

半導體의 非可逆的 傳播特性

(Nonreciprocal Wave Propagation in Semiconductor)

陳 年 鋼*

(Chin, Youn Kang)

要 約

導波管內에 裝置한 靜磁化된 얇은 n형 Si의 두께와 높이가 非可逆的의 마이크로波傳播特性에 어떤 영향을 주는가를 室溫에서 實驗的으로 관찰하고 이를 定性的으로 解析했다.

Abstract

Effects of nonreciprocal microwave propagation upon the width and height of a thin slab of transversely magnetized N-Si loaded in a rectangular waveguide are observed experimentally at the room temperature and the experimental results have been analysed qualitatively.

1. 序 論

마이크로波分野에서는 Hogan¹⁾이 마이크로波用 Gyrator을 개발한 이후 ferrite를 사용한 非可逆性素子の 實用化를 기했고 最近에는 靜磁界에 의한 半導體의 非可逆性을 Hirota²⁾는 表面波(surface wave)의 理論에 의해서 解析했으며 Suzuki³⁾는 Isolator, Circulator, 可變電力分割器(variable power divider) 등의 試作物에 의해서 mm波나 準mm波(submillimeter)에 實用할 수 있는 可能性을 보여 주었다.

그러나 非可逆性의 最大條件은 Hall 電流가 變位電流와 거의 같은 條件과 Hall角이 1보다 훨씬 큰 경우이므로 Toda⁴⁾는 高純度の n형 InSb를 液化 nitrogen 溫度 (77°K)와 數 K Gauss 下에서 實驗하여 좋은 結果를 얻었다.

本 論文은 非可逆性에 重要한 영향을 주는 半導體의 두께와 높이에 대한 測定을 n형 Silicon에 對하여 室溫에서 實驗했으며 特히 Tada나 Suzuki의 경우에는 空隙 (air gap)의 絶緣을 利用하지 않고 半導體의 上端이 닿는 導波管上面部分을 除去한 slot 상태에서 非可逆性을 實驗했으나 本實驗은 半導體의 上端과 導波管上面間의 空隙에 의한 영향을 관찰했다.

2. TE 表面波의 理論

實驗의 檢討에 理論의 基礎가 되는 TE表面波(TE surface wave—modified TE wave)에 關하여 簡單히 소개한다. Hirota²⁾의 理論에 의하면 半導體內를 傳播하는 TE表面波는 損失項과 z 方向의 變化를 무시하면(그림 1 참조).

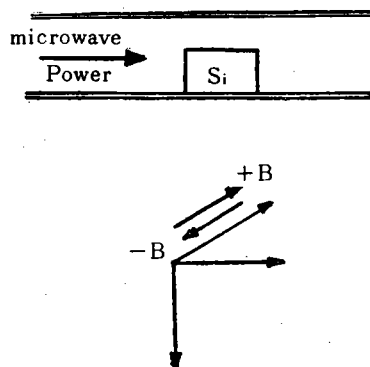


그림 1. 導波管內의 半導體 모양 (the sample in the waveguide and the direction of external magnetic field)

電界와 磁界의 分布는 다음과 같은 式으로 주워진 다.

$$E_x = 0 \quad (1)$$

$$E_y = Ak_x \exp(-\gamma_y y) \sin(\omega t - k_x x) \quad (2)$$

* 正會員, 韓國航空大學 電子工學科
Dept. of Electronic Engineering, Civil Aviation
College of Korea
接受日字: 1974年 9月 11日

$$H_z = A\omega\epsilon_1 \exp(-\gamma_y y) \sin(\omega t - k_x x) \quad (3)$$

이다.

여기서 $\omega^2 \mu_0 \epsilon_1 = k_x^2$, $\gamma_y = \mu_0 \sigma_x \omega / k_x =$

A: 常數, μ_0 : 透磁率, ϵ_1 : Si의 誘電率.

$$\sigma_x = \frac{ne^2 \tau^2}{m^2} \theta \quad (\text{導電率 tensor의 非對角線要素})$$

n: 電子密度, e: 電子의 電荷.

B: 外部에서 加하는 靜磁界.

TE表面波는 零 Impedance ($E_x/H_z=0$)를 가지므로 零 Impedance面만을 따라 傳播한다. 이러한 事實은 TE₁₀ mode의 位相速度가 TE表面波의 位相速度와 같다면 TE₁₀ mode와 結合할 수 있음을 암시한다. 즉 半導體 n형 Si를 傳播하는 TE表面波의 位相速度는 $\omega/k_x \approx (1/\mu_0 \epsilon_1)^{1/2}$ 로 주위지고 空隙의 位相速度도 S_i의 位相速度로 보면 空隙을 傳播하는 TE₁₀ mode의 電界와 磁界의 分布는 다음과 같다.

$$E_x = 0 \quad (4)$$

$$E_y = Ck_x \sin(\omega t - k_x x) \quad (5)$$

$$H_z = C\omega_x \sin(\omega t - k_x x) \quad (6)$$

이다. 여기서 C는 常數

n형 Si를 그림과 같이 導波管에 넣으면 TE表面波의 電磁界는 n형 Si와 空隙 (air gap)間的 境界面上 ($y=h_1$)에서는 TE₁₀의 電磁界와 같으므로 다음과 같은 關係式을 얻는다.

$$C = A \exp(-\gamma_y h_1)$$

여기서 γ_y 의 符號는 外部磁界 \vec{B} 와 電力 \vec{P} 가 흐르는 方向에 따라 定해진다. 즉 $\vec{P} \times \vec{B}$ 가 n형 Si의 試料 軸을 向하면 γ_y 는 正이 되므로 $A \gg C$ 가 되어 마이크로 波는 主로 半導體에 따라 傳播하고 \vec{B} 의 方向이 위와 反對가 되면 γ_y 는 負가 되므로 $A \ll C$ 가 되어 空隙間을 흐르게 된다. 그림 1과 같은 경우 \vec{P} 의 方向에 대한 γ_y 가 正인 \vec{B} 의 方向은 $-B$ 이고 $+B$ 인 경우는 γ_y 는 負가 된다.

3. 實驗 및 檢討

[1] 實驗

使用한 마이크로 波는 周波數가 9.255GHz인 TE₁₀ mode이며 實驗裝置의 構成圖는 그림 2-1과 같고 여기에 使用한 半導體는 內部의 크기가 10.15mm×22.8mm인 導波管 안에 그림 2-2처럼 導波管內의 下面中心線上에 一致케 하고 導波管 上面과는 약간의 空隙을 갖도록 配置한 半導體의 種類, 製造會社 및 特性은 다음과 같다.

(1) 種類: n型 Silicon

(2) 製造會社: Japan Electronic Metals Co. LTD., Tokyo, Japan

(3) 導電率: 17mho-m

(4) 移動度: 0.15m²/volt-sec

2개의 matching-slot를 使用했으나 定在波比는 1.3 밖에 얻지 못했고 入力는 10mW이다. 위의 實驗은 모두 室溫에서 했다. 그림 3과 그림 4는 一定한 높이 9.9mm와 一定한 길이 22.4mm를 갖는 얇은 n형 Si 조각의 두께의 變化에 대한 靜磁界에 의한 非可逆性的 圖表이고 그림 5는 一定한 두께 0.5mm와 길이 22.4mm를 갖는 얇은 n형 Si 조각의 높이 的 變化에 대한 靜磁界에 의한 非可逆性的 圖表이다.

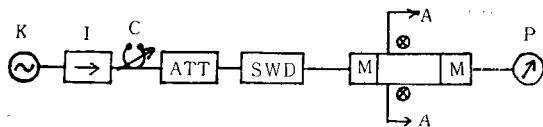
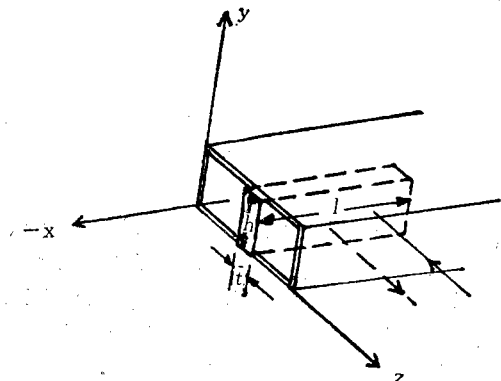


그림 2-1. 實驗裝置의 構成圖 (block diagram of the experiment)



<범례> K: Klystron M: Matching slot
I: Isolator SWD: 定在波測定器
ATT: 減衰器 P: 電力計
C: 空腔周波計 ⊗: 靜磁界發生裝置

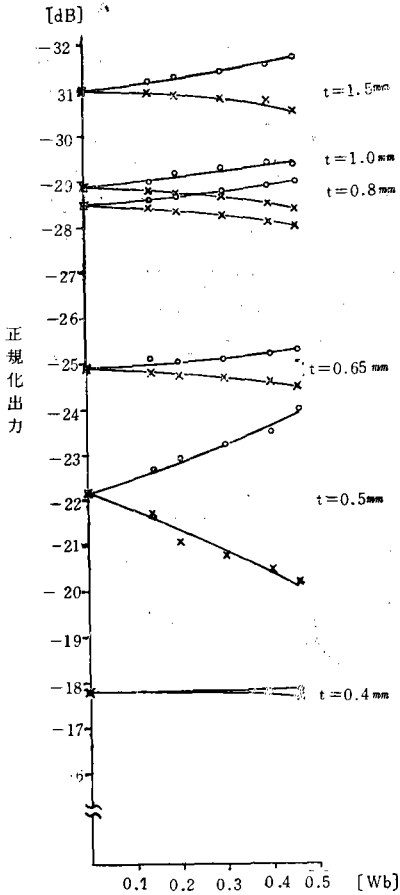
그림 2-2. 部分 A-A의 導波管 斷面圖 (sample in the waveguide)

[2] 檢討

靜磁界 B의 크기와 方向에 따라 나타내는 非可逆性은 一定한 크기에 對한 試料의 두께 t와 높이 h에 따라 크게 變한다. 試料의 두께 t가 대략 다음과 같은 條件을 만족할 때 가장 현저한 非可逆性을 나타낼 수 있다.⁵⁾

$$\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \approx (\sigma_x t)^{-1}$$

즉 單位길이에 대한 試料 Impedance인 $(\sigma_x t)^{-1}$ 가 自由空間의 Impedance $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 와 거의 같을 때 上式은 마이크로 波에 대한 Hall 電流의 效果가 最大



〈범례〉 ○; +B ×; -B

그림 3. 두께 (t)의 변화에 대한 靜磁界의 크기와 방향에 의한 出力의 변화圖 (thickness dependence of the transmission)

試料의 크기 : 9.9mm(높이) × 22.4mm(길이)

입을 意味하며 따라서 試料의 두께를 감소시키다는 것은 有效 carrier 密度를 감소시키거나 有效磁界強度를 增加시키는 것과 같은 效果를 나타낸다. 그러므로 上式의 條件을 만족할 때 가장 좋은 Isolator의 性質을 갖는 것이다. 또 一定한 두께에 대한 試料의 上端과 導波管内의 上面과 이루는 空隙에 관한 것을 관찰하면 다음과 같다.

導波管内의 上面과 試料上端간에 空隙이 생기지 않도록 管内의 上下兩面에 恰 당도록 試料를 넣고 外部에서 靜磁界를 加하면 靜磁界의 方向에 無關한 同一한 變化, 즉 同一한 可逆性을 나타내지만 試料를 管内의 上下兩面에 絶緣되도록 하고 靜磁界를 加하면 靜磁界의 크기와 方向에 無關한 一定한 出力만을 나타낸다. 이러한 實驗의 結果는 TE 表面電波의 存在를 立證해 준다. 그러나 導波管内의 上面이 Si와 空隙을 갖는 경우에는

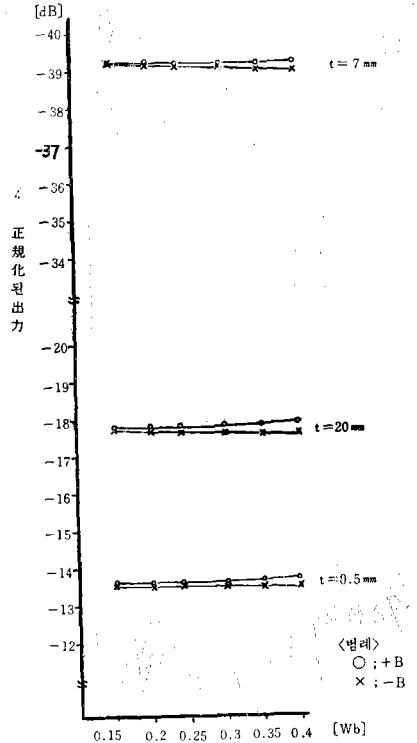


그림 4. 두께 (t)의 변화에 대한 靜磁界의 크기와 방향에 의한 出力의 변화圖 (thickness dependence of the transmission)
試料의 크기 : 9.15mm(높이) × 22.4mm(길이)

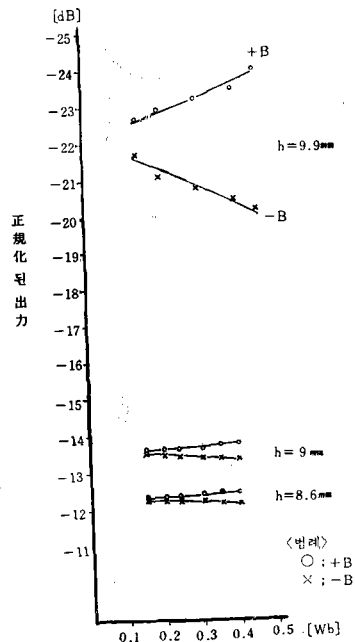


그림 5. 높이의 변화에 대한 靜磁界의 크기와 방향에 의한 出力의 변화圖 (height dependence of the transmission)
試料의 크기 : 0.5mm(두께) × 22.4mm(길이)

第 2項에서 說明한 바와 같이 靜磁界方向이 $-B$ 인 경우에만 Si에 TE 表面波가 흐르므로 電磁波의 電力傳送은 靜磁界의 크기에 따라 그림 3, 4, 5처럼 自然指數的으로 감소하지만 靜磁界方向이 $+B$ 인 경우에는 電磁波는 주로 導波管과 Si間의 空隙을 흐르므로 Si만이 靜磁界의 영향을 받아 위와는 反對로 電力傳送이 自然指數的으로 증가됨을 그림에 의해서 알 수 있다.

그림 5처럼 Si의 높이가 낮아짐에 따라 非可逆性이 줄어드는 것은 Hall 電流에 의해서 發生하는 空間電荷의 감소를 의미하는 것으로 解析한다.

4. 結 果

얇은 n형 Si조각의 두께와 높이에 대한 靜磁界에 의한 마이크로 波의 非可逆的 傳播特性的 圖表와 定性的 解析은 固體 plasma 研究에 參考資料가 될 것으로 믿는다.

參 考 文 獻

1. C.L. Hogan: "The ferromagnetic Faraday effect at microwave frequencies and its application." Bell Sys. Tech. J., Vol. 31, pp. 1-31, 1952.
2. R. Hirota: "Theory of a solid state plasma waveguide in a transverse magnetic field." J. Phys. Soc. Japan, Vol. 19, pp. 1130-1134, 1964
3. K. Suzuki: "Room temperature solid-state plasma nonreciprocal microwave devices." IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-16, No. 12, December 1969
4. M. Toda: "Propagation in a solid state plasma waveguide in a transverse magnetic field" J. Phys. Soc. Japan, Vol. 19, pp. 1126-1130, 1964
5. R. Hitota and K. Suzuki: "Field distribution in a magnetoplasma loaded waveguide at room temperature," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-18, No-4, April 1970