

B-a1

バイアスイオンコレクタを用いた 小型プラズマフォーカス装置で生成されたプラズマ流の評価

富山大工, 長岡技科大^A小口 拓哉, 松山 準, 加藤 青吾, 竹崎 太智, 佐々木 徹^A, 伊藤 弘昭
Evaluation of plasma parameters of compact plasma focus device using biased ion collector

Fac. of Eng., Univ. of Toyama; Nagaoka Univ. of Tech.^A

T. Oguchi, J. Matsuyama, S. Kato, T. Takezaki, T. Sasaki^A, H. Ito

宇宙空間を飛び回る高エネルギー粒子の生成起源として、粒子同士の衝突を介さない無衝突衝撃波が挙げられる。無衝突衝撃波では、電磁場と荷電粒子の相互作用によりプラズマの加熱と「粒子加速」が発生するが、詳細なメカニズムは不明瞭である。この「粒子加速」のメカニズムの解明のため、実験室で無衝突衝撃波を再現し、現象を「その場計測」する実験室宇宙物理が精力的に行われている。

実験室で無衝突衝撃波を再現するためには、希薄ガス中で高速なプラズマ流を駆動する必要がある。我々は、6本の柱状外電極とコーン型内電極を用いた小型プラズマフォーカス装置(PF)を用いて、パルスパワー放電により高速なプラズマ流の生成を行っている[1,2]。外電極と内電極にパルス放電を行い、大電流と電流自身が作る磁場とのローレンツ力によって発生するピンチ効果により、高温・高密度なプラズマ流を生成する。しかし、PFで生成されるプラズマ流は放電電流や電極形状に依存し、希薄ガス中は衝突が稀なことから再現性が低いという問題がある。そのため、生成されたプラズマ流の性質を理解するためにプラズマ流のパラメータを評価する必要がある。

本研究では、PFによって生成されたプラズマ流のパラメータを評価するため、バイアスイオンコレクタ(BIC)を用いたイオン電流計測を行った。BICはイオンコレクタとバイアス回路、フラックスを制限するアーチャーによって構成され、PF装置終端に設置されたBICにより、イオン電流およびプラズマパラメータを評価する。本発表ではBICで計測した電流-電圧特性および算出したプラズマパラメータについて評価した結果を報告する。

[1] T. Takezaki, *et al.*, Phys. Plasmas **23**, 062904 (2016).

[2] T. Takezaki, *et al.*, Phys. Plasmas **28**, 102109 (2021).

B-a2

小型プラズマフォーカス装置内部のプラズマ自発光計測

富山大工, 長岡技科大^A 加藤 青吾, 松山 準, 小口 拓哉, 竹崎 太智, 佐々木 徹^A, 伊藤 弘昭
Plasma self-emission measurement in compact plasma focus device

Fac. of Eng., Univ. of Toyama; Nagaoka Univ. of Tech.^A

S. Kato, J. Matsuyama, T. Oguchi, T. Takezaki, T. Sasaki^A, H. Ito

宇宙空間では宇宙線という高エネルギー粒子が観測されているが、詳細なエネルギー増加過程は明らかにされていない。宇宙線の生成・エネルギー増加機構を理解するため、実験室での宇宙物理現象の再現実験が提案されており、そのためには宇宙空間のプラズマと相似な高速プラズマ流の生成が必要となる。

実験室で高速プラズマ流を得るため、我々は小型プラズマフォーカス (PF) 装置によるプラズマ生成を提案している[1,2]。PF装置では内部電極と外部電極間にパルス放電を行い、大電流放電のピンチ効果により高エネルギー密度プラズマを生成するため、電極内部でのプラズマの動的挙動がプラズマ流速を決定する。しかし、宇宙プラズマと相似なプラズマを生成するには低圧力領域でのPF装置の動作が必要となり、低圧力領域ではパッシュンの法則が適用されないため、電極内での放電箇所や電流経路の生成が安定せず、プラズマ流の再現性が低いという課題がある。

本研究ではPF電極内部でのプラズマ挙動の計測が容易な柱状型電極を用いたプラズマフォーカス装置を構築した。図はヘリウムガス圧1Pa時の放電電流波形と電極内部に設置した光ファイバーからのプラズマ自発光の信号を示す。本発表では高速度カメラと光ファイバーを用いたプラズマ自発光計測の比較と、ガス圧変更時のプラズマ挙動の変化について報告する。

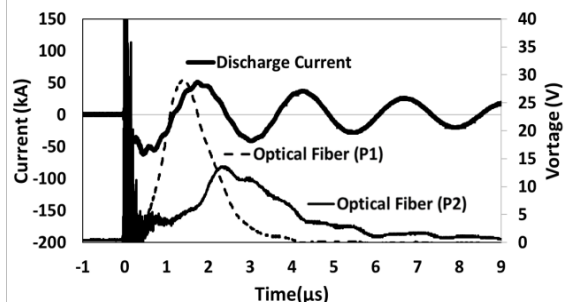


図: 電極内部でのプラズマ自発光の計測結果

[1] T. Takezaki, *et al.*, Phys. Plasmas **23**, 062904 (2016).

[2] T. Takezaki, *et al.*, Phys. Plasmas **28**, 102109 (2021).

B-a3

楕円電極を用いた反射三極管型仮想陰極発振器における出力マイクロ波の放射分布特性

富山大工 深田 悠晴, 伊藤 弘昭, 竹崎 太智

Radiation distribution of output microwave in reflective triode virtual cathode oscillator with elliptical electrodes

Fac. of Eng., Univ. of Toyama Y. Fukada, H. Ito, T. Takezaki

高出力マイクロ波源は、マイクロ波送電、加速器、プラズマ加熱、通信などの工業・産業分野で応用が期待されている。仮想陰極発振器は高出力マイクロ波源を生成する装置の 1 つであり、外部磁場が不要であることから単純な構造、GW 級のマイクロ波が発振可能で、周波数の選択性をもつ。その反面、低いマイクロ波変換効率、発振周波数が広帯域という欠点がある。そのため、電力変換効率および出力の向上、周波数の制御に関する研究が行われてきた。

本装置はメッシュ陽極に正の高電圧パルスを印加すると高電界により陰極表面から電子が放出される。メッシュ陽極を通過した電子ビームがドリフト空間上で空間電荷制限電流を超えると仮想陰極が形成され、後続電子は仮想陰極と実陰極間で往復運動する。この往復運動と仮想陰極自身が時間的・空間的に振動することによりマイクロ波が発振される。

先行研究において楕円形電極が従来の円形電極より、導波管軸上における発振マイクロ波強度の優位性を確認した^[1]。本研究ではさらなる出力の改善に向け、導波管軸に対し回転させた楕円形電極と円形電極による発振マイクロ波の放射角度分布特性を調査した。測定アンテナは出力窓から 120 cm の円周上に 0 度から 90 度まで 10 度おきに設置し、楕円形電極は、導波管長軸と電極長軸が一致する配置を 0 度として、 $\alpha = 0$ 度、45 度、90 度回転させて実験を行った。

楕円形電極を用いた場合、マイクロ波出力が高くなる結果が得られた。また、電極形状による方位角方向の放射角度分布特性に強い依存性は確認されず、発振周波数は電極形状や回転位置によらず全ての角度において一定であった。仰角方向の放射特性との関係を含め、詳細は発表にて報告する。

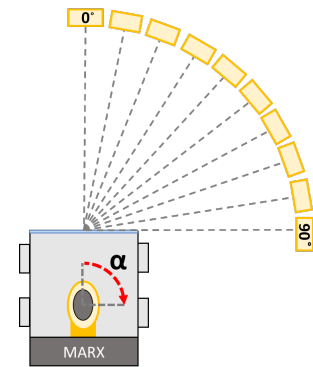


図 電極とアンテナの位置関係

[1] R. Tanaka, Y. Fukada, H. Ito, "Electrode shape dependence of output microwave characteristics in reflex triode virtual cathode oscillator", Phys. Plasmas 28, 033103 (2021)

B-a4

仮想陰極発振器における出力マイクロ波の周波数特性に及ぼす 電子ビームによる電流の影響

富山大工 長谷川 遼太郎, 田中 惟与, 伊藤 弘昭, 竹崎 太智

Effect of Electron Beam on Oscillation Frequency of Output Microwaves in Virtual Cathode Oscillator

Fac. of Eng., Univ. of Toyama R. Hasegawa, Y. Tanaka, H. Ito, T. Takezaki

仮想陰極発振器とは相対論電子ビームを用いたマイクロ波発生装置である。仮想陰極発振器は他の高出力マイクロ波源と比べて構造は単純だが、数十 MW から数 GW 級のマイクロ波の発振が可能である。しかしマイクロ波変換効率が著しく低いという問題点があり、その効率改善に向けた研究が行われている。本研究では出力マイクロ波の特性を解明するために、陰極-陽極間距離と金属メッシュの開口率を変更した場合に、仮想陰極発振器から出力される電子ビーム電流が出力マイクロ波の周波数に与える影響を調査した。

仮想陰極発振器は陰極とメッシュ状の陽極から構成されている。陰極に負の高電圧パルス印加し電界集中により飛び出した電子が空間電荷制限電流を超えると陰極とほぼ同電位になる仮想陰極が形成される。その後電子が陰極と仮想陰極を往復運動することによりマイクロ波が発生する。また、仮想陰極は非常に不安定な領域であり、空間的・時間的に振動することによってもマイクロ波が発生する。本研究では高電圧パルス印加するために、電源はマルクス発生器とパルス形成線路から成る高電圧パルス発生装置を使用しマルクスの発生電圧は 384 kV とした。陰極材料にはベルベットを使用し、メッシュ陽極にはステンレスを用いた。

ダイオード電圧の測定には硫酸銅分圧器を用いた。電子ビームによる電流を測定するために、ダイオード電流と自由空間に漏れていく漏れ電流はログスキーコイルを用いて測定した。出力されたマイクロ波はマイクロ波放射窓から 700 mm 離れた方形導波管アンテナで受信した。

結果としてマイクロ波の周波数は、ダイオード電流を時間で積分して得られた電荷量と漏れ電流を時間で積分して得られた電荷量の差が多くなると時間的に変化しやすいことがわかった。詳細な実験結果と考察は発表にて報告する。

B-a5

アルミニウムイオン源を用いた 両極性パルス加速器による高強度パルス重イオンビームの発生

富山大工 田上 航, 藤野 朗, 伊藤 弘昭, 竹崎 太智

Generation of pulsed heavy ion beam using bipolar pulse accelerator with aluminum ion source

Fac. of Eng., Univ. of Toyama W. Tagami, A. Hujino, H. Ito, T. Takezaki

高強度パルスイオンビームとはパルス電力技術を用いて発生されるパルス幅が 100ns 程度、イオン電流が数 kA 程度のイオンビームであり、従来のイオンビームと比較して電流密度が非常に大きいという特徴がある。そのためパルスイオンビームを用いた半導体材料へのイオン注入技術では表面層の瞬間的な加熱・冷却が可能である点から、従来のシリコン半導体で使用されているイオン拡散法やイオン注入法による処理が困難である次世代パワー半導体材料への応用が期待できる。しかし従来のパルスイオンビームでは陽極プラズマが生成される際に電極や真空容器内に付着した不純物もプラズマ化してしまい、イオンビームの純度を下げってしまうという問題がある。そのためパルスイオンビームの応用に向けて純度向上が課題となっている。

本研究では半導体材料の p 型ドーパントとして利用できるアルミニウムイオンビームを発生させることを目的としたアルミニウムイオン源の開発を行うとともに、陽極で発生したイオンを二段加速させることによって高純度なパルスイオンビームが発生可能である両極性パルス加速器を用いたパルスイオンビームの発生実験を行った。アルミニウムイオン源は真空アーク放電によるプラズマの生成が可能であり、両極性パルス加速器の陽極に設置ができるように設計されている。両極性パルス加速器では両極性パルスをタイミング良く印加することにより目的のイオンのみ二段加速させることが可能で、加速に伴うイオンの走行時間差によって不純物イオンを除去しイオンビームの純度を向上させる。

本発表では、アルミニウムイオン源の特性評価及び、アルミニウムイオン源を両極性パルス加速器に組み込むことによりパルスアルミニウムイオンビームの発生実験を行い、イオンビームの特性評価を行うことによって装置の動作を実証した。詳細な実験条件や結果は発表にて報告する。

B-a6

プラズマフォーカスの陽極形状に対するプラズマシートへの影響

富山大工 山田 拓歩, 大村 陽輔, 伊藤 弘昭, 竹崎 太智

Study on effect of anode shape on plasma sheet in plasma focus device

Fac. of Eng. Toyama Univ. T. Yamada, Y. Omura, H. Ito, T. Takezaki

プラズマフォーカス装置は、プラズマを流れる電流がによる磁場の影響で自己収縮(Zピンチ)する高温・高密度プラズマを生成できる装置である。主に、荷電粒子ビーム、X線、中性子などの線源としての応用があり、特にイオン源として、核融合ドライバー、材料へのイオン注入、薄膜堆積などへの研究が行われている。PF装置は、30 kVの充電電圧でも数 MeV 程度の高エネルギーイオンビームが発生する。しかしながら、イオンの加速機構の解明には至っていない。本研究ではPF装置をイオン源として応用するために、イオンビームの特性向上及びイオンビームの加速機構解明に向け、陽極先端形状に対するプラズマシートの影響調査を調べた。

本装置は、中心電極(陽極)と24本の棒で構成された籠型の外電極(陰極)、及び絶縁物から構成されている。真空状態の電極間に、イオン源として使用したいガスを封入し、高電圧パルス電圧を電極間に印加すると、絶縁物表面にシート状のプラズマが形成される。次に、電流 J と自己磁場 B によるローレンツ力 $J \times B$ により、プラズマシートは陽極先端方向へと加速される。プラズマが電極先端に達すると、電極先端付近でピンチされたプラズマ柱が形成される。その後、不安定性が発生しプラズマ柱が崩壊することにより荷電粒子ビームやX線などが発生する。

本研究は、充電電圧を30 kVに設定し、真空容器内を 5.0×10^{-3} Pa以下に排気した後、水素を封入した。電流はロゴスキーコイルで測定している。また陽極から230 mm軸上の位置にバイアスイオンコレクタ(BIC)を設置してイオン電流密度を測定し、陽極の軸上からみて36度と90度に高速度カメラを設置し、プラズマシートの進展を観測した。使用した陽極は、円柱内部を空洞にしたホロー型とテーパー加工した10度のホロー型、また円柱先端が平らな10度テーパー加工した10度フラット型と45度テーパー加工した45度フラット型の4種類を使用して実験を行った。詳細な実験結果と考察については発表にて報告する。

B-a7

120 - 220 GHz 帯の超多周波数発振ジャイロトロンにおける三段共振器の導入

東出昌己、山口裕資、渡邊将翔、伊藤慎悟、福成雅史、立松芳典
福井大学 遠赤外領域開発研究センター

Three-Stage Cavity Resonator in a 120 - 220 GHz Super-Multifrequency Gyrotron
M. Higashide, Y. Yamaguchi, M. Watanabe, S. Ito, M. Fukunari and Y. Tatematsu
Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

高周波ジャイロトロンの汎用性の向上を目指し、多周波数化を目的とした研究を行っている。これまで、径の異なる2つの共振器を軸方向に連結した二段共振器を導入し、4~8 Tの範囲において電子のサイクロトロン周波数に対応する周波数範囲(120~220 GHz)で発振可能なモードを探索した。その結果、第一共振器(以後、C1)で13個、第二共振器(以後、C2)で9個のモードの発振が観測され、120~220 GHzの周波数帯を占める割合(以後、周波数包含率)は27%であった [1]。

本研究では、共振器を三段化することで発振可能な周波数領域の拡大を図った。三段共振器の形状と共振器内の磁場強度分布を図に示す。C1 または C2 で電磁波が発振する磁場領域では、電子ビームのエネルギーがC1・C2内で奪われ第三共振器(以後、C3)で発振しない可能性がある。そのため、C1とC2には発振がない磁場で、多くのモードが発振するようにC3の径と長さを設計した。超伝導マグネットが生成する磁場の中心を、C2とC3の境界に設定し、4~8 Tにおいて発振するモードを観測した。その結果、C1で11個、C2で8個、C3で9個のモードが観測された。また周波数包含率は、C3の3.13%が新たに追加された。

[1] Y. Yamaguchi *et al.* IEEE Electron Dev. Lett. 41 (2020) 1241

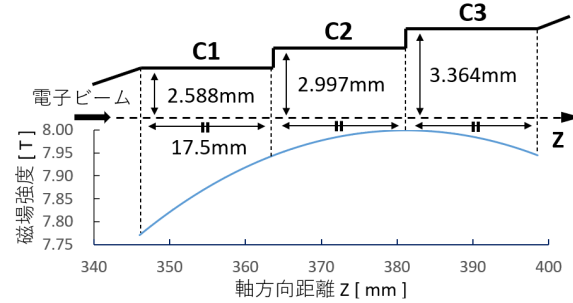


図 三段共振器の構造、軸上の磁場分布

B-a8

高周波ジャイロトロンにおける電子ビーム電流と発振出力の同時 PID 制御

川村詩織、山口裕資、渡邊将翔、福成雅史、立松芳典
福井大学 遠赤外領域開発研究センター

Simultaneous PID Control of Electron Beam Current and Output Power in a High-Frequency Gyrotron

S. Kawamura, Y. Yamaguchi, M. Watanabe, M. Fukunari and Y. Tatematsu
Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

高周波ジャイロトロンの応用 [1, 2] において、出力の高精度制御が求められている。これまで、熱カソードのヒータ操作による電子ビーム電流の PID 制御 [3]、またアノード電圧の操作による発振信号の PID 制御 [4] を、それぞれ実現してきた。しかし、前者のみでは出力の高速制御は困難であり、また後者のみでは電子ビーム電流を不安定化させる問題がある。そのため本研究では、上記二つの制御を同時に行い、電子ビーム電流を一定に維持しつつ、発振信号を高速制御することを目的とした。

高速 A/D 変換器 (NI PXIe-6368) を導入し、上記二種の PID 制御を同時に実行する装置を構築した。図に、同装置を用いて制御した発振信号の時間変化の例を示す。発振周波数を 212 GHz (共振器磁場 = 7.73 T)、電子ビーム電圧を 15 kV に設定し、電流の初期値を 400 mA とした。発振信号の目標値を 60 秒毎に 0.5V ずつ下げると、10 秒程で目標値に安定化される。この時、電流も一定に制御しないと、電流は大きく変化し、発振信号も不安定となる事があった

(図 a、370 s 近傍)。一方、電流の安定化制御を追加すると、発振信号が不安定になる事は無かった (図 b)。以上、二種の制御の同時実行により、更に精密な制御を可能とした。

- [1] T. Kawasaki *et al.*, Biomedical Optics Express 11 (2020) 5341
- [2] S. Yamazaki *et al.*, Biomedical PLoS ONE 16 (2021) e0248381-1-15
- [3] 若林優次 他, 日本物理学会北陸支部定例学術講演会 A-a6 (2018)
- [4] 奥出一磨 他, 日本物理学会北陸支部定例学術講演会 B-a10 (2020)

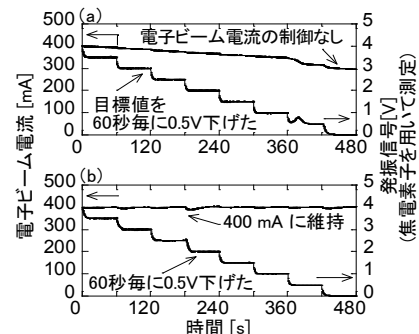


図: PID 制御による発振信号の調節

- (a) 電子ビーム電流を一定に制御しない場合
- (b) 電子ビーム電流を一定に制御した場合

B-a9

広帯域二次高調波周波数連続可変ジャイロトロンの実現に向けた 競合基本波における After-Cavity Interaction の解析

近藤要太, 福成雅史, 伊藤慎悟, 山口裕資, 立松芳典
福井大学 遠赤外領域開発研究センター

Analysis of after-cavity interaction in competing fundamental modes for realization of wideband continuously frequency-tunable second-harmonic gyrotron

Y. Kondo, M. Fukunari, S. Ito, Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu
Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

二次高調波発振による 400 GHz 帯の広帯域な周波数連続可変ジャイロトロンを開発を目指している。しかし二次高調波発振では、基本波の寄生発振が問題となる [1]。半径 3.045 mm、長さ 25 mm の空洞共振器の中心へ約 7 T の磁場を与え、TE_{6,6} モードの二次高調波発振を狙った実験では、低磁場側から二次高調波の発振領域まで連続的に続く、ある基本波の寄生発振が見られた(図 1)。この発振は文献 [2] に記される After-Cavity Interaction (ACI) の報告と類似しており、この寄生発振に起因すると考えられた。本研究では当該寄生発振が ACI の発生条件を満たすかどうかについて考察した。ACI では、共振器内のモード TE_{m,n} に対し径方向モード次数 n が 1 つ大きい TE_{m,n+1} が、共振器外で電子ビームと相互作用する。電子ビームとの相互作用長を持つ TE_{m,n+1} モードを探索した結果、共振器外で TE_{1,5} モードが電子ビームとの相互作用長を持つことが分かった。

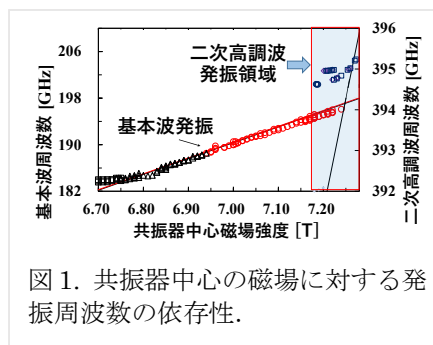


図 1. 共振器中心の磁場に対する発振周波数の依存性。

[1] G.S. Nusinovich *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci., **27**, 313-326 (1999)

[2] E. Khutoryan *et al.*, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, **42**, 684-700 (2021)

B-a10

高密度ポリエチレン (HDPE) 及び FeAlO_x 触媒分解に対する マイクロ波の影響

福井大遠赤セ 福井大工^A I.P. Abdi Karya, 仲川晃平, 浅野貴行^A, 光藤 誠太郎

The Effect of Microwave on Catalytic deconstruction of High Density Polyethylene (HDPE) and FeAlO_x

FIR-Center Univ. of Fukui; Fac. of Eng., Univ. of Fukui^A I.P. Abdi Karya, K. Nakagawa, T. Asano^A, S. Mitsudo

Every effort has been made to overcome the problem of plastic waste in the recent times and one of the efforts that have been made is to convert the plastic waste into more high-value products. Among the latest conversion technologies, Microwave-initiated catalytic deconstruction has been offered the way of dealing with this problem [1]. We have begun research in the hope that similar plastic waste catalytic decomposition will be more efficient in millimeter waves processing. First, in this research the effect of Microwave on pyrolysis of High-Density Polyethylene (HDPE) Plastic are investigated. Iron-based catalysts that used as microwave susceptors in this research are obtained by the sol-gel method using Iron (III) Nitrate Nonahydrate 99.9%, Aluminium Nitrate Nonahydrate 99.9% and Citric acid, anhydrous with a molar ratio of 1:1:1 respectively. The temperature caused by the effect of microwaves on catalyzed and uncatalyzed High-Density Polyethylene (HDPE) Plastic will be compared. The residual heating product will be observed using X-ray diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscope (SEM). The result of Microwave heating and Conventional heating will be compared.

B-a11

ミリ波焼結法による $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 多結晶体の高密度化

福井大遠赤セ, 福井大工^A 仲川晃平, I. P. Abdi karya, 浅野貴行^A, 光藤誠太郎

Densification of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ polycrystalline bulks by millimeter wave sintering method

FIR-Center, Univ. of Fukui; Sch. of Eng., Univ. of Fukui^A;

K. Nakagawa, I. P. Abdi Karya, T. Asano^A, S. Mitsudo

銅酸化物超伝導体の一種である $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ は、液体窒素温度(77 K)を超える超伝導転移温度 $T_c \sim 90$ K を示すことから実用化に向けた開発研究が進められており、薄膜や熔融凝固バルクなどの結晶配向制御がなされた材料においてはすでに実用化レベルを超えるほどの高い臨界電流密度 J_c が得られている。一方で、より容易に大型バルクや長尺線材を作製できる無配向多結晶体での応用は、銅酸化物超伝導体特有の粒間での弱結合問題により、全体での J_c が極めて低くなることからほとんどなされていない。弱結合問題の解決には、粒間結合性の改善に向けた高密度化や配向組織形成が必要である。

本研究では多結晶体の高密度化による粒間結合性の改善を目的に、28 GHz ジャイロトロンを用いた $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 多結晶焼結体のミリ波焼結を行う。電磁波加熱における特徴として、従来の電気炉による過熱と比較し、より低温短時間の緻密化が可能であることが知られているが、これまで $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ に対し行われた先行研究はほとんど存在していない。前駆体である $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 多結晶粉末は、固相反応法により合成し、プレス成型により $\phi 10$ mm の円盤状成型体を作製する。その後、ミリ波による焼結を試み、得られた焼結体の密度や超伝導特性を測定することで、焼結条件の検討を行う。さらに、マイクロ波(2.45 GHz)加熱、電気炉加熱においても同様の温度条件において焼結体を作製し、ミリ波焼結との比較検討を行う。結果の詳細については、当日発表する。

B-a12

二次高調波ジャイロトロン FU-CW-GVIB における発振モードの探索

野田安里, 山口裕資, 渡邊将翔, 川村詩織, 福成雅史, 立松芳典
福井大学 遠赤外領域開発研究センター

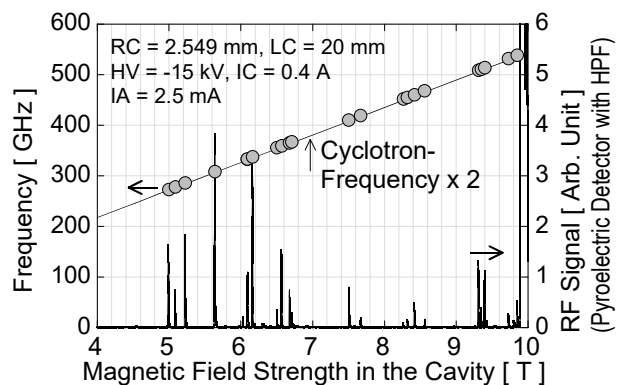
Search for Oscillation Modes in the Second Harmonic Gyrotron FU-CW-GVIB

A. Noda, Y. Yamaguchi, M. Watanabe, S. Kawamura, M. Fukunari and Y. Tatematsu

Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

ジャイロトロンを光源として、細胞等の生体関連試料へ電磁波を照射し、その影響を調べる研究が進んでいる [1, 2]。大きな温度上昇を伴わず非破壊の照射実験において、数ワットの出力を高確度で維持しつつ、周波数や放射分布を変更できる機能が要求されている。

本研究では、上記の照射実験に適用中のジャイロトロン (FU-CW-GVIB: 設計周波数 460 GHz, ガウスビーム放射の為のモード変換器を内蔵) に対し、発振周波数域の拡大の可能性を探った。発振実験において、電子ビームの電圧、電流を電源の上限近く (15 kV, 0.4 A) で一定に制御し、共振器内の磁場を可能な範囲 (4~10 T) で変えた。焦電素子で検出した発振信号、ならびにヘテロダイン法で測定した発振周波数を、右の図に示す。発振信号のピークが多数観測されており、各ピークに対して発振周波数を測定した結果、270~540 GHz の範囲で二次高調波発振する多くのモードを同定した。



図：発振周波数と発振信号の磁場依存性

[1] T. Kawasaki *et al.*, Biomed. Opt. Express **11** (2020) 5341

[2] S. Yamazaki *et al.*, PLoS ONE **16** (2021) e0248381

B-p1

光励起した厚膜シリコンの透過テラヘルツ電場波形の伝搬特性

福井大院工, 福井大遠赤セ^A, 神戸大院理^B, 佐藤 宏樹, 上遠野 修大, 小出 大士朗, 笹島 秀樹,
守安 毅, 谷 正彦^A, 北原 英明^A, 河本 敏郎^B, 熊倉 光孝

Propagation Property of Transmitted Terahertz Wave Form in Photoexcited Thick-Film Silicon

Grad. Sch. of Eng., Univ. of Fukui; FIR Univ. of Fukui^A; Grad. Sch. of Sci., Kobe Univ.^B

H. Sato, S. Katono, D. Koide, H. Sasajima, T. Moriyasu, M. Tani^A, H. Kitahara^A, T. Kohmoto^B, M. Kumakura

半導体におけるキャリアの密度や散乱時間などの情報がテラヘルツ波領域に多く含まれていることから、テラヘルツ波は、半導体の評価・測定に大変有用であり、多くの研究で利用されている。

半導体を光励起することで不純物をドーピングすること無く、照射光強度を変化させることによってキャリア密度を容易に変化することができる。光ポンプ・テラヘルツプローブ分光 (OPTP) システムを用いて光励起下におけるシリコンのキャリアダイナミクスの解明を目指している。

励起波長の侵入長より厚いバルクシリコンを対象に OPTP を行うと試料の厚さ方向に不均一なキャリア分布が生じるため、侵入長程度である厚さ $10 \pm 3 \mu\text{m}$ に削ったシリコン (厚膜シリコン) を対象に実験を行った。

観測された透過テラヘルツ電場波形を図に示す。光励起によって透過テラヘルツ電場波形の振幅とピーク時刻に変化が生じていることがわかる。講演では、光励起によって生じた振幅とピーク時刻の変化に着目してキャリアダイナミクスの議論を行う。

本研究は福井大学・遠赤外領域開発研究センターによる共同研究 (課題番号: R03FIRDG013B) として実施されたものである。

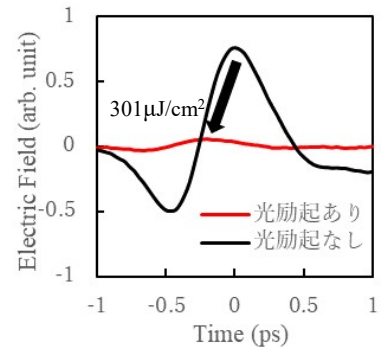


図: 厚さが侵入長程度のシリコンにおける透過テラヘルツ電場波形の光励起による変化。

B-p2

光学透明領域における薄膜の複素屈折率測定

福井大工, 東北工大工^A 堀場 将人, 新開 皓太, 福井 一俊, 山本 晃司, 齊藤 輝文^A

Measurement of complex refractive index of thin film in the region below the transparent region

Fac. of Eng., Univ. of Fukui, Fac. of Eng., Tohoku Inst. of Tech.^A, UVSOR, Inst. for Mol. Sci.^B

M. Horiba, K. Shinkai, K. Fukui, K. Yamamoto, T. Saito^A

我々は可視(VIS)から真空紫外(VUV)に至る広い光子エネルギー(PE)領域で複素屈折率を求めるため、シンクロトロン放射光に特化した分光エリプソメトリー (SE)測定法[1]を用いた装置を開発した。しかし、本測定法は測定原理上 PE 連続測定が困難という欠点がある。そこで、同一条件で光学反射(OR)スペクトルも測定可能にした複合型 VIS-VUV 複素屈折率測定装置(CVVCR)の開発を行っている[2]。CVVCRはPE連続測定が容易だが定量性に難があるOR測定と、PE連続測定に難があるが定量性に優れたSE測定の相互補完を特徴としている。つまり、定量性が担保されたORスペクトルに Kramers-Kronig 解析法や2角度法などを適用することで複素屈折率を連続スペクトルとして求めることができる。しかし、薄膜試料の場合、基礎吸収端以下の光学透明領域(TR)で光学干渉(図1)が生じるため上記の手法が適用できない。そこで、光学干渉があってもORスペクトルの定量性は担保されている点に着目し、干渉が見られるORスペクトルから直接薄膜試料の複素屈折率スペクトルを求める手法を研究しており、講演ではその解析手法と AlN 薄膜の TR での複素屈折率の結果を報告する。

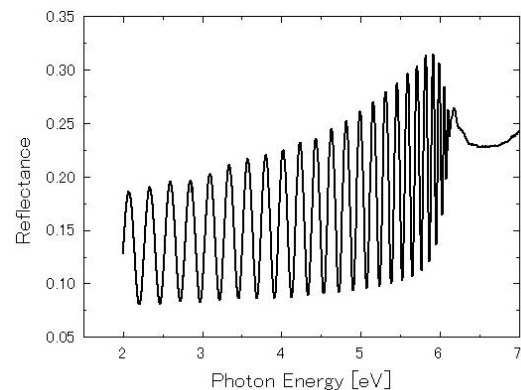


図1 AlN 薄膜の干渉スペクトル

[1] T. Saito, M. Yuri and H. Onuki, Rev. Sci. Instrum., **66**, 1570 (1995).

[2] 今井大介, 応用物理学会北陸・信越支部学術講演会予稿集 (2018) 34.

B-p3

ロッシェル塩における強誘電軸に垂直な電場の印加効果

富山大院理工 尾川 裕太郎, 喜久田 寿郎

Influence of an Electric Field Perpendicular to the Ferroelectric Axis on Dielectric Properties of Rochelle Salt

Graduate School of Sci and Eng., Toyama Univ. Y. Ogawa, T.Kikuta

硫酸三グリシンの強誘電軸に垂直な方向に電場を長時間印加し続けると、強誘電軸に現れる残留分極が次第に小さくなっていくことが報告されている[1]。相転移温度以上での熱処理により物性が元通りになることから、準静的な安定状態が実現したものであると考えられるが、もともと、反転可能な自発分極を持つという強誘電体の特徴は不安定なものであって、自発分極が抑えられた状態の方が本来の状態であるとする見方もある。いまだにそのメカニズムは解明されておらず、主に硫酸三グリシンを対象に研究が進められている。

ロッシェル塩は、世界で初めて発見された強誘電体で、2つの相転移温度の間の領域のみで強誘電性を示す特異な物質である。この物質も、強誘電軸に垂直な電場により、残留分極が次第に小さくなっていくことが分かっているが、詳しい系統的な測定は行われていない。本研究では、ロッシェル塩におけるこの現象を系統的に測定するため、温度、電場、結晶方位の観点から、残留分極の時間変化を測定している。右図は、293Kにおいて、ロッシェル塩の強誘電軸であるa軸に対し垂直な方向であるc軸に印加する垂直電場 E_{\perp} の大きさを変えた際の、規格化した残留分極 $Pr(t)/Pr(0)$ の時間変化を示している。垂直電場 E_{\perp} が大きくなるにつれて、残留分極 P_r の減少が速くなっていることが確認された。これに併せて、温度依存性、結晶方位依存性を報告する予定である。

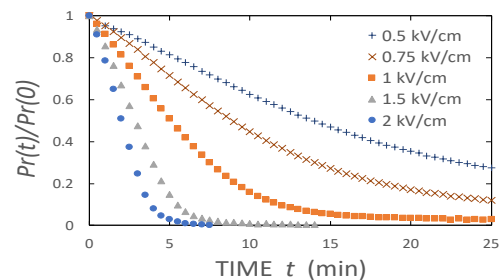


図 規格化した残留分極の時間変化

[1]T. Kikuta, H. Nishizuka, T. Yamazaki and N. Nakatani. *Ferroelectrics* 336, 91-100 (2006).

B-p4

硫酸三グリシンの強誘電軸に垂直な方向の電場の影響

富山大工 喜久田 寿郎

Effect of electric field in the direction perpendicular to the ferroelectric axis of triglycine sulfate

Faculty of Engineering, University of Toyama Toshio Kikuta

硫酸グリシン $((\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4, \text{TGS})$ 単結晶の強誘電相において強誘電軸 (b 軸) に垂直な方向へ直流電場 (横電場) を印加し続けると、 b 軸に現れる自発分極 P_s の大きさが徐々に減少していき、最終的に、 P_s は観測できなくなる。横電場の印加を途中で止めても温度を変えない限り減少した P_s の大きさは変わらず、温度降下で P_s の大きさは増加し上昇で減少する。相転移温度 T_c 以上での熱処理で元の P_s の大きさを取り戻す。減少速度は横電場の大きさに比例し、温度が高いほど速い。また、直流電場を b 軸に印加してもこのような現象は観測されず、 c 軸で最も速く、 a 軸のに比べて 100 倍ほど速い。

電気伝導率の方位や温度依存性と減少速度の特性が似ていることから、横電場で電極から試料内部に浸入した電荷が分極反転を妨げたと考えた。分極反転電流の測定からは、試料全体が徐々に分極反転できなくなっていくのではなく、分極反転できない領域 (体積) が次第に広がっていくモデルと一致した。X線回折強度の測定から分極反転できない領域は、正負の方向をそれぞれ向いた双極子が半数ずつ存在する領域であることが示唆された。強誘電相では双極子が統計的に同じ向きに配向するのに対し、横電場の印加で統計的に反平行に配向するよう変化していくようである。強誘電分域は、初め c 軸に垂直な分域壁を持つ形状の分域であったものが、横電場の印加方向に依存せず印加後には a 軸に垂直な分域壁を持つ細かなストライプ状の分域へと変わる。横電場の影響で分域壁の生成エネルギーが減り、分域表面電荷の静電エネルギーを下げるために小さなドメインが多数発生したものと考えられる。横電場の印加後に温度を下げてから昇温で比熱を測定すると、横電場を印加した温度より上での相転移に伴う異常比熱分だけ、横電場を印加しない試料に比べて小さくなっている。横電場の印加で双極子の自由度が失われたと思われる。

発表では、これまでにわかったことをまとめ、横電場の印加により P_s の大きさが徐々に減少するメカニズムを検討する。

B-p5

波長可変 SHG 分光法による Au/TiO₂ 触媒界面の電子状態の研究

北陸先端大マテ 坂手 俊介, Liu Xiaopeng, Peiyang Gong, Md Ehasanul Haque, 水谷五郎

Study of the interface electronic states of the Au/TiO₂ by wavelength tunable SHG spectroscopy

School of Materials Science, JAIST S. Sakate, X. Liu, P. Gong, M. E. Haque, and G. Mizutani

金属酸化物に担持された金(Au)が様々な触媒作用を持つことが知られている。特に酸化チタン(TiO₂)に担持された Au/TiO₂ は低温でも一酸化炭素(CO)酸化反応の触媒作用を持つことで注目されているが、その触媒活性の機構は明らかとなっていない。触媒活性の起源として TiO₂ 表面に存在する低配位の Ti 原子に Au が吸着することから提案されている。本研究では反転対称性の破れに敏感な波長可変光第二高調波発生(SHG)分光法を用いることで、Au/TiO₂ 界面の電子状態を観測し、触媒活性の起源を明らかにすることを目的とする。

傾斜方向が 90°異なる微傾斜面 TiO₂(110)単結晶を大気中でアニールし、Au 薄膜 2nm を真空蒸着することで 2 種類の Au/TiO₂(320)と Au/TiO₂(15 15 4)を作製した。これらの表面処理を行った 2 種類の試料を用いることによって低配位の Ti 原子をステップに集約することができ、ステップの傾斜方向の依存性を調べることができる。SHG は周波数 ω のレーザー光を反転対称性が破れている媒質に入射したときに、2 倍の周波数 2ω の光が発生する現象である。Au/TiO₂ 界面では反転対称性が破れているため、波長可変レーザーを用いて入射光の光子エネルギーを変化させ、発生した SHG 光の光強度を検出することによって界面の電子状態を調べることができる。また、図 1 に示すようにステップに沿ってレーザー光を入射させ偏光を制御することで、テラスまたはステップの SHG 光への寄与をそれぞれ取り出すことができる。

本発表では上記の方法を用いて 2 種類の Au/TiO₂ 界面の電子状態を調べ、ステップの傾斜方向への依存性を報告する。

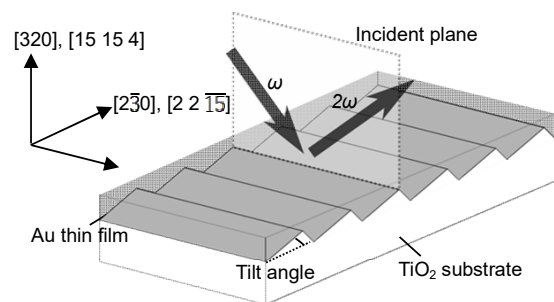


図 1 Au/TiO₂ と入射光の配置