

# 소형 이극안테나를 이용한 전계강도 프로브의 설계 및 제작

(Design and Fabrication of an Electric - Field Probe  
Using Short Dipole Antennas)

김 혁 제\* · 박 동 철\*\* · 이 애 경\*\*\* · 심 환 우\*\*\*

(Hyuk-Je Kim\* · Dong-Chul Park\*\* · Ae-Kyoung Lee\*\*\* · Whan-Woo Sim\*\*\*)

## 요 약

전자기장을 정량화하기 위해 사용되는 등방성 전계강도 프로브가 제작되었다. 제작된 프로브는 길이가 짧은 이극안테나, 범리드 쇼트키 다이오드 및 고저항 전송선으로 구성되며 등방성 특성을 얻기 위해 3개의 이극안테나를 서로 직각 배열하였다. 길이가 짧은 이극안테나를 사용함으로써 300MHz에서 2GHz 주파수 대역에서 주파수 특성이  $\pm 2.9\text{dB}$  이내로 일정하며, 3개의 안테나를 직각 배열함으로써 등방성 오차가 프로브축을 중심으로  $360^\circ$  회전시에  $\pm 1.2\text{dB}$  이내임을 확인하였다.

## Abstract

An isotropic electric-field probe, capable of characterizing and quantifying electromagnetic field, was fabricated. The probe consists of three short dipole antennas, a beam-lead Schottky diode and the high resistive transmission line. In order to get the isotropic response three mutually orthogonal dipoles are configured to form the probe. The probe's short dipole elements allow measurements of electric fields from 300MHz to 2GHz with a flatness of  $\pm 2.9\text{dB}$ . The mutually orthogonal dipole configuration shows a  $\pm 1.2\text{dB}$  deviation in the isotropic response with respect to angle.

## I. 서 론

전자기장의 이용주파수대가 계속 높아짐에 따라  
높은 주파수대의 표준전자기장을 발생시키고 측정

하기 위한 향상된 장비와 기술이 요구되고 있다.  
GTEM 셀, 전자파무반사실, 야외시험장등이 표준  
전자기장 조성을 위해서 사용되고 있다. 또한 전자  
파가 인체에 미치는 영향등에 대한 관심이 증가됨에

\* 충남대학교 전자공학과(Dept. of Electronics Eng., Chungnam Nat'l Univ.)

\*\* 충남대학교 전파공학과(Dept. of Radio Sciences & Eng., Chungnam Nat'l Univ.)

\*\*\* 한국전자통신연구소 전파기술부(Radio Technology Dept., Electronics and Telecommunications Research Institute)

따라 각종 전자장비로부터 발생하는 EMI에 대한 측정 기술이 필요하게 되었다. 그래서 표준전자기장 및 EMI 측정을 위해 더 높은 주파수대에서 더 넓은 대역폭을 가진 더 작은 크기에 전계강도 프로브의 개발이 이어지고 있다.[1, 2, 3, 4, 5, 6]

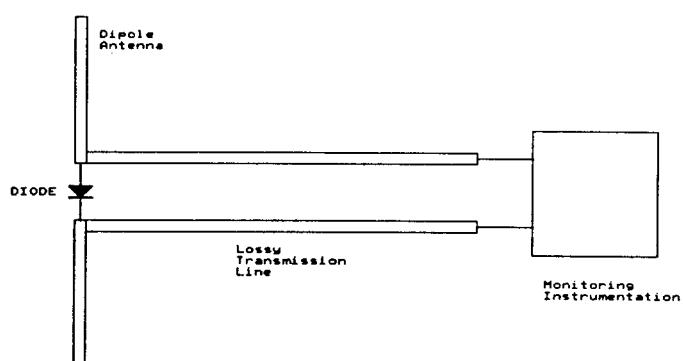
전계강도 프로브는 측정하려는 전자기장을 감지하는 안테나와 검출기 및 검출된 신호를 지시계기로 연결시켜주는 전송선으로 구성된다. 더 높은 주파수대에서 동작시키고 피측정전자파를 간섭하지 않기 위해서 주파수에 영향을 덜 받는 길이가 짧은 이극안테나(dipole antenna) 또는 테이퍼된 저항성분이 있는 이극안테나 등을 사용하고 있으며 검출기로는 다이오드 및 써미스터(thermistor)등을 사용하고 있다. 검출된 신호를 지시계기로 연결시키는 전송선은 제 2의 안테나 역할을 할 수 있다. 즉 입사파를 받아들일 수도 있고 신호를

전송하는 중에 방사할 수도 있다. 이런 영향을 줄이기 위해서 고저항 전송선 또는 광 케이블 등이 사용되고 있다.

본 논문에서는 길이가 짧은 이극안테나, 빌리드 쇼트키 다이오드 및 고저항 전송선을 사용한 전계강도 프로브에 대해 고찰하고 30MHz에서 2GHz 주파수 대역에서 동작하는 전계강도 프로브를 제작하여 그 특성을 평가해 보았다.

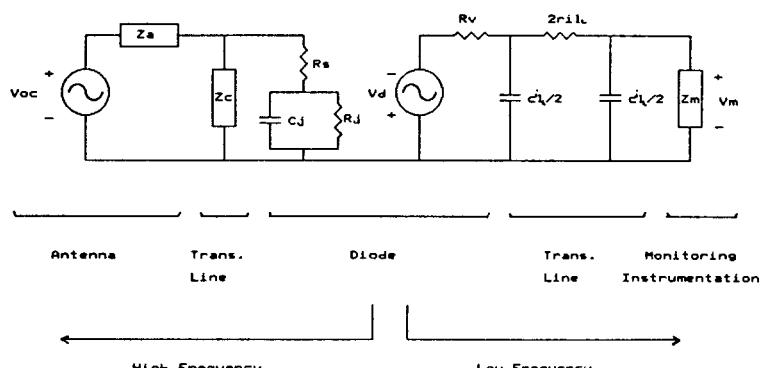
## II. 이론 및 설계

[그림 1]은 고려된 전계강도 프로브의 구조이며 [그림 2]는 고려된 전계강도 프로브의 등가회로 모델이다.



[그림 1] 전계강도 프로브 구조

[Fig. 1] Configuration of the Electric-Field Probe



[그림 2] 전계강도 프로브 등가회로 모델

[Fig. 2] Equivalent Circuit Model for the Electric-Field Probe

## 1. 길이가 짧은 이극안테나

이극안테나(dipole antenna)는 전류분포, 안테나 임피던스, 방사패턴등 그 특성이 주파수에 대해 민감하다. 그러나 동작주파수대의 파장보다 길이가 짧은 이극안테나는 그 특성이 비교적 주파수에 덜 민감하다. 이극안테나의 한쪽길이가  $h$ 이고 전파상수가  $\beta_A$  일때 길이가 짧은 이극안테나의 조건은 다음 식과 같다.[7]

$$|\beta_A h| \ll 1 \quad (1)$$

최대 동작주파수가 2GHz일 경우  $h=7\text{mm}$ 로 선택하면 식(1)이 만족됨을 알 수 있다. 이극안테나를 평면스트립형태로 제작하였는데 스트립 폭  $W_A$ 는 1mm로 선택하였다. 한편 길이가 짧은 이극안테나는 안테나 임피던스가 크기때문에 감지한 입사파를 재 방사하는 양이 적어져 피측정 전자장을 교란시키는 양이 적어진다. 길이가 짧은 이극안테나의 임피던스는 이극안테나 한쪽 길이가  $h$ , 폭이  $W_A$  일때 다음과 같은식으로 표현할 수 있다.

$$Z_A = \frac{-j}{\omega C_A} \quad (2)$$

$$C_A = \frac{h}{3 \times 10^8 \times 120 \times [\ln(\frac{4h}{W_A}) - 1]} \quad (3)$$

이극안테나는 입사파에 대해 안테나 길이방향 성분만 감지해 내는 특성이 있고, 측정하려는 입사파의 편파상태를 일반적으로 모르기 때문에 어느 방향으로 프로브를 놓아도 일정한 감도를 나타내는 등방성 프로브가 필요하다. 입사파가 다음과 같다고 하자.

$$\vec{E} = E_x \vec{a}_x + E_y \vec{a}_y + E_z \vec{a}_z$$

서로 직각으로 배열된 3개의 안테나 중심에서 입사파를 다시 쓰면

$$E = (V_x a_x + V_y a_y + V_z a_z) / K \quad (4)$$

소형 이극안테나를 이용한 전계강도 프로브의 설계 및 제작

이고, 여기서  $K$ 는 비례상수이다.

검출기에서  $x, y, z$  각각 성분들을 자승법칙으로 검출하고 더해준다면 측정되는 전압  $V_{dc}$ 는

$$V_{dc} = C [ |V_x|^2 + |V_y|^2 + |V_z|^2 ] \\ = C |K|^2 [ |E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2 ] = C |K|^2 |\vec{E}|^2 \quad (5)$$

이고, 여기서  $C$ 는 상수이다. 그러므로 서로 직각으로 배열된 3개의 이극안테나를 사용하여 프로브를 만들면 이 프로브는 입사파의 방향에 무관하게 입사파 크기의 제곱에 비례하는 일정한 감도를 갖게 된다. 실제 3개의 이극안테나를 서로 직각으로 배열하기 위해서 정삼각기둥에 길이방향과  $54.7^\circ$  씩 각을 이루어 상호 직각인 안테나들을 제작하였다.

## 2. 다이오드

검출다이오드를 안테나 금전 양단에 입사파 진폭 크기의 제곱에 비례하는 DC성분을 검출한다. [그림 2]의 등가회로에서  $R_s$ 는 패키지된 다이오드의 접촉저항, 기판저항, 분포저항들 때문에 생기는 직렬저항이고,  $R_j$ 는 접합저항,  $C_j$ 는 접합용량이다.  $V_d$ 는 다이오드 양단간의 전압이며  $R_v$ 는  $R_s$ 와  $R_j$ 의 합이다. 다이오드에서 소비된 전력  $P_d$ 는 다이오드 양단간 전압과 다음관계가 있다.

$$V_d = \beta_v P_d \quad (6)$$

여기서  $\beta_v$ 는 다이오드 전압감도이며 다음식으로 표현된다.[10]

$$\beta_v = \frac{0.0005}{(I_s + I_o)(1 + \frac{R_j}{R_L})[1 + (\omega C_j)^2 R_s R_j]} [\text{mV}/\mu\text{W}] \quad (7)$$

[그림 2]에서 살펴볼 수 있듯이 다이오드 양단간의 임피던스가 커야만 안테나에서 감지된 신호를 검출할 수 있어, 큰 접합저항과 작은 접합용량을 갖는 다이오드를 선택하였다. 범리드 다이오드는 평면형

이극안테나 위에 선연결없이 쉽게 제작할 수 있으므로 휴렛팩커드사의 HSCH-5330 빔리드 쇼트키 다이오드를 본 연구의 전계강도 프로브의 검출기로 사용하였다.

### 3. 전송선

이극안테나와 다이오드에서 얻은 신호를 지시계기로 연결시키는데 전송선이 이용된다. 이상적인 경우에 이 전송선은 입사파를 받아들여 입사파의 전류를 유기해도 안되며 다이오드에서 검출된 신호를 지시계기로 전송하는 과정에서 방사(radiation)로 인해 입사파를 간섭해서도 안된다. 또한 신호 검출(detection) 과정에서 지역통과 필터(low pass filter) 역할도 해야 한다. 단위 길이당 높은 저항을 가지는 전송선이 위의 조건들을 만족한다고 볼 수 있다.

전송선의 단위길이당 저항이  $r^i$ 이고 단위길이당 커페시턴스  $C^i$ 일 때, 고저항 전송선인 경우 단위길이당 직렬임피던스  $z_L$ 과 단위길이당 병렬어드미턴스  $y_L$ 은

$$z_L \approx 2r^i, y_L \approx j\omega C^i \quad (8)$$

가 되고 복소파수  $k_L$ 과 특성임피던스  $Z_c$ 는

$$k_L \approx \sqrt{-z_L y_L} = \sqrt{\omega r^i C^i} (1 - j) \quad (9)$$

$$Z_c \approx \sqrt{\frac{z_L}{y_L}} = \sqrt{\frac{r^i}{\omega C^i}} (1 - j) \quad (10)$$

이다. 동작주파수대에서 고저항 전송선의 감쇠가 크도록 잡아준다면 안테나와 다이오드에서 전송선쪽으로 본 입력임피던스는 전송선의 특성임피던스와 같게 된다. 고저항 전송선인 경우  $r^i$  성분과  $C^i$  성분이 전송선 특성에 주로 기여하므로 [그림 2]에서 보듯이 저역통과 필터의 역할을 함을 알 수 있다. 다이오드에서 발생한 여러가지 고주파성분들 중 DC 성분만이 전송선을 통과하여 지시계기로 전달되는 것

이다.

고저항 전송선의 단위길이당 저항  $r^i$ 는

$$r^i = \frac{R_S}{W_L} \quad [\Omega/m] \quad (11)$$

$R_S$ : 면저항     $W_L$ : 전송선의 폭

으로 표시되고 단위길이당 커페시턴스  $C^i$ 는[2]

$$C^i = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} \frac{\pi}{\ln(1 + \frac{d}{W_L}) + \frac{d}{W_L} \ln(1 + \frac{W_L}{d})} \quad [F/m] \quad (12)$$

여기서  $\varepsilon_r$  : 기판의 상대 유전율

$W_L$ : 전송선의 폭

$d$  : 전송선간의 간격

이다. [그림 2]를 살펴보면 안테나에서 받은 신호가 다이오드에서 검출되기 위해서는 식 (13)이 만족되어야 함을 알 수 있고 식 (13)으로부터 전송선의 폭과 간격을 구할 수 있다.

$$|Z_c| \gg \frac{1}{\omega C_A} \|R_j\| \frac{1}{\omega C_j} \quad (13)$$

알루미나 기판( $\varepsilon_r = 9$ )을 사용하고 전송선 폭( $W_L$ )과 간격( $d$ )을  $25\mu m$ 로 설계하면  $r^i = 6 \times 10^2 \Omega/m$ ,  $C^i = 100 pF/m$ 을 얻을 수 있고 식 (13)도 만족함을 알 수 있다. 전송선의 길이  $l_L$ 는 동작주파수대에서 감쇠가 충분히 크도록 다음 조건을 만족시켜야 하며

$$|\exp(-j k_L l_L)| \ll 1 \quad (14)$$

$$k_L = \sqrt{\omega \cdot 6 \times 10^6 \cdot 100 \times 10^{-12}} (1 - j) \text{ 이므로 } l_L = 1\text{cm} \text{로 선택하면 식 (14)를 만족함을 알 수 있다.}$$

### III. 제 작

니켈과 크롬을 8:2의 비율로 섞어 합금을 만든 후 진공증착기(Edwards, E306)를 사용하여 알루미나 기판위에 증착시켰다. 이어서  $25\mu m$ 의 선폭과 간격을 갖는 전송선 패턴을 형성시키기 위해 포토에칭

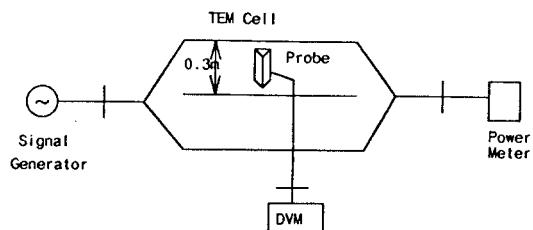
기법을 이용했는데 그 순서는 다음과 같다. 감광액(OFPR-800)을 스피너로 닉롬이 충착된 기판위에 도포시킨 후 마스크 정열기(MA-10, Mikasa제)로 250W의 자외선을 쪼여주고 1% 수산화칼륨 용액에서 현상시킨 다음 크롬에칠크(CR-7, Cyantek Co.) 용액에 담가 에칭하였다.

전송선 패턴이 형성된 기판위에 안테나 패턴을 도체펜(미국, Planned Product제품)을 사용하여 그렸다. 그 안테나 패턴 중앙 캡 양단간에 범리드 쇼트카 다이오드를 실버 애폭시를 사용하여 현미경을 보며 부착시켰다.

위 과정으로 제작한 3개의 기판을 정삼각 테플론 지지대에 부착함으로써 등방성 전계강도 프로브를 제작하였다.

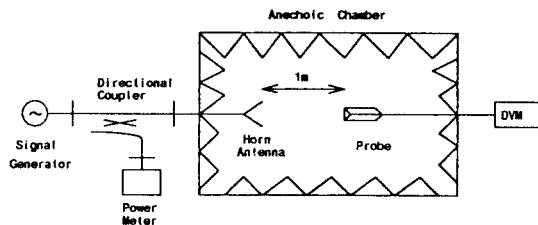
#### IV. 성능평가

제작된 전계강도 프로브의 성능평가를 위해 주파수 특성(frequency response), 등방성 특성(isotropic response) 및 동작영역 특성(dynamic response)을 측정하였다. 계산 가능한 표준 전자기장을 조성하고, 그 속에 제작한 프로브를 넣어서 지시계기인 디지털 전압계의 출력값을 읽었다. 주파수가 30MHz에서 200MHz까지는 TEM Cell(Transverse Electromagnetic Mode Cell)에서 측정하였고 200MHz에서 2GHz까지는 전자파 무반사실에서 측정하여 제작한 프로브의 성능평가를 수행하였다. [그림 3], [그림 4]는 측정 시스템의 구조이다.



[그림 3] TEM 셀을 이용한 측정 시스템 구조

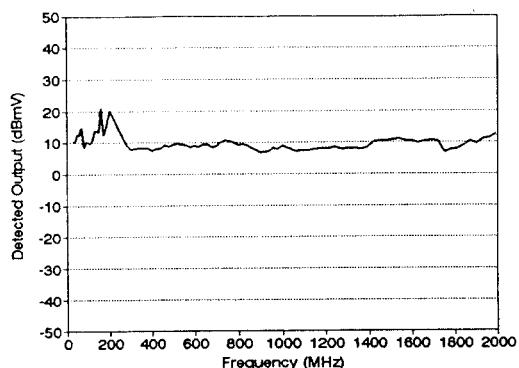
[Fig. 3] Schematic Diagram of the Measurement System using TEM Cell



[그림 4] 전자파 무반사실을 이용한 측정 시스템 구조

[Fig. 4] Schematic Diagram of the Measurement System using Anechoic Chamber

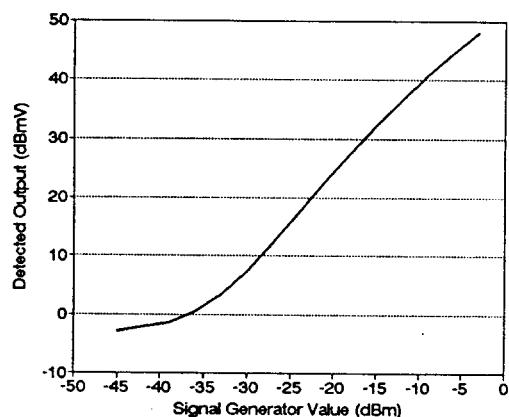
위와 같은 측정 시스템으로 2V/m의 전장을 조성하고 30MHz에서 2GHz까지 프로브 출력값을 읽어 [그림 5]에 나타내었다. 30MHz에서 300MHz까지는 최대값과 최소값의 차이가 11dB정도이고 300MHz에서 2GHz까지는 ±2.9dB이내로 일정함을 확인하였다. 300MHz 주파수대 이하에서 상대적으로 큰 편차를 보이는 것에 대한 원인은 규명하지 못했으나 사용한 다이오드의 특성이 300MHz 이하에서는 급격히 변하는 것이 아닌가 추측된다. 참고적 으로, 미국에서 87년도에 Kanda가 최적의 다이오드를 선정하여 제작한 테이퍼된 저항성분을 갖는 이국 안테나를 이용한 프로브[2]는 그 주파수 특성이 1MHz에서 15GHz까지 ±2dB이내였다.



[그림 5] 제작한 전계강도 프로브 주파수 특성

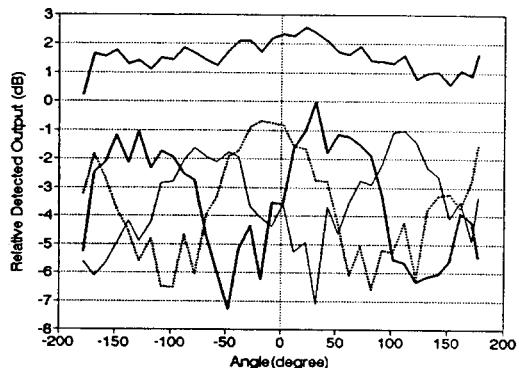
[Fig. 5] Frequency Response of the Fabricated Probe

60MHz의 일정한 주파수에서 신호원의 출력 수준을 변화시켜가면서 측정한 프로브의 한 소자의 출력 값을 [그림 6]에 나타내었다. 신호원의 출력이 3dBm씩 증가함에 따라 프로브 한 소자의 출력 DC 값이  $\sqrt{2}$ 배씩 선형적으로 증가함을 확인하였다. 조성한 전계강도가 약 1V/m 이하인 경우엔 전기장을 조성하지 않았을 때와 같은 값을 프로브가 출력함을 확인하여 제작한 프로브의 동작영역 하한은 약 1V/m임을 알 수 있다.



[그림 6] 프로브 한 소자의 동작영역 특성

[Fig. 6] Dynamic Response of an Element of the Probe



[그림 7] 제작한 프로브의 등방성 특성

[Fig. 7] Isotropic Response of the Probe

프로브의 등방성 특성을 살펴보기 위해서 300MHz에서 3.98V/m의 일정한 전기장을 조성하고 프로브의 위치와 전기장 방향은 고정시키고 프로브를 축을 중심으로 10°씩 회전시키면서 프로브를 구성하는 3개의 안테나 소자의 출력을 각각 측정하였다. [그림 7]은 측정결과로서 10° 간격의 회전에 측정되는 전압 중 최대값을 기준으로 상대적인 값으로 표시하였으며, 그럼 상단의 실선은 3개의 안테나소자 각각의 값을 제곱하여 더한 후 근호를 취한 값이다. 360° 회전에 약 ±1.2dB 이내의 편차로 등방성을 보여줌을 확인하였다. 앞에서 언급한 Kanda에 의해서 제작된 프로브의 등방성 특성은 ±0.3dB 이내이었다. 우리의 경우에 편차가 더 큰 원인으로는 프로브 제작시 정밀성이 부족했던데 있다고 생각된다.

## V. 결 론

표준전자기장 측정 및 EMI 측정시에 사용되는 전계강도 프로브의 설계이론을 고찰하고, 300MHz에서 2GHz 주파수 영역에서 동작하는 전계강도 프로브를 제작하여 주파수 특성, 동작영역 특성 및 등방성 특성을 측정하였다. 피측정 전계에 영향을 주지 않고 일정한 주파수 특성을 얻기 위해서 안테나는 전기적으로 길이가 짧은 이극안테나를 이용하였고 전송선은 고저항선을 사용하였으며 고주파 특성이 좋은 제로바이어스 쇼트키ダイオ드를 겹파용으로 사용하였다. 등방성 특성을 얻기 위해서 이극안테나 3개를 서로 직각으로 배열시켰다.

제작한 전계강도 프로브는 주파수 특성이 300MHz에서 2GHz까지의 주파수 영역에서 ±2.9dB이내의 일정한 주파수 특성을 나타내었다. 제작한 전계강도 프로브의 측정 범위 하한은 약 1V/m정도이며, 프로브 축을 중심으로 360° 회전시에 등방성 오차가 ±1.2dB 이내로 등방성 특성을 갖는다. 3개의 이극안테나 소자들의 중심을 정확하게 일치시키지 못한 점과 안테나 제작의 부정확등이 오차의 원인으로 생각된다.

안테나 소자 제작의 부정확성 및 고저항 전송선의 길이가 짧아 발생하는 원치않는 전자기장으로부터의 간섭문제를 보완한 다음, 충분한 실험을 거쳐 보정계수(calibration factor)를 찾아내어 프로그램화한 후 프로브 출력을 PC등으로 직접받아들인다면 전계강도 프로브는 매우 유용한 전자기장 측정장비로서 역할을 다할 것이다. 본 논문에 기초하여 수GHz 주파수대에서 동작하는 전계강도 프로브 및 극소형 생체용 전계강도 프로브 설계도 가능할 것으로 생각된다.

### 참고문헌

- [1] 김정환외 3인, “누설전자파 측정기 설계 및 제작 기술 개발”, KSRI-90-19-IR, 한국표준연구소, 1990.
- [2] M.Kanda and L.D.Driver, “An Isotropic Electric-Field Probe with Tapered Resistive Dipoles for Broad-Band, 100KHz to 18GHz,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.MTT-35, No.2, pp.124–130, Feb.1987.
- [3] T.E.Batchman and G.Gimpelson, “An Implantable Electric-field Probe of Submillimeter Dimensions,” *IEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.MTT-31, No.9, pp.745–751, Sep. 1983.
- [4] A.W.Rudge, “An Electromagnetic Radiation Probe for Near-Field Measurements at Microwave Frequencies,” *J. Microwave Power*, vol.5, pp.155–174, Nov.1970.
- [5] H.Bassen, M.Swigord and J.Abita, “A Miniature Broad-band Electric Field Probe,” *Annals of the New York Academy of Science, Biological Effects of Nonionizing Radiation*, Vol.247, pp. 481–493, Feb.1975.
- [6] H.Bassen, W.Herman and R.Hoss, “EM Probe with Fiber Optic Telemetry,” *Microwave J.*, vol.20, pp.35–47, Apr.1977.
- [7] H.I.Bassen and G.S.Smith, “Electric field probes-Review,” *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol.AP-31, No.5, pp.710–718, Sep.1983.
- [8] R.W.P.King and G.S.Smith, *Antennas in Matter: Fundamentals, theory and Applications*, MIT Press, 1981.
- [9] John D.Kraus, *Antennas*. McGraw-Hill, 1950.
- [10] Inder Bahl and Prakash Bhartia, *Microwave Solid State Circuit Design*, John Wiley & Sons, 1988.
- [11] G.S.Smith, “Analysis of Miniature Electric Field Probes with Resistive Transmission Lines,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol.MTT-29, No.11, Nov.1981.