

## 高周波磁界検出用磁気光学インディケータの作製と評価

安達信泰・植松大輔・太田敏孝

名古屋工業大学セラミックス基盤工学研究センター  
〒507-0071 岐阜県多治見市旭ヶ丘 10-6-29

### Synthesis and Characterization of the MO Indicator for the High Frequency Magnetic Field Probe

Nobuyasu Adachi, Daisuke Uematsu, Toshitaka Ota

Ceramics Research Laboratory, Nagoya Institute of Technology  
Asahigaoka 10-6-29, Tajimi, Gifu 507-0071 JAPAN

The magnetic garnet film was investigated as a magneto-optical (MO) indicator for the sensor probe of the high frequency magnetic field generated on the electrical circuits. In order to detect the magnetic field components of the high frequency electromagnetic wave, the ferromagnetic resonance (FMR) phenomena was utilized. The FMR enhances the sensitivity of the MO effect at a selected frequency band in the DC bias magnetic field. For the practical use, the applied magnetic field should be smaller because the conventional electromagnets generate approximately 20 kOe at the maximum. In order to decrease the magnetic field, the large magnetic anisotropy with in-plane of the  $(\text{Bi,Lu})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (110) film was utilized. The film was grown on the  $\langle 110 \rangle$  oriented single crystal  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  substrate by liquid phase epitaxy technique. The FMR field of this film becomes approximately 2 kOe, which is smaller than the case of  $(\text{Bi,Lu})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$  film or the (111) film. The MO enhancement was experimentally recognized up to 20 GHz in the magnetic field of 5 kOe which is easily generated by the conventional electromagnet or permanent magnet.

#### 1. はじめに

我々は、ここ数年、希土類磁性ガーネットの持つ磁気光学効果を利用して、電子回路上に発生する高周波電磁界のうち、磁界成分を検出できるプローブセンサー開発を行っている。希土類磁性ガーネットの発見から磁気光学 (MO) インディケータの応用における概略は、Ref. [1] に示したが、その後、MO インディケータの応用として変動磁界の可視化に取り組んでいる。磁界を視覚化する手法は、電子線を用いたローレンツ顕微鏡や磁気力顕微鏡 (MFM) があるが、前者は導入に多額の費用が必要であること、後者は走査して1枚の画像を得るのに時間が要するために、時間変化する磁束の動的な観察に不向きである。一方、磁気光学効果による手法は、簡便な光学系で構成される装置で安価かつリアルタイム観測も可能である。センサーとしての性能はMO インディケータの材料特性に大きく依存する。極低温では、磁気光学効果が大きな物質としてEuSeやEuSのカルコゲナイト磁性半導体が存在するが、キュリー点は液体窒素温度以下となり極低温領域にしか有効でない。室温で大きな磁気光学効果を示す物質は、希土類磁性ガーネットがキュリー点が500K以上であるので、室温で動作する

MO インディケータとしては現在、最も適した物質である。

磁性ガーネット薄膜は液相エピタキシー法により作製しているが、直流磁界検出のための指針にしていた組成設計は、感度と空間分解能を上げるために、ファラデー回転係数を大きくすること、異方性磁界を小さくすることを基本に考えてきたが、高周波磁界検出では、後述するように、異方性磁界を大きくすることが重要となる。

高周波磁界センサー開発は、近年、環境問題の一つである電磁環境適合性 (Electro-Magnetic Compatibility: EMC) が重要視されていることが背景にある。インターネットや携帯電話を利用した無線通信を中心としたユビキタスネットワーク社会にむけて、通信は多様化され、それに使用される通信周波数帯も、高周波化、ブロードバンド化が進んでいる。しかも、通信機器の小型化も加速され、機器同士はたえず、様々な電磁波にさらされている状況である。このため、機器の誤作動の危険が懸念されている。実際、航空法ではすでに、飛行機の計器類の誤作動を防ぐために、電波を発する携帯電話やパソコンの電源を飛行中に常時切ることが規定されている。総務省は、環境電磁波対策として、生体へのEMC、機器へのEMC、情報セキュリティへのEMCとして、その対策

を進めている [2]。高周波電磁界分布の評価の必要性は、特に機器への EMC に対してますます大きくなっている。ところが、GHz 帯を超えると従来型のループコイルによる電磁界計測は問題が生じることが指摘されていた。すなわち、高い周波数になると、プローブ自身による周辺電磁界分布への擾乱が顕著になる。そこで金属性のプローブの代わりに電気光学結晶や磁気光学結晶等の絶縁性セラミックスを利用して、電気を光信号に変換する、あるいは磁気を光信号に変換するプローブを開発する、といった試みがなされてきた [3-5]。物質が分極されたり、磁化されることによって、結晶の屈折率が変化し、その中を通過する光の偏波面が回転する。その光を偏光板を通して観測すると、電界、磁界の強弱が光の強弱に変換できるしくみであり、この原理自体は直流磁界の MO インディケータと同じである。高周波電磁界観察用に優位な点は、スピンの振る舞いが高速であるため、変動磁界に対して高速応答が期待できることにある。また、絶縁体薄膜を用いることにより、金属ループアンテナのようにプローブ自身が周辺電磁界分布のノイズとなる影響を小さくすることができる点にある。

そこで、まずは直流磁界観察に用いた MO インディケータによって高周波磁界が検出できるかどうかを調べることから研究を始めたところ以下に述べるような問題点があることが判明した。実験は、1本のマイクロストリップライン（細い銅線）上に高周波信号を流し、その真上に MO インディケータを置き、波長 1.3 ミクロンの赤外レーザーを走査させて MO インディケータからの反射光を検出する (Fig.1a)。偏光板を通った反射光の強度分布が磁界分布に相当する。アンペールの法則によれば、マイクロストリップラインの周りに同心円状に磁界が発生する。ファラデー回転は、MO インディケータの面直方向の磁束によって起こるので、銅線の縁をピークに磁界分布が発生すると予想し、実際に 100MHz の高周波シグナルを観察したところ Fig. 1(b) のような強度分布が得られた。しかしながら、入力周波数を GHz 帯に増大させるにつれて、S/N が低下し、10 GHz を超えると

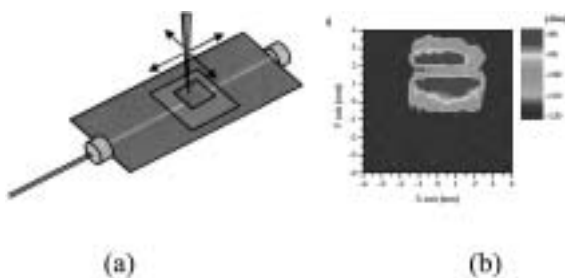


Fig. 1. Example observation of the high frequency magnetic field around the microstripline. The bright part part is the garnet film and dark area inside the film shows the part with large Faraday rotation.

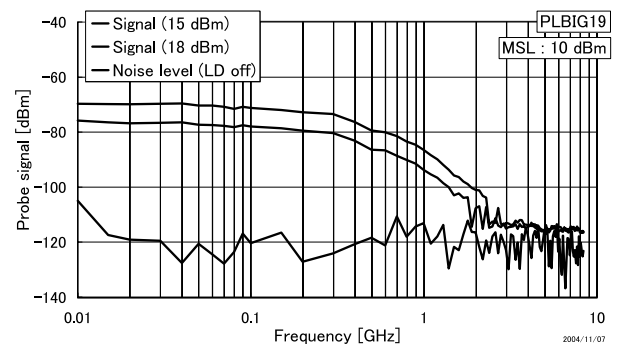


Fig. 2. Frequency dependence of the MO output signal from the MO indicator onto the microstripline. The input power was changed to 15, 16 dB and back ground signal was measured without laser. The incident laser was focused on the point with maximum output signal.

ノイズと同じレベルまで出力が低下した (Fig. 2.)。フェライト材料は、透磁率の減少が GHz 帯に見られる (Snoek の法則) ことは一般的だが、それは、磁壁移動が高周波に追従しなくなるためである。強い磁気異方性が面内にある薄膜の場合、面直方向に関しては磁気モーメントの回転運動による磁化誘起で生じるファラデー効果であれば、GHz 帯においても磁気モーメントの運動は応答できると考えたが、実際の実験ではファラデー回転は観測されなくなった。この問題に対して、高橋らは、磁性ガーネット膜の面内方向にバイアス磁界をかけた状態で、高周波磁界観察を行うと、特定周波数で MO 効果が増大され、画像化できることを報告した [6]。また、MO 効果が増大する周波数は、バイアス磁界の強度に依存することから、選択的に周波数を決めて観測することも可能であることが見出された。

Fig. 3 は、周波数に依存した MO 効果の増大を測定した結果である。実験は、直流磁界用の MO インディケータをマイクロストリップライン上に置き、マイクロストリップラインに高周波を入力することで発生した磁界分

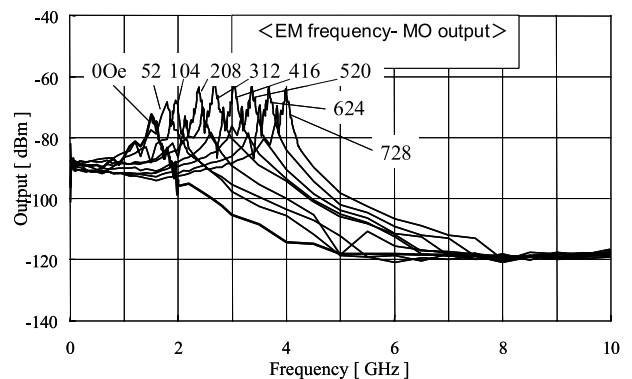


Fig. 3. Frequency dependence of the output signal from the MO indicator onto the microstripline in the applied bias magnetic field.

布を観測する際に Fig. 1(b) に示されるような反射光強度の明るい位置にレーザースポットを固定し、外部バイアス磁界のもとで周波数を変化させて行った。外部磁界が増大するとともに、極大を示すピークは MO 効果がエンハンスされていることを示し、周波数が高周波側にシフトしていく様子が見られる。この現象は、磁性ガーネットの強磁性共鳴 (FMR) に起因すると考えられている。実際に X バンド、Q バンドの強磁性共鳴実験の周波数-共鳴磁界曲線と MO 効果の増大周波数-バイアス磁界曲線を比較すると同一直線状にのることからも裏付けられている。実験で得られた画像から高周波磁界分布を定量的に評価するには、改善すべき点はあるものの、磁気共鳴とファラデー効果を組み合わせることで GHz 帯の高周波磁界を検出することが原理的に可能であることが明らかとなった。次に、センサプローブ開発としての一つの目標値である 30GHz までの高周波の磁界分布を行うための磁性ガーネットに印加は、バイアス磁界は市販の安価な電磁石か永久磁石で行えることが実用上望ましい。そのために、小さなバイアス磁界で磁気共鳴が起こるようなプローブであることが必要となる。そこで、磁性ガーネット薄膜に面内方向に強い磁気異方性を付加することで、異方性磁界のアシストにより強磁性共鳴が起こるような膜合成を目的とした。

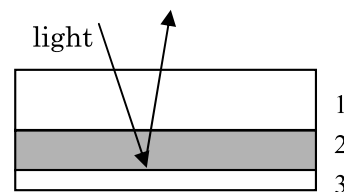
## 2. 実験

MO インディケータの作製には、光学的に優れ、均質な膜を得るのに有利な液相エピタキシー法を用いている。ガーネット組成の酸化物原料のほかにフラックスとして PbO, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を原料として調合し、白金るつぼ中で、700℃ から 900℃ 程度の高温融液を過冷却状態にして、単結晶基板を融液表面に接触させて片面基板上に成膜した。基板には Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (GGG) の単結晶基板を用いた。

組成としては、母体に Lu<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> を選択した。ピスマスが大きいイオン半径を持つために YIG にピスマスを置換する場合に比べて、Y よりイオン半径が小さく非磁性イオンである Lu ベースの母体を用いるほうが、同じ基板を用いる場合、ピスマス置換量を多くしてマッチン

**Table I.** The description of the R parameters.

$R_1 \equiv \frac{Fe_2O_3}{\sum R_2O_3}$	$R_2 \equiv \frac{Fe_2O_3}{M_2O_3}$	$R_3 \equiv \frac{PbO}{B_2O_3}$
$R_4 \equiv \frac{Fe_2O_3 + M_2O_3 + \sum R_2O_3}{Fe_2O_3 + M_2O_3 + \sum R_2O_3 + PbO + B_2O_3 + Bi_2O_3}$		
$R_5 \equiv \frac{R_2O_3}{\sum R_2O_3}$	$R_6 \equiv \frac{PbO}{Bi_2O_3}$	
R : Ion of the c cite (Y, Lu, Bi, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, etc.)		
M : Ion of the a, d cite (Ga, Al, Ge, etc.)		

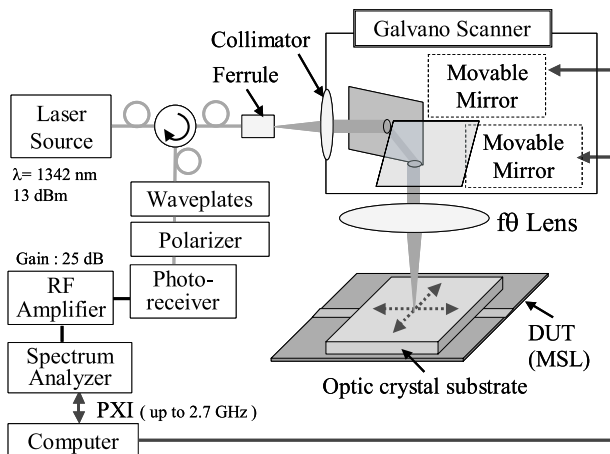


**Fig. 4.** The structures of the MO indicator: 1. GGG substrate, 2. garnet film, 3. Au coat.

グが取れると考えたからである。

融液組成は、Table I に示す R パラメータ [7] をもとに計算した。R<sub>1</sub> は c サイトに入る希土類イオンと a、d サイトに入る Fe<sup>3+</sup> イオンとの比であり、ガーネット相の初晶域やメルトの液相温度に関係する。R<sub>2</sub> はガーネット中の a、d サイトの Fe<sup>3+</sup> を置換する Ga<sup>3+</sup> の量に関係する。R<sub>3</sub> はフラックス中の B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の量を決める。R<sub>4</sub> はメルト中のガーネット成分の割合を表し、R<sub>5</sub> は c サイトの希土類イオンを他のイオンで置換するときの置換量を決める。R<sub>6</sub> はフラックス中の Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の量を決める。

Fig. 4 に MO インディケータの構造を示す。基板の片面に成膜し、反射膜である金薄膜を薄くコートティングする。反射面が接するようにマイクロストリップライン上におき、膜面とは反対側の基板面から赤外線レーザーを入射し、反射光を検出する。磁性薄膜の磁化されている部分を直線に偏光された光が通過すると偏光面が回転する。その後、偏光板を通った光強弱が磁界の大きさに対応する。磁界強度分布を測定する装置の概観図を Fig. 5 に示す。光学徐振台に被測定回路を固定し、光ファイバーを通した赤外線レーザー光 (λ=1.33μm) をガルバノスキャナーで走査させ、その戻り光を再び光ファイバーを通して、サーキュレーターにより受光素子に導き、出力を二次元マッピングする。さらに、バイア



**Fig. 5.** The schematic measurement system of the high frequency magnetic field distributions.

ス磁界を印加する場合は、マイクロストリップラインが配線されている回路基板をはさむように電磁石をセットし、回路基板全体に磁界を印加した。

### 3. 結果と考察

直流磁界の可視化用 MO インディケータでは、面内磁気異方性があり、かつ面直方向の初期磁化曲線の傾きが大きくなるようにするために、鉄サイトを非磁性イオンの Ga で置換した  $(\text{Bi,Lu})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$  の組成を選択した。鉄イオンが希釈されると磁気異方性が弱くなり、面内磁気異方性を持ちながら、面直方向へ磁界をかけたときの初期磁化曲線の傾きが大きくなるために、磁界に対する感度が大きくなるからである。高周波磁界観察で、磁気共鳴を起こすために外部磁界のアシストを期待して、異方性磁界を膜に付与する場合には、逆に鉄イオンによる磁気異方性を十分活かすために鉄イオンサイトの置換はしない指針で成膜を行った。Fig. 6 には、 $\text{Bi}_x\text{Lu}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  と  $\text{Bi}_x\text{Lu}_{3-x}\text{Fe}_y\text{Ga}_{5-y}\text{O}_{12}$  の (110) 膜における強磁性共鳴スペクトルを示す。 $\text{Bi}_x\text{Lu}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  は、鉄が希釈された系に比べ 800 Oe 低い、2kOe 程度の磁界を印加すると共鳴現象が現れることがわかる。

また、結晶磁気異方性も異方性磁界に大きく影響する。磁性ガーネット結晶の磁化容易軸は 111 方向にあるために、一般に光アイソレータの成膜用の基板として汎用されている (111) 基板を用いると面直方向に容易軸を持った膜が成膜される。(110) 面上に成膜すれば 111 方向に等価な 111 方向を膜面内に含めることが可能である。Fig. 7 に異なる面方位の GGG 基板上に成長させた膜の面内方向に磁界をかけたときの強磁性共鳴のスペクトルを示す。(111) 膜、(100) 膜、(110) 膜と順に共鳴磁界が減少するのは結晶磁気異方性の効果と考えられる。

これらの結果から、より小さな外部バイアス磁界で磁気共鳴を起こすための設計指針としては、直流磁界検出

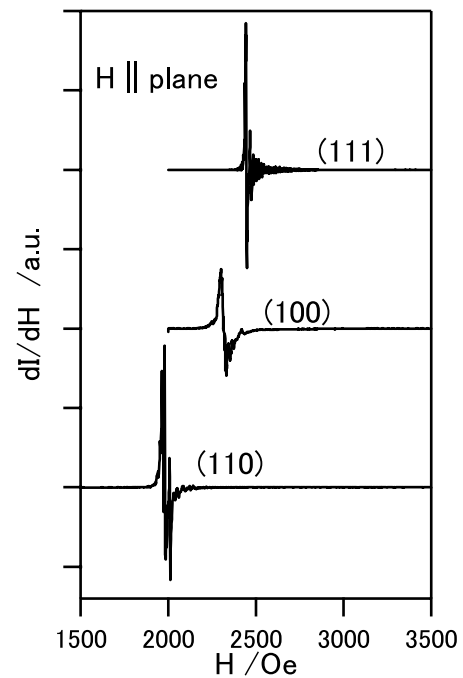


Fig. 7. FMR spectra of the the  $\text{Bi}_x\text{Lu}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (BLIG) grown on the (110), (100) and (111) GGG substrate.

用に適した組成  $(\text{Bi,Lu})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$  よりも鉄サイトを非磁性イオンで置換をしない組成である  $\text{Bi}_x\text{Lu}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 、結晶成長面としては (110) 面を選択するほうが適していると考えられる。

この  $\text{Bi}_x\text{Lu}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (110) 膜を用いて試作した MO インディケータをマイクロストリップライン上に置き、マイクロストリップライン上に発生する高周波磁界の MO 効果による反射光の出力に関して、周波数依存性を測定した結果を Fig. 8 に示す。Fig. 3 の結果と比較すると、728 Oe の直流バイアス磁界中では 4 GHz 付近において、シャープな MO 効果の増大が観測されるのに対して、

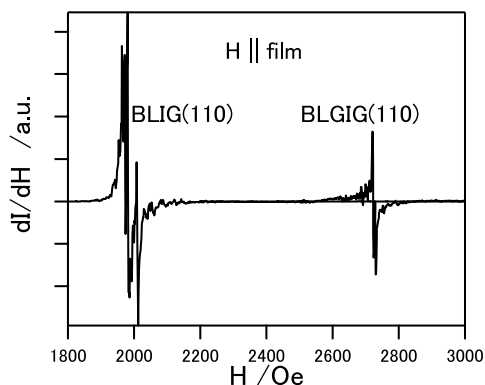


Fig. 6. FMR spectra of the the  $\text{Bi}_x\text{Lu}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (BLIG) and the  $\text{Bi}_x\text{Lu}_{3-x}\text{Fe}_y\text{Ga}_{5-y}\text{O}_{12}$  (BLGIG) grown on the (110) GGG substrate.

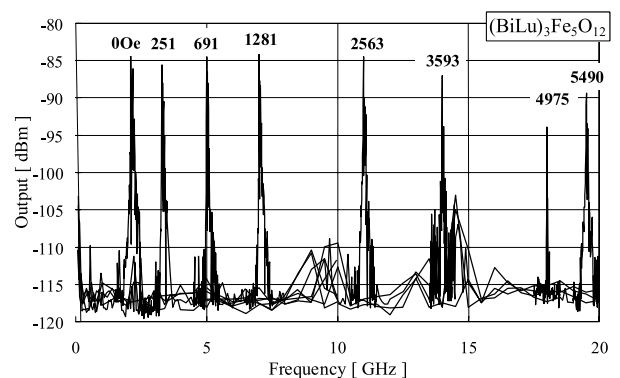
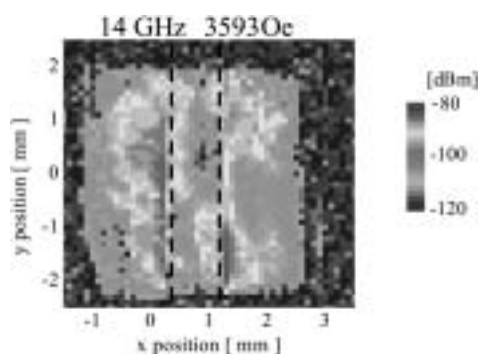


Fig. 8. Frequency dependence of the output signal from the  $\text{Bi}_x\text{Lu}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (110) MO indicator onto the microstrip line in the applied bias magnetic field.



**Fig. 9.** The observation of the high frequency magnetic field of 14 GHz generated around the microstrip line in the applied magnetic field ( $H=3593$  Oe). The dashed line indicates the position of the microstrip line

Fig. 8 の結果では、691 Oe のバイアス磁界中で、5GHz 付近において MO 効果の増大が観測されている。すなわち、膜の異方性磁界のアシストで小さなバイアス磁界でより高い高周波磁界の検出が可能となっている。また、この MO 効果による磁界検出は、20GHz のさらに高い高周波磁界においても、ほとんど感度を減少することなくピーク観測できることがわかる。20GHz のときに印加垂した直流磁界バイアスが 5.5 kOe であること、鉄心電磁石が発生できる最大磁界が 20 KOe 程度であることを考えると市販の電磁石、あるいは永久磁石を磁界発生源に用いて、測定系を組み立てることは十分可能であると考えられる。

$\text{Bi}_x\text{Lu}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (110) 膜を用いて試作した MO インディケータにより、15 GHz の高周波をマイクロストリップラインに入力し、発生した磁界分布を観測した例を Fig. 9 に示す。点線部分が MO インディケータの下のマイクロストリップラインの位置を表し、明るい輪郭が 5 mm 角に近い MO インディケータの形状を表している。点線付近の色の濃い部分が反射光強度の大きな部分で MO 効果が現れている部分に相当する。理論上は、マイクロストリップラインを中心とした同心円状に磁界が発生する。MO 効果として観測できる磁界成分は膜に対して垂直方向の成分であるので、ストリップラインの両端が強い磁界分布となる。Fig. 9 では、両端が強い傾向を示しているものの、分布強度は不均一であり、膜特性の

検討と改善が課題として残されている。

#### 4. まとめ

LPE 法により高周波磁界観察用の MO インディケータを作製した。磁気異方性を利用した設計指針に基づき、マイクロストリップライン上に発生する 20GHz の高周波磁界分布を FMR と MO 効果を組み合わせて二次元的に観測できるようになった。

#### 謝辞

本研究は情報通信研究機構連携研究部門仙台リサーチセンターにおける研究プロジェクト「電磁波セキュリティを確保するための高感度電磁波測定技術の研究開発」との共同研究によるもので、高周波磁界観察は、仙台リサーチセンターの太田博康主席専門研究員、高橋正慎特別研究員（太陽誘電（株））らの協力のもと行われたものです。プロジェクトリーダーである荒井賢一東北大学名誉教授には、全般にわたって有意義な議論をしていただきました。また、磁気共鳴の測定には、自然科学研究機構分子科学研究所の藤原基靖博士他技術職員の方々の協力を得ました。ここに感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] N. Adachi, D. Uematsu, T. Ota, T. Okuda, T. Machi, N. Koshizuka, Annual report of the Ceramics Research Laboratory, Nagoya Inst. Tech., Vol. IV, pp.21 (2004)
- [2] NICT homepage: <http://www2.nict.go.jp/y/y224/general/general.html>
- [3] E. Yamazaki, H. Park, S. Wakana, M. Kishi, M. Tsuchiya, Journal of Applied Phys. **41(7B)**, L864-L866 (2002).
- [4] N. Kuwabara, K. Tajima, R. Kobayashi, F. Amemiya, IEEE Trans. Electromagn. Compat. **34**, pp.391 (1992).
- [5] M. kanda, K. D. Masterson: Proc. IEEE **80**, pp.209 (1992)
- [6] M. Takahashi, H. Ota, N. Adachi, K. I. Arai, IEICE Tech. Rep., vol. 106, no. 579, EMCJ2006-129, pp. 77-82 (2007).
- [7] S. L. Blank, J. W. Nielsen, Cryst. Growth **17**, pp.302-311 (1972).