

저손실 자성체에서 정자표면파 전파특성

김명수, 한기평, 김약연, 이창화, 전동석, 이상석

한국전자통신연구소 부품기술개발부

대전시 유성구 가정동 161 번지

Tel)042-860-4828, Fax)042-860-5804, meyngsoo@etri.re.kr

Propagation Properties of Magnetostatic Surface Wave on Low Loss Magnetic Ferrites

Kim Meyngsoo, Han Geepyong, Kim Yarkyeon, Lee Changhwa, Dongsuk Jun, Lee Sangsuk

Component Technology Development Division, ETRI

161 Kajong-Dong, Yusong-Gu, Taejon

Tel)042-860-4828, Fax)042-860-5804, meyngsoo@etri.re.kr

요약

Telecommunication system demands for increased bandwidths and operating frequencies for analog signal processing could be satisfied in the near future by the emergence of a novel technology based on magnetostatic waves propagating in low loss ferrimagnetic films. The magnetostatic wave is the only available technology for analog signal processing directly at microwave frequencies.

1. 서론

주파수 자원의 활용 범위가 고주파 광대역 화되어 감에 따라 시스템의 신호처리부도 이러한 경향을 따르고 있다. 탄성표면파(Surface Acoustic Wave; SAW) 소자가 저삽입손실, 광대역 폭등의 뛰어난 특성에도 불구하고, lithography 시의 resist 최저 두께에 기인한 광 산란과 전자빔 산란에 의한 IDT(InterDigital Transducer)의 전극의 최저 넓이 제한으로 2GHz 이상의 주파수 영역에 사용되기 어렵다. 탄성표면파 소자 대신 정자파

를 이용하는 정자파 소자를 사용하면 주파수 혼합기의 사용없이 아날로그 신호를 직접 처리할 수 있다. 이러한 정자파 부품은 페리자성박막 주변에 특정방향으로 자기장을 형성하여 박막을 통해 정자파를 전파시키는 원리를 이용한다.

2. 전파이론

포화자화도($4\pi M_s$)를 지닌 자성체 페라이트에 외부에서 DC 자계(H_0)가 인가되면 재료의 투자율 텐서는 자화 공진주파수 $\omega_m = \gamma(4\pi M_s)$, 자화율(Geromagnetic ratio) $\gamma = 2.8 \times 10^6$ (Hz)/(Oe), 공진 각주파수 $\omega_0 = \gamma H_0$ 에 의해 식(1)과 같이 결정된다.

$$[\mu] = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

정자파 전파삽입손실에 영향을 미치는 손실계수(Damping term : α)는 $\alpha = \frac{\gamma \Delta H}{2}$ 와 같이 페라이트의 페리자성 공명 반치폭(ΔH) 변화에 의해 결정되고, 투자율 텐서의 각 성분은 식(2)와 같이 나

타난다.

$$\mu = \left\{ 1 + \frac{(\omega_0 + j\alpha)\omega_m}{(\omega_0 + j\alpha)^2 - \omega^2} \right\} \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{\omega_m\omega}{(\omega_0 + j\alpha)^2 - \omega^2}$$

$\vec{E}(t) = \text{Re}\{\vec{E}(\omega)e^{-i\omega t}\}$ 와 같이 정현신호로 변화하고 공간과 시간 의존적인 전자장의 형태가 $\exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t)$ 인 경우 소스가 없고 비전도성 매질에서 맥스웰 방정식은 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{k} \times \vec{H} &= -\omega \vec{E} \cdot \vec{E} \\ \vec{k} \times \vec{E} &= \omega \vec{\mu} \cdot \vec{H} \\ \vec{D} &= \vec{\epsilon} \cdot \vec{E} \\ \vec{B} &= \vec{\mu} \cdot \vec{H} \end{aligned} \quad (3)$$

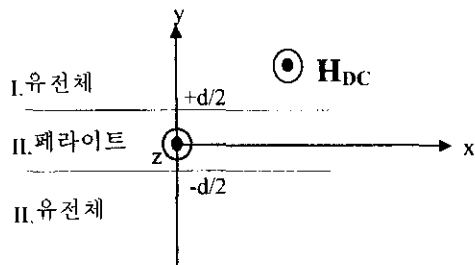
매질이 전기적 또는 자기적으로 비등방성인 경우

$$\begin{aligned} \vec{\epsilon} &= \epsilon_o(\vec{I} + \vec{\chi}_e) \\ \vec{\mu} &= \mu_o(\vec{I} + \vec{\chi}_m) \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)는 유전율 및 투자율 텐서를 각각 나타내며 $\vec{\mu}$ 가 3x3 행렬로 표현된다. 이때 \vec{I} 는 단위 행렬이다.

3. 정자표면파의 특성

인가 자계가 무한 평면에 있는 구조의 경우는 H 와 접성분이 연속이므로 $H_0 = H_{DC}$ 와 같이 반자계가 없다.



(그림 1) 페라이트 필름 평면에 평행한 방향으로 자화된 구조

다음은 $\vec{k} = k_y \hat{y}$ 일 경우 \vec{h} 는 식(5)을 만족하여

야 한다.

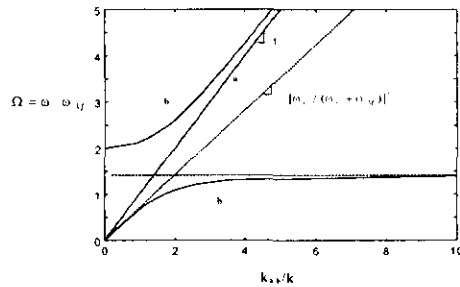
$$\begin{bmatrix} k_o^2(1+\chi) - k^2 & -ik_o^2\chi & 0 \\ +ik_o^2\chi & k_o^2(1+\chi) & 0 \\ 0 & 0 & k_o^2 - k^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

다음 분산 방정식을 얻는다.

$$k_o^2 = k_o^2 = \omega^2 \mu \epsilon \quad (6)$$

$$k_b^2 = k_o^2 \left[\frac{(\omega_o + \omega_M)^2 - \omega^2}{\omega_o(\omega_o + \omega_M) - \omega^2} \right]$$

상기의 분산 방정식은 (그림 2)과 같다. 이 그림에서 $[\omega_o / (\omega_o + \omega_M)]^{1/2}$ 와 $(\omega_o + \omega_M)$ 사이의 주파수에서는 k_b 는 허수가 되며, 따라서 이 모드에서는 전파하지 않는다. 또한 파수는 $k_M = \omega_M \sqrt{\mu_o \epsilon}$ 으로 정규화 되었으며, $\omega_o / \omega_M = 1$ 일 경우에 대해 계산된 그림이다.



(그림 2) 자화된 페라이트 내에서 인가된 자계에 수직으로 전파하는 평면파의 분산방정식

(그림 2)를 보면 $k = 0$ 일 경우의 극한값은 전파방향 모두에 대해서 $\omega = \omega_o + \omega_M$ 에서 발생한다. 반면에 $k \rightarrow \infty$ 일 경우의 극한값은 $\vec{k} \perp \vec{H}_o$ 일 경우 $\omega = [\omega_o(\omega_o + \omega_M)]^{1/2}$ 에서 발생한다. (그림 1)와 같은 구조에서 $\pm z$ 방향으로 유도된 파가 $\exp(i\vec{k} \cdot \vec{r})$ 에 비례하는 포텐셜을 가지고 각 영역에서의 포텐셜 함수는 아래 식(7)처럼 된다.

$$\begin{aligned} \psi_I(\vec{r}) &= C e^{-k_y y + i k_x x} \\ \psi_{II}(\vec{r}) &= \psi_o \cos(k_y y) e^{i k_x x} \\ \psi_{III}(\vec{r}) &= D e^{k_y y + i k_x x} \end{aligned} \quad (7)$$

페라이트 영역에서 맥스웰 방정식으로 부터 $(1+\chi)(k_x^2+k_y^2)=0$ 의 관계가 얻어지고 이 식의 해는 $1+\chi=0$ 이다. 이 조건은 오직 한 주파수에서만 만족된다. 또 다른 해는 $k_y^2=-k_x^2$ 이 된다. 만약 k_y 가 실수이면 k_x 는 허수여야 한다. 그러므로 ψ_{II} 는 가정된 것처럼 진동하지 않고 지수적으로 성장하거나 감쇠하여야 한다. 따라서 페라이트 영역에서 포텐셜은 식(8)과 같이 되고 $|k_y|=-k_x=k$ 가 되어 모두 k 로 나타내었다.

$$\psi_{II}(\vec{r}) = [\psi_{o+} e^{kx} + \psi_{o-} e^{-kx}] e^{i k y} \quad (8)$$

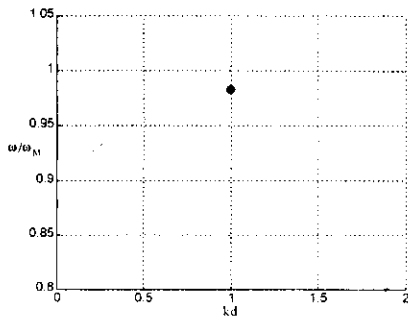
$y=\pm d/2$ 의 경계에서 h 의 접성분의 연속조건과 동일한 포텐셜의 연속과 b_y 는 연속인 경계조건에 의해 얻어진 4개의 식을 결합하면 식(9)의 행렬식이 얻어지며, 이 계수 행렬식의 의미있는 해 즉 분산관계는 식(10)와 같이 얻어진다. 여기서 v 의 의존성이 사라진다는 것이다. 따라서 전파의 방향을 바꾸더라도 분산특성은 변하지 않는다. k 와 χ 를 대입하면 식(11)이 구해지고 이 분산특성은 (그림 3)에 나타나 있다. 두 식에서 k 는 항상 양의 값을 가진다.

$$\begin{bmatrix} (\chi+2-v\kappa)e^{kd/2} & -(\chi+v\kappa)e^{-kd/2} \\ -(\chi-v\kappa)e^{-kd/2} & (\chi+2+v\kappa)e^{kd/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{o+} \\ \psi_{o-} \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

$$e^{-2kd} = \frac{(\chi+2)^2 - \kappa^2}{\chi^2 - \kappa^2} \quad (10)$$

$$\omega^2 = \omega_o(\omega_o + \omega_M) + \frac{\omega_M^2}{4} [1 - e^{-2kd}] \quad (11)$$

$$k = -\frac{1}{2d} \ln \left[1 + \frac{4}{\omega_M^2} [\omega_o(\omega_o + \omega_M) - \omega^2] \right] \quad (12)$$



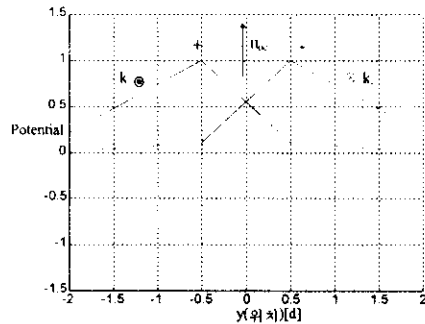
(그림 3) 표면파의 분산 ($\omega_o / \omega_M = 0.5$)

포텐셜함수가 필름의 두께에 대해서 주기적이지 않으므로 표면파는 여러 두께모드를 나타내지 않는다. 포텐셜은 식(13)와 같이 나타난다. 여기서 ψ_o 는 정규화에 의해 결정될 임의의 크기요소이다. $v=\pm 1$ 일 때 포텐셜함수가 (그림 4)에 보여져 있다. 분산관계가 v 에 무관하지만 모드의 필드는 그렇지 않다. 전파의 방향이 반대로 되면 모드의 에너지는 한 쪽 표면에서 다른 쪽 표면으로 바뀐다.

$$\psi_v(\vec{r}) = \begin{cases} \psi_o (e^{kd} + p(v)) e^{-ky + i k x}, & y > d/2 \\ \psi_o (e^{ky} + p(v)) e^{-i k x}, & |y| < d/2 \\ \psi_o (1 + p(v)) e^{ky} e^{i k x}, & y < -d/2 \end{cases} \quad (13)$$

$$p(v) = \frac{\psi_{o-}}{\psi_{o+}} = \frac{\chi - v\kappa}{\chi + 2 + v\kappa} e^{-kd} \quad (14)$$

$$p(v) = \frac{\chi + 2 - v\kappa}{\chi + v\kappa} e^{kd} \quad (15)$$

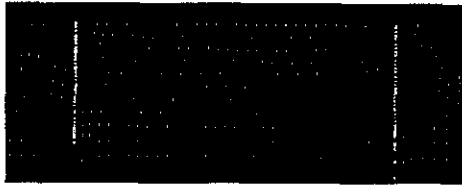


(그림 4) 분산곡선에 표시된 곳에서 $v=\pm 1$ 을 지닌 표면파의 포텐셜분포($\omega_o / \omega_M = 0.5$, $k_z d = 2$, $d = 20\mu\text{m}$)

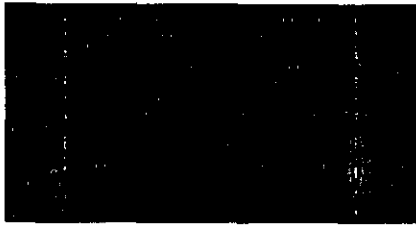
4. 3GHz 대 정자표면파 전파특성 시뮬레이션

자성체가 자화되면 투자율이 복소텐서양으로 되므로 유선체와 자성체가 포함된 복잡한 구조의 전자장 해석을 3차원 유한요소법으로 시뮬레이션을 하였다. (그림 5)는 자성체 상에 구현된 두개의 마이크로스트립선로를 나타내었으며 이 구조가 외부 차폐가 가해지지 않은 상태에서 입력

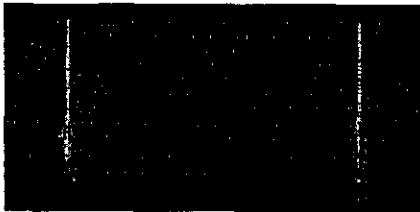
파가 입사되었을 때의 전개분포를 (그림 6)에 나타내었다. 외부바이어스 자계가 인가되지 않은 상태에서는 입력된 전자파가 모두 반사되는 것을 볼 수 있다. (그림 7)과 (그림 8)은 자성체가 외부자계에 의해 포화된 상태에서 입력파를 입사하였을 때의 전개전파 분포와 주파수 응답 특성을 보였다.



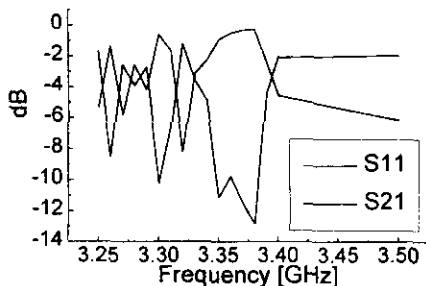
(그림 5) 자성체에 구현된 마이크로스트립선로



(그림 6) 비자화시 표면파의 전파특성(Ho=0)



(그림 7) 자화에 의한 표면파의 전파특성 (Ho=500, 4π Ms)



(그림 8) 자화시 표면파의 전파 주파수 응답 특성
5. 결론

본 논문은 정자표면파가 자화된 자성체 페라이트에서 전파되는 특성에 대하여 살펴보았다. 표면파는 하나의 전파 모드만 있고, 전파의 방향이 반대로 되면 모드의 에너지는 한 쪽 표면에서 다른 쪽 표면으로 바뀐다, 파의 크기는 필름의 두께에 걸쳐 주기적으로 분포되지 않고 필름의 표면으로 부터 지수적으로 감소하게 된다. 표면파의 발생 조건을 이용하여 표면파 전파특성을 3GHz 대에서 살펴보았으며 향후 다양한 소자에 응용 가능성이 있음을 보였다.

참고문헌

[1]M. R. Daniel, J. D. Adam, and T. W. O'Keeffe, "A Linearly Dispersive Magnetostatic Delay Line at X-Band", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. Mag-15. No. 6. pp. 1735-1737, 1979

[2]J. C. Sethares, "Magnetostatic Wave Devices and Applications", J. Appl. Phys. 53(3), March pp 2646-2651 1982

[3]Y. Okamura, A. Senoh, and S. Yamamoto, "Characteristics of Magneto-Static Surface Wave Propagating in Layered Ferrimagnetic Structure with a slightly Absorptive Superstrate", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 31, No. 6, pp. 3449-3451, Nov. 1995