$

$$0 = \frac{\partial \tilde{j}_n}{\partial x} + \left(\frac{i\omega}{v_n} - \alpha \right) \tilde{j}_n - \alpha \tilde{j}_p - \alpha' \tilde{E}_1 J_0 \dots\dots\dots(8)$$

$$\frac{\partial \tilde{E}_1}{\partial x} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\tilde{j}_n}{v_n} - \frac{\tilde{j}_p}{v_p} \right) \dots\dots\dots(9)$$

여기서 $\alpha' = \frac{dx}{dE}$, $J_0 = J_{n0} + J_{p0}$

式 (9)를 x 에 關하여 미분하고 (7), (8)을 代入하면

$$\frac{\partial^2 \tilde{E}_1}{\partial x^2} = -\frac{i\omega}{\epsilon} \left(\frac{\tilde{j}_n}{v_n^2} + \frac{\tilde{j}_p}{v_p^2} \right) + \frac{\alpha}{\epsilon} \left(\frac{1}{v_n} + \frac{1}{v_p} \right) \left(\tilde{j}_n + \tilde{j}_p \right) + \frac{\alpha'}{\epsilon} \left(\frac{1}{v_n} + \frac{1}{v_p} \right) \tilde{E}_1 J_0 \dots\dots\dots(10)$$

交流分 總 電流는

$$\tilde{j} = \tilde{j}_n + \tilde{j}_p + i\omega \epsilon \tilde{E}_1 \dots\dots\dots(11)$$

이며 이 記號를 使用하면 式(10)은 電界項으로 表現된 小信號 方程式이 된다.

$$\frac{\partial^2 \tilde{E}_1}{\partial x^2} + wh_- \frac{\partial \tilde{E}_1}{\partial x} + \left[\frac{\omega^2}{4} (h_+^2 - h_-^2) - \frac{\alpha'}{\epsilon} J_0 h_+ + i\omega \alpha h_+ \right] \tilde{E}_1 = \frac{\tilde{j}}{\epsilon} \left[ah_+ - \frac{i\omega}{4} (h_+^2 - h_-^2) \right] \dots\dots\dots(12)$$

여기서 $h_+ = \left(\frac{1}{v_p} + \frac{1}{v_n} \right)$ 및 $h_- = \left(\frac{1}{v_p} - \frac{1}{v_n} \right)$ 電界가 常數인 區間에서 式(12)는 單純한 解를 가지므로 電子沙汰 領域을 多數의 小區間으로 分割하고 各 區間의 平均 電界를 그 區間에 있어 dc 電界로 利用한다.

그러면 어떤 特定한 區間에 對한 式 (12)의 解는

$$E_1(x) = Ae^{k_+x} + Be^{k_-x} + \frac{j \left[ah_+ - \frac{i\omega}{4} (h_+^2 - h_-^2) \right]}{\frac{\omega^2 \epsilon}{4} (h_+^2 - h_-^2) - \alpha' J_0 h_+ + i\omega \alpha h_+} \dots\dots\dots(13)$$

여기서

$$K_{\pm} = -i\frac{\omega h_-}{2} \pm \sqrt{-\omega^2 h_+^2 - 4 \frac{J_0 \alpha'}{\epsilon} h_+ + i\omega \alpha h_+}$$

이들은 本質的으로 境界值 問題이며 Region I

의 交流 電界를 完全히 決定하기 위하여서는 두 개의 境界值 條件을 必要로 한다.

그림 1 에 보인 바에 依하면 이 두 境界條件은 다음과 같이 擇할 수 있다.

$$\vec{j}_n|_{x_0}=0 \text{ 및 } \vec{j}_p|_{x_0}=0$$

이 두 條件들과 式(9), (11)로부터 다음의 境界條件을 얻는다.

$$\vec{j} = -\epsilon v_p \frac{\partial \vec{E}_1}{\partial x} + i\omega\epsilon \vec{E}_1 \dots\dots\dots(14)$$

$$\vec{j} = \epsilon v_n \frac{\partial \vec{E}_1}{\partial x} + i\omega\epsilon \vec{E}_1 \dots\dots\dots(15)$$

여기서 注目할 點은 v_n 및 v_p 와 小信號 解와의 關係인데, v_n 과 v_p 는 h_+ , h_- , h_+^2 , 및 h_-^2 의 項으로 式(13)에 包含되므로 만일 v_n 과 v_p 가 서로 상당히 다른 값을 가지면 小信號 解는 이들 中 主로 작은 쪽에 依하여 決定된다.

이 다이오드의 小信號에 對한 임피던스는 두 가지로 構成된다. 하나는 電子沙汰—流動層 (Region I)의 임피던스이며 또하나는 流動層 (Region II)에 의한 것이다.

前者의 임피던스를 式(13)과 境界條件(14) (15)부터 求함에 있어서는 數值的 技法의 導入이 不可避한 것이나, 後者の 境遇에 對하여는 單純한 解析的 關係가 있다.

Region II 에서 式(11)은 다음과 같다.

$$\vec{j} = \vec{j}_n(x_0)e^{-i\frac{\omega}{v_n}(x-x_0)} + i\omega\epsilon \vec{E}_1 \dots\dots\dots(16)$$

이 關係로부터 Region II 의 임피던스는

$$Zd = \frac{1}{j} \int_{x_0}^{WD} \vec{E}_1(x) dx = \frac{\vec{F}}{\omega^2 C_d \tau} (1 - e^{-i\omega\tau}) - \frac{i}{\omega C_d} \dots\dots\dots(17)$$

여기서

$$\vec{F} = \frac{\vec{j}_n(x_0)}{j}, \quad C_d = \frac{\epsilon}{(W_D - x_0)}, \text{ 및 } \tau = (W_D - x_0)/v_n$$

式 (14)와 (15)에 依하여 式(13)을 풀면, Region II 의 임피던스와 함께 F가 밝혀진다. 따라서 小信號 임피던스가 完全히 드러난다.

電子와 正孔의 飽和 速度를 各各 10^7 및 2×10^6 cm/sec 로 가정하고 小信號에 對한 다이오드 D₁, D₂, D₃(表 1)의 임피던스 및 Q를 算出하였으

며 그 結果를 그림 2, 3에 보였다.

GaAs avalanche 다이오드의 임피던스 研究에 있어 興味있는 패러미터는 다이오드의 리액턴스가 零이 되고 負抵抗이 最大가 되는 avalanche 周波數이다.

이보다 낮은 周波數에서 다이오드는 誘導性이며 높은 周波數에서는 容量性임이 밝혀졌다. 그림 4의 曲線은 入力 電力에 對한 出力電力(CW) 및 效率(η)을 보인 것이다. 다이오드는 階段 接合이며 絶緣 破壞電壓은 약 60volt 인 것을 使用하였다.

그림 5에 보인 回路는 出力을 測定하기 위하여 使用된 것이다. 超短波 同調는 Sliding short 와 Slide screw tuner를 同時에 使用하여 얻었다.

표 1. 階段接合 p+n Avalanche diode Model의 패러미터

Diode	Break-down 전압 (Volt)	Break-down時 Depletion幅(μ)	최대 전계 강도 (KV/cm)
D1	17.5	0.6	578
D2	35.7	1.5	478
D3	58.	2.7	432

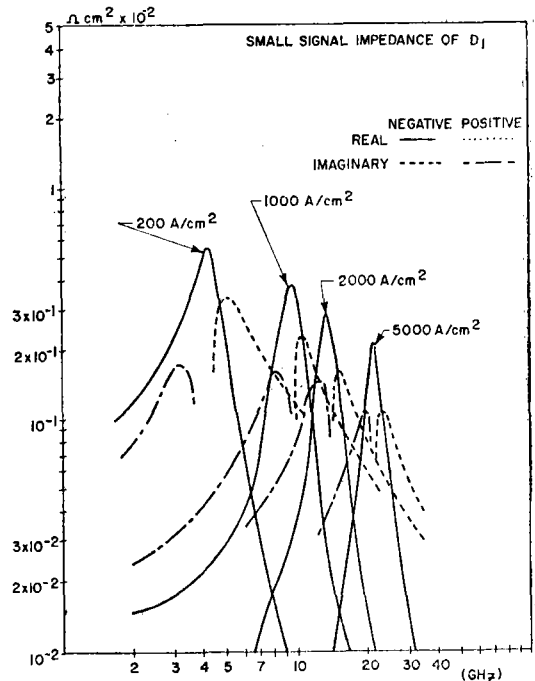


그림 2a 小信號 임피던스(Diode Model DI J=200, 1000, 2000, 및 5000A/cm²)

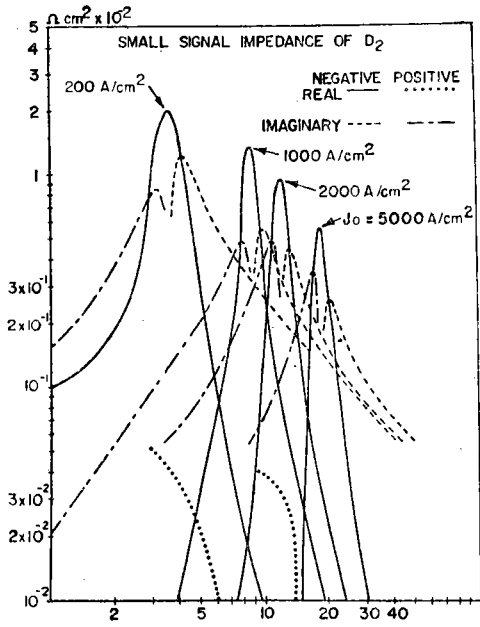


그림 2b 小信號 임피던스(Diode D2 J=200, 1000, 2000, 및 5000 A/cm²)

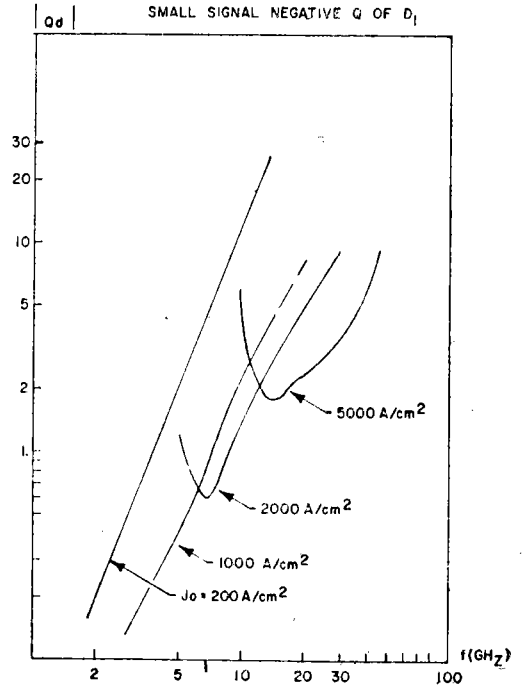


그림 3a 小信號 Q(Diode Model D1 J=200, 1000, 2000 5000A/cm²)

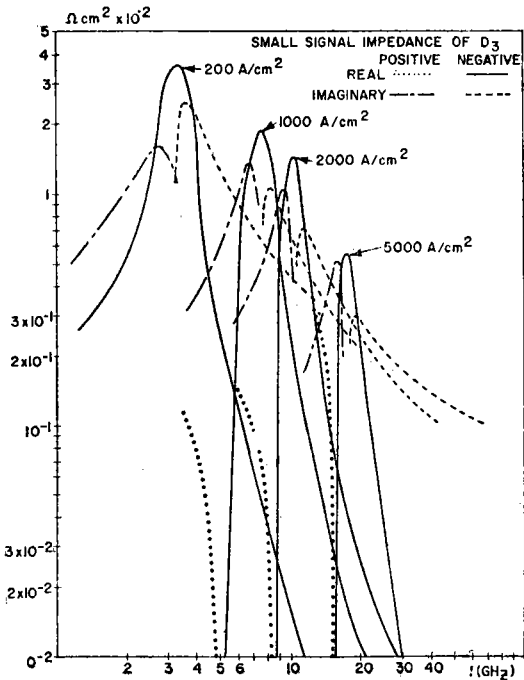


그림 2c 小信號 임피던스(Diode Model D3 J=200, 1000, 2000 및 5000A/cm²)

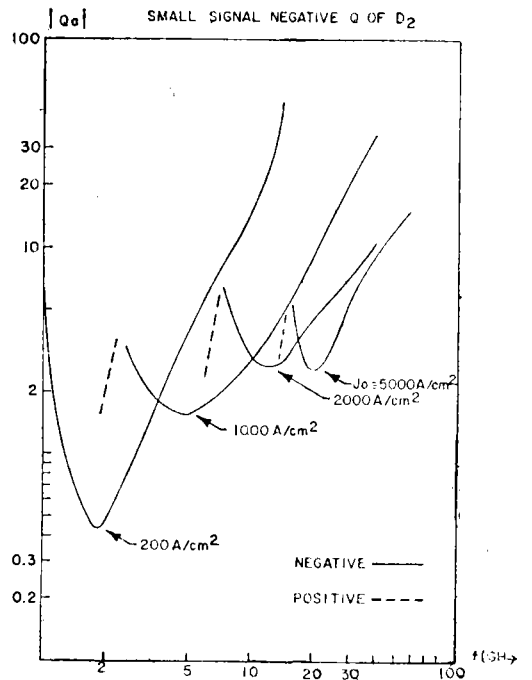


그림 3b 小信號 Q(Diode Model D2 J=200, 1000, 2000 및 5000A/cm²)

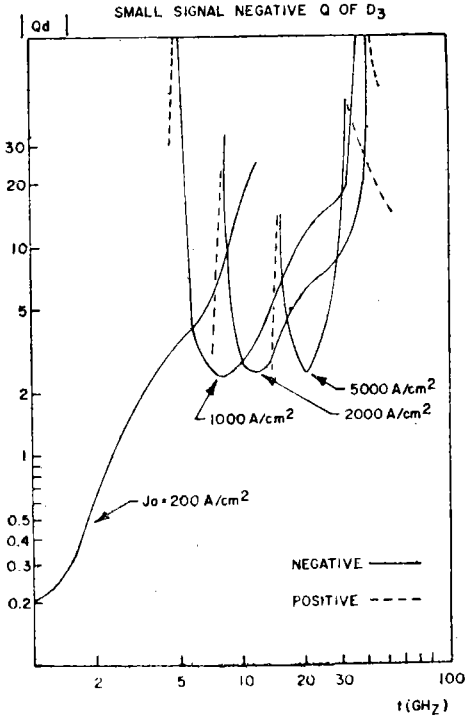


그림 3c 小信號 Q(Diode Model D3 J=200, 1000, 2000 및 5000A/cm²)

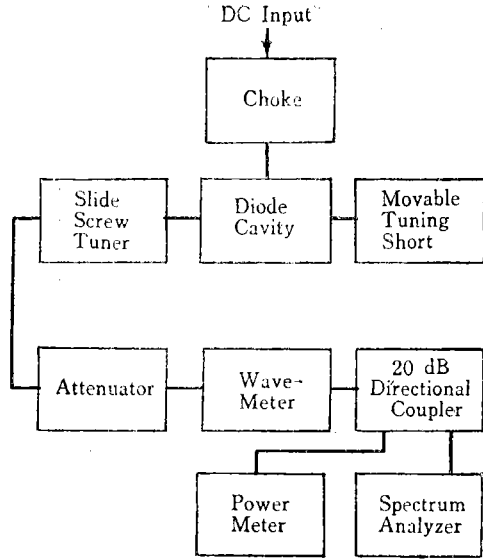


그림 5 X-band Waveguide Test Circuit

結 論

GaAs IMPATT 다이오드의 超短波 動作特性은 本質的으로 入力 바이어스 電流密度와 다이오드의 構造에 依하여 決定된다.

電流密度를 높이면 動作 周波數는 높아지며 다이오드의 임피던스는 낮아진다. Si IMPATT 다이오드에서와는 달리 GaAs 다이오드의 周波數 特性은 Carrier 欠乏층의 幅에 直接 比例하지는 않는다.

이것은 GaAs 다이오드의 流動領域 通過角이 작은 것과 正孔의 飽和 速度가 낮은 데에 기인하는 것이며 따라서 GaAs 다이오드의 超短波 動作에서는 電子沙汰領域이 主로 作用하게 된다.

參 照 文 獻

1. Misawa, T., "Negative Resistance in p-n Junctions Under Avalanche Breakdown Conditions, Part II," IEEE Trans. on Electrom Devices, vol ED-13, pp. 143-151, January 1966.

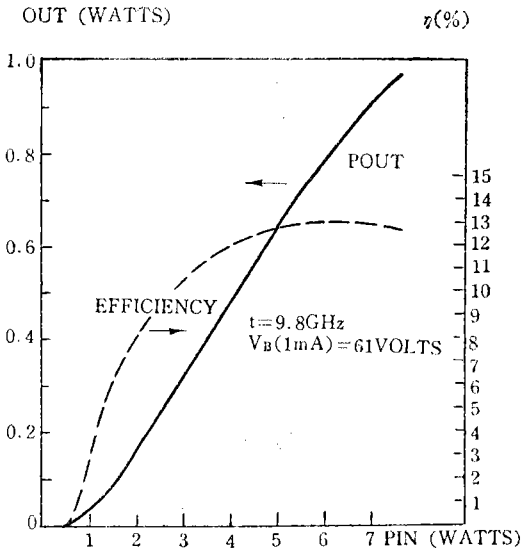


그림 4 入力對出力 및 效率曲線

2. Gummel, H. Scharfetter, D., "Avalanche Region of IMPATT Diodes" Bell System Technical Journal, Vol. 45, pp. 1797-1827, December 1966.
3. Kim, C., "A GaAs Avalanche Diode Analysis and An Approximate Indirect Measurement of Hole Saturation Velocity," IEEE Trans. on Electron devices, November 1969.
4. Kim, C. and Armstrong. L. "High Power and High Efficiency GaAs Avalanche Diodes" Journal of Applied Physics Letters, May 1, 1969.
5. Kim, C. and Armstrong L. "GaAs Schottky Barrier Avalanche Diodes" to be published in Solid State Electronics.
6. Sze, S. and Gibbons, G., "Avalanche Breakdown Voltages of Abrupt and Lineary Graded P-N Junctions in Ge, Si, GaAs, and GaP," Applied physics Letters, Vol. 8, pp. 111-113, March 1966