

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870052

研究課題名(和文) 3次元無線実装のための強磁性共鳴を利用した狭帯域近接磁場アンテナ原理の検証

研究課題名(英文) Verification of a narrow band magnetic antenna device using ferromagnetic resonance for a wireless tip integration

研究代表者

三宅 耕作 (Miyake, Kousaku)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20374960

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：3次元半導体無線実装に利用するために強磁性共鳴状態の磁性体を用いて10GHz以上で動作可能な短距離磁気アンテナの研究を行った。コプレーナ線路上にFeCo磁性体薄膜を配置した試料を作成し、磁性体をどのように配置すれば強度が増大するか調べ、細い信号線路のエッジ部分に磁性体を置くことで大きなインピーダンス変化が得られることを調べた。また、作成したデバイス間の透過特性を測定し、強磁性共鳴が生じている周波数帯域で信号伝達が見られた。

研究成果の概要(英文)：A near field magnetic antenna device using a ferromagnetic resonance states in magnetic thin film was studied for the application of wireless 3D semiconductor chip integration over 10 GHz. The devices, which consist of micro-patterns of FeCo thin film on a coplanar wave guide, were made for the study of the conditions to obtain a large impedance change. As a result, the largest variation for the impedance change by ferromagnetic resonance was achieved by putting the ferromagnetic materials onto the edge of the signal line. The transmission properties inter fabricated devices were also measured. Small electric power transmission were also observed in a frequency band over 10 GHz where the device was in a ferromagnetic resonance state.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：強磁性共鳴 マイクロ波 磁気アンテナ 実装

## 1. 研究開始当初の背景

半導体実装の分野において、100  $\mu\text{m}$  程度の厚さに薄片化したチップを積み重ねることで小型、高機能、高容量化、省エネ化を目指す試みが盛んになされており、シリコン貫通ビアのような3次元実装技術が注目されている。一方、大規模な設備投資が不要で検品がしやすく静電破壊に強いチップ間無線通信が注目されている。様々な伝送方法が研究されており、電磁波の透過性の良い超近距離磁気アンテナもその候補の一つである。また、情報量の増大に伴って使用周波数帯域が数10GHz以上に増大すると期待される。従って、高周波帯の磁気アンテナを開発する必要がある。

10GHz以上の高い周波数領域で磁気アンテナのゲインを増大させる方法として磁性体をアンテナに使うことで透磁率を増大させることが挙げられる。10GHz以上の高周波帯域ではアンテナによって作られる電磁波によって一般的な磁性体は強磁性共鳴状態(FMR)となっている場合があり、磁性体の歳差運動を通した電磁波の放射を考える必要がある。FMR状態をアンテナとして利用することのメリットは磁気異方性やバイアス磁場によって帯域を変化させることが容易に可能であり異なるアンテナ間のチャンネルごとに帯域を変えることが可能となる点も挙げられる。

また、実装以外にも磁気ヘッドに組み込まれる磁気アンテナはマイクロ波アシスト磁気記録の重要なキーデバイスとなる可能性があり、放射位置が操作され高い周波数で効率よく動作する近距離磁気アンテナの開発が望まれる。

伝送線路やアンテナの近辺に磁性体を配置し、そのインピーダンスを計測する実験手法は、ブロードバンドFMRと言われる強磁性共鳴スペクトルを観測する方法として良く知られている。その方法はネットワークアナライザを用いてコプレーナ線路(CPW)などに高周波を入力した状態で線路に近接させた強磁性体薄膜などに電磁波を吸収させ、磁場を印可することでインピーダンスが磁場に依存する部分を通して強磁性共鳴の状態を議論するという手法である。この手法は古典的なFMRの実験と異なり、数10GHzの帯域に渡って周波数領域で容易にFMRスペクトルを観察できる点である。しかしながら、スペクトルの半値幅やローレンチアンスペクトルの概形に関わる磁気モーメントの歳差運動の位相が計測結果にどのように影響するか明白では無く、再現性も悪く、どのような状態で歳差運動を行っているか必ずしも単純化して考えられないことが挙げられる。

一方、本研究代表者らは、これまで、ブロードバンドFMRを用いて磁気ドットの強磁性共鳴について研究を行い、コプレーナ線路上の磁性体の配置や位置によってスペク

トルが複雑に変化することを見出しており、線路から放射される交流磁場には複雑な分布があり均質磁場として単純化できないという理解に至っていた。従って、磁気アンテナを開発するためには線路と磁性体の相互作用について理解する必要がある。一方、アンテナからの電磁場の放射についてはシミュレーターなどによって解析が可能であるが磁性体の歳差運動による回転的な磁束の変化は単純に局所電流に比例しておらず電流の位相と磁性体の運動の位相の関係は複雑となる。従って実験によって詳細を明らかにする必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は10GHz以上の帯域で動作する新しいコンセプトの近距離磁気アンテナの動作実証を目的とする。そのために、まず、導波線路上に配置した薄膜強磁性体の強磁性共鳴状態においてインピーダンスの変化が最大となる条件について調べ、また磁性体の歳差運動がどのように変化するかについて様々なデバイスの測定を行い、結果を比較検討することでデバイス開発の指針を得る。

また、多重ループのアンテナデバイスを作成する方法ために、金属線路間をつなぐ方法として、清浄なコンタクトホールを作製する必要がある。本研究ではリフトオフ法を用いたが、実際にはリフトオフ法は確率的で再現性に乏しいため効率が悪く、バリなどが生じるため不便である。効率よくリフトオフを行う方法として高速ドライアイス微粒子による破砕によって、ほぼ100%リフトオフを実現する方法の開発を行った。

## 3. 研究の方法

まず、一方の端をショートとしたCPW上に磁性体薄膜からなる(FeCo 30 nm厚さ)数100  $\mu\text{m}$ 長さ、幅数 $\mu\text{m}$ サイズの矩形パターンを様々な位置、サイズで配置した試料を作成し、GSGプローブとネットワークアナライザを用いてS11パラメータを測定することでFMR現象を生じさせた。

FMRスペクトルの比較検討を行い最もスペクトルの変化が大きくなる条件やスペクトルの形状がどのようになるかについて詳しく調べた。

測定において膜面内に磁場を最大1 kOe程度、印可することでインピーダンスの磁場に依存しない部分と依存する部分を分離し、磁場に依存する部分を強磁性共鳴による磁気アンテナの寄与とみなした。

ラフネスの小さな(Ra=0.4 nm以下)、quartz基板/Ta (20 nm)/Cu (300 nm)/SiO<sub>2</sub> (1.5 nm)薄膜上にTa (1 nm)/FeCo (30 nm)/Ta(5 nm)をスパッタ法で作製し、この薄膜をフォトリソグラフィとArイオンミリングによってコプレーナ線路の形状に加工したのち、さらに電子線リソグラフィとミリング加工

によって表面の磁性体を試料パターンに成形した。この際、CPW 線路のエッジに確実に磁性体が残るよう磁性体パターンを形成した。

また、アンテナデバイスを作製するためにドライアイス処理装置によるプロセス開発も行った。リフトオフ法は電子線描画によって作製した 350 nm 厚さのレジストパターンの存在する試料に対して 35 nm 厚さの SiO<sub>2</sub> 膜でコーティングした状態に対して、およそ 0.2 mm スポット径のドライアイスジェットを 6mm 程度の距離から照射した。この技術は従来では再現性に乏しく、有機物とみられる汚染物質が時々付着する問題があった。本研究において、ノズル内部のオリフィスの目詰まりが無く強いジェットが実現されている状態では不純物のクラスターが存在せず、純粋な CO<sub>2</sub> 粒子による処理となっていることが推測される結果が得られ、再現性良くクリーンなプロセスを実現できるようになった。

図 1 に作成した試料の光学顕微鏡写真を示す。図の左端に GSG プロブを接触させ、線路に平行に磁場を印可した。GSG プロブ端までは校正基板を用いて測定直線に攻勢を行った。周波数は 0GHz ~ 30GHz で掃引し、FMR 信号以外のインピーダンスが測定中に再現するように注意深く測定を行い、異なる試料間でも、ほぼ同一のインピーダンスが得られており、異なる試料間のインピーダンスの大きさの比較ができる状態で信号の大きさの大小を議論している。

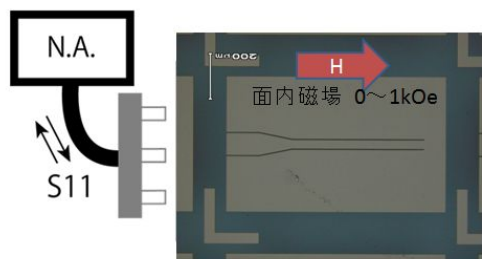


図 1 .作製したコプレーナ線路の光学顕微鏡写真。試料は図のシグナル線上に主に配置した。

#### 4 . 研究成果

作成した試料の写真 ( 図 2 ) を示す。シグナル線上で色の異なる矩形部分に薄膜磁性体が存在している。また、図 3 に測定で得られたインピーダンスの周波数依存性の 1 例を示す。FMR によってピーク構造が得られている。

このような測定を様々な配置、サイズ、形状の試料に対して繰り返した結果、以下のことが分かった。

(1) 信号線のエッジ部分に試料が完全に接している場合、強度が大きく数  $\mu\text{m}$  程度信号線の内部に試料を配置すると 5 分の 1 程度まで

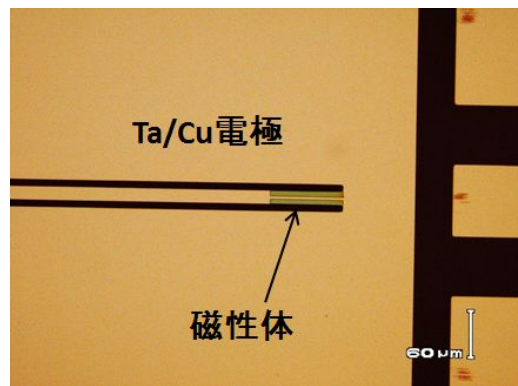


図 2 . 作製した試料の光学顕微鏡写真。信号線のエッジ部分から中心方向に広がるように磁性体が 2 箇所配置されている。

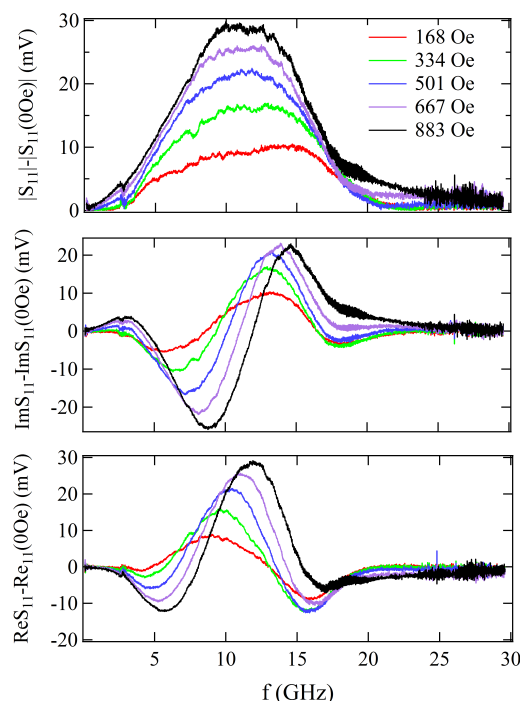


図 3 . 測定で得られた試料の FMR スペクトル。線路に平行に  $550 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  の磁性体を 4 本、CPW エッジ付近に配置した。弱磁場では分離が不十分であって本来のスペクトルとは異なっている。

速やかに信号強度が減少した。

(2) 信号線上のどの位置においてもスペクトルの概形は同一であり、また図の上下 2 本のエッジのどちらも同じ形状のスペクトルを生じる。従って、信号線上ではインピーダンスの変化は磁性体の長さに対して加算的であり、長さに比例してインピーダンスの変化は大きくなる。また測定した周波数帯ではこのサイズでは分布定数的な取り扱いは不要であった。

(3) 信号線幅は狭いほど FMR 信号は大きくな

った。従って細く絞った信号線上に試料を配置すると大きな信号変化が得られる。これは単純に測定試料のインピーダンスの中で最も大きな寄与の部分でFMR信号を生じさせることで測定データに大きく反映されることを表していると考えられる。

(4)磁性体を分割したドット形状とすることでローレンチアの位相が単純になり、虚部がローレンチアン、実部がアンチローレンチアンとなった。一方、信号強度は磁性体の体積密度の減少のため減衰した。一方、信号線のエッジから線路の中心線の方に分割せずにつながった磁性体の形状となっているとインピーダンスの変化は大きくなるが単純にその幅に比例しておらず、複雑な依存性となった。

以上の結果から線路上でできる限り長くエッジ付近に磁性体を集中させた試料が最も大きなインピーダンス変化となった。その結果が図3の測定結果であり、30mVに達する比較的大きな信号変化が得られた。一方、原理的に最も大きな信号変化が得られると期待される状態を想定して、コプレーナ線路だけの試料の表面上に加工前の磁性体薄膜を被せた試料で測定を行うと50mV程度の変化となり、信号線路のエッジ部分で半分以上の信号変化が生じていることが理解できた。

この試料を図4の写真のように上下に重ねてチップ間のS21測定を行った。磁場の無い状態とある状態で比較して差で0.0001dB程度の非常に微小な差ではあるが、何らかの信号のやり取りがなされており、磁性体を用いたデバイス間における信号のやりとりがなされたと考えられる。

最後にアンテナデバイスの作製方法としてドライアイス処理装置について研究を行った。写真に示すように非常に簡便かつ清浄に剥離することが示された。また、研究前に懸念された再現性の無いドライアイスジェット強度や不純物の付着の原因が明らかにされた。原因はノズルの内部の目詰まりに

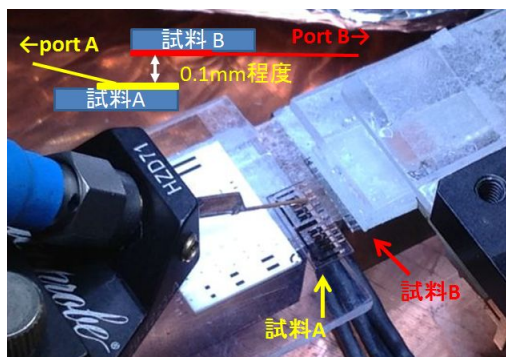


図4. 作成した磁性体を含むデバイスによるアンテナ通信実験の写真。デバイス表面を上下からお互いに重ね合わせS21測定を行った。

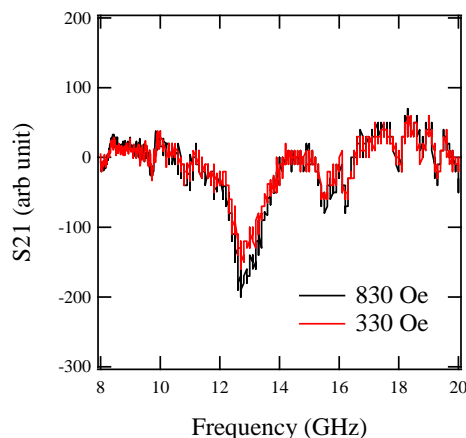


図5. 作成した磁性体を含むデバイスによるアンテナ通信実験の結果。FMRが生じていると考えられる帯域において磁場を印可するとS21にピークが現れ、変化が見られた。

よって液化炭酸ガスの流量が確保されなくなった場合にノズル温度が上昇し、ノズルに固着された不純物が粒子となって基板を汚染するといったメカニズムであると考えられ、ノズル流量の再現性をとることで、流量が弱くなるような細いノズルでも処理を行うことができるようになった。この技術はアンテナ作製のみならず、広くデバイス作製に応用できる成果である。

これらの研究成果によって、導波線路と磁性体パターンの相互作用について理解が深まり、強磁性共鳴状態を利用した近距離磁気アンテナの設計指針が明らかとなった。今後の研究によって、より詳細なアンテナ作製や強磁性共鳴状態を取り扱えるシミュレーターの開発が行えるようになると期待される。

## 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 1 件)

Kousaku Miyake, Yoshimi Hisatsune, Masakiyo Tsunoda, and Masashi Sahashi: “Fabrication of a Current-Perpendicular to Plane Magneto-resistive Device with a Dry Ice Blasting Lift-off Process”: Journal of the Magnetics Society of Japan (査読有), Vol. 39, No. 3, 107-110, (2015) <http://doi.org/10.3379/msjmag.1504R002>

〔学会発表〕(計 1 件)

三宅耕作, 山口明啓, 佐橋政司: “コプラナ線路上の様々な位置に配した磁性体マクロパターンによる VNA-強磁性共鳴の測定: 日本物理学会第70回年次大会: 2015年3月21日 (早稲田大学, 東京)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

6．研究組織

(1)研究代表者

三宅 耕作（MIYAKE, KOUSAKU）  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：20374960