サブ・ミリ波ジャイロトロン設計

田辺英彦, 森 竜也, 印牧知廣, 小川 勇, 立川敏明, 出原敏孝

(福井大学工学部)

佐 藤 信 之

(東北大学電気通信研究所)

(1989年10月31日受理/1989年12月22日改訂原稿受理)

Design of a Gyrotron Operating in the Submillimeter Wave Range

Hidehiko Tanabe, Tatsuya Mori,

Tomohiro Kanemaki, Isamu Ogawa, Toshiaki Tatsukawa,

Toshitaka Idehara and Nobuyuki Sato*

(Received October 31, 1989/Revised Manuscript Received December 22, 1989)

Abstract

This paper describes the design of a step tunable, cyclotron harmonic gyrotron operating in the submillimeter wave range (maximum frequency is about 600GHz), which is suitable for plasma diagnostics and far infrared spectroscopies. The numerical simulations are performed for several cavity modes. The dimension of cavity is optimized at the second harmonic operation of TE₂₆₁ mode, operating at an output power and a frequency of 1kW and 384GHz, respectively. The beam voltage $V_k=40\text{kV}$ and the beam current $I_b=0.6\text{A}$, so we can have fairly high efficiency of 4.1% for the second harmonic operation.

Keywords :

step tunable gyrotron, cyclotron harmonic operation, submillimeter wave range, plasma diagnostics, far infrared spectroscopy

1. はじめに

ジャイロトロンは、ミリ波からサブ・ミリ波帯における発振管として研究、開発が世界中で活発に行われている。ジャイロトロンは、サイクロトロン共鳴条件のもとで旋回運動する電子ビームと、高周波電磁界との相互作用を利用した発振管であり¹⁾、進行波管、その他の従来の電子管と比べて、とくにミリ波からサブ・ミリ波の領域で大電力電磁波を高効率で発生することができる。この特長を生かして、核融合プラズマの追

Faculty of Engineering, Fukui University, Fukui 910.

* Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai 980.

加熱の一方法である電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) のための電力源として、高出力のミリ波帯ジャイロトロンが開発が行われている²⁾。単管あたり数百 kW の出力が、30 % から 50 % の高効率で達成され、発振周波数も 140 GHz まで上がり、核融合プラズマの ECH のために用いられている。一方、プラズマ診断や遠赤外分光分析のために、高周波数の中出力ジャイロトロンが開発が進められている³⁻⁵⁾。サイクロトロン高調波で動作する最高周波数 302 GHz (波長 1.0 mm) までの近ミリ波ジャイロトロンの開発は、すでに行われている⁶⁻⁸⁾。現在、我々はサブ・ミリ波帯の全領域をカバーするために、サブ・ミリ波ジャイロトロンの研究開発を行っている。シドニー大学においても同様な研究が行われており、周波数 330 GHz が基本波動作で達成された⁹⁾。また、アメリカやソビエトでも、このような装置に関する活発な研究がなされた。短パルス動作によるサブ・ミリ波領域の発振や¹⁰⁻¹¹⁾、多重共振器による三次高調波動作での発振¹²⁾、そして単一の高次モードで高出力動作する発振周波数が可変なジャイロトロン¹³⁾などが行われた。特に、高周波数のサブ・ミリ波ジャイロトロンの開発には高調波動作の利用が必要である。これにより、磁場系の節約ができるという大きな利点がある。我々は、長パルスの高調波動作で、安定に動作する周波数可変の中出力ジャイロトロンを開発を目指している。ここでは、このサブ・ミリ波ジャイロトロン¹⁴⁾の設計方針と、数値計算による動作特性の解析結果について述べる。

2. 設計方針と設計パラメータ

サブ・ミリ波領域を完全に覆い尽くし、安定に動作する発振器の開発は、まだほとんどなされていない。我々は、サブ・ミリ波によるプラズマ散乱計測や、遠赤外分光分析による物性研究などに用いる中出力光源として、サブ・ミリ波ジャイロトロンを開発を行っている。サブ・ミリ波帯の広い範囲をカバーするジャイロトロン¹⁵⁾の設計を行い、この設計に基づいて試作を行う。

設計の方針として、現有の主磁場コイル (最大強度 8 T)、高電圧パルス電源 (40 kV, 6 A, パルス幅: 1 msec) を用いて動作できるジャイロトロンを対象とする。強度 8 T に対応する電子のサイクロトロン周波数は 207.7 GHz である。よって、高調波動作を用いることによってサブ・ミリ波の発振が可能となる。我々の目標は、サイクロトロン基本波動作と、その高調波動作 ($f \approx 2fc$ と $f \approx 3fc$) を用いて約 600 GHz (波長 0.5 mm) まで、周波数可変で長パルスの安定な中出力の発振が可能なサブ・ミリ波帯ジャイロトロンを開発することである。また、二次高調波動作による発振の制御は三次高調波動作に比較して容易であるため、設計の時に最適化する動作モードとして、周波数 $f \approx 400$ GHz の二次高調波動作モードのひとつを選択する。このとき、安全のため、主磁場強度には余裕を持たせ 7.5 T 以下で動作するものを選ぶ。表 1 に、おおまかな設計パラメータを示す。

表 1. 設計パラメータ

発振周波数 f/f_c	400GHz 程度 2
主磁場強度	8T 以下
入力電圧	40kV 以下
入力電流	6A 以下
出力	1kW 程度

3. 解析方法

図1は、今回我々が設計したサブ・ミリ波帯ジャイロトロンの概略図である。空洞共振器と電子銃の動作解析が、設計の中心となった。まず空洞共振器の設計では、決定した動作モードで二次高調波動作による発振が可能かどうかを検討するために、共振器内での電子ビームと高周波電磁界との相互作用を数値計算によって解析した。ここでは、解析の都合上、共振器内には TE_{mnq} の単一モードだけが励起されており、定常状態に達していると仮定している。この解析では、モード競合に関する正確な計算結果を得ることは不可能である。そのためには競合するモードの時間的发展の解析が必要となる¹⁴⁾。しかし、我々が用いた単一モード解析法で、設計に必要な「純粋に単一モードで発振するための条件」を十分求めることができる。この解析法は、二段階からなる。すなわち、まず最初に共振器内に電子ビームが存在しない場合に境界条件を満足する高周波電磁界分布を計算する。この電磁界は減衰項を含むが、その減衰量は電子ビームから供給されるとして、高周波電磁界の平衡状態を考える。次に、この高周波電磁界と電子ビームとの相互作用を計算して電子ビームのエネルギー減衰率を求める。このように、この解析法では電界強度、すなわち出力を設定して、この出力を維持するのに必要な入力電流を求めるわけである。主磁場強度は共振器領域で一様であると仮定している。この共振器の解析から、効率の高い発振に必要な電子ビームに対する条件が得られる。しかし、これは電子ビームの分散性を無視したものである。そこで次に、このバラツキを最小にして、効率の高い電子ビームを射出できる電子銃の設計を、同様にシミュレーションによって行った。更に、このジャイロトロンで、三次高調波動作による約 600 GHz の発振が可能かどうか、シミュレーションによって調べた。三次高調波動作は、基本波動作や二次高調波動作に比べ、電子ビームの分散性や主磁場強度の非一様性に非常に強く影響される。よって、これらの事を考慮した共振器内の相互作用の解析を行った。

図1. サブ・ミリ波ジャイロトロンの装置概略図.

4. 解析結果

図2は、最終的に用いる事に決定した空洞共振器の形状を表している。左側が電子ビームの入射口で、右

から高周波電磁界が出力される．長さは14.5 mm，直径は4.85 mmである．

図3は，この共振器に対する， TE_{261} モード高周波電界の軸方向分布の計算結果である．横軸は空洞共振器の軸方向の位置を表しており，左右の縦軸はそれぞれ電界の相対強度と位相を表している．ここで，電界強度はその最大値を1に規格化してある．グラ

フ中の破線はキャピテイの形状を表している．共振器内には定在波ができており，相対強度が約1/20の高周波電波が放射されている．このときの負荷 Q と共振周波数はそれぞれ，12300，384 GHzである．出力の設定値は比較的小出力（1 kW）であるが，共振器の Q 値が高いため，共振器内の高周波電界は強く，電子ビームとの相互作用が大きくなる．

表2に， TE_{261} モードの周波数と共に，この共振器の他の多くの共振モードと周波数が示されている．電子銃は， TE_{261} モードが効率よく発振するように設計されている．そのため，これらの共振モードのなかには発振効率の悪いものや，全く発振しないものがある．更に，高調波動作では低次モードとのモード競合により発振を妨げられるモードもある．しかし，それでも発振することが可能な多くの共振モードがある．この特性を生かして，発振周波数をほぼ連続的に変化させることができる．

図4は， TE_{261} モードや他の高調波動作のモード競合を調べるために行った解析結果を表している．横軸は主磁場強度で，縦軸は入力電流を表しており，各モードに対する出力1.0 kWを維持するのに必要な入力電流の主磁場強度依存性を示している．この解析では，発振は TE の単一モードであると仮定している．図中の N は高調波次数を表しており， TE_{261} ， TE_{061} ， TE_{551} は二次高調波動作（ $N=2$ ）で， TE_{291} ， TE_{091} ， $TE_{110,1}$ は三次高調波動作（ $N=3$ ），他は基本波動作（ $N=1$ ）である．基本波動作での共振周波数は約200 GHzであり，二次，三次高調波動作での周波数は，それぞれ約400 GHzと600 GHzである．電子ビームは TE_{261} モードの効率が極大となる位置（ $R_{inj} = 1.25$ mm）に設定してある．しかし， TE_{811} 以外のモードは，この電子ビームの設定で，同様に効率がほぼ極大となる． TE_{811} モードは，WHISPERING GALLERY MODEであり，電界強度分布が共振器の管壁周辺に集中しているため，この電子ビームの設定

図2．空洞共振器の形状寸法．

図3．共振器内高周波電磁界の強度と位相の軸方向分布．

では効率が低くなっている。この図から、

TE_{811} モード以外の他の基本波動作のモードは、入力電流が高調波動作に比べて小さく、容易に発振することがわかる。しかし、主磁場強度の制御により TE_{261} モードのみが発振するような主磁場強度を設定すれば、モード競合を避けて発振させることができる。しかし、このような条件でもビーム電流が大きくなると基本波の共鳴モードが励起されて、高調波の発振に影響を与えると考えられる。二次高調波動作の TE_{551} も同様にモード競合を起こさずに発振させることができる。一方、主磁場コイルの最大磁場強度は 8 T であるから、安全に動作させるため、約 7.3 T の磁場強度で発振する二次高調波の TE_{261} モードを動作モードとして選択した。そこで次に、 TE_{261} モードに関する解析結果を述べる。

図 5 は、出力が 1 kW のときの TE_{261} モードの発振効率と、入力電流の主磁場依存性を表している。横軸は磁場を表し、左右の縦軸はそれぞれ、実効率と入力電流を表している。ここで磁場の値は、二次高調波動作でサイクロtron共鳴を起こす磁場強度：7.39 T からのずれを表している。最大実効率は 4 % で、出力 1 kW を維持するために必要なビーム電流は 0.6 A である。これは現有電源設備の範囲内であるから、この発振を得ることは可能である。

図 6 は、図 5 で最も効率の高いときの、電子ビームのエネルギー変化を表したものである。横軸は、共振器の軸方向の位置を表し、縦軸は電子のエネルギーを表している。ここで、エネルギーの値は共振器入口での値を 1 として規格化してある。20 本の実線は、同一の旋回中心を持つ、高周波電磁界に対して位相の異なる

表 2. 図 2 の共振器の共鳴モード (TE_{mnq}) と周波数

No.	m	n	f(GHz)	No.	m	n	f(GHz)	No.	m	n	f(GHz)
1	1	1	37.6	51	12	2	368.9	101	5	7	531.5
2	2	1	60.9	52	9	3	374.0	102	10	5	534.9
3	0	1	76.0	53	17	1	376.0	103	3	8	537.4
4	3	1	83.3	54	4	5	377.8	104	16	3	538.1
5	4	1	105.1	55	2	6	384.0	105	25	1	538.9
6	1	2	105.4	56	0	6	386.0	106	1	9	540.3
7	5	1	126.6	57	13	2	391.3	107	13	4	540.6
8	2	2	132.3	58	7	4	392.5	108	20	2	545.3
9	0	2	138.4	59	18	1	396.4	109	8	6	548.8
10	6	1	147.9	60	10	3	398.0	110	6	7	559.0
11	3	2	158.0	61	5	5	404.9	111	26	1	559.2
12	1	3	168.2	62	3	6	412.7	112	11	5	560.0
13	7	1	169.0	63	14	2	413.6	113	17	3	561.0
14	4	2	182.9	64	1	7	416.5	114	14	4	564.6
15	8	1	190.1	65	19	1	416.9	115	4	8	566.1
16	2	3	196.4	66	8	4	417.8	116	21	2	567.0
17	0	3	200.4	67	11	3	421.7	117	2	9	570.2
18	5	2	207.2	68	6	5	431.6	118	0	9	571.6
19	9	1	211.0	69	15	2	435.7	119	9	6	574.9
20	3	3	223.4	70	20	1	437.2	120	27	1	579.5
21	1	4	230.5	71	4	6	440.8	121	18	3	583.8
22	6	2	231.1	72	9	4	442.8	122	12	5	585.0
23	10	1	231.8	73	12	3	445.3	123	7	7	586.2
24	4	3	249.7	74	2	7	446.1	124	15	4	588.5
25	11	1	252.5	75	0	7	447.9	125	22	2	588.7
26	7	2	254.6	76	21	1	457.6	126	5	8	594.3
27	2	4	259.3	77	16	2	457.8	127	3	9	599.6
28	0	4	262.3	78	7	5	457.9	128	28	1	599.7
29	12	1	273.2	79	10	4	467.6	129	10	6	600.8
30	5	3	275.4	80	5	6	468.4	130	1	10	602.2
31	8	2	277.9	81	13	3	468.7	131	19	3	606.5
32	3	4	287.1	82	3	7	475.1	132	13	5	609.7
33	1	5	292.6	83	22	1	478.0	133	23	2	610.3
34	13	1	293.9	84	1	8	478.4	134	16	4	612.2
35	6	3	300.5	85	17	2	479.8	135	8	7	613.0
36	9	2	300.9	86	8	5	483.8	136	29	1	619.9
37	4	4	314.2	87	14	3	492.0	137	6	8	622.1
38	14	1	314.4	88	11	4	492.1	138	11	6	626.5
39	2	5	321.8	89	6	6	495.6	139	4	9	628.4
40	10	2	323.7	90	23	1	498.3	140	20	3	629.1
41	0	2	324.2	91	18	2	501.7	141	24	2	631.8
42	7	3	325.3	92	4	7	503.6	142	2	10	632.2
43	15	1	335.0	93	2	8	508.2	143	0	10	633.4
44	5	4	340.7	94	9	5	509.5	etc	...		
45	11	2	346.4	95	0	8	509.7				
46	8	3	349.8	96	15	3	515.1				
47	3	5	350.1	97	12	4	516.5				
48	1	6	354.6	98	24	1	518.6				
49	16	1	355.5	99	7	6	522.3				
50	6	4	366.8	100	19	2	523.5

図4. 各共鳴モードに対する、実出力1kWを維持するために必要な入力電流 I_b の主磁場強度依存性。

図5. TE_{261} モード ($f \sim 2f_c$) に対する、実出力1kWを維持するのに必要な入力電流 I_b と実効率 η の磁場 DB 依存性。

図6. 図5で最も効率の高い時の、共振器内での電子ビームのエネルギー変化。

る20個のサンプル電子のエネルギー変化を表している。破線はこれらの平均を表している。この解析はフィールド・フィクス方式であるため、この電子のエネルギー減衰量が高周波電磁界のエネルギーに転換されると考え、設定した出力を維持するために必要な入力電流を求めている。電子ビームのエネルギーは全体として見ると、共振器を出るまで減衰され続けて行き、高周波電磁界のエネルギーに効率よく変換されていく様子がわかる。

図7は、電子ビームの打ち込み位置に対する効率と入力電流の依存性を表したものである。左右の縦軸はそれぞれ、効率と出力1kWを維持するために必要な入力電流を表し、横軸は電子ビームの打ち込み位置を

図7. TE₂₆₁モード ($f \sim 2f_c$) に対する、実出力1kWを維持するのに必要な入力電流 I_b と実効率 η のビーム打ち込み位置 R_{inj} に関する依存性。

表している。この電子ビームの打ち込み位置とは、空洞共振器の中心軸から電子ビームの旋回中心までの距離のことである。効率が極大となる位置は、それぞれ電界 E_0 の第二零点、第三零点にはほぼ一致している。二

次高調波動作による発振では、電界強度の変曲点に打ち込むと一般に効率が高くなる。電子銃の構造上、エミティング・エリアの電子発射位置により、電子ビームの打ち込み位置にはバラツキが生じるが、この図からわかるように1.2 mmから1.35 mmの間では効率が比較的高く、入力電流が小さくて済むので打ち込み位置のバラツキがこの範囲内に納まれば、その影響は考えなくてもよい。ビーム電流の最大値は3 Aを目標とした。電子ビームのバラツキが小さい大きな電流値を取るには中空電子ビームの半径を大きくするとよいが、上記の範囲ならば質の良い十分に大きな電流を得ることが可能であろう。このように電子銃の性能に対して条件が課せられる。

そのため数値計算によって、先の条件を満たす電子ビームを供給することのできる電子銃の設計を行った。図8は、電子銃に関する解析結果の一例であり、 TE_{261} モードで効率よく発振するために必要な電子ビーム

図8. TE_{261} モード ($f \sim 2f_c$) の発振に最適化した電子銃の計算結果。

を射出している。横軸はジャイロトロンの軸方向の位置で、縦軸は半径方向の位置を表している。破線はポディから5 kV間隔の等電位線を表し、カソード、アノード、ボディの電圧設定がそれぞれ、40 kV、10.5 kV、0 kVのとき、このような電位分布ができる。主磁場強度は7.31 Tで、ミラー比は25である。エミティング・エリア上から等間隔に出ている10本の線は、10個のサンプル電子の軌道である。これらが波うっているのは、コイルが作る静磁場によって螺旋運動していることを示している。電子ビームの軌道曲線から、ラミナー流であることがわかる。このとき、電子ビームの速度比 α と打ち込み位置の平均値は、それぞれ1.56、1.5 mmであり、打ち込み位置のバラツキは、0.135 mmである。また、ビーム電流は最大3 Aまで取ることができる。

以上の TE_{261} モードに関する解析結果をまとめたのが、表3である。これが試作管の最終的な設計パラメータである。このジャイロトロンは TE_{261} モード(二次高調波動作)に最適化してあるが、前述のように、 TE_{261} モード以外にも多くの発振モードが存在する。

図4には、主磁場強度が7~8 Tの間で、主な共振モードの発振特性が示されている。 TE_{261} モード以外にも TE_{551} モードが二次高調波動作により周波数405 GHzの発振が可能である。このときの主磁場強度は

7.72 Tであり、主磁場強度の限界に近い。一方、三次高調波動作の TE_{291} や $TE_{1,10,1}$ の発振特性を調べるには、この解析では不十分である。それは、この解析では主磁場強度は共振器領域で一様であると仮定し、電子ビームのパラメータもバラツキを無視した設定値であるためである。しかし、図4からわかるように、これらの高調波では、モード競合を起こさずに発振させるには、主磁場強度の設定精度が非常に要求される。また、高調波動作になるほどモード・パターンが複雑で、電子ビームのバラツキによる影響が大きくなる

そこで、三次高調波に関して、更に実験条件にそった解析を行うために、磁場コイルの形状と配置や電子ビームのバラツキを考慮したシミュレーションを行った。ここでは、 $TE_{1,10,1}$ モードの発振に関する解析結果について説明する。

図9は、電子銃に関する解析結果のひとつで、 $TE_{1,10,1}$ ($f \approx 3fc$)の発振効率が最大となるとき

表3. 試作管の設計パラメータ(最終決定値)

実出力	1.0kW
動作モード	TE_{261} ($f \sim 2f_c$)
共振器の長さ	14.5mm
の直径	4.85mm
周波数	384GHz
主磁場	7.31T
ビーム電圧	40kV
速度比	1.56
速度分散	2.0%
ビーム電流	3.0A以下
ビーム中心位置	1.25mm
ビーム厚さ	0.295mm以下
旋回中心広がり	0.135mm以下
ラマ半径	0.08mm
電子効率	11%
実効率	4%

図9. $TE_{1,10,1}$ モード ($f \sim 3fc$)の発振で最も効率の高いときの電子ビームの軌道計算結果。

子ビームの軌道を示している。主磁場強度は7.70 Tで、ミラー比は80である。このときも電子ビームはラミナー流を形成している。ここでも、エミッティング・エリア上に等間隔に10個のサンプル電子を取っている。

図10は、このときの10個のサンプル電子の共振器の電子ビーム入射口における速度比 α と、旋回中心の位置(入射位置) R_{in} を示している。この図の横軸は、サンプル電子の番号を表している。この番号は、右上

図10. 図9の電子ビームの、共振器入射口における速度比 α と入射位置 R_{inj} のサンプル電子に対する依存性.

のカソードの概略図に示されているように、エミッティング・エリアの半径の大きい方から、順に1～10番としてある。左右の縦軸はそれぞれ、速度比と入射位置を表している。速度比 α の平均値は1.64、標準偏差は0.21であり12%と、比較的バラツキが大きい。しかし、このとき1番～5番の α 値の平均が1.8以上と大きいため、変換効率は全体的に見ると高くなる。

発振の主磁場、補助磁場依存性を調べるために、上述のような電子銃の解析から得られる電子ビームのパラメータを用いて共振器の動作解析を行った。

図11は、 $TE_{1,10,1}$ ($f \approx 3 \text{ fc}$) と他のモードとの競合を調べるために行った、発振の主磁場強度依存性

図11. $TE_{1,10,1}$ モードに対する、実出力200Wを維持するのに必要な入力電流 I_b の主磁場コイル電流依存性.

に関するグラフである。横軸は主磁場コイル電流を表し、縦軸は 200 W の出力を維持するのに必要な入力電流を表している。この主磁場コイルは共振器領域に、最大電流 300 A で約 8 T のほぼ一様な磁場を生じる。主磁場コイル電流が 282.8 A のとき、発振効率は最大 (0.31 %) となり、入力電流は最小 (1.61 A) となる。 $TE_{1,10,1}$ ($f \approx 3fc$) を TE_{031} ($f \approx fc$) や、 TE_{551} ($f \approx 2fc$) とモード競合を起こさずに発振させるためには、コイル電流を 282.6 ~ 283.0 A の 0.4 A の範囲内に設定しなければならない。主磁場コイル電流値の制御は、0.1 A まで可能であるため、 $TE_{1,10,1}$ をモード競合を起こさずに発振させることができる。このモードの周波数は 602 GHz (波長 0.50 mm) であり主磁場コイルの限界に近い。

図 12 は、 $TE_{1,10,1}$ ($f \approx 3fc$) の発振の補助磁場コイル電流依存性を示している。横軸は補助磁場コイ

図12. $TE_{1,10,1}$ モードに対する、実出力200Wを維持するのに必要な入力電流 I_b の補助磁場コイル電流依存性。

ル電流を表し、縦軸は出力 200 W を維持するのに必要な入力電流を表している。補助磁場コイル電流に対する発振の条件は、主磁場コイル電流に対する条件よりも緩く、制御がしやすい。

表 4 に、 TE_{261} モードと共に、解析で発振可能ことがわかった二次、三次高調波動作に関する解析結果を示す。二次高調波動作 ($f \approx 400$ GHz) では 1 kW、三次高調波動作 ($f \approx 600$ GHz) では 200 W の出力を得ることが可能である。

図13は、基本波動作、二次高調波動作、及び三次高調波動作に対する共鳴周波数と対応する主磁場強度の関係を示している。図中の丸印は共鳴モードを表している。これまでで説明したのは、装置の主磁場強度限界に近い 7 ~ 8 T の範囲である。しかし前述のように、7 T 以下にも多くの共鳴モードが存在する。従って、この装置を最高周波数 602 GHz の周波数可変な光源として応用することができる。

表4. 高調波動作 ($f \sim 2f_c, 3f_c$) による代表的な発振モードと特性

発振モード	TE ₂₆₁	TE ₅₅₁	TE ₂₉₁	TE _{1,10,1}
周波数	384.0GHz	404.9GHz	570.2GHz	602.2GHz
高調波字数: N	2	2	3	3
主磁場コイル 電流精度	267.3A~ 269.1A	283.2A~ 285.0A	267.0A~ 267.8A	282.6A~ 283.0A
競合しうる モード	TE ₂₃₁ (N=1) TE ₈₁₁ (N=1) TE ₀₆₁ (N=2)	TE ₅₂₁ (N=1) TE ₀₃₁ (N=1)	TE ₂₃₁ (N=1) TE ₈₁₁ (N=1) TE ₂₆₁ (N=2) TE ₀₉₁ (N=3)	TE ₅₂₁ (N=1) TE ₀₃₁ (N=1) TE ₅₅₁ (N=2)
出力	1kW	1kW	200W	200W
効率	4.1%	4.1%	0.42%	0.31%
ビーム電流	0.6A	0.6A	1.20A	1.61A

図13. 主磁場強度と共鳴周波数の関係 ($f \sim f_c, 2f_c, 3f_c$)

5. 結論及び今後の計画

以下に結論として解析の結果をまとめる。

まず第一に、TE₂₆₁ モードの二次高調波動作による発振に最適化したサブ・ミリ波ジャイロトロン設計を行った。この設計で、磁場系や電源系などの現有設備の範囲内で、モード競合のない周波数 384 GHz (波長 0.78 mm) の発振が得られる。

第二に、このジャイロトロンで他の二次、及び三次高調波動作によるサブ・ミリ波の発振が可能であるか否かを解析した。その結果、三次高調波動作によって、最高周波数 602 GHz の発振が得られることがわかつ

た。これによって、波長 0.50 mm までのサブ・ミリ波帯をカバーする波長可変の中出力光源として応用することができる。

今後の計画は、この設計に基づいて試作したジャイロトン管の動作実験を行ない、設計の良否を確かめるとともに、プラズマ散乱計測及びサブ・ミリ波分光の光源として応用することを検討する。

参 考 文 献

- 1) J.L. Hirshfield : 'Gyrotrons' in "Infrared and Millimeter Waves" (ed. K.J. Button, Academic Press, New York, 1979), Vol.1, pp.1-54.
- 2) K. Felch, C. Hess, H. Huey, E. Jongeward, H. Jory and R. Pendleton : 13th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Hawaii, USA (1988) 175.
- 3) Y. Terumichi, S. Kubo, A. Ando, Y. Yanagimoto, K. Ogura, H. Tanaka, J. Takahashi, I. Tonai, M. Nakamura, T. Maekawa, S. Tanaka and T. Idehara. : 9th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Takarazuka, Japan, Oct. 22-26, 1984 (Japan Society of Applied Physics, Tokyo, 1984), pp.411-412.
- 4) P. Woskoboinkow, D.R. Cohn, M. Gerver, W.J. Mulligan, R.S. Post, and R.J. Temkin : Rev. Sci. Instrum., **56** (1985) 914.
- 5) G.F. Brand, P.W. Fekete and K.J. Moore, 12th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Florida, USA, Dec. 14-18, 1987 (IEEE, New York, 1987), pp.356-357.
- 6) 安斎久浩, 佐藤信之, 横尾邦義, 小野昭一, 逸見和久, 出原敏孝 : 信学技報, **ED85-117** (1985) 23.
- 7) J.L. Byerly, B.G. Danly, K.E. Kreischer, R.J. Temkin, W.J. Mulligan and P. Woskoboinkow : Int. J. Electronics **57** (1985) 1033.
- 8) T. Idehara, T. Tatsukawa, S. Matsumoto, K. Kunieda, K. Hemmi and T. Kanemaki : Phys. Letts. **A132** (1988) 344.
- 9) G.F. Brand : 'Tunable Gyrotrons' in "Infrared and Millimeter Waves" (ed. K.J. Button, Academic Press, New York, 1985), Vol.14, pp 371-408.
- 10) S.A. Malygin : Radiotekh Elektron. **31** (1980) 334.
- 11) A.G. Luchinin, O.V. Malygin, G.S. Nusinovich and V.A. Flyagin : Sov. Phys. Tech. Phys. **28** (1983) 1001.
- 12) S.E. Spira, K.E. Kreischer and R.J. Temkin : 13th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Hawaii, USA (1988) 429.
- 13) K.E. Kreischer and R.J. Temkin : Phys. Rev. Lett. **59** (1987) 547.
- 14) D. Dialetis, K.R. Chu : 'Mode Competition and Stability Analysis of the Gyrotron Oscillator' in "Infrared and Millimeter Waves" (ed. K.J. Button, Academic Press, New York, 1983), Vol.7, pp 537-581.