

**MOD 法による薄膜スパイラルアンテナ結合 VO_x
マイクロボロメータ検出素子の製作に関する研究**

防衛大学校理工学研究科後期課程
電子情報工学系専攻・エレクトロニクス工学分野

レー・ゴク・ソン

平成 25 年 1 月

目次

第1章 序論

1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	4
1.3 論文の構成	4

第2章 MOD法によるSiO₂/Si基板上へのVO_x薄膜の作製および特性評価

2.1 序言	7
2.2 MOD法	7
2.3 V ₂ O ₅ 薄膜の作製	9
2.3.1 作製方法	9
2.3.2 作製条件の最適化	10
2.4 VO _x 薄膜の作製および特性評価	18
2.4.1 減圧熱処理によるVO _x 薄膜の作製	18
2.4.2 電気的特性の評価および考察	21
2.5 結言	25

第3章 MOD法による石英基板上へのVO_x薄膜の作製および特性評価

3.1 序言	27
3.2 V ₂ O ₅ 薄膜の作製	27
3.3 VO _x 薄膜の作製および特性評価	29
3.3.1 減圧熱処理によるVO _x 薄膜の作製	29
3.3.2 SiO ₂ /Si基板と石英基板上に作製されたVO _x 薄膜の特性比較	31
3.3.3 抵抗温度係数の評価	34
3.4 結言	35

第4章 薄膜スパイラルアンテナの解析および設計

4.1 序言	36
4.2 スパイラルアンテナ	36
4.3 スパイラルアンテナの数値解析	37

4.3.1	任意形状アンテナにおける積分方程式	37
4.3.2	モーメント法による電流分布の数値解析	39
4.3.2	スパイラルアンテナの放射電磁界	41
4.4	薄膜スパイラルアンテナの設計	43
4.5	結言	48
第 5 章	薄膜スパイラルアンテナの製作および受信特性	
5.1	序言	50
5.2	薄膜スパイラルアンテナの製作	50
5.3	100 GHz 帯での受信特性の測定および評価	52
5.3.1	測定系	52
5.3.2	アンテナ受信特性の測定および評価	53
5.4	結言	57
第 6 章	薄膜スパイラルアンテナを結合した VO_x マイクロボロメータ検出素子	
6.1	序言	59
6.2	ボロメータの動作原理	59
6.3	検出素子の製作	60
6.4	100 GHz 帯での検出特性の測定および評価	62
6.5	結言	66
第 7 章	結論	68
謝辞	72
参考文献	74
発表実績	86

第1章 序論

1.1 研究背景

テラヘルツ波は、電波と光波の周波数の間に位置し、100 GHz～10 THzの周波数領域で定義されている電磁波である[1]。このテラヘルツ波は、X線のエネルギーの約100万分の1とエネルギーが低いいため人体への影響が少ない[2]、紙、プラチック、発包材、セラミックスなどに対し大きな透過性をもち[3],[4]、水素結合による分子間相互作用や回転運動、フォノンの格子振動、巨大分子の低振動モードやねじれ振動などに相当するエネルギーをもつため非常に水に敏感である[5]などの特性をもつ。このような特性により、テラヘルツ波は、基礎科学分野のみならず分光、医療診断、イメージング、情報通信など広い分野への応用が期待されている[6]。

このような応用分野で用いられる検出器に注目すると、その代表的なものに量子型検出器、熱型検出器、電磁波直接検出器がある。量子型検出器は、半導体中の束縛エネルギー準位にあるキャリアが、テラヘルツ波を光子として吸収することにより伝導帯あるいは価電子帯に遷移し、遷移した自由キャリアを信号電流として取り出して検出する。量子型検出器には、半導体中の浅い不純物準位を用いる不純物半導体光伝導検出器[7]や量子井戸構造のエネルギーバンドにおけるサブバンド間の遷移を利用する量子井戸光伝導検出器[8]などがある。これらの検出器は、非常に高感度であるが、低温に冷却する必要がある。一方、熱型検出器は、電磁波の照射による温度上昇に伴う抵抗の変化などを利用しており、熱電効果を利用するサーモパイル検出器[9]、極性結晶の自発分極や誘電率あるいは電気抵抗の温度変化を用いる焦電検出器[10]、誘電ポロメータ[11]、抵抗ポロメータ[12]などがある。一般的に、これらの検出器は広帯域動作であるが、感度が低い問題がある。また、電磁波直接検出器は、入射光の周波数や位相に直接応答可能な検出素子であり、素子の電流－電圧特性の非線形性を利用している。この代表的な検出器としては、ショットキーバリアダイオード[13]あるいは超伝導体を用いたSISミキサ[14]などがある。これらの素子は高速での応答が可能であるが、素子の構造が複雑である。

このような検出器の中で、私は、最近注目されている爆発物や刃物の探知、郵便物の安全検査などセキュリティー対策に利用されるテラヘルツイメージングへの応用を目指した検出器を考えている。そのためには、信号強度の検出に対応していること、

またイメージングアレー素子の実現のためには歩留まり良く多素子を製作する必要があり、構造が簡単であることが求められる。さらには、読み出し回路との接続ならびに動作コストの低減のために室温動作することも重要である。このように考えると熱型検出器、特に誘電ボロメータなどと比べると比較的高い感度が得られる抵抗ボロメータ[15]がイメージング応用に適した検出器の候補の1つと考えられる。しかし一般に、ボロメータ検出器は電磁波を吸収するための吸収体を用いており、吸収体の温度変化をボロメータで検出するため電磁波に対する受信感度が小さい問題がある[16]。この問題を解決する直接的な方法として、吸収体の面積を大きくすることが考えられるが、面積の増加に伴いボロメータのサイズも大きくなり、限られた空間での多素子によるアレー化が困難となる[17]。そのため、ボロメータのサイズを増大することなく効果的に電磁波を受信する方法として、吸収体の代わりにアンテナを用い、アンテナにより得られた高周波電流を直接ボロメータに供給し電磁波を検出するアンテナ結合素子が有効な手段の一つと考えられる[18]-[22]。

このような理由により、本研究ではアンテナ結合型ボロメータ検出素子に注目した。本研究の特徴は、ボロメータ材料の選択とその作製方法にある。まず、ボロメータ材料について考えてみる。ボロメータ材料を評価する最も重要な指標の一つに抵抗温度係数 (Temperature Coefficient of Resistance; TCR) がある[23]。最も良く用いられている代表的なボロメータ材料にBi, Ti, Te がある。これらの室温でのTCRは0.1~0.4 %/K [24]- [26]である。また、その他の材料としてシリコン多結晶, Nb₅N₆があるが、それらのTCRはそれぞれ~0.5 %/K [27], ~0.9 %/K [23]であり、いずれも1 %/K 以下の低い値である。これらより高い~3 %/K のTCRをもつ材料として単層カーボンナノチューブを用いたボロメータ[28]があるが、他のボロメータ材料と比べると製作ならびに取り扱いが困難になる。これらに対し、本研究で取り上げた2酸化バナジウム (VO₂) は、室温付近において2~6 %/K のTCRをもち[29]-[31], Biなどの金属ボロメータと比べて一桁以上高く、また単層カーボンナノチューブを利用したボロメータと比べても2倍程度高い値を示している。したがって、VO₂をボロメータ材料に使用することにより、高い検出感度が期待できる。次に、VO₂薄膜の作製方法について述べる。VO₂薄膜の作製方法としては、これまで反応性スパッタ法[29],[32],[33], Pulsed Laser Decomposition (PLD) 法[34],[35]などが主に用いられてきた。これらの成長装置はそれぞれ長所・短所を持ち合わせているが、高真空を必要とするため総じて装置が大掛かりとなり、薄膜作製コストも高

くなる。これに対し、本研究で注目した有機金属分解 (Metal-Organic Decomposition; MOD) 法[36]-[40]は、目的とする金属酸化物の組成に応じたモル比で構成される有機金属化合物を全て1つの有機溶媒に溶かし込んだ溶液 (MOD溶液) を基板上に塗布し、焼成することにより薄膜を得る方法である。そのため、スパッタ法やPLD法とは異なり高真空装置を必要とせず、低コストで大面積での薄膜の作製が可能となり、組成の制御性にも優れた薄膜成長法である。さらに、MOD法によるVO₂薄膜の作製方法について考えてみる。バナジウム (V) は価数が2~5を取り、多種の酸化物を構成するため、VO₂の組成比を化学量論比に制御することが難しく、MOD法によりVO₂薄膜を直接かつ安定に作製することが困難である。そこで、本研究ではまず、大気圧下の焼成で容易にかつ安定に化学量論的組成比が得られるV₂O₅薄膜をMOD法により作製し、その後、V₂O₅薄膜を還元することによりVO₂薄膜を作製する方法を採用した。また、V₂O₅薄膜を還元する方法としてはSO₂ガス[41]あるいはH₂ガス[42]などの還元剤を用いる方法や、減圧雰囲気中で焼成する方法[43],[44]などがある。本研究では有毒ガスなどの使用を避け、安全な環境で実験を行うことができる減圧熱処理法を取り入れ、VO₂ボロメータ薄膜を作製する方法を採用した。これまで、このMOD法によりVO₂薄膜を作製した報告例はほとんどなく、ボロメータ検出器への応用を目指した高いTCRをもつVO₂薄膜をMOD法で実現することは非常に興味深く意義があるものと考えられる。ただし、VO₂の組成のみで構成される薄膜を作製することは上記の理由により困難であり、作製した薄膜内にはVO₂組成とそれとは異なる組成 (例えば、V₃O₇, V₄O₉など) が混在するケースが多い[45],[46]。そのため、本論文ではいくつかの組成が混在する薄膜をVO_xと表記する。

最後に、アンテナ結合型ボロメータ検出素子に用いるテラヘルツアンテナについて考えてみる。アンテナとしては、導波管構造を用いたアンテナと誘電体基板上へ製作する薄膜アンテナと大きく2つに分けられる。しかし、高い周波数では導波管構造の製作は困難である[47]ためテラヘルツ帯では誘電体基板上に製作する薄膜アンテナが良く用いられる。テラヘルツ帯で用いられる薄膜アンテナに、スロットアンテナ[48],[49]、ボウタイアンテナ[50]、対数周期アンテナ[51]などがある。スロットアンテナは、比較的高い利得を有するものの狭帯域である。逆に、ボウタイアンテナ、対数周期アンテナは広帯域であるが、利得は低くなる。また、対数周期アンテナの放射パターンと入力インピーダンスは、周波数に対して周期的に変動する。一方、本研究で応用を目指すテラヘルツイメージングなどに利用される電磁波は、様々な偏波面を有しているた

め、円偏波特性をもつアンテナが効果的である。また、比較的高いアンテナ利得を保ちつつ広帯域動作が得られ、さらにアレー素子を実現するにはアンテナ面に対し垂直な指向性をもつことが望まれる。このような理由により本研究ではスパイラルアンテナ[52]-[56]を採用した。また、スパイラルアンテナは自己補対構造をもつため定インピーダンス特性をもち、これはデバイスを設計する上でも大きな利点となる。

以上により、本研究ではMOD法による薄膜スパイラルアンテナを結合したVO_xボロメータ検出器を取り上げることにした。

1.2 研究目的

本研究では、テラヘルツイメージングへの応用を目指した高感度な検出素子の実現に向け、MOD法によりVO_xボロメータ薄膜を作製し、その薄膜の有用性を薄膜スパイラルアンテナ結合VO_xマイクロボロメータ検出素子の製作により実証することを目的とした。そのため、本研究では以下の3項目を検討する。

- (1) MOD法によりアンテナ結合素子に適用可能な高いTCRをもつVO_xボロメータ薄膜を作製する。
- (2) 100 GHz帯で動作する薄膜スパイラルアンテナの設計・製作を行い、アンテナ特性を実験的に明らかにし、アンテナ結合素子への適用性を検討する。
- (3) 薄膜スパイラルアンテナを結合したVO_xマイクロボロメータ検出素子を製作し、受信特性の評価を通じてMOD法により作製したVO_xボロメータ薄膜の有用性を検証する。

1.3 論文の構成

本論文は1章の序論、2章から6章までの本論、7章の結論から構成されている。本章に引き続き、第2章、第3章では、まずMOD法によるVO_x薄膜の作製と特性の評価について述べる。本研究では、薄膜作製の基板としてVO_x薄膜の作製に最も良く用いられている基板の1つであるSiO₂/Si基板とテラヘルツ帯でのアンテナ結合素子を製作するのに適した石英基板を用いた。そこで、第2章では、MOD法によるSiO₂/Si基板上へのVO_x薄膜の作製について述べる。具体的には、まずMOD法の概要を述べ、次に、V₂O₅薄膜の作製としてMOD溶液の基板への塗布方法、基板の焼成プロファイルについて述べ、焼成プロファイルのパラメータである焼成温度、MOD溶液の塗布回

数，焼成時間ならびに焼成回数などに注目しながら SiO_2/Si 基板上への V_2O_5 薄膜の作製における作製条件の最適化を行う。続いて，得られた最適条件で作製した V_2O_5 薄膜を酸素雰囲気中で減圧熱処理することにより VO_x 薄膜を作製し，酸素圧力，熱処理温度，時間を変化させながら VO_x 薄膜の特性評価を行う。また，本章では，得られた薄膜と VO_2 バルク単結晶の電気的特性の違いについて詳しい考察を加えている。続いて，第 3 章では，MOD 法による石英基板上への VO_x 薄膜の作製について述べる。第 2 章で得られた最適な条件で V_2O_5 薄膜を石英基板上に作製し， V_2O_5 薄膜を減圧熱処理することにより VO_x 薄膜を作製し，特性を評価する。最後に， SiO_2/Si 基板と石英基板上に作製した VO_x 薄膜の特性を比較する。

第 4 章，第 5 章では，アンテナ結合素子に適用する薄膜スパイラルアンテナについて述べる。第 4 章では，理論的な考察を中心としたアンテナの解析および設計について述べる。まず，テラヘルツ帯で良く用いられるアンテナをいくつか取り上げ，それらのアンテナとスパイラルアンテナを比較検討することによりスパイラルアンテナの特色を明らかにする。次に，任意形状アンテナにおける電流分布を与える積分方程式をスパイラル形状のアンテナに適用し，被積分関数に含まれる電流分布をモーメント法で数値的に解析する。その後，スパイラルアンテナ上の電流分布をもとにベクトルポテンシャルを求め，それによる遠方での放射電磁界を計算する。また，本研究ではアンテナは誘電体基板上に設置されているため基板の放射電磁界に与える影響を imaging force モデルを用いて解析している。最後に，周波数 75～110 GHz で動作するスパイラルアンテナを得るための設計について述べる。本研究では，アンテナ形状は，2 アームアルキメデス型のスパイラルアンテナとした。第 5 章では，第 4 章で設計したスパイラルアンテナの製作および受信特性評価について述べる。本章では，製作した薄膜スパイラルアンテナの受信特性を実験的に明らかにすることを目的としている。そのため，検出器としては製作が容易な Bi マイクロボロメータをアンテナ中央に配置した素子を製作している。まず，薄膜スパイラルアンテナの製作プロセスについて述べ，続いて製作したアンテナの 100 GHz 帯でのアンテナパターン，検出電圧の基板厚さ依存性ならびに周波数帯域などのアンテナ受信特性を実験的に明らかにし，アンテナ結合素子への適用性を検討する。

第 6 章では，これまで得られた MOD 法により石英基板上に作製した VO_x 薄膜と 100 GHz 帯での受信特性を評価してきた薄膜スパイラルアンテナを用いて薄膜スパイラル

アンテナ結合 VO_x マイクロボロメータ検出素子を製作する。まず、一般的なボロメータの動作原理について述べ、本章で評価する DC 感度あるいは検出感度の定義を明らかにする。次に、光露光装置と電子ビーム露光装置を用いて素子を製作する。最後に、製作した素子の DC 感度ならびに 94 GHz における検出感度を Bi マイクロボロメータと比較することにより素子の特性を評価し、MOD 法により作製した VO_x ボロメータ薄膜の有用性を検証する。

第 7 章では、本研究で得られた結果をまとめるとともに、本研究で製作した薄膜スパイラルアンテナ結合 VO_x マイクロボロメータ検出素子のテラヘルツイメージングへの応用に向けた課題ならびに将来展望について考察し結論とする。

第2章 MOD法によるSiO₂/Si基板上へのVO_x薄膜の作製および特性評価

2.1 序言

本研究では、MOD法によりVO_xボロメータ薄膜を作製し、同薄膜の有用性をアンテナ結合素子により実証することに主眼を置いている。そのため、MOD法により高いTCRをもつ薄膜を作製する必要がある。特に、VO₂の作製方法としてMOD法によりV₂O₅薄膜を作製し、同薄膜を酸素減圧下で還元熱処理することによりVO₂を得る方法を採用している。そこで、まず結晶性の良いV₂O₅薄膜を得るための作製条件の最適化を行う必要がある。また、減圧下における還元熱処理では、できるだけVO₂組成の均一性の高い薄膜を得るための還元条件の最適化が必要である。一方、VO_x薄膜を作製する基板について考えてみると、その代表的なものにサファイア(Al₂O₃)基板[32],[33],[57]、Si基板表面を酸化処理したSiO₂/Si基板[57]-[60]などがある。本章における実験では、基板の劈開が容易で、安価に手に入れることのできるSiO₂/Si基板を用いた。

本章では、まず、代表的ないくつかの薄膜成長法について述べ、それらの成長法とMOD法を比較しながらMOD法の特徴を明らかにする。次に、MOD法の作製条件であるMOD溶液の塗布回数、焼成温度、焼成時間などを変化させながらSiO₂/Si基板上へV₂O₅薄膜を作製し、X線回折(X-Ray Diffraction; XRD)による2θ/θ特性および走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope; SEM)による表面モフォロジーの評価により作製条件を最適化する。続いて、減圧熱処理条件である熱処理圧力、熱処理温度、熱処理時間を変化させながらV₂O₅薄膜を還元する。これにより得られたVO_x薄膜を2θ/θ特性、SEMおよび原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope; AFM)によるモフォロジー特性、抵抗-温度(Resistance - Temperature; R-T)特性により評価し、減圧熱処理条件の最適化を行い、高いTCRをもつVO_x薄膜の作製を目指す。さらに、本実験で得られたVO_x薄膜のR-T特性では、半導体相から金属相への相転移を起こす相転移温度(T_c)、相転移にともなう抵抗変化、ヒステリシス特性における温度幅(ΔT)がVO₂バルク単結晶と比べて異なるためこの理由について考察を加える。

2.2 MOD法

一般に、薄膜の作製方法は、気体化した物質から作製する気相法と液体化した物質

から作製する液相法に大きく分けられる。気相法は、さらにレーザ光や電子もしくはイオンビームなどを用いて薄膜材料を直接気化して薄膜化する物理気相成長 (Physical Vapor Deposition; PVD) 法と薄膜構成原子を含む化合物ガス原料の化学反応を利用して薄膜化する化学気相成長 (Chemical Vapor Deposition; CVD) 法に分けられる。PVD法としては、第1章で述べたスパッタ法、PLD法に加えて分子線成長 (Molecular Beam Epitaxy; MBE) 法[61]、電子ビーム蒸着法 (Ion-Beam Enhanced Deposition; IBED) [58],[59]などがある。また、CVD法は、化学反応のためのエネルギーを何から得るかによって、あるいは、原料ガスの相違によって、熱CVD法[62]、プラズマCVD法[63]、光CVD法[64]、有機金属気相成長 (Metal-Organic Chemical Vapor Decomposition; MOCVD) 法[65]などに分類される。熱CVD法は原料ガスを適当なキャリアガスにより反応容器へ導き、高温の基板表面で化学反応をおこさせ、目的の膜を作製する方法である。プラズマCVD法は原料ガスをプラズマ状態にし、活性な励起分子、ラジカルイオンなどを生成させ、化学反応を促進する方法である。光CVD法は光を化学反応のエネルギーとして用いるCVD法である。MOCVD法は原料ガスに炭素-金属結合をもつ有機金属化合物を用いるCVD法である。

一方、MOD法は、溶剤に溶解させた金属塩を用いる液相法の一つである化学溶液堆積 (Chemical-Solution Deposition; CSD) 法[66]に属し、特に金属塩に有機金属化合物を用いるものがMOD法と呼ばれる。また、同じ液相法に分類されるゾルーゲル (Sol-Gel) 法[67]は、一般に金属アルコキシドからなるゾルを加水分解・重縮合反応により流動性を失ったゲルとし、このゲルを加熱して酸化物を得る方法である。ゾルーゲル法は、MOD法と同様に原料が安価に手に入る利点はあるが、金属アルコキシドから出発してゲルを得るために多くの化学反応プロセスを必要とし、薄膜の作製の度にこれらの合成を行う必要がある。これに対しMOD法は、MOD溶液を基板に塗布し乾燥させるだけでゲル化が可能であり、ゲルを得るための加水分解・重縮合反応プロセスを全く必要としない。さらにMOD溶液は、比較的長期保存が可能であり、薄膜の作製の度に溶液の合成を行う必要もない。

次に、MOD法の薄膜作製プロセスの概要について述べる。図 2.1 に示すように、まず、MOD溶液をスポイドなどにより基板上に滴下し、スピンドコーティングにより溶液を均一に塗布する。次に、有機金属を溶かし込んでいる有機溶媒を除去するためプリベーキングを行い、乾燥させる。次に、試料を 400~500°C の温度で仮焼成すること

により有機金属を分解して金属酸化物で形成されるプリカーサ薄膜を作製し、続いて 600~800°C 程度の温度で本焼成することにより結晶化された酸化物薄膜が得られる。また、この MOD 溶液の塗布回数、スピコーティングの回転数や時間を変化させる、あるいは全体の焼成のプロセスを繰り返すことにより膜厚を制御することができる。このプロセスからもわかるように MOD 法は、スパッタ法や PLD 法などの気相成長法と比較して真空装置を必要としないことが大きな特徴の 1 つである。そのため、装置も大掛かりなものにならず安価に薄膜が作製できる。また、MOCVD 法などでは化合物の組成制御が難しいという問題があるが、MOD 法では薄膜の組成比に応じたモル比で構成される有機金属を全て一つの有機溶媒に溶かし込んだ溶液を用いるため、所要の組成比が得られやすい。さらに、大面積な基板でも MOD 溶液を均一に塗布・焼成ができるため大面積薄膜を得ることが可能である。このように、MOD 法は、他の薄膜成長法と比べて多くの利点を有している。

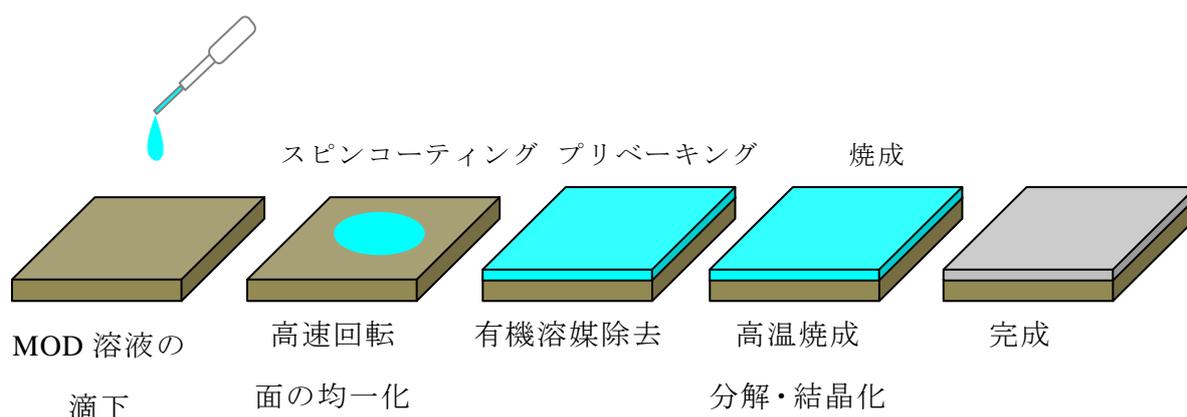


図 2.1 MOD 法による薄膜作製プロセスの概略

2.3 V₂O₅ 薄膜の作製

2.3.1 作製方法

本項では、MOD 法による V₂O₅ 薄膜の作製方法について詳しく述べる。薄膜の作製プロセスを図 2.2 に示す。本研究では、カルボン酸金属塩 (carboxylates) を酢酸 n-ブチル溶剤に溶かし込んだ高純度科学研究所製の MOD 溶液 (V-02) を用いた。また、SiO₂/Si 基板は、n-Si(100) 基板を有機洗浄した後、1,000°C で 10 時間酸化処理することにより作製した。まず、MOD 溶液を SiO₂/Si 基板に垂らし、4,000 rpm, 30 秒間スピコーティングを行い、均一に溶液を塗布した。その後、120°C で 2 分間のプリベーキングに

より有機金属を溶かし込んでいる有機溶媒を除去し、再び MOD 溶液を塗布してプリベークする操作を m 回繰り返した。次に、試料をアルミナの基板ホルダーの上に載せ、ホットウォール型の横型アニール炉に設置した。その後、図に示すように、基板温度を室温 (T_r) から 450°C まで $20^\circ\text{C}/\text{min}$ の昇温レートで上昇させ、 450°C で 15 分間、酸素 1 気圧の雰囲気中で仮焼成し、プリカーサ薄膜を作製した。仮焼成は、有機金属を分解し、アモルファス状の金属酸化物を得るための焼成プロセスである。一般に、有機金属は $400\sim 500^\circ\text{C}$ で分解されることが知られており、本実験では 450°C とした。この仮焼成に引き続き、基板温度を本焼成温度 (T_f) まで $7^\circ\text{C}/\text{min}$ の昇温レートで上昇させ、酸素 1 気圧の雰囲気中で t_f の時間本焼成を行い、その後 $7^\circ\text{C}/\text{min}$ の降温レートで温度を減少させた。そして、基板を取り出した後、再び MOD 溶液を塗布して焼成する操作を n 回繰り返した。本論文では、MOD の塗布回数を m 回、本焼成を n 回行った場合を $(m \times n)$ と表記する。

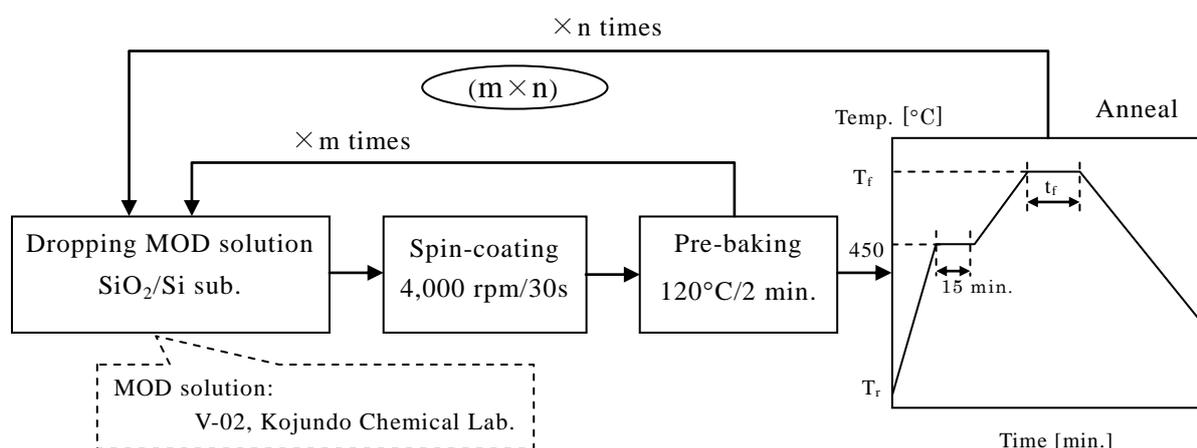


図 2.2 MOD 法による V_2O_5 薄膜の作製プロセス

2.3.2 作製条件の最適化

本項では、図 2.2 に示した V_2O_5 薄膜の作製プロセスにおいて、薄膜作製条件である本焼成温度 (T_f)、MOD 溶液の塗布回数 (m)、本焼成時間 (t_f) ならびに焼成回数 (n) を変化させながら V_2O_5 薄膜を作製し、XRD による $2\theta/\theta$ 特性ならびに表面モフォロジー特性の評価を通じて薄膜作製条件を最適化する。

(1) 本焼成温度の最適化

最初に、 V_2O_5 薄膜を作製するにあたり、MOD の塗布回数を $m = 1$ 回、本焼成を $n = 1$ 回とする (1×1) の条件に固定し、本焼成温度 T_f を $550\sim 660^\circ\text{C}$ まで変化させて薄膜を

作製した。本焼成時間 t_f は 30 分一定とした。図 2.3 に作製した薄膜の $2\theta/\theta$ 測定における V_2O_5 (001) の X 線回折強度と T_f の関係を示す。 T_f が上がるほど、X 線回折強度は強くなり、 $T_f = 650^\circ\text{C}$ で最も強い X 線回折強度を示した。しかし、さらに 660°C まで温度を上げると急激にその強度は減少した。また、図 2.3 で最大の回折強度が得られた $T_f = 650^\circ\text{C}$ で作製した V_2O_5 薄膜の $2\theta/\theta$ 特性を図 2.4 に示す。スパッタ法により作製した V_2O_5 薄膜は、主に (001) による回折ピークが得られるとの報告がある[68]。MOD 法を用いた本実験においても (001), (002) 面のみが明瞭に観測され、良好な軸配向特性が得られた。

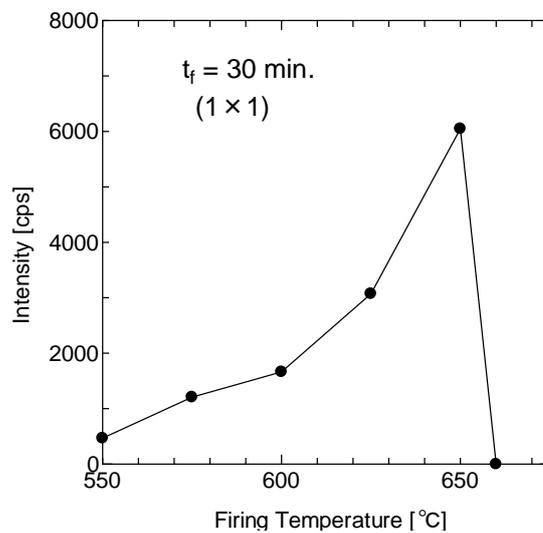


図 2.3 V_2O_5 (001) の X 線回折強度と本焼成温度の関係

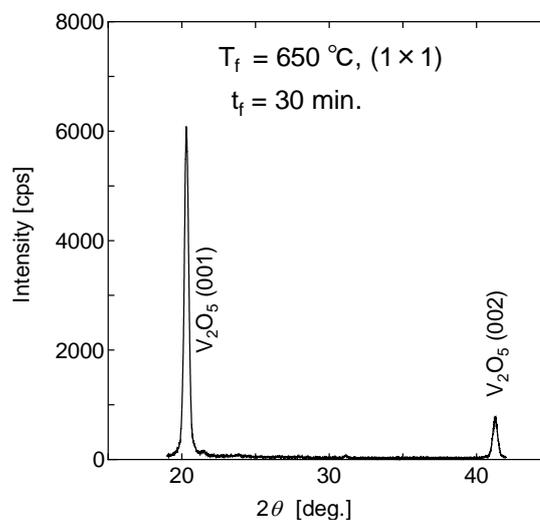


図 2.4 XRD による $2\theta/\theta$ 特性

さらに、図 2.5 に T_f を変化させて作製した V_2O_5 薄膜の倍率 2,000 倍での表面 SEM 写真を示す。(a)の $T_f = 550^\circ\text{C}$ の場合は、ほんのわずかに黒色の結晶が見られるものの明瞭なグレインが観測されず、図 2.3 においても回折強度が非常に弱いことから十分に結晶化されていないことがわかる。一方、(b)の $T_f = 650^\circ\text{C}$ の場合は、黒色の $1\sim 2\ \mu\text{m}$ の板状のグレインが明瞭に観測され、温度上昇とともに結晶化が促進されていることがわかる。しかし、(c)の T_f を 660°C にまで上げると、丸い液滴のような形状に変化した。これは、 660°C は V_2O_5 の融点に近いので結晶が溶解されたためと考えられる[69]。したがって、図 2.3 で $T_f = 660^\circ\text{C}$ において急激に回折強度が減少したのは、結晶が溶解して結晶性が失われたためと考えられる。

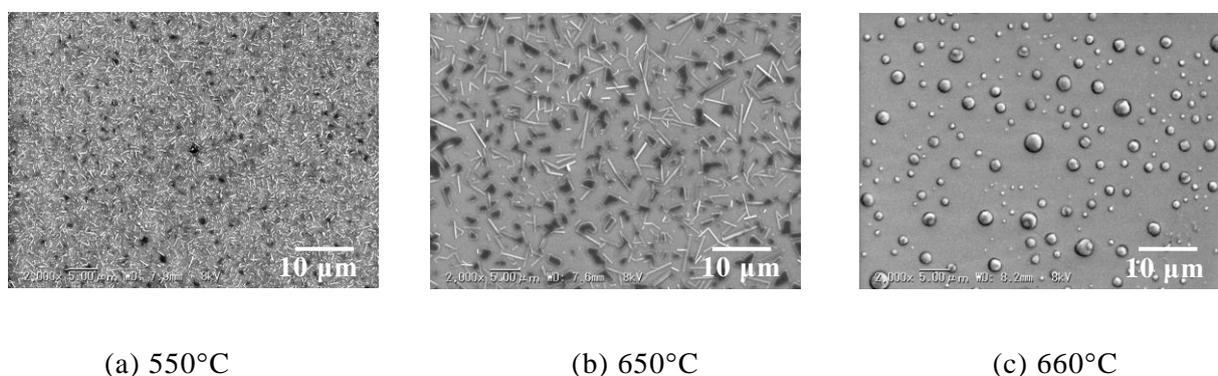


図 2.5 T_f を変化させたときの V_2O_5 薄膜の表面 SEM 写真

以上のことから、 $t_f = 30$ 分とした場合、 $T_f = 650^\circ\text{C}$ において最も強い X 線回折強度が得られ、明瞭なグレインが観測された。これにより最適な本焼成温度 $T_f = 650^\circ\text{C}$ が得られた。しかし、グレインの間に隙間が多く、基板が V_2O_5 結晶により被覆されていないため、この状態ではボロメータ検出器に適用できない問題がある。そこで次に、基板の被覆率を改善するために MOD 溶液の塗布回数を増加させ、その最適化を行った。

(2) 塗布回数の最適化

本目では、 T_f を上記の(1)で得られた最適な 650°C 、 t_f を 30 分に固定し、塗布回数 (m) を $1\sim 4$ 回まで、すなわち $(1\times 1)\sim(4\times 1)$ まで変化させて薄膜を作製した。図 2.6 に作製した薄膜の $2\theta/\theta$ 測定における V_2O_5 (001) の X 線回折強度と m の関係を示す。図を見ると、 $m = 1$ の場合に比べ $m = 2$ で作製した回折強度は、塗布回数の増加にほぼ比例して増加している。しかし、 $m = 3$ 、 $m = 4$ と増加させると回折強度は逆に弱くなった。

また, 図 2.7 に m を変化させて作製した V_2O_5 薄膜の倍率 2,000 倍での表面 SEM 写真を示す。(a)に示す $m = 1$ の場合は, 黒色グレインのサイズは $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 程度と小さいが, (b)に示す $m = 2$ にすると, 黒色グレインのサイズは $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 程度と大きくなった。しかし, (c)の $m = 4$ の場合は, 逆にグレインの数は減少し, 棒状の結晶が数多く観測された。

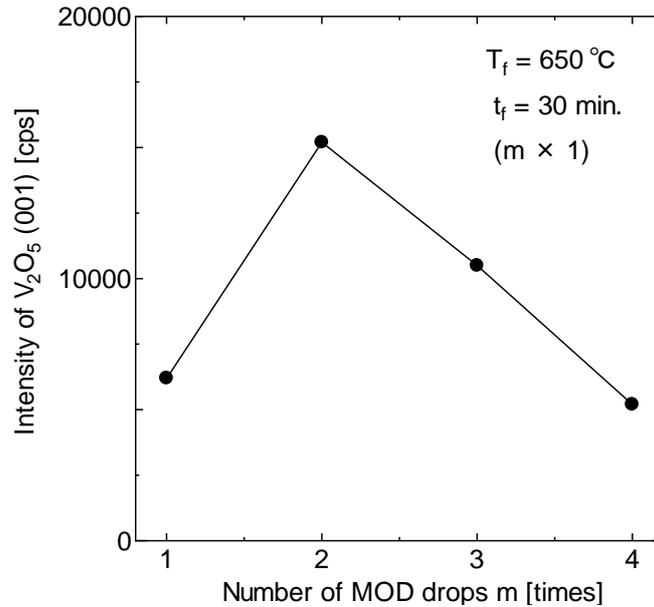


図 2.6 塗布回数と V_2O_5 (001)の X 線回折強度の関係

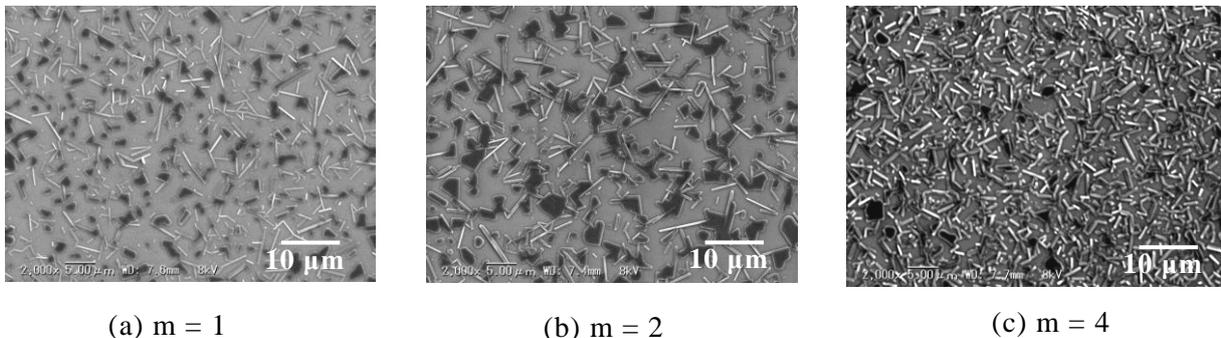


図 2.7 塗布回数を変化させたときの V_2O_5 薄膜の表面 SEM 写真

2.3.1 項で説明したように, MOD 法では金属酸化物からなるプリカーサ薄膜を得るために $400\sim 500^\circ\text{C}$ で有機金属を分解する仮焼成プロセスが必要となる。そのため, 塗布回数を多くして仮焼成を行う前の試料が厚くなると, 有機金属を熱分解する際に有機物の分解により発生したガスが膜内から十分に排出されず膜内に炭素などの不純物として残留する可能性がある。したがって, 図 2.6 における $m = 3$, $m = 4$ の場合の X 線回折強度の減少なら

びに図 2.7 での $m = 4$ の場合の表面モフォロジーの劣化は、有機金属が十分に分解・排出されずに薄膜内に残留した不純物が原因で結晶性が劣化したためと考えられる。

以上のことから、 $T_f = 650^\circ\text{C}$ 、 $t_f = 30$ 分に対し、 $m = 2$ の場合に最も良い結晶性が得られ、これにより最適な塗布回数 2 回を得た。本実験では、仮焼成の条件を焼成温度 450°C 、焼成時間を 15 分としている。したがって、厚い試料に対して有機金属をより効率よく分解させる方法として温度をさらに高くする、あるいは、時間をより長くすることが考えられる。しかしこの場合、有機金属が分解されて得られた金属酸化物の結晶化が起こり、非結晶性のプリカーサ薄膜が得られなくなり、これが本焼成後に得られる薄膜の結晶性の劣化を引き起こすことが知られている[36]。そのため、仮焼成の温度、時間を変化させた実験は行わなかった。

(3) 本焼成時間の最適化

これまで得られた最適な本焼成温度と塗布回数はそれぞれ 650°C 、2 回である。本目では、 $T_f = 650^\circ\text{C}$ 、 $m = 2$ に固定し、 t_f を 15 分～2 時間まで変化させて本焼成を行い、最適な本焼成時間について検討する。図 2.8 に作製した薄膜の $2\theta/\theta$ 測定における V_2O_5 (001) の X 線回折強度と t_f の関係を示す。 t_f を 15 分から 30 分へ長くすることにより V_2O_5 (001) の回折強度は強くなった。これは、15 分間での本焼成ではプリカーサ薄膜が十分に結晶化されず部分的に非結晶性が残っているためと考えられる。しかし、 t_f を 30 分からさらに長くしても、X 線回折強度はほとんど変わらずほぼ一定の値を示した。これは、30 分の本焼成でほぼ結晶化が完了し、焼成時間をさらに延ばしても結晶性が変化しないためと考えられる。

以上のことから、 $T_f = 650^\circ\text{C}$ 、 $m = 2$ とした場合、最適な t_f は 30 分であることがわかった。これにより最適な本焼成時間 $t_f = 30$ 分が得られた。しかしながら、図 2.7(b) に示す $T_f = 650^\circ\text{C}$ 、 $m = 2$ 、 $t_f = 30$ 分の最適な条件で作製した薄膜の表面モフォロジーを見ると、図 2.5 (b) の $m = 1$ の場合と比べてグレインサイズは明らかに大きくなっているものの、まだグレインの間に多くの隙間がある。そのため、薄膜のボロメータ検出器への応用を考えるとさらに基板の V_2O_5 結晶による被覆率を向上させる必要がある。そこで、最後に(2×1)で作製した薄膜 V_2O_5 に MOD 溶液を 2 回塗布して本焼成を加える操作を繰り返す、すなわち本焼成回数 n を増加させることにより表面モフォロジー特性の向上を図った。

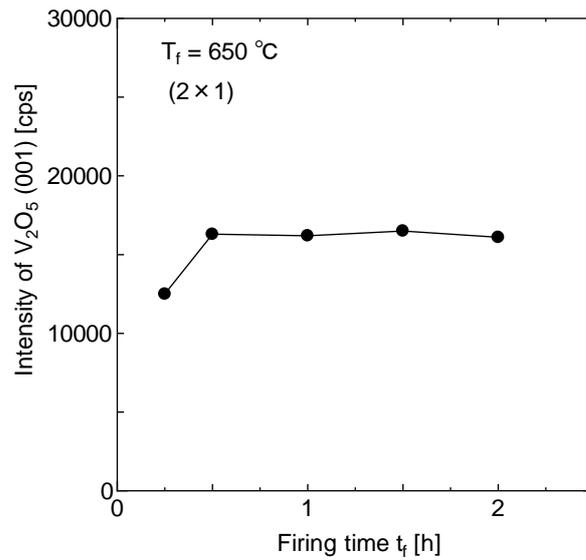


図 2.8 本焼成時間と V_2O_5 (001) の X 線回折強度の関係

(4) 本焼成回数の最適化

本目では、 $m = 2$ とし、 $T_f = 650^\circ\text{C}$ 、 $t_f = 30$ 分 [すなわち(2×1)] で作製した V_2O_5 薄膜に、さらに MOD 溶液を 2 回塗布して同じ条件で本焼成を加える回数 n を 1 から 5 まで増やして[すなわち(2× n); $n = 1, 2, 3, 4, 5$]薄膜を作製した。図 2.9 に作製した薄膜の $2\theta/\theta$ 測定における V_2O_5 (001) の X 線回折強度と n の関係を示す。図からわかるように、X 線回折強度は本焼成回数 n にほぼ比例して増加していることがわかる。このことは、 $T_f = 650^\circ\text{C}$ 、 $t_f = 30$ 分の条件で本焼成することにより、結晶性を劣化させることなく n を 1~5 回まで増やし、膜厚を増加させることができることを示唆している。

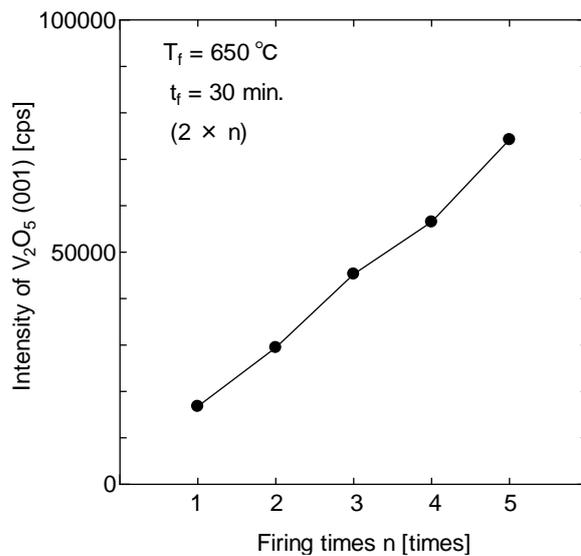
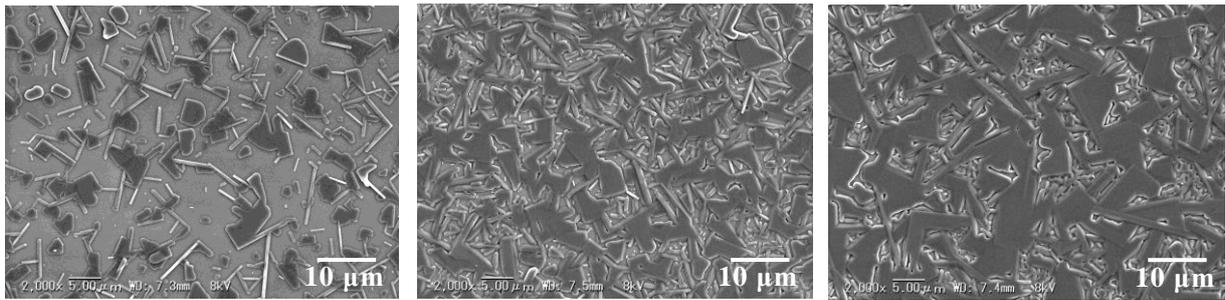


図 2.9 本焼成回数と V_2O_5 (001) の X 線回折強度の関係



(a) (2×1)

(b) (2×3)

(c) (2×5)

図 2.10 本焼成回数を変化させたときの V_2O_5 薄膜の表面 SEM 写真

図 2.10 に倍率 2,000 倍での $n = 1, 3, 5$ で作製した V_2O_5 薄膜の表面 SEM 写真を示す。(a)の $n = 1$ に比べ、(b)に示す本焼成回数を $n = 3$ に増やすことによりグレインサイズが $5 \mu m$ 以上と大きくなり、 $n = 1$ のときに顕著に見られた結晶間の隙間は大幅に減少した。さらに、(c)の $n = 5$ の場合は、グレインサイズは $10 \mu m$ 以上とさらに大きくなり、基板表面はほとんど V_2O_5 結晶に覆われ、被覆率も大幅に改善された。本焼成回数を 5 回からさらに増やすと X 線回折強度はさらに増加し、薄膜の基板に対する被覆率も改善される。しかし、本焼成回数が増えるほど、作製に要する時間が長時間に及ぶ。本実験では、焼成に要する時間も考慮し、 $n = 5$ であればボロメータ検出器へ応用が可能な薄膜が得られているという観点から最適な本焼成回数を $n = 5$ とした。

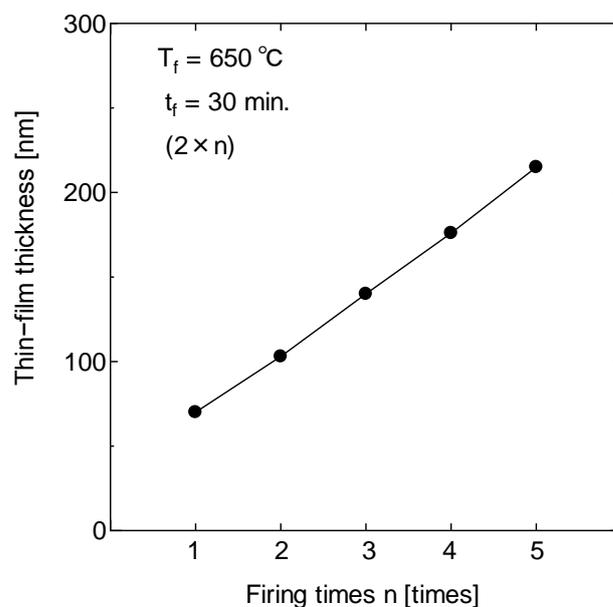


図 2.11 本焼成回数と V_2O_5 膜厚の関係

さらに、本焼成回数と膜厚の関係を図 2.11 に示す。図からわかるように、 n の増加

に比例して膜厚は増加しており， $n = 1$ [(2×1)]での膜厚は約 70 nm， $n = 5$ [(2×5)]での膜厚は約 215 nm であった。この $n = 5$ で得られた膜厚 215 nm は，ボロメータ検出器の製作が可能な膜厚である。また本結果から，MOD 法において本焼成回数を変化させることにより結晶性を劣化させることなく膜厚が制御できることがわかった。

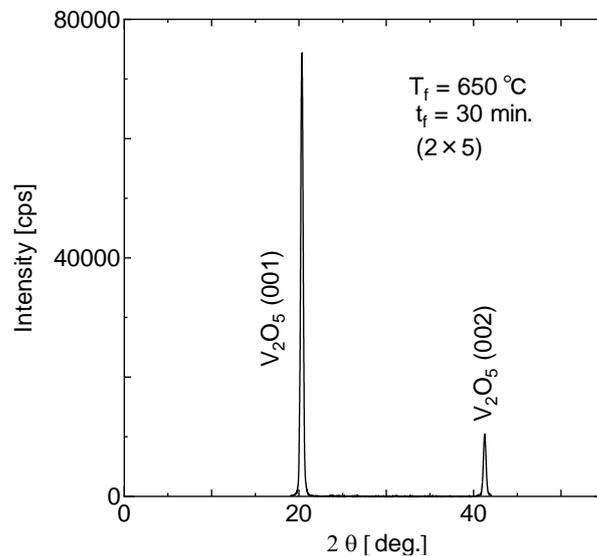


図 2.12 (2×5)で作製した V_2O_5 薄膜の XRD による $2\theta/\theta$ 特性

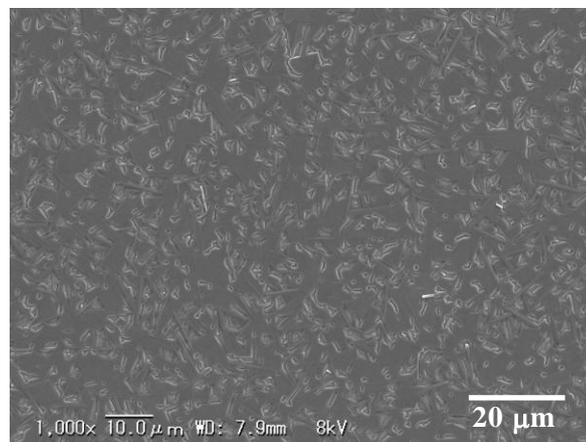


図 2.13 (2×5)で作製した V_2O_5 薄膜の表面 SEM 写真

最後に，改めて本章で得られた最適な塗布回数 $m = 2$ ， $T_f = 650^\circ\text{C}$ ， $t_f = 30$ 分，焼成回数 $n = 5$ ，すなわち(2×5)により作製した V_2O_5 薄膜の $2\theta/\theta$ 特性ならびに倍率をこれまでの倍率 2,000 を 1,000 に下げたときの表面 SEM 写真を図 2.12, 図 2.13 にそれぞれ示す。図 2.12 において(001)，(002)面のみが明瞭に観測され，優れた軸配向特性をもつ V_2O_5 薄膜が得られた。また，図 2.13 において隙間がほとんどなく SiO_2/Si 基板上に薄膜状の平坦なグレイン構造をもつ V_2O_5 が形成され，結晶性の良い V_2O_5 薄膜が得られた。

2.4 VO_x 薄膜の作製および特性評価

前節において MOD 法の作製条件を最適化することにより優れた軸配向特性をもつ平坦な V₂O₅ 薄膜が得られた。そこで本節では、最適化した条件 ($m = 2$, $T_f = 650^\circ\text{C}$, $t_f = 30$ 分, $n = 5$) で作製した膜厚が約 215 nm の V₂O₅ 薄膜に対して減圧熱処理を加え、得られた VO_x 薄膜の特性を評価する。

2.4.1 減圧熱処理による VO_x 薄膜の作製

図 2.14 に本実験で用いた減圧熱処理装置の概要を示す。アルミナのチューブにヒータ線を巻き、チューブ内部に試料を入れて加熱するホットウォール型の縦型アニール炉である。また、ヒータ線を巻いたアルミナのチューブ全体を円筒型のステンレスで覆い、真空引きができるようにした。MOD 法により作製した V₂O₅ 薄膜を本装置に入れ、ロータリーポンプで真空引きを行い、マスフローコントローラで酸素量を制御しながら減圧酸素雰囲気中で熱処理を行った。本節では、熱処理圧力 (P_h), 熱処理温度 (T_h), 熱処理時間 (t_h) を変化させながら V₂O₅ 薄膜を熱処理し、得られた薄膜の特性を評価することによりこれらの熱処理条件を最適化する。熱処理の方法としては、まず試料をアニール炉に入れ真空引きを行い、酸素流量を制御しながら P_h の圧力を保持する。その後、室温から T_h の温度まで $17^\circ\text{C}/\text{min}$ の昇温レートで加熱し、 t_h の時間その温度を保ち熱処理を加えた。その後、ヒータ電源を切り冷却した。

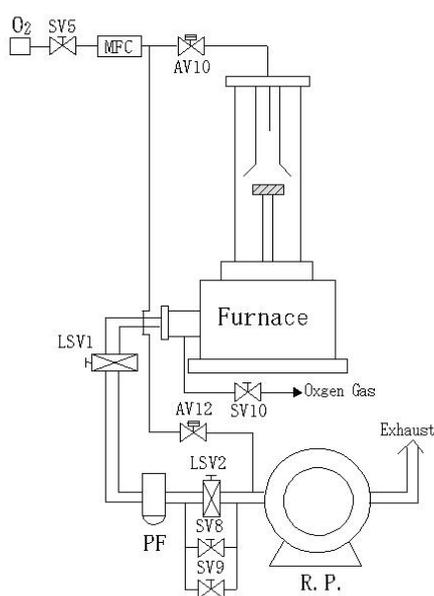


図 2.14 減圧熱処理装置の概要

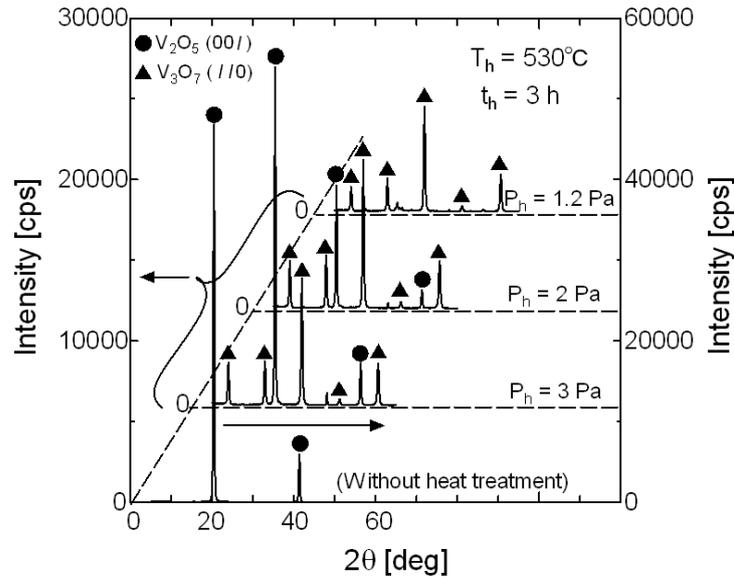


図 2.15 $P_h = 1 \sim 3$ Pa での減圧熱処理により得られた VO_x 薄膜の $2\theta/\theta$ 特性

まず、 V_2O_5 薄膜を $T_h = 530^\circ\text{C}$, $t_h = 3$ 時間に固定し、熱処理圧力を $3 \sim 1.2$ Pa まで変化させながら、熱処理を行った。熱処理後に得られた VO_x 薄膜の XRD による $2\theta/\theta$ 特性を図 2.15 に示す。また、比較のため熱処理を行っていない V_2O_5 薄膜の $2\theta/\theta$ 特性を図の最下段に示している。図を見ると、 $P_h = 3$ Pa の場合、最下段の \bullet で示す V_2O_5 の回折ピークの半分程度の強度をもつ V_2O_5 の (001) 面, (002) 面での回折がまだ見られるが、 \blacktriangle で示す V_2O_5 の還元により得られた V_3O_7 の (110) 面での回折も現れている。 P_h を 2 Pa に減少させると、さらに多くの V_2O_5 の還元により V_2O_5 の回折強度は弱くなり、 V_3O_7 の回折強度が増加した。そして、 $P_h = 1.2$ Pa では、 V_2O_5 の回折ピークはほとんど観測されず、低角度側から順に V_3O_7 の (110) から (550) 面までが支配的に観測された。以上により、 P_h を減少させることにより V_2O_5 の V_3O_7 への還元が促進され、 $P_h = 1.2$ Pa において V_2O_5 はほとんど混在せず、 V_3O_7 が支配的な薄膜が得られることがわかった。1.2 Pa 以下の圧力での焼成も試みたが、本熱処理システムでは圧力を長時間安定に保持することが困難であった。そのため、本実験では最低圧力を 1.2 Pa とした。

次に、 P_h を V_3O_7 が支配的な薄膜が得られた 1.2 Pa, $t_h = 2$ 時間に固定し、熱処理温度を $530 \sim 580^\circ\text{C}$ まで変化させながら V_2O_5 薄膜を熱処理した。熱処理することにより得られた薄膜の $2\theta/\theta$ 特性を図 2.16 に示す。 $T_h = 530^\circ\text{C}$ では、 \blacktriangle で示す V_3O_7 の回折ピークが明瞭に得られているが、 \bullet で示す V_2O_5 に対する回折ピークも同時に観測された。しかし、 T_h を 550°C に上昇させると、 V_2O_5 の回折ピークはほぼ消滅し、 V_3O_7 の回折ピ

ークが支配的な特性が得られた。さらに、 $T_h = 580^\circ\text{C}$ においても同様に T_h を 550°C の回折ピークが支配的になっているが、それらの強度は $T_h = 550^\circ\text{C}$ の場合と比べて弱くなっている。これは、以下でも述べるように V_3O_7 からさらに還元が進んだ組成が形成されているためと考えられる。以上により、熱処理温度を上昇させる場合においても熱処理圧力を減少させた場合と同様に V_2O_5 の還元が起り、 V_3O_7 が支配的に形成されることがわかった。

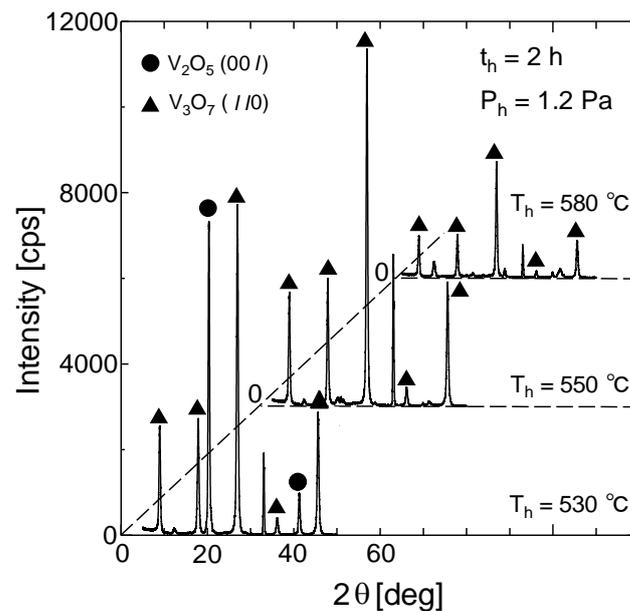


図 2.16 $T_h = 530 \sim 580^\circ\text{C}$ での減圧熱処理により得られた VO_x 薄膜の $2\theta/\theta$ 特性

次に、 P_h を 1.2 Pa, T_h を 530°C に固定し、熱処理時間を $2 \sim 5$ 時間まで変化させて V_2O_5 薄膜の熱処理を行った。熱処理後に得られた VO_x 薄膜の $2\theta/\theta$ 特性を図 2.17 に示す。図 2.17(a) は図 2.15 と同様に回折角 2θ を $5 \sim 60^\circ$ まで変化させたときの特性を示し、図 2.17 (b) は回折角 2θ を $35 \sim 43^\circ$ とし縦軸の回折強度を約 1 桁小さくして測定した特性である。まず、図 2.17(a) において $t_h = 2$ 時間では \blacktriangle で示す V_3O_7 の回折ピークが得られているものの、 \bullet で示す V_2O_5 による回折ピークがまだ明瞭に現れている。しかし、 t_h を $3.5, 4$ 時間と長くすると、 V_2O_5 による回折ピークはほとんどなくなり、 V_3O_7 の回折ピークが支配的となった。しかし、 t_h を 5 時間まで長くすると、この V_3O_7 の回折ピーク強度は大きく減少した。これは、還元が V_3O_7 からさらに促進されているためと考えられる。そこで、 VO_x 薄膜の組成を詳しく検討するため、回折角 2θ を狭め、縦軸を約 1 桁小さくして $2\theta/\theta$ 特性を測定した。その結果を図(b)に示す。図を見ると $t_h = 3.5$ 時間では、 \blacktriangle で示す V_3O_7 (440) の回折ピークに加え \blacklozenge で示す V_4O_9 (004)

による回折ピークと●で示す V_2O_5 (002)による回折ピークが観測された。しかし、 $t_h = 4$ 時間にするとこれらの回折ピークに加え V_3O_7 と V_4O_9 からさらに還元が進んだ◇と○で示す VO_2 (020)と(210)の回折ピークが観察された。そして、 t_h を 4.5 時間まで長くすると、 VO_2 の回折ピーク強度は増大し、逆に V_3O_7 の回折ピーク強度は減少した。さらに $t_h = 5$ 時間にすると、 V_3O_7 の回折ピークは観察されず、 V_3O_7 からさらに還元が進んだ V_4O_9 と VO_2 による回折が観測された。しかしながら、本実験で t_h を 2~5 時間まで変化させて場合において、ほんのわずかではあるが作製した薄膜内に V_2O_5 が残留していることがわかった。以上により、 V_2O_5 薄膜を $T_h = 530^\circ\text{C}$ 、 $P_h = 1.2 \text{ Pa}$ に固定し t_h を 2~5 時間まで変化させながら熱処理することにより、 V_2O_5 は、 $V_2O_5 \rightarrow V_3O_7 \rightarrow V_4O_9 \rightarrow VO_2$ と還元されることがわかり、 $t_h = 4\sim 5$ 時間において VO_2 による回折を得ることができた。他の成長法で作製した VO_2 薄膜の場合でも、本実験と同様に VO_2 以外の組成が薄膜中に混在することが報告されている[45],[46],[57]。

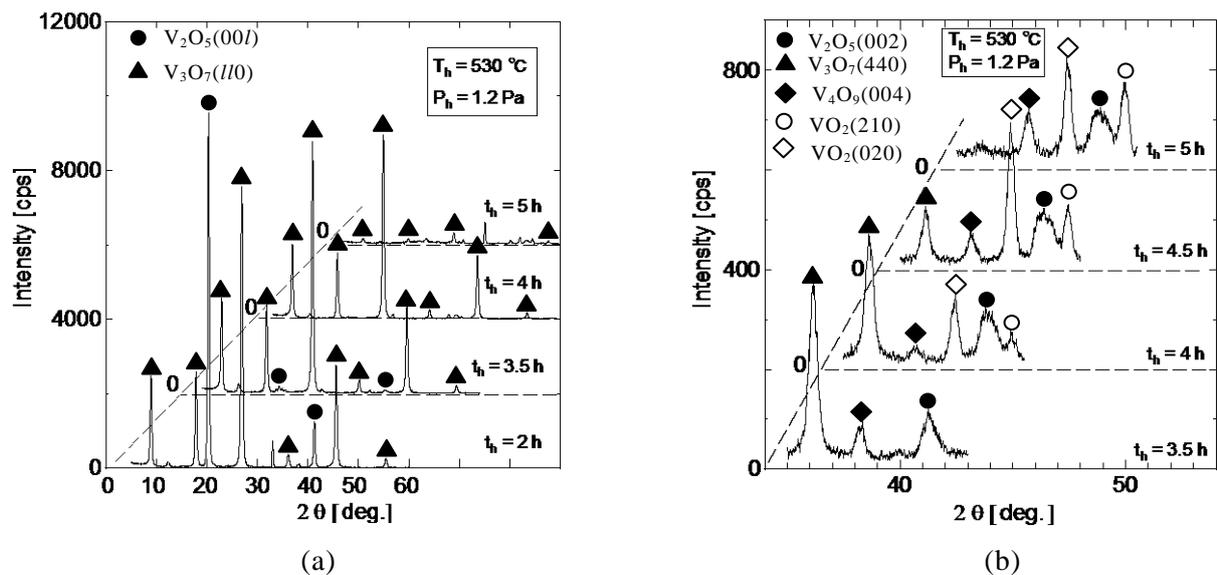


図 2.17 $t_h = 2\sim 5$ 時間での減圧熱処理により得られた VO_x 薄膜の $2\theta/\theta$ 特性

2.4.2 電気的特性の評価および考察

作製した VO_x 薄膜をポロメータ検出素子へ応用することを考えると、その電気的特性を評価することが重要である。そこで本項では、前節で V_2O_5 薄膜を $T_h = 530^\circ\text{C}$ 、 $P_h = 1.2 \text{ Pa}$ に固定し t_h を 2~5 時間まで変化させながら熱処理して得られた VO_x 薄膜の R-T 特性を測定した。R-T 特性は、 VO_x 薄膜を光露光法により $40 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ のマイクロブリッジに加工し、そのブリッジにより測定した。 VO_x 薄膜の R-T 特性を図 2.18 に示

す。温度はペルチェ素子により変化させた。抵抗は、素子を 5°C から 100°C まで加熱し、その後、逆に 100°C から徐々に 5°C まで冷却しながら 4 端子法により測定した。 $t_h = 2$ 時間では、抵抗率は温度の上昇とともに緩やかに単調に減少した。図 2.17(a)の $t_h = 2$ 時間で得られた VO_x 薄膜の XRD 測定では V_2O_5 と V_3O_7 の回折ピークが強く現れている。 V_2O_5 は室温付近で $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ オーダの抵抗率をもつ絶縁性の高い材料であることから、電流は V_2O_5 には流れず V_3O_7 のパスのみに流れるため、この R-T 特性は V_3O_7 によるものと考えられる。また $t_h = 3.5$ 時間においても、50~60°C 付近でわずかに異なる抵抗率変化を示しているものの、抵抗率は温度の上昇とともにほぼ単調に減少している。しかし、 $t_h = 4$ 時間以上では、熱処理時間によらず同じ約 55°C で抵抗率は急激に減少した。このように半導体相から金属相への相転移にともなう大きな抵抗変化は VO_2 によるものであり [32], 図 2.17(b)で VO_2 による回折が観測されていることと考えると、 VO_2 が VO_x 薄膜内に形成されていることがわかる。また 90°C と 10°C での抵抗率の比は、 $t_h = 4, 4.5, 5$ 時間に対してそれぞれ $3.3 \times 10^{-2}, 4.0 \times 10^{-3}, 1.0 \times 10^{-3}$ であり、熱処理時間の増加とともに抵抗率の変化は約 1~3 桁と大きくなった。さらに、温度を上昇させたときと下降させたときの R-T 特性に、相転移を示す際の VO_2 特有のヒステリシスが現れ、そのヒステリシスループ幅 (ΔT) は熱処理時間によらず同じ約 3°C であった。以上により、 $t_h = 4 \sim 5$ 時間の熱処理により得られた VO_x 薄膜は、 VO_2 の特徴をもつ R-T 特性を示すことがわかった。

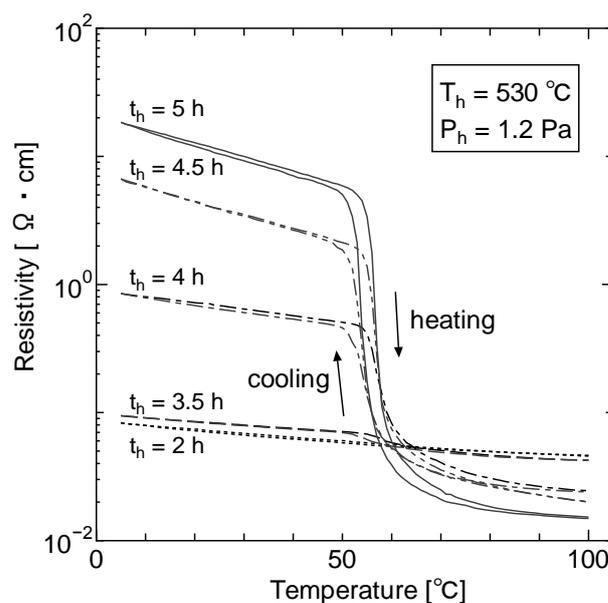
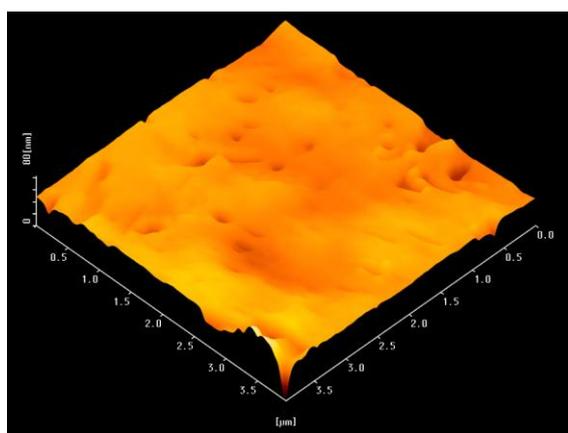
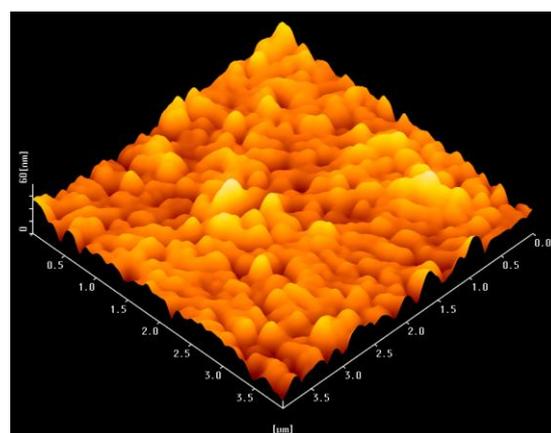


図 2.18 VO_x 薄膜の抵抗-温度特性

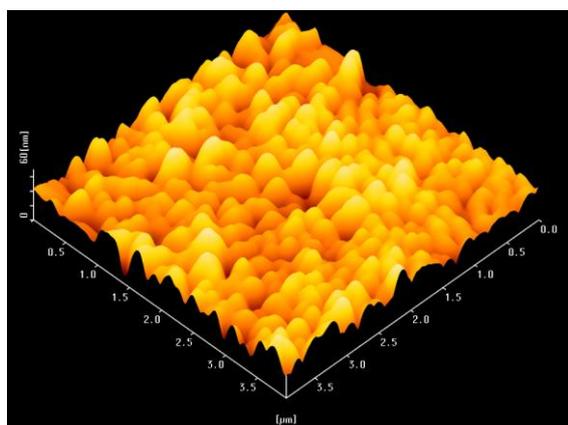
次に、これらの実験結果に対して考察を加える。まず、急激な抵抗率の変化を示した相転移温度 (T_c) について考えてみる。 VO_2 バルク単結晶の T_c は 67°C であると報告されている[32],[70],[71]。それに対し、一般に基板の上に成長した VO_2 薄膜の T_c は、主に基板と薄膜との熱膨張係数の違いによる結晶の外部ひずみに依存し、基板の種類により異なるが、バルク単結晶の T_c より低い値となる[60],[72]。本実験で得られた VO_x 薄膜の T_c は、ひずみのないバルク単結晶の値より低い約 55°C であった。この値は、IBED法により同じ SiO_2/Si 基板の上に成長した VO_2 薄膜とほぼ同じ値である[58]。さらに、本実験では $t_h = 4, 4.5, 5$ 時間で熱処理した VO_x 薄膜で T_c の違いは観測されなかった。これは、 T_c が基板と薄膜との熱膨張係数の違いによるひずみに関係すると考えると、これらの3種類の薄膜は全て同じ基板を用い、熱処理における昇温レートならびに降温レートも同じであり結晶に生じるひずみも同程度であるためと考えられる。



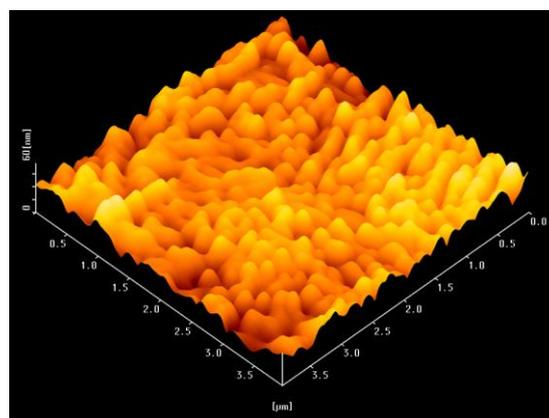
(a) $t_h = 3.5$ h



(b) $t_h = 4$ h



(c) $t_h = 4.5$ h



(d) $t_h = 5$ h

図 2.19 減圧熱処理により得られた VO_x 薄膜の AFM 画像

次に、ヒステリシスループ幅 ΔT について考えてみる。 VO_2 薄膜の ΔT は、先ほど述べた結晶の外部ひずみやグレインサイズに依存することが知られている[72],[73]。本実験で得られた $\Delta T = 3^\circ\text{C}$ の値は、他で報告されている値に比べて同程度かあるいはそれより狭い値である[34],[35]。そこで、グレインサイズを評価するため AFM により表面モフォロジーを観測した。図 2.19 に $t_h = 3.5$ 時間 (a), 4 時間 (b), 4.5 時間 (c), 5 時間 (d) で熱処理した VO_x 薄膜の AFM 画像を示す。(a)の $t_h = 3.5$ 時間の場合は、図 2.17 (b)からわかるようにほとんど VO_2 は形成されておらず、 V_3O_7 による非常に平坦な結晶表面を示している。この時の二乗平均平方根(root mean square; rms)の値は 4.3 nm であった。しかし、(b), (c), (d)の $t_h = 4, 4.5, 5$ 時間の場合は、いずれの場合も全て同様なモフォロジーを示し、 VO_2 薄膜は、ほぼ同じ大きさの 200~300 nm の粒状のグレインにより形成されている。また、これらの rms の値はほぼ同じ 13.0 nm であった。本実験では、 T_c と同様に $t_h = 4, 4.5, 5$ 時間で熱処理した VO_x 薄膜において ΔT にも違いは観測されなかった。これは、 T_c の考察をした場合と同様に、結晶に生じるひずみが同程度であることならびにグレインサイズもほぼ同じであるため ΔT にも違いが観測されなかったと考えられる。

さらに、抵抗率の変化について考えてみる。一般に、バルク単結晶 VO_2 の抵抗率の変化は 5 桁程度であり、この抵抗率の変化は、 VO_2 の配向特性の均一性あるいは組成の均一性に依存すると報告されている[73]。一方、薄膜の抵抗率の変化は、基板が単結晶基板であるか否かで変わるが、その値は 2~4 桁程度となる[60]。本実験の $t_h = 4.5$ あるいは 5 時間で得られた薄膜の抵抗率の変化は 2~3 桁であり、他の報告に比べて遜色のない値が得られている。また、 $t_h = 4.5$ で作製した同薄膜の室温 (27°C)での抵抗率は $3.7 \Omega \cdot \text{cm}$ であり、この値は、 VO_2 に対して得られている典型的な値と同程度である[60]。しかし、この抵抗率変化の大きさは $t_h = 4, 4.5, 5$ 時間の場合で 1~3 桁と異なる値を示した。この焼成時間の増大とともに抵抗率の変化が大きくなった理由は、図 2.17 (b)を見ると t_h を 4~5 時間と増加させるにつれて V_3O_7 の回折ピーク強度が減少し、 V_3O_7 の混在が少なくなっていることから VO_2 組成の均一性が向上したためと考えられる。しかし、 $t_h = 5$ 時間で焼成した VO_x 薄膜においても VO_2 (020)と(210)の軸配向が混在しており、さらに V_2O_5 と V_4O_9 の組成も混在している。今後は、ガラスチューブの中に酸素ガスを封入するなど熱処理圧力をさらに厳密に制御し、安定した熱平衡状態で焼成することにより VO_2 組成の均一性の向上が期待できる[74]。

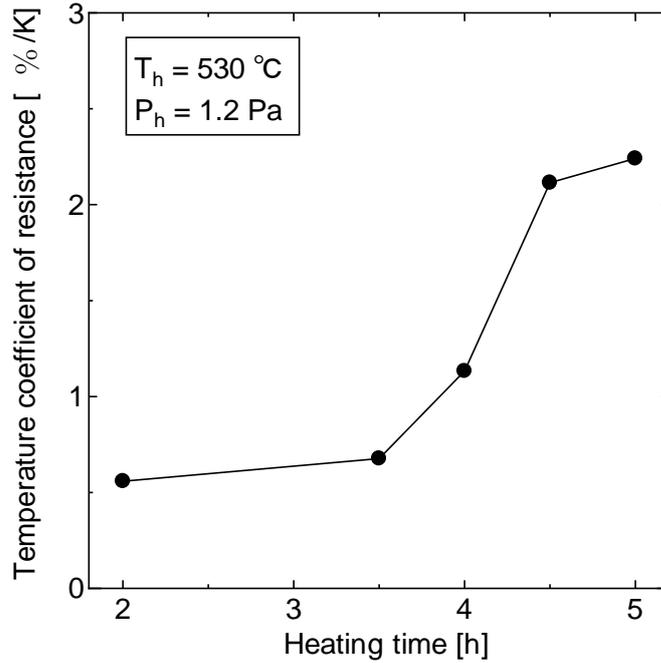


図 2.20 VO_x 薄膜の 300 K での抵抗温度係数と熱処理時間の関係

最後に、図 2.18 で得られた R-T 特性から VO_x 薄膜の TCR を求めた。この TCR は、薄膜をボロメータ検出素子に応用する際に非常に重要な評価項目の一つであり、単位温度あたりの抵抗の変化率で定義され、式 (2.1) で与えられる。

$$\text{TCR} = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (2.1)$$

式 (2.1) と得られた R-T 特性から求めた 300 K (27°C) での TCR と熱処理時間の関係を図 2.20 に示す。図に示すように、 $t_h = 2 \sim 3.5$ 時間では TCR は V₃O₇ の特性と思われる TCR = 0.5 ~ 0.6 %/K 程度の低い値を示した。しかし、 $t_h = 4$ 時間では VO₂ の特性により TCR は 1.2 %/K に向上した。さらに、R-T 特性において 2~3 桁の大きな抵抗変化を示した $t_h = 4.5 \sim 5$ 時間で作製した VO_x 薄膜では、急激に TCR は向上し、2.1~2.2 %/K の値を示した。この値は、他の薄膜成長法で報告されている VO₂ 薄膜の値と比べて遜色のないものである[29],[59]。

以上により、 $t_h = 4.5 \sim 5$ 時間で作製した VO_x 薄膜において 2.1~2.2 %/K の TCR が得られ、ボロメータ検出素子へ適用可能な VO_x 薄膜が得られた。

2.5 結言

本章では、まず、MOD 法により SiO₂/Si 基板上へ V₂O₅ 薄膜を作製し、同薄膜を減圧下で熱処理することにより VO_x 薄膜を作製した。MOD 法における本焼成温度 (T_f),

MOD 溶液の塗布回数 (m), 本焼成時間 (t_f) ならびに焼成回数 (n)を最適化し, 得られた最適条件 ($m = 2$, $T_f = 650^\circ\text{C}$, $t_f = 30$ 分, $n = 5$) により作製した V_2O_5 薄膜は, 優れた軸配向特性をもち, 薄膜状の平坦なグレイン構造をもつ良好な結晶性を示した。

次に, 最適な条件で作製した V_2O_5 薄膜を減圧下で熱処理した。熱処理圧力 P_h を 3~1.2 Pa まで減少させること, あるいは熱処理温度 T_h を $530\sim 580^\circ\text{C}$ まで上昇させることにより V_2O_5 が還元され V_3O_7 が形成されることがわかった。また, さらに $T_h = 530^\circ\text{C}$, $P_h = 1.2$ Pa の条件で t_h を 2~5 時間まで変化させることにより V_2O_5 は, $\text{V}_2\text{O}_5 \rightarrow \text{V}_3\text{O}_7 \rightarrow \text{V}_4\text{O}_9 \rightarrow \text{VO}_2$ と還元されることがわかり, $t_h = 4\sim 5$ 時間において XRD による VO_2 の回折ピークが観測された。また, R-T 特性において $t_h = 4\sim 5$ 時間で得られた薄膜は, VO_2 の特徴をもつ特性を示し, VO_2 が VO_x 薄膜内に形成されていることがわかった。また, それらの相転移温度 T_c は 約 55°C , 抵抗変化は 1~3 桁, ヒステリシス幅 ΔT は約 3°C であった。この T_c と ΔT の値はバルク単結晶と比較して低いものであり, その違いは, 主に基板と薄膜との熱膨張係数の違いにより薄膜内に生じた外部ひずみによるものと考えられる。最後に, ボロメータ検出素子に応用する際に非常に重要となる TCR を測定した。 $t_h = 4.5\sim 5$ 時間で作製した VO_x 薄膜において $2.1\sim 2.2\%$ /K の TCR が得られた。この値は, 他の薄膜成長法で作製した VO_x 薄膜と比較して遜色のない値であり, ボロメータ検出素子へ適用可能な VO_x 薄膜が MOD 法により得られた。

第3章 MOD法による石英基板上へのVO_x薄膜の作製および特性評価

3.1 序言

第2章では、VO_x薄膜の作製に良く用いられる代表的な基板の1つであるSiO₂/Si基板を用い、その上にMOD法によりV₂O₅薄膜を作製し、同薄膜を酸素減圧下で熱処理することによりVO₂を含むVO_x薄膜を作製した。しかし、本研究ではVO_x薄膜をアンテナ結合検出素子へ適用することを考えている。そこで、薄膜アンテナを製作するのに適した基板について考えてみると、そのためにはまず絶縁体であることが求められる[75]。ドーピングを行っていないSiは非常に低い抵抗率をもつが、絶縁性に関しては誘電体には及ばない。また、高周波帯での損失を考えると低誘電率が望ましい[76],[77]。さらに、ボロメータの感度は、基板の熱伝導率に反比例するため[20]、熱伝導率の低い基板を用いることによりボロメータの感度が向上できる。このような考察から、アンテナ結合ボロメータ検出素子を製作する基板として、絶縁体であり、低誘電率、低熱伝導率をもつことが要求される[78],[79]。これらの要件を満足し、容易に入手可能な基板の1つに石英基板がある。そこで本章では、第2章と同じ手法を用いてMOD法により石英基板上にVO_x薄膜を作製し、電気的特性などの特性により作製したVO_x薄膜のアンテナ結合素子への適用性について検討する。

3.2 V₂O₅薄膜の作製

本節では、2.3.1項で説明した方法と同様の方法を用い、基板のみをSiO₂/Si基板から石英基板に換えてV₂O₅薄膜の作製を行った。また、作製条件としては、改めて条件の最適化を行うことはせず、2.3.2項で得られた最適条件、すなわち本焼成温度T_f=650°C、塗布回数m=2回、本焼成時間t_f=30分および本焼成回数n=5回を用いた。

作製したV₂O₅薄膜のXRDによる2θ/θ特性を図3.1に示す。この特性から、V₂O₅(001)、(002)面のみが明瞭に観測され、優れた軸配向特性をもつV₂O₅薄膜が石英基板上に作製できていることがわかる。この特性は、図2.12に示したSiO₂/Si基板上へ作製したV₂O₅薄膜の2θ/θ特性と回折ピーク位置、回折強度ともほぼ同様であった。ただし、図3.1では15~25°付近に渡ってわずかにブロードな回折が見られる。これは、石英基板によるものである。次に、石英基板上に作製したV₂O₅薄膜の倍率1,000倍で観察したSEM写真を図3.2に示す。本特性においても図2.13に示したSiO₂/Si基板上に作製した場合

と同様に、10 μm 以上のグレインがほとんど隙間なく平面的に形成されており、石英基板上においても薄膜状の V_2O_5 を得ることができた。また、膜厚も SiO_2/Si 基板上に作製した場合とほぼ同じ約 200 nm であった。このように、本実験では同じ条件で SiO_2/Si 基板と石英基板上に作製した V_2O_5 薄膜において XRD による $2\theta/\theta$ 特性, SEM による表面モフォロジー, 膜厚に関して大きな違いは見られなかった。

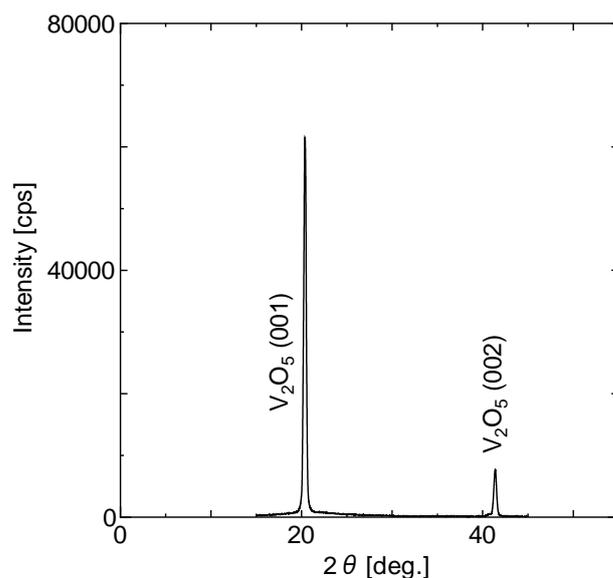


図 3.1 (2×5)で作製した V_2O_5 薄膜の XRD による $2\theta/\theta$ 特性

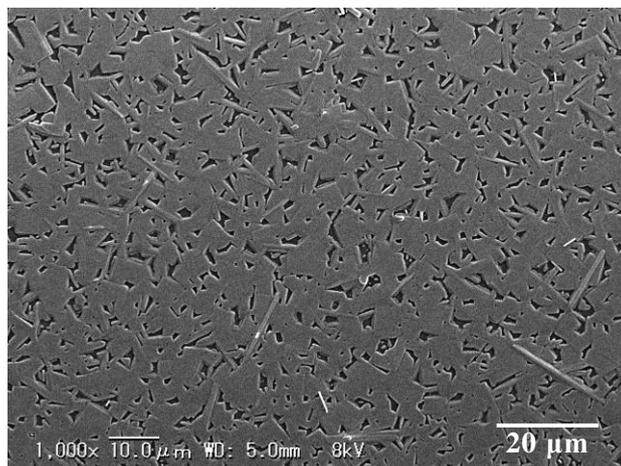


図 3.2 (2×5)で作製した V_2O_5 薄膜の表面 SEM 写真

以上により、MOD 法により石英基板上に作製した V_2O_5 薄膜に対しても SiO_2/Si 基板と同様に還元熱処理により VO_2 の形成が期待できる結晶性の良い V_2O_5 薄膜が得られた。

3.3 VO_x 薄膜の作製および特性評価

3.3.1 減圧熱処理による VO_x 薄膜の作製

本項では前節と同様に、2.4 節で述べた SiO₂/Si 基板上に作製した V₂O₅ の減圧熱処理で得られた VO_x 薄膜の結果を参照し、石英基板上に作製した V₂O₅ 薄膜を酸素圧力 P_h = 1.2 Pa、熱処理温度 T_h = 530°C に固定し、熱処理時間を t_h = 2~5 時間まで変化させて減圧熱処理した。得られた VO_x 薄膜の 35~43° の範囲における 2θ/θ 特性を図 3.3 に示す。2 時間の熱処理で得られた薄膜の X 線回折強度を左の、3.5~5 時間の熱処理で得られた薄膜の強度を右の縦軸に示している。t_h = 2 時間の場合は、●で示す V₂O₅ の(002)面での回折ピークが支配的に現れているが、同時に V₂O₅ の還元による▲で示す V₃O₇ の(440)面での回折ピークもわずかながら観察された。そして t_h = 3.5 時間になると、還元された V₂O₅ の割合がさらに多くなったため V₂O₅ による回折がほとんど見られなくなり、逆に V₃O₇ の回折強度が強まり V₃O₇ が支配的な特性が得られた。しかし、t_h = 4~5 時間と熱処理時間を長くすると、V₃O₇ の回折強度は逆に弱まり、V₃O₇ の還元による○で示す VO₂ (210)あるいは◇で示す VO₂ (020) による回折が観測された。以上のことから、石英基板上に作製した V₂O₅ は、減圧熱処理時間とともに主に V₂O₅ → V₃O₇ → VO₂ と還元されることがわかった。この還元プロセスは、概ね SiO₂/Si 基板上に作製した場合と同様であった。

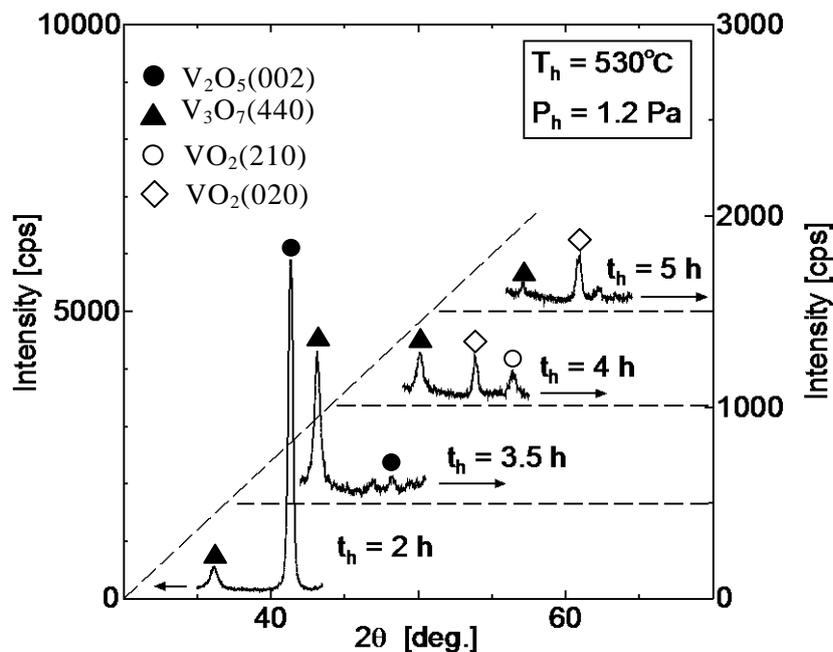


図 3.3 t_h = 2~5 時間での減圧熱処理により得られた VO_x 薄膜の 2θ/θ 特性

次に、同薄膜の R-T 特性を評価した。図 3.4 に t_h をパラメータとした 15~100°C の温度範囲で測定した R-T 特性を示す。測定方法は、2.4.2 項で説明した方法と同様である。 $t_h = 2$ 時間の場合は、温度上昇とともに抵抗率は緩やかで単調に減少した。これは図 3.3 からわかるように V_2O_5 が還元されて形成された V_3O_7 によるものであるためと考える。 $t_h = 3.5$ 時間では、50~60°C 付近でわずかに異なる抵抗率変化を示しているものの、抵抗率は温度の上昇とともにほぼ単調に減少している。この 50~60°C 付近での他の温度領域と異なる抵抗率変化は、 V_3O_7 の還元により形成され始めた XRD 測定では観測されなかったわずかな量の VO_2 によるものと考えられる。しかし、 $t_h = 4\sim 5$ 時間では $T_c = 52^\circ\text{C}$ 以上で約 3~4 桁の急激な抵抗変化を示した。これらは、図 3.3 に示したように $t_h = 4\sim 5$ 時間では熱処理時間が増加するとともに V_3O_7 がさらに還元され VO_2 の回折ピークが増加し、 VO_2 の均一性が向上したためと考えられる[34]。さらに、温度上昇時と下降時においてヒステリシス特性が見られ、その ΔT は約 2°C であった。このように、R-T 特性においても t_h に対する抵抗率変化は SiO_2/Si 基板上に作製した場合と概ね同様な傾向が得られた。以上により、石英基板上に作製した V_2O_5 薄膜を $t_h = 4\sim 5$ 時間減圧熱処理した VO_x 薄膜においても SiO_2/Si 基板上に作製した場合と同様に VO_2 特有の特性をもつ R-T 特性が得られた。

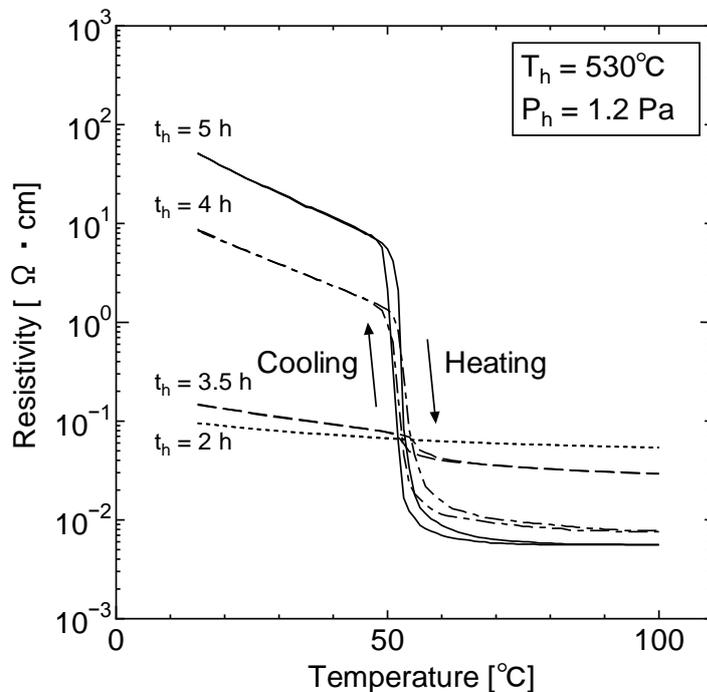


図 3.4 $t_h = 2\sim 5$ 時間での減圧熱処理により得られた VO_x 薄膜の R-T 特性

3.3.2 SiO₂/Si 基板と石英基板上に作製された VO_x 薄膜の特性比較

前項では、石英基板上に作製した V₂O₅ 薄膜の減圧熱処理で作製した VO_x 薄膜において、SiO₂/Si 基板上に作製した場合と概ね同様な還元プロセスと R-T 特性が得られた。しかし細部を見てみると、R-T 特性では t_h = 5 時間で得られた石英基板上に作製した VO_x 薄膜は SiO₂/Si 基板と比べて約 1 桁大きな 4 桁に渡る抵抗率変化が得られており、ヒステリシス特性における ΔT の値は SiO₂/Si 基板と比べて約 1°C 狭い 2°C となっている。そこで本項では、このような基板の違いによる R-T 特性の違いに関して考察を行う。

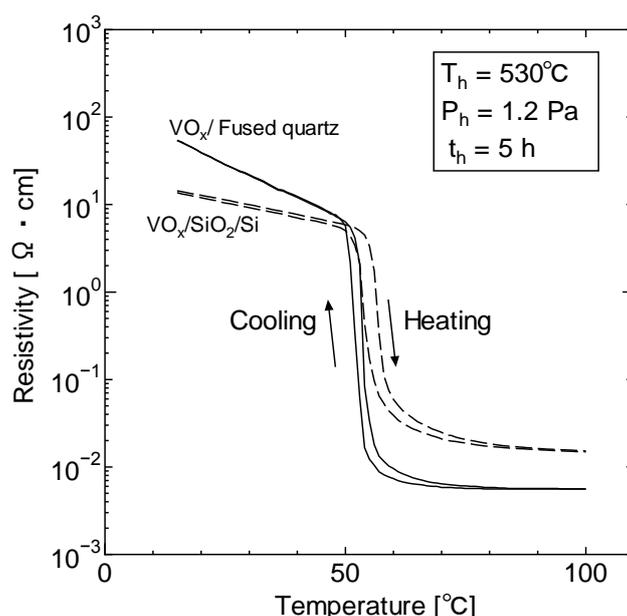


図 3.5 異なる基板上へ t_h = 5 時間で作製した VO_x 薄膜の R-T 特性

改めて図 3.5 に、石英基板と SiO₂/Si 基板上に T_h = 530°C, P_h = 1.2 Pa, t_h = 5 時間で作製した VO_x 薄膜の R-T 特性をそれぞれ実線と破線で示す。これらは、それぞれ図 3.4, 図 2.18 に示した t_h = 5 時間の特性と同じものである。このように比較すると SiO₂/Si 基板と石英基板上に作製した薄膜の R-T 特性の違いが明らかになる。前述したように、石英基板上に作製した VO_x 薄膜は、SiO₂/Si 基板の場合と比べて抵抗率変化は 1 桁大きな 4 桁に増加し、相転移温度 T_c は 55°C から 52°C へ 3°C 下がり、ヒステリシス温度幅 ΔT も 1°C 狭い 2°C となった。

次に、これらの特性の違いについて考察する。まず、抵抗率変化の違いについて考察する。図 3.6 に石英基板上と SiO₂/Si 基板上に作製した VO₂ が支配的に観測できる t_h = 4 時間と 5 時間の減圧熱処理により得られた VO_x 薄膜の 2θ/θ 特性を示す。上段は石英基板、下段は SiO₂/Si 基板の場合を示している。図を見ると SiO₂/Si 基板の場合は、2.4.1

項で述べたように、 $t_h = 4 \sim 5$ 時間において◇と○で示す VO_2 (020)と(210)の回折ピークに加えて、▲で示す V_3O_7 (440)と◆で示す V_4O_9 (004)による回折も得られている。さらに、●で示す V_2O_5 (002)による回折もわずかながら残留している。これに対し石英基板の場合は、◇と○で示す VO_2 (020)と(210)の回折ピークが支配的となり、 $t_h = 4$ 時間において▲で示す V_3O_7 (440)による回折が見られるだけである。このように、異なる基板に対して VO_x 薄膜に含まれる組成の違いが観測された。この違いに関しては現時点では不明であるが、基板表面の結晶構造の違いに起因していると考えられる。以上のことから、 SiO_2/Si 基板より石英基板上に作製した方が VO_x 薄膜内における VO_2 組成の均一性が高いことがわかる。このために、図 3.5 に示すように石英基板上に作製することにより SiO_2/Si 基板の場合と比べて抵抗率変化が 1 桁大きな 4 桁に増加したものと考えられる[34]。また、これにより T_c より高温側の金属相での抵抗率もより低くなっていると考えられる。

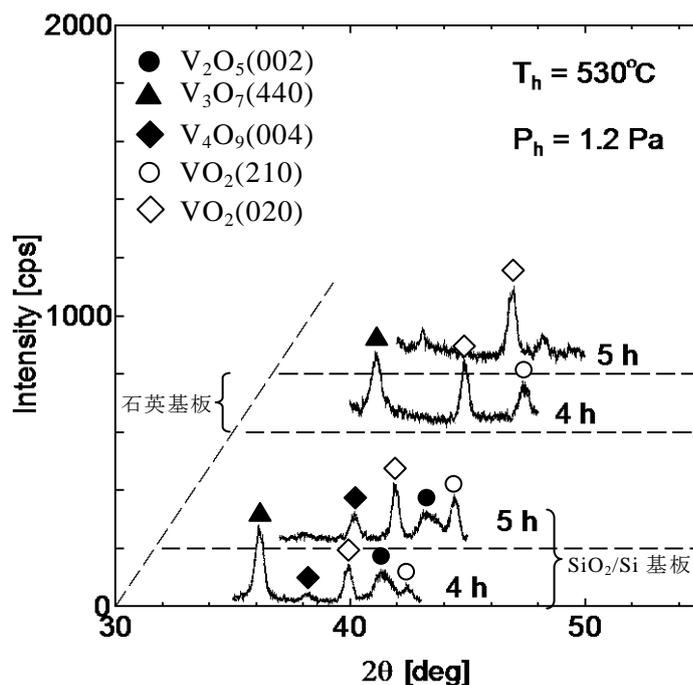


図 3.6 異なる基板上への VO_x 薄膜の $2\theta/\theta$ 特性の比較

さらに、 T_c の違いについて考察する。2.4.2 項に述べたように、 T_c は薄膜に内在するひずみに大きく左右される。さらに、このひずみは、外部ひずみ (extrinsic stress) と内部ひずみ (intrinsic stress) に分けられる。まず、外部ひずみについて考えてみる。この外部ひずみは基板と薄膜の熱膨張係数の違いにより導入されるひずみが主な要因であり、熱処理温度 T_h から室温近傍へ降温する際に、基板に対して VO_2 薄膜が縮むまたは引っ張ることによりひずみが形成さ

れる[34]。本実験で用いている SiO_2/Si 基板は、 Si 基板表面上に熱酸化処理により極薄膜の SiO_2 を形成しているだけである。したがって、 SiO_2/Si 基板の熱膨張係数は Si 基板の熱膨張係数で決定されると考えられる。 Si 基板と石英基板の熱膨張係数はそれぞれ 2.6×10^{-6} と $0.55 \times 10^{-6}/\text{K}$ である。一方、 VO_2 の熱膨張係数は、面方位によって異なることが知られている [80]-[82]。しかしながら、本実験で得られた (020) と (210) に方位をもつ VO_2 の熱膨張係数は、調べた限りにおいて現時点では不明である。そのため、定量的なひずみ量の議論は困難であるが、定性的には、 Si 基板と石英基板の大きく異なる熱膨張係数の違いが T_c の違いを引き起こす要因の一つになっていると考えられる。次に、内部ひずみについて考えてみる。内部ひずみは、グレインの形成により導入されるひずみが主な要因である。そして、そのグレインのサイズが T_c に大きく影響し、グレインサイズが小さいほど T_c は小さくなることが報告されている[72]。図 3.7(a)と(b)に SiO_2/Si 基板上と石英基板上に $t_h = 5$ 時間で作製した VO_x 薄膜の AFM 画像をそれぞれ示す。図からわかるように、両者のグレインサイズは明らかに異なり、(a)に示す SiO_2/Si 基板上に作製した薄膜のグレインサイズが約 200~300 nm であるのに対し、石英基板の場合は、約 100~200 nm である。このことから石英基板に作製した方がグレインサイズは小さいことがわかり、このサイズの違いも石英基板の低い T_c の原因の一つである。

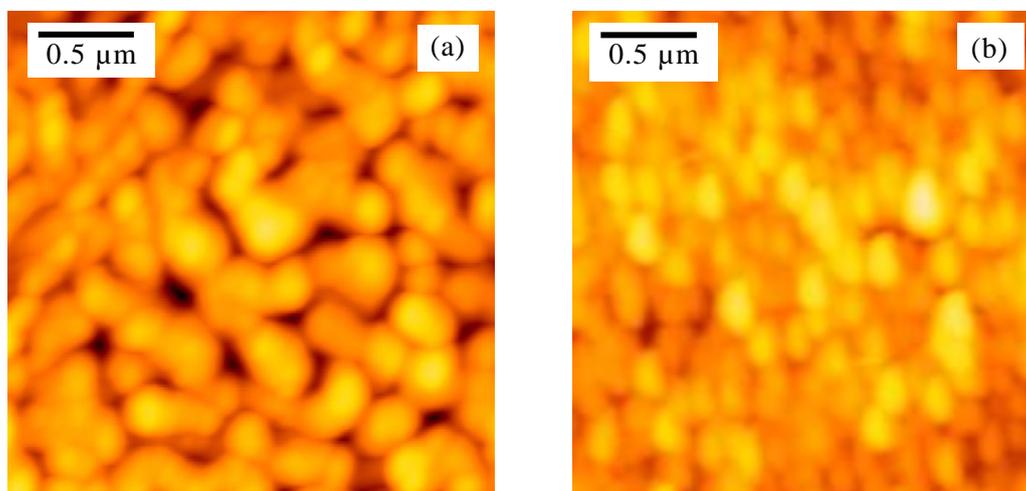


図 3.7 (a) SiO_2/Si 基板と (b) 石英基板上へ $t_h = 5$ 時間で作製した VO_x 薄膜の AFM 画像

最後に、 ΔT の違いについて考察する。 ΔT も前述した T_c と同様に主に内部ひずみ、すなわちグレインサイズに依存し、グレインサイズが小さいほど ΔT も小さくなることが同様に報告されている[72]。図 3.7 に示した通り石英基板上に作製した薄膜のグレインサイ

ズは SiO_2/Si 基板の場合と比べて小さい。そのため石英基板上に作製した VO_x 薄膜の ΔT は狭くなったと考えられる。また、グレインサイズの大きな違いにもかかわらず両者の ΔT の違いがわずか 1°C のみであったことは、 ΔT のグレインサイズ依存性が弱いためと考えられる[82]。

3.3.3 抵抗温度係数の評価

$T_h = 530^\circ\text{C}$, $P_h = 1.2 \text{ Pa}$ に固定し、 t_h を 2~5 時間まで変化させて石英基板上に作製した VO_x 薄膜の 300 K (27°C) での TCR と熱処理時間の関係を図 3.8 に●で示す。TCR は、図 3.4 の R-T 特性より求めた。また、比較のため図 2.20 に示した SiO_2/Si 基板上に作製した VO_x 薄膜の結果も合わせて○で図に示している。図からわかるように、両者とも熱処理時間の増加とともに TCR は高くなっているが、石英基板上に作製することにより倍以上高い TCR が得られている。特に、 $t_h = 4\sim 5$ 時間では、 $4.4\sim 4.8\%/\text{K}$ の高い TCR が得られた。この値はバルク単結晶と比べて遜色のない値であり[44]、さらに、他の成長方法で作製した VO_x 薄膜の TCR に比べて 2 倍程度高い値である[29],[31]。

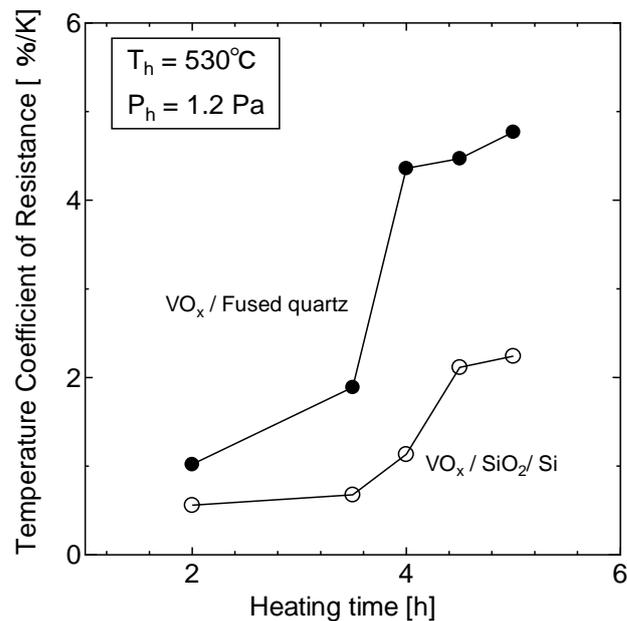


図 3.8 VO_x 薄膜の 300 K での抵抗温度係数と熱処理時間の関係

一般に、同じ VO_2 薄膜でも異なる基板上に作製した場合、その活性化エネルギーは異なり[82]、 VO_x 薄膜内において VO_2 の均一性が高いほど、活性化エネルギーが高くなる[83],[84]。さらに、本項で議論している TCR はこの活性化エネルギーと関係があり、活性化エネルギーが高いほど TCR は高くなる[85],[86]。前項で述べたように、熱処理

時間の増加とともに VO_x 薄膜内における VO_2 の均一性は高くなる。また、石英基板上に作製した VO_x 薄膜内における VO_2 の均一性は、 SiO_2/Si 基板の場合と比べて高い。そのため、両者とも熱処理時間の増加とともに TCR が高くなり、さらに石英基板上に作製した VO_x 薄膜の方が SiO_2/Si 基板より高い TCR を示したと考えられる。またこの考察は、相転移時に、より急峻に大きな抵抗変化を示すほど活性化エネルギーが高くなるという報告[34],[87]の妥当性を支持している。さらに、石英基板と SiO_2/Si 基板上に作製した VO_x 薄膜では、薄膜内に内在するひずみが異なることを前節で議論した。したがって、結晶ひずみによりバンド構造が変化し、これにより活性化エネルギーが異なり、この違いが TCR の違いに関係していることも考えられる。

以上により、MOD 法により $t_h = 4\sim 5$ 時間で石英基板上に作製した VO_x 薄膜において $4.4\sim 4.8\%$ /K の高い TCR が得られ、ボロメータ検出素子へ十分適用可能な VO_x 薄膜が得られた。

3.4 結言

MOD 法により石英基板上に V_2O_5 薄膜を作製し、同薄膜を減圧下で還元熱処理を行うことにより VO_x 薄膜を作製した。まず、 SiO_2/Si 基板上への V_2O_5 薄膜の作製により得られた最適な作製条件を用いて V_2O_5 薄膜を作製し、良好な軸配向特性ならびに隙間のほとんどない平坦なモフォロジー特性が得られた。その後、得られた V_2O_5 薄膜を酸素圧力 $P_h = 1.2\text{ Pa}$ 、熱処理温度 $T_h = 530^\circ\text{C}$ に固定し、熱処理時間 $t_h = 2\sim 5$ 時間まで変化させて熱処理した。XRD 特性より t_h の増加とともに V_2O_5 薄膜の還元は促進され、その還元プロセスは $\text{V}_2\text{O}_5 \rightarrow \text{V}_3\text{O}_7 \rightarrow \text{VO}_2$ であることがわかった。また、 $t_h = 4\sim 5$ 時間で減圧熱処理した薄膜の R-T 特性において相転移に伴う約 $3\sim 4$ 桁の抵抗率変化、 $T_c = 52^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ を示し、 VO_2 特有の特性をもつ R-T 特性が得られた。また、これらの値は、 SiO_2/Si 基板上へ作製した場合と異なり、抵抗率変化は 1 桁大きく、 T_c は約 3°C 低く、 ΔT は約 1°C 狭いものであった。これらの違いは、 VO_x 薄膜内における VO_2 組成の均一性、基板と薄膜の熱膨張係数ならびにグレイサイズの違いにより薄膜内に導入されるひずみの違いにより説明ができる。さらに、石英基板上に作製した VO_x 薄膜の TCR は、他の成長方法で作製した VO_x 薄膜の TCR に比べて 2 倍程度高い $4.4\sim 4.8\%$ /K の値を示した。

これにより、MOD 法によりアンテナ結合素子に適用可能な高い TCR をもつ VO_x ボロメータ薄膜がアンテナを製作するのに適した石英基板上に作製できた。

第4章 薄膜スパイラルアンテナの解析および設計

4.1 序言

本研究では、テラヘルツイメージングへの応用を目指した高感度な検出素子を実現するために MOD 法により VO_x ボロメータ薄膜を作製し、その薄膜の有用性をアンテナ結合素子の製作により実証することを主眼に置いている。これまでの議論において、MOD 法により薄膜アンテナの製作に適した石英基板上にアンテナ結合素子に十分適用可能な $4.4\sim 4.8\%$ /K の高い TCR をもつ VO_x 薄膜が実現できた。そこで次に、アンテナ結合素子に用いる薄膜アンテナに関して検討を進めていく。まず本章では、薄膜アンテナとしてスパイラルアンテナを取り上げ、その動作解析を行う。実際にアンテナ結合素子を製作しその特性を評価する際には、製作した素子がアンテナ結合素子として動作しているかどうかを確認する必要がある。そのためには 100 GHz 帯でのアンテナパターン、円偏波特性などの評価が重要となる。ここでは任意形状アンテナ上での電流分布を与える Mei の積分方程式を取り上げ、これにスパイラルアンテナの動径を表す関数を代入し、モーメント法により電流分布の数値解析を行う。得られた電流分布からベクトルポテンシャルを求め、これによりアンテナ遠方での放射電磁界を求める。続いて、実際に製作するスパイラルアンテナの設計をカレントバンド理論により行う。特に、本設計では 94 GHz において優れた円偏波特性をもつアンテナに着目した。

4.2 スパイラルアンテナ

テラヘルツ帯で動作するアンテナとしては、アンテナ形状の微細化により導波管構造での製作が困難となるため薄膜アンテナが必要となる。またアンテナの薄膜化は、アレー化によるアンテナ利得の向上[88]-[90]あるいはアンテナ結合素子の高密度配置による高感度化、高分解能化に有効である[91]。

薄膜アンテナとしては、ダイポールアンテナ[92]、スロットアンテナ、ボウタイアンテナ、対数周期アンテナ、スパイラルアンテナ、パッチアンテナ[93]などがある。本研究で応用を目指すテラヘルツイメージングなどに利用される電磁波は、様々な偏波面を有しているため、円偏波特性をもつアンテナが効果的である。また、比較的高いアンテナ利得を保ちつつ広帯域での周波数動作が得られ、さらにアレー素子を実現するにはアンテナ面に対し垂直な指向性をもつことが望まれる。上に述べた薄膜アンテナの

中で、パッチアンテナは直線偏波のみならず円偏波にも対応できる大きな特徴を有しているが、帯域が狭く、広い指向性をもつためアンテナ利得は低い[94]。また、ダイポールアンテナ、スロットアンテナは直線偏波に対応しており帯域は狭い。一方、ボウタイアンテナ、対数周期アンテナは、広帯域アンテナとして良く知られている。しかし、ボウタイアンテナは直線偏波に対応し、利得も低い。また、対数周期アンテナも基本的には1つのアンテナで広帯域を実現するため利得は低くなる。さらに、対数周期アンテナの放射パターンと入力インピーダンスは、周波数に対して周期的に変動する。これらのアンテナに対して、本研究で取り上げたスパイラルアンテナは、円偏波に対応している。また、比較的高い利得を保ちつつ広帯域な動作が可能であり、アンテナ面に対し垂直な指向性をもつ。さらに、スパイラルアンテナは自己補対構造をもち、周波数に依存しない定インピーダンスが得られるため[95]-[97]デバイスを設計する上でも大きな利点を有している。

スパイラルアンテナをアーム数で分類すると、1アーム[98]、2アーム[52]-[56]、4アーム[99],[100]、マルチアーム[101]に分けられる。1アームのスパイラルアンテナは、構造が非対称であるためアンテナパターンも非対称となる[98]。この非対称性は、2アーム、4アームまたはマルチアームとすることにより改善される[102],[103]。しかし、アーム数が4アームあるいはマルチアームになると電力分配器と移相器が必要となり、アンテナへの給電システムが複雑になる[98]。さらに、アーム数の増加とともに高次モードが現れ、サイドローブの多いアンテナパターンになる[99]-[101]。このような理由により、良好なアンテナパターンの対称性が得られ[103]、4アーム以上に比べ給電が容易な2アームスパイラルアンテナが良く用いられている[102],[103]。また、アームの幅について考えると、スパイラルアンテナはアーム幅が中心から外に向かうにしたがって徐々に広がっていく対数周期型とアーム幅が一定のアルキメデス型に大きく分けられる。本研究では比較的高い利得を得るためにアルキメデス型を選択し、2アームアルキメデススパイラルアンテナを採用した。

4.3 スパイラルアンテナの数値解析

4.3.1 任意形状アンテナにおける積分方程式

2-アームアルキメデススパイラルアンテナは2線式伝送線路を円形に曲げた構造をしており、曲線状である[103],[104]。このような曲線状のアンテナを考える前に、まず

その基本となる直線状アンテナについて考えてみる。

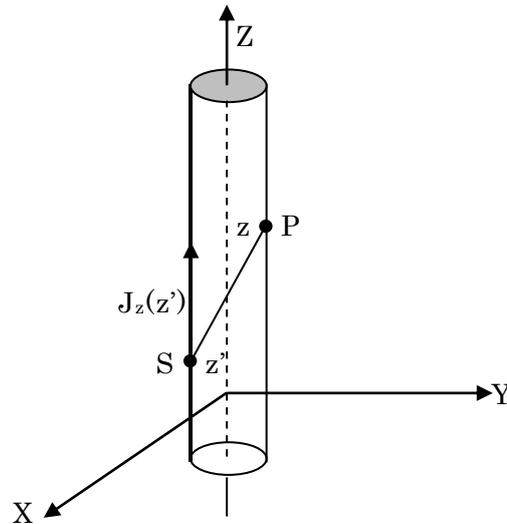


図 4.1 細線形状アンテナ

細線形状アンテナを図 4.1 に示す。導体の損失が小さいとき、アンテナに給電することによりアンテナの表面に線形的な電流分布 J が形成される。そして、放射電磁界を求める際に必要となるベクトルポテンシャル \mathbf{A} は、この電流分布により求められる。直線状アンテナは円筒対称で半径が波長に比べて十分小さいと仮定すると、電流分布は方位角によらず、 Z 軸方向のみに依存する。そのため、ベクトルポテンシャルは z 成分のみとなる。アンテナの表面に観察点 P がある場合には、 z' の座標にある放射点 S による観察点 P でのベクトルポテンシャルの z 成分は、次式の Hallen の方程式で与えられる[105]。

$$\begin{aligned} A_z(z) &= \mu_0 \int_L J(z') G(z, z') dz' \\ &= \mu_0 B \cos kz - \frac{j\mu_0 V_0}{2Z_0} \sin k|z| \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$G(z, z') = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \quad (4.2)$$

ここで、 B は係数であり、 V_0 、 k 、 Z_0 はそれぞれアンテナに印加される電圧、波数、自由空間でのインピーダンスである。また、 $J(z')$ は電流分布であり、 $G(z, z')$ は Green 関数である。 R は放射点 S と観察点 P の距離である。

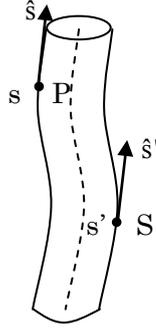


図 4.2 任意形状の線状アンテナ

この方程式を基に, 図 4.2 に示す任意形状の線状アンテナにおける電流分布を与える方程式が Mei により導かれた[105]。式(4.3)にその Mei の積分方程式を示す。

$$\int_L \mathbf{J}(s') \Pi(s, s') ds' = \mathbf{B} \cos ks - \frac{jV_0}{2Z_0} \sin k |s| \quad (4.3)$$

ここで, 積分核は

$$\begin{aligned} \Pi(s, s') &= \mathbf{G}(s, s') \hat{s} \cdot \hat{s}' \\ &= - \int_0^s \left[\frac{\partial \mathbf{G}(\xi, s')}{\partial \xi} \hat{\xi} \cdot \hat{s}' + \frac{\partial \mathbf{G}(\xi, s')}{\partial s'} + \mathbf{G}(\xi, s') \frac{\partial(\hat{\xi}, \hat{s}')}{\partial \xi} \right] \cos k(s - \xi) d\xi \end{aligned} \quad (4.4)$$

である。 \hat{s} と \hat{s}' はそれぞれ観察点 \mathbf{P} と放射点 \mathbf{S} での単位接線ベクトルである。ここで, 式(4.1)と(4.3)の被積分関数にある電流分布 \mathbf{J} が求めるべき関数であり, 未知関数となる。そのため, 放射電磁界を求めるのに必要なベクトルポテンシャル \mathbf{A} を知るためには, この未知関数 \mathbf{J} を計算する必要がある。本節では, 一般に良く用いられているモーメント法により電流分布 \mathbf{J} を数値解析する[105]-[109]。

4.3.2 モーメント法による電流分布の数値解析

モーメント法は未知関数を既知の適当な関数を用いて展開し, 適当な重み関数との内積をとることにより展開係数に関する連立方程式を作り, それを解くことにより未知関数を求める方法である。

モーメント法を適用するにあたり, まず式(4.4)においてアンテナの形状を与える変数 s, s' に 2 アームアルキメデス型スパイラルアンテナの動径を表す関数を導入する。図 4.3 にスパイラルアンテナの座標系を示す。この座標系においてスパイラルアンテナの動径を表す関数は次式で与えられる。

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + a\phi_s \quad (4.5)$$

ここで、 a はスパイラル係数である。この関数より求めた変数 s, s' を式(4.3)に代入することによりスパイラルアンテナ上の電流分布を与える積分方程式が得られる。この方程式における電流分布をモーメント法により求める。

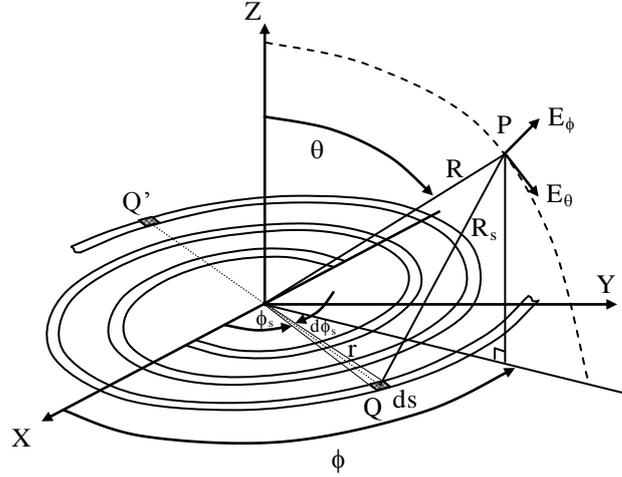


図 4.3 スパイラルアンテナの座標系

まず、スパイラルアンテナのアームを N セグメントに分割する。そのとき、電流分布は次式で表される。

$$\mathbf{J}(s') = \sum_{n=1}^N a_n \mathbf{g}_n(s') \quad (4.6)$$

ここで、 a_n は未知係数であり、 \mathbf{g}_n は基本関数と呼ばれる。基本関数の中には区分正弦関数、区分定数関数、区分線形関数などがある。式(4.3)の右辺は正弦関数であるため、基本関数として区分正弦関数を選択すれば精度の高い計算が可能となる [106]-[109]。

式(4.6)を式(4.3)に代入すると、

$$\int_L \sum_{n=1}^N a_n \mathbf{g}_n(s') \Pi(s, s') ds' = B \cos ks - \frac{jV_0}{2Z_0} \sin k|s| \quad (4.7)$$

となる。ここで、 B は未知係数である。

係数 a_n を積分関数の前に取り出すと、

$$\sum_{n=1}^N a_n \int_L \mathbf{g}_n(s') \Pi(s, s') ds' = B \cos ks - \frac{jV_0}{2Z_0} \sin k|s| \quad (4.8)$$

となる。

係数 B も未知であるため、式(4.8)の左辺に移項させれば、計算しやすくなる。そうすると、

$$\sum_{n=1}^N a_n \int_L g_n(s') \Pi(s, s') ds' - B \cos ks = -\frac{jV_0}{2Z_0} \sin k |s| \quad (4.9)$$

となる。

式(4.9)を行列で表すと、

$$\begin{aligned} [K_{mm}][J_n] &= [F_m] & (m, n = 1, 2, \dots, N+1) \\ [J_n] &= [K_{mm}]^{-1}[F_m] & (4.10) \end{aligned}$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} J_n &= \begin{cases} a_n & (n = 1, 2, \dots, N) \\ B & (n = N+1) \end{cases} \\ K_{mm} &= \begin{cases} \int_L g_n(s') \Pi(s_m, s') ds' & (n = 1, 2, \dots, N) \\ -\cos ks_m & (n = N+1) \end{cases} \\ F_m &= -\frac{jV_0}{2Z_0} \sin k |s_m| \end{aligned}$$

である。式(4.10)を求められた a_n と式(4.6)により電流分布 J が得られる。

4.3.3 スパイラルアンテナの放射電磁界

まず、得られた電流分布を用いてベクトルポテンシャルを計算する。図 4.3 に示すスパイラルアンテナの座標系において P は観察点であり、 R 、 θ 、 ϕ の極座標で与えられる。また、 r 、 ϕ_s はスパイラルアンテナ上の Q 点を定義する座標である。 E_ϕ と E_θ は P 点における電界の 2 つの直交成分であり、 E_ϕ は角度 θ の回転軸に平行し、 E_θ は角度 θ の面にある。 P 点が十分遠方にあるとき、 Q 点と P 点との距離 R_s は、

$$R_s \approx R - r \sin \theta \cos(\phi - \phi_s) \quad (4.11)$$

と近似できる。

一方、電流源 J_s によるベクトルポテンシャル \mathbf{A} はスパイラルアンテナに沿った経路 L についての次式の線積分で表される。

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_L J_s \frac{e^{-jkR_s}}{R_s} ds \quad (4.12)$$

式(4.11)を式(4.12)に代入し、 A_ϕ 、 A_θ 成分に分解する。ただし、原点に対して Q 点に対称

なもう一方のアーム上の点の電流からの寄与も考慮し

$$A_\phi \approx \frac{\mu_0}{4\pi R} \int J_\phi (e^{-jkR_Q'} + e^{-jkR_Q}) ds \quad (4.13)$$

$$A_\theta \approx \frac{\mu_0}{4\pi R} \int J_\theta (e^{-jkR_Q'} + e^{-jkR_Q}) ds \quad (4.14)$$

となる。ここで、次に以下の変数変換を行う。

$$J_\phi ds = J_s \{rd\phi_s \cos(\phi - \phi_s) - dr \sin(\phi - \phi_s)\} \quad (4.15)$$

$$J_\theta ds = J_s \cos \theta \{rd\phi_s \sin(\phi - \phi_s) + dr \cos(\phi - \phi_s)\} \quad (4.16)$$

$$R_{Q'} = R + r \sin \theta \cos(\phi - \phi_s) \quad (4.17)$$

$$R_Q = R - r \sin \theta \cos(\phi - \phi_s) \quad (4.18)$$

式(4.15)～(4.18)を式(4.13), (4.14)に代入して整理すると次式のベクトルポテンシャルの ϕ , θ 成分が得られる。

$$A_\phi = \frac{\mu_0 e^{-jkR}}{2\pi R} \int J_s \cos kp \{rd\phi_s \cos(\phi - \phi_s) - dr \sin(\phi - \phi_s)\} \quad (4.19)$$

$$A_\theta = \frac{\mu_0 e^{-jkR} \cos \theta}{2\pi R} \int J_s \cos kp \{rd\phi_s \sin(\phi - \phi_s) + dr \cos(\phi - \phi_s)\} \quad (4.20)$$

ここで、 $p = r \sin \theta \cos(\phi - \phi_s)$ である。また、電磁界における電界成分 E_ϕ , E_θ は、これらのベクトルポテンシャルを用いて次の放射ゲージを用いて計算できる。

$$E_\phi = -j\omega\mu_0 A_\phi \quad (4.21)$$

$$E_\theta = -j\omega\mu_0 A_\theta \quad (4.22)$$

式(4.19)と(4.20)は、空中におかれたスパイラルアンテナに対する遠方でのベクトルポテンシャルを表しており、アンテナ両面から等しい強度の電磁波が空中に放射される。しかし、本研究ではアンテナは基板の上に製作し、その基板裏面に反射鏡を付けたアンテナ構造を考えている[110]-[112]。これは、イメージングやレーダーなどアンテナ片面での受信あるいは送信を考えた場合、反射鏡を付けることにより高い検出感度を得られるためである[113]。したがって、裏面に反射鏡を取り付けた基板上にアンテナが置かれた場合には基板の影響を考慮したベクトルポテンシャルを求める必要がある。そこで、この構造でのアンテナを解析するため imaging force モデルを導入した[114],[115]。図 4.4 に imaging force モデルを示す。アンテナは h の厚さを有する基板上に位置している。アンテナから放射される電磁波は 2 つの部分に分かれる。1 つは空気

中に直接放射される電磁波である。もう 1 つは基板側に放射され反射鏡で反射した電磁波あり，この電磁波を imaging force モデルでは実像のアンテナから $2h$ 離れた虚像のアンテナから基板を通じて放射された電磁波として考える。したがって，アンテナから放射される電磁波はこれら 2 つの波の和であり，空中におかれたアンテナのベクトルポテンシャルの式(4.19)，(4.20)にアンテナの影響を加えたベクトルポテンシャル A_ϕ と A_θ は次式となる。

$$A_\phi = \frac{j\mu_0 e^{-jkR}}{\pi R} \int J_s \cos k\rho \sin kq \{r d\phi_s \cos(\phi - \phi_s) - dr \sin(\phi - \phi_s)\} \quad (4.23)$$

$$A_\theta = \frac{j\mu_0 e^{-jkR} \cos \theta}{\pi R} \int J_s \cos k\rho \sin kq \{r d\phi_s \sin(\phi - \phi_s) - dr \cos(\phi - \phi_s)\} \quad (4.24)$$

基板の誘電率 ϵ_r と厚さ h の影響は，式(4.23)，(4.24)に含まれるパラメータ $q = \sqrt{\epsilon_r} h \cos \theta$ により反映されている。これらのベクトルポテンシャルを用いることにより反射鏡を付けた基板上に製作したスパイラルアンテナのアンテナパターン，周波数帯域などが計算できる。

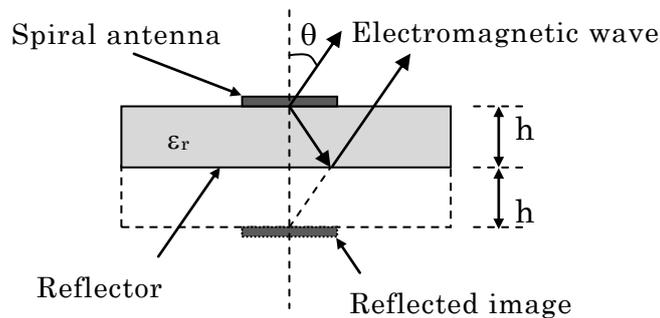


図 4.4 基板の影響を考慮するための imaging force モデル

4.4 薄膜スパイラルアンテナの設計

4.2 節で述べたように，スパイラルアンテナの形状は図 4.5 に示す 2 アームアルキメデス型とした。また，動作帯域としてはテラヘルツ帯で最も大気中での減衰が少ない 100 GHz 帯を含む W バンド (75~110 GHz) とした[110]。まず，図 4.5 においてアンテナの外径 (d_{cl}) と内径 (d_{ch}) をカレントバンド理論[102]-[104]を用いて決定した。アンテナの原点に交差する線を引き，原点に対して対称側で A と A' 点を取る。また，その線と A 点の隣接アームとの交点を B とする。カレントバンド理論によると A 点での電

流と B 点での電流が同位相であれば、その領域での放射が一番強くなり放射領域となる。A と A' 点は原点に対し対称であるため、原点からアームに沿って A と A' 点までの長さは同じである。また、アームに沿う原点から A と B 点までの長さの差はアームのセグメント A'B である。2 アームスパイラルアンテナは一般に給電の構造を簡単とするため平衡励起、すなわち同振幅を逆位相で給電しており [103],[104],[111],[112] 本研究でもこの平衡励起を用いた。これにより A' と A 点での位相差は π となる。スパイラル形状のため原点から A' と B までの距離は若干異なるが、円形近似して同じ距離にあると仮定すると A' と B 点での電流が逆位相すなわちアームに沿って A' から B までの距離を波長の半分 $\lambda/2$ とすることにより A と B 点は同位相になる。すなわち、 d を原点と B 点の長さを半径とする円の直径とすると $\pi d/2 = \lambda/2$ の関係にすることにより A 点での電流と B 点での電流が同位相となる。書き直すと

$$d = \lambda/\pi \tag{4.25}$$

となる。

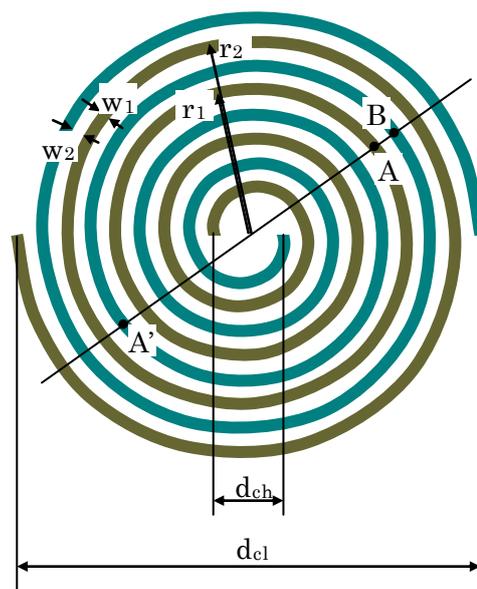


図 4.5 スパイラルアンテナの設計

空中におかれたアンテナの場合、式(4.25)における λ は自由空間での波長 λ_0 である。しかし、本研究ではスパイラルアンテナを基板上に製作しているためアンテナの動作波長は基板の誘電率を考慮しなければならない。誘電体基板上にあるアンテナの動作波長は、式(4.26)に示すように空気と基板との平均誘電率を考慮した平均波長 λ_m で与えられる [114]-[117]。

$$\lambda_m = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\frac{1 + \epsilon_r}{2}}} \quad (4.26)$$

ここで、 ϵ_r は基板の比誘電率である。基本的にアンテナの外径 (d_{cl}) および内径 (d_{ch}) は、アンテナの最低動作周波数 75 GHz と最高動作周波数 110 GHz で決定され、それぞれの周波数に対して式(4.26)に石英基板の比誘電率 ($\epsilon_r = 3.8$) を代入して得られた平均波長と式(4.25)から求められる。しかし、本研究では不要な高次モードの除去ならびに放射領域の広がりを考慮し、最終的に外径 (d_{cl}) と内径 (d_{ch}) をそれぞれ 1.9 mm, 0.26 mm とした。

4.2 節で述べたように、スパイラルアンテナを自己補対構造とすることにより周波数に対して入力インピーダンスは一定となる。ここで自己補対構造とは、無限に広い完全導体板の 1/2 で構成された任意形状のアンテナにおいて、板の部分の形状と穴に相当する部分の形状が完全に同形である構造のことである。したがって、図 4.5 においてスパイラルアンテナを自己補対構造とするためには、 w_1 と w_2 をそれぞれアンテナのアーム幅とアーム間隔とすると、 $w_1 = w_2 = w$ としなければならない。スパイラル関数の定義から、どちらか 1 本のアームに対してアームが 1 周したときの半径の差はスパイラル係数 a を用いて、 $r_2 - r_1 = 2\pi a$ となる。しかし、その差は $2w_1 + 2w_2 = 4w$ であるため、次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} 2\pi a &= 4w \\ w &= \pi a / 2 \end{aligned} \quad (4.27)$$

これにより、アンテナアーム幅 w はスパイラル定数 a によって決定されることがわかる。4.3.2 項の式(4.5) で示したように、スパイラルアンテナの関数は $r = r_0 + a\phi_s$ で定義され、 a は巻線の密度に関係し、軸比に影響を与える[114],[118]。 a が小さいとアンテナは密に、大きいと粗に巻かれる。また、 a と軸比の関係は a を波長で規格化した値を用いて検討されており、マイクロ波帯では $a_\lambda = a/\lambda$ が 0.01 程度のとき軸比は 1.5 dB 以下となることが報告されている[118]。このように良好な軸比が得られる条件から a と w をそれぞれ 0.032 mm/rad と 52 μm とした。この a の値と $d_{cl} = 1.9$ mm, $d_{ch} = 0.26$ mm を式(4.5)に代入して ϕ_s を求めると、アームの巻き数はおおよそ 4 回(すなわち、終端の角度が $360 \times 4 = 1,440^\circ$) となる。

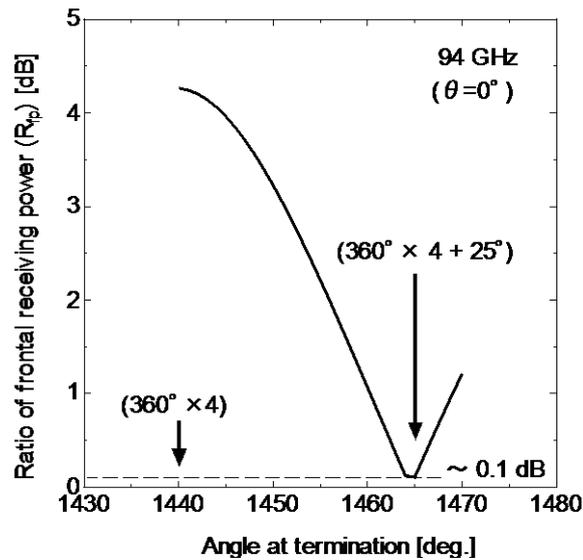


図 4.6 94 GHz 電磁波に対する正面での電力の比と終端角度との関係

スパイラルアンテナの円偏波特性は、終端角度と動作周波数に大きく依存する。円偏波性の良し悪しは軸比を用いて評価されるが、本研究では円偏波ではなく直線偏波に対応したホーンアンテナを用いて実験を行っている。そのため、軸比の代わりに新たに円偏波特性を評価する指標として R_{fp} を式(4.28) のように定義した。

$$R_{fp} = 10 \times \left| \log \frac{E_{\phi}(\theta = 0^{\circ})^2}{E_{\theta}(\theta = 0^{\circ})^2} \right| \quad (4.28)$$

ここで、 $E_{\phi}(\theta = 0^{\circ})$ と $E_{\theta}(\theta = 0^{\circ})$ は、図 4.3 で定義されるアンテナ正面 ($\theta = 0^{\circ}$) での直交する複素電界ベクトルの振幅である。実験的には、入射電磁波の電界成分が直交する E_{ϕ} ベクトルと E_{θ} ベクトルの方向と一致するようにホーンアンテナの向きを 90° 回転させてアンテナに入射し、これにより得られた受信電力の比を計算することにより R_{fp} を求めることができる。したがって、良好な円偏波特性を実現するためには 式(4.28) で定義された R_{fp} をできるだけ小さな値にする必要がある。図 4.6 に式(4.23), (4.24)を用いて計算した電磁波の周波数を 94 GHz としたときの R_{fp} とスパイラルアンテナの終端角度の関係を示す。計算は、巻き数が正確に 4 回である $1,440^{\circ}$ から $1,470^{\circ}$ まで変化させて行った。終端角度の増加に伴い R_{fp} は減少し、 $1,465^{\circ}$ で最小となり約 -0.1 dB の R_{fp} の値を示した後、 $1,470^{\circ}$ まで角度の増加とともに増加している。したがって、本研究では、94 GHz 電磁波に対して良好な円偏波特性が得られるように終端角度を $1,465^{\circ}$ ($360^{\circ} \times 4 + 25^{\circ}$) にした。これまでの検討で得られた 2 アームアルキメデススパイラル

アンテナの設計パラメータを表 4.1 にまとめて示す。

表 4.1 アンテナの設計パラメータ

設計パラメータ	設計値
アンテナの形状	2-アームアルキメデススパイラル
動作周波数	75～110 GHz
外径 (d_{cl})	1.9 mm
内径 (d_{ch})	0.26 mm
スパイラル定数 (a)	0.032 mm/rad
アーム幅 (w)	52 μm
終端角度	1,465° ($360^\circ \times 4 + 25^\circ$)

また、自己補対構造をもつアンテナの入力インピーダンスは、空中におかれた場合は $Z_0 = 60\pi$ で与えられるが、誘電率 ϵ_r の基板上にあるアンテナの場合は次式で与えられる [95]。

$$Z = \frac{60\pi}{\sqrt{\frac{1+\epsilon_r}{2}}} \quad (4.29)$$

したがって石英基板を用いた場合、式(4.29)から入力インピーダンスは約 120 Ω と見積もられる。

最後に、4.3.3 項で得られた式(4.23)、(4.24)を用いて計算したアンテナパターンの一例を示す。図 4.7, 4.8 は、それぞれスパイラルアンテナが空中にある場合と厚さ $h = 0.4$ mm の石英基板 ($\epsilon_r = 3.8$) 上にある $\phi = 90^\circ$ の場合の 94 GHz に対するアンテナパターンである。図において、実線および点線はそれぞれ E_ϕ 、 E_θ 成分に対するアンテナパターンであり、アンテナ正面 ($\phi = 0^\circ$) での E_θ 成分に対する電力により規格化している。空中におかれた場合、 E_θ 成分のアンテナパターンは絞れたパターンを示している。しかし、 E_ϕ 成分のパターンは $\phi = \pm 90^\circ$ とアンテナ正面での利得差は 2.5 dB 程度であり比較的ブロードなパターンとなっている。一方、石英基板上にある場合は、基板の影響により E_ϕ 成分のアンテナパターンは絞れており、 E_θ 成分のパターンも空中にある場合より若干絞れている。このように、アンテナパターンからも反射鏡を付けた基板上にあ

るアンテナの方が空中にあるアンテナに比べて高い利得が得られることがわかる。また，図からわかるように両者ともアンテナ正面での E_ϕ , E_θ 成分に対する値はほぼ一致しており，アンテナ設計通り 94 GHz 電磁波に対して良好な円偏波特性が得られている。

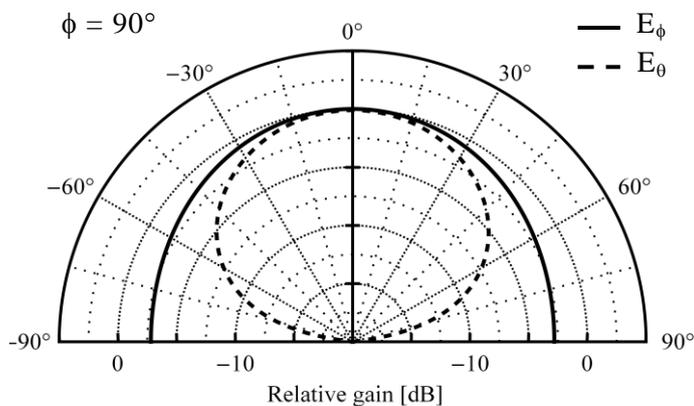


図 4.7 94 GHz 電磁波に対する空中でのアンテナのアンテナパターン

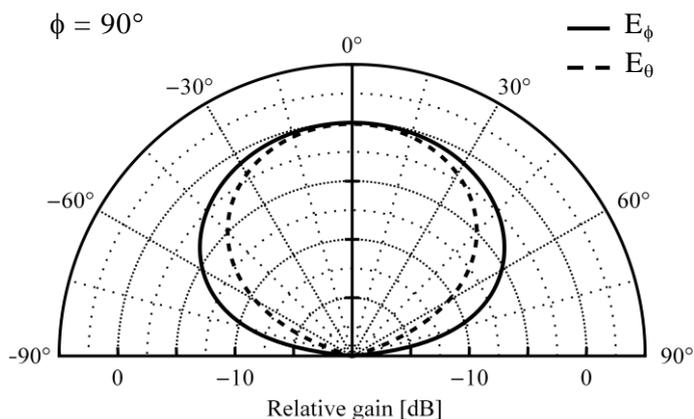


図 4.8 94 GHz 電磁波に対する基板上にあるアンテナのアンテナパターン

4.5 結言

VO_x マイクロボロメータ検出器を結合するアンテナであるスパイラルアンテナの解析および設計を行った。アンテナの構造としては，良好なアンテナパターンの対称性が得られ，給電が容易である 2 アーム構造とした。また，アームの形状としては対数周期型に比べて高い利得を得るためにアルキメデス型を選択した。これにより最終的なアンテナ構造を 2 アームアルキメデス型とした。次に，この構造に基づいてアンテナの数値解析を行った。解析には細線形状アンテナに対する Hallen の方程式を基に導いた任意形状アンテナ上での電流分布を与える Mei の積分方程式を用いた。この Mei

の積分方程式にスパイラルアンテナの動径を表す関数を代入し、モーメント法により電流分布の数値解析を行い、得られた電流分布からベクトルポテンシャルを求め、これによりアンテナ遠方での放射電磁界を求めた。さらに、imaging force モデルを導入することにより誘電体基板におかれたアンテナに対する放射電磁界を与えるベクトルポテンシャルを導いた。

アンテナの設計においては、アンテナの外径ならびに内径はカレントバンド理論を用い隣り合うアーム間での電流が同位相になるように決定した。また、スパイラルアンテナは自己補対構造とすることにより周波数に対して入力インピーダンスを一定にすることができる。そのため、アンテナのアーム幅とアーム間隔を同じにした。また、その間隔 w を決定するスパイラル係数 a は、アンテナの軸比が 1.5 dB 以下になる条件から求めた。さらに、本設計で注目した良好な円偏波特性を得るために R_{fp} を定義し、計算により 94 GHz において最も良好な円偏波特性が得られる終端角度を決定した。これにより、実際に石英基板上に 2 アームアルキメデススパイラルアンテナを製作するに当たり必要な設計パラメータが得られた。

第 5 章 薄膜スパイラルアンテナの製作および受信特性

5.1 序言

第 4 章では、アンテナ結合素子に用いる薄膜アンテナとして 2 アームアルキメデススパイラルアンテナを取り上げた。モーメント法により同アンテナ表面における電流分布の数値解析を行い、得られた電流分布からベクトルポテンシャルを求める方法について述べ、一例として空中および石英基板上にあるアンテナのアンテナパターンの計算を行った。さらに、自己補対構造をもつアンテナをカレントバンド理論に基づき設計した。

本章では設計したパラメータを用いて微細加工によりスパイラルアンテナを製作する。アンテナにより受信した信号の検出については、平行 2 線により信号を取り出す方法がある [106]。しかし、設計したアンテナの内径が 0.26 mm と非常に微細であることからアンテナ中央に直接微細な検出器を配する方法が望ましい。そこで、本章では Bi マイクロボロメータを検出器として用いた。Bi ボロメータの感度は低いですが、本章ではアンテナの受信特性を評価することが目的であることから製作が容易な Bi ボロメータは検出器として良い選択である。次に、製作したアンテナの受信特性を 75~110 GHz の周波数範囲において評価した。受信特性としては、アンテナパターン、周波数帯域特性を中心に議論した。さらに、基板上に製作したアンテナの特性は基板の厚さや誘電率に大きく影響されるため検出電圧の基板厚さ依存性についても言及する。

5.2 薄膜スパイラルアンテナの製作

アンテナは、まずスパイラルアンテナ部を製作し、その後 Bi マイクロボロメータ検出器をアンテナに結合させる手順で製作した。製作プロセスを図 5.1 に示す。図はアンテナの中心部を切り出して示している。まず、図 5.1 (a)でトリクロロエチレン、アセトン、エタノールにより 10 分ずつ超音波洗浄した石英基板上に約 300 nm の金を真空蒸着した。金薄膜上にフォトレジスト S1818 を塗布した後、光露光法によりアンテナ部のパターンニングを行い、現像液 MF-319 により現像した。次に、図 5.1 (b)で 10% KI 水溶液により金を化学エッチングし、アセトンでレジストを除去することによりアンテナ部を製作した。続いて、図 5.1 (c)でアンテナ上に再びフ

フォトレジスト S1818 を塗布した後、アンテナ中央部に Bi を蒸着するための $20\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m}$ の長方形の部分パターンニングし、現像液 MF-319 により現像した。最後に、図 5.1(d)において Bi を真空蒸着し、アセトンでリフトオフすることにより素子を完成させた。特に、蒸着では Bi 薄膜をアンテナのエッジ部分で切れずに堆積させるため、アンテナ正面から 1 回蒸着し、その後正面に対し約 $\pm 45^\circ$ の方向からそれぞれ 1 回ずつ計 3 回にわたり蒸着を行った。これにより得られた Bi の厚みは約 300 nm である。

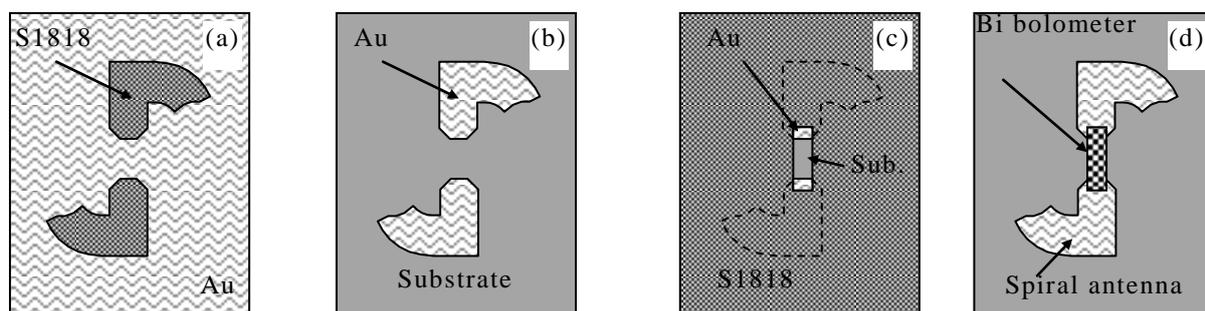


図 5.1 薄膜スパイラルアンテナの製作プロセス

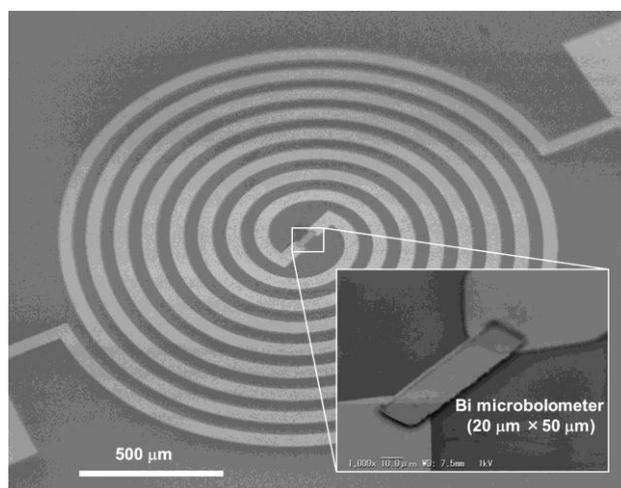


図 5.2 Bi マイクロボロメータとスパイラルアンテナ結合検出素子の SEM 写真

図 5.2 に製作したスパイラルアンテナの SEM 写真を示す。設計通り $52\ \mu\text{m}$ のアーム幅、 $1.9\ \text{mm}$ の外径、 $0.26\ \text{mm}$ の内径、 $1,465^\circ$ の終端角度をもつ 2 アームアルキメデススパイラルアンテナが製作できた。アンテナの両端にはアンテナにバイアス

を印加し，検出電圧を測定するための $0.9\text{ mm} \times 0.9\text{ mm}$ の電極がある。さらに，アンテナ中央には図の拡大写真からわかるように幅 $20\text{ }\mu\text{m}$ ，長さ $50\text{ }\mu\text{m}$ の Bi マイクロボロメータが配置されている。

5.3 100 GHz 帯での受信特性の測定および評価

5.3.1 測定系

図 5.3 にアンテナの受信特性の測定系を示す。製作したアンテナの基板裏側に Cu 反射板を張り付け，アンテナを θ と ϕ の方向に回転可能なステージ上に設置した。75 ~ 110 GHz の電磁波は，電力増幅モジュールを取り付けた信号発生器 (Agilent 8257C) からの基本信号を通倍器 (HP 83558A) により 6 逡倍することにより得た。同信号は電氣的に 1 kHz で強度変調されており，変調された信号をホーンアンテナ (Flann 27240) を介してアンテナに照射した。ホーンアンテナに供給される電力は，パワーメーター (Yokogawa 7651) によりモニターした。電磁波照射により検出した電圧は，ロックインアンプ (NF LI5630) により測定した。

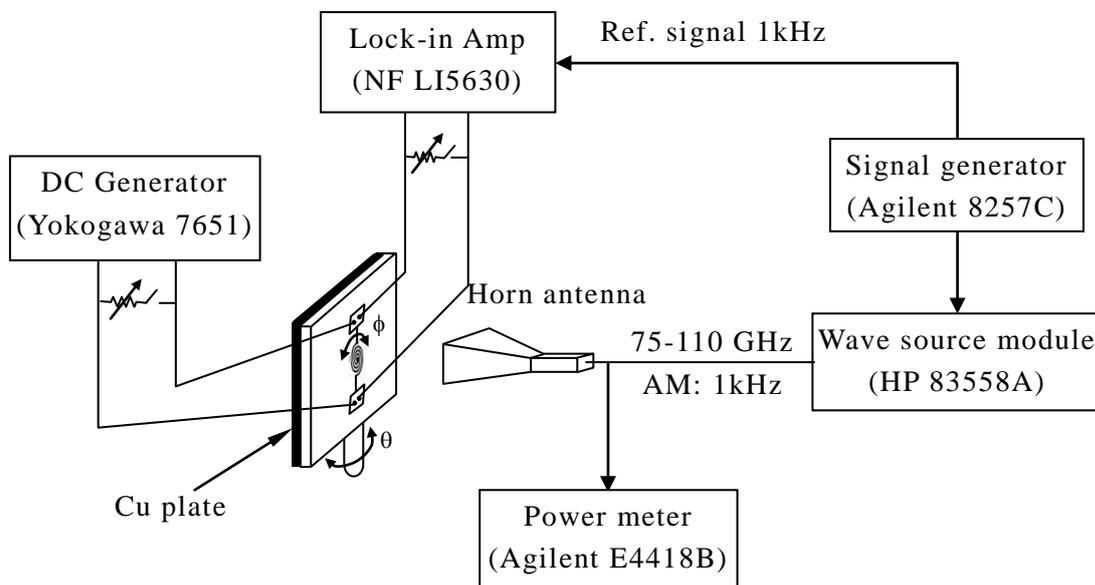


図 5.3 アンテナの受信特性に対する測定系

アンテナパターンは，電磁波をアンテナ面に対して垂直に照射し， ϕ を 0° および 90° に固定して θ を変化させながら測定した。式 (4.28) で表される R_{fp} において

E_ϕ , E_θ 成分に対するアンテナ正面での受信電力は、それぞれ $\phi = 90^\circ$, $\theta = 0^\circ$ と $\phi = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$ での検出電圧に対応するものである。また、周波数帯域特性は $\phi = 90^\circ$, $\theta = 0^\circ$ に固定し、周波数を変化させながら測定した。

5.3.2 アンテナ受信特性の測定および評価

まず、製作したアンテナが照射した電磁波に対してアンテナとして動作しているかどうかを確かめるため 94 GHz に対するアンテナパターンを測定した。図 5.4(a), 5.4(b) に それぞれアンテナ位置を $\phi = 0^\circ$ および $\phi = 90^\circ$ に固定し、電磁波の電界成分が E_ϕ および E_θ 方向に平行になるようにアンテナに照射したときのアンテナパターンを示す。基板厚さは 0.4 mm である。●と実線は、それぞれ E_ϕ 成分に対する実験値と式(4.23)に示すベクトルポテンシャルから求めた理論値を表している。また、◆と破線は、それぞれ E_θ 成分に対する実験値と式(4.24)に示すベクトルポテンシャルから求めた理論値である。さらに、実験値、理論値は $\theta = 0^\circ$ での E_ϕ 成分に対する検出電圧により規格化している。図からわかるように、実験により得られたパターンと理論的なパターンはよく一致している。このことから製作したアンテナが 94 GHz 電磁波に対してアンテナとして動作していることが確認できた。さらに、 $\phi = 0^\circ$, $\phi = 90^\circ$ の両者において、 $\theta = 0^\circ$ での E_ϕ および E_θ 成分に対する検出電圧はほぼ同じ値を示している。このことから、設計通り 94 GHz において良好な円偏波特性が実験から得られた。

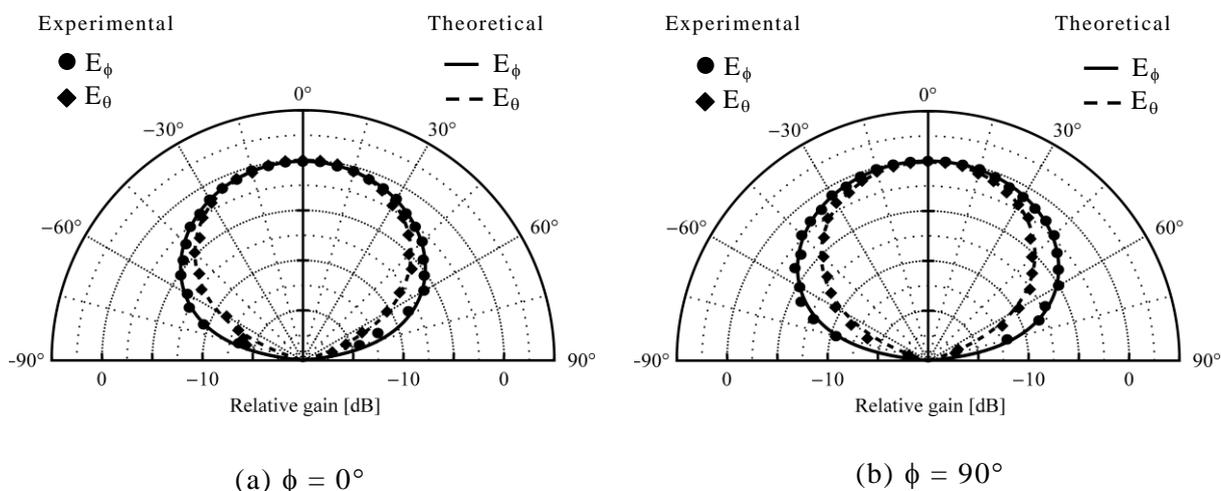
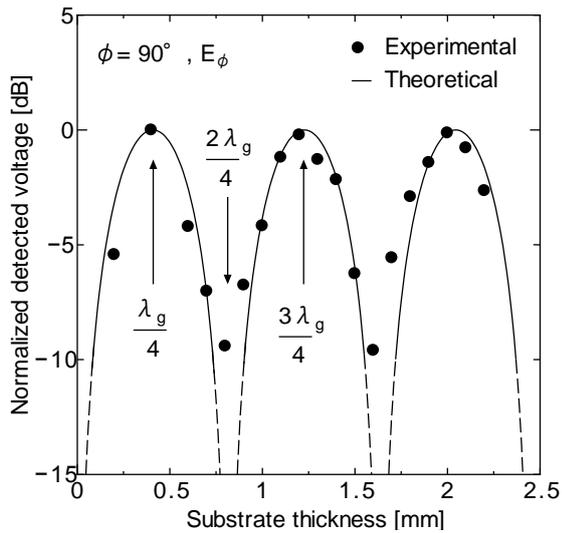
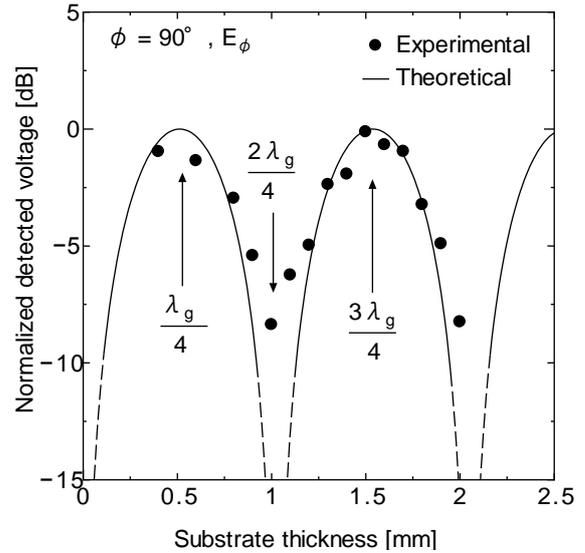


図 5.4 94 GHz 電磁波に対するアンテナパターン



(a) 94 GHz



(b) 75 GHz

図 5.5 94 GHz と 75 GHz 電磁波に対する $\phi = 90^\circ$ での
アンテナによる検出電圧の基板厚さ依存性

4.3.3 項の図 4.4 で説明したように、アンテナから放射される電磁波は直接空気中に放射される波と基板側に放射される波に分けられる。基板側に放射された波は基板の裏面で反射し、直接空気中に放射される波と重ね合わされる。基板側に放射される波の位相は基板の厚さに依存する。そのため、アンテナの受信特性は基板の厚さに依存すると考えられる。そこで次に、アンテナによる検出電圧の基板厚さ依存性を検討した。図 5.5 (a) は 94 GHz 電磁波をアンテナに照射したときの $\phi = 90^\circ$ における E_ϕ に対する検出電圧と基板の厚さ (h) との関係を示している。ここで、● と実線はそれぞれ実験値と式(4.23)から求めた理論値である。図 5.5(a) において検出電圧は 0.2~2.2 mm まで基板の厚さを変化させることにより理論値とほぼ同様な周期的な変動を示した。また、検出電圧は基板が $\lambda_g/4$ の奇数倍の厚さのとき最大となり、偶数倍の厚さのとき最小となった。ここで、 λ_g は基板内波長である。基板が $\lambda_g/4$ の厚さの場合には、基板側に入射した電磁波は基板裏面で反射されるとき位相が 180° シフトするため厚さ $\lambda_g/4$ の基板を往復する際の位相シフト 180° とあわせて位相が 360° シフトして基板表面のアンテナ面に達する。そのため、空気側から直接入射する電磁波と同位相で足し合される。一方、基板が $\lambda_g/2$ の厚さの場合には、同様の考察により基板側に入射した電磁波は基板裏面で反射して基板表面のアンテナ面

に達するまでに位相が 180° シフトするため空気側から直接入射する電磁波と逆位相で足し合される。このような理由により検出電圧は、基板が $\lambda_g/4$ の奇数倍の厚さのとき最大となり、偶数倍の厚さのとき最小となる。この実験結果の妥当性を確認するため異なる周波数で検出電圧の基板厚さ依存性を検討した。図 5.5 (b)に 75 GHz 電磁波をアンテナに照射したときの $\phi = 90^\circ$ における E_ϕ に対する検出電圧と基板の厚さ(h)との関係を示す。75 GHz の電磁波をアンテナに照射した場合も 94 GHz の場合と同様に検出電圧は理論値とほぼ同様な周期的な変動を示し、検出電圧は基板が $\lambda_g/4$ の奇数倍の厚さのとき最大となり、偶数倍の厚さのとき最小となった。ここで、94 GHz と比べて基板の厚さに対する周期間隔が長くなっているのは照射した 75 GHz の電磁波の波長が 94 GHz と比べて長いためである。これらの実験結果から、基板の厚さがアンテナの検出電圧に大きく影響することがわかり、これにより最適なアンテナ構造を設計するのに必要な知見が得られた。

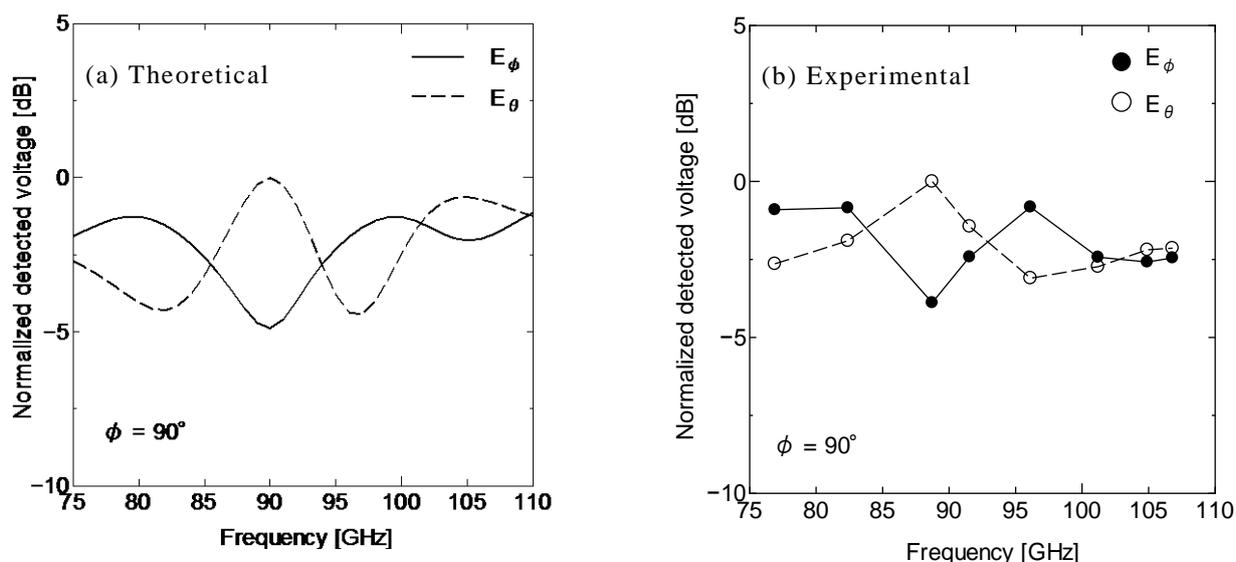


図 5.6 E_ϕ および E_θ 成分による正面検出電圧の周波数依存性

アンテナの特性を議論する上で周波数帯域特性を評価することは実用上重要なことである。そこで、本研究ではスパイラルアンテナが 75~110 GHz で動作するように設計しているためこの周波数範囲において帯域特性を評価する。しかし、上述したように検出電圧は基板の厚さによって変化するため基板の厚さを固定して周波数を変化させながら検出電圧を測定した場合、基板の影響が含まれアンテナそのものの帯域特性を評価することができない。したがって本実験では、アンテナその

ものの帯域特性を評価するため基板の厚さを最大の検出電圧が得られる $\lambda_g/4$ の奇数倍になるように測定周波数ごとに変更して検出電圧を測定した。具体的な基板の厚さは、77, 82, 88, 92, 96, 101, 105 および 107 GHz の測定周波数に対しそれぞれ 0.5, 1.4, 1.3, 2.1, 0.4, 1.9, 1.1 と 1.8 mm とした。図 5.6 (a) と (b) はそれぞれ E_ϕ および E_θ 成分に対する検出電圧と周波数の関係の理論値と実験値を示している。理論値は式 (4.23), (4.24) から求めた値である。図において、 E_ϕ および E_θ 成分に対する検出電圧は周波数ごとに異なっている。これは、アンテナの終端角度を $1,465^\circ$ に固定している（すなわち、アンテナアームの長さが一定である）ためアンテナのアームに沿う電流分布が周波数ごとに異なるためである。また、94 GHz において R_{fp} が最少になるようにアンテナを設計しているため E_ϕ と E_θ 成分に対する検出電圧の比は周波数ごとに異なっている。図 5.6 (a), 5.6 (b) を比較すると実験値は概ね理論値と傾向が一致しており、 E_ϕ および E_θ 成分に対する検出電圧は 76.9~106.8 GHz の約 3 dB 以内の変化内でほぼ一定であった。これにより、76.9~106.8 GHz の幅広い周波数帯域特性が得られた。

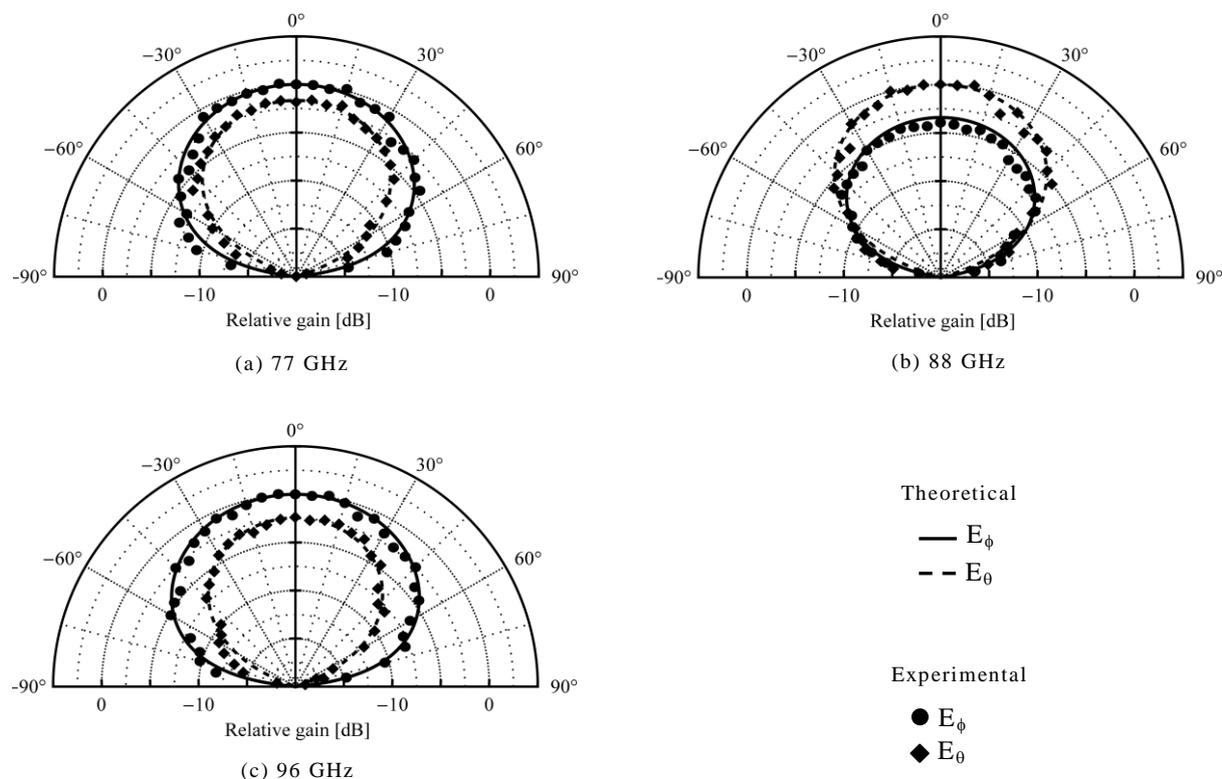


図 5.7 77, 88 および 96 GHz の電磁波に対するアンテナパターン

最後に、図 5.6 (b) で得られた検出電圧がアンテナにより受信した信号によるもの

であるかどうかを確認するためアンテナパターンを測定した。図 5.7 (a), (b) および (c) はそれぞれ $\phi = 90^\circ$ における 77, 88 および 96 GHz の電磁波に対するアンテナパターンである。●と実線はそれぞれ E_ϕ 成分に対する実験と理論値を、◆と破線はそれぞれ E_θ 成分に対する実験値と理論値を表している。図からわかるように、実験値は多少のずれはあるもののいずれの周波数においても理論値とほぼ一致している。このことから図 5.6 (b) で得られた検出電圧は、アンテナにより受信した信号によるものであることがわかる。したがって、本実験で得られた検出電圧の周波数依存性は、製作したスパイラルアンテナの周波数特性を示していると結論付けることができる。

以上のことから、製作した 2 アームアルキメデススパイラルアンテナにおいて設計通りの良好な円偏波特性ならびに広帯域特性が得られ、アンテナ結合素子に適用可能な薄膜スパイラルアンテナが得られた。

5.4 結言

石英基板上に $20 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ の Bi マクロボロメータを検出器とした 2 アームアルキメデススパイラルアンテナを製作し、アンテナ基板の裏側に Cu 板反射鏡を取り付け 100 GHz 帯でのアンテナ受信特性を評価した。

まず、94 GHz におけるアンテナパターンを測定した。実験により得られたパターンと imaging force モデルにより計算した理論的なパターンはよく一致しており、このことから製作したアンテナが 94 GHz 電磁波に対してアンテナとして動作していることが確認できた。さらに、 $\phi = 0^\circ$, $\phi = 90^\circ$ の両者において、 $\theta = 0^\circ$ での E_ϕ および E_θ 成分に対する検出電圧はほぼ同じ値を示していることから、良好な円偏波特性が得られた。次に、アンテナによる検出電圧の基板厚さ依存性を検討した。検出電圧は 94 と 75 GHz において、基板の厚さが基板内波長 $\lambda_g/4$ の奇数倍の厚さで最大、偶数倍の厚さで最小となる周期的な変動を示した。さらに、アンテナの周波数帯域特性を検討するため、76.9~106.8 GHz までの測定周波数に対し基板厚さを λ_g の 1/4 の奇数倍になるように測定周波数ごとに変化させ、 E_ϕ および E_θ 成分に対する検出電圧を測定した。76.9~106.8 GHz の範囲で概ね理論値と傾向が一致した検出電圧が得られ、 E_ϕ および E_θ 成分に対する検出電圧は 76.9~106.8 GHz の約 3 dB 以内の変化内でほぼ一定であった。また、77, 88 および 96 GHz でのアンテナ

パターン測定においても理論値と実験値はよく一致し、76.9～106.8 GHz で得られた検出電圧がアンテナにより受信した信号によるものであることが確認できた。これにより製作したスパイラルアンテナは76.9～106.8 GHz の幅広い周波数帯域特性をもつことがわかった。

以上のことから、アンテナ結合素子に適用可能な広帯域で良好な円偏波特性をもつ薄膜スパイラルアンテナが得られた。

第6章 薄膜スパイラルアンテナを結合した VO_x マイクロボロメータ検出素子

6.1 序言

これまで2章, 3章では, MODにより SiO_2/Si 基板および石英基板上に作製した V_2O_5 薄膜を酸素減圧下で熱処理することにより VO_2 を含む VO_x 薄膜を作製し, 石英基板上に作製した VO_x 薄膜において約4.4~4.8 %/Kの高いTCRが得られたことを述べた。これにより, MOD法によりアンテナ結合素子に適用可能な VO_x ボロメータ薄膜が得られた。また, 4章, 5章では, 2アームアルキメデススパイラルアンテナを設計・製作し, 100 GHz帯でのアンテナ受信特性を評価することにより良好な円偏波特性ならびに76.9~106.8 GHzの幅広い周波数帯域特性が得られた。これにより, アンテナ結合素子に適用可能な薄膜スパイラルアンテナが得られた。

本章では, これまでに得られた結果を用いてMODにより薄膜スパイラルアンテナを結合した VO_x マイクロボロメータ検出素子を製作し, 製作した素子の特性を評価することによりMOD法により作製した VO_x 薄膜の有用性を検証する。そのために, まず素子の特性を評価する基礎になるボロメータの動作原理について述べる。その後, 電子ビーム露光法により微細構造をもつマイクロボロメータからなる検出素子を製作し, ボロメータのDC感度, 94 GHz電磁波の照射による検出感度などの素子特性を評価する。

6.2 ボロメータの動作原理

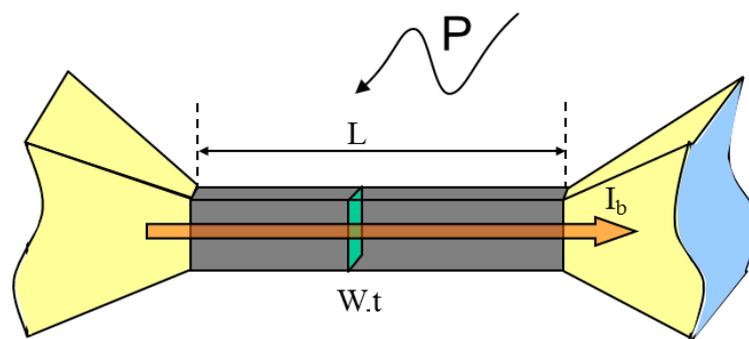


図 6.1 ボロメータの構造

本章でアンテナ結合マイクロボロメータ検出素子を議論するにあたりボロメータの動作原理についてまず説明する。図 6.1 に一般的なボロメータの構造図を示す。ボロメータの長さ, 厚さおよび幅をそれぞれ L , t および W とするとボロメータの抵抗は,

$$R_b = \rho \frac{L}{Wt} \quad [\Omega] \quad (6.1)$$

と表される。ここで、 ρ はボロメータの抵抗率である。電磁波をボロメータに照射するとボロメータの温度が変化する。第 1 章で述べたように、ボロメータに電磁波を吸収させる方法として吸収材を用いる方法が一般的である。それに対し本研究で注目しているアンテナ結合素子は、アンテナで受信した電磁波による高周波電流をボロメータに流すことによりボロメータの温度を変化させている。電磁波の照射によりボロメータの温度が上昇すると抵抗が変化する。そのため、ボロメータに電流 I_b をバイアスした状態で電磁波を照射するとその抵抗変化により検出電圧が得られる。ボロメータによる検出電圧 ΔV は、

$$\Delta V = I_b \Delta R = I_b R_b \frac{1}{R_b} \frac{dR_b}{dT} \frac{dT}{dP} \Delta P = I_b R_b \alpha R_{th} \Delta P \quad [V] \quad (6.2)$$

または、

$$\Delta V = I_b \Delta R_b = I_b R_b \frac{1}{R_b} \frac{dR_b}{dP} \Delta P = I_b R_b S_d \Delta P \quad [V] \quad (6.3)$$

と表すことができる。ここで、

$$\alpha = \frac{1}{R_b} \frac{dR_b}{dT} \quad [K^{-1}] \quad (6.4)$$

$$R_{th} = \frac{dT}{dP} \quad [K/W] \quad (6.5)$$

$$S_d = \frac{1}{R_b} \frac{dR_b}{dP} \quad [W^{-1}] \quad (6.6)$$

と定義され、 α は抵抗温度係数 (TCR)、 R_{th} は熱抵抗、 S_d は DC 感度である。また、 ΔP は電磁波の照射によりボロメータに入力した電力である。式(6.2)、(6.3)から検出電圧は α 、 R_{th} 、 S_d に比例することがわかる。

6.3 検出素子の製作

薄膜スパイラルアンテナを結合した VO_x マイクロボロメータ検出素子の製作プロセスを図 6.2 に示す。図 6.2 (a)で、MOD 法により厚さ 0.4 mm の石英基板上に作製した VO_x 薄膜上に S1818 フォトレジストを滴下し、4,000 rpm, 30 秒でスピコートし、120°C,

2分で乾燥させた。その後、光露光法により $52\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ の領域をパターンニングし、MF-319 現像液で現像した。次に、図 6.2 (b)で、Ar イオンミリングによりエッチングを行い、アセトンで S1818 レジストを除去することにより $52\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ の矩形の VO_x を製作した。続いて、図 6.2 (c)で、ネガレジスト(SAL601-SR7, Rohm and Haas co.)を垂らし、4,000 rpm, 70 秒でスピコートし、 105°C , 1分で乾燥させた。その後、電子ビーム露光法により両端に2つの $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ のパッチ部分とつながる $1\ \mu\text{m}$ のラインを描画した。描画条件は、加速電圧、ビーム電流および電子ドーズは、それぞれ 80 keV, 50 pA および $20\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$ とした。描画した後、 115°C で1分間ポストエクスポージャーベークし、CD-26 現像液により現像した。次に、図 6.2 (d)で、試料前面に金を真空蒸着し、アセトンでリフトオフすることにより $1\ \mu\text{m} \times 52\ \mu\text{m}$ の VO_x のマイクロボロメータ部分を製作した。図 6.2 (c)で $1\ \mu\text{m}$ のライン線の両端につながる2つのパッチ部分を設けたのはこの $1\ \mu\text{m} \times 52\ \mu\text{m}$ の領域のリフトオフを容易にするためである。次に、図 6.2 (e)で、再び S1818 フォトリソレジストを塗布し、光露光法によりボロメータ上に重ねてスパイラルアンテナのパターンニングを行い、MF-319 現像液で現像した。このとき、スパイラルアンテナの中央部にマイクロボロメータが配置されるように注意深く位置合わせを行った。最後に、図 6.2 (f)で、S1818 フォトリソレジストで保護されたアンテナ部分以外の領域を Ar イオンミリングによりエッチングし、アセトンによりレジストを除去することにより素子を完成させた。

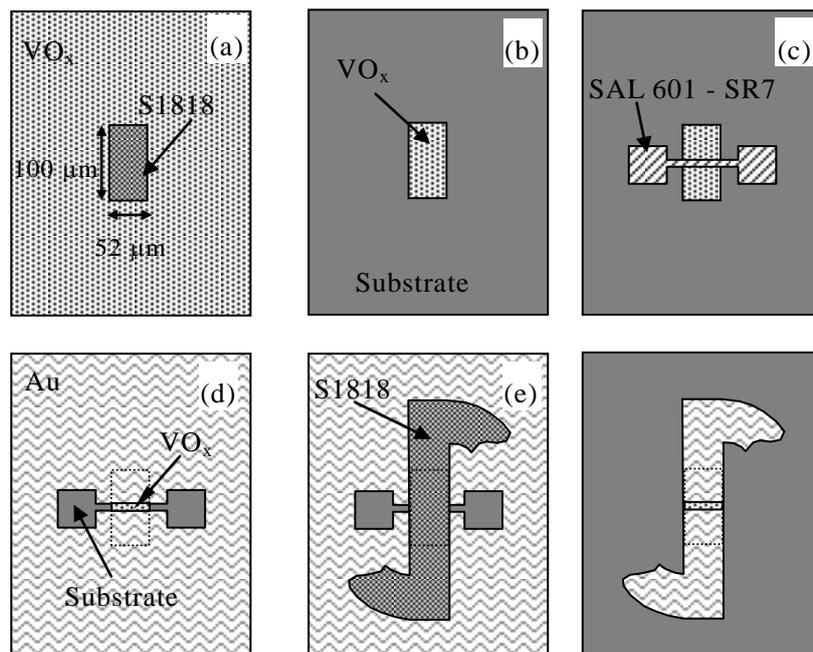


図 6.2 VO_x マイクロボロメータ検出素子の製作プロセス

図 6.3 に製作した素子の SEM 写真を示す。スパイラルアンテナの形状は、5.2 節の図 5.2 で製作したスパイラルアンテナと同じである。また、アンテナ中央部分の拡大図から幅 $52\ \mu\text{m}$ 、長さ $1\ \mu\text{m}$ の VO_x のマイクロボロメータが製作できていることがわかる。ボロメータの幅は、製作を容易にするためにスパイラルアンテナのアーム幅と同じ $52\ \mu\text{m}$ とした。また、長さはアンテナとのインピーダンス整合を考え再現性良く製作できる最小の長さとして本実験では $1\ \mu\text{m}$ とした。

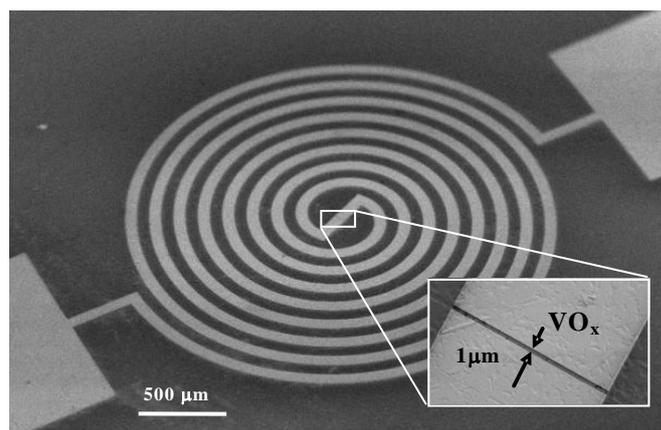


図 6.3 製作した素子の SEM 写真

6.4 100 GHz 帯での検出特性の測定および評価

本節では、製作した素子の評価として、まず VO_x マイクロボロメータそのものの特性を評価することによりボロメータ検出部の性能を明らかにする。続いて、素子に 94 GHz 電磁波を照射しアンテナパターンを測定することにより製作した素子がアンテナ結合素子として動作しているかどうかを評価する。最後に、94 GHz 電磁波に対する素子の検出感度を評価する。

まず、 VO_x マイクロボロメータの特性として 6.2 節の式(6.6)で示す DC 感度を評価する。そのため本実験では、素子に印加する直流電流を $0.2\sim 0.9\ \text{mA}$ まで変化させることによりボロメータへの入力電力を変化させ、そのときの抵抗の変化を測定した。図 6.4 にその関係を示す。縦軸の入力電力はボロメータの初期抵抗値 ($10\ \mu\text{A}$ で測定した抵抗) で規格化している。図において●は、 VO_x マイクロボロメータに対する実験値を示している。また、特性を比較するために、同じスパイラルアンテナで検出部のみが Bi マイクロボロメータである 5.2 節の図 5.2 で製作した素子の測定結果も△で示している。図からわかるように、入力電力を増加させると両者とも抵抗は線形に減少している。

しかし、 VO_x マイクロボロメータの勾配は、 Bi マイクロボロメータと比べてはるかに高くなっている。DC 感度は、式(6.6)からわかるように入力電力に対する抵抗の変化率で定義されているため図 6.4 の傾きから求めることができる。これにより計算した Bi マイクロボロメータの DC 感度は約 49 W^{-1} であった。一方、 VO_x マイクロボロメータに対しては約 540 W^{-1} の DC 感度が得られた。この値は、 Bi マイクロボロメータと比べ 10 倍以上高い値であり、これにより高い検出感度が期待できる。

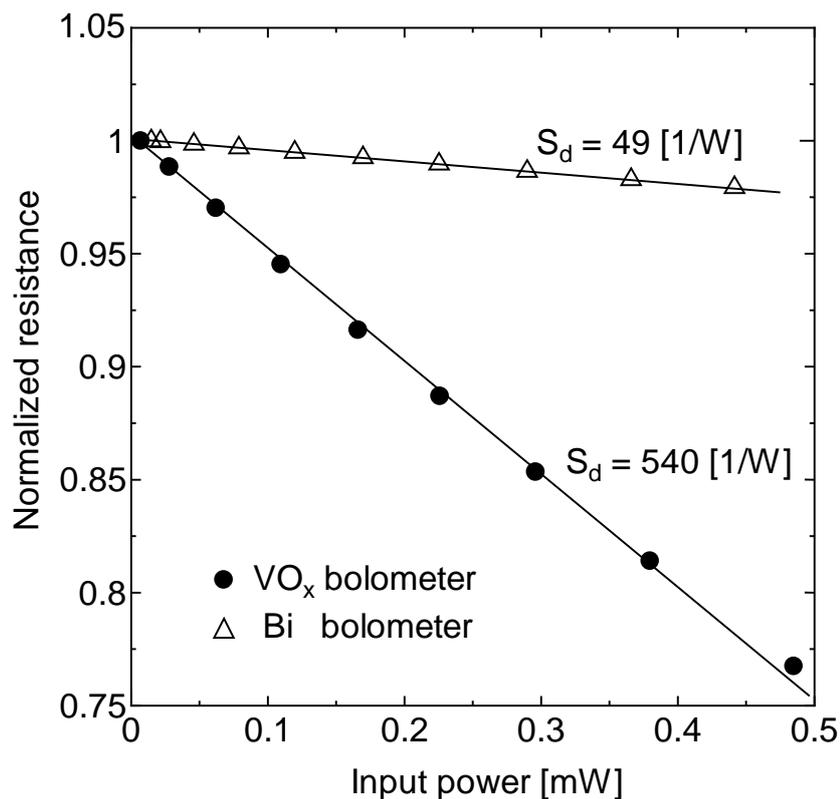


図 6.4 規格化されたボロメータ抵抗と入力電力との関係

次に、製作した VO_x マイクロボロメータを検出器とする素子のアンテナパターンを測定した。図 6.5 にその測定系を示す。本実験では、94 GHz 電磁波をガンダイオード発振器 (NEC A2126) により直接発生させ、その後メカニカルチョッパーにより 200 Hz の強度変調を加え、ホーンアンテナから素子に照射した。素子の基板裏面には Cu 反射板を取り付けている。また、直流電流源 (Yokogawa 7651) により素子に電流を印加し、検出電圧はロックインアンプ (NF LI5630) により測定した。 E_ϕ と E_θ 成分に対するアンテナパターンは図のように $\phi = 90^\circ$ に固定し、 θ 方向に素子を回転させながら測定した。

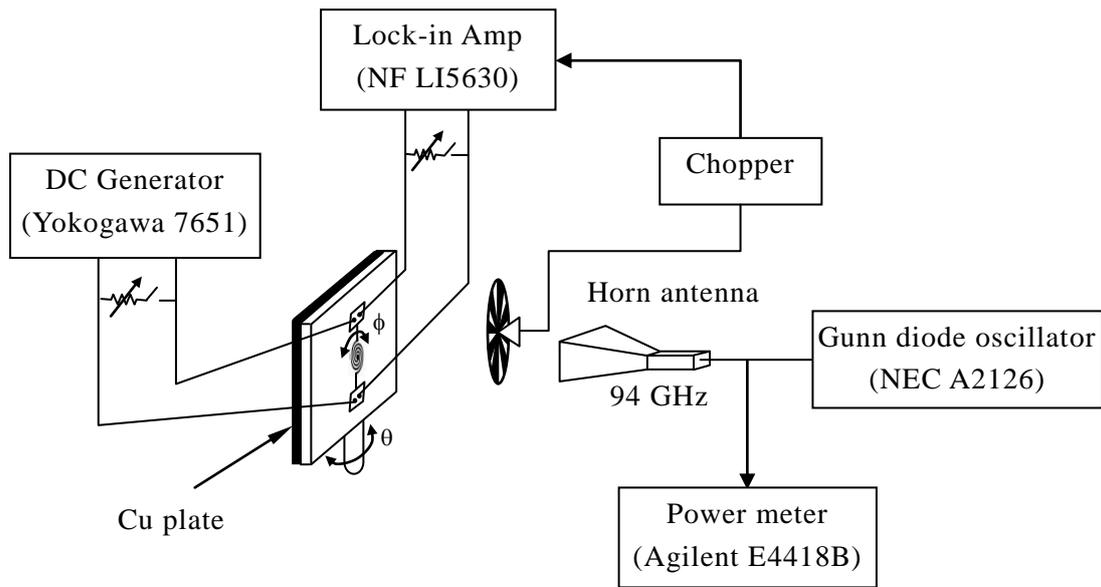


図 6.5 検出特性の測定系

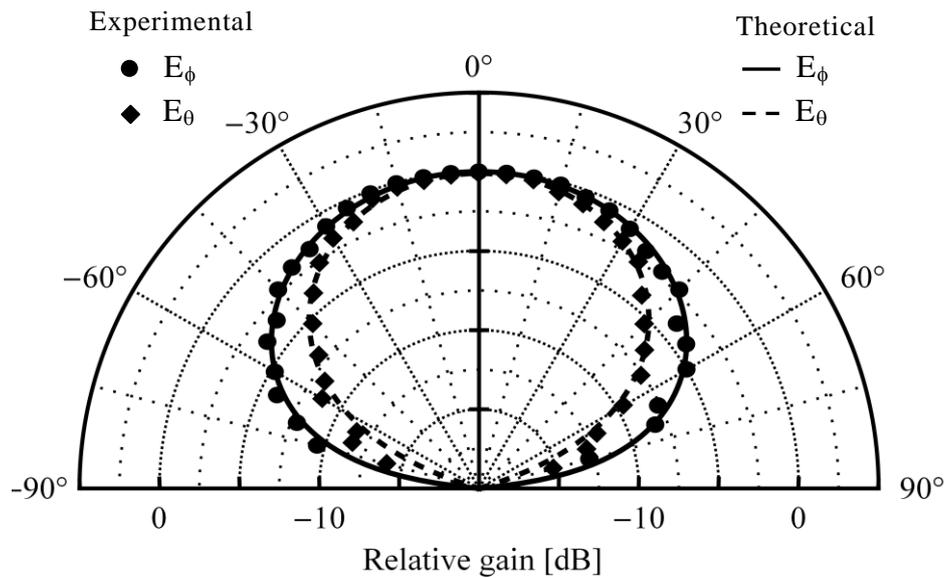


図 6.6 94 GHz 電磁波に対するアンテナパターン

図 6.6 に $\phi = 90^\circ$ とした時の 94 GHz でのアンテナパターンを示す。●と実線は、それぞれ E_ϕ 成分に対する実験値と式(4.23)に示すベクトルポテンシャルから求めた理論値を表している。また、◆と破線は、それぞれ E_θ 成分に対する実験値と式(4.24)に示すベクトルポテンシャルから求めた理論値である。図からわかるように実験値と理論値は概ね良い一致を示しており、またアンテナ正面 ($\theta = 0^\circ$) での E_ϕ と E_θ 成分に対する検

出電圧は、ほぼ同じ値を示している。これらの実験結果から、良好な円偏波特性を有するアンテナ動作が得られ、製作した素子はアンテナ結合素子として動作していることが確認できた。

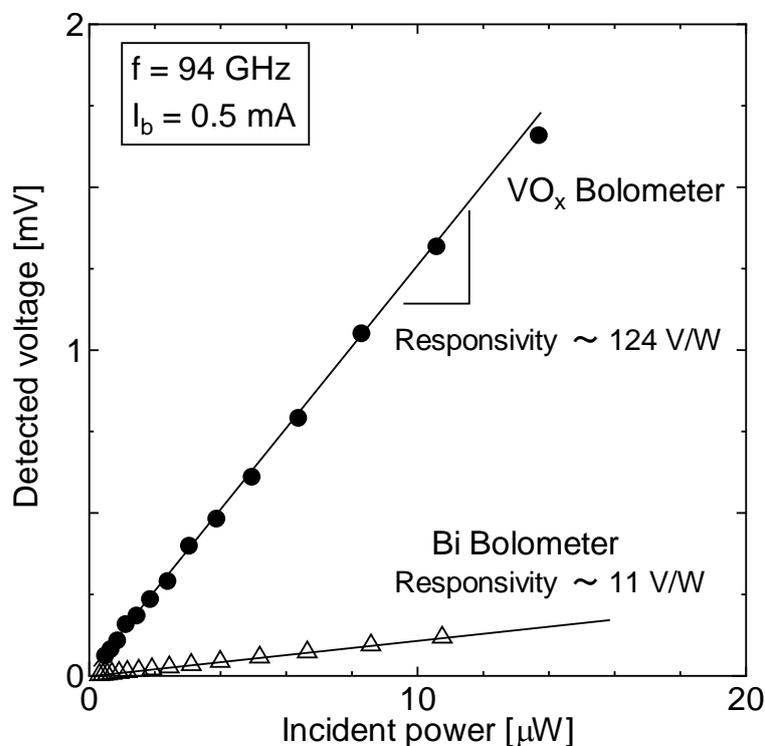


図 6.7 検出電圧と入射電力との関係

以上の検討により、ボロメータに供給される電力は電磁波を受信したアンテナから供給されたものであることが確認できた。そこで最後に、94 GHz における素子の検出感度を評価する。素子の検出感度を評価するには電磁波の照射により VO_x マイクロボロメータに供給される電力を求める必要がある。この入射電力は、図 6.5 の測定系においてホーンアンテナの前に置いたメカニカルチョッパーを open の状態で素子に電磁波を照射し、その時の電磁波照射前後のボロメータの抵抗変化と図 6.4 で得られたボロメータの抵抗と入力電力の関係から見積もることができる。ホーンアンテナに供給する 94 GHz 電磁波の電力を -5~9 dBm まで変化させたときの検出電圧とボロメータへの入射電力との関係を図 6.7 に示す。●は、VO_x マイクロボロメータ素子に対する測定値を示している。また、特性を比較するために図 6.4 と同様に Bi マイクロボロメータ素子に対する測定結果を△で示している。ボロメータへのバイアス電流は両者とも I_b = 0.5 mA である。両者とも入射電力が増加することにより検出電圧は線形に増加している。

式(6.2)あるいは(6.3)からわかるように、ボロメータの検出電圧は入射電力に比例する。このことから製作した検出器がボロメータとして正常に動作していることが改めて確認できる。また、△で示す Bi ボロメータ素子に比べて●で示す VO_x マイクロボロメータ素子は、はるかに大きな傾きを示している。ボロメータの検出感度は式(6.3)から次のように定義される。

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta P} = I_b R_b S_d \quad [\text{V/W}] \quad (6.7)$$

したがって、この検出感度は図 6.7 の傾きから求めることができる。この傾きから求めた Bi ボロメータ素子の検出感度は 11 V/W であった。一方、VO_x ボロメータ素子に対しては、Bi ボロメータ素子と比べて 1 桁以上高い 124 V/W の感度が得られた。

上記で検討した検出感度は実験によるものである。一方、式(6.7)を用いることにより理論値を求めることができる。図 6.4 の測定で得られた DC 感度ならびにボロメータの抵抗値は Bi ボロメータ素子に対してそれぞれ 49 W⁻¹, 450 Ω であり、VO_x ボロメータ素子に対してそれぞれ 540 W⁻¹, 470 Ω であった。また、I_b は両者とも 0.5 mA である。これらの値を式(6.7)に代入することにより Bi ボロメータ素子に対して 11 V/W, VO_x ボロメータ素子に対して 127 V/W の理論値が得られる。これらの値は、実験で得られた値とほぼ同じである。このことは、直流バイアスによりボロメータへ電力を入射したときの感度と電磁波照射による高周波電流バイアスによりボロメータへ電力を入射したときの感度がほぼ同じであることを意味している。このことから広帯域なボロメータ動作が確認でき、94 GHz において I_b = 0.5 mA のバイアス条件で 124 V/W の高い検出感度が得られた。

6.5 結言

MOD 法により石英基板上に作製した VO_x 薄膜を用いてスパイラルアンテナを結合した幅 52 μm, 長さ 1 μm の VO_x マイクロボロメータ検出素子を製作した。次に、製作した素子に印加する直流電流を変化させて測定したボロメータ抵抗の入力電力依存性から DC 感度を求めた。VO_x マイクロボロメータ素子に対し Bi マイクロボロメータ素子に比べて 1 桁以上高い約 540 W⁻¹ の DC 感度が得られた。また、94 GHz 電磁波に対するアンテナパターンの測定において理論値とほぼ一致した良好な円偏波特性を有するパターンが得られた。これにより製作した素子はアンテナ結合素子として動作してい

ることが確認できた。最後に、94 GHz 電磁波に対する検出電圧の入射電力依存性から VO_x マイクロボロメータ素子に対して I_b = 0.5 mA で Bi マイクロボロメータ素子に比べて 1 桁以上の約 124 V/W の高い検出電圧が得られた。

以上により、MOD 法により高い検出感度をもつ薄膜スパイラルアンテナを結合した VO_x マイクロボロメータ検出素子の実現でき、MOD 法により作製した VO_x 薄膜の有用性を検証することができた。

第7章 結論

本研究では、テラヘルツイメージングへの応用を目指した高感度な検出素子の実現に向け、MOD法によりVO_xボロメータ薄膜を作製し、その薄膜の有用性を薄膜スパイラルアンテナ結合VO_xマイクロボロメータ検出素子の製作により実証することを目的とし、これまで検討を進めてきた。その結果、以下の結論を得た。

1. MOD法によるVO_xボロメータ薄膜の作製

(1) MOD法によりSiO₂/Si基板上に良好な軸配向特性をもつV₂O₅薄膜が得られた。同薄膜を熱処理温度530°C，酸素圧力1.2 Paに固定し、熱処理時間を2～5時間まで変化させて熱処理することによりVO_x薄膜を作製し、XRD測定によりその組成は還元により熱処理時間の増加とともに主にV₂O₅ → V₃O₇ → V₄O₉ → VO₂ と変化することがわかった。また、4～5時間で減圧熱処理した薄膜のR-Tにおいて約55°Cの相転移温度で半導体相から金属相への相転移が得られ、1～3桁の抵抗率変化ならびに温度幅が約3°Cのヒステリシス特性が得られた。これらの特性はVO₂特有のものである。さらに、熱処理時間4.5～5時間で作製したVO_x薄膜において他の成長法と比較して遜色のない2.1～2.2 % /K (300 K)のTCRが得られた。

(2) アンテナ結合素子の製作に用いられる代表的な基板である石英基板上にMOD法によりV₂O₅薄膜を作製した。その後、同薄膜を熱処理温度530°C，酸素圧力1.2 Paに固定し、熱処理時間を2～5時間まで変化させて熱処理することによりVO_x薄膜を作製した。熱処理において概ねSiO₂/Si基板上に作製した場合と同様の還元プロセスが得られた。また、4～5時間で熱処理した薄膜のR-T特性においても相転移に伴う約3～4桁の抵抗率変化を示し、相転移温度が52°C，ヒステリシス温度幅が2°CのVO₂特有の特性が得られた。しかし、これらの特性は、SiO₂/Si基板上へ作製した場合と異なり、これはVO_x薄膜内におけるVO₂組成の均一性、基板と薄膜の熱膨張係数ならびにグレイサイズの違いにより薄膜内に導入されるひずみの違いによるものと考えられる。さらに、石英基板上に作製したVO_x薄膜のTCRは、他の成長方法で作製した薄膜のTCRに比べて2倍程度高い4.4～4.8 % /Kの値を示した。

以上により, MOD 法によりボロメータ検出素子へ適用可能な高い TCR を有する VO_x 薄膜が得られた。

2. 薄膜スパイラルアンテナの設計・製作ならびに特性評価

(1) スパイラルアンテナの構造を2アームアルキメデス型とした。Meiの積分方程式にスパイラルアンテナの動径を表す関数を代入し, モーメント法により電流分布の数値解析を行い, 得られた電流分布からベクトルポテンシャルを求め, これによりアンテナ遠方での放射電磁界を求めた。さらに, imaging forceモデルを導入することにより誘電体基板におかれたアンテナに対する放射電磁界を与えるベクトルポテンシャルを導いた。次に, カレントバンド理論によりアンテナを設計し, 動作周波数75~110 GHzに対してアンテナの外形, 内径をそれぞれ1.9 mm, 0.26 mm, アンテナアーム幅を52 μm , スパイラル係数を0.032 mm/radとした。また, 94 GHzにおいて良好な円偏波特性が得られるように終端角度を1465°とした。

(2) 得られた設計値に基づきBiマイクロボロメータを検出器とする薄膜スパイラルアンテナを製作した。94 GHzにおいてimaging forceモデルにより導出した理論的なアンテナパターンとよく一致した実験値が得られ, 製作したアンテナが94 GHz電磁波に対してアンテナとして動作し, 良好な円偏波特性を有していることが確認できた。また, アンテナによる検出電圧は, 94と75 GHzにおいて基板厚さに対し基板の厚さが基板内波長 λ_g の1/4の奇数倍の厚さで最大, 偶数倍の厚さで最小となる周期的な変動を示した。さらに, 製作したスパイラルアンテナに対し76.9~106.8 GHzの幅広い周波数帯域特性が得られた。

以上により, アンテナ結合素子に適用可能な広帯域で良好な円偏波特性をもつ薄膜スパイラルアンテナが得られた。

3. 薄膜スパイラルアンテナを結合した VO_x マイクロボロメータ検出素子の製作

MODにより作製した VO_x 薄膜を用いてスパイラルアンテナを結合した幅 52 μm , 長

さ $1\ \mu\text{m}$ の VO_x マイクロボロメータ検出素子を製作した。製作した素子において VO_x マイクロボロメータは、Bi マイクロボロメータに比べて 1 桁以上高い約 $540\ \text{W}^{-1}$ の DC 感度を示した。また、94 GHz 電磁波に対して理論値とほぼ一致した良好な円偏波特性を有するアンテナパターンが得られ、製作した素子がアンテナ結合素子として動作していることを確認した。さらに、94 GHz 電磁波に対し $I_b = 0.5\ \text{mA}$ で Bi マイクロボロメータ素子に比べて 1 桁以上の高い約 $124\ \text{V/W}$ の検出電圧が得られ、高感度なアンテナ結合素子を実現することができた。

以上により、MOD 法により高い検出感度をもつ薄膜スパイラルアンテナを結合した VO_x マイクロボロメータ検出素子を実現でき、MOD 法により作製した VO_x 薄膜の有用性を検証することができた。

最後に今後の研究課題について考えてみる。本研究では、MOD 法により高い検出感度をもつアンテナ結合 VO_x マイクロボロメータ検出素子を実現できた。しかし、実際にテラヘルツイメージングへ応用するためには素子のさらなる高感度化が望まれる。そのためには、具体的に以下に述べる改善などを図る必要がある。

(1) VO_x 薄膜に関して

本研究では、MOD 法により $4.4\sim 4.8\ \%$ /K の高い TCR をもつ VO_x 薄膜が得られた。しかし、ボロメータ薄膜の TCR はボロメータ検出素子の検出感度に直接影響するためさらに高い TCR を実現することが素子の高感度化に極めて有効である。3.3 節で議論したように、TCR は VO_x 薄膜内での VO_2 の均一性が高いほど高くなる。現状では薄膜内に VO_2 以外の組成がいくつか含まれているため、 VO_2 組成のみで構成される薄膜を得ることができればより高い TCR が期待できる。MOD 法による VO_x 薄膜の均一性は作製条件に大きく影響される。そのため、特に焼成圧力を正確に制御し熱平衡を保ちつつ長時間にわたる焼成を行うことにより薄膜組成の均一性を向上させる必要がある。さらに、本研究で最適化してきた焼成温度、焼成時間以外の昇温・降温レートなどについても詳細に検討する必要がある。

(2) アンテナ結合素子の構造に関して

次に、アンテナ結合素子について考えてみる。まず、アンテナ結合素子としての感度を向上させるためにはアンテナとボロメータのインピーダンス整合をとる必要がある。4.4節で述べたようにアンテナの自己補対構造を仮定するとアンテナのインピーダンスは約 120Ω と見積もられる。一方、本研究で製作した素子における VO_x マイクロボロメータの抵抗は6.4節で説明したように約 470Ω でありインピーダンスの整合は得られていない。したがって、整合を得るためにマイクロボロメータの長さを $1 \mu\text{m}$ からさらに短くするなどマイクロボロメータのサイズの再検討が必要である。

また、ボロメータからの熱流出について考えてみると、ボロメータはアンテナから供給された高周波電流により加熱される。そして、ボロメータに供給された熱は基板との接触面から基板側へ流出する。したがって、熱伝導率の低い基板を用いることによりボロメータから基板側へ流出する熱量を抑えることができボロメータの感度の向上が期待できる。熱伝導率が非常に低い媒質としては空気がある。そのため本研究で用いた石英基板の代わりにメンブレン上に MOD 法により VO_x 薄膜を作製し、素子を製作することによりボロメータの検出感度が大幅に向上することが期待できる。また、メンブレンを用いることにより薄膜スパイラルアンテナは実質的に空中にあると考えることができ、基板の影響がなくなりアンテナの解析が容易になる利点もある。

今後、以上のような検討を加えることによりさらに高感度な薄膜アンテナを結合した VO_x マイクロボロメータ検出素子が実現できると考える。

謝 辞

本研究は、平成 22 年度から平成 24 年度までの間、防衛大学校理工学研究科後期課程在学中に電子情報工学系専攻、エレクトロニクス工学教育研究分野の内田貴司教授の御指導のもとに行われたものです。ベトナム社会主義共和国から日本へ留学し、研究科前期課程を含め防衛大学校で学んだ 5 年間は自分の一生に比べると決して長い期間ではありませんが、内田教授には講義、研究を通じてのご指導のみならず、異なる文化、生活習慣に対する考え方などに関してもお教えいただき、自分の将来にとって財産となる貴重な知識・経験を得ることができました。心から深く感謝申し上げます。

立木隆准教授には研究を進める上で必要なプログラミングなどによる解析手法に加え、装置の操作法、測定方法などに関し多くのご助言、ご助力をいただき、さらに実験器具等を含めた研究環境を整備していただいたことに深く感謝申し上げます。

山田吉英教授には、本論文の審査をしていただくとともに、論文をまとめるにあたり多くのご助言をいただきました。深く感謝いたします。大越昌幸教授、森武洋教授には、本論文の審査をしていただくとともに、実験などに関して多くのご支援、ご教示をいただきました。ここに深く感謝いたします。また、実験全般を通じて多くのご支援、ご教示をいただいた井上成美教授に深く感謝申し上げます。また、スパイラルアンテナの理論解析に関してご助言、ご助力をいただいた森下久教授、永利美緒博士に感謝致します。

安岡義純名誉教授には薄膜スパイラルアンテナの実験においてご指導をいただき、研究を進める上で多くの励ましをいただきました。また、青野祐美講師には、酸化バナジウムの物性実験においてご教示をいただきました。ここに深く感謝致します。

日本語教育課程、研究科前・後期課程在学中に講義等でご指導いただいた教官方に深く感謝いたします。また、英語教育を通じていつも応援していただいた杉野俊子教授、日本で生活するにあたり励ましをいただいた総合情報図書館事務室 史料・情報係長の石川みどり氏に深く感謝致します。

内田研究室研究科前期課程学生の渡邊省司氏、林功輔氏、濱中公志氏、笠井博幸氏、堅田寛氏、堀口顕司氏、松下亮仁氏、研修生の菅原昭人氏、金谷英敏氏には研究に関連することのみならず生活に関しても様々のご助言、ご助力を頂きました。ここに感謝いたします。また、本研究を共に進めてきた内田研究室本科学生の大隣佑亮君、加

藤祐樹君，橋本将雄君，遠藤翔君，小松原祐司君に感謝します。また，防衛大学校でのベトナム留学生にも様々な応援をいただきました。ここに感謝致します。

最後に，いつも暖かい応援をしてくれた家族，特に妻に深く感謝致します。

参考文献

- [1] M. J. Fitch and R. Osiander, "Terahertz Waves for Communications and Sensing", Johns Hopkins APL Technical Digest, Vol. 25, No. 4, pp. 348-355 (2004).
- [2] P. H. Siegel, "Terahertz Technology", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 50, No. 3, pp. 910-928 (2002).
- [3] M. Kowalski, N. Palka, M. Piszczek, and M. Szustakowski, "Processing of THz images acquired by a passive camera", Photonics Letters of Poland, Vol. 4, No. 3, pp. 97-99 (2012).
- [4] J. F. Federici, B. Schulkin, F. Huang, D. Gary, R. Barat, F. Oliveira, and D. Zimdars, "THz imaging and sensing for security applications – explosives, weapons and drugs", Semicond. Sci. Technol., Vol. 20, pp. S266-S280 (2005).
- [5] A. G. Davies, A. D. Burnett, W. Fan, E. H. Linfield, and J. E. Cunningham, "Terahertz spectroscopy of explosives and drugs", Materialstoday, Vol. 11, No. 3, pp. 18-26 (2008).
- [6] M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology", Nat. Photonics, Vol. 1, pp. 97-105 (2007).
- [7] N. Hiromoto, M. Saito, and H. Okuda, "Ge:Ga Far-Infrared Photoconductor with Low Compensation", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 29, No. 9, pp. 1739-1744 (1990).
- [8] H. C. Liu, H. Luo, C. Y. Song, Z. R. Wasilewski, A. J. S. Thorpe, and J. C. Cao, "Design of Terahertz Quantum Well Photodetectors", Infrared Phys. Technol., Vol. 50, pp. 191-193 (2007).
- [9] M. Y. Kim and T. S. Oh, "Thermoelectric Characteristics of the Thermopile Sensors with Variations of the Width and the Thickness of the Electrodeposited Bismuth-Telluride and Antimony-Telluride Thin Films", Mater. Trans., Vol. 51, No. 10, pp. 1909-1913 (2010).
- [10] A. Odon, "Modelling and Simulation of the Pyroelectric Detector Using MATLAB/Simulink", Measurement Science Review, Vol. 10, No. 6, pp. 195-199 (2010).
- [11] M. Noda, K. Inoue, M. Ogura, H. Xu, S. Murakami, H. Kishihara, and M. Okuyama,

- “An uncooled infrared sensor of dielectric bolometer mode using a new detection technique of operation bias voltage”, *Sens. Actuators*, Vol. A 97-98, pp. 329-336 (2002).
- [12] M. E. MacDonald and E. N. Grossman, “Niobium Microbolometers for Far-Infrared Detection”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 43, No. 4, pp. 893-896 (1995).
- [13] H. P. Röser, H. W. Hübers, T. W. Crowe, and W. C. B. Peatman, “Nanostructure GaAs Schottky diodes for far-infrared heterodyne receivers”, *Infrared Phys. Technol.*, Vol. 35, No. 2-3, pp. 451-462 (1994).
- [14] Y. Uzawa, M. Takeda, and Z. Wang, “A Circuit for Tuning Superconductor - Insulator - Superconductor Mixers Using Distributed Tunnel Junctions”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 42, pp. 91-95 (2003).
- [15] K. A. Lee, Y. Guo, P. A. Stimson, K. A. Potter, J-C. Chiao, and D. B. Rutledge, “Thin-Film Power-Density Meter for Millimeter Wavelengths”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 39, No. 3, pp. 425-428 (1991).
- [16] P. L. Richards, “Bolometers for infrared and millimeter waves”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 76, No. 1, pp. 1-24 (1994).
- [17] F. Niklaus, C. Vieider, and H. Jakobsen, “MEMS-Based Uncooled Infrared Bolometer Arrays-A Review”, *Proc. SPIE*, Vol. 6836, pp. 68360D/1-15 (2007).
- [18] M. J. Myers, W. Holzapfel, A. T. Lee, R. O’Brient, P. L. Richards, H. T. Tran, P. Ade, G. Engargiola, A. Smith, and H. Spieler, “An antenna-coupled bolometer with an integrated microstrip bandpass filter”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 86, pp. 114103-114105 (2005).
- [19] J. Mees, M. Nahum, and P. L. Richards, "New design for antenna-coupled superconducting bolometers", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 59, No. 18, pp. 2329–2331 (1991).
- [20] T. Shimizu, H. Moritsu, Y. Yasuoka, and K. Gamo, “Fabrication of Antenna-Coupled Microbolometers”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 34, pp. 6352-6357 (1995).
- [21] M. J. Myers, K. Arnold, P. Ade, G. Engargiola, W. Holzapfel, A. T. Lee, X. Meng, R. O’Brient, P. L. Richards, H. Spieler, and H. T. Tran, “Antenna-Coupled Bolometer Arrays for Measurement of the Cosmic Microwave Background Polarization”, *J. Low*

- Temp. Phys., Vol. 151, pp. 464-470 (2008).
- [22] K. Hayashi, T. Tachiki, T. Uchida, T. Furuya, T. Idehara, and Y. Yasuoka, "Detection Properties of Thin-Film Slot-Antenna-Coupled GaAs Schottky Barrier Diodes", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 48, pp. 081103/1-5 (2009).
- [23] X. H. Lu, L. Kang, J. Chen, Y. Y. Zhong, N. He, L. B. Zhang, B. B. Jin, W. W. Xu, P. H. Wu, Q. J. Yao, and S. C. Shi, "A terahertz detector operating at room temperature", *Proc. SPIE*, Vol. 7277, pp. 72770N/1-7 (2008).
- [24] G. M. Rebeiz, C. C. Ling, and D. B. Rutledge, "Large Area Bolometers for Millimeter-Wave Power Calibration", *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 10, No. 8, pp. 931-936 (1989).
- [25] S. F. Gilmartin, K. Arshak, D. Collins, B. Lane, D. Bain, S. B. Newcomb, B. McCarthy, and A. Arshak, "Titanium Hydride Formation in Current-Biased Titanium Microbolometer and Nanobolometer Devices", *Sensors & Transducers J.*, Vol. 103, No. 4, pp. 83-95 (2009).
- [26] S. M. Wentworth and D. P. Neikirk, "Far-Infrared Microbolometers Made with Tellurium and Bismuth", *Electron. Lett.*, Vol. 25, No. 23, pp. 1558-1560 (1989).
- [27] F. Niklaus, J. Pejnefors, M. Dainese, M. Häggblad, P. E. Hellström, U. Wällgren, and G. Stemme, "Characterization of transfer bonded silicon bolometer arrays", *Proc. SPIE*, Vol. 5406, pp. 521-530 (2004).
- [28] G. V. Reveles, T. J. Simmons, M. B. Sánchez, M. A. Vidal, H. N. Contreras, and F. J. González, "High-Sensitivity Bolometers from Self-Oriented Single-Walled Carbon Nanotube Composites", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 3, pp. 3200-3204 (2011).
- [29] H. Wang, X. Yi, and S. Chen, "Low temperature fabrication of vanadium oxide films for uncooled bolometric detectors", *Infrared Phys. Technol.*, Vol. 47, pp. 273-277 (2006).
- [30] M. Pan, H. Zhong, S. Wang, J. Liu, Z. Li, X. Chen, and W. Lu, "Properties of VO₂ thin film prepared with precursor VO(acac)₂", *J. Cryst. Growth*, Vol. 265, pp. 121-126 (2004).
- [31] H. Wang, X. Yi, G. Huang, J. Xiao, X. Li, and S. Chen, "IR microbolometer with self-supporting structure operating at room temperature", *Infrared Phys. Technol.*, Vol.

- 45, pp. 53-57 (2004).
- [32] S. J. Yun, J. W. Lim, B-G. C. Chae, B. J. Kim, and H-T. Kim, “Characteristics of vanadium dioxide films deposited by RF-magnetron sputter deposition technique using V-metal target”, *Physica B*, Vol. 403, pp. 1381-1383 (2008).
- [33] Y. Nihei, Y. Sasakawa, and K. Okimura, “Advantages of inductively coupled plasma-assisted sputtering for preparation of stoichiometric VO₂ films with metal-insulator transition”, *Thin Solid Films*, Vol. 516, pp. 3572-3576 (2008).
- [34] D. H. Kim and H. S. Kwok, “Pulsed laser deposition of VO₂ thin films”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 65, No. 25, pp. 3188-3190 (1994).
- [35] Z. Pei-ran, S. Yamamoto, A. Miyashita, and H. Naramoto, “Pulsed laser deposition of VO₂ single crystal thin films on sapphire substrates”, *Chin. Phys. Lett.*, Vol. 15, No. 12, pp. 904-906 (1998).
- [36] T. Uchiyama, S. Watanabe, T. Tachiki, and T. Uchida, “Optimization of SrTiO₃ Precursor Films on MgO Substrates Prepared by the Metal-Organic Decomposition Method”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 46, No. 12, pp. 7849-7851 (2007).
- [37] I. Yamaguchi, T. Manabe, T. Tsuchiya, T. Nakajima, M. Sohma, and T. Kumagai, “Preparation and Characterization of Epitaxial VO₂ Films on Sapphire Using Postepitaxial Topotaxy Route via Epitaxial V₂O₃ Films”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 47, pp. 1022-1027 (2008).
- [38] W. L. Liu, H. R. Xia, H. Han, and X. Q. Wang, “Synthesis and structure of bismuth titanate nanopowders prepared by metalorganic decomposition method”, *J. Mater. Sci.*, Vol. 40, pp. 1827-1829 (2005).
- [39] T. Ishibashi, T. Kawata, T. H. Johansen, J. He, N. Harada, and K. Sato, “Magneto-optical Indicator Garnet Films Grown by Metal-organic Decomposition Method”, *J. Magn. Soc. Jpn.*, Vol. 32, pp. 150-153 (2008)
- [40] A. Galembeck and O. L. Alves, “BiVO₄ thin film preparation by metalorganic decomposition”, *Thin Solid Films*, Vol. 365, pp. 90-93 (2008).
- [41] K. Kawashima, K. Kosuge, and S. Kachi, “Isothermal reduction of V₂O₅ by SO₂ gas”, *Chem. Lett.*, pp. 1131-1136 (1975).
- [42] Y. H. Kim and H. I. Le, “Redox Property of Vanadium Oxide and Its Behavior in

- Catalytic Oxidation”, *Bull. Korean Chem. Soc.*, Vol. 20, No. 12, pp. 1457-1463 (1999).
- [43] H. Endo, M. Wakihara, and M. Taniguchi, “Phase equilibria in the V_2O_4 - V_2O_5 system at temperatures from 500°C to 651°C”, *Chem. Lett.*, pp. 905-908 (1974).
- [44] M. Gurvitch, S. Luryi, A. Polyakov, A. Shabalov, M. Dudley, G. Wang, S. Ge, and V. Yakovlev, “ VO_2 films with strong semiconductor to metal phase transition prepared by the precursor oxidation process”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 102, pp. 033504/1-13 (2007).
- [45] K. Okimura and N. Kubo, “Preparation of VO_2 Films with Metal-Insulator Transition on Sapphire and Silicon Substrates by Inductively Coupled Plasma-Assisted Sputtering”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 44, No. 36, pp. L1150-L1153 (2005).
- [46] Y. Shigesato, M. Enomoto, and H. Odaka, “Thermochromic VO_2 Films Deposited by RF Magnetron Sputtering Using V_2O_3 or V_2O_5 Targets”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 39, No. 10, pp. 6016-6024 (2000).
- [47] H. Kobayashi and Y. Yasuoka, “Fabrication of 2 Dimensional Slot Array Antennas for 94 GHz Millimeter Wave Radiation”, *Technical Report of IEICE*, Vol. MW97-24, pp. 49-54 (1997). [In Japanese].
- [48] D. F. Filipovic, S. S. Gearhart, and G. M. Rebeiz, “Double-Slot Antennas on Extended Hemispherical and Elliptical Silicon Dielectric Lenses”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 41, No. 10, pp. 1738-1749 (1993).
- [49] Y. Tawk, K. Y. Kabalan, A. El-Hajj, C. G. Christodoulou, and J. Costantine, “A Simple Multiband Printed Bowtie Antenna”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 7, pp. 557-560 (2008).
- [50] H. Saijo, M. Morimoto, T. Kiwa, and M. Tonouchi, “Terahertz emission properties from YBCO thin film log-periodic antennas”, *Physica C*, Vol. 362, pp. 319-323 (2001).
- [51] R. DuHamel, “Broadband logarithmically periodic antenna structures”, *IRE International Convention Record*, Vol. 5, pp. 119-128 (1957).
- [52] J. R. Donnellan, “A Spiral - Doublet Scanning Array”, *IRE Trans. Antennas Propag.*, pp. 276-280 (1961).
- [53] M. S. Wheeler, “On the Radiation from Several Regions in Spiral Antennas”, *IRE*

- Trans. Antennas Propag., Vol. 9, No. 1, pp. 100-102 (1961).
- [54] H. Nakano, K. Hirose, I. Ohshima, and J. Yamauchi, "An Integral Equation and its Application to Spiral Antennas on Semi-Infinite Dielectric Material", IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 46, pp. 267-274 (1998).
- [55] Y. Amin, Q. Chen, L. R. Zheng, and H. Tenhunen, "Design and Fabrication of Wideband Archimedean Spiral Antenna for RFID Sensing and Wireless Applications", Progress in Electromagnetics Research, Vol. 130, No. 2, pp. 241-256 (2012).
- [56] M. A. Tarasov, S. V. Shitov, V. P. Koshelets, and G. V. Prokopenko, "Integrated receiving structure comprising complementary spiral antenna and tuned parallel biased SIS array", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 3, pp. 2254-2256 (1993).
- [57] B-G. Chae, H-T. Kim, S-J. Yun, B-J. Kim, Y-W. Lee, and K-Y. Kang, "Comparative Analysis of VO₂ Thin Films Prepared on Sapphire and SiO₂/Si Substrates by the Sol-Gel Process", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 46, No. 2, pp. 738-743 (2007).
- [58] N. Yuan, J. Li, G. Li, and X. Chen, "The large modification of phase transition characteristics of VO₂ films on SiO₂/Si substrates", Thin Solid Films, Vol. 515, pp. 1275-1279 (2006).
- [59] Y. Ningyi, L. Jinhua, H. L. W. Chan, and L. Chenglu, "Comparison of VO₂ thin films prepared by inorganic sol-gel and IBED methods", Appl. Phys. A, Vol. 78, pp. 777-780 (2004).
- [60] Y. Ningyi, L. Jinhua, and L. Chenglu, "Valence reduction process from sol-gel V₂O₅ to VO₂ thin films", Appl. Sur. Sci., Vol. 191, pp. 176-180 (2002).
- [61] Y. Yoneda, T. Okabe, K. Sakaue, H. Terauchi, H. Kasatani, and K. Deguchi, "Structural characterization of BaTiO₃ thin films grown by molecular beam epitaxy", J. Appl. Phys., Vol. 83, pp. 2458-2461 (1998).
- [62] T. Maruyama and Y. Ikuta, "Vanadium dioxide thin films prepared by chemical vapour deposition from vanadium (III) Acetylacetonate", J. Mater. Sci., Vol. 28, pp. 5073-5078 (1993).
- [63] T. T. T. Pham, J. H. Lee, Y. S. Kim, and G. Y. Yeom, "Properties of Si_xN_y thin film

- deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition at low temperature using $\text{SiH}_4/\text{NH}_3/\text{Ar}$ as diffusion barrier film”, *Sur. Coat. Technol.*, Vol. 202, pp. 5617-5620 (2008).
- [64] T. Katayama, M. Fujimoto, M. Shimizu, and T. Shiosaki, “Growth and Properties of PbTiO_3 Thin Films by Photoenhanced Chemical Vapor Deposition”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 30, pp. 2189-2192 (1991).
- [65] D. Vernardou, M. E. Pemble, and D. W. Sheel, “Vanadium oxides prepared by liquid injection MOCVD using vanadyl acetylacetonate”, *Sur. Coat. Technol.*, Vol. 188–189, pp. 250– 254 (2004).
- [66] R. W. Schwartz, “Chemical Solution Deposition of Perovskite Thin Films”, *Chem. Mater.*, Vol. 9, pp. 2325-2340 (1997).
- [67] T. J. Hanlon, J. A. Coath, M. A. Richardson, “Molybdenum-doped vanadium dioxide coatings on glass produced by the aqueous sol-gel method”, *Thin Solid Films*, Vol. 436, pp. 269-272 (2003).
- [68] C. Navone, J. P. Pereira-Ramos, R. Baddour-Hadjean, and R. Salot, “Electrochemical and structural properties of V_2O_5 thin films prepared by DC sputtering”, *Proc. Int. workshop “Advanced Techniques for Energy Sources Investigation and Testing”*, Vol. 4-9, pp. L5/1-7 (2004).
- [69] Y. C. Zhang, Z. X. Yue, Z. L. Gui, and L. T. Li, “Microwave Dielectric Properties of $\text{CuO-V}_2\text{O}_5\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-Doped ZnNb}_2\text{O}_6$ Ceramics with Low Sintering Temperature”, *J. Electroceramics*, Vol. 14, pp. 67–74 (2005).
- [70] V. N. Andreev, F. A. Chudnovskii, and V. A. Klimov, “Resistivity of the metallic phase of epitaxial VO_2 films”, *Pis'ma v ZhETF*, Vol. 60, No. 9, pp. 637-638 (1994).
- [71] J. Nag and R. F. Haglund Jr, “Synthesis of vanadium dioxide thin films and nanoparticles”, *J. Phys.: Condens. Matter.*, Vol. 20, pp. 264016-264029 (2008).
- [72] F. C. Case, “Modifications in the phase transition properties of predeposited VO_2 films”, *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol. A 2, No. 4, pp. 1509-1512 (1984).
- [73] J. F. De Natale, P. J. Hood, and A. B. Harker, “Formation and characterization of grain-oriented VO_2 thin films”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 66, No. 12, pp. 5844-5850 (1989).
- [74] H. Endo, M. Wakihara, M. Taniguchi, and T. Katsura, “Phase Equilibria in the

- V₂O₃-VO₂ System at High Temperatures”, *Bull. Chem. Soc. Japan*, Vol. 46, pp. 2087-2090 (1973).
- [75] H. Pawlak, M. S. Reuther, and A. F. Jacob, “High isolation substrate integrated coaxial feed for Ka-band antenna arrays”, *Microwave Conference*, pp. 1507-1510 (2007).
- [76] J. B. Muldavin and G. M. Rebeiz, “MM-Wave Tapered Slot Antennas on Synthesized Low Permittivity Substrates”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 47, No. 8, pp. 1276-1280 (1999).
- [77] G. P. Gauthier, A. Courta, and G. M. Rebeiz, “Microstrip Antennas on Synthesized Low Dielectric-Constant Substrates”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 45, No. 8, pp. 1310-1314 (1997).
- [78] B. S. S. Rao, T. R. Vishnu, H. Khan, and D. V. Ratnam, “Spiral Antenna Array Using RT-Duriod Substrate for Indian Regional Navigational Satellite System”, *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, Vol. 2, No. 2, pp. 555-557 (2012).
- [79] X. Chen, Q. Lv, and X. Yi, “Responsivity analysis of micro-bolometer under pulsed bias”, *Optik*, Vol. 122, pp. 2143-2146 (2011).
- [80] P. F. Bongers, “Anisotropy of the electrical conductivity of VO₂ single crystals”, *Solid State Commun.*, Vol.3, No. 9, pp. 275-277 (1965).
- [81] H. P. Kirchner, “Thermal expansion anisotropy of oxides and oxide solid solutions”, *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 52, No. 7, pp. 379-386 (1969).
- [82] Y. Cui and S. Ramanathan, “Substrate effects on metal-insulator transition characteristics of rf-sputtered epitaxial VO₂ thin films”, *J. Vac. Sci. Technol., A*, 29, No. 4, pp. 041502/1-7 (2011).
- [83] E. Kusano and J. A. Theil, “Effects of microstructure and nonstoichiometry on electrical properties of vanadium dioxide films”, *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol. A 7, No. 3, pp. 1314-1317 (1989).
- [84] S. E. Nikitin, I. A. Khakhaev, F. A. Chudnovskii, and E. B. Shadrin, “Reversible changes in electrical properties of a VO₂ film on a superionic conductor substrate”, *Phys. Solid State*, Vol. 35, No. 10, pp. 1393-1395 (1993).
- [85] J. Li and N. Yuan, “Temperature sensitivity of resistance of VO₂ polycrystalline films

- formed by modified ion beam enhanced deposition”, *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 233, pp. 252-257 (2004).
- [86] M. Nagashima and H. Wada, “The oxygen deficiency effect of VO₂ thin films prepared by laser ablation”, *J. Mater. Res.*, Vol. 12, No. 2, pp. 416-422 (1997).
- [87] H. Jerominek, F. Picard, and D. Vincent, “Vanadium oxide films for optical switching and detection”, *Opt. Eng.*, Vol. 32, No. 9, pp. 2092-2099 (1993).
- [88] F. J. González, C. S. Ashley, P. G. Clem, and G. D. Boreman, “Antenna-coupled microbolometer arrays with aerogel thermal isolation”, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 45, pp. 47-51 (2004).
- [89] J. A. Cox, R. Higashi, F. Nusseibeh, and C. Zins, “MEMS-based uncooled THz detectors for staring imagers”, *Proc. SPIE*, Vol. 8031, pp. 80310D/1-6 (2011).
- [90] T. Uchida, Y. Abe, S. Hashimoto, and Y. Yasuoka, “Receiving Properties of Thin-Film Slot Antenna Arrays for 28-THz-CO₂ Laser Radiation”, *IEEJ Trans. FM.*, Vol. 127, No. 10, pp. 581-585 (2007).
- [91] D. A. Scribner, M. R. Kruer, and J. M. Killiany, “Infrared focal plane array technology”, *Proc. IEEE*, Vol. 79, No. 1, pp. 66-85 (1991).
- [92] Q. Liu, A. P. Robinson, K. L. Ford, R. J. Langley, and S. P. Lacour, “Elastic dipole antenna prepared with thin metal films on elastomeric substrate”, *Electron. Lett.*, Vol. 48, No. 2, pp. 65-66 (2012).
- [93] K. Carver and J. Mink, “Microstrip antenna technology”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 29, No. 1, pp. 2-24 (1981).
- [94] I. Codreanu and G. D. Boreman, “Influence of dielectric substrate on the responsivity of microstrip dipole-antenna-coupled infrared microbolometers”, *Appl. Opt.*, Vol. 41, No. 10, pp. 1835-1840 (2002).
- [95] B. K. Kormanyos, P. H. Ostdiek, W. L. Bishop, T. W. Crowe, and G. M. Rebeiz, “A Planar Wideband 80-200 GHz Subharmonic Receiver”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 41, No. 10, pp. 1730-1737 (1993).
- [96] Y. Mushiake, “Self-Complementary Antennas”, *IEEE Antennas Propagation Magazine*, Vol. 34, No. 6, pp. 23-29 (1992).
- [97] H. Nakano and J. Yamauchi, “The Two Wire Round Spiral Antenna”, *IECE Technical*

- Report, Vol. A.78-75, pp. 31-36 (1978) [In Japanese].
- [98] H. Nakano, Y. Shinma, and J. Yamauchi, "A Monofilar Spiral Antenna and Its Array above a Ground Plane – Formation of a Circularly Polarized Titled Fan Beam", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 45, No. 10, pp. 1506-1511 (1997).
- [99] D. S. Filipovic, A. U. Bhohe, and T. P. Cencich "Low-Profile Broadband Dual-Mode Four-Arm Slot Spiral Antenna with Dual Dyson Balun Feed", *IEE Proc. Microwave Antennas Propag.*, pp. 527-533 (2005).
- [100] H. Wang and M. Zhang, "Simulation design of four-arm cavity backed dielectric loaded UWB spiral antenna", *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, Vol. 4, pp. 1675-1678 (2008).
- [101] L. Shafai, "Design of Multi-Arm Multi-Mode Spiral Antennas for Directional Beams Using Equivalent Array Concept", *Electromagnetics*, Vol. 14, No. 3-4, pp. 285-304 (1994).
- [102] L. Sevgi and G. Çakir, "A Broadband Array of Archimedean Spiral Antennas for Wireless Applications", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 48, No. 1, pp. 195-200 (2006).
- [103] R. Bawer and J. J. Wolfe, "The Spiral Antenna", *IRE International Convention Record*, Vol. 8, pp. 84-95 (1960).
- [104] J. A. Kaiser, "The Archimedean Two-Wire Spiral Antenna", *IRE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 8, No. 3, pp. 312-323 (1960).
- [105] K. K. Mei, "On the Integral Equations of Thin Wire Antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. AP-13, pp. 374-378 (1965).
- [106] T. Fukutomi and Y. Yasuoka, "A Printed Two-Arm Spiral Antenna Operating at the 90-GHz Band", *IEICE Trans. Electron.*, Vol. 77-C-I, No. 11, pp. 599-606 (1994) [in Japanese].
- [107] H. Nakano, S. R. Kerner, and N. G. Alexopoulos, "The Moment Method Solution for Printed Wire Antennas of Arbitrary Configuration", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 36, No. 12, pp. 1667-1674 (1988).
- [108] S. K. Khamas and G. G. Cook, "Moment-Method Analysis of Printed Wire Spirals Using Curved Piecewise Sinusoidal Subdomain Basis and Testing Functions", *IEEE*

- Trans. Antennas Propag., Vol. 45, No. 6, pp. 1016-1022 (1997).
- [109] S. K. Khamas, G. G. Cook, and R. J. Waldron, "Moment-Method Analysis of Printed Circular Wire-Loop Antenna Using Curved Piecewise Sinusoidal Subdomain Basis and Test Functions", IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 44, No. 9, pp. 1303-1305 (1996).
- [110] N. Kukutsu and Y. Kado, "Overview of Millimeter and Terahertz Wave Application Research", NTT Technical Review, Vol. 7, No. 3, pp. 1-6 (2009).
- [111] K. Hirose, M. Miyamoto, and H. Nakano, "A Two-Wire Spiral Antenna with Unbalanced Feed", Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 4, pp. 128-131 (2001).
- [112] H. Nakano, T. Igarashi, H. Oyanagi, Y. Iitsuka, and J. Yamauchi, "Unbalanced-Mode Spiral Antenna Backed by an Extremely Shallow Cavity", IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 57, No. 6, pp. 1625-1633 (2009).
- [113] H. Nakano, K. Nogami, S. Arai, H. Mimaki, and J. Yamauchi, "A Spiral Antenna Backed by a Conducting Plane Reflector", IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. AP-34, No. 6, pp. 791-796 (1986).
- [114] H. Nakano, M. Ikeda, K. Hitosugi, and J. Yamauchi, "A Spiral Antenna Sandwiched by Dielectric Layers", IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 52, No. 6, pp. 1417-1423 (2004).
- [115] Y. Yasuoka, S. Hashimoto, Y. Abe, and K. Gamo, "Fabrication of the thin film slot antenna arrays for receiving 28 THz-CO₂ laser radiation", Microelectron. Eng., Vol. 61-62, pp. 1049-1054 (2002).
- [116] M. Kominami, D. M. Pozar, and D. H. Schaubert, "Dipole and Slot Elements and Arrays on Semi-Infinite Substrates", IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. AP-33, No. 6, pp. 600-607 (1985).
- [117] T. Shimizu, Y. Abe, and Y. Yasuoka, "Thin-Film Slot Antenna for 700 GHz Submillimeter Wave Radiation", IEICE Trans. Electron., Vol. E78-C, No. 8, pp. 1002-1006 (1995).
- [118] H. Nakano and J. Yamauchi, "A Theoretical investigation of the Two-Wire Round Spiral Antenna – Archimedean Type", Antennas and Propagation Society

International Symposium, Vol. 17, pp. 387-390 (1979).

発表実績

学術論文

1. **L. N. Son**, T. Tachiki, and T. Uchida: “Characteristics of Vanadium Oxide Thin Films Prepared by Metal-Organic Decomposition for Bolometer Detectors”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 50, pp. 025803/1-4 (2011.2).
2. **L. N. Son**, T. Tachiki, T. Uchida, and Y. Yasuoka: “Receiving Properties of Thin-Film Spiral Antenna Fabricated on Fused-Quartz Substrate Backed by Copper Plate Reflector”, IEICE Trans. Electron., Vol. E95-C, No. 5, pp. 936-941 (2012.5).
3. **L. N. Son**, T. Tachiki, and T. Uchida: “Fabrication of Vanadium Oxide Thin Films on Fused Quartz Substrates by Metal-Organic Decomposition for Bolometer Detectors”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 51, pp. 088004/1-2 (2012.7).
4. **L. N. Son**, T. Tachiki, and T. Uchida: “Fabrication and Evaluation of Thin-Film Spiral-Antenna-Coupled VO_x Microbolometer by Metal-Organic Decomposition”, accepted for publication in Jpn. J. Appl. Phys. (2013).

国際会議 proceedings 等

1. **L. N. Son**, T. Tachiki, and T. Uchida: “Fabrication of vanadium oxide thin films by the metal-organic decomposition method for bolometer detectors”, Extended Abstracts of the 2nd International Workshop on Terahertz Technology 2009 (TeraTech'09), pp. 187-188, Osaka, Japan, Dec. 2009.
2. **L. N. Son**, T. Tachiki, T. Uchida, and Y. Yasuoka: “A Thin-Film Spiral Antenna Coupled with Bi Microbolometer Operating at 100 GHz Band”, Proc. of the 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2010), Rome, Italy, Tu-P.17/1-2, Sep. 2010.

3. **L. N. Son**, T. Tachiki, and T. Uchida: “Electrical Properties of VO_x Bolometer Thin Films Prepared by Metal-Organic Decomposition”, Proc. of the 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2010), Rome, Italy, We-P.30/1-2, Sep. 2010.
4. **L. N. Son**, T. Tachiki, T. Uchida, and Y. Yasuoka: “Effects of Substrate Thickness on Receiving Properties of Thin-Film Spiral Antenna”, Proc. of the 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2011), Houston, Texas, USA, Tu5.46/1-2, Oct. 2011.
5. **L. N. Son**, T. Tachiki, and T. Uchida: “Fabrication of VO_x Microbolometer Detector Coupled with Thin-Film Spiral Antenna by Metal-Organic Decomposition”, Proc. of the 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2012), Wollongong, Australia, Thu-P-30/1-2, Sep. 2012.
6. **L. N. Son**, T. Tachiki, and T. Uchida: “High TCR of VO_x Thin Films Fabricated by Metal-Organic Decomposition for Bolometer Detectors”, Proc. of the 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2012), Wollongong, Australia, Thu-P-41/1-2, Sep. 2012.

学会発表

1. **レー・ゴク・ソン**, 立木隆, 内田貴司: “有機金属分解(MOD)法によるボロメータ用酸化バナジウム薄膜の作製”, 日本赤外線学会第 18 回研究発表会, 2008-IR-23, Oct. 2008.
2. **レー・ゴク・ソン**, 立木隆, 内田貴司: “有機金属分解(MOD)法による VO_x/SiO₂ 薄膜の作製”, 第 56 回応用物理学関連連合講演会, 1a-N-1, Apr. 2009.
3. **レー・ゴク・ソン**, 立木隆, 内田貴司: “有機金属分解(MOD)法により作製した V₂O₅ 薄膜の減圧熱処理”, 第 70 回応用物理学学会学術講演会, 9a-ZB-6, Sep. 2009.

4. レー・ゴク・ソン, 立木隆, 内田貴司: “有機金属分解(MOD)法による VO_x ボロメータ薄膜の作製”, 日本赤外線学会第 19 回研究発表会, 2009-IR-20, Nov. 2009.
5. レー・ゴク・ソン, 立木隆, 内田貴司: “MOD 法により作製した VO_x ボロメータ薄膜の特性評価”, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 18a-S-5, Mar. 2010.
6. レー・ゴク・ソン, 立木隆, 内田貴司, 安岡義純: “誘電体基板上薄膜スパイラルアンテナに対するアンテナパターンの数値的検討”, 第 20 回日本赤外線学会研究発表会, 2010-IR-36, Nov. 2010.
7. レー・ゴク・ソン, 立木隆, 内田貴司, 安岡義純: “薄膜スパイラルアンテナによる検出電圧の誘電体基板厚さ依存性”, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 26a-BX-11, Mar. 2011.
8. 笠井博幸, レー・ゴク・ソン, 立木隆, 内田貴司: “有機金属分解(MOD)法による減圧加熱を用いた VO_x 薄膜の作製”, 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 2a-ZJ-4, Sep. 2011.
9. レー・ゴク・ソン, 立木隆, 内田貴司, 安岡義純: “100 GHz 帯薄膜スパイラルアンテナの受信特性”, 第 21 回日本赤外線学会研究発表会, 2011-IR-31, Oct. 2011.
10. レー・ゴク・ソン, 立木隆, 内田貴司: “MOD 法により石英基板上に作製した VO_x 薄膜の電気的特性”, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 16p-B7-13, Mar. 2012.
11. 笠井博幸, レー・ゴク・ソン, 立木隆, 内田貴司: “MOD 法による VO_x 薄膜組成の焼成圧力依存性”, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 18a-GP1-1, Mar. 2012.
12. 笠井博幸, レー・ゴク・ソン, 立木隆, 内田貴司: “MOD 法により作製した VO_x プリカーサ薄膜の空気減圧下での焼成”, 第 73 回応用物理学学会学術講演会,

11a-C11-10, Sep. 2012.

13. レー・ゴク・ソン, 立木隆, 内田貴司: “MOD 法による薄膜スパイラルアンテナを結合した VO_x マイクロボロメータ検出素子の製作”, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 11p-B1-16, Sep. 2012.
14. 松下亮仁, レー・ゴク・ソン, 笠井博幸, 立木隆, 内田貴司: “MOD 法による窒化シリコン基板上への VO_x 薄膜の作製”, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 12p-PB3-1, Sep. 2012.
15. 内田貴司, レー・ゴク・ソン, 立木隆: “薄膜スパイラルアンテナ結合 VO_x ボロメータ素子による電磁波検出”, 第 22 回日本赤外線学会研究発表会, 2012-IR-06, Nov. 2012.
16. レー・ゴク・ソン, 立木隆, 内田貴司: “MOD 法により異なる基板上に作製した VO_x 薄膜の特性比較”, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, Mar. 2013. (発表予定)
17. 松下亮仁, レー・ゴク・ソン, 立木隆, 内田貴司: “Si₃N₄ メンブレン上への 200 GHz 帯薄膜スパイラルアンテナの製作”, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, Mar. 2013. (発表予定)
18. 笠井博幸, レー・ゴク・ソン, 立木隆, 内田貴司: “MOD 法により作製した VO_x 薄膜の特性評価”, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, Mar. 2013. (発表予定)