

# ミリ波・サブミリ波帯可変結合率型エバネッセント波カプラ

表 鐘石<sup>†</sup> 喬 榮治<sup>††</sup> デビッド ラトリッジ<sup>†††</sup>  
水野 皓司<sup>†††</sup>

## Metal Mesh Couplers Using Evanescent Waves at Millimeter and Submillimeter Wavelengths

Jongsuck BAE<sup>†</sup>, Jung-Chih CHIAO<sup>††</sup>, David B. RUTLEDGE<sup>†††</sup>, and Koji MIZUNO<sup>†††</sup>

あらまし ミリ波帯からサブミリ波帯で用いる準光学的な素子の一つとして、金属メッシュと誘電体板間のエバネッセント波の結合を利用する新しい方式の反射率（若しくは透過率）可変な電磁波カプラを提案し、ミリ波帯でその動作の検証を行った。水晶板上に製作された容量性金属メッシュとシリコン板とから構成されるカプラを用い、周波数 56 GHz において、 $\lambda/140$  以下のメッシュとシリコン板との距離の調整で 70% 以上の透過率変化を得られることがわかった。この大きな透過率変化は、エバネッセント波の結合により、金属メッシュ基板の実効的な屈折率が変化するためであることを、実験結果とモーメント法を用いた理論解析の結果との照合を通して明らかにした。また、これらの結果に基づき、カプラの設計を容易に行うための等価回路を完成した。

キーワード エバネッセント波、金属メッシュ、カプラ、準光学的

### 1. ま え が き

準光学的な回路構成を有するデバイスは、ミリ波・サブミリ波帯技術開発のキーテクノロジーの一つと考えられている [1]。それは、この方式が、従来マイクロ波帯で用いられてきた導波管回路等とは異なり、動作周波数増大に伴う高周波損失の増加を防ぐことができ、また波長に比較し回路寸法を大きくできるため、製作および取扱いが容易である等、優れた特徴をもつためである。準光学的な回路構成方法の一つの応用として、多数個の固体素子（ガンダイオード、HEMT 等）をファブリ・ペロー共振器内に 2 次元アレー化し

て組み込み、素子からの電力を共振器内でコヒーレントに合成する高出力ミリ波・サブミリ波固体発振器の開発が、現在活発に進められている [2]。図 1 は、その発振器の構成例である。この電力合成型固体発振器の発振周波数は、素子が装着された鏡と出力取出し用の部分透過型の反射鏡との間隔を機械的に変えることで変化させることができる。このとき、各発振周波数において最大出力を発振器から得るためには、出力反射鏡の反射率をその都度調整することが要求される。従って、準光学的な回路構成をもつ電力合成型固体発振器の出力反射鏡として、その結合率（反射率および透過率）を連続的に変化できる可変結合率型の出力カプラが、発振器の動作の最適化には必要不可欠である。金属メッシュエバネッセント波カプラは、このようなミリ波からサブミリ波帯で用いられる準光学的な回路素子の一つとして、我々が提案し開発を進めている結合率可変な電磁波カプラである [3]。

従来、ミリ波・サブミリ波帯において、可変結合率型で準光学的なカプラとしては、2 枚の誘電体板を用いたファブリ・ペロー型カプラが一般によく用いられて来た。しかし、このタイプのカプラは、その動作原理上、大きな結合率変化をもつものは、必然的に狭帯

<sup>†</sup> 東北大学電気通信研究所, 仙台市

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aobaku, Sendai-shi, 980-77 Japan

<sup>††</sup> ベル通信研究所, 米国

Optical Networking System and Testbeds, Bell Communication Research, 311 Newman Springs Road, Red Bank, NJ 07701-5699, USA

<sup>†††</sup> カリフォルニア工科大学, 米国

Department of Electrical Engineering, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125, USA

<sup>††††</sup> 理化学研究所フォトダイナミクス研究センター, 仙台市

Photodynamics Research Center, The Institute of Physical and Chemical Research, 19-1399 Aza-Koeji, Nagamachi, Sendai-shi, 980 Japan

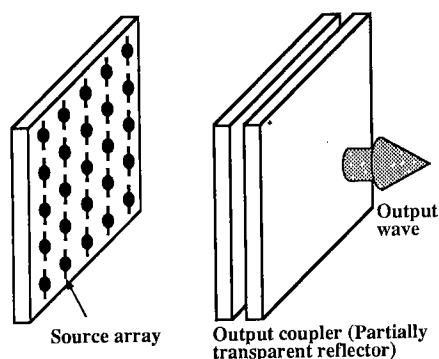


図1 可変結合率型出力カプラをもつミリ波・サブミリ波帯電力合成型発振器

Fig. 1 Quasi-optical power combining of solid-state devices using a Fabry-Perot resonator with an output coupler.

域特性をもつという欠点をもっている。金属メッシュエバネッセント波カプラは、このようなファブリ・ペロー型カプラとは異なり、高い結合率変化と広帯域特性を原理的に併せもつ新しいタイプの電磁波結合器である。現在まで、我々はモーメント法を用いた理論解析を進め、シリコン板と容量性金属メッシュからなるカプラを試作して、周波数 57 GHz で最大 80 % の結合率、また帯域 7 GHz にわたり 30 % 以上の結合率変化を得ている。これらの結果は、この周波数帯域におけるエバネッセント波カプラの有用性を示している。

本論文は、このカプラの動作原理であるエバネッセント波結合の効果、およびカプラの周波数特性を決定する金属メッシュの共振周波数についてミリ波帯で理論的および実験的に詳細に調べ、カプラの基本的な設計方法を明らかにしたものである。

## 2. 構成と動作原理

図2(a)は、金属メッシュエバネッセント波カプラの概略図である。このカプラは、水晶基板上に製作された誘導性若しくは容量性金属メッシュ(図2(b))と、入射波長 $\lambda$ 以下の距離に平行に置かれたシリコン板とから構成される。エバネッセント波カプラの結合率は、金属メッシュと誘電体板との距離 $L$ を調整することで変化する。このようなカプラの構成は、従来のファブリ・ペロー干渉計に類似しているが、その動作原理は全く異なっている。エバネッセント波カプラでは、入射波によって金属メッシュ上に誘起されたエバネッセント波が近接して置かれたシリコン板と結合し、その結合度合に応じてカプラ自体の反射率および

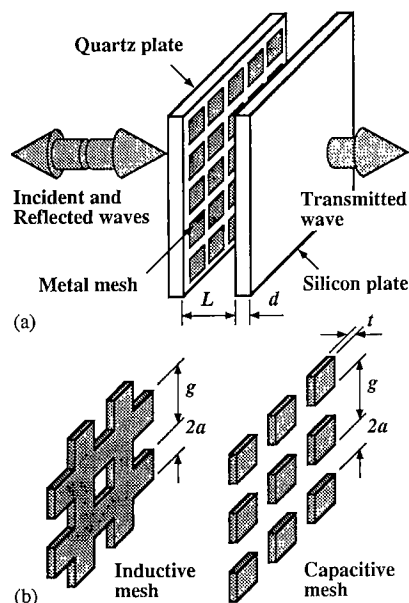


図2 (a) 金属メッシュエバネッセント波カプラと(b)誘導性および容量性金属メッシュの構成

Fig. 2 (a) Configurations of the MEW-coupler and (b) the metal meshes.

透過率、つまり入射波に対する反射および透過の結合率が変化する。一般に、エバネッセント波の振幅は金属メッシュ表面からその法線方向に離れるに従い指数関数的に減少し、通常  $\lambda/20$  程度の距離で  $1/e$  となる[4]。従って、エバネッセント波カプラは、 $L$  のわずかな距離調整によってカプラの結合率を大きく変化させることができる。また、エバネッセント波カプラは、その周波数特性が、主に図2(b)に示したメッシュパラメータ(ピッチ  $g$ , 間隙幅若しくは金属幅  $2a$ , および金属膜厚  $t$ )によって決定され、ファブリ・ペロー型カプラのように電磁波の干渉効果を用いないため、原理的に広帯域特性をもっている。

## 3. 実験装置

図3は、周波数 40~60 GHz のミリ波帯で本エバネッセント波カプラの透過特性を測定するために用いた実験システムの概略図である。誘導性および容量性金属メッシュは、 $(g, 2a) = (1.58, 0.65), (1.7, 0.69), (2.12, 0.86)$  mm の値をそれぞれもつものを、厚さ 2 mm, 直径 40 mm の水晶板上に厚さ 1  $\mu$ m のアルミを蒸着することで製作した。シリコン(Si)板( $\sim 7k\Omega\cdot\text{cm}$ )は、厚さ 0.5~3 mm の厚さをもつものを用いた。水晶板およびSi板の透過特性の測定結果から、水晶板が屈折率

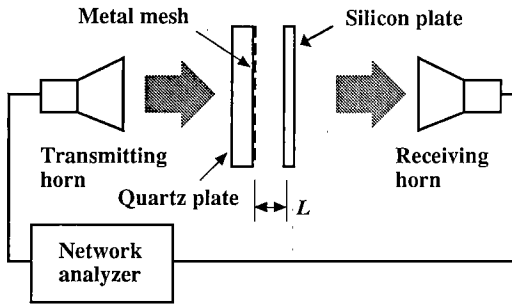


図3 実験システム概略図  
Fig. 3 Experimental setup.

$2.12 \pm 0.05$ , 電界減衰定数約  $0.5/\text{cm}$ , Si 板が屈折率  $3.42 \pm 0.05$ , をそれぞれもつことがわかった. また, この測定周波数範囲では Si 板単体での高周波損は観測されなかった.

実験は, ミリ波ネットワークアナライザ HP85106C に U バンドの送受信用ホーンアンテナを接続し, カプラの透過率を測定することで行った. Si 板は,  $\pm 10 \mu\text{m}$  以下の精度で  $0 \sim 10 \text{ mm}$  移動可能な可動台に取り付け, 水晶板との距離  $L$  を調整した. また, その平行度は HeNe レーザを用いて調整した.

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 エバネッセント波結合の効果

図4は, 周波数  $57.4 \text{ GHz}$  で, ピッチ  $1.7 \text{ mm}$  の容量性金属メッシュをもつエバネッセント波カプラの電界透過率を, 水晶板上のメッシュと Si 板との距離  $L$  を変えて測定した結果である. 図より,  $L$  を  $0$  から増加させていくと, 透過率は最初の  $3\%$  から急激に増大し  $L = 0.2 \text{ mm}$  において  $92\%$  の最大値をとり, 更に  $L$  を増加させると, 通常ファブリ・ペロー干渉計として働くことがわかる. この結果は, エバネッセント波結合の効果が主に  $0.2 \text{ mm}$  以下の距離で生じることを示している.

図4の  $L = 0 \sim 0.2 \text{ mm}$  までの透過率の変化は, 金属メッシュと Si 板間でのファブリ・ペロー干渉の効果も加え合わさっている. そこで, この効果を除去するために,  $L = 0$  近傍での透過率とエバネッセント波結合の効果が無いと考えられる  $L = \lambda/2$  近傍での透過率とを比較した結果を図5に示す. 図中の白丸は,  $L = 0$  から変えたときの透過率から,  $L = \lambda/2$  から変えたときの透過率を差し引いたものである. この結果から, エバネッセント波結合の効果が, 容量性メッシュカプラに対し

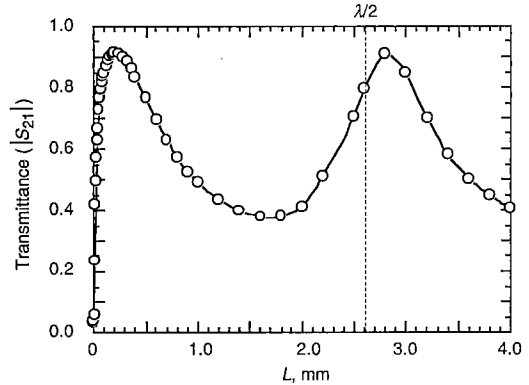


図4 電界透過率特性の測定結果 ( $g = 1.7 \text{ mm}$ ,  $f = 57.4 \text{ GHz}$ )  
Fig. 4 Measured transmittance ( $|S_{21}|$ ) of the coupler with  $g = 1.7 \text{ mm}$  at  $57.4 \text{ GHz}$ .

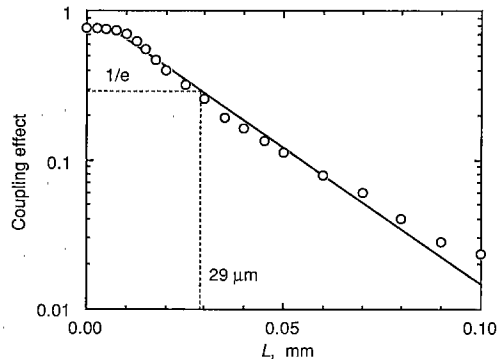


図5 エバネッセント波結合効果  
Fig. 5 Evanescent wave coupling effect.

指数関数的に働き,  $L = 0$  の所で透過率を  $78\%$  だけ減少させることがわかる. また, その効果 (の振幅) が  $1/e$  に減少する距離は約  $29 \mu\text{m}$  となる. この値は, 従来の金属メッシュに関する理論で, 1 次エバネッセント波の減衰定数 ( $3.5/\text{mm}$ ) より求められる値より  $1$  けた小さい. このことから, エバネッセント波カプラの透過率変化が, 単純なエバネッセント波の Si 板への結合だけでは説明できないことがわかる. これについては, 5. で詳しく議論することにする.

図6は,  $g = 2.12 \text{ mm}$  の誘導性および容量性メッシュの  $L$  に対するパワーの透過率変化を測定した結果である. 測定周波数は,  $44 \text{ GHz}$  である. この周波数では, Si 板そのものの透過率がほぼ  $1$  となり, 金属メッシュと Si 板間でのファブリ・ペロー干渉の効果が表れないため, エバネッセント波結合の効果をより正確に調べることができる. この図において, 実線および破線

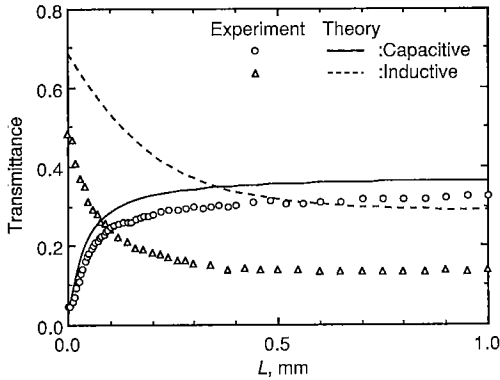


図6 パワー透過率特性の測定結果 ( $g=2.12$  mm,  $f=44$  GHz)  
Fig. 6 Measured power transmittances of the couplers with  $g=2.12$  mm at 44 GHz.

は、モーメント法を用いた理論的な数値解析の結果を示している。エバネッセント波カプラの理論解析法は、文献 [3], [5] に詳細に述べられているので、ここでは省略する。この結果から、エバネッセント波結合の効果は、誘導性メッシュカプラでも生じ、容量性メッシュとは反対にその透過率を増加させることがわかった。これらのエバネッセント波結合効果に対する誘導性および容量性メッシュカプラの透過特性の違いは、メッシュ自体がもつ相補的な周波数特性に起因したものである [6]。誘導性メッシュカプラにおいて、実験と理論との絶対値が大きく異なっているが、これは一般に容量性メッシュに比較し、誘導性メッシュの高周波損が大きいためと考えられる。ここで示した理論解析結果では、メッシュおよび誘電体板での高周波損は考慮されていない。

#### 4.2 広帯域特性

図7は、ピッチ1.7 mmの容量性金属メッシュをもつカプラの周波数特性を水晶板とSi板との距離 $L$ をパラメータに測定した結果である。縦軸は、カプラのパワー透過率である。この実験では、厚さ1 mmのSi板を用いた。この実験結果から、周波数57 GHzの近傍で、130  $\mu\text{m}$  ( $\lambda/35$ )の板間距離の変化に対し、0～80%の高い透過率変化が得られていることがわかる。また、同じ距離の変化に対し、30%以上の透過率変化が周波数50 GHzから57 GHzにわたって得られている。これは、中心周波数に対しおよそ13%の帯域に相当する。この実験結果は、容量性金属メッシュエバネッセント波カプラが高い結合率変化と広帯域特性を併せもつことを示している。

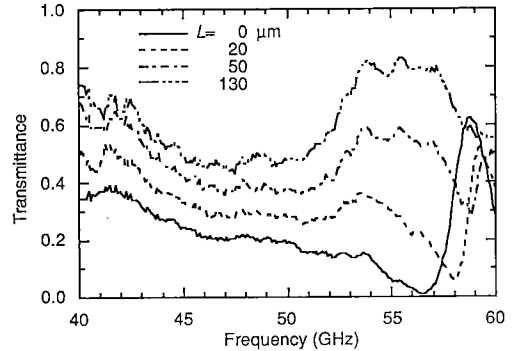


図7 周波数特性 ( $g=1.7$  mm)  
Fig. 7 Measured power transmittances of the coupler as a function of frequency.

#### 4.3 共振周波数特性

金属メッシュの従来の理論から、その共振周波数は次式で与えられる。

$$f_c = c/(n \cdot g) \quad (1)$$

ここで、 $c$ は光速、 $n$ はメッシュ基板の屈折率、 $g$ はメッシュのピッチである。この $f_c$ において、容量性メッシュの透過率はほぼ0に、誘導性メッシュでは1 ( $n=1$ の場合)になることがわかっている [7]。これ以上の周波数では回折波が発生し、エバネッセント波カプラの透過損を増大させるため、その動作周波数は $f_c$ 以下に制限される。

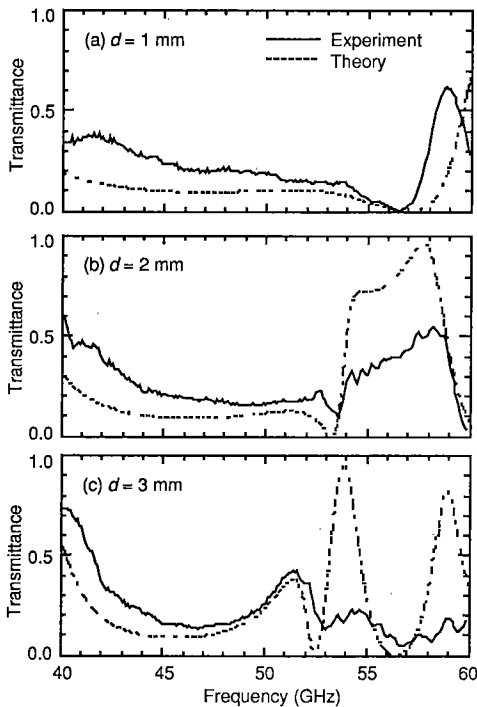
厚さ1 mmのSi板を用いた $g=1.7$  mmの容量性メッシュカプラの共振周波数は、式(1)からは51.6 GHzとなることが予想される。しかし、図7で示した $L=0$ に対する透過率測定の結果から、透過率がほぼ0となる共振点が約56.5 GHz近辺にあることがわかる。これは、Si板の実効的な屈折率が約3.1であることを示している。この値は、実際の値3.42より実験誤差を考慮しても小さい。そこで、同様の測定を他のエバネッセント波カプラに対しても行い、その実効的な屈折率変化を調べてみた。表1は、その結果をまとめたものである。この結果から、メッシュの種類およびそのピッチにかかわらず、Si板の実効的な屈折率はおよそ3.1近辺にあることがわかった。

次に、エバネッセント波カプラの共振周波数をSi板の厚さ $d$ をパラメータにして測定した。図8 (a), (b), (c)は、 $g=1.7$  mmの容量性メッシュカプラに対し、それぞれSi板の厚さを $d=1, 2, 3$  mmと変化させたときの結果である。実線が測定値、破線がモーメント法によ

表1 カブラの共振周波数と実効屈折率

Table 1 Resonant frequencies and effective refractive indices of the silicon plate in the coupler for different mesh pitches.

| カブラ | ピッチ<br>(mm) | 共振周波数<br>(GHz) |      | 実効屈折率 |
|-----|-------------|----------------|------|-------|
|     |             | 理論             | 実験   |       |
| 誘導性 | 2.12        | 46             | 46   | 3.08  |
| 容量性 | 2.12        | 46             | 46.8 | 3.02  |
| 誘導性 | 1.70        | 57             | 56   | 3.15  |
| 容量性 | 1.70        | 57             | 56.5 | 3.12  |

図8 Si板の厚さ  $d$  に対する共振周波数の変化Fig. 8 Resonant frequency characteristics of the coupler with different thicknesses  $d$  of the silicon plates.

る理論値をそれぞれ示している。図8から、 $d = 1, 2, 3$  mmと増加するのに対し、メッシュの共振周波数は56.5 GHz, 53.5 GHz, 53 GHzと減少していること、また、理論と実験が少なくとも共振周波数以下の部分でよく一致していることがわかる。この結果は、エバネッセント波カブラにおけるSi板の実効的な屈折率は、 $d$ に強く依存して変化することを示している。

図8で得られた共振周波数の測定値から、Si板の実効的な屈折率を式(1)を用いて計算し、Si板の厚さ $d$ に

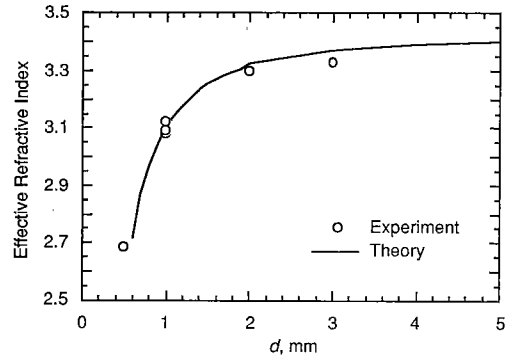


図9 Si板の厚さに対する実効的な屈折率の変化

Fig. 9 Effective refractive index of the silicon plate in the coupler.

対してプロットしたのが図9である。白丸が実験値で、実線が理論より得られた値である。図には、 $g = 2.12$  mmの容量性メッシュと $d = 0.5$  mmのSi板を用いて得られた結果も示してある。この図で、 $d$ を増加させていくと、その実効的な屈折率はほぼ指数関数的に増加し、 $d = 3$  mm以上で実際の値3.42の97%となり飽和する。この結果から、エバネッセント波カブラにおいて、実際のSi板の屈折率を得るためには、少なくとも金属メッシュのピッチの2倍以上の厚さを必要とすることがわかる。ここで、 $d = 0$ の場合、メッシュ基板の屈折率は、水晶板の屈折率2.12に一致するはずであるから、 $d$ を0から3.4 mmまで変えたとき、Siの実効的な屈折率は2.12から3.42まで変化することになる。これは、 $g = 1.7$  mmの金属メッシュカブラにおいて、その共振周波数を、そのメッシュピッチを変えることなく51.6 GHzから83.2 GHzまでの広い範囲で変更可能であることを意味している。

エバネッセント波カブラにおける共振周波数の調整は、使用する周波数で高い結合率変化を得られるようカブラの設計を行う上で重要である。図10は、図8の実験で用いた3種類の容量性メッシュカブラの共振周波数近傍でのパワー透過率を、金属メッシュとSi板との距離の変化に対し測定したものである。この結果からわかるとおり、3種類全部のカブラが、0.2 mm以下の距離の変化に対し、70%以上の高い結合率変化を与える。また、厚さ3 mmのSi板をもつカブラは、わずか $\lambda/140$ 以下の距離の変化でその結合率が74%変化させている。この結合率変化は、図7で示した $d = 1$  mmのSi板を用いたカブラの周波数53 GHzでの値と比較すると、同じ距離の変化に対し、1.6倍高い値である。こ

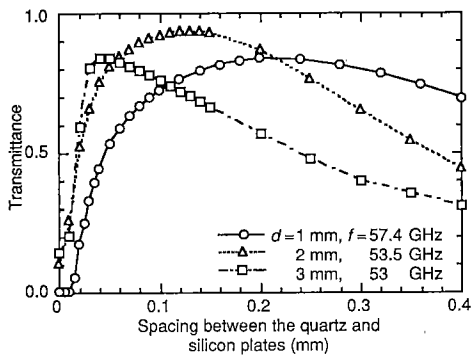


図10 3種類のカプラのパワー透過率特性の比較  
( $g=1.7$  mm)

Fig. 10 Measured power transmittances of the couplers for the silicon plates with different thicknesses.

のように、エバネッセント波カプラでは、最大の結合率変化が主に共振周波数近辺で得られることから、Si板の厚さを調整することで共振周波数を広範囲に調整できることは、エバネッセント波カプラの製作を容易にする重要な特徴と言える。

## 5. エバネッセント波カプラの等価回路

エバネッセント波カプラは、金属メッシュの基板となる誘電体の屈折率が、それに対向した誘電体板の屈折率より小さいことが必要である。それは、このカプラが、メッシュと誘電体板との距離により実効的な基板屈折率を変化させ、メッシュの透過特性が変わることを利用してその結合率を調整するためである。今回用いた水晶基板と厚さ1 mmのSi板の場合、その板間距離 $L$ を0に近づけたとき、金属メッシュが見る実効的な屈折率は2.12から3.1まで変化する。ここで、この屈折率が $L$ に対しどのような関数で変化するかを明らかにできれば、エバネッセント波カプラのインピーダンスを数値解析法を用いず決定でき、等価回路を用いた設計を容易にする。これは、エバネッセント波カプラを多くの他の準光学的な素子と組み合わせて用いるとき、特に有効となる。

先に4.1で述べたとおり、エバネッセント波カプラのメッシュとSi板との距離 $L$ に対する透過率の急激な変化は、単純なエバネッセント波のSi板への結合だけでは説明することができない。そこで、金属メッシュからSi板を見たときの実効的な屈折率 $n_e$ が、エバネッセント波のSi板への結合の割合に応じて変化すると仮定すれば、その値は次式で表される。

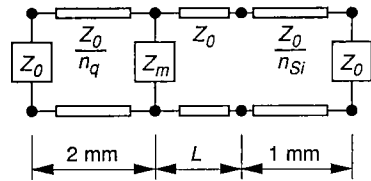


図11 カプラの等価回路

Fig. 11 Equivalent circuit of the coupler.

$$n_e = \sqrt{(n_s^2 - 1) \frac{1}{m_{\max}} \sum_{m=1}^{m_{\max}} \exp(-\alpha_m \cdot L) + 1} \quad (2)$$

$$\alpha_m = k \sqrt{\left(\frac{m \cdot \lambda}{g}\right)^2 - 1} \quad (3)$$

ここで、 $n_s$ はSi板の厚さを考慮した屈折率、 $k$ は入射波の自由空間での波数、 $\alpha_m$ は $m$ 次エバネッセント波の電界減衰定数、 $m_{\max}$ は考慮するエバネッセント波の最大次数を表している。もしこのSi板の実効的な屈折率 $n_e$ の式が正しいなら、金属メッシュのインピーダンスはComptonら[8]によって与えられた次の方程式を用いて簡単に計算できる。但し、入射波長に比較してメッシュの金属の厚さは十分薄いものとする。

$$\frac{Z_i}{Z_0} = -j \left[ f'_0 \ln \left( \cos \frac{\pi a}{g} \right) \right] \left[ \frac{f'}{f'_0} - \frac{f'_0}{f} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$\frac{Z_c}{Z_0} = j \frac{2}{1+n_e^2} \left[ 4 f'_0 \ln \left( \cos \frac{\pi a}{g} \right) \right]^{-1} \left[ \frac{f}{f'_0} - \frac{f'_0}{f} \right] \quad (5)$$

$$f'_0 = f_0 \sqrt{\frac{2}{1+n_e^2}} \quad (6)$$

ここで、 $Z_i$ および $Z_c$ はそれぞれ誘導性および容量性メッシュのインピーダンス、 $f$ は規格化周波数で $g/\lambda$ で与えられる、 $f_0$ は規格化周波数で通常1の値をとる[8]、 $g$ および $a$ は図2(b)で示されたメッシュパラメータ、 $Z_0$ は空間のインピーダンスで $377 \Omega$ である。Si板の実効屈折率を含む金属メッシュのインピーダンスが式(4)または式(5)で求められれば、エバネッセント波

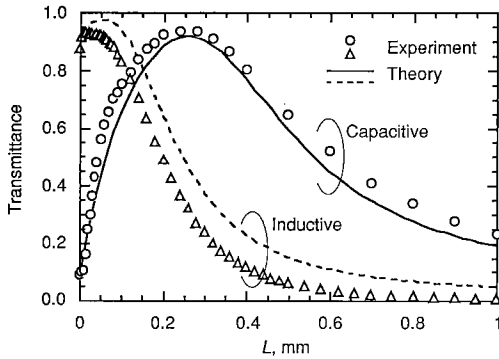


図12 理論および実験結果の比較 ( $g = 1.7$  mm,  $f = 56$  GHz)  
Fig. 12 Comparison between the theoretical and experimental results for the transmittance of the coupler with  $g = 1.7$  mm at 56 GHz.

カブラの反射率および透過率は、図11で示す伝送線路を用いた等価回路を使って求めることができる。図中の  $Z_m$  はメッシュのインピーダンス、 $n_q$  は水晶板の屈折率、 $n_{Si}$  は Si 板の実際の屈折率 (= 3.42) を表している。

さて、式(2)で与えられる Si の実効的な屈折率  $n_e$  の正当性を確認するため、実際に 1 mm の厚さをもつ Si 板と ( $g, 2a$ ) = (1.7, 0.69) mm の誘導性および容量性メッシュをもつエバネッセント波カブラについて、周波数 56 GHz での透過率を  $L$  を変数に計算してみた。図12は、その結果である。この計算では、エバネッセント波のモード次数の最大値  $m_{max}$  は 10 とした。図中の実線および点線は、それぞれ容量性および誘導性メッシュカブラの計算結果を表している。この結果からわかるとおり、式(2)の  $n_e$  を用いた計算が、エバネッセント波カブラの  $L=0$  近傍での急激な透過率変化をよく表しており、 $n_e$  に関しても行った我々の仮定が実験誤差範囲内で正しいことがわかった。また、 $n_e$  を使ったエバネッセント波カブラの透過率の計算は、モーメント法を用いた数値計算法でも行い、その結果が実験結果とよく一致することを確認している。

エバネッセント波カブラの等価回路を用いた設計の手順は、次のとおりである。まず、式(1)を使って、動作周波数をメッシュの共振周波数と等しくおくことで、メッシュのピッチを決定する。ここで、式(1)の  $n$  は、厚さを考慮した Si 板の実効的な屈折率である。次に、メッシュの  $L$  に依存したインピーダンスを、式(4)若しくは(5)を式(2)および(3)と組み合わせて計算する。最後に、図11の等価回路を用い、カブラの反射率

および透過率を計算し、最大結合率変化が得られるように、水晶および Si の厚さを決定すればよい。ここで、式(2)のエバネッセント波の最大次数  $m_{max}$  は、 $2a/g$  のメッシュパラメータの値で変化し、この値が小さいほど  $m_{max}$  は大きくする必要がある。今回用いた  $2a/g = 0.4$  のメッシュに対しては、 $m_{max} = 7 \sim 10$  の値を用いればよいことが、モーメント法を用いた解析結果より確かめられている。

## 6. む す び

金属メッシュを用いたエバネッセント波カブラを提案し、その動作解析をミリ波帯で理論および実験的に行った。金属メッシュとシリコン板との距離に依存したメッシュのインピーダンス変化を明らかにし、エバネッセント波カブラの等価回路を完成させた。また、エバネッセント波カブラの透過特性を決定する金属メッシュの共振周波数が、シリコン板の厚さに依存して指数関数的に変化することを明らかにした。この結果を用い、容量性メッシュカブラのシリコン板の厚さを 1 から 3 mm の間で調整することによって、53 ~ 57 GHz の間の各周波数において、 $\lambda/26$  (0.2mm) 以下の距離の変化で 70% 以上の結合率変化が得られた。

謝辞 本研究の一部は、文部省科学研究費の援助によった。

## 文 献

- [1] 水野皓司, “準光学的多素子デバイス—短ミリ波・サブミリ波帯デバイス開発のアプローチ,” 日本赤外線科学誌, vol. 2, no. 1, pp. 17-24, 1992.
- [2] J. Bae, Y. Aburakawa, H. Kondo, T. Tanaka, and K. Mizuno, “Millimeter and submillimeter wave quasi-optical oscillator with Gunn diodes,” IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol. 41, no. 10, pp. 1851-1858, 1993.
- [3] J. Bae, J.-C. Chiao, K. Mizuno, and D. B. Rutledge, “Metal mesh coupler using evanescent waves at millimeter and submillimeter wavelengths,” Int. J. Infrared and Millimeter Waves, vol. 16, no. 2, pp. 377-390, 1995.
- [4] Z. S. Agronovich, V. A. Marchenko, and V. P. Shestopalov, “The diffraction of electromagnetic waves from plane metallic lattices,” Sov. Phys. Tech. Phys., vol. 7, pp. 277-286, 1962.
- [5] R. M. Weikle II, “Quasi-optical planar grids for microwave and millimeter-wave power combining,” Ph.D. Dissertation, California Institute of Technology, 1992.
- [6] R. Ulrich, “Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure,” Infrared Phys., vol. 7, pp. 37-55, 1967.
- [7] M. S. Duderlag and T. A. DeTemple, “Far-IR optical properties of freestanding and dielectrically backed metal meshes,” Appl. Opt., vol. 20, no. 7, pp. 1245-1253, 1981.

- [8] L. B. Whitbourn and R. C. Compton, "Equivalent-circuit formulas for metal grid reflectors at a dielectric boundary," Appl. Opt., vol. 24, no. 2, pp. 217-220, 1985.

(平成7年12月8日受付, 8年3月21日再受付)



表 鍾石 (正員)

昭51 朝鮮大学校・工・電子卒。工博。昭58 東北大学助手, 以来ミリ波・サブミリ波の発生および応用の研究に従事。現在, 東北大学電気通信研究所助教授。



喬 榮治

He was born in Taiwan, Republic of China, in 1966. He received the B.S. degree in electrical engineering from the National Taiwan University, Taipei, in 1988. From 1988 to 1990, he served as a Technical Officer of Communication in the Air Force, Taipei. In 1991 and 1995, he obtained the M.S. and Ph.D. degrees from the California Institute of Technology, respectively. His research interests include monolithic millimeter-wave integrated-circuit antennas, submillimeter-wave frequency multipliers, applications of micromachining techniques to millimeter-wave beam-steering devices and optical switches, and multiwavelength optical networks. He is currently with Bell Communications Research (Bellcore) as a research scientist in the Optical Networking Systems and Testbeds group.



David B. Rutledge

He is Professor of Electrical Engineering at the California Institute of Technology. His research has been in developing integrated-circuit antennas, imaging arrays, active grids, and software for computer-aided design and measurement. He is co-author with Scott Wedge and Richard Compton of the widely distributed educational microwave computer-aided design package, *Puff*, with over 12,000 copies worldwide. Five of his students have won Presidential Investigator and Career Awards. His group has contributed 200 publications to the technical literature. He was Distinguished Lecturer for the Antennas & Propagation Society, won the Microwave Prize of the Microwave Theory & Techniques Society and the Teaching Award of the Associated Students of Caltech, and is a Fellow of the Institute of Electrical and Electronic Engineers.



水野 皓司 (正員)

昭38 東北大・工・電子卒。昭43 同大学院博士課程了。同年東北大助手, 助教授を経て, 昭59 教授(電気通信研究所)。昭47 ロンドン大客員研究員, 平2 カリフォルニア工科大, ロンドン大客員教授。平5 IEEE フェロー。平2 より理化学研究所(フォトダイナミクス研究センター) チームリーダーを兼務。ミリ波・サブミリ波デバイスの研究開発に従事。昭58 科学計測振興会賞受賞。