

300 GHz

ジャイロトロンを用いた材料処理装置の開発

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2010-11-12 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 佐古, 勝英, 谷, 晋仁, 橋本, 秀一, 尾関, 隆則, 光藤, 誠太郎, 立松, 芳典, 斉藤, 輝雄, 出原, 敏孝, SAKO, Katsuhide, TANI, Shinji, HASHIMOTO, Syuiti, OZEKI, Takanori, MITSUDO, Seitaro, TATEMATSU, Yoshinori, SAITO, Teruo, IDEHARA, Toshitaka メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/2740

300 GHz ジャイロトロンを用いた材料処理装置の開発

Development of the material processing system

by using the 300 Gyrotron FU CW I

佐古 勝英, 谷 晋仁, 橋本 秀一, 尾関 隆則, 光藤 誠太郎, 立松 芳
典, 斉藤 輝雄, 出原 敏孝

Katsuhide Sako, Shinji Tani, Syuiti Hashimoto, Takanori Ozeki, Seitaro Mitsudo,

Yoshinori Tatematsu, Teruo Saito, Toshitaka Idehara

福井大学遠赤外領域開発研究センター

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

Fukui 910-8507, Japan

Abstract

The effective characteristics of high frequency and strong electric field processing were observed. One of the interesting effects is the so-called non-thermal effect or microwave effect. In order to widely study the non-thermal effect of ceramics sintering and application of material processing, we developed a material processing system by using the 300 GHz gyrotron FU CW I. This system consists of a 300GHz, 2.3 kW, CW gyrotron with a cryogen free 12 T superconducting magnet, a corrugated circular waveguide and an applicator. In submillimeter wave region, the distribution of the electromagnetic wave shows inhomogeneity inside a simple applicator. In order to improve distribution, polygonal reflector was developed and installed into an applicator. By using a polygonal reflector, homogeneity of the electromagnetic wave inside the applicator was improved by three times. In addition, in order to study the non-thermal effect, it is important to study the dependency of the electromagnetic field intensity. In order to control the electromagnetic field intensity independent of the sample temperature, pulsed operation system was developed. A semiconductor switch, by using the power MOSFET, was inserted between a cw power supply and a gyrotron. As a result, variable pulsed operation of a gyrotron was obtained.

1. はじめに

マイクロ波あるいはミリ波帯の電磁波を利用したセラミックス焼結の研究は 1970 年代からアメリカを中心に始められ、1980 年代に入ってから著しい発展を遂げた。それ以来、マイクロ波を用いたセラミックス焼結は、従来の抵抗炉等のように外部加熱による焼結法と比較し、大きな利点があることから画期的な技術として注目されるようになった。主な利点として、1)急速・内部加熱が可能、2)選択加熱が可能、3)低温で、かつ短時間で緻密な焼結が可能であるという利点が挙げられる。特に3)については非熱的效果とされ、現在でもその効果についての解明のための研究がなされている。このような利点を見出す研究などについてはこれまで、1960 年代に開発されたマグネトロンが使用されていた。用いられる電磁波の周波数は 2.45 GHz であり、工業的利用を目的として割り当てられた周波数である。しかし、2.45 GHz を照射した低誘電損率の物質や大型の試料などの焼結は、電界の不均一によるサーマルランナウエーの問題を解決するのが難しく、上記のような利点がありながらも格段の進展は望めない状態であった。その問題を打開したのが、核融合の加熱装置として研究されていた Gyrotron である。Gyrotron はマイクロ波よりも高周波数領域であるミリ波において高出力の発振を行うことのできる発振管である。Gyrotron から発振される高出力ミリ波を利用することによって、上で述べた問題を解決することが出来るようになり、一部の研究機関から画期的な結果が報告されるようになった。¹⁾ さらに最近では、焼結専用のコンパクトな中出力 Gyrotron が開発され始め、本研究室でも 1970 年代後半から Gyrotron の開発・応用に関する研究をしてきた経緯から、応用研究を目的として 2000 年に IAP(Institute of Applied Physics) で新たに開発された 24 GHz Gyrotron Ceramics Sintering System(24 GHz GCSS)を購入し、研究を始めた。我々は今までこの焼結装置を用いて主に炭化硼素の焼結を研究してきた。成果として、鋳込み成形法を用いたミリ波焼結により焼結助剤無添加、無加圧状態で相対密度 90%以上の炭化硼素焼結体を得ることに成功している。また、最近 28 GHz Gyrotron, 24 GHz gyro-BWO を用いた Gyrotron-gyroBWO Heating System(28 GHz GHS)を導入した。他にも周波数に依存する電磁波焼結の特殊効果研究や、さらなる高周波化による新しい応用研究を行うために 300 GHz Gyrotron Material Processing System(300 GHz MPS)の開発も行っている。[1]

加熱に使用する周波数の増加とともに、浸透深さの減少や集光スポットの縮小が可能となってきた。浸透深さの減少を効果的に用いた表面処理や小スポットの高いエネルギー密度を利用した、工業的利用が検討されている。ただし電磁波特有の効果を最大限に利用した電磁波加熱を行う場合、通常の加熱と同じような、全体的な温度の上昇が好ましくない場合がある。つまり、試料に高周波の電磁波を作用させながらも全体の温度を抑えることが期待される。また、セラミックスの電磁波焼結における緻密化の出力依存性を調べることで、緻密化に対する電界の効果を解明することが期待される。ジャイロトロンをパルス発振させデューティ比を変化することにより、加える電界強度を変え

ずに温度を制御できるようにすることはこれらの開発・研究に重要であると考えられる。そこで、フレキシブルな加熱処理を実現するために電源に対して改造を行いパルス照射による熱処理を可能にする開発を行った。

2. 装置

図1に示す300 GHz材料処理装置は、独自に開発した300 GHz ジャイロトロン、導波管、アプリケーションからなっている。ジャイロトロンは材料加熱に対して十分である2.3 kW の出力が連続的に発振可能であり、また動作電圧15 kV、電流1.1 A とジャイロトロンとしては非常に低い電圧・電流で動作するため扱い易く各種電源を合わせても非常にコンパクトに収めることができる。導波管の内壁は出力される電磁波に最適化されたコルゲート構造になっており、伝送による損失を最小限に抑えると同時にアプリケーションからの反射を減衰する単向管の役目を担っている。アプリケーションはミラーを用い集光しての加熱とマルチモードの電界により均一な体積加熱の両方の加熱が行えるように開発されている。

次に、図2にジャイロトロンのパルス化を行った回路を示す。ジャイロトロンシステムはおもに電子を加速する高電圧のカソード定電圧電源、熱カソードを加熱制御するヒーター電源、ジャイロトロンで構成されている。定電圧電源はジャイロトロンのカソードに接続されており電子ビームに必要なエネルギーを供給している。ジャイロトロンをパルス運転するためにはこのカソードと低電圧電源の間をスイッチングできるようにする必要がある。そこで、ドイツのBEHLKE社から高圧半導体スイッチを購入し、該当する部分(破線の枠内)へと追加した。

表1に仕様を載せる。動作は基本的に電界効果トランジスタと同じであり、ゲートに閾値よりも高い電圧を掛けてやることで、キャリアがソースドレイン間に集まり導通するようになる(ONになる)。

表1 半導体スイッチ
HTS-221-03 (BEHLKE)

	仕様	要求する値
電圧	22 kV	17 kV
連続電流	2.5 A	1.1 A
ピーク電流	36 A	1.1 A
繰り返し	5 kHz	1 kHz
パルス幅	200 ns ~ ∞	1 ms ~ ∞
内部抵抗	55 Ω	—
許容損失	360 W	100 W

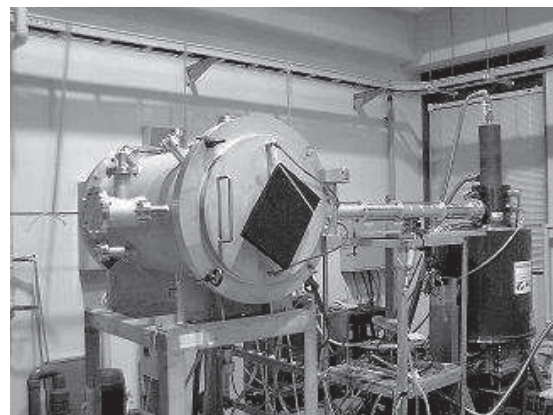


図1

300 GHz ジャイロトロン材料処理装置

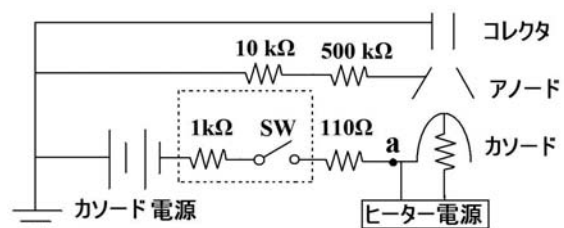


図2 ジャイロトロン電源系回路図

3. 実験結果

組み込んだスイッチのゲート電圧をトリガージェネレータにより制御した。様々なパラメータでパルス運転し、そのときのカソード電圧を測定した。カソード電圧として測定した点は図2の a 点における電圧である。図3, 4, 5 に実験の結果を示す。

図3はパルス幅を変化させた時のカソード電圧の様子である。電源電圧 15 kV, トリガーは繰り返し周波数 4 Hz に固定し、デューティ比を操作することでパルス幅を変化させた。上から順にパルス幅 50 ms, 100 ms, 200 ms のときの波形となっている。

この図からトリガーによってパルス幅が制御出来ていることがわかる。また、コンデンサの放電に見られるような、パルス幅を長くしていったときに徐々に電圧が下がるといった様子も見られず、電圧が非常に安定していることが分かった。これにより、パルス発振を用いての加熱時間を任意に設定できるようになった。

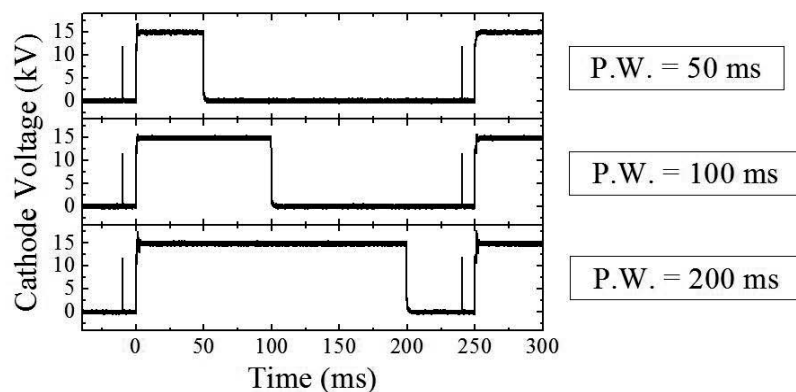


図3 パルス幅を変化させた時の様子

図4はパルス周期を変化させた時のカソード電圧である。電源電圧 15 kV, トリガーはパルス幅を固定し、繰り返し周波数を操作することでパルスの周期を変化させた。上から順にパルス周期が 50 ms, 100 ms, 250 ms のときの波形となっている。

この図からトリガーによってパルス周期が制御出来ていることがわかる。これにより、パルス発振を用いるときの冷却または熱拡散の時間を任意に設定できるようになった。

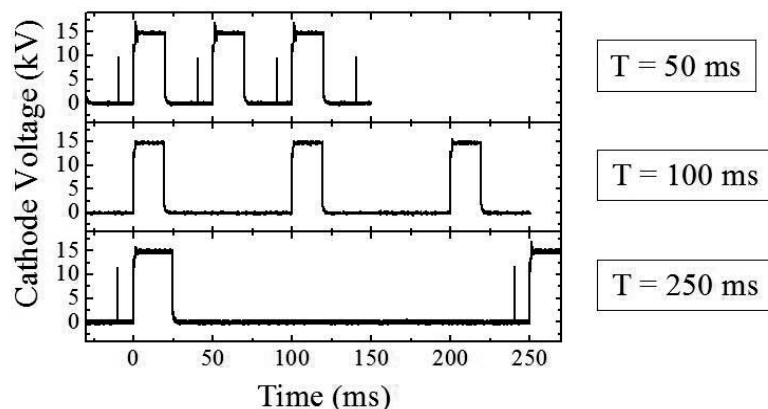


図4 パルス周期の可変性

図5はパルス発振のデューティ比を変化させた時の平均出力である。電源電圧 15 kV, トリガーは繰り返し周波数を 20 Hz に固定し, デューティ比を操作した。平均出力の測定には水負荷を用いた。カソード電流 I_c を固定し, 各デューティ比毎に出力測定を行った。図内の■, ●, ▲はそれぞれカソード電流 300 mA, 400 mA, 500 mA に対応している。また, 図内の直線は連続発振(=デューティ比 100 %)時に得られた出力から予測される各デューティ比での平均出力である。各デューティ比で得られた出力は連続動作時の出力から予想された線によく一致していることがわかる。これにより, 瞬間の出力を変化することなく, デューティ比を変化させることで平均出力を制御できるようになった。

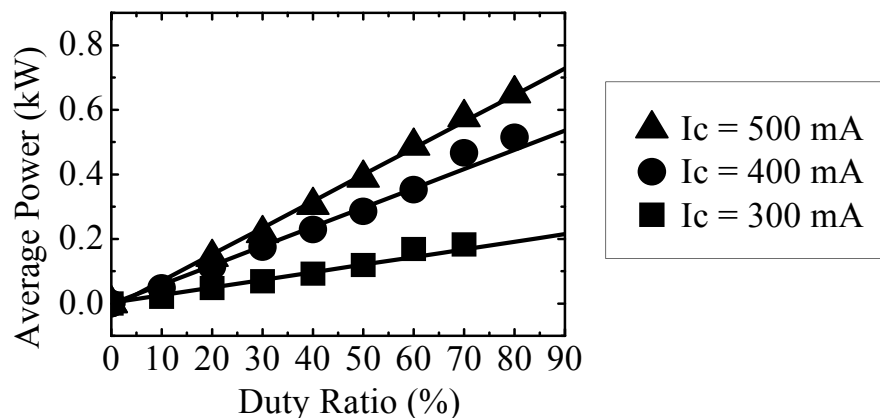


図5 デューティ比変化による平均出力の制御

4. まとめ

デューティ比を変化させることでサンプルの温度を制御できるようにするため, ジャイロトロン電源に半導体スイッチを組み込んだ。実際の加熱時間となるパルスのオン時間やサンプルの冷却・熱拡散時間となるオフ時間を変化させてみたところ, カソード電圧の波形に乱れは無く, 正常に発振していることを確認した。

また, 実際にジャイロトロンから発振される平均出力を測定したところ, 連続動作時の出力から予想される出力をよく再現していた。これより, デューティ比を変化させることで平均出力を制御できることを確認した。

参考文献

- 1) M. A. Janney, C. L. Calhoun and D. Kimrey, *J. am. Ceram. Soc.*, 75, 341-46 (1992)