

大強度短パルスマイクロ波ビームの発生と応用に向けた研究

栗原 智章, 安藤 利得*

Production of Ultra Short Pulse High Power Microwave and its Practical Application.

By

Tomoaki KURIHARA, Ritoku ANDO*

Abstract: A quasi-optical antenna system, called Vlasov antenna, is designed for launching the 5 GHz high power microwave from circler waveguide to free space. Several designs of the antenna are carried out by simple geometrical optics. It can be work but the efficiency can be improved by increasing the step-cut length. Optimum design is investigated experimentally.

Key words: Gaussian beam, Mode conversion, TM_{01} -mode, TEM_{00} -mode, Vlasov antenna, Quasi-optical antenna, High power microwave, Intense electromagnetic wave, Ultra short pulse, Superradiance.

1. まえがき

大出力マイクロ波 (High Power Microwave : HPM) は定常出力 (CW) とパルス出力 (Pulse) とに分けられる。定常発振器は、核融合炉や、高エネルギー粒子の加速器などの要請から高出力化が進められてきた。現在、出力はメガワット級に達している。これは自由空間での電力の輸送に有効である。また、ガスを電離する能力が高いためプラズマ生成する際に適している。一方でパルス発振の出力はギガワット級に達している。CW に比べて、最大瞬間出力は3桁ほど大きい。非常に短時間ではあるが電場強度が大きいため大気圧下でも放電が可能なほどである。また真空中で誘電体などの表面に当てると表面で放電が起こる [1]。このことからレーザーと比べて比較的大きな面積において緩やかなアブレーションを起すことができると我々は考えている。特にスペースへの応用では非化学推進剤のアブレーションなどに使える可能性がある。他には無い特徴を備えており、将来を見越して研究を行ってゆく必要がある。

一般にパルスの長所は瞬間電力が大きくなることができることであり、瞬間的に大きな高周波電場を生成できる。またパルスでは平均電力を下げることができ、電源の容量を減らし、熱の問題は回避できる利点もある。一方でパルス幅が短くなれば、放電の閾値が高くなる傾向がある [2]。超短パルス (Ultra short pulse) はレーダに使われるマイクロ波よりも大電力で、パルス幅が非常に短い。個性的なマイクロ波である。パルス幅が特に短い超短パルスを利用することによって、電子管内部や出力窓での放電や、伝送する導波路内で放電などを減らし、容易に大出力の電磁波を伝播させることができる。

現在のところ応用はあまり多くはない。国内でも超短パルス-HPM の研究はあまり行われていない。そこでこの論文では紹介も兼ねて、超短パルスの発生方法と伝播手法について述べる。特に発振管からの出力 (TM_{01} モード) を自由空間に放出して、平行光線に相当するガウスビーム (TEM_{00}) に変換した結果について詳しく述べる。

* Kanazawa University

2. マイクロ波源

〈2.1〉後進波発振管

実験には周波数が比較的低い S バンド帯 (5 GHz 付近) のマイクロ波を選んだ。手軽なサイズで構成されるので、パーツを自作し易いこと、また、測定装置などが比較的安価に手に入ることもある。超短パルスを得るには、後進波発振管 (Backward-Wave Oscillator : BWO) を用いた。BWO は導波管壁に凹凸を付け、遅波構造 (Slow Wave Structure : SWS) と呼ばれる構造を持つ。この SWS が電子ビームと共振し、電磁波を取り出す。SWS で発振した電磁波は、BWO ゆえにまず上流に伝播して、上流の直管が細いために入り口で反射する。そして再び SWS を通り、下流の円形導波管へと出てくる。原理上は、磁場は必要ないが電子ビームを軸方向に伝播させるために外部磁場を加える必要がある。この実験では、発振管には外部から約 1.1 T の軸方向の磁場がかけられている。

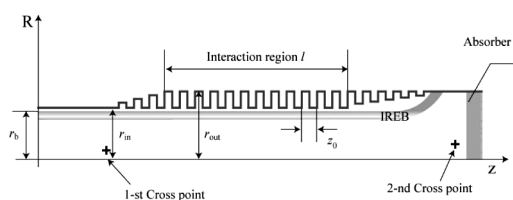


図 1 BWO 発振管の共振部の構造 (シミュレーション)
Fig.1. Structure of BWO in simulation.

〈2.2〉大強度相対論的電子ビーム

HPM の発振管のエネルギー源は電子ビームであり、密度を変調する事 (バンチング) によって、ビームはエネルギーを失い、電磁波を成長させる。理論的にはエネルギーの変換効率は 50 % 以上の値になるが、実際には数 10 % くらいになる。いずれにしても HPM と同程度かそれ以上の大電力の電子ビームが必要である。そのような電子ビームには、大強度相対論的電子ビーム (IREB) が適している。IREB はエネルギーが数百 keV ~ 数 MeV で、電流は 1 kA を超えるパルスビームである。ただし IREB の電子密度が高いがゆえに、電子のエネルギーの均一性が悪化してしまう。この欠点を克服してくれるものに次の超放射がある。それは、電子ビームの質にあまり関係がなく単一周波数を得る事を可能にする。

〈2.3〉超放射

超短パルスを得るときには、パルス状の電子ビームを使って、発振管をパルス動作させる。ここで、電子ビームのパルス幅を決めるにあたり配慮することがある。それは、パルス幅によって、発振が効率的に起きる範囲がある。大強度電磁波を発生することができる事が N.S. Ginzburg らによって新たに提案された [3]。過渡的電磁波放射現象で、超放射 (Superradiance) と名付けられている。超放射の動作では、ピーク電力は定常のときと比べて、最大で CW の 2 倍の強度になる。この実験で用いる発振管の図 2 にシミュレーションで得られるマイクロ波の周波数スペクトルを示す。非常に鋭い発振ピークが 5 GHz 付近に得られている。この場合、マイクロ波の最大出力は IREB の最大出力の 35 % である。シミュレーションに基づき、鎌田らはこれまでに、5 GHz で出力は 300 MW の発振を観測している [4]。電子ビームは電流約 4.5 kA、エネルギー 550 keV、電力は 2.48 GW である。実験では効率 12 % が得られている。

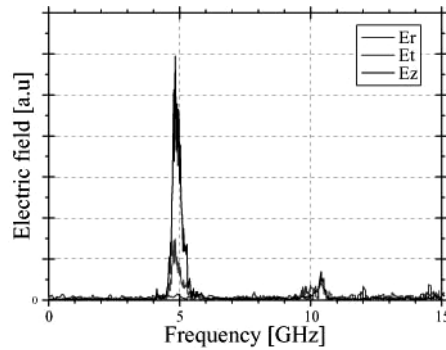


図 2 超放射のシミュレーション。BWO でパルスを短くすると超放射発振を起こす。
Fig.2. Radiation frequency obtained by the simulation.

〈2.4〉出力窓の表面での放電の様子

さて、マイクロ波の強さを示す 1 つの例がある。通常はホーンアンテナを用いて、出力窓を通過させている。これを用いずに、円形導波管の太さでそのまま出力窓を通過させると、真空側において放電が起こる。図 3 に窓に残された放電跡の写真を示す。表面には中間から周辺にかけて、細かい筋が放射状に見える。できた放電跡は TM_{01} モードの電場分布に非常に近い。

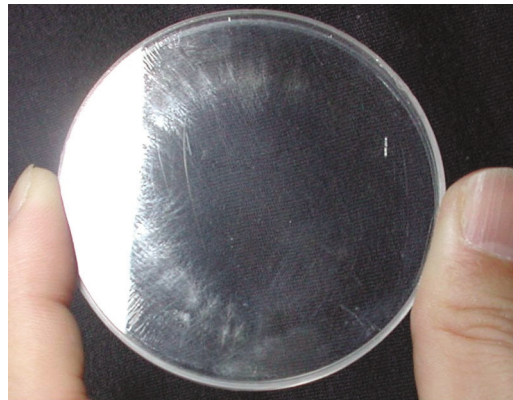


図 3 アクリル窓についた放電跡
Fig.3 Damage on the surface of acrylic window.

3. モード変換器

〈3.1〉ブラソフアンテナ

マイクロ波では、円形導波管から自由空間に放射する場合に、ブラソフアンテナ (Vlasov antenna) とよばれる準光学アンテナを使用する [5]。ちなみに、ジャイロトロンは TE モードで発振し、ガウスビームへの変換にはブラソフアンテナが用いられている [6]。その構造を、図 3 に示す。マイクロ波の伝送に用いる円形導波管を末端で半面を階段状に切断した「ステップカット導波管」と、「放物面反射鏡」の 2 つのパーツから構成される。このアンテナは、通常はこれより周波数が高いマイクロ波やミリ波に応用されていることが多い。定在波を作りにくいこと、高出力に向いていると考えられる。また、同様な理由からパルスにも向いていると考えられる。

〈3.2〉幾何光学による設計

さて、各パーツの働きを分けて考える。まず、ステップカット導波管から説明する。導波管中のマイクロ波は、斜め伝播する平面波としても考えることができる。円形導波管の中でのマイクロ波の伝播では、導波管の半径 (a) と自由空間での波長 (λ_0)、また、軸方向の管内波長 (λ_z) が式 (1) を満たすのはよく知られている。

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda_z}\right)^2 + \left(\frac{\xi_{n,m}}{a}\right)^2 \quad (1)$$

ちなみに波数 ($k = 2\pi/\lambda$) を用いて、垂直方向の波数を $k_\perp = (\xi_{n,m}/a)$ とおけば、上記式は、 $k_0^2 = k_z^2 + k_\perp^2$ と書き直すこともできる。この式は、TM モードと TE モードの両方に成り立つ。ここで、 $\xi_{n,m}$ はモードの次数 n と m で決まる定数であり、ベッセル関数 $J_n(x)$ の m 番目の解である。(n, m) = (0, 1) モードについては、 $\xi_{0,1} = 2.40$ で与えられる。さて、この式から λ_0 が決まっている場合には、マイクロ波が斜めに進む角度 (伝播角 α) が決まる。

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{k_\perp}{k_0}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda_0 \xi_{n,m}}{2\pi a}\right) \quad (2)$$

さて、導波管中のマイクロ波のモードは、導波管に垂直な断面で定在波ができていると解釈することもできる。したがって、 k_\perp が正と負の波が常に存在する。そのため、導波管の軸に対してプラスとマイナスの角度で斜めに伝播している波は振幅が等しく、図 4 (a) のように双方が相伴っている。

単に導波管を垂直に切断すると、マイクロ波は $\pm a$ を保って 2 つの方向に放射される。これを階段状 (ステップカット) にすると、直接出てくる波と、ひさしの部分で一度反射した波は、2 つきれいに並んで平面波となって出てくる。結局、交差していた光線が 2 本横に並んで出てくる。(ここで、導波管の軸と、出射される光線の軸の両方を含む面上で、出射ビームの軸と垂直に X 軸をとる。また、その両者と垂直な方向に Y 軸をとる。)

出射波の開口 (W_X) は、全体では導波管の直径 $2a$ の倍になる。ただし、光線は α の角度に出射されるため、

$$W_X = 4a \cos \alpha \quad (3)$$

で与えられる。これから、 a が大きく、かつ伝播角度 α が小さいほど (ただし a が大きいほど α は小さくなるので相乗効果となるが)、 W_X は大きくなる。

一方、TM₀₁ モードは導波管内部を軸対象で伝播する。そのため導波管を垂直に切断した場合には、軸を光源に 360° 方向に放射される。さて、上記のようにステップカット導波管の部分では半分が折り返される。そのために、図 4 (b) のように 180 度方向にマイクロ波が出射される。正面から見るので、円形導波管の中心軸はちょうど点光源のようになる。この点光源からの光を平行にするために放物面反射鏡が用いられる。その場合、放物面反射鏡の焦点を導波管の軸に一致させるのは当然であるが、軸から放物面までの距離 (焦点距離 f_p) は任意に決めることができる。そして、最大の角度、つまり、真横に出る光線が、放物面反射鏡から反射される光線の幅 (W_Y) を決める。数学的にこの幅はちょうど $4f_p$ となる。

$$W_Y = 4f_p \quad (4)$$

ステップカットの切り幅 L_{SC} は、導波管の断面を反射して往復するのに要する距離の $1/2$ 以上に設定する。また、ひさしが長過ぎると放物面反射鏡から反射される光線をさえぎってしまうので、次の条件を満たさなければならない。

$$2a \leq L_{SC} \tan \alpha < 2f_p \quad (5)$$

TM₀₁ モードと TE₀₁ モードは電場と磁場を入れ替えたもので、ちょうど TE₀₁ モードと TM₀₁ モードの偏光方向を 90 度回転したものである。位相だけを見ると、両者は同じである。したがって出射されたマイクロ波でも、TM モードと TE モードでは、電場が 90° 回転すると予想できる。

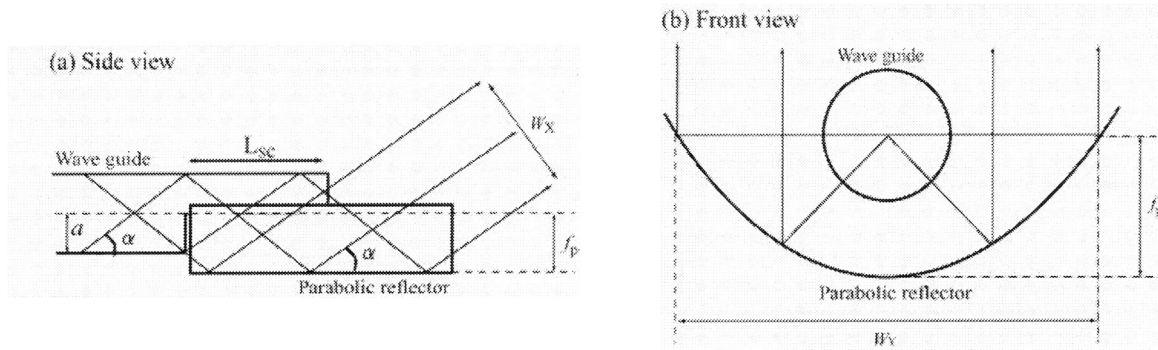


図4 ステップカット部分でのマイクロ波の伝播の様子
側面図と断面図

Fig.4 Propagation of microwave at Vlasov antenna.

〈3.3〉 ガウスビーム波

ここでの目標は、マイクロ波を自由空間に放出して、それを平行光線に相当するガウスビーム（TEM00 モード）に変換することである [7]．電場の大きさは中心から離れるに従って減少する．電場が $1/e$ になるところ、つまり、エネルギー密度が $1/e^2 = 0.13$ になる半径をスポットサイズ (ω) という．エネルギー密度分布はガウス分布（式（6））に従う．

$$I(x, y) = \frac{2P_0}{\pi\omega_x\omega_y} \exp\left(-\frac{2x^2}{\omega_x^2}\right) \exp\left(-\frac{2y^2}{\omega_y^2}\right) \quad (6)$$

ここで、 $I(x, y)$ は電力密度、 P_0 は総出力、 ω_x と ω_y はそれぞれの方向のスポットサイズである．また、 x, y はピークの位置で原点をとる．この式を逆に用いて、ピーク電力密度 (I_0)、 ω_x 、 ω_y を測定することによって P_0 を求めることができる．

$$P_0 = \frac{I_0}{2} \pi\omega_x\omega_y \quad (7)$$

さて、幾何光学では出射波の強度分布は、上記の開口面上では平坦で、それ以外は零となると考えられる．しかし、我々の扱うマイクロ波は波長が長く、回折をするため強度分布は階段状にではなく、周辺で緩やかにつながっていると思われる．そこで、近似的に、ここでは幾何光学から求めた開口面の大きさを、幾何光学の焦点の位置では ω が最小になるウエストサイズ (ω_0) に等しいと考えることにした（出射ガウスビームの幅の仮定）．

$$W_x \approx 2\omega_{0x} \quad , \quad W_y \approx 2\omega_{0y} \quad (8)$$

ω_0 が小さいと回折が強く働き、広がり角 θ_{beam} は大きくなる．

$$\theta_{\text{beam}} \approx \lambda_0 / \pi\omega_0 \quad (9)$$

今回、試作したブラソフアンテナは、導波管径を2種類（ $a = 3.0 \text{ cm}$ と 3.6 cm ）用意した．全体は表1のようになっている．ステップカットの切り幅 L_{sc} は4種類（ $L_{\text{sc}} = 5.5 \text{ cm}, 8.5 \text{ cm}, 9.5 \text{ cm}, 14 \text{ cm}$ ）を選択した．それぞれをここではタイプⅠ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳと呼ぶことにする．放物面反射鏡（ $f_p = 6.0 \text{ cm}$ ）はすべて同じものを使っている．そのため、 $2\omega_y$ はすべて同じである．

a と ω_{0x} は式（2）と式（3）を使って計算できる． a が大きいほど a は小さく、 ω_{0x} は大きくなる．今は、波長が長いために回折が起こりやすい．特に出射開口幅が小さい場合には、アンテナから距離を離れるに従ってビーム径は急

速に大きくなる．計算上は，タイプⅠ，ⅡとタイプⅢ，Ⅳの ω_X は出射直後には7.7 cmと11 cmであるが， $Z = 50$ cm以降で大きさが逆転する．ビームの径が最初小さいほど，回折が大きくなるので，アンテナから距離を離れるに従ってビーム径は急速に大きくなる．したがって，遠くまでビーム径を広げずに伝播させるには a は大きいほど良いと予想できる．開口幅 $2\omega_X$ と $2\omega_Y$ は大きいほど良いと思われる．ところで，幾何光学的には L_{sc} は式(5)の条件を満たせば変わらない筈である．しかし，ここでは，あえて長さを変えてみた．いずれも式(5)の条件を満たすので，幾何光学的な考察では，両者の性能は変わらない．

表1 試作したブラソフアンテナの大きさと予想されるスポットサイズ
Table 1. Sizes of Vlasov antennas and the calculated spot sizes.

Type	I	II	III	IV
a	3.0 cm		3.6 cm	
α	49.8 degree		39.7 degree	
Lmin - Lmax	5.08 cm - 10.1 cm		8.72 cm - 14.5 cm	
Lsc	5.5 cm	9.5 cm	8.5 cm	14 cm
$Z = 0$ cm ($2\omega_{XB} \times 2\omega_{YB}$)	7.7 cm \times 24 cm		11 cm \times 24 cm	
$Z = 50$ cm	50.2 cm \times 28.8 cm		36.4 cm \times 28.8 cm	
$Z = 75$ cm	74.8 cm \times 33.9 cm		53.2 cm \times 33.9 cm	
$Z = 100$ cm	99.6 cm \times 39.9 cm		70.3 cm \times 39.9 cm	

4. 実験1 (変換前のマイクロ波出力の観測)

〈4.1〉 配置

発振管の後端には，直径10 cmの円錐ホーンアンテナを設置して，マイクロ波が反射して悪影響を与えないように空中に放射している．後の実験2では出力ホーンの後方にモード変換のために準光学アンテナを設置する．

〈4.2〉 検波出力

発振管からの出力の波形を図5に示す．検波にはトンネルディテクタを使った．パルスの半値幅は約5 nsとわかる．ちなみにシミュレーションでは3 ns程度が得られており，ほぼ実験と一致している．周波数はローパスの周波数フィルターを用いて確認した．分解能が1 GHz程度であるため，それほど厳密ではないが，5 GHz以下で観測されて，4 GHz

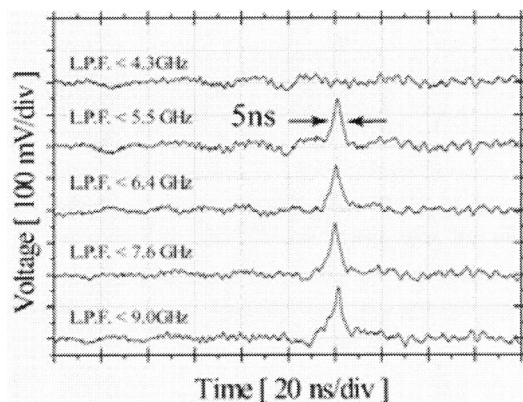


図5 検波出力波形。
Fig.5. Detected power after passing the L.P.F.

以下で観測されないため、発振周波数は 5.0 ± 0.5 GHz である。設計値が 4.98 GHz であるため、ほぼ一致している。

〈4.3〉変換前の出射パターン

測定は、出力のホーンアンテナに向かい合わせに受信ホーンを置き、マイクロ波を検波した。受信ホーンは出力ホーンの正面からの角度 θ を変えられるように設置する。測定に用いた受信ホーンは開口面積 $16.75 \text{ cm} \times 12.45 \text{ cm}$ 、有効面積 180 cm^2 である。これで受信パワーと角度の関係を測定する。結果を図 6 に示す。測定は円錐ホーンより距離 $Z = 150 \text{ cm}$ で測定した。

出力は 25° をピークに持つ。円環状に放射しているとして、このグラフを積分する。求めた総出力は約 160 MW となる。周波数は 5 GHz である。

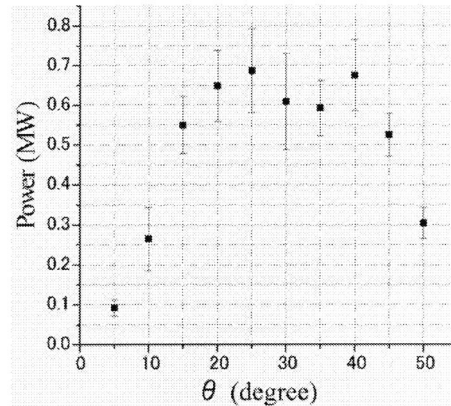


図 6 円錐ホーンからの放射の角度分布。
Fig.6. Received power vs. radiation angle.

5. 実験 2 (ブラソフアンテナによる変換)

〈5.1〉ブラソフアンテナの配置

ブラソフアンテナは表 1 にあるように、4 種類を試作した。実験 2 の配置では出力用の円錐ホーンアンテナに、同じ大きさの円錐ホーンをもう一つ向かい合わせに設置した。その後ろを金属の円筒へ繋ぐ。そして金属円筒の他端に試作したブラソフアンテナを設置した。ブラソフアンテナは放物面反射鏡が地面に対し垂直になるように配置する。X 方向は地面に対し水平になる。ブラソフからの放射マイクロ波は以下のように、光管スクリーンによる測定と、検波測定する 2 種類の方法をとった。

〈5.2〉蛍光管スクリーンによる観測

マイクロ波ビームを市販の照明用の蛍光管に当てると発光する。蛍光管が発光する際の閾値は約 $30 \text{ kW} / \text{cm}^2$ 程度である。そこで、長さ 120 cm、直径 3 cm の蛍光管を垂直に 40 本並べて、スクリーンを作り放射パターンを観測した。

まず、タイプ I から IV の 4 つについて、蛍光管スクリーンによる放射パターン測定を行った。測定方法は前述したとおり、蛍光管をスクリーン状に並べ、距離を変えながら蛍光管の発光を観測した。蛍光管スクリーンは、マイクロ波ビームに垂直になるように設置する。蛍光管スクリーンとブラソフアンテナの距離を $Z = 50 \text{ cm}$, 75 cm , 100 cm にして蛍光管の発光を観測した。

図 8 は、全て $Z = 50 \text{ cm}$ で撮影した。図 8(a) ~ (d) はそれぞれ表 1 のタイプ I ~ IV に対応している。図(c) にスケールを示す。 W_X は図(a)(b) よりも図(c)(d) の方が広い。また、幾何光学的にはブラソフアンテナからの放射は L_{sc} に影響されないはずである。図からわかるように、 W_X が大きい方が強く光っている。図(d) の方が図(c)よりも小さい面積で明るく光っている。図(a) と図(b)、図(c) と図(d) の比較では、共に L_{sc} が大きい方が強く光っている。これは、最初 W_X が小さいと、急速にビームが発散してしまうためと考えられる。

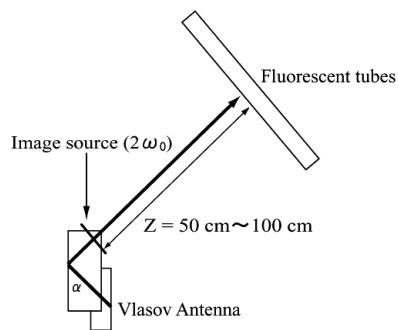


図 7 蛍光管スクリーンの配置
Fig.7. Fluorescent tubes array was set at the distance of Z from Vlasov antenna.

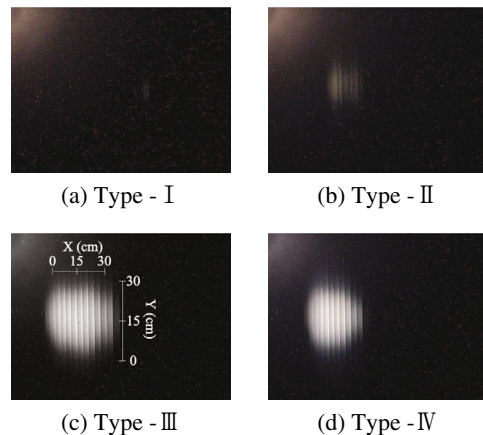


図 8 変換後の放射パターンの写真
Fig.8. Radiation pattern from prototype Vlasov antennas. Z = 50 cm.

〈5.3〉 検波による観測

次に、最も明るく光ったタイプ IV ($a = 3.6$ cm, $L_{sc} = 14$ cm) において、強度分布の測定を行った。この時の測定系の配置を図 9 に示す。L.P.F. は 5 GHz ローパスフィルターである。

エネルギー密度が実験 1 と比べて高いため、ここでは受信ホーンとして矩形導波管を用いた。開口面積は 2.22 cm × 4.76 cm, 有効面積は 10.0 cm² である。さらに、受信したマイクロ波の強度を下げるため、方向性結合器(−20 dB)と固定減衰器(−30 dB)で減衰させる。また、ケーブルで−4.8 dB, ケーブルと可変減衰器の接合部で−6.0 dB の減衰がある。これを可変減衰器で減衰率(0 dB ~ −80 dB)を変えながら強度測定を行った。最終的にディテクタに入る出力は 1 mW 程度にしている。

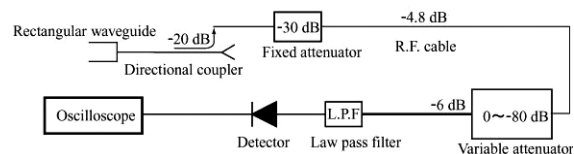


図 9 検波測定の配置
Fig.9. Detecting system.

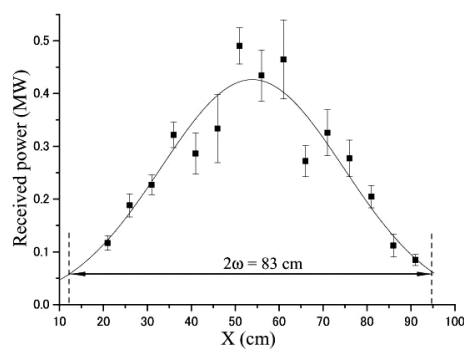


図 10 マイクロ波ビーム強度分布 : X 方向
Fig.10. Received power : X - direction

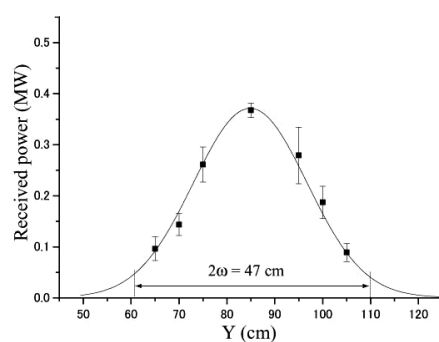


図 11 マイクロ波ビーム強度分布 : Y 方向
Fig.11. Received power : Y - direction

測定は、この受信用の矩形導波管を、ピーク値を示した部分を中心に縦と横に 5 cm おきに移動させて行った。結果を図 10 と図 11 に示す。測定は $Z = 100$ cm で行った。グラフの縦軸は矩形導波管での受信出力、横軸は測定位置である。両者でピーク値が微妙に異なるのは、測定の際に装置のメンテナンスを行ったのが原因で、電子ビームの状態が変わってしまったためと思われる。

各グラフを式 (6) で近似することで、 ω を決めた。スポットサイズはそれぞれ $\omega_X = 41.5$ cm, $\omega_Y = 23.5$ cm である。これはともに計算値(表 1)の 1.2 倍で、計算値と良く一致する。

ピーク値は図 10 の値で 0.43 MW, 単位面積あたりの電力密度は 43 kW/cm^2 となった。これらを式 (7) に代入することによって $P_0 = 65 \text{ MW}$ が求まる。この値と変換前の出力 160 MW から変換効率を求めると、その値は 41 %となる。

また、この出力測定の際に、受信用矩形導波管の縦横の向きを変えたところ出力が全くでなかった。このことから、電場の向きは設計通り X 方向に直線偏光されている。

6. まとめ

超短パルスの大出力マイクロ波 (300 MW) の発生に成功した。今後いろいろな分野へ応用を検討しているが、そのためには伝播形態を自由に変える必要がある。ここでは発振器からの出力 (TM₀₁ モード) を自由空間に放出するための準光学アンテナを設計した。準光学アンテナはジャイロトロン (TE モード) に良く用いられているが、後進波発振管 (TM モード) においても動作することがわかった。

This research was partially supported by the Ministry of Education, Science, Sports and Culture, Grant-in-Aid for scientific research (C), 2005, 17540466.

参 考 文 献

- [1] M. P. Brizhinev, S. V. Golubev, D. S. Dorozhkina, B. G. Eremin, V. G. Zorin, A. G. Livak, I. V. Plotnikov, S. V. Razin, V. E. Semenov, A. V. Strikovskii, and O. N. Tolkachev : "Microwave discharge in Vacuum on a dielectric surface", Journal of Experimental and theoretical physics, Vol.92, No.6, pp.1137-1142 (2001)
- [2] N. S. Ginzburg, N. Yu. Novozhilova, I. V. Zotova, A. S. Sergeev, and N. Yu. Peskov : "Generation of powerful subnanosecond microwave pulses by intense electron bunches moving in a periodic backward wave structure in the superradiative regime." Physical Review, Vol.60, No.3, pp. 3297- 3303 (1999)
- [3] N. S. Ginzburg, I. V. Zotova : "Nonlinear-theory of superradiance of moving layer of excited cyclotron oscillators." Sov. Tech Phys. Lett., 15, pp. 573 - 574 (1989)
- [4] K. Kamada, K. Yamamoto, R. Nakajima, R. Ando, I. V. Zotova, R. M. Rozental, A. S. Sergeev, and N. S. Ginzburg: "S-band superradiance in slow wave structure", Proc. of 6th Int. Workshop on Strong Microwave in plasma, (Nizhny Novgorod, Russia July, 2005) , Vol.1, pp. 185-190, (2006)
- [5] S. N. Vlasov, L. I. Zagryadskaya and M. I. Petelin: "Transformation of a whispering gallery mode, propagating in a circular waveguide, into a beam of waves." Radiofizika, Vol.15, No.12, pp.14-17 (1972)
- [6] I. Ogawa, T. Idehara, S. Maekawa, W. Kasperek, and G. F. Brand: "Conversion of gyrotron output into a gaussian beam using the far-field." International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vol.20, No.5, pp.801-821(1999)
- [7] 福光於菟三: 「光エレクトロニクス入門」, 昇光堂(1988)