

## 論 文

# 마이크로파를 利用하여 半導体内的 Hall에 依한 移動度測定方法

正會員 許 英 男\*

## On the Method of Measuring the Mobility using the Microwave by the Hall Effect in the semiconductor

Yeong Nam HEO\*, *Regular Member*

**要 約** 半導体材料의 電氣의特性을 알기 위해서는 여러 方法이 있으나 그 중에서도 캐리어의 移動度測定이 重要하다. 移動度測定에는 몇 가지 方法이 있으나 가장 널리 쓰이는 것이 Hall效果에 依한 方法이다. 本論文에서는  $TE_{012}$  모우드로 動作하는 圓筒形空胴을 利用하여 반도체의 移動度を 測定하였다. 測定の 結果值, 測定回路의 構成, Cavity의 設計, 여러 問題點의 提起등으로 本研究에 關心이 있는 者에게 도움이 되고자 한다.

**ABSTRACT** The electric characteristics of semiconductor materials can be found by way of various methods, of which the measurement of the carrier mobility is thought to be of great importance. There exist some mobility measurements, but the measurement based on Hall effect is the most widely used. In this paper is adopted the mobility measurement of semiconductor by the use of cylindrical cavity operated in the same shape as  $TE_{012}$  modes. It is hoped that the resultant values of measurement, the structure of measurement circuit, cavity design and the raising of relevant problems may give much help to those who may interested in this field.

### 1. 序 論

現代電子産業은 材料部門의 發達에 따라 急速히 發展되고 있다. 材料加工技術의 發達は 電子回路를 極少化시켰고 이로부터 파생되는 效果는 豫想을 不許하고 있다. 材料의 加工技術分野뿐만 아니라 새로운 材料가 끊임없이 開發되고 있는데 새롭게 탄생된 材料의 電氣의特性을 알기 위하여 여러 가지 測定이 행해지고 있으며 그 중에서도 캐리어(carrier)의 移動度測定이 重要하다.

移動度測定에는 몇가지 方法이<sup>1)</sup> 있지만 가장 널리 쓰이는 것이 Hall效果에 依한 方法이다. 이 方法에 의한 測定에는 적어도 4個所의 接觸點이 必要한데 接觸點의 接觸狀態에 따라서 接觸抵抗이 달라질 수도 있으며 被測定試料의 狀態(龜裂과 같은 物理的狀態)에 따라 測定值에 差異가 생길 수 있기 때문에 測定誤差를 피하기 위하여 特別한 注意가 必要하다.

따라서 接觸點이 없어도 이러한 量을 測定할 方法이 研究되어 왔는데 最近 마이크로파를 使用한 無接觸點測定方法이 開發되었다. 이 方法은 在來의 直流方式에 比하여 몇 가지 利點이 있는데 첫째 接觸部의 接觸不良에 依한 誤差를 피할 수 있고 눈으로 識別할 수 없는 微細한 龜裂이나

\* 順天大學物理學科

Dept. of Suncheon National College, Suncheon, 540 Korea  
論文番號: 83-10 (接受 1983. 4. 13)

破損과 같은 缺陷에 對하여 影響을 받지 않는다는 것이다. 그러나 周圍溫度 또는 試料溫度變化와 空腔氣의 影響을 適切히 制御하는 方式이 아직 完全하지 못하므로 實用化되지 못하고 있다.

이 方式은 1948年 Cooke<sup>12)</sup>에 의한 마이크로파에 있어서의 Hall效果의 發見으로부터 비롯되었고, 1955年 Rau와 Caspari는 마이크로파 Faraday回轉을 利用하여 Ge의 導電度센서量을 구했는데 円筒形導波管内에 둔 試料에 마이크로파를 通過시켰을 때 波의 편파면의 回轉을 測定함으로써 구했던 것이다. Portis와 Teaney<sup>13)</sup>는 TE<sub>111</sub>狀態로 動作하는 円筒形空胴을 써서 CuSO<sub>4</sub> · 5H<sub>2</sub>O에서 Faraday回轉이 일어남을 알아냈다. Nishina와 Spray<sup>14)</sup>는 Portis와 Teaney의 空胴技術을 發展시켜 TE<sub>101</sub> 및 TE<sub>011</sub>모우드의 矩形空胴을 使用하여 30°K에서 300°K사이의 Ge移動도를 測定하였다. Ong과 Portis는 TE<sub>112</sub>모우드로 動作하는 円筒形空胴을 써서 10°K까지의 낮은 온도에서 低移動度試料의 移動도를 測定하였다.

本論文에서는 TE<sub>112</sub>모우드로 動作하는 円筒形空胴을 利用하여 半導체移動도를 測定하는 方式을 擇하였는데 測定回路의 構成, 空胴의 設計, 共振周波數의 確認, 必要한 諸資料의 測定 및 計算, 理論值와의 比較, 測定機器의 特性檢討, 나아가서 問題點의 提起를 主로 한 實驗의 結果를 보고하여 本研究에 關心을 가진 者에게 도움이 되고자 한다. 空胴内에서는 Bessel函數의 두 根이 서로 一致할 때는 degenerate모우드가 發生하는데 TM<sub>1,mn</sub>과 TE<sub>0,mn</sub>에서와 같이 두 degenerate모우드는 서로 直交이므로 에너지가 結合되어 있지 않아서 두 電界는 서로 無關하나 Hall效果에 의한 두 degenerate모우드는 한 偏波가 回轉때문에 90°成分으로 分解할 수 있음으로 해서 생긴 것으로 두 電界는 서로 密接한 關係가 있게 된다. 移動도는 E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>의 測定 및 이외의 必要한 諸定數를 測定하여 Watanabe<sup>15)</sup>에 의한 式을 써서 求했다.

## 2. 理論的解析

### (1) Hall效果

어떤 導體의 直流電流 I를 흘리면서 이 電流方向과 直角方向으로 直流磁界를 加하면 試料導體中的 移動電荷는 다음과 같은 힘을 받는다.

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

여기서  $I = q\mathbf{V}$ 이고  $q$ 는 移動電荷量,  $\mathbf{V}$ 는 그 電荷의 速度,  $\mathbf{B}$ 는 直流磁界이다. 試料가 N形인 半

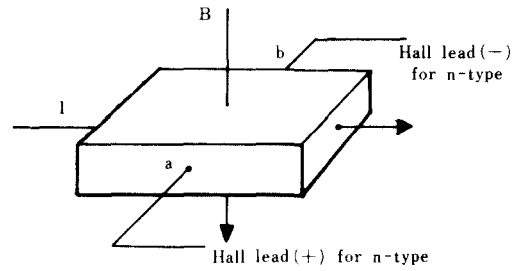


그림 1 홀效果 Hall effect.

導體이면 그림 1에서와 같이 多數캐리어인 電子는 b側으로 힘을 받아 밀리므로 b側에 負電荷를 發生시키고 P形인 半導체에서도 역시 式(1)의 힘에 의하여 多數캐리어인 正孔이 b側에 밀리므로 b側에 正電界를 發生시킨다.

이와 같은 Hall效果는 直流대신 高周波電界를 加하여 試料内에 交番電流를 誘導하여 흐르게 하여도 일어남이 發見되었고 그 Hall效果에 의하여 Faraday回轉이 일어난다.

### (2) Faraday回轉

그림 2에서와 같이 半導체試料(N-type 1×1×0.3mm)에 直流磁界 B를 加하고 E<sub>1</sub>方向으로 高周波電界를 加하면 試料内에서는 電界의 方向으로 誘導電流 I<sub>1</sub>가 흐르게 되며 이 電流의 原因이 되는 電子는 式(1)의 F에 의해 한 쪽으로 移動하게 되는 Hall效果가 일어난다.

Hall效果에 의한 電界 E<sub>2</sub>와 勵振電界 E<sub>1</sub>의 合成인 電界는 E가 되고 E<sub>1</sub>은 E의 方向으로 回轉된 結果가 된다. E<sub>2</sub>의 크기는 試料의 移動도의 크기에 따라 다르므로 E<sub>1</sub>과 E<sub>2</sub>를 測定함으로써

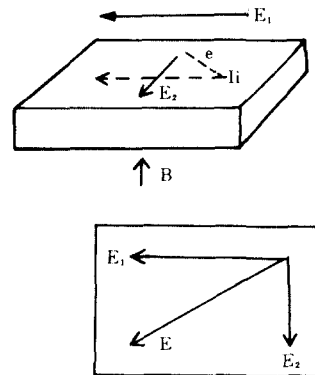


그림 2 홀效果에 의한 Faraday回轉 Faraday rotation by Hall effect.

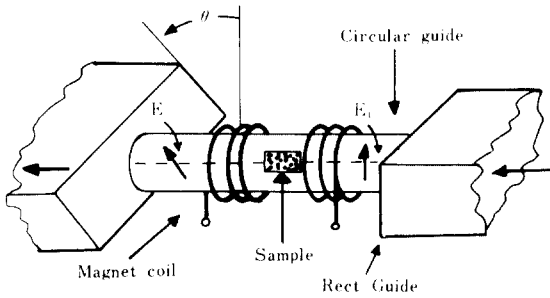


그림 3 Rau와 Caspari의 測定裝置  
Rau and Caspari's measuring equipment.

그 試料의 移動도를 求할 수 있고 計算에 依하여 導電度도 求할 수 있게 된다.

Rau와 Caspari는<sup>6)</sup> 그림 3과 같이 장치하여 Q값을 測定하고 Q와 移動도  $\mu$ 의 關係式을 求하여  $\mu$ 를 求했던 것이다.

그림에서 出口側導波管을 回轉시키지 않고 E를 다시  $E_1$ 과  $E_2$ 로 分解하여 測定할 수 있으면 같은 結果를 얻을 수 있을 것이다. 試料을 空胴共振器內의 電界位置에 두면 直流磁界를 加한 狀態에서는  $E_1$ 과  $E_2$ 의 degenerate모우드가 生기는 셈이고 이는 서로 結合되어 있다. 直流磁界를 加하지 않은 狀態에서는 Faraday回轉이 일어나지 않으므로  $E_2$ 가 發生하지 않을 것으로 期待되나 實際로는  $E_2$ 가 存在하게 된다. 이는 空胴의 構造가 幾何學的으로 完全하지 못하기 때문인데 다음 實驗에서와 같이 適當한 方法으로  $E_2$ 를 相殺시켜 直流磁界를 加하였을 때의 Faraday回轉에 依한  $E_2$ 만이 測定되게 하여 誤差를 줄일 수 있도록 한다.

(3) 円筒形空胴의 特性

그림 4와 같이 그 속에 試料가 들어 있을 때의 円筒形空胴의 S行列은 入射波의 크기를  $a_1$ ,  $a_2$ , 反射波의 크기를  $b_1$ ,  $b_2$ 라 할 때

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

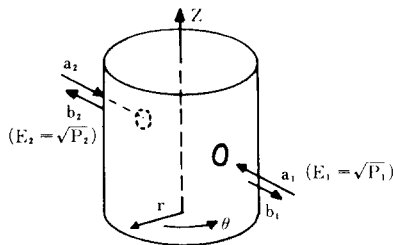


그림 4 円筒形空胴  
Cylindrical cavity.

로 定義되며 Watanabe<sup>5)</sup> 및 Sayed<sup>7)</sup>에 依하면

$$s_{11} = \frac{1/Q_{x1} - 1/Q_s - 1/Q_w}{1/Q_{x1} + 1/Q_s + 1/Q_w} \quad (3)$$

$$s_{12} = \frac{[-2|\sigma_1|/R_e(\sigma_0)]}{(1/Q_{x1} + 1/Q_s + 1/Q_w)} * \times \frac{1/Q_s(Q_{x1} \cdot Q_{x2})^{1/2}}{(1/Q_{x2} + 1/Q_s + 1/Q_w)} \quad (4)$$

$$s_{21} = s_{12} \quad (5)$$

$$s_{22} = \frac{1/Q_{x2} - 1/Q_s - 1/Q_w}{1/Q_{x2} + 1/Q_s + 1/Q_w} \quad (6)$$

여기서  $\mu B = |\sigma_1|/R_e(\sigma_0)$  (7)

$1/Q_{x1}$ ,  $1/Q_{x2} = \text{input 1 및 2에 서의 空胴모우드의 結合에 關連된 Q값}(Q_{x1}, Q_{x2})$

$$1/Q_s = [R_e(\sigma_0)/\omega \epsilon_0] \int_{V_s} |E_2|^2 dV \quad (8)$$

試料때문에 生기는 損失이 있을 때의 Q값( $Q_s$ )

$$1/Q_w = (1/2\omega) \int_A \delta |H_0|^2 dA \quad (9)$$

空胴벽면의 損失에 基因한 Q값( $Q_w$ )

$$\omega = \int_V |E_0|^2 dV$$

$$E_2 = E_1 / (1 + L(\epsilon - \epsilon_0))$$

空胴內의 試料內部的 電界

$E_0$ 은 試料가 들지 않은 空胴內의 電界

$H_0$ 은 空胴內의 磁界의 세기

$E_0$ 은 空胴內의 電界의 세기

$L$ 은 試料內의 depolarizing coefficient

$V$ 는 空胴의 體積

$A$ 는 空胴內部壁面積

$V_s$ 는 試料體積

$\sigma_1$ 은 試料의 導電度Tensor의 非對角線成分

$\sigma_0$ 은 試料의 導電度Tensor의 對角線成分

$\epsilon$ 은 試料의 誘電率

$\epsilon_0$ 은 自由空間의 誘電率

空胴에 試料가 없을 때와 있을 때의 Q값을  $Q_0$ ,  $Q_1$ 으로 定義하면

$$1/Q_0 = 1/Q_w + 1/Q_x \quad (\text{無負荷 Q값}) \quad (10)$$

$$1/Q_1 = 1/Q_w + 1/Q_x + 1/Q_s \quad (\text{負荷 Q값}) \quad (11)$$

$$\therefore Q_1/Q_0 = (1 + I_1)/(1 + I_0) \quad (12)$$

여기서  $I_0$  및  $I_1$ 은 無負荷 및 負荷時의 反射係數 즉  $s_{11}$ 값이다. 그러나 試料가 없을 때의 空胴은 疎結合狀態이므로 다음 條件이 적용된다.

$$1/Q_x < 1/Q_w \quad -1 \leq I_0 \leq 0 \quad (13)$$

또한

$$1/Q_x < 1/Q_w + 1/Q_s \quad -1 \leq I_1 \leq 0 \quad (14)$$

$I_0$  및  $I_1$ 을 絶對值로 나타내면

$$Q_1/Q_0 = (1 - I_1)/(1 - I_0) \quad (15)$$

여기서

$$I_1 \geq I_0 \quad 1 \geq I_0 \geq 0$$

狀態의 變化에 따른 正規化 Q값의 變化量은

$$\Delta Q/Q_0 = 1 - Q_1/Q_0 = (\Gamma_1 - \Gamma_0)/(1 - \Gamma_0) \quad (16)$$

(4) 超高周波 Hall移動도와 電力關係

式(5)는 定義에 依하면

$$S_{21} = (P_2/P_1)^{\dagger} = \frac{[2|\sigma_1|/R_e(\sigma_0)] \cdot (1/Q_{x1} + 1/Q_s + 1/Q_w)^{-\dagger} \cdot (1/Q_s(Q_{x1}Q_{x2})^{-\dagger})}{(1/Q_{x2} + 1/Q_s + 1/Q_w)} \quad (17)$$

여기서  $P_1$ 은 空胴에의 入射電力이고  $P_2$ 는 Hall效果에 依한 出口쪽으로 나오는 Hall電力이다. Hall移動도는 式(7)로부터

$$\mu = \frac{1}{B} \frac{(1/Q_s + 1/Q_w + 1/Q_{x1})(1/Q_s + 1/Q_w + 1/Q_{x2})}{(2/Q_s)(Q_{x1}Q_{x2})^{-\dagger}} \times \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\dagger} \quad (18)$$

위 式(18)을 測定하기 쉬운 反射係數로 고쳐 쓰면 편리하다.

$$\frac{1/Q_w + 1/Q_s + 1/Q_{x1}}{(Q_s Q_{x1})^{-\dagger}} = \left[ \frac{2(1 - \Gamma_{10})}{(1 - \Gamma_{11})(\Gamma_{11} - \Gamma_{10})} \right]^{\dagger} \quad (19)$$

여기서  $\Gamma_{10}, \Gamma_{20}$ 은 入力 1, 2의 無負荷反射係數이고  $\Gamma_{11}, \Gamma_{21}$ 은 入力 1, 2의 負荷反射係數이다. 이 式을 式(18)에 代入하면

$$\mu = \frac{1}{B} \frac{[(1 - \Gamma_{10})(1 - \Gamma_{20})]^{\dagger}}{[(1 - \Gamma_{11})(1 - \Gamma_{21})(\Gamma_{11} - \Gamma_{10})(\Gamma_{21} - \Gamma_{20})]^{\dagger}} \times \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\dagger} \quad (20)$$

入出力側에서의 結合이 同一할 때에는

$$\mu = \frac{1}{B} \frac{(1 - \Gamma_0)}{(1 - \Gamma_1)(\Gamma_1 - \Gamma_0)} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\dagger} \quad (21)$$

式(16)의 關係式을 利用하면 式(20)은

$$\mu = \frac{1}{B} \frac{1}{[(1 - Q_{11}/Q_{10})(1 - Q_{21}/Q_{20})(1 - \Gamma_{11})(1 - \Gamma_{21})]^{\dagger}} \times \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\dagger} \quad (22)$$

여기서  $Q_{11}, Q_{10}$ 은 入力側의 負荷 및 無負荷  $Q$ 값이고  $Q_{21}, Q_{20}$ 은 出力側의 負荷 및 無負荷側의  $Q$ 값이다. 式(22)에서 알 수 있는 바와 같이 直流磁束密度  $B$ , 入出力側負荷, 無負荷  $Q$ 값, 入出力側反射係數 및 入出力側電力을 測定하면 試料의 移動도를 求할 수 있다.

3. 實 驗

(1) 空胴(cavity)의 選定

円筒形空胴(cylindrical cavity)의 共振波長은  $TE_{lmn}$  또는  $TM_{lmn}$ 모우드로 動作시킬 때

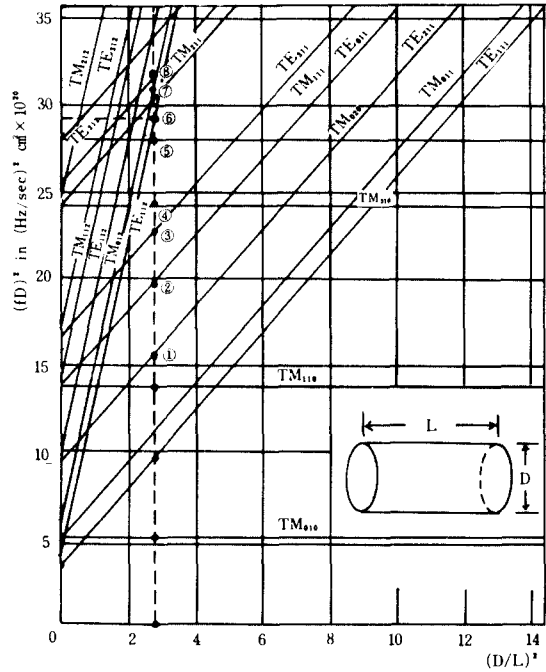


그림 5 円筒形空胴의 共振모우드 Resonant modes for cylindrical cavity.

$$\lambda = \frac{2}{\sqrt{(2x_{1m}/\pi D)^2 + (n/L)^2}} \quad (23)$$

여기서  $D$ 는 空胴의 直徑

$L$ 은 空胴의 높이

$\lambda$ 는 自由공간의 共振波長

$x_{1m}$ 은  $J'_m(x)$  ( $TE_{mode}$ ) 또는  $J_m(x)$  ( $TM_{mode}$ )의  $m$ 次根이다.

위 式을 周波數로 表現한 다른 式으로 고쳐 쓰면

$$(fD)^2 = \left(\frac{cx_m}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{cn}{2}\right)^2 \left(\frac{D}{L}\right)^2 \quad (24)$$

$(D/L)^2$ 을 橫軸으로,  $(fD)^2$ 을 縱軸으로 取하여  $x_{1m}$ 과  $n$ 을 따라 式(24)을 그래프로 나타내면 그림 5와 같다.  $D=49.403\text{mm}$ ,  $L=29.515\text{mm}$ 의 空胴을 取하면 그림 5의 그래프에 依하여 共振周波數는  $TE_{112}$  ( $m=1, n=1$ )모우드일 때 약 10.9 GHz가 되는데 實際測定한 結果 10.857GHz였다.<sup>(8)</sup> 空胴內의  $TE_{112}$ 모우드의 電磁界는 그림 6과 같다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 出口에서는 電界가 存在하지 않으므로  $E_2=0$  즉 出口  $P_2=0$ 이다. 試料가 있을 때 直流磁界를 加하면 그림 2와 같이 Faraday回轉이 일어나  $E_2$ 가 存在하게 되고 結局 移動度  $\mu$ 를 求할 수 있게 된다. Faraday回轉에 依한 電界變化를 測定하기에 가장

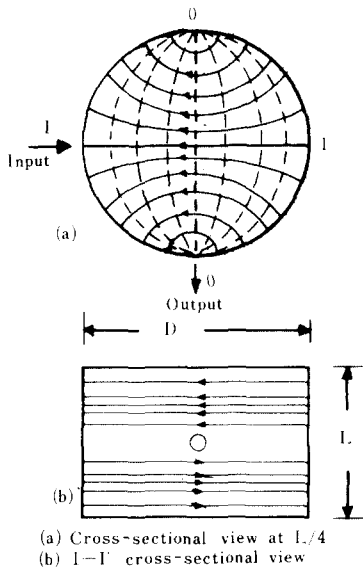


그림 6 TE<sub>112</sub> 모우드의 電磁界  
Field configuration in cylindrical cavity (TE<sub>112</sub> mode).

알맞기 때문에 TE<sub>112</sub> 모우드로 動作하는 円筒形 空胴을 擇했다.

(2) 円筒形空胴의 準備

그림 6에서 예상한 바와 같이 出口의 位置가 조금만 틀려도  $P_2=0$ 이 되지 않는다. 實際로 幾何學的으로 完全한 空間의 製作이 어렵기 때문에 그림 7과 같이 調節나사(tuning screw)를 設置하여 直流磁界를 加하지 아니했을 때  $P_2=0$ 가 되도록 調節한다. 内部의 임피던스를 調節할 수 있도록  $S_1, S_3, S_5$ 의 位置에는 黃銅나사를,  $S_2, S_4, S_6$ 의 位置에는 鉛筆芯으로 만든 나사를 끼워 리액턴스와 抵抗作用을 하게 했다. 각각을

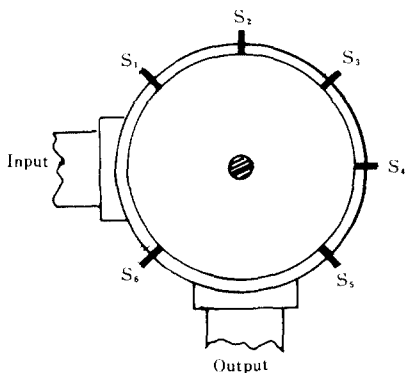


그림 7 調節나사의 位置  
Locations of tuning screws.

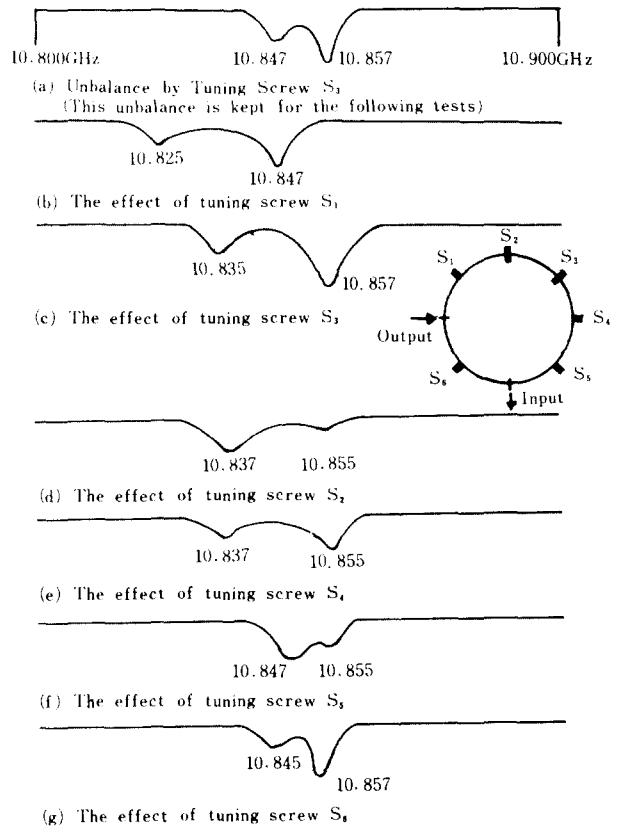


그림 8 調節나사의 影響  
The effects of tuning screws.

内部로 약 2.5mm程度 突出시켰을 때 共振周波數의 變動모양을 그림 8에 나타냈다.

試料를 最大電界位置에 둘 수 있도록 그림 9에서와 같이 앞面 中央에 구멍을 뚫어 테플론(TEFLON)나사를 끼웠고 이 나사를 돌려 上下位置를 조절할 수 있게 하였다. 内部에의 接近을 위하여 앞面을 뚜껑으로 하여 여섯 개의 나사로 고정할 수 있게 하였다.

(3) 測定

가. 回路構成 및 準備

그림 10과 같이 마이크로波브리지回로를 構成하고 스위커(sweeper: HP-8620C main frame)의 出力을 TWT(HP-415C)로써 增幅하여 波長計와 슬롯 라인(slotted line: HP-X, 810B)을 거쳐 空胴에 이르게 한다.

基準臂(reference arm)에 있는 減衰器를 最大로 해두고 信號源으로부터의 電力이 마이크로볼트미터에 나타나지 않도록 한다.

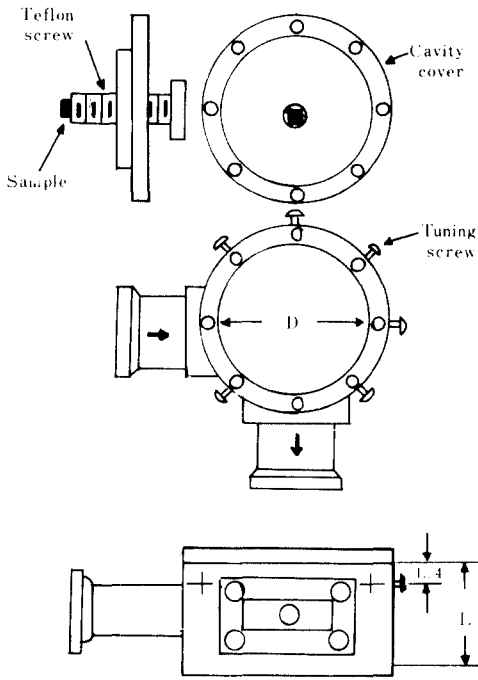


그림 9 空腔의 구조  
Cavity for the test.

나. 共振周波數

먼저 空腔이 設計대로 動作할 것인지를 確認하기 위하여 共振周波數를 調査하여 보았다. 스위치의 周波數帶域內에서 最低共振周波數로부터 그림 5에서 구한 값과 比較 測定한 값을 比較한 결과 豫想대로 共振되었으나 豫想值보다 약간 낮은 周波數에서 일어났다. 表 1은 그림 5의 豫想共振點①, ②...⑧의 計算共振周波數와 實測值와

표 1 豫想 및 實測共振周波數  
Predicted and observed resonant frequency.

| mode              | predicted | observed | coupling         |
|-------------------|-----------|----------|------------------|
| TE <sub>211</sub> | 7.838GHz  | not seen | not coupled      |
| TE <sub>011</sub> | 9.025     | not seen | not coupled      |
| TE <sub>111</sub> | 9.025     | 8.978    | weakly coupled   |
| TE <sub>311</sub> | 9.621     | not seen | not coupled      |
| TM <sub>210</sub> | 9.928     | 9.863    | strongly coupled |
| TM <sub>020</sub> | 10.670    | 10.630   | "                |
| TE <sub>112</sub> | 10.912    | 10.864   | "                |
| TM <sub>012</sub> | 11.313    | 11.284   | "                |
| TE <sub>212</sub> | 11.885    | 11.850   | weakly coupled   |

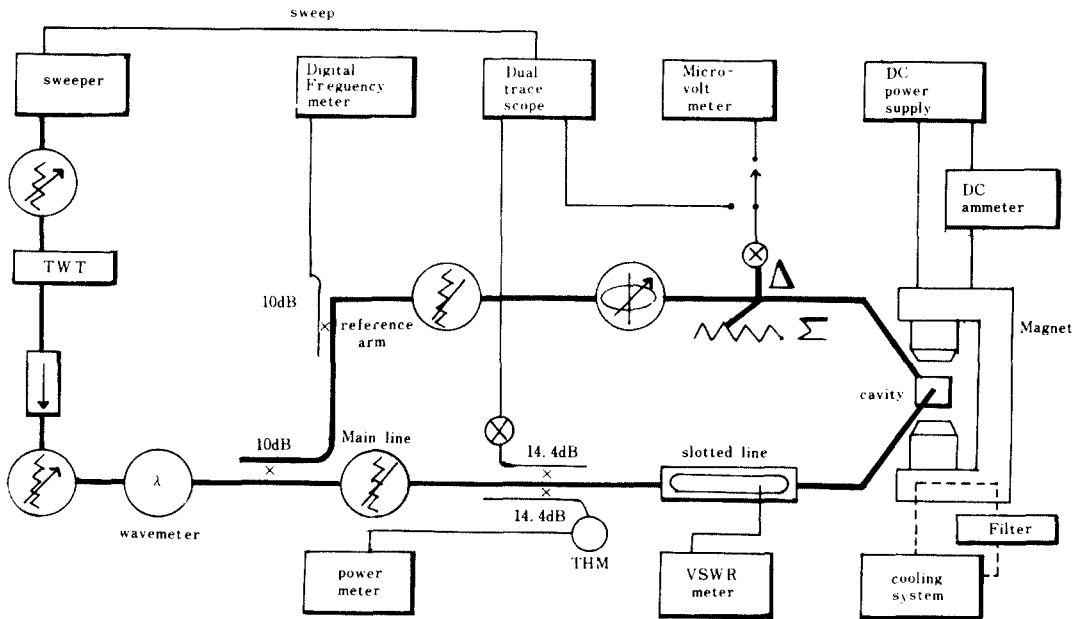


그림 10 測定回路의 構成  
Bridge circuit of microwave.

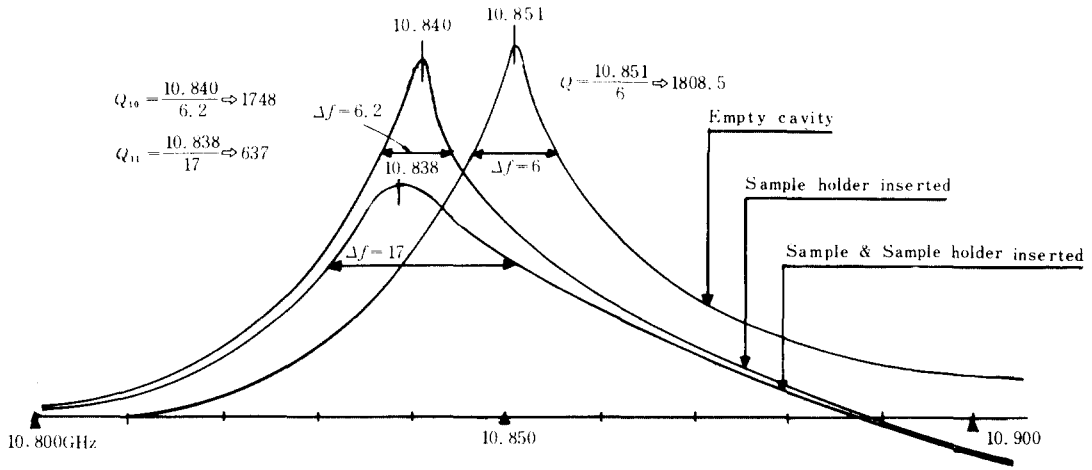


그림 13 여러 공진곡線  
Resonance curves for various.

여 零點을 갖았는데 과연 最低點을 갖았는지가 의문시된다. 세세로 試料가 들어가면 出力레벨이 뚝 떨어지면서 周波數가 變動하기 때문에(대개 減少) 共振周波數와 共振曲線을 갖는 것도 매우 어려우므로 共振周波數와 帶域幅의 測定에 誤差가 發生한다. 또 한 가지 重要한 誤差原因은 計測器誤差이다. 同一系統에 波長計와 디지털周波數計를 사용하면 單一周波數 CW動作일 때에도 약 15MHz의 差異가 있다. 이는 計器自體의 誤差때문이 아니라 다른 原因인 것 같다. 또한 方向性結合器의 結合度의 周波數에 따른 變動등도 誤差의 原因이 될 수 있다. 만일 磁性을 가진 物質이 空胴에 들어 있으면 Hall效果가 일어나 誤差를 誘發할 것이다. 스위처의 出力周波數는 10分程度의 간격으로 약 4MHz가 變動했는데 이것은 稼動하기 시작하여 充分한 時間이 지나서 安定될 時間이 지났는데도 그런 變動이 계속되었다.

#### 4. 結 論

半導体材料의 移動度測定에 있어서 直流Hall效果方法보다 마이크로波Hall效果方法이 몇 가지 點에서 유리하다. 그 중 重要한 것은 ① 直流方式으로는 모양의 크기에는 관계없다, ② 直流方式으로는 試料의 狀態, 接點의 狀態에 큰 誤差를 發生할 수 있으나 마이크로波方式으로는 内部龜裂과 같은 狀態에도 영향을 받지 않고 無接點方式이다.

本實驗에서 가장 重要한 것은 空胴의 設計와 利用인데 動作狀態를 調整나사로 調整할 수 있으나 特別한 注意가 必要하다. 스위처는 좀 더 安定하고 特性이 좋아야 되겠다. 結果值가 두 배 이상이나 差異가 있음은 本實驗裝置로써는 原理만을 確認하고 改善點을 研究할 뿐이지 專門의 일 測定을 할 수 없다고 본다. 스롯라인이나 밖에 없기 때문에 入力側을 測定하고 出力側을 測定하기 위해 空胴 등의 裝置를 옮겨 連結하는 作業은 많은 時間을 要하고 誤差를 誘發하는 原因도 되었다고 생각한다. 試料를 삽입하는 데 들은 나사가 磁極사이에 있기 때문에 이를 調整하려면 그 때마다 무거운 磁極을 移動시켜야 했고 移動中 작은 부주의로도 空胴이나 各種나사에 損傷을 주기가 쉬웠다. 따라서 現在로서는 本方式이 여러 가지 利點이 있지만 不利한 點이 더 많으므로 많은 改善點이 要求된다. 이를 改善하기 위해서는 ① 諸定數의 測定을 自動化해야 하겠다. Q의 測定을 오실로스코프상의 그래프로 求하지 않고 直接 값을 알 수 있는 方法<sup>9)</sup>과 反射係數의 直讀計器方式을 강구해야 겠으며 모든 測定值를 自動으로 遂行하는 方法을 研究해야 되겠다. ② 試料插入의 簡單化가 이루어져야 한다. 磁極의 構造物에 방해를 주지 않고 쉽게 넣고 빼낼 수 있는 方法이 考案되어야 한다. 試料를 最大電界位置에 두기 위해 데를론 나사를 插入하면 誘電體損失때문에 發熱하게 되고 溫度에 민감한 試料의 測定에는 많은 誤差를 가져올 수

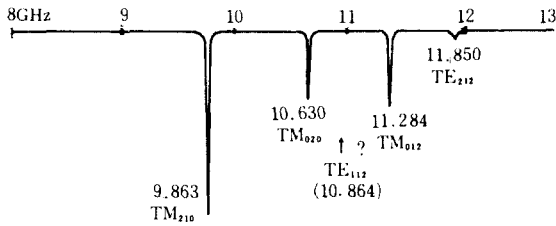


그림11 空胴出力側の 여러 모우드  
Relative magnitudes of modes  
coupled through cavity.

의 比較이고 그림11은 空胴出力側の 傳達波를 오실로스코프로 測定한 結果이다.

다. 諸定數測定

式(2)에서 알 수 있는 바와 같이 移動度  $\mu$ 의 計算에 必要한 定數는 直流磁束密度  $B$ , 反射係數  $\Gamma$ ,  $Q$ 값 入出力電力이다. 磁束密度는 그때그때 測定하기가 不便하므로 空胴이 充分히 드러 들 수 있는 一定한 間격으로 磁極을 固定해 놓고 磁束密度  $B$ 에 對한 勵磁電流  $I_f$ 의 關係를 구하여 圖表를 만들어 놓으면 勵磁電流  $I_f$ 를 나타내는 直流電流計로써 求할 수 있다(그림12).

磁氣履歷現象때문에  $I_f$ 의 增減時  $B$ 값이 약간 달랐다. 反射係數  $\Gamma$ 의 測定은 空胴入出力側に 스롯 라인을 連結하여 檢出한 VSWR로써 計算해 냈다.  $Q$ 값은 入出力側の 反射波와 出力側の 出力(傳送波)을 2 현상 오실로스코프로 測定하여 구한 共振그래프로써 計算해 냈다. 이때 조작해야 할 일은 우선 試料를 넣지 않고 試料를 固定하는 테플론 나사를 試料의 位置까지 삽입시키고 直流磁界를 加하지 않은 狀態에서  $Q_{10}, Q_{20}$ 을 測定하고 다시 테플론 나사를 빼내어 그 끝에 試料(두께 약0.3mm, 가로×세로 1mm×1mm인 N형 Ge)를 接着시켜 다시 삽입하되 最大電界位置인  $L/4$ 位置에 둔다. 磁極에 直流電流를 주어 試料

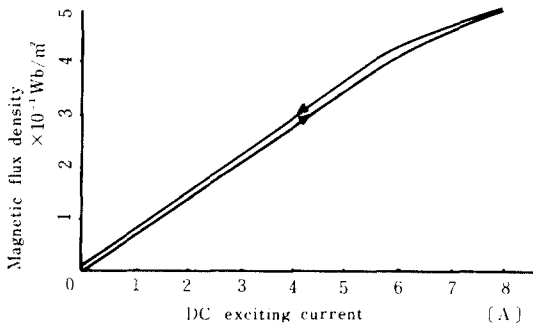


그림12 磁化特性  
Magnetizing characteristics.

에 Hall效果가 일어나게 하면 出力側に 電界가 檢出된다. 波長計로써 正確한 周波數를 確認한 다음 基準암에 있는 減衰器와 移相器로써 出力側の 檢出力指示가 0이 되도록 조절한 다음 波長計의 다이얼을 크게 돌려 波長計의  $Q$ 값이 오실로스코프의 그래프에 포함되지 않게 하고서 試料가 들어 있을 때의  $Q$ 값을 測定한다.  $E_2$ 는 지극히 微弱한 量이므로 마이크로볼트미터로도 測定하기가 힘들다. 그래서 增幅器를 거쳐  $E_2$ 의 有無를 確認한다. 基準암의 減衰器와 移相器의 調節은 오실로스코프상의 그래프와 이 增幅器의 出力이 最少가 될 때까지 한다. 이 狀態에서 스위프의 機能스위치(function switch)를 스퀘어 웨이브(square wave)쪽으로 돌려 놓고 스롯 라인의 클로우브를 움직여 VSWR미터로 反射係數  $\Gamma_{11}, \Gamma_{21}$ 을 求한다. 이와 같이 하여 얻은 曲線은 그림 13과 같고 이것으로 求한 諸定數는 다음과 같다.

$$B = 0.17 \text{ Wb/m}^2$$

$$Q_{11} = 637 \text{ (at } 10.838 \text{ GHz)}$$

$$Q_{21} = 660$$

$$Q_{10} = 1748 \text{ (at } 10.840 \text{ GHz)}$$

$$Q_{20} = 2108$$

$$\Gamma_{11} = 0.69$$

$$\Gamma_{21} = 0.74$$

$$P_2/P_1 = -41 \text{ dB} = 7.9432 \times 10^{-5}$$

이상의 測定值를 式(2)에 代入하면

$$\mu = \frac{1}{0.17} \frac{1}{\left[ \left(1 - \frac{637}{1748}\right) \left(1 - \frac{660}{2108}\right) (1 - 0.69) (1 - 0.74) \right]} \times (7.9432 \times 10^{-5})^{\dagger}$$

$$= 0.2788 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$$

$$= 2788 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$$

라. 誤差의 分析

이와 같이 하여 求한 값은 N형Ge의 公認移動度 약 3000cm<sup>2</sup>/V·sec와 比較해 볼 때 약간의 差異가 있었다. 그 誤差의 原因을 分析해 보면 첫째는 空胴이나 브리지回路를 平衡시키는데서 일어날 수 있다. 空胴의 調整은 機械的振動에 민감해서 空胴을 磁極사이에 삽입할 때 다치지 않도록 특히 주의해야 한다. 어떤 振動으로 인해 調整나사가 움직였다면 平衡이 흐트러져 이미 誤差가 포함된 狀態가 된다. 둘째의 原因으로는 브리지回路의 零點을 맞추는 作業이다. 移相器는 ±20°程度로 움직여야 指示가 最低點을 지났고 減衰器는 ±0.5dB程度로 움직여야 되었기 때문에 移相器와 減衰器를 차례로 변경하여 調整하



있기 때문이다, ③空胴内溫度制御方式의 研究가 必要하다. 半導體材料는 溫度에 따라 特性이 다르므로 溫度特性도 測定할 수 있어야 하기 때문이다, ④構成裝置의 簡單化가 이루어지야 되겠다. 여러 가지 計測器가 여러 個所에서 使用되므로 있기 때문에 많은 空間을 차지하고 복잡스럽다. 이와 같은 改善이 이루어지면 試料特性의 方向性도 쉽게 測定할 수 있으며 試料호용性 등을 통해 빛을 보낼 수 있게 되면 感光材料의 特性 研究도 本方式으로 可能해질 것으로 보인다.

参 考 文 献

(1) W. R. Runyan, "Semiconductors measurements and instrumentation," McGraw-Hill, pp. 131-151.  
 (2) S. P. Cooke, "Hall and kerr effects at microwave frequency," Phys. Rev 74, p. 701, Aug. 1948.

(3) A. M. Portis and D. Teaney, "Microwave Faraday rotation: design and analysis of a bimodal cavity," J of Applied Phys, vol. 29, no. 12, Dec. 1958.  
 (4) Y. Nishina and W. J. Spray, "Measurement of the Hall mobility in n-type germanium at 9121 megacycles," J of Appl Phys, vol. 29, p. 230, 1958.  
 (5) Naozo Watanabe, "Hall effect in N- and P-type germanium at 24 Ge," J of the Phys Society of Japan, vol. 16, no. 10, pp. 1979-1988, Oct. 1961.  
 (6) R. R. Rau and M. E. Caspari, "Faraday effect in germanium at room temperature," Phys Rev, vol. 100, no. 2, p. 632, Oct. 1953.  
 (7) M. M. Sayed and C. E. Westgate, "Microwave Hall measurement techniques on low mobility semiconductors and insulators, I analysis," Rev. Sci. Instrum, vol. 46 no. 8, p. 1074, Aug. 1975.  
 (8) J. A. Kong, "Theory of electromagnetic wave," John Wiley & Sons Inc, p. 175, 1975.  
 (9) N. D. J. Miller, "The automatic measurement of resonator Q factor," J of Phys. E (GB) vol. 11, no. 3, p. 185, Mar 1978.



許 英 男 (Yeong Nam Heo) 正會員  
 1943年 4月20日生  
 1967年 2月 : 釜山師範大學物理學科卒業  
 1978年 2月 : 釜山大學校教育大學院物理教育科卒業  
 1982年 2月 : 朝鮮大學校大學院電子工學科卒業  
 1973年 5月 ~ 1983年 2月 : 麗水水產專門大學通信科勤務  
 1983年 3月 ~ 現在 : 順天大學勤務