

## p-n 接合에 있어서의 非等方性 應力效果\*\*\* (Anisotropic Stress Effects in p-n Junctions)

孫 炳 基\* · 李 健一\*\* · 金 秀 重\*\* · 李 宇 一\*\*

(Sohn, Byung Ki · Lee, Kuhn Il · Kim, Soo Jong and Lee, Wu Il)

### 要 約

本 研究는 p-n 接合面에 수직하게 非等方性 應力을 加하여 그 效果를 調査·研究한 것이다. 壓力이 增加할 수록 素子의 降服電壓은 낮아지고 降服特性은 軟化한다. 一定한 壓力範圍內에서는 弛緩 및 履歷現象을 나타내나 위 降服特性은 再現된다. 加壓針의 形態에 따라서 그 弛緩時定數가 相異하나 素子 및 加壓針이 決定되면 그 時定數는 대체로 一定하게 나타난다. 반지름이  $15\mu$ 이고 끝부분이 평탄한 加壓針의 경우,  $3.0 \times 10^4$  kgw/cm<sup>2</sup>까지의 壓力範圍에서는 降服電壓의 壓力依存特性은 좋은 直線性을 나타내었고, 또 加壓下의 降服電壓의 溫度依存特性도 100~300°K의 범위에서 좋은 直線性을 보였다.

### Abstract

The effects of anisotropic mechanical stress applied normal to the surface of p-n junctions have been investigated. As the stress increased, the breakdown voltage was decreased and the breakdown mode became softer. Within a certain limitation in the applied stress, the above phenomena were reversible, though relaxation and hysteresis phenomena were observed. The time constant of relaxation depended upon the shape of the stressing tip, but for the given tip and device a unique time constant was obtained. The stress-dependence of breakdown voltage showed a good linearity up to about  $3.0 \times 10^4$  kgw/cm<sup>2</sup>, when the flat tip of radius  $15\mu$  was used, and the temperature-dependence of breakdown voltage under the stress also showed a good linearity in the temperature range of 100 to 300°K.

### 1. 序 論

1951年 H.Hall 等<sup>(1)</sup>에 의하여 p-n 接合의 流體靜壓 效果에 대한 研究가 시작된 후 1962年 W.Rindner<sup>(2)</sup>는 非等方性應力을 p-n 接合에 加하여 그 效果를 調査하였고, 그 結果 流體靜壓일 경우 보다 非等方性 應力일

때의 效果가 훨씬 더 크다는 것을 밝혔다. 이 效果를 非等方性 應力效果(Anisotropic Stress Effect: ASE)라고 부르고<sup>(2,3)</sup>, 뒤 이어 等方性 應力效果와 더불어 이 ASE의 物性 및 應用을 위한 많은 研究가 활발히 전개되었다.<sup>(4-12)</sup>

Si이나 Ge등 diamad type lattice의 에너지 準位構造를 갖는 경우 壓力은 原子間隔을 감소시키고, 또 이는 에너지帶 間隔을 增大시켜서 結果의으로 接合의 抵抗을 크게한다는 사실이 일찍 Shockley 그룹에 의하여 보고되었다.<sup>(13)</sup> 또 室溫에서 高純度의 Ge에 壓力을 加하면 그 抵抗이 壓力에 따라 많이 變化하며, 低溫에서는  $I_n S_b$ 가 壓力에 의하여 抵抗의 變化와 더불어 傳導型이 n型에서 p型으로 反轉하는 등<sup>(14)</sup> 半導體의 壓力

\* 正會員, 慶北大學校 工科大学 電子材料工學科  
Dept. of Electronic Materials, Col. of Eng.,  
Kyungpook National University

\*\* 正會員, 慶北大學校 工科大学 電子工學科  
Dept. of Electronics, College of Eng.,  
Kyungpook National University

接受日字: 1974年 5月 18日

\*\*\* 本 研究는 1973年度 文教部 研究助成費에 의하여 이루어진 것임.

依存性是 顯著하다. 그러나 아직도 이 效果에 따른 明確한 解析이 내리지지 않은채 應力에 敏感한 半導體特性 研究와 더불어 그 應用研究가 활발하다.<sup>(14,16)</sup>

應力이 p-n 接合의 電氣의 特性에 미치는 영향에 대한 研究는 半導體感壓素子の 原理理解의 基礎가 될 뿐 아니라, 小型, 輕量, 高感度의 半導體壓力變換器, 變位計, 加速度計, 音響素子 等의 各種素子開發의 基礎가 된다. 特히 ASE의 높은 感度는 應用面에 있어서의 밝은 展望과 基礎의인 分野에 있어서의 複雜性을 同時에 提示하고 있다.

本 論文에서는 stylus 및 鋼鐵針으로 p-n 接合에 應力을 加하여 그 逆方向 抵抗과 降服電壓의 變化 및 逆方向電流의 應力에 따른 弛緩效果, 그리고 또 溫度에 대한 非等方性 應力效果를 調査·研究하였다.

### 2. 實驗裝置 및 方法

Fig. 1에서 보는 바와 같은 加壓裝置로 素子에 應力을 加하고, Fig. 2에서와 같은 回路에 의하여 電氣의 特性을 測定하였다. 加壓裝置는 중앙에 加壓針을 固定한 알루미늄棒이 베어링軸에 固定되어 한 方向으로만 可動되게 되어 있고, 被加壓素子를 固定한 微動臺, 그리고 應力을 微小調節할 수 있는 ferrite-core 電磁石

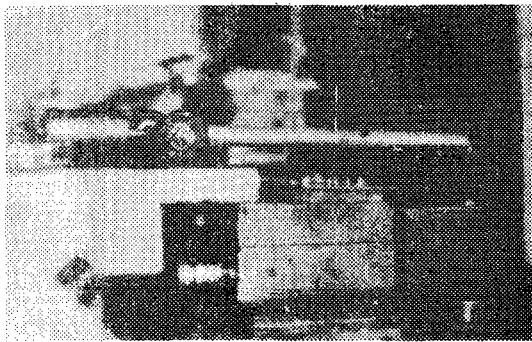


Fig. 1. Stressing apparatus

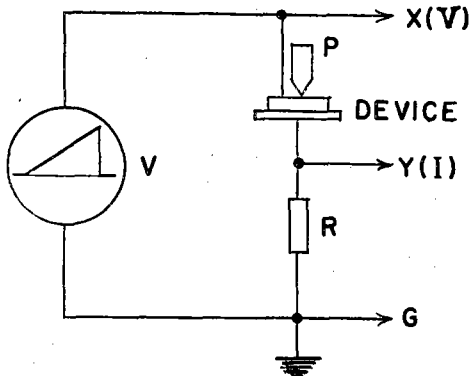


Fig. 2. Circuit diagram for measurements

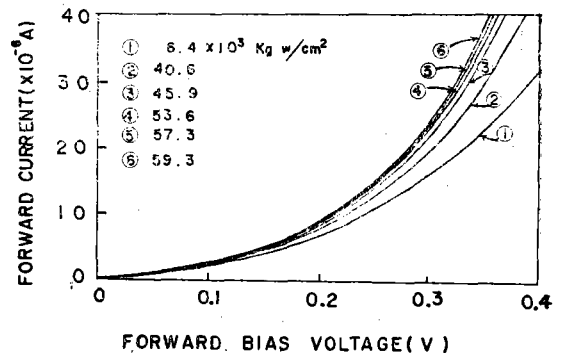
으로 構成되어 있다. 針端의 半徑이 15 $\mu$ 인 鋼鐵針으로 6 $\times 10^4$ kgw/cm<sup>2</sup>까지 加壓하거나 또는 stylus를 使用하였다. Fig. 2.에서 V로는 Tektronix-547 CRO를 이용하여 單發 톱니波를 發生시켜 使用하고, Hewlett Packard-160B CRO 및 YEW-3078 X-Y 記錄計로 電流-電壓特性을 調査하였다. 低溫源으로는 液體酸素 및 dry ice를 썼고 iron-constantan 熱電對를 使用하여 溫度를 測定하였다.

먼저 應力을 parameter로하여 素子에 印加되는 bias 電壓(V)에 대한 素子電流(I)의 特性, 즉 應力(P)에 대한 I-V 特性曲線群을 얻고 이로부터 I-P 特性曲線群을 얻었다. 다음 應力에 대한 素子の 逆方向 降服電壓(V<sub>B</sub>)의 關係 및 이의 溫度에 따른 變化를 觀察하였다. 應力에 따른 降服電壓의 變化는 주로 接合型 diode M18Z10(#12)와 點接觸型 diode 1S1464(#3)에 대하여 調査하였다. 그러나 點接觸型 diode 1S1464(#3)의 경우 그 再現性이 좋지 못한 뿐만 아니라 加壓點의 變位效果가 지나쳐서 體系的인 調査는 主로 接合型 diode M18Z10(#12)에 대하여 行하여졌다. 接合型 diode의 降服特性이 應力에 따라 銳利하지 않고 "soft"한 變化일 경우에는 逆方向 I-V 特性曲線의 기울기가 急激하게 變化한 후 거의 直線的으로 變化하는 部分을 延長하여 電壓軸과 만나는 값으로 그 降服電壓을 定義<sup>(17,18)</sup>하였다. 點接觸型 diode 1S1464의 경우는 일단 降服이 일어나면 그 接合의 溫度가 急히 上昇하므로 降服電壓이 時間에 따라 달라진다. 그래서 接合溫度 上昇에 의한 降服電壓 變動의 影響을 最大限으로 줄이기 위하여 單發 톱니波(single saw-tooth pulse) 電壓에 의하여 降服을 이르고 CRO에 의한 Oscillogram 사진 또는 X-Y 記錄計를 使用하여 降服電壓을 測定하였다.

### 3. 結果 및 考察

#### 3-1. 電流-電壓特性

應力을 parameter로한 diode M18Z10(#12)의 I-V



(a)

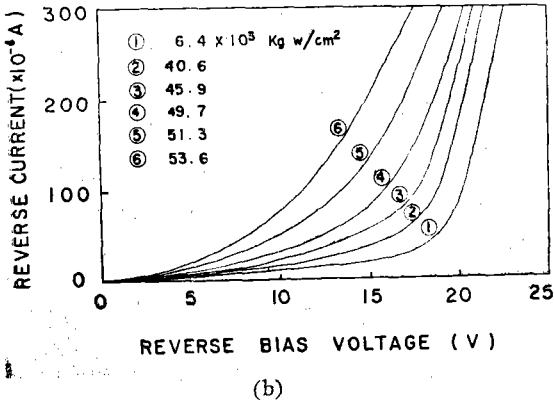


Fig. 3.  $I-V$  characteristics of the junction (M18Z10 #12) under various stresses (a)forward (b)reverse

特性曲線을 Fig. 3.에 나타내었다. Fig. 3(a)는 順方向 bias 電壓이 印加되었을 경우이고, Fig. 3.(b)는 逆方向 bias 電壓이 印加되었을 경우이다. Fig. 3.(b)

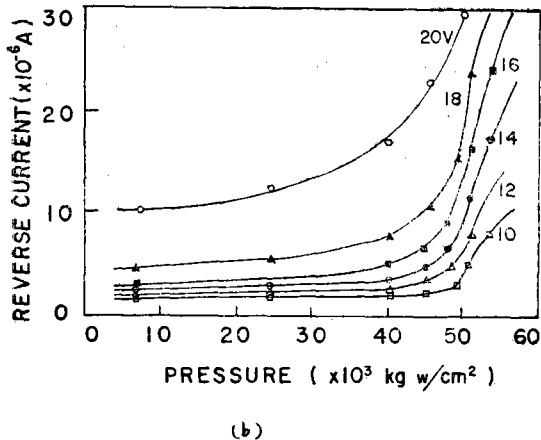
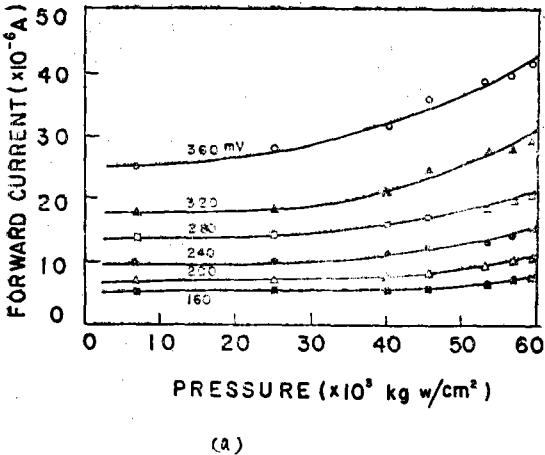


Fig. 4. Current-pressure characteristics for various bias voltages (device: M18Z10 (#12) tip:steel, flat,  $r=15\mu$ ). (a) forward (b) reverse

에서 壓力이 增加함에 따라서 降服特性이 軟化되어 阻과 동시에 降服電壓이 低下됨을 알 수 있다. Fig. 4.는 Fig. 3.으로부터 얻은 電流-壓力 特性曲線이다. 壓力의 어떤 범위에서는 電流-壓力特性이 상당히 좋은 直線性을 나타내고 있으며, Fig. 4(b)의 逆方向 bias의 경우에는  $5 \times 10^4 \text{kgw/cm}^2$ 의 壓力 근처에서 急激한 逆方向電流의 增加를 나타낸다. 그러나 약  $4 \times 10^4 \text{kgw/cm}^2$  以下の 壓力에 대해서는 그 直線性이 매우 좋음을 볼 수 있다. 그리고 壓力이 약  $6 \times 10^4 \text{kgw/cm}^2$  이상이 되었을 때에는 素子에 機械的인 무리가 加해짐을 알 수 있었다.

順方向이나 逆方向이나 모두 壓力增加에 따라서 電流는 增加하였고, 동시에 順方向抵抗이나 逆方向抵抗 모두 減少하는 現象을 나타내었다. 이는 Hall 등의 流體靜壓의 경우 壓力이 增加하면 抵抗이 增加한다는 사실과는 다르다. 이것은 素子の 熱的抵抗 및 擴散抵抗의 變化에 의한 것이라기 보다는 空間電荷抵抗<sup>19)</sup>에 起因하는 것으로 생각된다. 空間電荷領域에 發生一再結合準位가 存在하면 順方向이나 逆方向 bias 接合抵抗이 減少하게 되고, 降服特性이 軟化하게 될 原因이 되며, 또 이와 같은 效果는 溫度가 上昇함에 따라 더욱 현저해진다<sup>20)</sup>는 사실을 미루어 볼 때, ASE의 경우는 壓力에 의하여 空間電荷領域에 發生一再結合中心의 密度가 增加되어 降服特性은 軟化하고 順方向抵抗 및 逆方向抵抗이 減少하는 것으로 解析된다. 결국 壓力이 加해졌을 때의  $I-V$  特性曲線은 Fig. 5와 같이 된다.

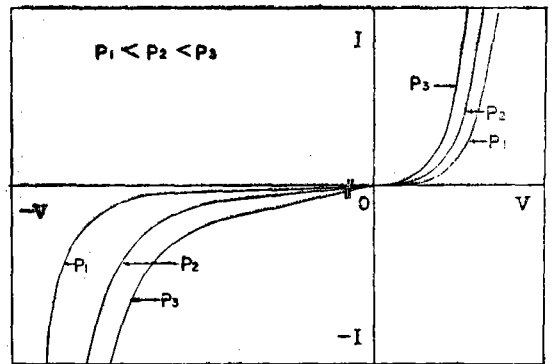


Fig. 5.  $I-V$  characteristics under various pressures

3-2. 弛緩現象

壓力을 인가했을 때 逆方向電流는 Fig. 6과 같은 弛緩特性을 나타낸다. 壓力이 높아질수록 이 現象은 더욱 顯著해진다. Fig. 6은 stylus로 약 27gw의 무게로 加壓한 것이다. 이때 bias 電壓은 0.5v 였었는데 弛緩時定數는 9.1sec 정도였다. 그러나 端部가 평탄한 ( $r=15\mu$ ). 鋼針의 경우  $9.0 \times 10^3 \text{kgw/cm}^2$ 까지의 壓

力範圍에 있어서는 壓力에 거의 無關하게 時定數는 一定하며 그 값은 대체로 19sec 정도였다. 後者의 경우 逆方向電流의 變化量은 前者의 경우보다 적었다. 그리고 또 壓力에 대한 逆方向電流의 變化는 履歷特性을 보였다. 이것은 곧 弛緩效果에 의하여 쉽게 해석된다.

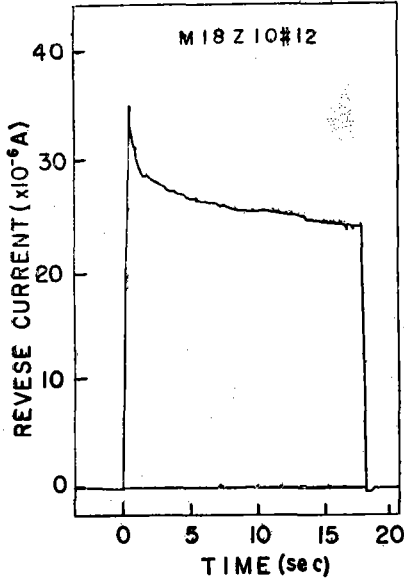


Fig. 6. Relaxation effect in the reverse current

3-3. 降服電壓의 溫度 및 壓力依存性

Fig. 7 및 Fig. 8은 diode M18Z10(#12)의 降服電壓의 溫度依存性和 壓力依存性을 각각 나타내고 있다. Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 降服電壓의 溫度依存性은 壓力이 加해지지 않은 경우<sup>21)</sup>와 마찬가지로 100~300°K의 온도범위에서 좋은 直線性을 보인다. 그러나 壓力이 비교적 큰 경우 320°K 이상으로 온도가 높아 질때 直線性은 弱화되는 경향을 보였다. Fig. 8에서 端部가 평탄하고 반지름이 15μ인 鋼鐵針으로 加

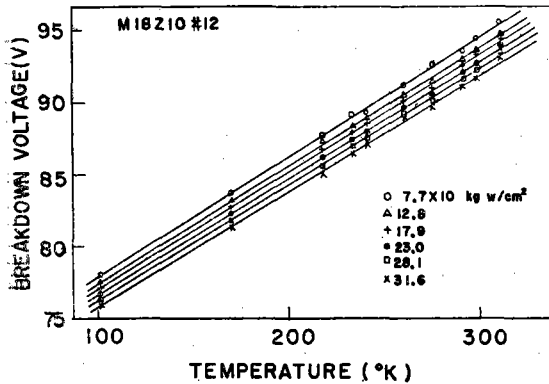


Fig. 7. Relationship between the breakdown voltage and the absolute temperature under various stresses

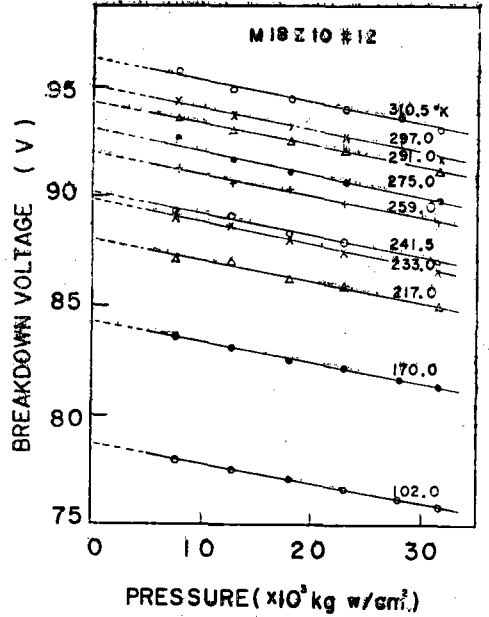


Fig. 8. Relationship between the breakdown voltage and the stress at various temperature

壓한 경우의 降服電壓의 壓力依存特性도  $\sim 3 \times 10^4 \text{ kgw/cm}^2$  정도의 압력범위에서는 좋은 直線性을 보이고 壓力이 增加함에 따라 降服電壓은 감소함을 알 수 있다. 그러나 球狀端部의 加壓針인 경우에는 降服電壓의 減小分 즉  $-\Delta V_B$ 가 壓力에 따라 大體로 壓力 3배곱근에 비례하였다.

Fig. 7과 Fig. 8에서의 각 직선들의 기울기  $\partial V_B / \partial T$ 는 대체로  $83 \times 10^{-3} \text{ V/}^\circ\text{K}$  정도이고,  $-\partial V_B / \partial P$ 는 대체로  $10^{-4} \text{ V} \cdot \text{cm}^2 / \text{kgw}$ 의 order이며, 그 絕對值  $|\partial V_B / \partial P|$ 를  $\alpha$ 라 할 때  $\alpha$ 는 溫度가 上昇함에 따라서 增加한다. 이 增加를 나타낸 것이 Fig. 9이고  $\partial \alpha / \partial T$ 는  $4.5 \times 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{cm}^2 / \text{kgw} \cdot \text{deg}$ 이다

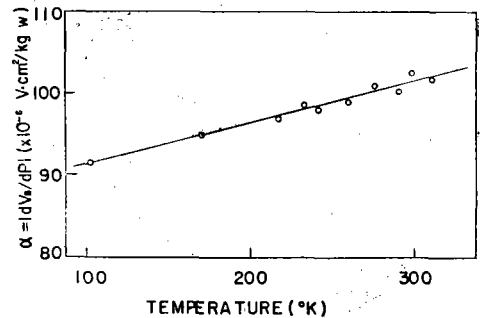


Fig. 9.  $\alpha = |\partial V_B / \partial P|$  against temperature

非等方性 應力效果는 여러가지 物理的 機構의 相互作用의 結果로서 說明되어야 하므로 매우 複雜하다.

그러나 大體로 壓力에 의한 energy gap의 變化와 半導體 素子の 空間電荷領域內에 壓力에 의하여 發生한 發生一再結合 中心에 起因하는 것으로 생각된다. 또한 ASE에는 電氣的으로 可逆의 效果를 내는 경우라 할지라도 素子の 被加壓 表面을 자세히 검사해보면 상처가 있고 얇은 dislocation이 生成되는 경우가 많아서 表面條件이 때로는 影響을 미치는 경우가 있다. 壓力이 어느 限界를 넘으면 ASE는 非可逆의으로 되며 annealing에 의하여 原狀態로 되돌아 오는 경우도 있으나 限界超過가 될 때는 素子は 되돌아 오지 않고 파괴된다. 또 加壓點의 位置에 따라서 ASE는 달카로운 變化를 보인다. 이것은 加壓點이 결정결함이 있는 부분일 경우에는 壓力效果가 매우 클 것이다.

#### 4. 結 論

비교적 素子電流가 낮은 범위에 있어서는 壓力이 증가할수록 素子の 抵抗이 감소하고 降服特性은 軟化한다. 이것은 ASE가 壓力에 의하여 發生한 空間電荷領域內의 發生一再結合中心에 起因함을 강하게 表現한다. 또 본 실험의 경우 應力이  $5 \times 10^4 \text{kgw/cm}^2$ 까지의 범위에서는 順方向이나 逆方向電流의 對壓力特性이 비교적 좋은 直線性을 나타내었으며 再現性도 좋았다. 壓力에 대한 弛緩特性은 加壓針端의 形態에 따라서 그 弛緩時定數가 相異하나 素子 및 加壓條件이 결정되면 그 時定數는 대체로 一定하게 나타난다. 端部가 평탄하고 半徑 15 $\mu$ 인 鋼鐵針으로 diode M18Z10(#12)를 약  $10^4 \text{kgw/cm}^2$ 까지 加壓했을 경우의 逆方向電流의 弛緩時定數  $\tau$ 는 대체로 19sec 정도로 큰 값을 나타내었다. 100~300°K의 온도 및  $3 \times 10^4 \text{kgw/cm}^2$ 까지의 壓力의 範圍에서는 降服電壓의 溫度依存性은 勿論 평탄한 端部加壓針의 경우 壓力依存性도 좋은 直線性을 나타내었다. 그리고 降服電壓은 溫度上昇에 대해서는 直線의 增加函數이지만 壓力이 커짐에 따라서는 直線의 減小函數였다.

#### 參 考 文 獻

1. Hall, J. Bardeen, and G. Pearson, Phys. Rev., 89, 129 (1951)

2. W. Rindner, J. Appl. Phys., 33, 2479 (1962)  
 3. W. Rindner and I. Braun, J. Appl. Phys., 34, 1958 (1963)  
 4. A. Goetzberger and R. H. Finch, J. Appl. Phys., 35, 1851 (1964)  
 5. M. E. Sikorski, P. Andreatch, A. Grieco, and H. Christensen, Rev. Sci. Instrum., 33, 1130 (1962)  
 6. W. Rindner, G. Doering, and R. Wonsen, Solid-State Electronics, 8, 227 (1965)  
 7. J. R. Hauser and J. J. Wortman, J. Appl. Phys., 37, 3884 (1966)  
 8. H. Kressel and A. Elsea, Solid-State Electronics, 10, 213 (1967)  
 9. A. Jayaraman, B. B. Kosicki, and J. C. Irvin, Phys., 171, 836 (1968)  
 10. B. B. Kosicki, A. Jay Braman and W. Paul, Phys. Rev., 172, 764 (1968)  
 11. H. Ikoma, J. Phys. Soc. Japan, 25, 1069 (1968)  
 12. W. Wlodarksi, IEEE Trans., IECT-19, 64 (1972)  
 13. W. Shockley and J. Bardeen, Phys. Rev., 77, 407 (1950); 80, 72 (1950)  
 14. M. Wakatsuki, J. Inst. Electronics Comm. Engrs. Japan, 53, 935 (1970)  
 15. J. M. Besson, A. R. Calawa, and W. Paul, Phys. Rev., 173, 699 (1968)  
 16. J. Lees, M. P. Wasse, and G. King, Solid-State Comm., 5, 521 (1967)  
 17. R. H. Haitz, J. Appl. Phys., 35, 1370 (1964)  
 18. W. I. Lee, B. K. Sohn, and K. I. Lee, Proc. Seoul International Conference on Electronic Engineering—1970, p. 309 (1971)  
 19. R. J. McIntyre, J. Appl. Phys., 32, 983 (1961)  
 20. O. Ryuzan, J. Phys. Soc. Japan, 16, 2177 (1961)  
 21. W. I. Lee, B. K. Sohn, and K. I. Lee, On the breakdown in p-n junctions, Report to MOE—1970 (March, 1971)