

半導體의 不純物中心의 電子의 特性*

Electronic Characteristics of the Impurity Centers in Semiconductors

孫炳基** · 李健一** · 金秀重** · 李宇一**

(Byung-Ki Sohn, Kuhn-Il Lee, Soo-Joong Kim and Wu-Il Lee)

要 約

Ge 點接觸形 diode 에 있어서 逆方向 電壓이 印加되었을 때의 burst noise 를 調査하여 carrier 捕獲中心의 電子의 狀態를 溫度 및 逆方向 電壓의 函數로서 求하였다.

여기서는 이러한 中心의 電子의 狀態를 나타내는 時定數의 測定領域을 十數分까지 擴大하였으며 이는 이 때 까지 다른 研究者들에 의한 範圍보다 約 10,000倍나 넓은 것이다.

이 時定數와 溫度와의 關係에서 捕獲中心의 quasi-Fermi 準位 및 이의 activation energy 를 求하였다.

Abstract

The electronic states of carrier capture centers in reverse biased point-contact germanium diodes have been investigated through the temperature- and reverse voltage- characteristics of burst noise.

The measured values of the time constants which represent the electronic states of the centers are extended up to greater than ten minutes, which are about 10,000 times greater than the ones obtained by other investigators.

From the relation between these time constants and temperatures, the quasi-Fermi level and the activation energy of the center have been obtained.

I. 序 論

半導體 素子の 雜音中에는 現象的으로 極히 類似하나 機構的으로는 根本的으로 다른 두 가지의 雜音이 있다. 그림 1에서 보듯이 이들은 一般的으로 一定한 條件下에서는 어떤 統計的 分布를 갖는 二安定性 또는 境遇에 따라서 多安定性的의 電流變動을 나타낸다. 이들을 각각 microplasma noise[그림 1(a)] 및 burst noise[그림 1(b)]라

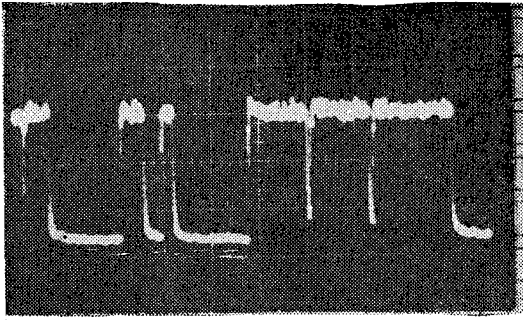
부른다.

microplasma 現象은 diode 나 transistor 의 逆方向으로 bias 된 $p-n$ 接合의 降服電壓 근처에 있어서 數 volt 未滿의 極히 좁은 電壓領域에서만 觀察되나 burst noise 는 逆方向으로 bias 된 넓은 電壓領域에서 뿐만 아니라 順方向으로 bias 된 普通의 $p-n$ 接合 diode⁽¹⁻³⁾, tunnel diode⁽¹⁾, 接合型 transistor⁽³⁻⁷⁾ 등에서 觀察되고, 또 各種 抵抗體^(4, 8)에서도 觀察된다.

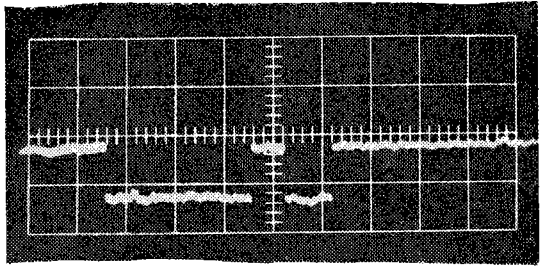
microplasma 는 McKay⁽⁹⁾에 의하여 發見된 後 많은 사람들⁽¹⁰⁻¹⁴⁾에 의하여 研究되고 이의 機構는 $p-n$ 接合의 空間電荷領域에 있어서의 結晶不

* 本 研究는 72年度 文敎部 研究助成費에 의하여 이루어진 것임.

** 正會員, 慶北大學校 工科大學 電子工學科 (Dept. of Electronics, Kyungpook National University)



(a) $20\mu\text{A}/\text{cm}$ $0.5\mu\text{sec}/\text{cm}$



(b) $10\text{nA}/\text{cm}$, $50\text{ msec}/\text{cm}$

그림 1. (a) microplasma noise (b) burst noise

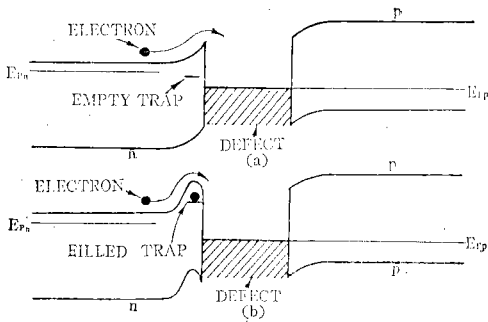


그림 2. 結晶缺陷이 空間電荷領域內에 있을대의 帶構造
The band structure of the defect in the space charge region.

完全성에 起因되는 局所的인 avalanche breakdown 現象으로 알려져 있다.

이에 反해 burst noise의 發生機構는 空間電荷領域 또는 表面에 存在하는 結晶缺陷의 電位障壁의 變動에 依하여, 이들 缺陷을 지나는 電流가 變動된다는 것으로 說明된다. 그림 2에서와 같이 金屬析出物과 같은 높은 再結合率을 갖는 結晶缺陷이 p-n 接合의 空間電荷領域內나 이 근처에 있으면 이것은 주위의 半導體 物質과 Schottky barrier를 形成하게 된다. 萬一 이 缺陷에 依한 空間電荷領域에 不純物中心과 같은 carrier의 捕獲中心이 있으면 이들 中心이 carrier를 捕獲하느냐 放出하느냐에 따라 Schottky barrier의 높이가 달라지며 따라서 이 缺陷을 지나는 電流도 變動된다고 생각된다. 그리고 電流變動이 二安定特性을 나타낼때는 이것은 單一 carrier의 捕獲 또는 放出에 起因된다고 解析된다.

따라서 burst noise의 電流振幅은 一般的으로

매우 작으며, microplasma의 電流振幅의 約 1,000分の 1인 數 10nA 程度밖에 되지 않는다. 그리고 microplasma의 境遇 때로는 發光現象⁽¹⁵⁾이 수반되기도 하나 burst noise의 경우는 發光現象이 없다.

한편 電流 pulse의 持續時間은 burst noise의 경우 대체로 數 $10\mu\text{sec}$ 보다 길며 本 實驗에 있어서는 230°K 근처의 低溫에서 數分내지 10餘分程度까지의 것이 觀察되기도 했다. 그러나 microplasma의 경우 pulse의 持續時間은 大體로 μsec 以下の 極히 짧은 것이 많다는 것이 特徵이다.

本 論文에서는 比較的 burst noise가 發見될 確率이 큰 Ge의 點接觸型 diode를 써서 burst noise의 電流振幅을 逆方向 電流 및 逆方向 電壓의 函數로서 求하였다. 한편 溫度를 parameter로 하여 正方向 pulse의 持續時間 τ_+ 및 負方向 pulse의 持續時間 τ_- 의 分布를 $50\mu\text{sec}$ 에서 15分에 이르기까지의 넓은 範圍에 걸쳐서 調査하였다. 이는 이때까지 다른 研究者⁽¹⁶⁻¹⁹⁾들에 依하여 이루어진 範圍를 約 10,000倍나 擴大한 것이다. 여기서 다시 τ_+ 및 τ_- 의 平均值 $\langle\tau_+\rangle$ 및 $\langle\tau_-\rangle$ 를 溫度의 函數로서 求하고, 이들로부터 不純物中心 또는 捕獲中心의 quasi-Fermi 準位 및 energy 準位를 決定하였다. 또한 逆方向 電壓 V_R 을 parameter로 하여 τ_+ , τ_- 의 分布를 調査하고 여기서 $\langle\tau_+\rangle$ 및 $\langle\tau_-\rangle$ 를 V_R 의 函數로 求하여 捕獲中心의 電子捕獲 및 放出機構가 thermionic-field emission(TFE)에 依함을 알 수 있었다.

II. 理 論

여기서는 結晶缺陷을 金屬析出物로 假定하고, 이것이 $p-n$ 接合의 空間電荷領域에 있어서 n 側과 p 側을 連結하는 것으로 假定하면 平衡狀態에 있어서의 帶構造는 그림 3과 같이 된다. 그리고 一般的으로 觀測되는 바와 같이 n 型 半導體와 金屬사이에는 높은 電位障壁이 있어서 整流性 接觸을 하고 있으나 金屬과 p 型 半導體 사이에는 낮은 電位障壁이 있어서 ohmic 接觸을 하고 있다고 假定한다 (16, 20).

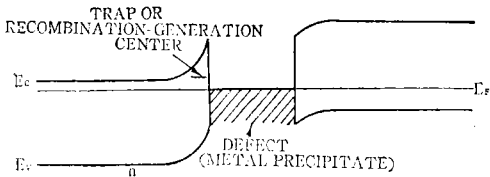


그림 3. 平衡狀態에 있어서의 結晶缺陷의 帶構造
The equilibrium band structure of the defect.

結晶缺陷이 있는 곳에서의 電位障壁은 diode의 餘他部分의 電位障壁보다 一般的으로 낮다. 따라서 缺陷의 크기는 diode의 크기에 비해 매우 작다 하더라도 이 部分을 지나는 電流의 크기는 適當한 bias 範圍에 있어서는 diode의 나머지 部分을 흐르는 電流 보다 훨씬 클 수도 있다. 實際로 S. T. Hsu 等 (17)은 同一 過程에 依해서 製造된 接合型 diode 中 burst noise가 있는 것과 없는 것의 $I-V$ 特性을 比較하여, 낮은 順方向 電壓範圍에 있어서 burt noise가 있는 diode가 이것이 없이 diode의 正常電流에 비해 約 100倍 以上の 過剩電流를 나타내는 것을 觀察하였다.

따라서 結晶缺陷 근처에 있어서 n 쪽에서 p 쪽으로 바라 보는 電位障壁의 모양은 그림 4(a)와 같이 된다고 생각할 수 있다. 지금 이 缺陷에 依한 空間電荷領域內에 不純物中心과 같은 carrier의 捕獲中心이 있다면, 이것이 carrier를 잡느냐 放出하느냐에 따라 實効電位障壁의 높이 ϕ_B 가 變動하게 되고 이는 다시 이 缺陷을 지나는 電流의 變動을 가져오게 된다. 그림 4(b)는 捕獲中心에 電子가 잡혔을 때 實効電位障壁의 높이가 $q\Delta V$ 만 큼 높아짐을 나타내고 있다. 이 경우 缺陷을 흐르는 電流는 減少하므로 負方向의 pulse로 되며 萬

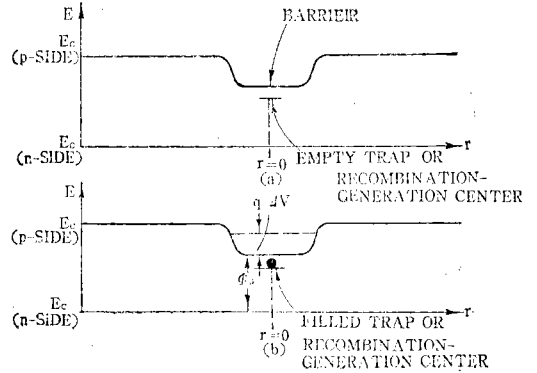


그림 4. (a) n 型領域에서 結晶缺陷쪽을 본 電位障壁의 높이 (b) 捕獲電子에 依한 電位障壁 높이의 變化

Fig. 4. (a) Potential barrier height as seen from the n -type region toward the defect, (b) Barrier height modulation due to the trapped electron.

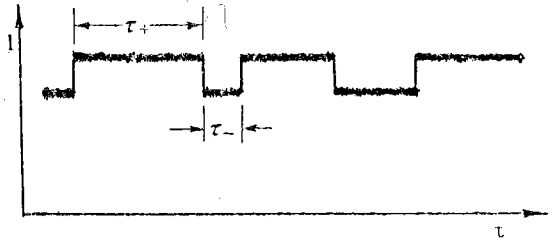


그림 5. τ_+ 및 τ_- 의 定義

Fig. 5. Defiintions of τ_+ and τ_- .

一 捕獲中心에서 電子가 放出되면 電位障壁은 다시 낮아지므로 電流는 正方向의 pulse로 된다.

다시 말하면 그림 5에서 正 pulse의 持續時間 τ_+ 는 捕獲中心에 電子가 存在하지 않는 時間을 나타내고, 負 pulse의 持續時間 τ_- 는 여기에 電子가 잡혀있는 時間을 나타낸다. 이들의 平均値를 各各 $\langle \tau_+ \rangle$ 및 $\langle \tau_- \rangle$ 로 表示하면

$$\langle \tau_+ \rangle = \frac{1}{\sigma V_{th} N_C \exp[(E_{Fn} - E_C)/kT]} \quad (1)$$

및

$$\langle \tau_- \rangle = \frac{1}{\sigma V_{th} N_C \exp[(E_i - E_C)/kT]} \quad (2)$$

로 주어지며 (17, 18), 여기서 σ 는 捕獲中心의 電子 捕獲斷面積, V_{th} 는 自由電子의 熱的速度, N_C 는 傳導帶의 實効狀態密度, E_{Fn} 은 電子捕獲中心이 있는 곳에서의 quasi-Fermi 準位, E_C 는 傳導帶

下端의 energy 準位, E_i 는 電子捕獲中心의 energy 準位이다. 이들의 比는 곧

$$\frac{\langle \tau_- \rangle}{\langle \tau_+ \rangle} = \exp[(E_{Fn} - E_i)/kT] \quad (3)$$

로 되어 이는 捕獲中心의 捕獲斷面積에 無關하게 된다.

式 (1)에서 $\log \langle \tau_+ \rangle$ 를 $1/T$ 의 函數로 그리면 直線이 되어야 하며 이의 기울기에서 $E_c - E_{Fn}$ 이 決定된다. 한편 捕獲中心의 activation energy $E_c - E_i$ 는 $\log \langle \tau_- \rangle$ 를 $1/T$ 의 函數로 나타낸 直線의 기울기에서 얻어진다.

III. 實驗結果 및 論議

本 實驗을 위한 裝置의 略圖는 그림 6과 같다. burst noise의 τ_+ 또는 τ_- 의 測定에 있어서 sweep 速度가 5sec/cm 보다 빠른 增遇는 CRO를 使用했고 230°k 程度의 低溫인 경우는 τ_+ 또는 τ_- 가 數分에서 十數分 程度까지 길어지므로 CRO로는 觀察이 不可能하여 strip chart recorder를 使用했다. burst noise의 CRO trace는 그림 7에서와 같이 여러 trace를 寫眞으로 찍어 이들을 擴大하여 여기서 τ_+ , τ_- 의 分布 및 이들의 平均値 $\langle \tau_+ \rangle$, $\langle \tau_- \rangle$ 등을 求하였다. 이때 burst noise의 波形的

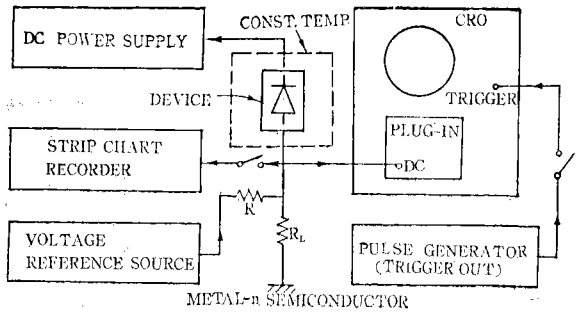
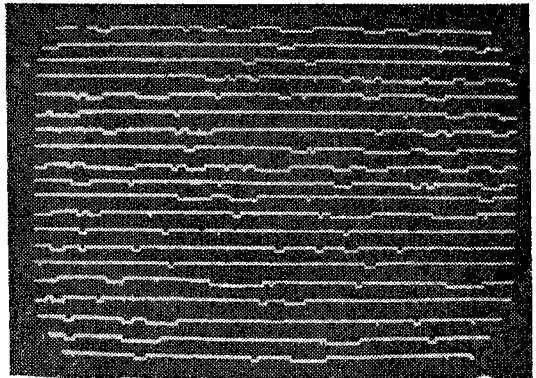


그림 6. 實驗裝置의 略圖
Fig. 6. Schematic diagram of the experimental apparatus.



250nA/cm 0.5 sec/cm
그림 7. τ_+ 및 τ_- 의 分布決定을 위한 burst noise CRO trace.
Fig. 7. CRO traces of the burst noise for the determination of τ_+ and τ_- .

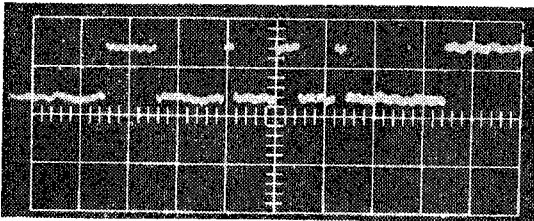
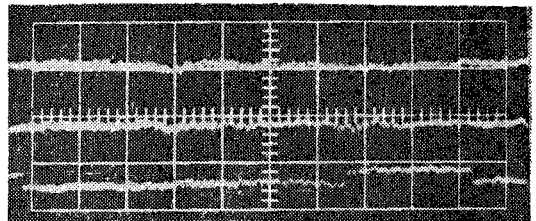
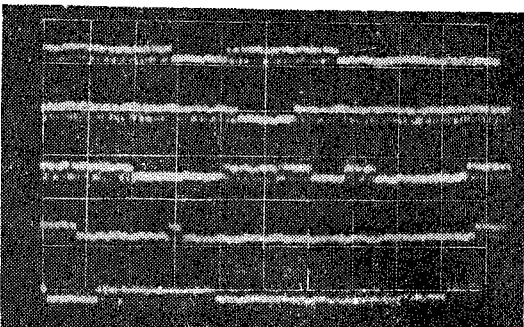


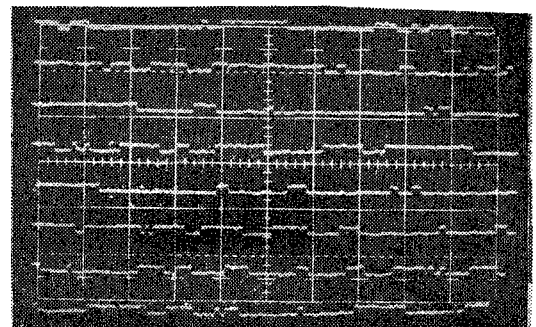
그림 8. (a) 10nA/cm, 50msec/cm



(b) 40nA/cm, 2sec/cm



(c) 50nA/cm 5sec/cm



(d) 100nA/cm, 0.5msec/cm

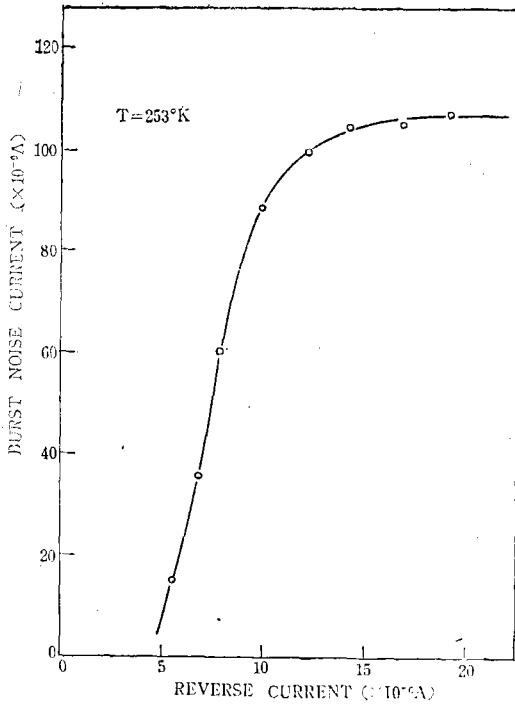


그림 9. 逆方向電流에 對한 burst noise 電流
 Fig. 9. Plot of the burst noise current versus the reverse current.

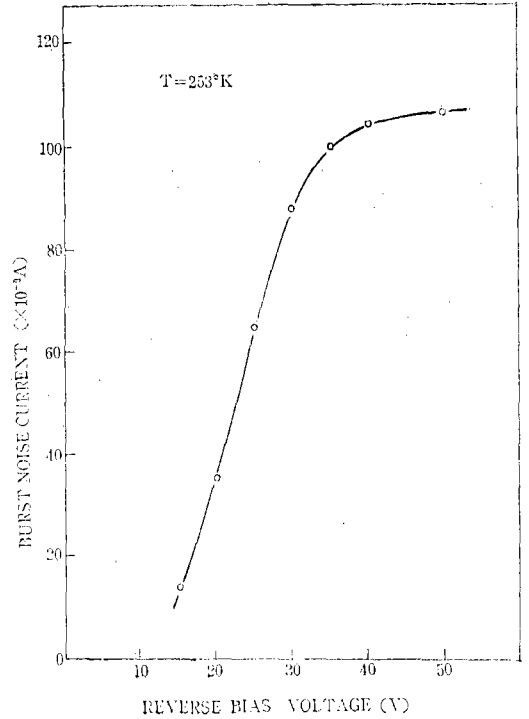


그림 10. 逆方向電壓에 對한 burst noise 電流
 Fig. 10. Plot of the burst noise current versus the reverse bias voltage.

歪曲을 막기 위하여 CRO 入力を DC mode 로 하였으며 基準電壓源을 써서 CRO의 DC 入力 level의 調節 및 여러 trace가 필름의 한 화면에 收錄되도록 하였다.

本 實驗에서 使用한 素子는 Ge의 點接觸型 diode이다. 總 200個中에서 burst noise를 나타내는 素子는 18個였으며, 이들의 電流波形도 素子마다 여러가지로 달랐다. 이들 중 比較的 뚜렷한 burst noise를 發生한 素子는 10個 程度였고 이들의 波形의 몇 가지가 그림 8에 실려져 있다. 그림 8(b)에서와 같이 多安定特性을 나타내는 경우는 carrier의 捕獲中心이 둘 이상 있어서 이들이 獨立的으로 電子의 狀態를 달리 하는데 起因한다고 볼 수 있으나 그림 8(c)와 같이 burst noise가 集團的으로 出現하다가 없어지고 하는 것은 그 原因이 이들 捕獲中心間의 相互作用에 있다고 解析된다(21).

測定에 使用한 素子는 τ_+ , τ_- 등을 위한 統計的 處理의 便宜上 pulse 모양이 깨끗한 diode #4-

0212를 使用하였다. 溫度 253°k에서 逆方向電流 I_R 에 對한 burst noise의 電流振幅 I_{BN} 은 그림 9에 나타나 있다. 대체로 I_R 에 比해서 I_{BN} 은 約 100分の 1程度였고 I_{BN} 이 10nA 以下의 경우는 素子의 熱的 雜音에 因하여 觀察이 困難하였다. I_R 이 5에서 10 μ A의 範圍에서 I_{BN} 은 좋은 直線性을 나타내었으며 I_{BN} 이 約 100 μ A에서 飽和值에 到達하였다.

I_{BN} 을 逆方向電壓 V_R 을 函數로 하여 그리면 그림 10과 같이 되며 曲線의 대체의 경향은 그림 9와 같다. 이 素子의 경우, 그 spreading 抵抗은 約 100 Ω 이었으므로 여기서는 V_R 을 그대로 接合電壓 V_j 를 볼 수 있다.

그림 11은 여러 溫度에 對한 τ_- 및 τ_+ 의 分布를 나타낸 것이다. 230에서 305°k까지의 넓은 溫度範圍에 걸쳐서 τ 의 分布는 指數函數的 減少를 나타냄을 보여 준다. 特히 230°k에 對한 것은 그림 11에서 거의 水平線으로 나타나 있으나 이것만을 尺度를 바꾸어 다시 그린 것이 그림 12

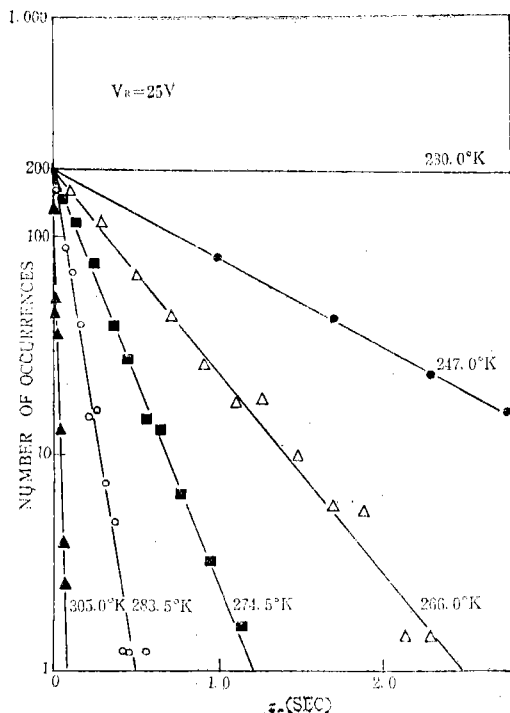
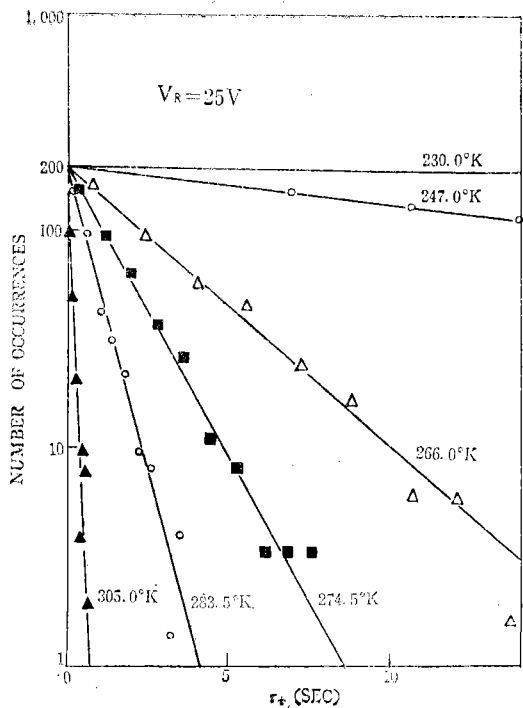


그림 11. pulse 持續時間의 分布 (a) 電子가 捕獲된 境遇, (b) 電子가 放出된 境遇
 Fig. 11. Distribution of the pulse width. (a) When the center is filled by an electron. (b) When the center is empty.

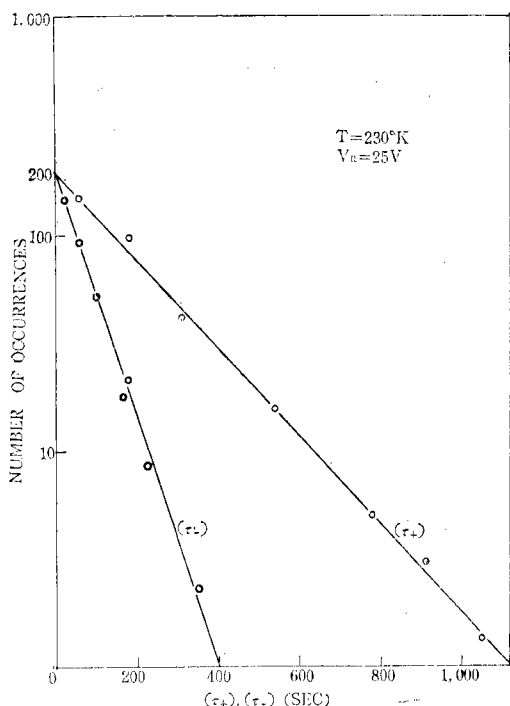


그림 12. 230°k 에서의 pulse 持續時間의 分布
 Fig. 12. pulse width distribution at 230°k.

이다.

여기에서 特記할 事實은 이 程度의 低溫에서 pulse 의 持續時間이 數分에서 十數分 程度에 이르기까지 긴것이 있음에도 不拘하고 如前히 깨끗한 指數函數的 分布를 갖는다는 점이다. 이 結果는 이대 까지의 다른 研究者⁽¹⁶⁻¹⁹⁾들에 依한 $\langle \tau \rangle$ 의 約 10,000배에 해당한다. 그림 13에는 이 實驗에서 얻은 strip chart 에 그려진 burst noise 의 한 例이다.

이들의 關係에서 電子捕獲中心의 activation energy 와 이 中心에 對한 quasi-Fermi 準位를 決定하기 위하여 $\log \langle \tau \rangle$ 를 $1/T$ 에 對하여 그리면 그림 14가 된다.

$\langle \tau_- \rangle$ 의 기울기를 式 (1)에 적용하면 捕獲中心의 activation energy $E_C - E_i$ 가 $0.660eV$ 로 決定된다. $\langle \tau_+ \rangle$ 의 기울기를 式 (2)에 적용하면 $E_C - E_{Fn}$ 은 $0.583eV$ 로 되며 여기서 $E_{Fn} - E_i$ 가 $0.077eV$ 로 구해진다.

여기서 $\langle \tau_+ \rangle$ 나 $\langle \tau_- \rangle$ 가 溫度가 내려 감에 따라 커진다는 것은 捕獲中心에 의한 電子의 捕獲 및

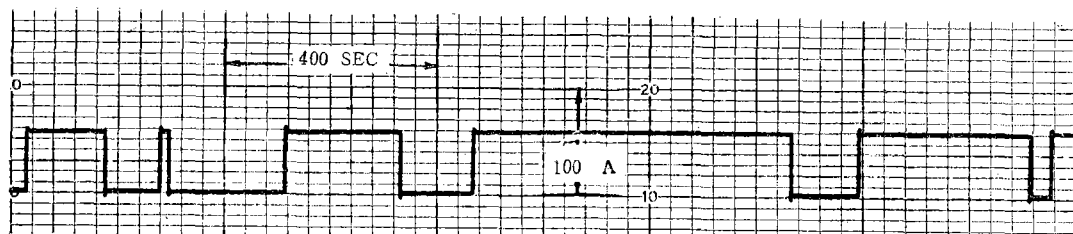


그림 13. 230°k에서 strip chart recorder에 記錄된 burst noise의 波形

Fig. 13. A part of the burst noise waveform recorded by a strip chart recorder at 230°k.

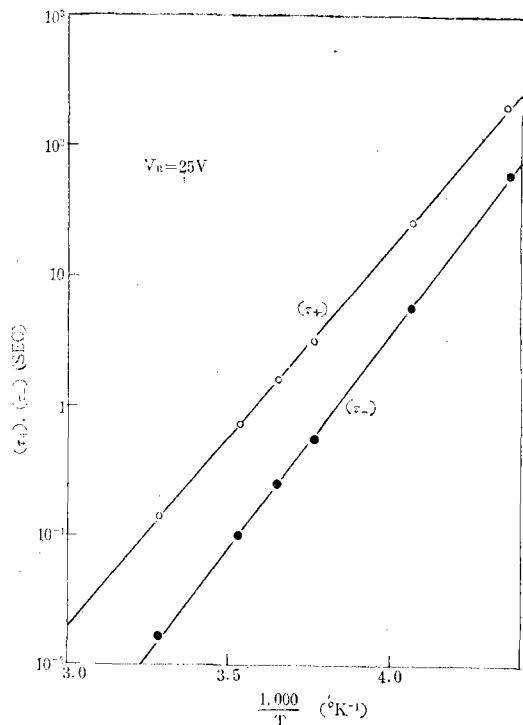


그림 14. 溫度의 函數로 表現한 pulse 幅의 平均値

Fig. 14. plot of the average values of the pulse width as a function of temperature.

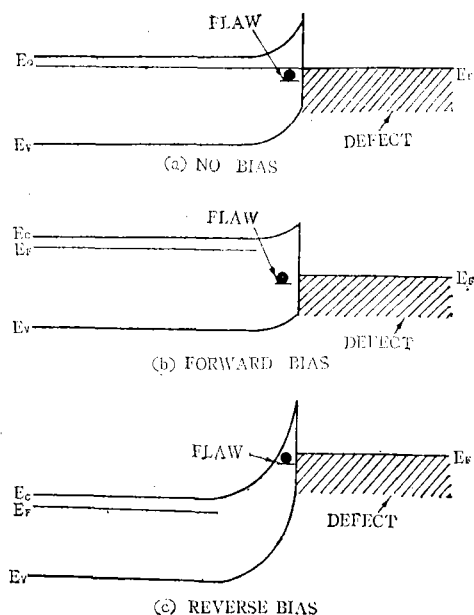


그림 15. 帶構造와 trap의 位置

Fig. 15. The band structure and position of the trap.

放出의 機構가 thermionic-field emission(TFE) 過程에 依함을 말한다. 즉 熱的으로 活性化된 電子가 結晶缺陷에서 tunneling에 의하여 捕獲中心에 잡히게 되면 平均時間 $\langle \tau_- \rangle$ 동안 그곳에 머물다가 다시 tunneling에 의하여 傳導帶로 올라가게 된다. 이 捕獲中心의 位置는 그림 15에 그려져 있다.

一般的으로 捕獲中心의 位置가 비교적 깊지 않을 때는, 그림 2에서도 알 수 있듯이 burst noise는 順方向 bias 때에도 나타나야 한다. 그러나 본

實驗에서는 順方向 bias 때는 전혀 burst noise가 관찰되지 않았다. 이는 trap의 位置가 空間電荷領域의 가장자리 근처에 있어서 逆方向 bias가 걸렸을 때는 空間電荷領域으로 들어가나 順方向 bias가 걸릴 때는 이 領域 밖에 있게 된다고 가정할 수도 있으나 本 實驗에서의 burst noise의 크기로 보아 그럴 가능성은 적고 오히려 그림 15b에서 알 수 있듯이 順方向 bias가 걸렸을 때는 trap의 quasi-Fermi準位가 trap準位보다 훨씬 높아져 이 trap은 언제나 電子에 의해서 채워져

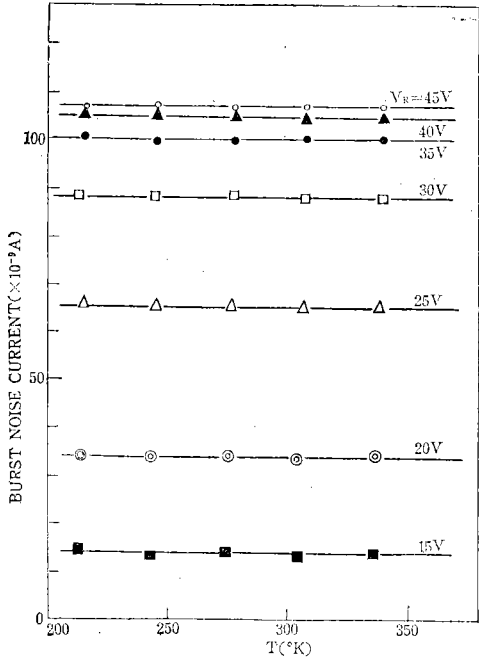


그림 16. 溫度에 對한 burst noise 電流
 Fig. 16. plot of the burst noise current as a function of temperature.

있는 것에 기인한다고 해석 된다.

한편 逆方向電壓 V_R 을 parameter 로 하여 溫度에 對한 I_{BN} 을 보면 이는 거의 溫度에 無關하게 나타난다(그림 16).

이는 I_{BN} 이 單一 carrier 에 의한 有效電位障壁의 變動에 依한다고 보면 結晶缺陷을 지나는 電流가 TFE 과정에 依한다고 假定할때 期待되는 結果이다.

그림 17은 293°k에서의 $\langle \tau_+ \rangle$ 및 $\langle \tau_- \rangle$ 의 逆方向電壓依存性を 나타낸 것이다. 여기서 낮은 逆方向電壓領域에서는 이들이 대체로 逆方向電壓에 指數函數的 依存性を 갖는다고 볼 수 있다.

IV. 結 論

burst noise 에 의하여 半導體에 있어서의 不純物中心과 같은 電子 trap 또는 再結合中心의 電子의 特性이 밝혀졌다. burst noise 는 p-n 接合의 空間電荷領域內 또는 表面에 存在하는 結晶缺陷을 지나는 電流가 이것에 가까이있는 電子 trap, 또는 再結合中心의 電子의 狀態에 따라 變動되는

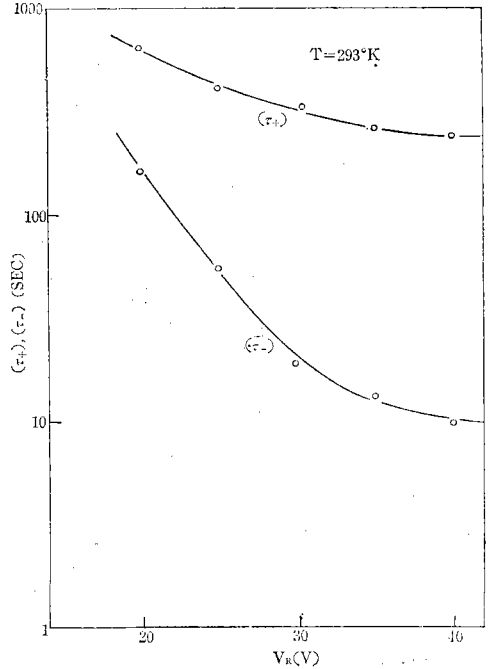


그림 17. 293°k에서 $\langle \tau_+ \rangle$ 및 $\langle \tau_- \rangle$ 의 逆方向電壓 依存性
 Fig. 17. The dependence of $\langle \tau_+ \rangle$ and $\langle \tau_- \rangle$ on the reverse bias voltage at 293°k.

때 그 原因이 있다. 即 이러한 捕獲中心이 電子를 잡으면, 缺陷을 지나는 電流는 감소하고 電子를 放出하면 電流는 增加한다. burst noise 의 電流振幅이 二安定特性을 나타낸은 이것이 單一 carrier 의 捕獲 또는 放出에 기인함을 強力히 시사해 준다. 때로는 burst noise 가 多安定特性을 나타낼 때도 있으나 이는 空間電荷領域에 carrier 捕獲中心이 두 개 이상 있을때 서로 獨立的으로 變動하거나 또는 이들이 相互作用을 일으키면서 變動하는 경우라고 해석된다.

捕獲中心에 電子가 잡혀 있는 時間 τ_- 및 電子가 비어 있는 時間 τ_+ 는 넓은 溫度範圍에 걸쳐서 좋은 指數函數的 依存性を 나타 내었으며 특히 약 230°k에서 τ 가 十數分에 이르는 경우에 대해서 까지도 잘 맞았다. 이 程度의 긴 τ 는 다른 研究者들에 依한 지금까지의 範圍를 約 10,000배나 擴大한 셈이 된다.

溫度에 對한 이들의 平均值 $\langle \tau_- \rangle$ 및 $\langle \tau_+ \rangle$ 에서 activation energy 및 quasi-Fermi 準位를 決定하여 各各 $E_C - E_t$ 는 0.660eV 및 $E_C - E_{Fn}$ 은

0.583eV를 얻었다. 그리고 $\langle\tau_+\rangle$ 및 $\langle\tau_-\rangle$ 의 逆方向電壓에 대한 依存性도 대체로 指數函數的이었다.

한편 本 實驗에서 使用한 點接觸型 Ge diode에 있어서의 結晶缺陷을 지나는 電流가 TFE 과정에 依함을 알 수 있었다.

參 考 文 獻

1. W. H. Card and P. K. Chaudhari, Proc. IEEE, 53, 652(1965).
2. D. Wolf and E. Holler, J. Appl. Phys., 38, 189(1967).
3. S. T. Hsu and R. J. Whittier, Solid-St. Electron., 12, 867 (1969).
4. W. H. Card and A. Mavretic, Physics of Failure in Electronics, 2, 268(1963).
5. G. Giralt, J. C. Martin and F. X. Mateu-Perze, C. R. Acad. Sci., 261, 5350 (1965); Electron. Lett., 2, 228 (1966).
6. J. F. Schenck, Proc. Sixth Annual Reliability of Physics Symp., p. 31 (1967).
7. J. C. Martin, D. Esteve and G. Blasquez, paper presented at the Conf. on Physical Aspects of Noise in Electronic Devices, Univ. of Nottingham, England (1968)
8. D. A. Bell, Electrical Noise, pp. 258-261, van Nostrand, New York (1960).
9. K. G. McKay, Phys. Rev., 94, 877 (1954).
10. D. J. Rose, Phys. Rev., 105, 413 (1957).
11. K. S. Champlin, J. Appl. Phys., 30, 1039 (1959).
12. R. J. McIntyre, J. Appl. Phys., 32, 983 (1961).
13. R. H. Haitz, J. Appl. Phys., 35, 1370 (1964).
14. W. I. Lee, B. K. Sohn and K. I. Lee, Proc. of the Seoul International Conf. on Electrical and Electronics Engineering, pp. 309-314 (1970).
15. M. Kikuchi, J. Phys. Soc. Japan, 15, 835; 1832 (1960).
16. K. B. Cook, Jr., and A. J. Brodersen, Solid-St. Electron., 14, 1237 (1971).
17. S. T. Hsu, R. J. Whittier and C. A. Mead, Solid-St. Electron., 13, 1055 (1970).
18. S. T. Hsu, Solid-St. Electron., 14, 487 (1971).
19. R. C. Jaeger, A. J. Brodersen, IEEE Trans. Electron Devices, ED-17, 128 (1970).
20. C. A. Mead, Solid-St. Electron., 9, 1023(1966).
21. W. I. Lee, B. K. Sohn, K. I. Lee and S. J. Kim, to be published.
22. E. L. Murphy and R. H. Good, Jr., Phys. Rev., 102, 1464 (1956).
23. F. A. Padovani and R. Stratton, Solid-St. Electron., 9, 695 (1966).