

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5 月 24 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20560329

研究課題名（和文） 電磁結晶を用いた超高性能デバイスの研究開発

研究課題名（英文） Research and development of devices with very high performance using electromagnetic crystals

研究代表者

賈 洪廷（JIA HONGTING）

九州大学・日本エジプト科学技術連携センター・准教授

研究者番号：60315223

研究成果の概要（和文）：

本研究では、まず、異方性特性を持つファイライトと誘電体などと複合した円柱から構成した電磁結晶の電波特性の解析方法を提案し、様々な複合した円柱での電磁結晶の電波特性を明らかにした。また、これらの電磁結晶中に置いたライン電流ソースからの電波放射特性も解明した。印加した磁界 DC バイアスによって、放射特性を制御することは可能であることを明らかにした。次に、線状アンテナは電磁結晶中に置くと、線状アンテナの電流分布も電磁結晶からの影響も受ける。ここでは、すべての境界条件を満たした厳密な解析方法を提案し、電磁結晶中の線状アンテナの放射特性を解明した。また、異なる性質を持つ円柱から構成した複雑な電磁結晶問題に対して、厳密的且つ効率的な解析方法を提案した。幾つ複雑な構造を持つ電磁結晶の電波特性を明らかにした。更に、任意形状の金属柱と不均一な誘電体で構成した電磁結晶に対して、今まで、数値的な解析法以外に、有効な解析的な手法は提案されておらず、本研究では、この複雑な問題に対して、収束の速い、有効な解析的な方法を提案した。本研究で提案した解析手法の有効性、収束性などを証明した。超広帯域を持つシステムに応用するための 2.0GHz  $\sim$  16.0GHz の低ノイズ増幅器を設計し、帯域内の雑音指数は 2.85 dB 以下、平坦度は  $\pm 0.85$  dB で、入力側と出力側も良好なマッチング特性を持つ。また、コストの節約や回路性能の向上するために、面積を 80% 節約できる 3D インダクタを提案した。

研究成果の概要（英文）：

This research has proposed an analytical method to analyze electromagnetic crystals composed of ferrite material with anisotropic magnetic permeability and normal materials or metals. Many kinds of electromagnetic crystals with different structures have been investigated. Next, we have given many radiation results from line current source sandwiched by two electromagnetic crystals. The radiation patterns and gains can be controlled by the bias-dc magnetic field. Next, when an antenna is in electromagnetic crystal, the current distribution on this antenna is affected by the two crystals. We have proposed a novel approach to formulate the radiation from a striate antenna placed in two pieces of two-dimensional electromagnetic crystals. All the electromagnetic fields may be expressed using Green functions, which are derived by the spectral domain approach based on reflected matrices and transmitted matrices. The distribution of electric currents may be calculated by a moment method, and the currents may be calculated by a moment method, and the currents are also transformed into an infinite periodic array of linearly phased dipole in the spectral domain. The radiated fields are expressed by a finite integral and this integral in far-zone can be calculated by a method of steepest descent without performing this integration. Next, we have proposed a new method for analyzing two-dimensional electromagnetic crystals composed of differential material cylinders using lattice sums technique and isolated T-matrices solution. The new approach has improved the computing accuracy than the traditional methods', and then, this method can solve many electromagnetic crystal problems which are difficult for the traditional methods.

Moreover, it is very difficult to analyze electromagnetic crystals composed of many conductive cylinders with any shaped cross section in inhomogeneous dielectric materials by the traditional methods except for the numerical approaches. Here, we have proposed a new formulation to deal with scattering problems of a two-dimensional electromagnetic crystal consisting of inhomogeneous media and perfect conductors. The scattering fields in grating region may be expressed in terms of sine or cosine functions, which satisfy the boundary condition on inner surface of perfect conductors. The fields in upper and lower semi-infinite space has been expanded into space harmonics. By using the continuous conditions of tangential fields cross the boundary planes and a window function, a set of linear equations may be derived. The final solution is expressed in S matrix form. This format is very convenience to deal with other complex structures such as metallic cylinders with arbitrary cross section. The numerical results not only have confirmed the validity of the proposed method, but also have shown the fast convergence and high calculated accuracy. Finally, we have designed an ultra wideband low noise amplifier of 2.0GHz~16.0GHz with less than  $\pm 0.85$  dB flatness and less than 2.85 dB noise figure, for applying in ultra wideband communication system and microwave CT system. The reflection from input port and output port are less than -8 dB. We have also proposed a new 3D inductor which can save 80% die areas than the normal inductors. This technical can save the fabrication cost and improve the performance of RF circuits.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：電磁結晶、周期構造、アンテナ、指向性、利得、格子和、散乱行列、ノイズ、増幅器、インダクタ

1. 研究開始当初の背景

近年、爆発的に増えつつある膨大な情報を迅速に伝達するため、既存のインターネットシステムを代わって、全光インターネットシステムや、超広帯域の通信システムの構築は不可欠である。また、環境破壊及び近代人の食生活習慣の変化により、乳がんが急激な増加傾向にある。乳がんは早期発見早期治療により治る率が高い癌である。申請者は電磁結晶の問題に対して、幾つの解析手法を提案して参った。乳がん検診用のシステムへ応用する新しい解析方法を提案して参った。

2. 研究の目的

本研究では、まず、すべての電磁結晶構造に対しても、解析が有効な解析法を開発する。

また、異方性媒質に対しても有効な解析手法を提案する。提案した解析方法を利用し、電磁結晶の電波散乱特性を明らかにする。また、アンテナを電磁結晶中に置くと、高い利得などの優れた特性が得られるため、本研究では、電磁結晶中のアンテナからの放射特性を解明する。また、通信システムやマイクロ波CTシステムに必要な超広帯域低ノイズ増幅器などを研究開発する。更に、RFシステムの製造コストの削減やRF回路の性能を向上するため、面積の節約可能な3Dインダクタを研究開発する。

3. 研究の方法

(1) 異方性媒質円柱から成る電磁結晶の

## 解析

ファイライトの円柱に誘電体をコーティングし、規則的に並べ、特定の周波数帯域では2次元のフォトニック結晶に成る。z軸に直流磁界を印加すると仮定し、また、コーティングしたファイライトはz方向において均一で構成する。これら条件をマクスウェル方程式に代入すると、z軸に対する独立なTE波とTM波の波動方程式が得られる。磁化したファイライトはTE波に対して、普通の同方性媒質と変わらない性質を持つため、TE波の議論を省略する。ここでは、TM波 ( $E_z, H_x, H_y$ ) を照射し、ファイライトの異方性による散乱特性を調べる。磁化したファイライトの電気特性は誘電率  $\epsilon_0 \epsilon_f$  とテンソル透磁率で表らせる。格子和と空間高調波などを用いて、散乱行列が得られた。

### (2) ファイライト電磁結晶中のライン電流ソースからの放射

空間高調波やS-行列などを用いて、2枚の電磁結晶中に置くライン電流ソースからの厳密な放射界を導いた。また、電流源を離れた観測点において、鞍点法を用いて、積分を近似的に求められる遠方界の表現も得られた。

### (3) 電磁結晶中の線形アンテナからの放射

ある線状アンテナがx方向に置き、 $t_1$ と $t_2$ を離れたフォトニック結晶に挟まれた。フォトニック結晶はx方向に周期hを持ち、z方向に無限長い多層構造である。この問題は3次元問題であるが、z軸の完全対称性から、x-yにおける放射特性は $\partial \mathbf{J} / \partial z = 0$ の2次元変化する電流源からの特性と同じである。よって、ここでは、すべての電流源はz軸に置いて変化しないと仮定し、グリーン関数を用いて、モーメント法を利用し、電流分布を求める。また、S-行列など利用し、電磁結晶中のグリーン関数を求められた。更に、鞍点法を用いて、積分を近似的に計算すると、遠方界の公式も得られた。

### (4) 複雑円柱で構成した電磁結晶の解析

一周期に多数の異なる性質・サイズのシリンダーが存在する。これらのシリンダーは $\epsilon_{pb}$ の比誘電率と $\mu_{pb}$ の比透磁率を持つ媒質に置く。ここでは、一周期内のシリンダーの数はP個と仮定し、それぞれの半径、比誘電率及び比透磁率は $(r_p, \epsilon_{pb}, \mu_{pb})$ ,  $p=1, 2, \dots, P$ であり、0次元セルの各シリンダーの位置はローカル座標系に置いて $(x_{op}, y_{op})$ ,  $p=1, 2, \dots, P$ である。このような単位セルはx軸にhの均等に配置し、周期構造になる。問題は従来の手法では、計算条件が厳しく、計算精度も問

題ある。ここでは、厳密な新しい解析方法を提案した。

### (5) 不均一中の金属柱から成る電磁結晶の解析

不均一な誘電体には任意断面を持つ金属柱がある場合、従来の解析的な解法が無効である。本研究では、x方向にスライスし、金属の形状を同等面積の長方形円柱に等価し、すべて、境界条件持たし、二つ長方形導体柱に挟んだ不均一な誘電体領域中の電磁界は有限数のフーリエ級数の和で近似する。更に、境界条件を合わせて、厳密な方程式を得られ、最後に、空間高調波の元でのS行列式が得られた。

## 4. 研究成果

提案した磁化ファイライトと誘電体及び金属円柱から成る電磁結晶の電波特性を明らかにした。また、磁界DCバイアスが変化すると、バンドギャップの位置や幅も変動する。ここでは、バンドギャップを制御し易いため、磁化ファイライト円柱の一部を普通の誘電体に変わり、誘電体円柱を磁化ファイライトでコーティングし、正三角形の格子で配置した6層の周期アレーからのパワー反射率の結果から、バンドギャップの数は二つになったが、二つのバンドギャップの幅は共に広がった。次に、内部の誘電体を完全導体になると、バンドギャップの幅が非常に広いことが分かった。この特性は小型アンテナの設計に非常に重要である。

次に、二種類異なる円柱から構成した周期アレーの反射特性を比較する。一つは誘電体円柱を磁界ファイライトでコーティングするタイプ、誘電体-ファイライトタイプと呼ぶ。もう一つは磁化ファイライト円柱を誘電体でコーティングするタイプ、ファイライト-誘電体タイプと呼ぶ。2タイプ共に、円柱断面において、誘電体とファイライトの面積割合は等しいと仮定する。誘電体-ファイライトタイプの場合、二つのバンドギャップは高周波数帯域に現れ、その幅も小さい。一方、ファイライト-誘電体タイプの場合、低周波数帯域に一つバンドギャップしか現れなかったが、その幅は結構広い。この二つタイプの反射特性を比較すると、誘電体とファイライトの断面面積割合が同じであるが、電波の反射特性は全然異なることが分かった。

電流のラインソースを2枚のフォトニック結晶の間に置き、フォトニック結晶の影響を受け、ライン電流ソースとフォトニック結晶の距離が変化すると、放射パターンも変化する。従って、適当な距離を選び、希望する放射パターンが得られる。更に、放射パタ

ーンは磁界 DC バイアスの強度により、制御も可能であることを明らかにした。

ここでは提案した厳密な解析法で、線状アンテナを誘電体スラブにエアホールを正三角形で配置したフォトニック結晶 2 枚の間に置き、線状アンテナの電流分布を得られ、また、 $E_0$  放射方向は  $30^\circ$  から  $150^\circ$  までで、利得は 1.7 – 7.1 の間に变化する。サイドローブのレベルは非常に低い。線状アンテナからフォトニック結晶との距離を  $t_1 = t_2 = 1.5h$  に選び、周波数が  $h/\lambda_0 = 0.25$  の場合、非常に鋭い放射特性が得られた。

任意形状の金属柱を不均一な誘電体に置く問題に対しては、本研究で提案した解析手法の計算結果から、全周波数帯域において、低次三つの空間高調波の振幅と位相は、両方法の計算結果が完全に一致した。従って、提案した手法の有効性が明らかである。また、小さい打ち切り項数でも、高い計算精度の結果が得られることが分かった。

現代通信において、超広帯域技術はますます重要になる。ここでは、0.18 TSMC の製造技術で、2 – 16 GHz の超広帯域低ノイズ増幅器を設計した。周波数 2 GHz から 16 GHz までの間に、10.65 ~ 12.3 dB の利得が得られた。弱い負フィードバックなどの技術によって、 $\pm 0.85$  dB の平坦な利得特性が得られた。また、2 GHz ~ 16 GHz の帯域に、雑音指数は 2.82 ~ 2.14 dB に達成した。入力側と出力側の反射係数は -8 dB 以下である。

CMOS の集積 RF 回路において、平面型インダクタは占拠する面積の割合が非常に高い。インダクタの面積が減らすことは RF 回路性能の向上や、コストの削減には非常に有効である。ここでは、M6-M1、M6-M2 と M6-M3 で設計した 3D インダクタが妥当であり、3D インダクタの Q ファクターは通常のインダクタと同等程度の Q ファクターが実現できた。通常インダクタと提案する 3D インダクタの必要な面積を比較すると、通常のワン層設計では、 $428 \times 425 \mu\text{m}^2$  の面積が占め、一方、提案した 3D の 2 層設計では、 $185 \times 165 \mu\text{m}^2$  しか使いません。80% の面積が節約できた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 8 件)

[1] H. Jia, K. Yasumoto, and B. Gupta,

“Scattering properties of planar arrays of circular cylinders coated by magnetized ferrite and its application as reflector and controller of antennas,” *Proceedings of The Fifth Research Forum of Japan-Indo Collaboration Project on Infrastructural Communication Technologies Supporting Fully Ubiquitous Information Society*, pp.20-28, Dec. 2008.

[2] H. Jia, K. Yasumoto and B. Gupta, “A study of electromagnetic radiation from a two-dimensional striated antenna embedded in electromagnetic crystal,” *Proceedings of The Fourth Research Forum of Japan-Indo Collaboration Project on Infrastructural Communication Technologies Supporting Fully Ubiquitous Information Society*, pp.27-31, July 2008.

[3] M. Bhattacharya, B. Gupta, K. Yasumoto, H. Jia, “Neural network modeling of scattering parameters from a conducting post in rectangular waveguide,” *Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium*, July 2008.

[4] K. Yasumoto, K. Watanabe, H. Jia, “Analysis of two-dimensional photonic crystal circuits using Fourier modal method based on Floquet mode,” *Proceedings of 2008 Japan-Indo Workshop on Microwave, Photonics, and Communication Systems*, pp.30-38, July 2008.

[5] Hongting Jia, “A new analysis of scattering problems for electromagnetic crystals consisting of inhomogeneous dielectric materials and conductors,” *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference*, pp.1-4, Dec. 2009.

[6] Hongting Jia, “A exact analysis of coplanar waveguides and strip lines with full-wave method,” *Proceedings of IEEE Applied Electromagnetics Conference and URSI Commission B meeting*, pp.1-4, Dec. 2009.

[7] K. Yousef, H. Jia, R. Pokharel, A. Allam, M. Ragab, and K. Yoshida, “A 2-16 GHz CMOS Current Reuse Cascaded Ultra-wideband Low Noise Amplifier,” *Proceedings of Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference*, pp.1-5, April 2011.

[8] K. Yousef, H. Jia, and A. Allam, “Design of 3D Integrated Inductors for RFICs,” *Proceedings of 2012 Japan-Egypt Conference on Electronics, Communications and Computers*,

pp.1-4, March 2012.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

賈 洪廷 (JIA HONGTING)

研究者番号：60315223