H-형태 소형 개구를 가진 직사각형 도파관 탐침의 공진 투과

Resonant Transmission of a Rectangular Waveguide Probe
with H-type Small Aperture

고 지 환 · 조 영 기*

Ji-Hwan Ko · Young-Ki Cho*

요 약

근접장 마이크로파 현미경에 사용되는 도파관 탐침 구조에 대해 기존의 폭이 좁은 사각형 개구를 대신하여 H-형태 개구 구조를 제안하였고, 두 구조의 성능 평가지표로서 투과 효율과 스팟 크기를 비교 분석하였다. 비교 결과로 투과 효율은 비슷하였지만, 스팟 크기 면에서는 H-형태 개구 구조가 훨씬 작아서 해상도 측면에서 개선된 형태의 탐침 구조로 사용될 수 있음을 확인하였다. 이런 H-형태 개구의 이점을 이용하면 광 정보 저장, 나노 리소그래픽, 나노 현미경과 같은 근접장 광학 장치가 상당히 성능 개선될 것이다. 또한, 도파관 탐침에 공진기가 부착된 구조에서 투과 효율이 향상됨을 확인하였다.

Abstract

As a microwave near field probe for near field scanning optical microscope(NSOM) system, H-shaped(ridge type) small aperture is proposed and its performances from the viewpoints of the transmission efficiency(transmission cross section) and spatial confinement(beam spot size) are compared with those of the previous narrow rectangular aperture type. While the transmission efficiencies are comparable to each other for the two structures, the transmitted beam spot size for the proposed H-shaped aperture is much smaller than that for the previous rectangular aperture. This strong point of the H-shaped aperture is expected to significantly improve near-field optical applications such as optical data storage, nanolithography and nanomicroscopy. It is also observed that the transmission efficiency can be improved if the coupling aperture is implemented in the type of the transmission cavity.

Key words : Near-Field Microwave Microscope, Small Aperture, Ridged Aperture, Aperture Resonance

I. 서 론

도체 평판에 있는 소형 개구를 통한 전자파의 투과 문제는 오래 동안 연구의 대상이 되었다^{[1]~[4]}. 잘 알려진 바와 같이 처음으로 Bethe^[1]는 파장에 비하여 매우 작은 개구에 대해 전자파 투과 특성을 연구하

여 투과 효율에 대한 정량적인 수식을 유도하고, 투과 효율이 매우 낮다는 사실을 정량적으로 밝혔다.

이러한 매우 좁은 개구에서의 투과 효율을 개선시키기 위해서 Harrington^[5]은 투과 공진 조건이 만족되는 여러 가지 구조를 제안하였다. 제안된 구조는 소형 개구에 커패시터를 연결하거나, 커패시터

「이 연구는 2011학년도 금오공과대학교 교내학술연구비의 지원으로 연구되었음.」

금오공과대학교 전자공학부(School of Electronics Engineering, Kumoh National University of Technology)

*경북대학교 전자공학부(School of Electronics Engineering, Kyungpook National University)

· Manuscript received October 15, 2013 ; Revised November 11, 2013 ; Accepted November 20, 2013. (ID No. 20131015-093)

· Corresponding Author : Young-Ki Cho (e-mail : ykcho@ee.knu.ac.kr)

그림 1. 근접장 마이크로파 현미경 구성도

Fig. 1. Configuration of near-field microwave microscope.

특성을 갖는 구조로 변형함으로써 투과 공진(Transmission Resonance)을 만족시킬 수 있었다^{[6],[7]}. 여기에서 투과 공진이란 실체의 개구 면적이 작아도 불구하고, 개구 변형에 의해 전자파 투과량이 현저하게 증가되는 현상을 의미한다.

이와 같은 투과 공진 현상을 이용하여 파장에 비해 매우 작은 개구를 이용하여 만들어진 근접장 탐침(Near-field Probe)은 근접장 마이크로파 현미경, 나노 현미경, 나노 리소그래피(nano-lithography) 등에 활용되고 있다^{[2],[8]~[10]}. 여기서 근접장 마이크로파 현미경은 피측정 물체를 비파괴적으로 조사하여 이미지를 얻을 수 있으며, 간단한 구성은 그림 1과 같다^[9]. 그림에서 도파관 탐침을 통해 마이크로파가 방사되고, 피측정 물체에 의해 반사된 파를 분석하여 물체의 이미지와 속성을 얻는다. 여기서 높은 해상도를 얻기 위해서는 도파관 탐침에 매우 근접하게 피측정 물체가 있어야 하고, 파가 방사되는 도파관 탐침의 개구 크기가 매우 작아야 한다^{[8]~[10]}. 즉, 도파관 탐침의 근접 스폿 크기(spot size)와 개구의 투과 효율에 의해 현미경의 해상도가 결정됨을 의미한다.

본 논문에서는 근접장 마이크로파 현미경에서 주요한 도파관 탐침의 구조에 관하여 전자파의 투과 특성을 분석할 것이다. 기존에는 도파관 종단에 폭이 좁은 사각형 개구 구조를 사용해 왔는데, 이 구조의 성능 향상을 위해 H-형태 개구 구조로 대체하여 투과 효율과 스폿 모양 및 크기를 비교 고찰하고자 한다.

II. 근접장 도파관 탐침 구조의 전자파 해석

그림 2. 근접장 도파관 탐침 구조

Fig. 2. Near-field waveguide probe structure.

근접장 마이크로파 현미경에 사용되는 도파관 탐침은 그림 2에서 보는 것과 같이 도파관 종단에 소형 개구를 두어 파를 방사하고 피측정 물체에서 반사되는 파를 수신하는 역할을 한다. 앞서 언급한 바와 근접장 탐침은 소형 개구 형태로서 투과 효율이 높아야 하고, 개구의 근접 거리에서 스폿 크기가 매우 작아야만 피측정 물체의 해상도 높은 영상(image)을 얻을 수 있다.

기존의 탐침 구조로는 그림 2(a)와 같이 폭이 좁은 사각형 개구가 널리 사용되어 왔다. 이 구조는 개구의 길이 a_s 에 따라 공진 주파수가 결정되는데, 개구의 길이는 대략 반 파장에 해당되며, 개구에서 극히 근접한 거리에서의 스폿의 크기를 보면 원거리장 패턴과 달리 개구의 단면 모양과 유사하게 개구의 폭 방향(y 방향)으로는 작고, 길이 방향(x 방향)으로는 길게 나타나게 된다. 이러한 스폿 크기를 줄이기 위해서는 개구의 크기를 줄여야만 하는데, 본 논문에서는 그림 2(b)에서 보여준 바와 같이 H-형태 개구로 대체하여 투과 효율과 스폿 모양 및 크기를 기존의 사각형 개구 구조와 비교 분석하였다.

먼저, 그림 2의 탐침 구조에서 소형 개구를 통한 투과 효율을 알아보기 위해 도파관의 입력 포트에 대해 반사 계수를 계산하였다. 여기서 반사파가 거의 없으면 반사 계수를 데시벨로 표시하면 매우 크게 되고, 이때 투과 효율은 거의 100 % 되어 임

(a) 폭이 좁은 사각형 개구
(a) Narrow rectangular aperture

(b) H-형태 개구
(b) H-type aperture

그림 3. 도파관 탐침의 반사 계수 계산

Fig. 3. Calculated return loss of the waveguide probe.

사파가 전부 투과함을 의미하지만, 반대로 반사파가 크게 되면 투과 효율은 저하될 것이다.

계산에 사용된 도파관은 WR-90(폭: 22.86 mm, 높이: 10.16 mm)이고, 그림 2에서 보여준 폭이 좁은 사각형 개구인 구조와 H-형태 개구인 구조에 대해 개구의 크기에 따른 반사 계수를 계산하여 그림 3에 나타내었다. 이들 구조에 대해 반사 계수를 계산하

기 위해 도파관 종단에 두께가 $t_s=0.1$ mm인 도체 판으로 단락하고 중심 부분에 개구를 만들었는데, 폭이 좁은 사각형 개구 구조인 경우, 개구 폭을 $b_s=0.3$ mm로 두고, 개구 길이를 $a_s=12.5\sim15.5$ mm 범위에서 1 mm 간격씩 증가하면서 반사 계수를 계산하였다. 그리고 H-형태 개구 구조인 경우는 중간 허리의 폭을 $g=0.3$ mm, 팔의 폭을 $w=0.7$ mm로 고정하고, 개구 크기 a_1 와 b_1 의 길이를 5~6.5 mm 범위에서 0.5 mm 간격으로 증가하면서 반사 계수를 계산하였다. 계산에 사용된 S/W Tool은 Ansoft사의 HFSS를 사용하였다.

계산 결과로서 그림 3의 도파관 탐침의 반사 계수 특성과 표 1의 공진 주파수에서 반사 계수와 투과 효율을 보면 두 구조 모두 비슷한 경향을 보여주고 있으며, 예상되는 바와 같이 개구의 크기가 점차 커지면 공진 주파수는 낮아지는 모습을 볼 수 있다. 그림에서 10.5 GHz 이상의 높은 주파수 대에서는 비교적 양호한 투과 특성을 보이지만, 낮은 주파수대를 보면 반사 계수가 20 dB 이하로 투과 효율 면에서 약간씩 저하되는 모습을 볼 수 있다. 여기서 10.5 GHz 대 이하의 주파수대를 동작 주파수로 사용하기 위해서는 개구의 투과 효율을 좀 더 개선할 필요가 있을 것으로 여겨진다.

그림 2의 도파관 탐침 구조에서 투과 효율을 개선하기 위해서는 그림 4에서 보는 바와 같이 도파관 탐침에 공진기(cavity)를 추가하고, 결합 개구(coupling aperture)의 크기를 적절하게 조절하여 원하는 주파수에서 공진되게 완전하게 정합시키면 좀 더 우수한 투과 효율을 얻을 수 있을 것이다^{[10],[11]}.

이러한 공진기를 가진 도파관 탐침이 우수한 투과 효율을 갖는지 검증하기 위해서 앞서 그림 2의

표 1. 공진 주파수에서 도파관 탐침의 반사계수

Table 1. Reflection coefficient of the waveguide probe at the resonant frequency.

순번	사각형 개구 (반사계수/투과효율)	H-형태 개구 (반사계수/투과효율)
1	18.1 dB / 98.4 %	14.3 dB / 96.3 %
2	20.8 dB / 99.2 %	17.0 dB / 98.0 %
3	25.0 dB / 99.7 %	21.8 dB / 99.3 %
4	40.0 dB / 99.9 %	40.0 dB / 99.9 %

그림 4. 공진기를 가진 도파관 탐침 구조
Fig. 4. Waveguide probe structure with cavity.

(a) 폭이 좁은 사각형 개구
(a) Narrow rectangular aperture

(b) H-형태 개구
(b) H-type aperture

그림 5. 정합된 도파관 탐침의 반사 계수 계산
Fig. 5. Calculated return loss of the matched waveguide probe.

탐침 구조에 공진기를 추가하고, 공진이 되도록 결합 개구의 크기를 적절하게 조절하여 도파관 탐침 구조를 설계하였고, 이 도파관 탐침 구조에 대해 반사 계수를 계산하여 그림 5에 제시하였다.

계산에 사용된 도파관 탐침 구조는 그림 3의 공진기가 없는 두 가지 탐침에 대하여 사각형 개구는 $a_s=14.5$ mm, $b_s=0.3$ mm인 구조, 그리고 H-형태 개구는 $a_1=b_1=6$ mm인 구조에 대하여 공진기의 길이가 $t_c=17.5$ mm, 20.0 mm, 22.5 mm일 때 각각의 결합 개구의 크기를 조절하여 탐침을 설계하였다. 여기서 결합 개구의 도체 두께는 $t_a=1.27$ mm이다.

설계된 결합 개구의 크기를 보면 먼저 사각형 개구 탐침인 경우, 공진기 길이가 $t_c=17.5$ mm이면 $a_c=16.2$ mm, $b_c=2.0$ mm이고, $t_c=20.0$ mm이면 $a_c=17.2$ mm, $b_c=2.0$ mm이며 그리고 $t_c=22.5$ mm이면 $a_c=21.2$ mm, $b_c=2.0$ mm로 공진 주파수는 각각 9.82 GHz, 9.64 GHz, 9.2 GHz로 계산되었다. H-형태 개구 탐침인 경우도 비슷하게 공진기 길이가 $t_c=17.5$ mm이면 $a_c=16.4$ mm, $b_c=2.0$ mm이고, $t_c=20.0$ mm이면 $a_c=18.4$ mm, $b_c=2.0$ mm이며, 그리고 $t_c=22.5$ mm이면 $a_c=20.7$ mm, $b_c=1.0$ mm로 공진 주파수는 각각 9.86 GHz, 9.66 GHz, 9.26 GHz로 계산되었다.

그림 5에서 반사 계수의 주파수 응답 특성을 보면 대역폭 면에서 사각형 개구 탐침 구조가 약간 크지만 전체적인 성능은 대체로 비슷하였다. 이런 분석 결과로 알 수 있는 것은 동작 주파수가 주어지면 먼저 공진기의 길이로 주파수를 맞추고, 결합 개구의 크기를 조절하여 공진시키면 원하는 특성을 갖는 공진기를 용이하게 설계할 수 있다.

다음은 도파관 개구의 전면에 극히 근접하게 떨어진 거리에서 탐침의 해상도를 결정하는 근접장의 전계 세기 분포를 알아보려고 한다. 근접장의 전계 세기 분포는 개구 전면에서 거리 d 만큼 떨어진 지점에서 단면에 대해 전계 세기를 계산한 것으로 그림 6에서 전계 세기 분포를 보여 주고 있다. 계산에 사용된 주파수는 9.86 GHz로 H-형태 개구 탐침 구조는 그림 5에서 보여준 공진기 길이 $t_c=17.5$ mm에서 공진될 때 해당 주파수이며, 폭이 좁은 사각형 개구 탐침 구조는 주파수 9.86 GHz에서 공진되게 공진기 길이를 $t_c=17.3$ mm로 약간 줄이고, 결합 개구의 크기를

그림 6. 방사 개구로부터 근접 거리에서의 전계 세기 분포

Fig. 6. Electric field intensity distribution along the distance away from the radiating aperture.

$a_c=16$. mm, $b_c=2.0$ mm로 조절하였다. 계산 결과인 그림 6의 전계 세기 분포를 보면 거리 d 가 0.1 mm, 0.2 mm, 0.5 mm, 1 mm로 조금씩 증가될 때마다 전계 세기 분포를 색깔로 표시한 것으로 스팟 모양과 변화되는 모습을 볼 수 있다. 여기서 도파관에 입력되는 입사파의 총 전력은 1 W이다.

그림을 보면 거리 d 가 점점 증가할수록 스팟 크기가 커지는 모습을 볼 수 있는데, 거리 d 가 극히 작

그림 7. 그림 6 전계 세기 분포의 단면도

Fig. 7. Profile of the electric field intensity distribution of Fig. 6.

은 0.1 mm일 때 방사 개구 구조의 단면과 비슷한 모양을 보여 주고 있으며, 거리 d 가 증가하면 스팟이 점점 퍼져서 둥근 모습을 보여주고 있다. 또한, 각 스팟의 중심에서 거리 d 가 점점 증가할수록 전계 세기도 적어짐을 알 수 있다.

폭 좁은 사각형 개구 구조와 H-형태 개구 구조에 대해 동일하게 떨어진 거리에서 스팟 크기를 비교하여 보면 스팟의 높이 방향(y 방향)에서는 두 경우 비슷하지만, 스팟 길이 방향(x 방향)에서는 H-형태 개구 구조가 훨씬 작은데, 이는 H-형태 개구의 크기가 작기 때문이다. 이러한 전계 세기 분포에 대해 좀 더 자세히 알아보기 위해 거리 d 만큼 떨어진 지점에서 x 방향과 y 방향에 따른 전계 세기 분포의 단면도를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 보면 사각형 개구인 경우 x 방향은 정현파 형태이고, y 방향은 펄스 형태의 모습을 보여주고 있다. 이와 달리 H-형태 개구인 경우, x 방향과 y 방향 모두 펄스 형태를 보여주고 있으며, 스팟 크기도 작을 뿐만 아니라 스팟 중심에서 전계 세기도 약 1.5배 더 크게 나타내었다.

따라서 앞서 언급한 바와 같이 근접장 마이크로

파 현미경의 해상도 개선에서 주요한 요소는 탐침의 투과 효율과 스팟 크기인데, 앞서 분석한 두 탐침 구조를 비교하면 투과 효율 면에서는 비슷하지만, 스팟 크기 면에서는 H-형태 개구 구조가 훨씬 작음을 확인하였으며, 또한 개구로부터 근접 거리가 증가하여도 전계 에너지는 좁은 공간에 제한되어 빔의 형태가 퍼지지 않고, 모습 그대로 더 잘 보존됨을 확인할 수 있었고, 이는 영상 획득시 피측정 물체까지의 거리(개구로부터)의 변화에 대하여도 영상의 질이 열화되지 않음을 의미한다. 이러한 점을 고려하면 H-형태 개구 구조가 현미경의 해상도를 더욱 높일 수 있을 것으로 예상된다.

III. 결 론

근접장 마이크로파 현미경에 사용되는 도파관 탐침 구조에 대하여 전자파 특성을 분석하였다. 기존의 탐침 구조로는 폭이 좁은 사각형 개구를 주로 사용해 왔는데, 방사 개구의 인접장의 스팟 크기를 줄이기 위해 본 논문에서 H-형태 개구 구조를 제안하였고, 투과 효율과 스팟 크기를 비교 분석하였다. 두 도파관 탐침 구조의 성능 비교 결과로 투과 효율은 비슷하였지만, 스팟 크기 면에서는 H-형태 개구 구조가 훨씬 작음을 확인하였다. 또한, 도파관 탐침에 공진기를 부착하여 공진으로 투과 효율이 향상됨을 확인하였다.

이러한 연구 결과로서 H-형태 개구를 도파관 탐침에 적용하면 근접장 마이크로파 현미경의 해상도를 개선할 수 있을 것으로 예상되며, 또한 이런 H-형태 개구의 이점을 이용하면 광 정보 저장, 나노 리소 그래픽, 나노 현미경과 같은 근접장 광학 장치가 상당히 성능 개선될 것으로 기대되며, 소형 개구를 통한 전자파 투과 문제 연구에 활용될 것으로 사료된다.

References

[1] H. A. Bethe, "Theory of diffraction by small holes", *Phys. Rev.*, vol. 66, no. 7-8, pp. 163-182, Oct. 1944.
[2] E. X. Jin, X. Xu, "Finite-difference time-domain

studies on optical transmission through planar nano-apertures in a metal film", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 43, no. 1, pp. 407-417, 2004.

- [3] J. E. Park, J. I. Lee, J. W. Ko, and Y. K. Cho, "Physics in resonant transmission on the small aperture coupling", in *Proceedings ISAP'09*, pp. 887-890, 2009.
[4] J. E. Park, J. Yeo, J. W. Ko, and Y. K. Cho, "Resonant transmission of an electrically small aperture with ridge", *J. of Electromagnetic Waves and Appl.*, vol. 23, pp. 1981-1990, Nov. 2009.
[5] Roger. F. Harrington, "Resonant behavior of a small aperture backed by a conducting body", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 30, no. 2, pp. 205-212, Mar. 1982.
[6] 고지환, 조영기, 여준호, 이종익, "리지가 장하된 소형 원형 개구의 공진 투과에 관한 연구", 한국전자과학회논문지, 22(6), pp. 654-660, 2011년 6월.
[7] 고지환, 조영기, "C-형태와 H-형태의 소형 개구에 의한 공진 투과 및 C-형태 개구 간의 상호결합 효과", 한국전자과학회논문지, 22(12), pp. 1399-1405, 2012년 12월.
[8] E. A. Ash, G. Nicholls, "Super-resolution aperture scanning microwave microscope", *Nature*, vol. 237, pp. 510-512, 1972.
[9] Michael Golosovsky, Dan Davidov, "Novel millimeter-wave near-field resistivity microscope", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68. no. 11, pp. 1579-1581, Mar. 1996.
[10] S. -N. Hsieh, T. -H. Chu, and M. -T. Chen, "Scanning near-field microwave microscope using a rectangular waveguide probe with different resonant modes of cavity", *APMC*, 2011.
[11] Anan Copt, M. Golosovsky, Dan Davidov, and A. Frenkel, "Localized heating of biological media using a 1-W microwave near-field probe", *IEEE Trans. MTT*, vol. 52, no. 8, pp. 1957-1963, Aug. 2004.

고 지 환

1982년: 경북대학교 전자공학과 (공학사)

1985년: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)

1998년: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)

1985년~2000년: 한국전자통신연구원 연구원

원 연구원

2000년~현재: 금오공과대학교 전자공학부 교수

[주 관심분야] 안테나 설계, 초고주파 도파관 및 수동 부품 설계, 전자파 산란, 위성 통신

조 영 기

1978년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1981년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1998년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

2008년: 한국전자파학회 회장

1981년~현재: 경북대학교 IT대학 전자공학부 교수

[주 관심분야] 전자기 산란 및 복사, 주기 구조, 안테나 이론 등