

コルゲート導波管を用いた周波数可変なテラヘルツ  
波源の研究

安中 裕大

新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程

電気情報工学専攻

## 目次

第1章	研究背景	1
1.1	導入	1
1.2	表面波発振器	4
1.2.1	周期構造と導波管モード	4
1.2.2	遅波と表面波	5
1.2.3	空間高調波	6
1.2.4	電子ビームが持つモード	7
1.3	Orotron と Ledatron	8
1.4	Smith-Purcell 放射	9
1.5	電子ビームのバンチング	10
第2章	実験装置	11
2.1	実験装置構成	11
2.2	パルスパワーシステム	11
2.3	電子ビーム源	13
2.4	外部磁場源	15
2.5	コルゲート導波管	16
2.6	検出システム	18
第3章	0.1THz 帯表面波発振実験	20
3.1	実験概要	20
3.2	実験結果	21
3.2.1	BWO 領域における実験	21
3.2.2	TWT 領域における実験	24
3.3	結論	29
第4章	Ledatron 放射と Smith-Purcell 放射実験	30
4.1	実験背景	30
4.2	コルゲート導波管の電磁界モード	30
4.3	Smith-Purcell 放射の周波数特性	32
4.4	実験結果	35
4.4.1	Ledatron 放射	35
4.4.2	Smith-Purcell 放射	39
4.5	考察と結論	42
第5章	時間的高調波による Smith-Purcell 放射の大強度化確認実験	43
5.1	実験の目的	43
5.2	Smith-Purcell 放射と時間的高調波	43

5.3 Smith-Purcell 放射の周期数依存実験	46
5.4 考察と結論	51
第6章 結論	52
参考文献	53
研究業績目録	55
謝辞	56

## 第1章 研究背景

### 1.1 導入

テラヘルツ波は周波数が 0.1 から 10 THz 程度の電磁波である。テラヘルツ波の周波数は、Fig. 1.1 に示すように、マイクロ波と赤外線との間の周波数に位置しており、電波と光の中間領域と呼ばれる。その特性から、無線通信やレーダー、非破壊検査、医療、プラズマの制御や計測など様々な応用が期待されている。これらを実現するには高効率で、出力と周波数可変性が高く、小型で常温動作が可能なテラヘルツ源が必要とされる。

現在研究が進められているテラヘルツ波発生源には以下のようなものがある。量子効果を利用した半導体装置である量子カスケードレーザー(quantum cascade laser: QCL)[1,2] やトンネル共鳴ダイオード[3,4]、電子ビームを利用したジャイロトロン[5-7]や遅波発振器[8-15]などである。

中でも電子ビームを利用した装置は比較的大強度での発振が可能であり、大強度テラヘルツ源として盛んに研究されている。これらの装置は共振空洞や周期構造を用いて電子ビームのエネルギーを電磁波に変換し、テラヘルツ波を発生させる。たとえばジャイロトロンは電子ビームのサイクロトロン運動を共振空洞内で共鳴させ、テラヘルツ波として取り出すものである。日本では福井大学遠赤外領域開発研究センターの研究が有名である[7]。ジャイロトロンの周波数は電子のサイクロトロン周波数で決まるため高周波数化には大強度の磁場が必要であり、装置構成も大規模になりやすい。2008 年には 40 T の大強度磁場を用いた 1 THz で 1.5 kW の出力のジャイロトロンが報告されている[5]。一方、遅波発振器は周期構造を用いて電子ビームの運動エネルギーを電磁波のエネルギーに変換する装置である。SP-FEL や表面波発振器(surface wave oscillator: SWO)、後進波管(backward wave oscillator: BWO)、Orotron、Ledatron[16]などがある。SP-FEL は金属平板に施した周期構造を用いた装置で、周期構造のそばを電子ビームが通ることで Smith-Purcell(SP)放射を生じさせる[17]。Orotron や Ledatron は周期構造の上に反射板を設置し、反射板と周期構造の間に共振器を形成することで発生する電磁波の強度を強めるものである。両者の発振機構はよく似ているため、本論文では Ledatron と呼称する。SWO は周期構造を施したコルゲート導波管に電子ビームを伝播させ、表面波を励起させる装置である。群速度の正負に応じて BWO と進行波管(traveling wave tube: TWT)に動作が切り替わる。近年の我々の研究では 80 keV 以下の電子ビームを用いて、25 GHz 帯の BWO により 100 kW、0.1 THz 帯の SWO により最大 20 kW の出力を達成している[13,18]。SWO はジャイロトロンのような大強度磁場を必要としないため、比較的小規模な卓上装置としての利用が期待できる。しかし表面波の周波数が周期構造の寸法で決まるため、テラヘルツ帯では周期構造が細くなり、高周波数化にあたって製作精度が問題になる。たとえば、当研究室にある 0.4 THz 帯 BWO の周期構造は周期長が 0.25 mm である。更に高い周波数ではマイクロメートルのオーダーで製作精度が必要となるだろう[14]。

Fig. 1.2 に各装置の発振周波数と出力の代表的な値をプロットする。それぞれ文献

[1,2,5,6,13,15,18]を参考にしている。赤い点は我々の研究室で用いられている装置を示している。青い三角は Gyrotron や QCL といった他の装置を示している。数テラヘルツの帯域ではジャイロトロンと QCL が大強度発振を実現しているが、それぞれ大強度の磁場や極低温化での動作が必要であり、実用に適さない。QCL を室温で動作させる研究もなされているが、依然その出力は低い[2]。我々の研究室で用いている装置は、常温で動作でき、磁場も 0.8 T 程度と比較的弱い強度で動作できる。その周波数帯は 2013 年に 25 GHz 帯 BWO で 100 kW, 2016 年に 0.1 THz 帯 SWO で 20 kW, 0.3 THz 帯 SWO で 1 kW を実現している。また、Fig. 1.2 に示したように、25 GHz 帯の BWO において SP 放射や Ledatron 放射が生じることが報告されている[18]。これらの放射は、同じ周期構造から発生する表面波動作と比べ、4 倍の周波数まで生じており、高周波数化に当たって周期構造の製作精度の問題を解決する可能性がある。しかし出力は表面波による放射と比べて大幅に下がり、Ledatron 放射は表面波の 100 分の 1, SP 放射は 10000 分の 1 の出力となる。SP 放射や Ledatron 放射の大強度化を調べることは SWO の周波数可変性を広げ、高周波数化に寄与するものである。そこで本研究では SWO による SP 放射や Ledatron 放射の大強度化を目的とし、これらの放射の特徴を調べる。

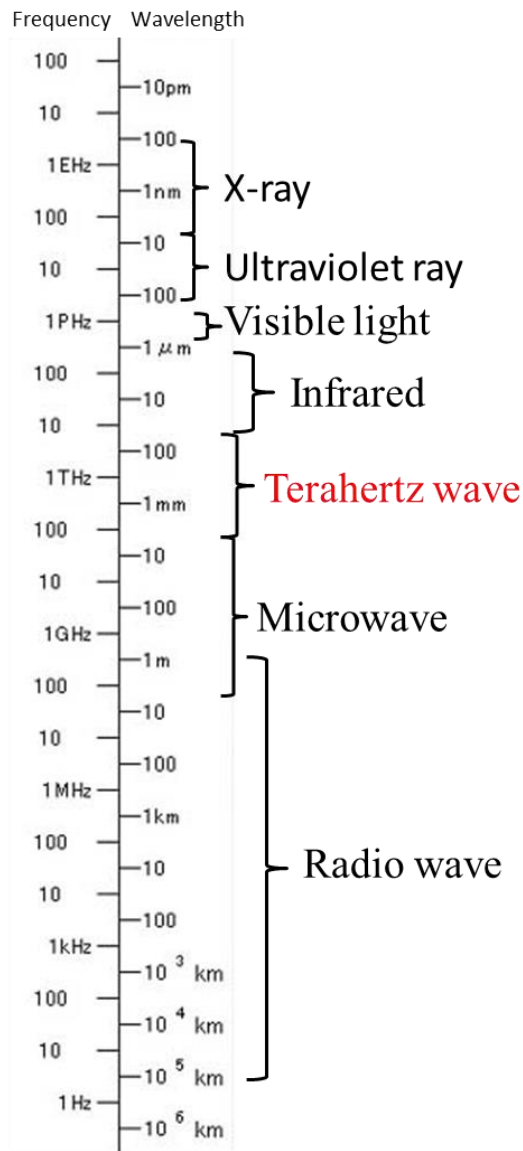


Fig. 1.1 Group of electromagnetic wave based on frequency and wavelength.

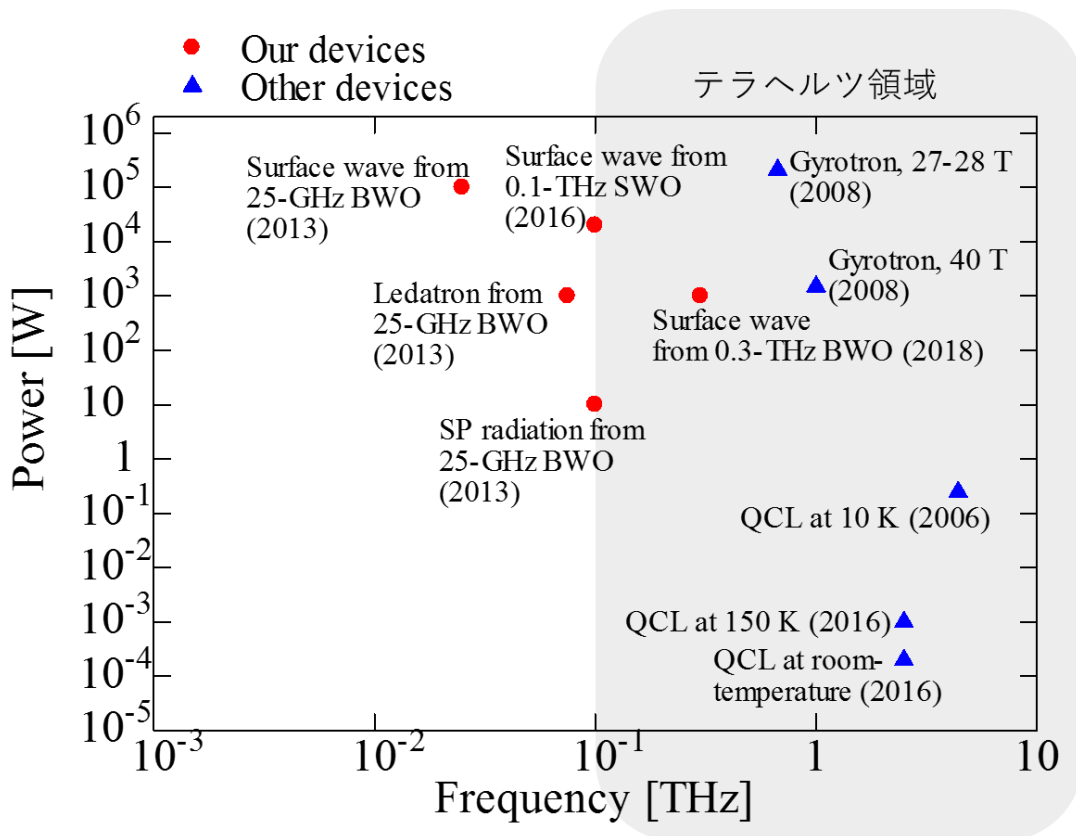


Fig. 1.2 Representative values of frequencies and maximum powers of THz-devices. Plots marked by ● represent backward-wave oscillator (BWO) and surface-wave oscillator (SWO) used in our laboratory. Plots marked by ▲ represent other terahertz devices including Gyrotron and quantum cascade laser (QCL).

## 1.2 表面波発振器

### 1.2.1 周期構造と導波管モード

本研究で円筒導波管の内壁に周期構造を施したコルゲート導波管を SWO として用いる。その周期構造は Fig. 1.3 に示すような矩形周期構造をしている。その寸法である平均半径  $R_0$ , 周期  $z_0$ , 溝の幅  $d$ , 振幅  $h$  により、表面波の周波数帯が決定される。周期構造は電磁波の位相速度を下げ、遅波にする効果があり、遅波構造(Slow wave structure: SWS)とも呼ばれる。遅波に関しては次の節で説明する。周期構造のパラメータから導波管の電磁界モードの分散関係を計算できる。分散関係の例として 25 GHz 帯の SWO で使われるコルゲート導波管の  $TM_{01}$  モードの分散関係を Fig. 1.4 に示す。分散関係は横軸が軸方向の波数、縦軸が周波数を示している。 $TM_{01}$  モードのアップercットオフ周波数は 25 GHz 程度である。 $TM_{01}$  モードは位相速度  $2\pi f/k_z$  は光の速さより遅く、遅波となっている。遅波は周期構造表面に電界が集中した表面波として形成される。 $TM_{01}$  モードは波数  $15.07 \text{ cm}^{-1}$  で群速度が 0 になる

$\pi$ -point となる。波数が 0 から  $15.07 \text{ cm}^{-1}$  のとき群速度は正となり、 $15.07 \text{ cm}^{-1}$  から  $31.41 \text{ cm}^{-1}$  で群速度が負となる。群速度が負になる領域で BWO、正になる領域で TWT として動作する。

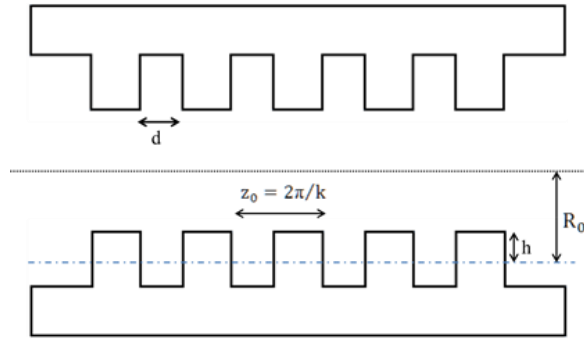


Fig. 1.3 Schematic of periodic structure and size parameters.

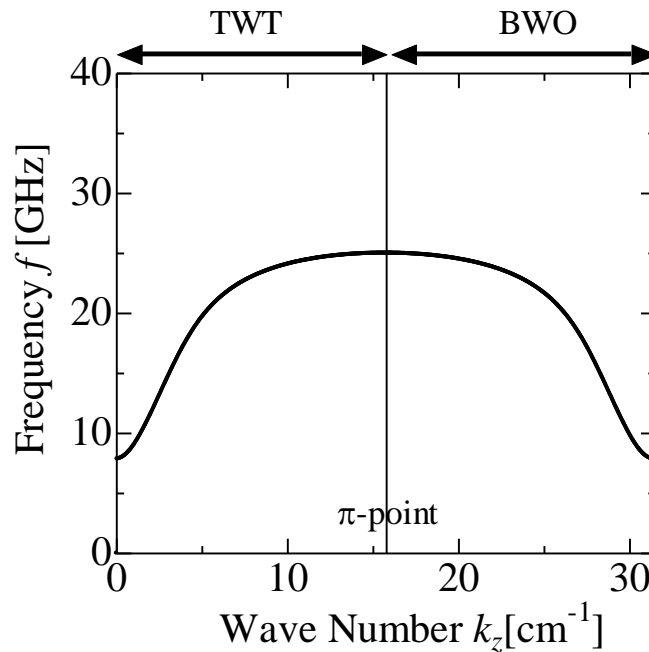


Fig. 1.4 Dispersion relation of  $\text{TM}_{01}$  waveguide mode of K-band corrugated waveguide.

### 1.2.2 遅波と表面波

位相速度  $\omega/k_z$  が光速  $c$  より遅い波を遅波と呼ぶ。遅波は以下に示すように、媒質表面に垂直方向の波数が虚数となる解を持ち、電界強度分布が媒質の表面に集中する。このような波は表面波、もしくは近接場光、表面プラズモン・ポラリトン（テラヘルツ領域では擬似表面プラズモン・ポラリトン）などと呼ばれる。



遅波が表面波となる理由を以下に示す。いま、媒質の表面に沿う向きに  $z$  軸方向を取り、 $z$  軸方向へ伝播する電磁波を考える。いまその位相速度が光速より遅いとすると

$$c > \omega/k_z \quad (1-1)$$

である（簡単のため、ここで空間高調波を考慮しない）。この両辺に  $k_z/c$  をかけて二乗すると

$$\frac{\omega^2}{c^2} - k_z^2 < 0 \quad (1-2)$$

が得られる。また、 $z$  軸方向に垂直な方向の波数成分を  $k_r$  とすると、波数と角周波数の関係はよく知られているように

$$\frac{\omega^2}{c^2} = k_z^2 + k_r^2 \quad (1-3)$$

と書ける。式(1-2), (1-3)より、

$$k_r^2 = \frac{\omega^2}{c^2} - k_z^2 < 0 \quad (1-4)$$

である。式(1-4)より、 $z$  軸に垂直方向の波数  $k_r$  は虚数となる。

いまここで、遅波の電界が

$$E = E_0 \exp i(k_r r + k_z z - \omega t) \quad (5)$$

で表されるとする。ここで  $i$  は虚数単位、 $t$  は時間である。 $E_0$  は電界の振幅である。 $k_r = ik'_r$  とおくと、式(1-5)は

$$E = E_0 \exp(-k'_r r) \exp i(k_z z - \omega t)$$

と変形できる。電界の振幅は  $E_0 \exp(-k'_r r)$  となる。振幅は  $r$  が増えるにつれて指数関数的に減少し、 $0$  に近づく。以上から遅波電磁波は  $r = 0$  付近で電磁界強度がもっとも強くなり、表面から遠ざかるにつれて  $0$  に近づく表面波となる。

### 1.2.3 空間高調波

内壁に周期構造を持つ導波管の電磁界モードはフロケの定理に従い、波数空間において周期的になる。その周期  $k_0$  は周期構造の周期  $z_0$  で決まり、 $k_0 = 2\pi/z_0$  である。波数  $k + pk_0$  ( $p = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ) に生じる分散関係をフロケの高調波、あるいは空間高調波と呼ぶ。ここで  $p$  は高調波次数である。Fig. 1.5 に空間高調波の例を示す。導波管中の電磁界モードはすべての空間高調波が足し合わさった電磁界分布を持つと考えられる。

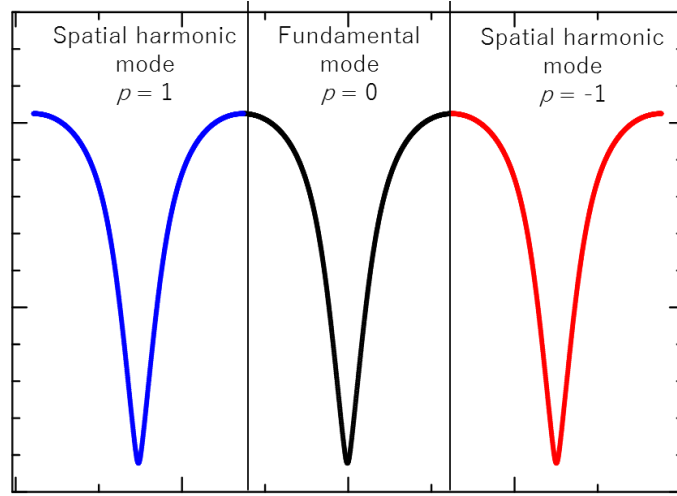


Fig. 1.5 Schematic of Floquet harmonic with harmonic numbers  $p = 0, 1, -1$ .

#### 1.2.4 電子ビームが持つモード

電子ビームは電子の振動に起因する4つのモードを持つ。Fast space charge (FSC)モード、Slow Space Charge (SSC)モード、Fast cyclotron (FC)モード、Slow cyclotron (SC)モードである。FSCモードとSSCモードは電子ビームのプラズマ振動に起因するモードである。一方FCモードとSCモードは電子のサイクロトロン運動に起因するモードである。その分散関係は $\omega = vk \pm \omega_p/\gamma^{3/2}$ (FSC, SSCモード),  $\omega = vk \pm \omega_c/\gamma^{3/2}$ (FC, SCモード)で表される。ここで $\omega$ は角周波数、 $v$ は電子の速度、 $\omega_p$ はプラズマ振動数、 $\omega_c$ はサイクロトロン角周波数、 $\gamma$ は相対論的因子である。SWOでは主にFSCモードとSSCモードがテラヘルツ波の発生に関わってくる。これらのモードは基本的に位相速度が光速より遅い遅波であり、電子ビームの表面に張り付くように存在する表面波だと解釈できる。ビームモードの位相速度と導波管の電磁界モードの位相速度が等しくなる点で両者の間に相互作用が生じ、電子ビームの運動エネルギーがテラヘルツ波のエネルギーに変換される。この相互作用には、FSCモードとSSCモードの両方が導波管モードと相互作用する場合と、SSCモードが単独で導波管モードと相互作用する場合の二通りがある。前者の相互作用が生じる領域はビーム電流量が低いときに生じるためLow current regimeあるいはCompton regimeと呼ばれる。後者はHigh current regimeあるいはRaman regimeと呼ばれる。Compton regimeからRaman regimeへの変遷は規格化された電流値 $\pi I_b/\beta\gamma^3 I_A$ で決まる[15]。ここで $\beta = v/c$ 、 $I_A$ はアルフヴェン電流17 kAである。ここでFig. 1.6にCompton regimeとRaman regimeの例を載せる。80 keVのビーム線が持つFSCモードとSSCモードが導波管モードとともに交わっている。このときビームと導波管モードの相互作用はCompton regimeにある。一方ビームエネルギーを下げていくと、 $\beta\gamma^3$ も下がっていき、結果として規格化した電流値

$\pi I_b / \beta \gamma^3 I_A$  は大きくなっていく。それに伴い相互作用は Compton regime から Raman regime に移っていく。30 keV のビーム線は SSC モードのみが導波管モードと相互作用しており、Raman regime にあるといえる。

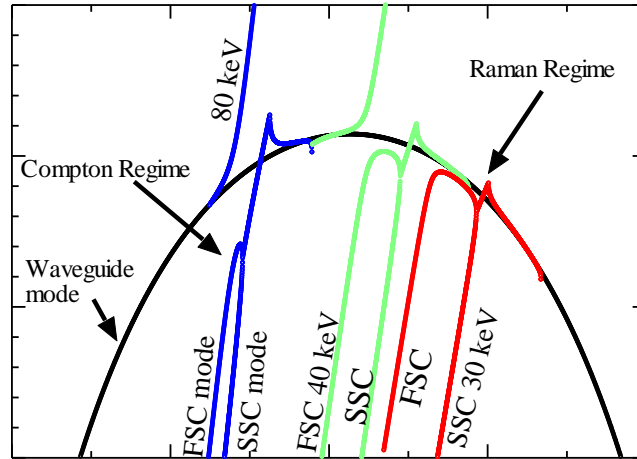


Fig. 1.6 Interaction between beam modes and waveguide mode in Compton regime or Raman regime.

### 1.3 Orotron と Ledatron

Orotron と Ledatron は Fig. 17 と Fig. 18 に示すよに、平板の周期構造に導体を反射板として設置した装置構成を取る。Orotron は 1969 年にロシアの F. S. Russin らによって最初に報告された[19]。その後 1973 年に日本の K. Mizuno らによって Ledatron が報告され、Ledatron や Orotron のような構成の装置では二つのモードが存在し、それぞれが電磁波の放射に寄与することを指摘した[16]。二つのモードというのが表面波モードと Fabry-Perot 共振モードである。Fabry-Perot 共振モードは周期構造と反射板の間に形成される空洞共振モードで、テラヘルツ波を扱う上で広く応用されている[20]。Orotron 放射はさらに、ビームのバンチングによって放射強度が上昇することが報告されている[21, 22]。

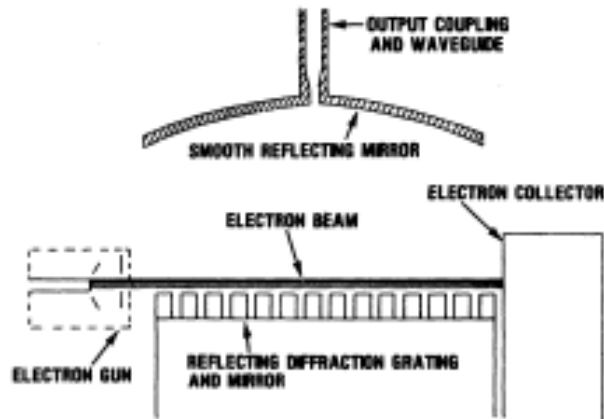


Fig. 1.7 Schematic of Orotron.(Reproduced from ref. [19]).

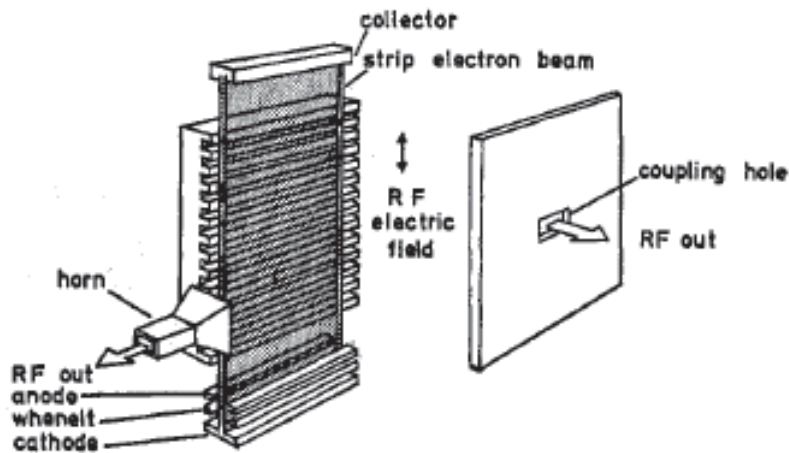


Fig. 1.8 Schematic of Ledatron (Reproduced from ref. [16]).

#### 1.4 Smith-Purcell 放射

SP 放射は Fig. 1.9 に示すように、回折格子のそばを電子ビームが伝播することで電磁波を発生させる現象である。1953 年に S. J. Smith と E. M. Purcell によって報告されて以来、テラヘルツ帯から可視光にいたるまで広い周波数帯で研究されてきた[17]。SP 放射の周波数は以下の式で決定される。

$$f = |n| \frac{c}{z_0} \left( \frac{1}{\beta} - \cos\theta \right)^{-1} \quad (1-5)$$

ここで  $n$  は回折次数、 $\theta$  は回折格子に対する放射の角度である。SP 放射は自然放射であるため、本来の放射強度は低い。しかしその放射強度がビームのバンチングによって増強できることが 1998 年に報告されてから、SP 放射の大強度化の研究が広く行われるようになった

[23]。

離散的なモードを励起する表面波動作や Ledatron 放射とは異なり、SP 放射は  $0 < \theta < 180^\circ$  の範囲の連続的に放射が発生する。この点に関して興味深い報告が 2015 年に N. Yamamoto らによってなされている[24]。文献では可視光領域の SP 放射と表面プラズモンポラリトンモードの間に Fano 共鳴に似た特徴が顕れるとしている。Fano 共鳴は連続準位と離散準位の間を生じる共鳴である。表面プラズモンポラリトンモードと交わる点で SP 放射の強度が増大する。離散的なモードを利用することにより、SP 放射も離散的な周波数で放射が発生できることを示唆している。

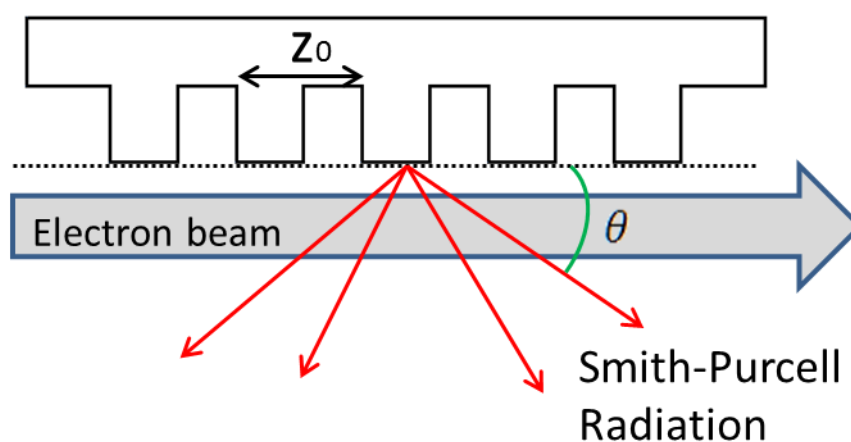


Fig. 1.9 Schematic of Smith-Purcell radiation.

### 1.5 電子ビームのバンチング

電子ビームに粗密の波が生じることをビームのバンチングと呼ぶ。電子ビームをバンチングすることで SP 放射や Ledatron 放射の強度が増大することが報告されている。バンチングの方法として線形加速器を利用する場合と[25,26]、表面波との相互作用によりバンチングされる場合がある[27, 28]。表面波と電子ビームの相互作用が生じるとき、電子ビームは表面波の周波数でバンチングされる。バンチングされた電子ビームは表面波の周波数だけでなく、その整数倍の周波数成分も持つ。この表面波の整数倍の周波数成分のことを、表面波の時間的高調波と呼ぶ。時間的高調波と一致する点で SP 放射や Ledatron 放射の強度が強くなる。表面波によるバンチングには、同一の周期構造でバンチングを行って放射を発生させるセルフバンチングと、バンチングを行う周期構造と放射を発生させる周期構造を分けるプレバンチングがある[29]。

## 第2章 実験装置

### 2.1 実験装置構成

本研究で用いる実験装置の模式図を Fig. 2.1 に示す。真空容器内にカソードとビームリミッター、周期構造を持つコルゲート導波管が設置されている。カソードにはパルスパワーシステムと呼ばれる電圧源が接続されており、カソードにパルス電圧を印加することで電子ビームを発生させる。ビームリミッターはアノードとして利用される。電子ビームは導波管内を軸方向に伝播し、周期構造と相互作用することで大強度電磁波を発生させる。発生した電磁波は直管導波管を通して出力窓から放射され、検出システムにより観測される。真空容器内にはロゴスキーコイルが設置されており、電子ビームの電流量を測ることができる。真空容器の外側には10個の磁場コイルが設置されており、軸方向に一樣な外部磁場を発生させる。電圧源とロゴスキーコイル、検出システムは10 m の同軸ケーブルでオシロスコープに接続されている。

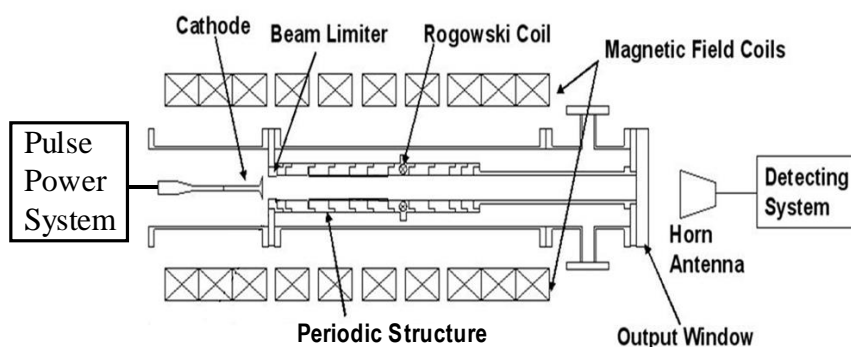


Fig. 2.1 Schematic diagram of the experimental setup.

### 2.2 パルスパワーシステム

本実験では二種類のパルスパワーシステムを用いる。100 kV までのパルス電圧を発生させる際にはマルクスジェネレーター (Marx Generator: MG) をパルスフォーミングライン (Pulse Forming Line: PFL) に接続したものをパルスパワーシステムとして使う。Fig. 2.2 に MG の写真を、Fig. 2.3 に PFL の写真を示す。MG はコンデンサを並列に接続した上で充電し、直列接続へ切り替えることでインパルス高電圧を発生させる装置である。当研究室の MG はニチコン社製 IG-H200 を使用している。この MG は最大で 200 kV を得ることができる。PFL は MG により発生させたインパルス電圧を圧縮しパルスパワーに変換するための回路である。同軸構造になっており、外部導体と内部導体の間に純水を循環させて絶縁している。純水はポンプを用いて循環させ、イオン交換樹脂を通してろ過することで絶縁特性を一定に保っている。PFL の寸法は全長が 1 m、外部導体の内径が 261.4 mm、内部導体の

外形は 89.2 mm である。PFL にはギャップスイッチが接続されており、ギャップ間の距離を 0.5 から 5 mm の間で変更することでカソードに印加される電圧を変えることができる。

30 kV までの MG と比べて低い電圧領域では小型 MPC 電源をパルスパワーシステムとして用いる。小型 MPC 電源の写真を Fig. 2.4 に示す。小型 MPC 電源は株式会社末松電子製作所製の MPC3010S-25LN である。磁気パルス圧縮(magnetic pulse compression: MPC)方式を採用することで MG と比べて小型軽量の装置構成ができ、テラヘルツ波源の小型化に都合が良い。

これらパルスパワーシステムからカソードに印加される電圧は分配抵抗を用いて 1/13000 に減衰してオシロスコープで観測される。



Fig. 2.2 Photo of Marx generator.



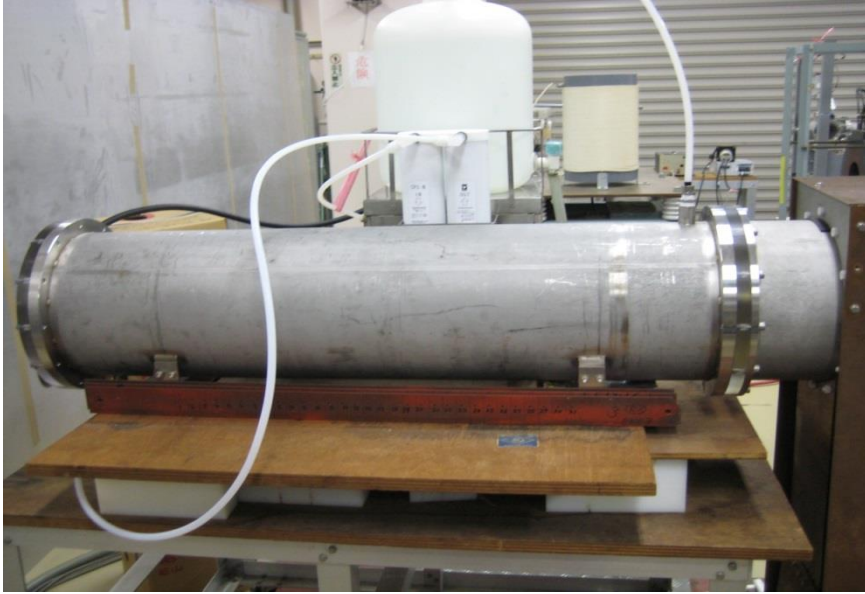


Fig. 2.3 Photo of pulse forming line.



Fig. 2.4 Photo of MPC voltage supply.

### 2.3 電子ビーム源

電子ビーム源としてコールドディスクカソードを用いている[30,31]。Fig. 2.5 にカソードの写真を示す。カソードの径は 26 mm のものと 29 mm のものを今回の実験では使う。カソードの縁にはベルベットと呼ばれる誘電体繊維を貼り付けており、電子ビームが安定して生じるようにしている。アノードにはステンレス製のビームリミッターを利用している。その内径は 26.6 mm のものと 29.7 mm のものを今回の実験では用いる。2.2 節で説明したパルスパワーシステムからカソードへ電圧を印加することで電子ビームが発生する。

発生する電子ビームは、カソード印加電圧を  $V_c$  [kV] としたとき、ビームエネルギー  $V_c$  [keV] を持つ。ビームエネルギーからは電子ビームの相対論因子  $\gamma$  や規格化された速度  $\beta$  が求められる。電子の静止質量のエネルギーを 511 keV とすると、カソード印加電圧  $V_c$  [keV]



により加速された電子が持つエネルギーは  $511 + V_c$  [keV] となる。相対論因子は加速後のエネルギーと静止質量のエネルギーの比  $\gamma = (511 + V_c)/511$  である。また、 $\beta = (1 - \gamma^{-2})^{1/2}$  である。本論文では、ビームエネルギーが 100 keV 以下の電子ビームを弱い相対論的電子ビーム、10 keV 以下の電子ビームを非相対論的電子ビームと呼ぶ。100 keV のとき  $\beta \approx 0.26$ 、10 keV のとき  $\beta \approx 0.093$  であるから、電子の速度が光速の約 25 % 以下を弱い相対論的領域、約 10 % 以下を非相対論的領域とする。

カソードから発生するビームの形状は感熱紙に焼き付けることで確認した。29 mm のカソードについての結果を Figs. 2.6(a) と (b) に示す。(a) は PFL を電圧源にして焼き付けたものである。円環状の痕跡が得られた。この時のカソード印加電圧とビーム電流の最大値は 79 kV と 358 A である。(b) は小型 MPC 電源を用いて観測したビームの焼付け跡である。(b) については 5 回ビームを重ねて焼き付けることで観測した。5 回の平均電圧は  $26.5 \pm 0.5$  kV、平均電流は  $48.1 \pm 2.3$  A である。なお、感熱紙はアノードより 228 mm 遠ざけた位置に設置した。焼付け跡は両方とも径が 29 mm である。

アノードとカソード間の距離は 0 から 25 mm 程度までで距離を変更できる。本論文中で特に断りがなければ、アノード・カソード間距離を 10 mm に固定して実験を行う。



Fig. 2.5 Cold disk cathode whose diameter is 29 mm. (Reproduced from Ref. [32].)

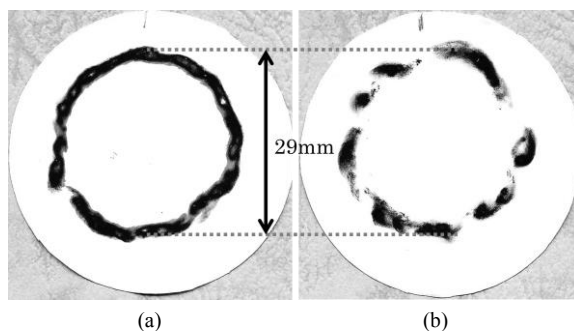


Fig. 2.6 (a) Form of electron beam printed on thermal paper with about 79 keV and (b) 26 keV. (Reproduced from Ref. [32].)

## 2.4 外部磁場源

外部磁場を発生させるためにテクノ電気工業(株)製のソレノイドコイルが10個設置されている。その写真を Fig. 2.7 に示す。コイルに流す電流量を変えることで磁束密度を変更でき、最大で1 T (500 A 時) まで流すことが出来る。コイルに流す電流量は磁場コイル電源の設定を変えることで制御する。電源制御部にある出力電流設定目盛と出力電流、発生する磁場の磁束密度は Table 2.1 に示す通りである。本論文においては出力電流設定目盛を 8.5 に固定し、磁場を 0.82 T にして実験を行う。磁場コイルは一回の動作につき、2 秒間磁場を発生させる設定となっており、動作後は 60 秒のインターバルをはさむ。

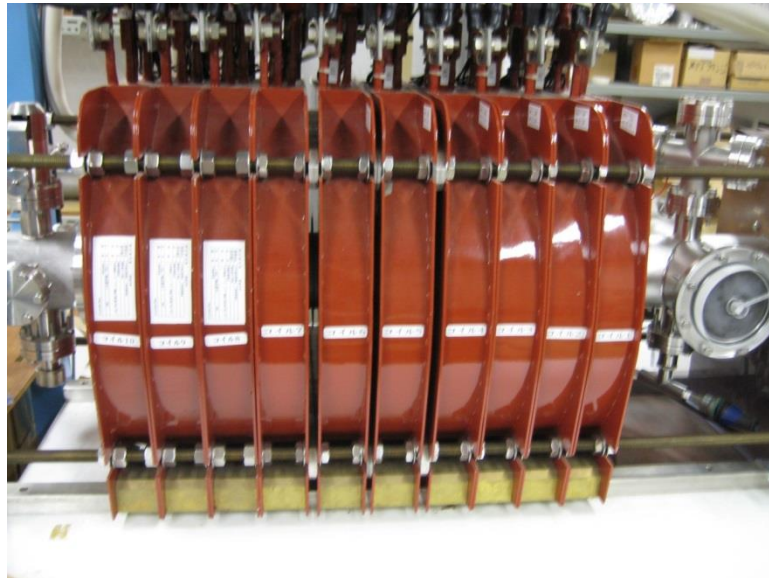


Fig. 2.7 Photo of magnetic coils.

Table 2.1 Coil current and generated magnetic field.

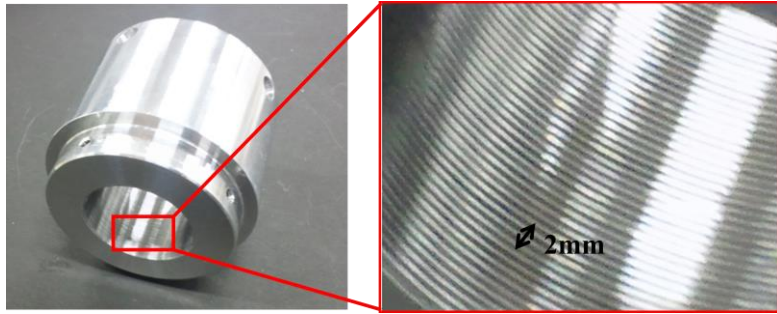
出力電流設定	磁場コイルに流れる電流値[A]	軸方向の磁束密度[T]
1	36.6	0.0789
2	86.7	0.177
3	138.4	0.276
4	188.6	0.375
5	242.7	0.473
6	291.6	0.572
7	345.2	0.67
8	398.6	0.769
9	449.6	0.868
10	501.4	0.986

## 2.5 コルゲート導波管

本研究では内壁に矩形周期構造を持つ円筒コルゲート導波管を発振器として用いる。Fig.2.8に W-band(0.1 THz)と K-band(25 GHz)のコルゲート導波管の写真, 周期構造の模式図を載せる。コルゲート導波管はアルミ製である。また、模式図に載せた周期構造の寸法を Table 2.2 に示す。寸法のパラメータはそれぞれ、 $R_0$ が導波管の平均半径、 $z_0$ が周期構造の一周期の長さ、 $d$ が溝の長さ、 $h$ が周期構造の振幅である。周期構造の寸法により、発振器の周波数帯が決まる。周期構造には電磁波の位相速度を下げる効果があり、そのため遅波構造(slow wave structure: SWS)とも呼ばれる。

Table 2.2 Size parameters of K-band and W-band corrugated waveguide.

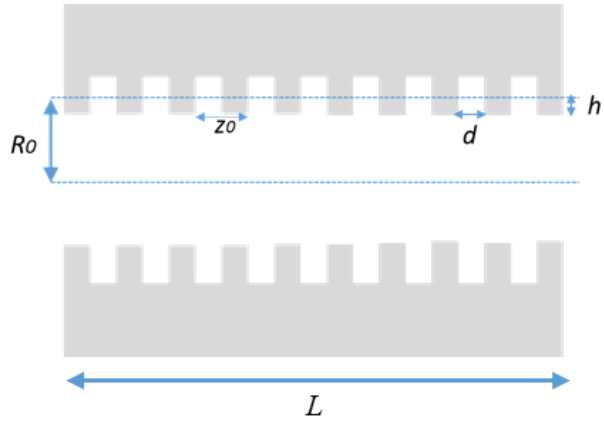
	$R_0$	$z_0$	$d$	$h$
K-band	14.6 mm	2.0 mm	1.0 mm	1.3 mm
W-band	15.1 mm	0.5 mm	0.3 mm	0.3 mm



(a)



(b)



(c)

Fig. 2.8 (a) Photo of W-band corrugated waveguide. (Reproduced from Ref. [32].) (b) Photo of K-band corrugated waveguide. (c) Schematic of corrugated waveguide with the size parameters of periodic structure. (Reproduced from Ref. [33].)

## 2.6 検出システム

SWOによって発生する放射は検出システムによって検出される。検出システムはホーンアンテナ、カットオフ導波管、減衰器、検出器で構成されている。本実験で使う検出システムは周波数帯で分類され、それぞれ K-band, U-band, F-band, D-band, G-band, Y-band である。これらは EIA standard に従う。ホーンアンテナの一例として D-band と Y-band のホーンアンテナの写真を Fig. 2.10 に載せる。ホーンアンテナの開口面は長方形になっている。実験では TM モードの放射を観測するために長辺を縦にして設置する。各ホーンアンテナの開口面積は Table 2.2 のようになる。カットオフ導波管は High pass filter として利用され、そのカットオフ周波数により観測した電磁波の周波数下限を決めることが出来る。上記の K-から Y-band までのカットオフ導波管のほか、151-GHz high-pass filter も本実験では利用する。カットオフ導波管のカットオフ周波数は Table 2.3 に示す通りである。

検出システムは Fig. 2.12 に載せるように、基本的には出力窓から角度  $\varphi$ 、距離  $D$  の位置に設置する。本論文中では特に断りがない場合  $D = 600 \text{ mm}$  に固定する。角度  $\varphi$  は  $-90^\circ$  から  $90^\circ$  の間で変更できる。出力窓からの放射の角度は導波管モードのモード数によって決定されるため、検出システムの角度を変更することで、放射に寄与しているモードを調べることが出来る[34,35]。

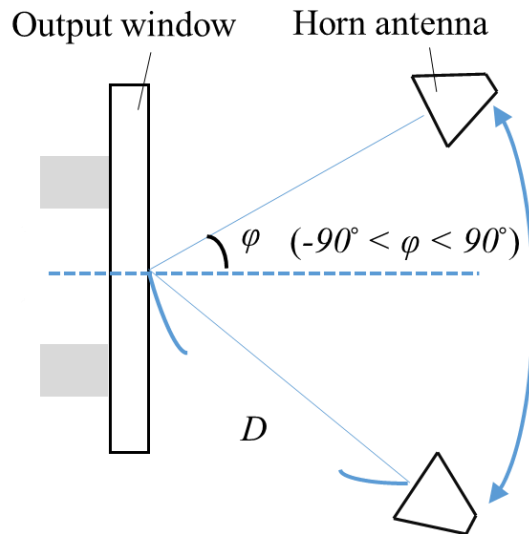


Fig. 2.9 Position of horn antenna.

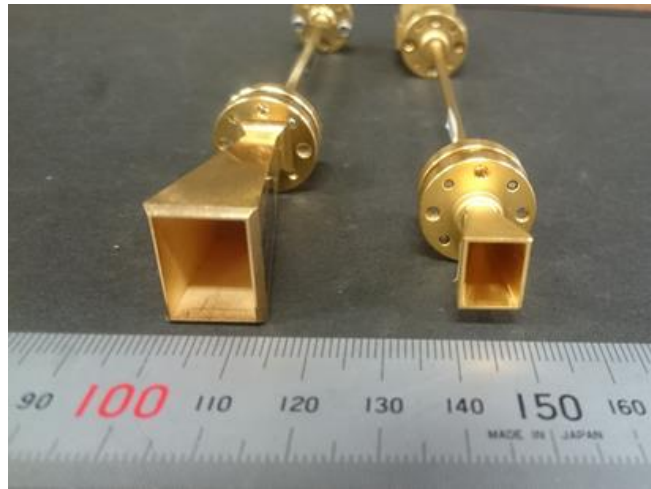


Fig. 2.10 Photo of D- and Y-band horn antennas

Table 2.2 Aperture of horn antennas

アンテナ	面積(mm <sup>2</sup> )
K-band	2692
U-band	1623
F-band	292
D-band	188
Y-band	11

TABLE 2.3 Frequency bands of the detecting system

Detector	Cutoff frequency	Recommended Frequency
K-band	14 GHz	17.6 – 26.7 GHz
U-band	31 GHz	39.3 – 59.7 GHz
F-band	74 GHz	90 – 140 GHz
D-band	91 GHz	110 – 170 GHz
G-band	116 GHz	140 – 220 GHz
Y-band	137 GHz	170 – 220 GHz

## 第3章 0.1 THz 帯表面波発振実験

### 3.1 実験背景

この実験では 0.1 THz 帯矩形コルゲート導波管に弱い相対論的電子ビームを入射し、表面波放射を発生させる。BWO 領域と TWT 領域の両方で放射を確認し、その特性を調べる。電子ビームのエネルギーは 10 から 100 keV の間で変化させる。ビーム電流量は 10 から 100 A オーダーの間である。

2.4 節で述べた周期構造のパラメータからコルゲート導波管に形成される電磁界モードの分散関係が計算できる。以下 Fig. 3.1 に  $TM_{01}$  モードの分散関係を載せる。ここで点線はそれぞれ光速線と 30 keV のビーム線を表している。太い実線が  $TM_{01}$  モードの分散曲線である。 $TM_{01}$  モードの位相速度は光速より遅い遅波となっていることが分かる。したがって  $TM_{01}$  モードはコルゲート表面に電界強度が集中する表面波を形成すると考えられる。また、表面波は  $\pi$ -point ( $62.83 \text{ cm}^{-1}$ ) で群速度が 0 となる。また、 $62.83$  から  $125.6 \text{ cm}^{-1}$  で群速度が負となる BWO 領域、0 から  $62.83 \text{ cm}^{-1}$  で群速度が正となる TWT 領域を形成する。ビーム線と分散関係曲線の交わる点で電子ビームと表面波の間に相互作用が生じ、表面波放射が発生すると考えられる。30 keV のビーム線が  $\pi$ -point 付近で分散関係曲線と交わっていることから、ビームエネルギーが 30 keV 以下では BWO, 30 keV 以上では TWT として動作する。細い実線はそれぞれ F-band と G-band 検出システムのカットオフ周波数を示している。

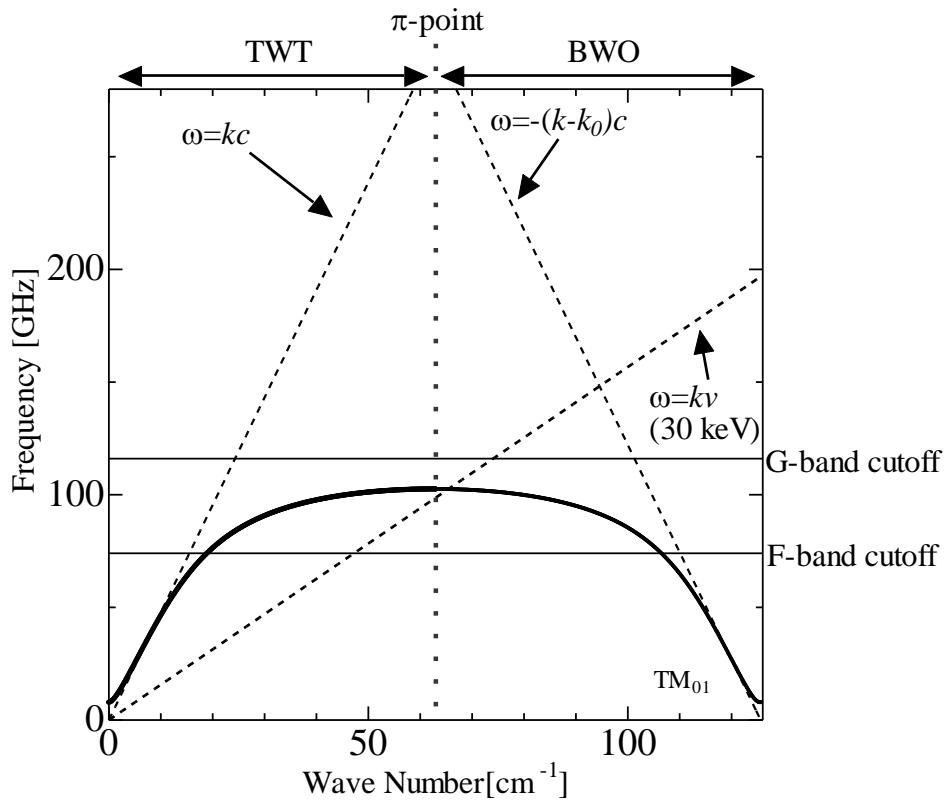


Fig. 3.1 Dispersion relation of 0.1-THz corrugated waveguide  $TM_{01}$  mode. Dashed line is 30 keV beam line which intersects  $TM_{01}$  mode at  $\pi$ -point.

## 3.2 実験結果

### 3.2.1 BWO 領域における実験

はじめに小型 MPC 電源を用いた実験結果について述べる。MPC 電源を用いてカソードに電圧を印加し、発生した電子ビームをコルゲート導波管に入射する。周期構造の周期数は 40 周期である。F-band と D-band の検出システムによって検出された信号の時間発展を Fig. 3.2 に示す。上からカソード印加電圧、ビーム電流、F-と D-band のマイクロ波信号の時間変化である。電圧源、ログスキーコイル、マイクロ波検出用ダイオードは等しい長さの同軸線路を介してオシロスコープ接続されているため、Fig. 3.2 の電圧、電流、マイクロ波信号は同時刻に計測されたものだと言える。F-band での検出信号のピークにおいてカソード印加電圧は約 15 kV である。次に D-band を G-band に変更した結果を Fig. 6 に示す。マイクロ波が G-band で確認されないことから、発生したマイクロ波の周波数が G-band のカットオフ周波数より低いことが分かる。以上の結果から、発生したマイクロ波の周波数は 91 から 116 GHz の間である。Fig. 7 には、カソード印加電圧に対するマイクロ波出力とビーム電流の依存性を示す。マイクロ波は 12 から 20 kV 程度で発生している。Fig. 3.1 の分散



関係曲線より、この電圧領域において SWO は BWO として動作し、発振周波数は 93 から 100 GHz 程度である。

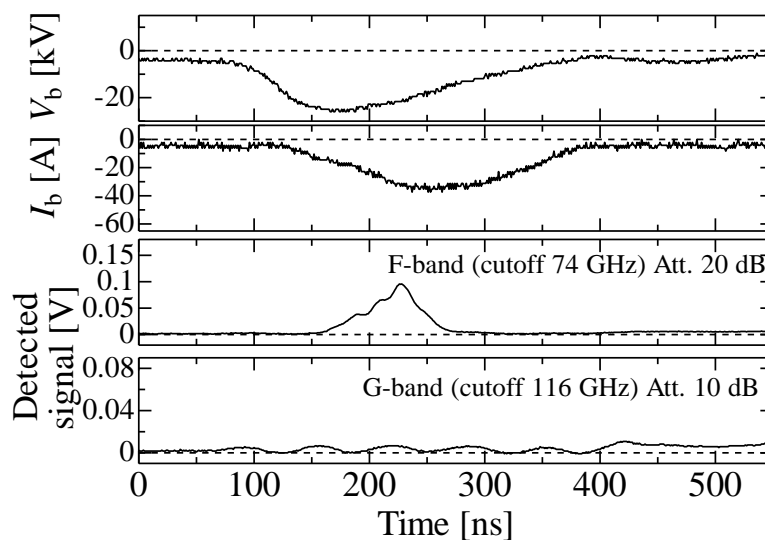


Fig. 3.2 Time evolutions of applied voltage, electron beam current, and detected signals by F- and G-band detecting systems. (Reproduced from ref [32]).

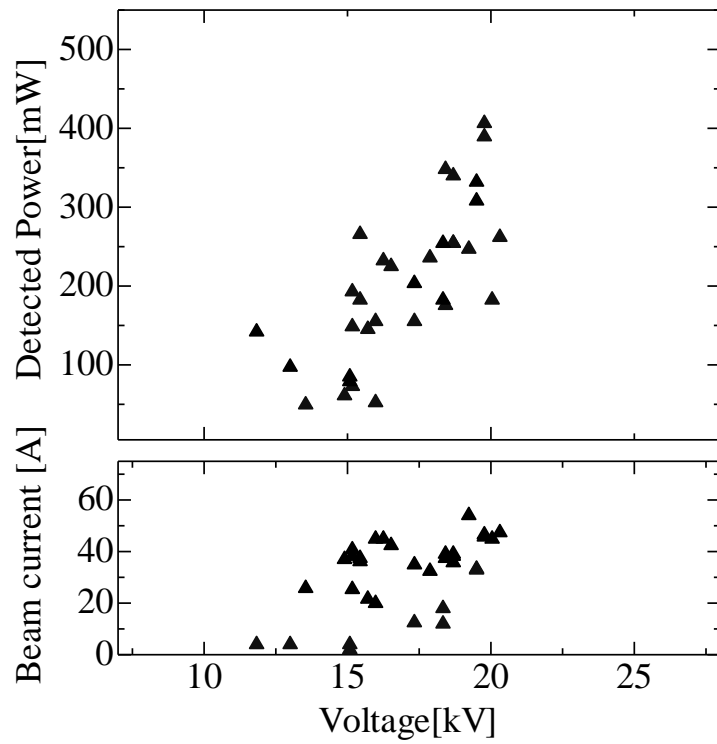


Fig. 3.3 Dependence of electron beam current and detected power on applied voltage in BWO operation. (Reproduced from ref. [32]).

### 3.2.2 TWT 領域における実験

次に電圧源として PFL を用いた動作実験を行った。F-band と Y-band により検出した信号の時間発展の結果を Fig. 3.4 に示す。上からカソード印加電圧とビーム電流、F-band 及び Y-band で検出されたマイクロ波信号の時間変化である。各マイクロ波検出信号のピークは異なる時間に観測されている。F-band での信号のピークにおいて電圧値は約 60 kV である。パワー校正を元に検出信号を放射出力に変換すると、4.15 W である。Y-band で検出された信号は、一つ目のピークにおいて約 77 kV であり、二つ目のピークにおいて約 79 kV である。信号の出力は、一つ目のピークが 85.11 mW、二つ目のピークが 261.35 mW である。これらのピークにおける電圧値に対し SWO は TWT として動作する。TWT 動作において表面波は正の群速度を持ち、フィードバックが起これないため通常はマイクロ波を生じない。しかし有限の長さを持つ SWS の端点で表面波が反射することで、負の群速度を持つ表面波に変換され、マイクロ波を発生させたと考えられる[36]。F-band の信号は、Y-band の二つ目の信号と同時に立ちあがっているが、立下りは Y-band より約 30 ns 遅い。F-band の信号で検出される時間や出力が異なることから、F-band で検出されたマイクロ波は Y-band では検出されておらず、それぞれ異なる周波数帯のマイクロ波を検出していると考えられる。この時 F-band で確認されたマイクロ波の周波数は F-band のカットオフ周波数 74 GHz より高く、Y-band のカットオフ周波数 137 GHz より低い。Fig. 3.1 の分散関係曲線より、80 keV 以下のビーム線は 74 から 137 GHz までの周波数帯で 0.1-THz 帯周期構造の表面波(TM<sub>01</sub>)モードと交わる。このことから、F-band で検出されたマイクロ波信号は表面波の励起により発生したものと考えられる。一方 Y-band で観測されたマイクロ波はカットオフ周波数 137 GHz よりも周波数が高く、これは TM<sub>01</sub> モードのアップパーカットオフ周波数より大きい。よって Y-band で確認されたマイクロ波は表面波によるものではないと考えられる。

そこで TM<sub>01</sub> モードによらないマイクロ波の発振機構として高次モードの励起が考えられる。高次モードを含む分散関係を Fig. 3.5 に示す。高次モードは位相速度が光速より速い速波領域に存在しており、体積波として導波管内に形成される。これらの高次モードは群速度が 0 となる  $2\pi$ -point で励起でき、Ledatron 放射を発生させる。点線は Y-band のカットオフ周波数である。Y-band で一つ目の発振が確認された時に F-band で表面波による信号が観測されないのは、発生したマイクロ波が 2.6 節に示した F-band ダイオードの推奨周波数を上回っていること、また減衰器により有意な信号が得られなかったためと考えられる。また、F-band の信号の立ち下がりが Y-band の二つ目の信号より遅いのは、高次モードの励起により表面波モードが抑えられたためと考えられる。ここで、Fig. 3.4 の動作実験と同一の条件で行った実験における時間発展の結果を Fig. 3.6(a)に示す。F-band の信号ピークと Y-band の信号ピークは同じ時間に検出されており、信号の立下りの遅れは見られない。Fig.3.6(b)は、Fig. 3.4 と Fig. 3.6(a)における印加電圧とビーム電流の時間発展をそれぞれ重ねたものである。Fig. 3.4 の結果を実線、Fig. 3.6(a)の結果を破線で示した。全時間で電

圧、電流ともにほぼ一致しており、Fig. 3.4におけるF-band信号の立下りの遅れは印加電圧とビーム電流に関係しないことが分かる。そこでFig. 3.4とFig. 3.6の結果を含めた4回の動作実験の結果について、F-とY-band信号のピーク出力の関係をFig. 3.7(a)に示す。実線は近似直線であり、傾きが-107.3、切片が31695.3である。Y-band信号のピークにおけるカソード印加電圧の平均は $79.35 \pm 1.18$  kV、ビーム電流の平均値は $451.00 \pm 27.17$  Aである。Y-band信号のピーク出力が大きくなるほどF-band信号のピーク出力が小さくなることが分かる。またFig. 3.8(b)に示すのはY-band信号のピーク出力値に対し、Y-とF-band信号のピークが検出される時間の差を示したものである。Y-bandの信号が強くなるほど、F-とY-bandピーク間の時間差が大きくなっている。以上から、F-band信号の立下りが遅れたのは、高次モードの励起が止まった後、抑えられていた表面波モードの励起が遅れて強まったためと考えられる。この現象は文献[16]のK. Mizuno氏等のLedatron研究において、mode pullingと呼ばれ論じられている。

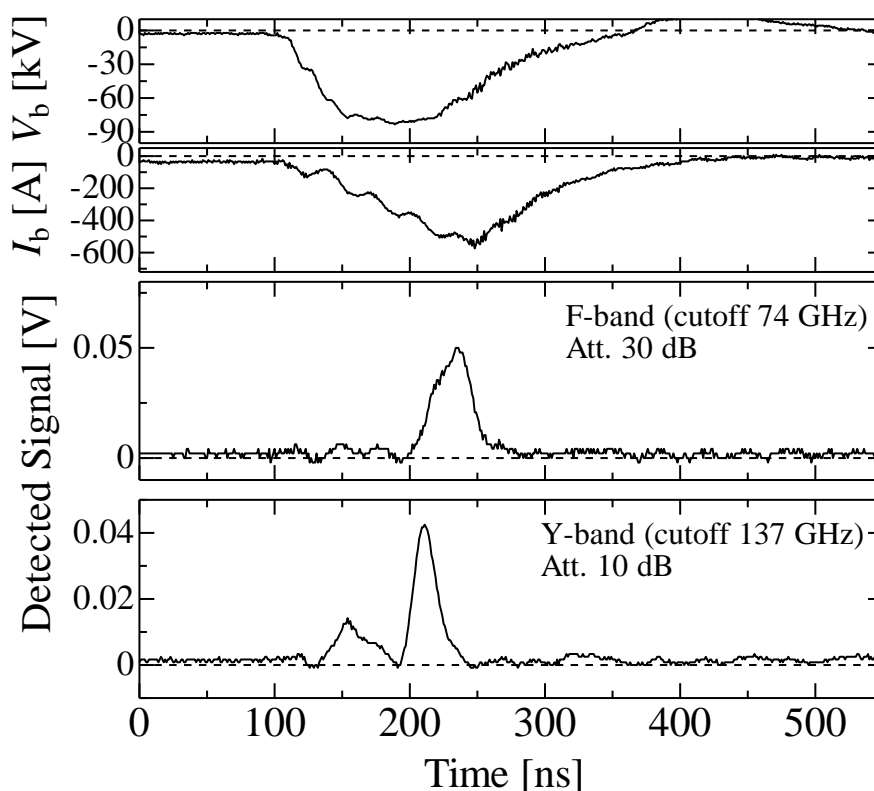


Fig. 3.4 Time evolutions of applied voltage, electron beam current and detected signals by F- and Y-band detecting systems with high pass filter 74 and 137 GHz. Signals of microwave due to surface wave and higher order mode are detected. (Reproduced from ref. [32]).

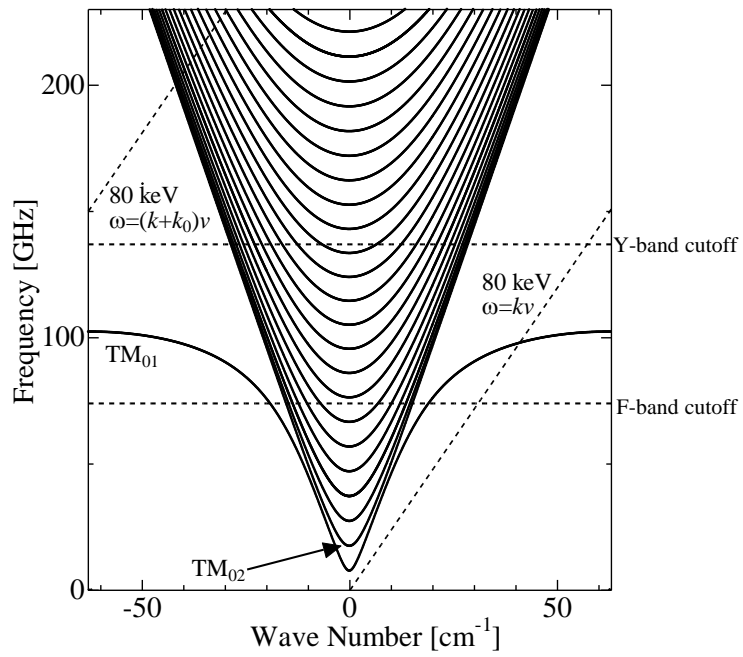
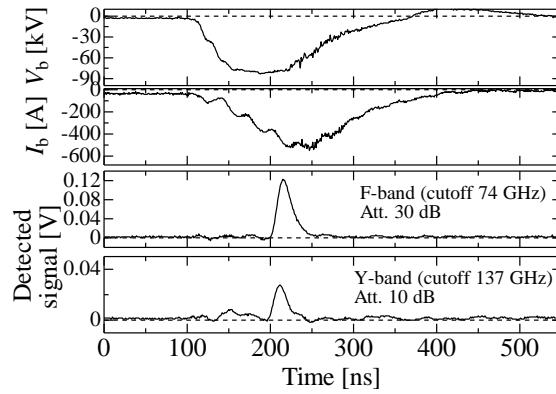
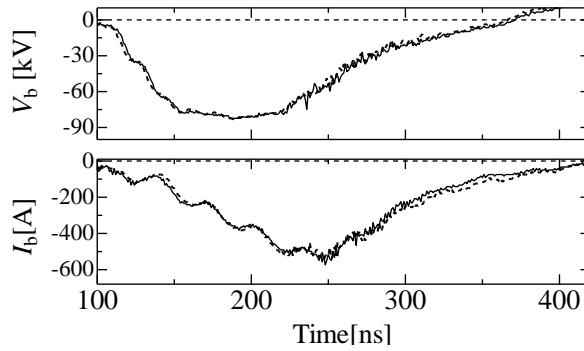


Fig. 3.5 Dispersion relation of surface wave (TM<sub>01</sub>) and higher-order modes (TM<sub>02</sub> and more) based on reduced zone scheme. (Reproduced from ref. [32]).

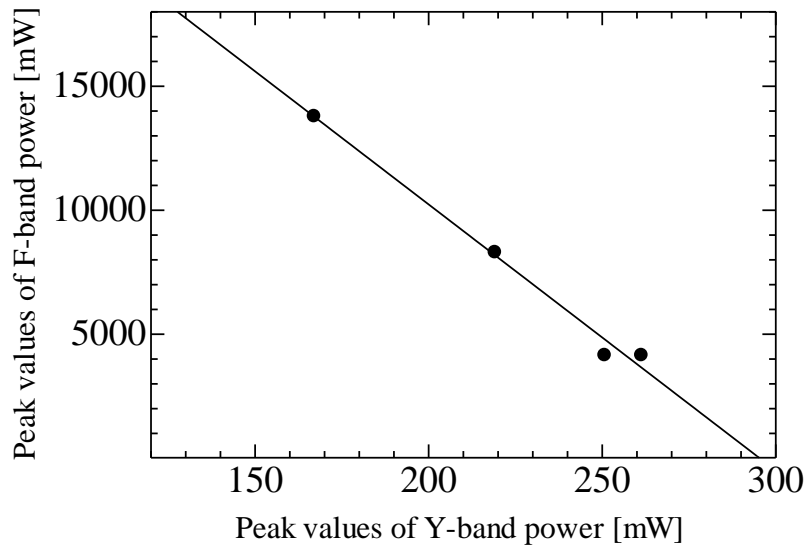


(a)

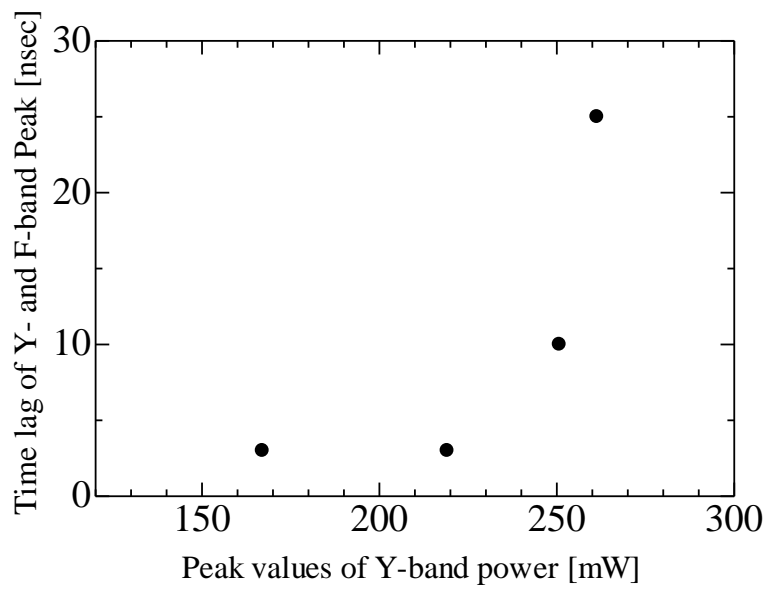


(b)

Fig. 3.6 (a) Time evolution of experimental result with same condition as Fig. 8. Peaks of F-band signal and Y-band second signal are detected at same time. (b) Time evolution of applied voltage and beam current of Fig. 8 and Fig. 10(a). Solid line is of Fig. 8 and dotted line is of Fig. 10(a). These are almost fitted. (Reproduced from ref. [32]).



(a)



(b)

Fig. 3.7 (a) Peak values of Y-band signal versus Peak values of F-band signal. The solid line is linear approximate line. (b) Peak values of Y-band signal versus Time lags from Y-band peak to F-band peak. (Reproduced from ref. [32]).

### 3.3 結論

0.1 THz 帯コルゲート導波管を用いた表面波発振実験を行った。表面波放射は BWO 領域と TWT 領域の両方で確認された。TWT 領域では表面波放射と同時に高次モードの励起による発振が確認された。表面波と高次モードが同時に励起される際、モード引き込みと呼ばれる現象が生じ、表面波による放射と高次モードによる放射の出力の間に反比例の関係が見られた。



## 第4章 Ledatron 放射と Smith-Purcell 放射確認実験

### 4.1 実験背景

第3章では表面波の励起によるテラヘルツ波の発振実験を行った。一方、コルゲート導波管によるテラヘルツ波の発振機構は表面波の励起のほかに、SP 放射や Ledatron 放射の発生が期待される。SP 放射は電子ビームが周期構造のそばを通る際に電磁波を発生させる現象である。コルゲート導波管は内壁に周期構造を持つことから、電子ビームによって SP 放射を発生させる。Ledatron 放射は Fabry-Perot 共振器モードを電子ビームが励起することで生じる放射である。コルゲート導波管には表面波以外にも高次モードと呼ばれる電磁界モードが体積波として存在する。この高次モードを群速度が 0 になる点で励起することで、Ledatron として動作しうる。Ledatron と SP 放射は表面波放射よりも高い周波数で電磁波を発生でき、テラヘルツ波源の高周波数化や周波数可変性を高める上で興味深い放射である。

本実験は 25 GHz 帯コルゲート導波管を用いた発振器を構成し、Ledatron 放射と SP 放射を観測することで両者の特性の違いを調べることを目的とする。

### 4.2 コルゲート導波管の電磁界モード

今回の実験では周期数が 20 の周期構造を持つ 25 GHz コルゲート導波管を用いて実験を行う。2.4 節に載せた周期構造の寸法から、コルゲート導波管内に形成される導波管モードの分散関係が計算できる。Fig. 4.1 に分散関係図を示す。フロケの定理より、導波管モードは波数空間において、 $k_0 = 2\pi/z_0 = 31.4 \text{ cm}^{-1}$  の周期で周期的になる。ここで緑と青の実線はそれぞれ 30 keV と 60 keV のビーム線  $\omega = (k + pk_0)v$  である。なお、 $\omega$  は角周波数、 $k$  は波数、 $v$  はビームの速度、 $p$  はフロケ高調波の次数である。TM<sub>01</sub> モードの位相速度が光速より遅いことから、表面波として形成されると考えられる。アップercットオフ周波数は 25 GHz である。群速度  $\pi$ -point ( $k_z = 15.7$  and  $-15.7 \text{ cm}^{-1}$ ) で 0、 $k_z$  が 0 から  $\pi$ -point の間で正、 $\pi$ -point から  $2\pi$ -point ( $k_z = 0$ ) で負となる。30 keV のビーム線が  $\pi$ -point 付近で TM<sub>01</sub> モードと交わっていることから、30 keV 以下のビームエネルギーで BWO, 30 keV 以上のビームエネルギーで TWT として発振器は動作する。TM<sub>01</sub> モード ( $l > 1$ ) は高次モードであり、 $\pi$ -point 付近の TM<sub>02</sub> モードを除き、位相速度が光速よりも大きい速波となっている。これら高次モードは体積波として導波管内に形成され、群速度が 0 になる  $2\pi$ -point 付近で励起されると Ledatron 放射を生じると考えられる。高次モードは複数のフロケ高調波が重なることで、75 GHz 以上の領域に Dense spectrum region を形成する[37]。この領域においてモード同士が緊密に存在しており、個別にモードを励起することが出来ない。電磁界の特性は自由空間における電磁波のそれに似るため、Dense spectrum region の高次モードはテラヘルツ波の放射に寄与しないと考えられる。点 Q, R, S, T は 4.3 節と 4.4 節で述べる

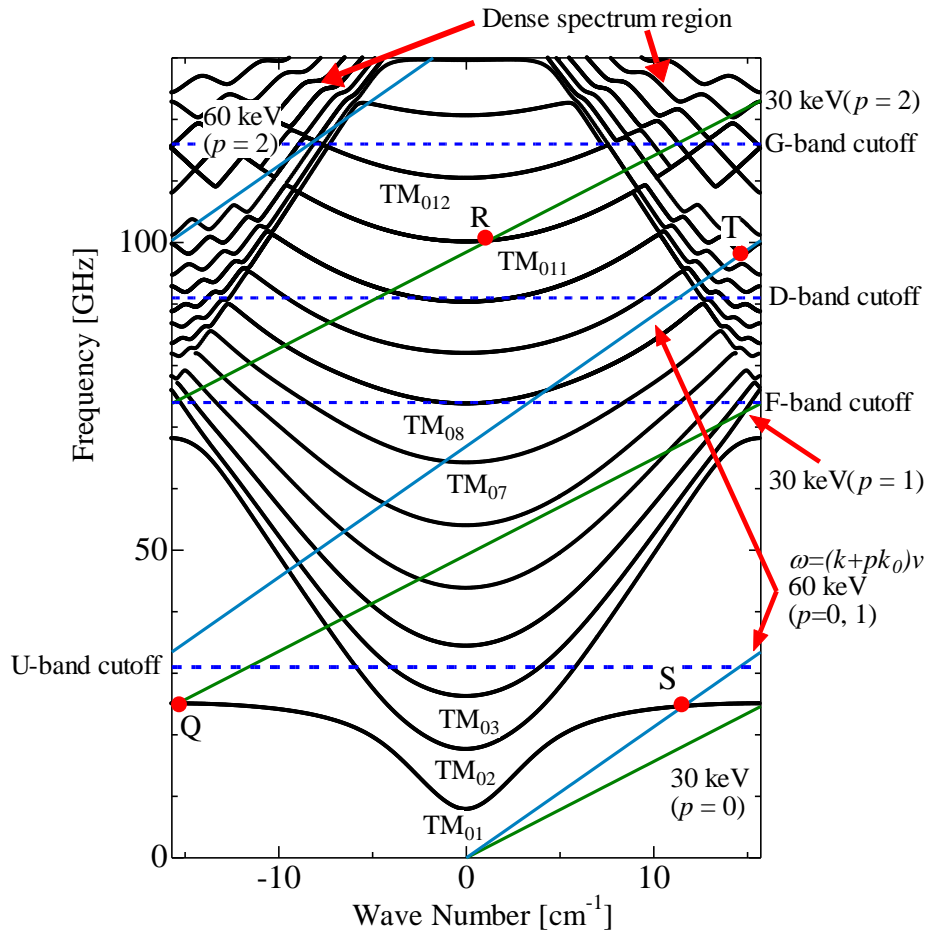


Fig. 4.1 Dispersion curves of surface wave ( $\text{TM}_{01}$ ) and higher-order modes ( $\text{TM}_{02}$  and more) based on reduced zone scheme. See Fig. 4.2 and Section IV for explanations on points Q, R, S and T.

### 4.3 Smith-Purcell 放射の周波数特性

Fig.5 に式(1)から求めた Smith-Purcell 放射の規格化した分散関係を載せる。横軸は  $k_0$  で規格化した波数、縦軸は規格化した周波数  $z\omega/c$  である。黒い実線は  $TM_{01}$  モードの分散曲線、緑色の実線は  $TM_{01}$  モードの分散曲線の波数と周波数をそれぞれ 4 倍にしたものである。点線は 30 keV と 60 keV のビーム線である。ビーム線は点 S と Q で  $TM_{01}$  モードと交わっており、この点でビームと表面波の間に相互作用が生じると考えられる。このとき電子ビームはバンチングされ、表面波の周波数の整数倍に時間的高調波を生じうる。4 倍高調波はビーム線が緑の実線と交わる点で発生する。ビーム線が表面波と点 S, Q で相互作用する場合、4 倍高調波は点 T, R にそれぞれ生じる。赤と青の実線はそれぞれ式(1)に  $n=-1, -2$  と  $\theta=0, 180^\circ$  を入れて計算した SP 放射の分散関係である。赤い線、青い線の間で SP 放射が生じる。Fig. 4.3 には SP 放射の周波数の電圧依存性を  $\theta = 0, 90^\circ, 180^\circ$  についてプロットした。実線は実験で用いる検出システムのカットオフ周波数を示している。点線はそれぞれ表面波の 2 倍、3 倍、4 倍高調波を示している。

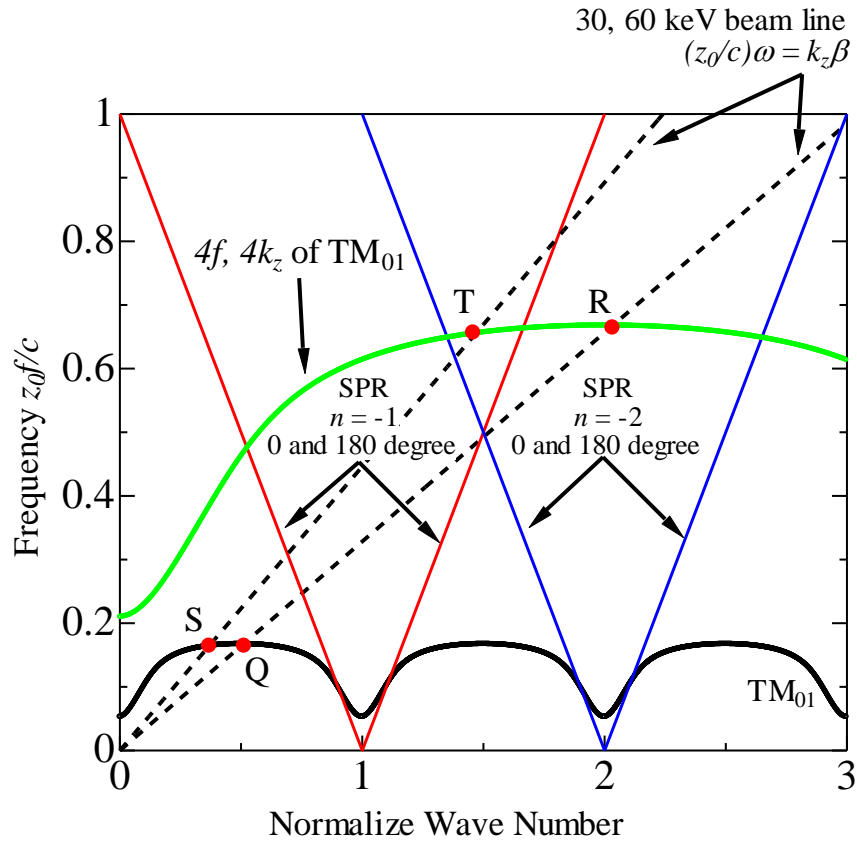


Fig. 4.2 Normalized dispersion curve of K-band slow-wave structure based on periodic scheme. Red and blue lines indicate the SP-radiation lines for angles  $\varphi = 0$  and  $180^\circ$  with  $n = -1$  and  $-2$ , respectively. Green curve corresponds to the quadruple of wavenumber and frequency of the  $TM_{01}$  mode. Fourth temporal harmonic of surface wave is induced at the intersection between green curve and beam line. Points S and Q denote operation points of surface-wave mode. Points T and R represent quadruple frequencies of S and Q, respectively. These points are discussed in Section 4.4.2.

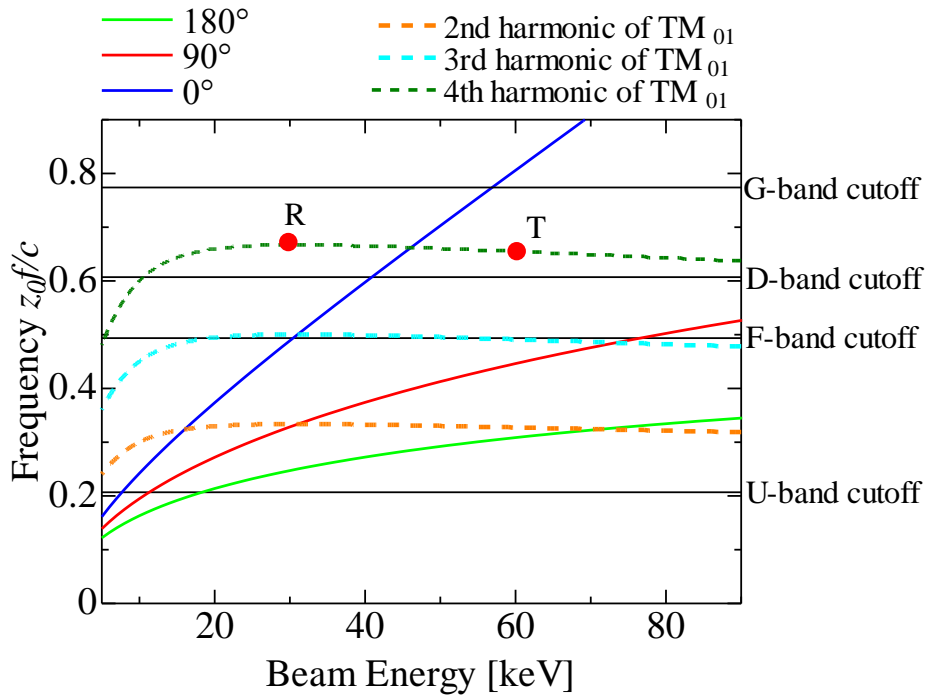


Fig. 4.3 Dependence of normalized frequency of SP radiation for  $n = -1$  on beam energy at radiation angles of  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ . Dotted lines indicate frequencies of temporal harmonics of  $TM_{01}$  mode. See Fig. 4.1 as regards points R and T.

## 4.4 実験結果

### 4.4.1 Ledatron 放射

実験では PFL を用いてカソードに電圧を印加し、電子ビームを発生させた。電子ビームを 20 周期のコルゲート導波管に入射し、放射を観測した。Fig. 4.4 に K-band と U-band の検出システムにより検出された信号の時間変化波形を載せる。なお K-band と U-band 信号はそれぞれ減衰器より 1/1000 と 1/100 に減衰されて検出されている。検出された信号は 61 ns のパルス幅を持つ。K-band と U-band の信号のピークは 185 ns に同時に観測されている。このとき電圧は 56 kV、電流は 349 A である。また、出力は K-band が 70 W であり、U-band は 15 W である。検出システムの周波数特性から、K-band 信号は表面波放射を観測したものである。一方で U-band で検出された信号はカットオフ周波数が表面波の周波数より十分大きいため、表面波の励起によるものではないと言える。次にカソード電圧を変化させて電圧に対する出力の依存性を Fig. 4.5 にプロットした。このプロットには 56 shots のデータが使用されている。K-band の放射は BWO 領域と TWT 領域の両方で確認された。K-band の最大出力は 100 W オーダーであり、TWT 領域で得られている。

U-band 信号も BWO と TWT 領域の両方で検出されている。40 keV 以下のビームエネルギーでは、分散関係においてビーム線は  $TM_{05}$  (45 GHz) と  $TM_{06}$  (55 GHz) の  $2\pi$ -point 付近で交わる。この点において Ledatron 放射の発生が期待できる。Ledatron 放射の出力は K-band 放射の 1/100 と小さい。このとき Ledatron 放射の周波数は表面波の二倍高調波 (50 GHz) と異なっている。一方 60 keV 以上のビームエネルギーでは U-band の出力レベルが 1 W 以上に増大する。この時、ビーム線  $TM_{08}$  モードの  $2\pi$ -point と 75 GHz で交わり、この周波数は表面波の 3 倍高調波と合致する。3 倍高調波との競合が Ledatron 放射の出力を増大させたと考えられる。

次にカソードとアノード間の距離を 7 から 12 mm の間で変化させて、U-band 出力の電流値依存性を片対数プロットした。Fig. 4.6 にそれを示す。Fig. 4.6(a) はビームエネルギーが  $30 \pm 2$  keV の範囲で検出したものである。このビームエネルギーのとき  $TM_{05}$  モードを  $2\pi$ -point 付近で励起させる。Fig. 4.6(b) はビームエネルギーが  $66 \pm 2$  keV の範囲で検出したデータを片対数プロットしている。このビームエネルギーのとき  $TM_{08}$  モードを  $2\pi$ -point 付近で励起させ、表面波の 3 倍高調波に一致する Ledatron 放射を発生させる。電流の範囲は (a) が 50 から 240 A、(b) は 170 から 500 A である。点線と実線は最小二乗法で得られたもので、点線は電流値に対する出力線形な増加を示しており、実線は (a) が  $I^4$ 、(b) が  $I^3$  に比例して増加することを示している。プロットしたデータは両方の図で点線よりかは実線に合致している。

Fig. 4.6(a) と (b) を 200 A で比べると (b) の Ledatron 放射は (a) よりも 10 倍出力が高い。ビームエネルギーの違いは 2 倍であるから、出力の増加はビームエネルギーの増加で説明できない。 $2\pi$ -point における  $TM_{05}$  モードの周波数が表面波の二倍高調波より小さいため、(a) の Ledatron 放射は高調波による大強度化の影響がなかったと考えられる。一方 (b) の

Ledatron は三倍高調波と周波数が一致するため、高い出力が得られた。

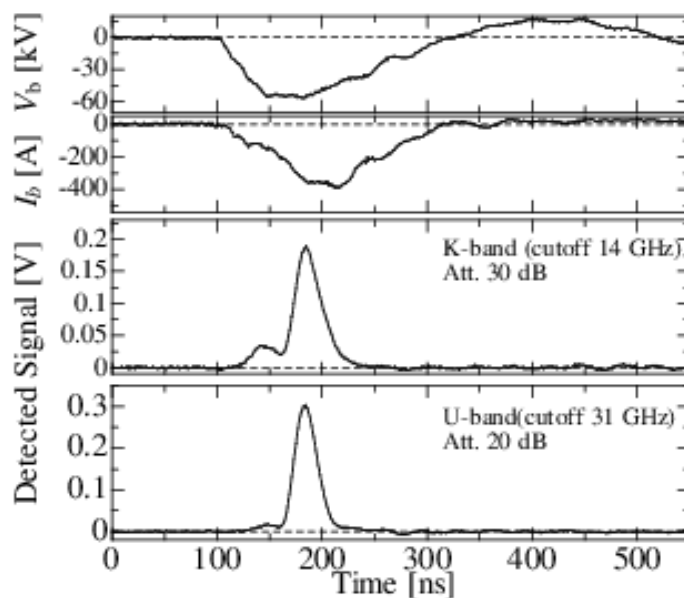


Fig. 4.4 Time evolution of cathode voltage, beam current, and detected signals of K- and U-band. Detection angles are  $5^\circ$  for K-band and  $-5^\circ$  for U-band. Anode-cathode distance is 10 mm.

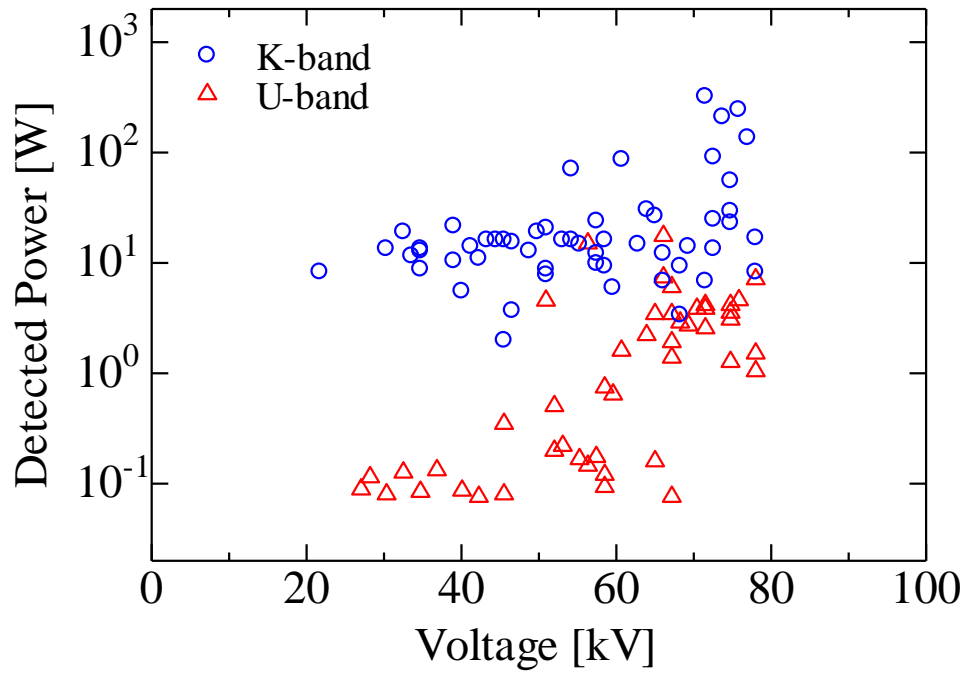


Fig. 4.5 Power detected by K- and U-band detecting systems as function of cathode voltage. Detection angles are  $5^\circ$  for K-band and  $-5^\circ$  for U-band. Anode-cathode distance is 10 mm.



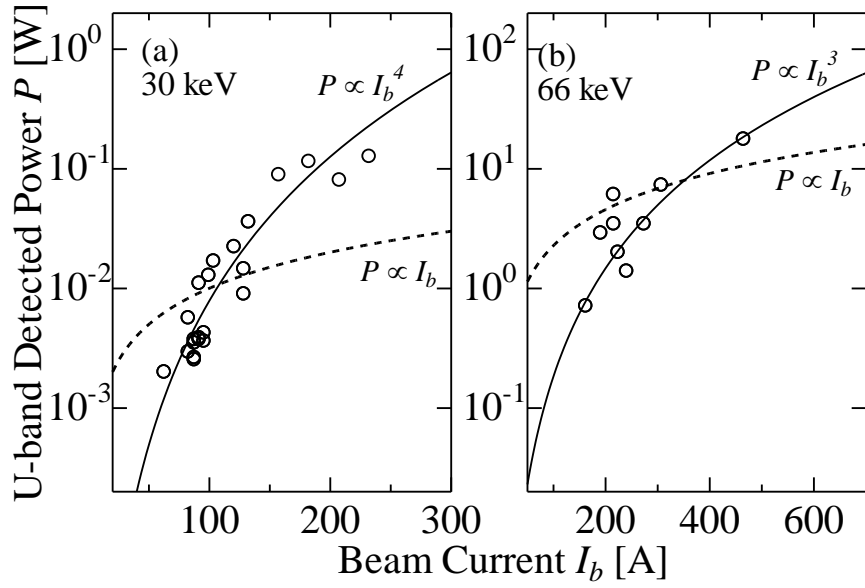


Fig. 4.6 Dependence of peak powers of U-band signals on beam current for average beam energy of (a) 30 keV and (b) 66 keV. Detection angle is  $5^\circ$ . Anode-cathode distance varies from 7 to 12 mm. Solid fitting line (a) has form  $P = 7.9 \times 10^{-11} I_b^4$ , and while that for (b) has form  $P = 1.8 \times 10^{-7} I_b^3$ . Dashed fitting lines have forms  $P = 1.0 \times 10^{-4} I_b$  for (a) and  $P = 2.3 \times 10^{-3} I_b$  for (b), respectively.

#### 4.4.2 Smith-Purcell 放射

K-, F-, D-band 検出システムを用いて実験を行った。Fig. 4.7 に検出された信号の時間変化の波形を載せる。これらの 210 ns 付近に信号のピークが得られており、ピークでの出力、カソード電圧、ビーム電流は、K-band が 15 W, 56 kV, 199 A であり、F-band が 8.0 mW, 56 kV, 199 A、D-band が 10 mW, 59 kV, 224 A である。F-band と D-band が同程度の出力であるから、これらは同じ放射を検出していると考えられる。

カソード電圧を変化させ、K-band と D-band の電圧依存を Fig. 4.7 のように得た。最大出力レベルはそれぞれ 40 と 0.04 W である。表面波放射である K-band 信号の出力は F-band や D-band 信号より 1000 倍大きい。

続いて D-band 信号の電流依存を Fig. 4.8 に示す。このときビームエネルギーは  $60 \pm 2$  keV である。点線と実線は最小二乗法で求めたフィッティング曲線である。 $I_b^4$  で増加する実線の方が線形に増加する点線よりもより実験データに合致する。実験結果は文献[23]で報告されている自然放出時の SP 放射の電流依存性と明らかに異なる。

次に K-band, D-band, G-band 検出システムを用いて、D-band 以上の周波数の放射について調べた。K-band と D-band では信号が得られたが、G-band では有意な信号は得られなかった。D-band のピークでの出力は 9.5 mW であり、このとき電圧は 60 keV である。D-band と G-band のカットオフ周波数から、この放射は 91GHz 以上、116 GHz 以下である。Fig. 4.1 に示すように、この周波数範囲では 60 keV のビーム線は Dense spectrum region を通る。前述の通り、この領域では高次モードの効果が少なく、Ledatron 放射は起こらない。Dense spectrum region 中の点 T では、 $45^\circ$ へ放射する SP 放射が  $p = 1$  のビームによって発生し、また、表面波の 4 倍高調波と一致する。

Fig. 4.7 において 40 kV よりも低い電圧の放射は  $TM_{011}$  か  $TM_{012}$  モードの Ledatron 放射で説明できる。40 keV 以下のビーム線 ( $p = 2$ ) はこれらのモードを  $2\pi$ -point 付近で交わる。Fig. 4.5 の 40 kV 以下の領域で U-band と比べると、 $p = 1$  で励起される U-band の Ledatron 放射と比べて、 $p = 2$  で励起される D-band の Ledatron 放射の出力は小さい。フロケ高調波次数  $p$  が 1 から 2 へ増える際に出力は 1/100 に下がる。D-band の Fig. 4.1 の点 R 付近で交わる。点 R において Ledatron 放射は表面波の 4 倍時間的高調波と一致しており Ledatron 放射は 4 倍高調波により出力が増強される。しかし、時間的高調波による増大よりもフロケ高調波次数が増えることによる減衰の方がここでは支配的である。

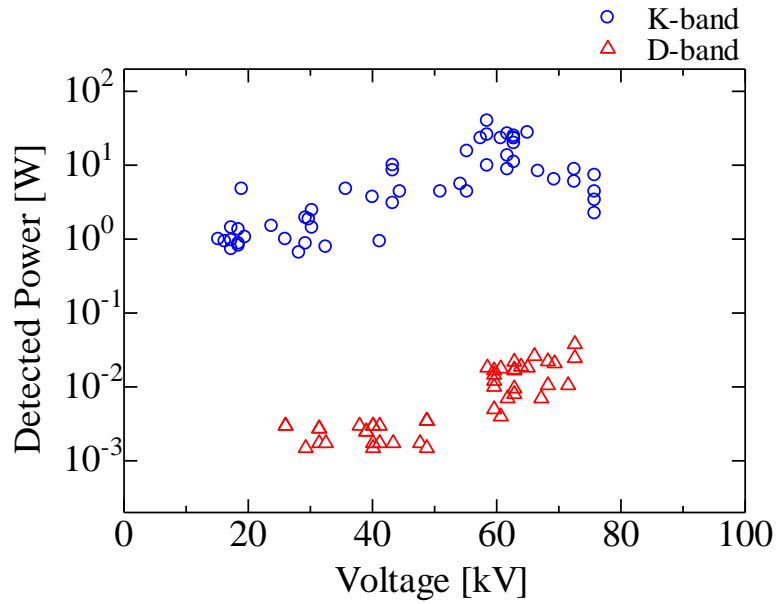


Fig. 4.7 Dependence of K- and D-band peak power on cathode voltage. Angles of horn antennas are  $0^\circ$  for K-band and  $10^\circ$  for D-band. Anode-cathode distance is 10 mm. K- and D-band data around 30 kV are generated at points Q and R in Fig. 5, respectively. Around 60 kV, K- and D-band are generated at points S and T, respectively.

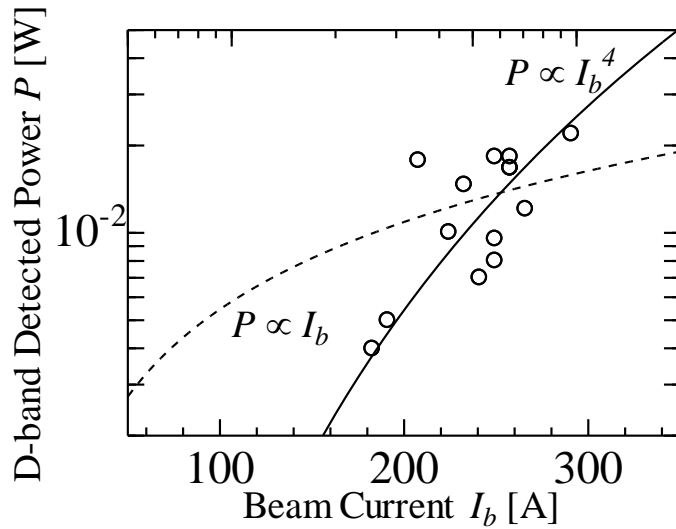


Fig. 4.8 Dependence of D-band peak power on cathode voltage for average beam energy of 60 keV. Detection angle  $\varphi$  is  $10^\circ$  and anode-cathode distance is 10 mm. Solid fitting line has form  $P = 3.4 \times 10^{-12} I_b^4$ . Dashed fitting lines have forms  $P = 5.5 \times 10^{-5} I_b$ . Detected signals are generated at point T in Fig. 4.3.

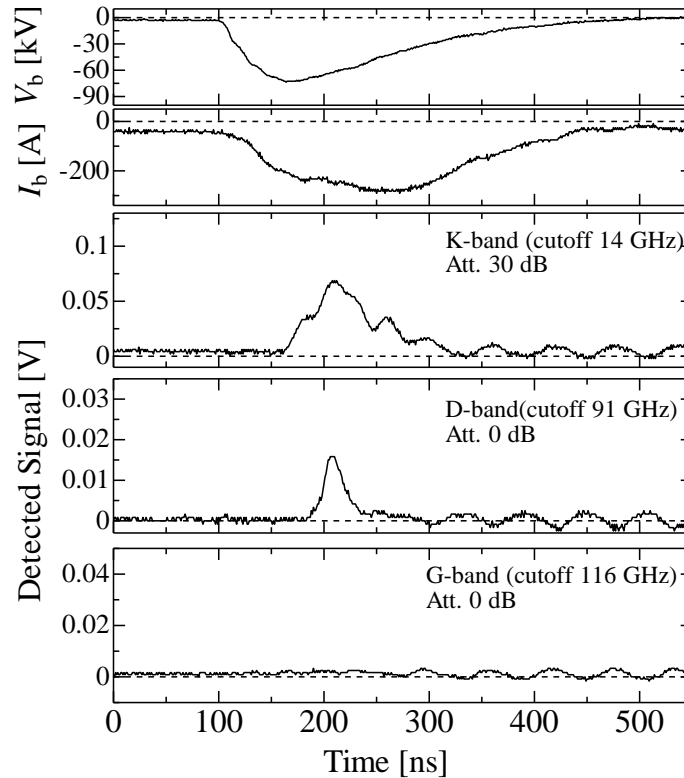


Fig. 4.9 Time evolution of cathode voltage, beam current, and K-, D-, G-band signals. Detection angles are 0 for K-band,  $10^\circ$  for D-band, and  $-10^\circ$  for G-band. Anode-cathode distance 10 mm.

出力窓に対する検出システムの設置角度を変えることで、U-band と F-band の放射パターンを調べた。その結果を Fig. 4.10 に示す。この実験データを得るために、それぞれの角度ごとに 5 shots 記録し、そこから最大値と最小値を除いて 3 shots の平均を取った。エラーバーは実験データの分散を示している。平均電圧と電流は(a)が 57 kV と 165 A, (b)が 59 kV, 149 A である。両方とも広い角度に分布している。

(a)において実線は  $TM_{01}$ ,  $TM_{03}$ ,  $TM_{05}$ ,  $TM_{07}$  モードの計算した放射パターンである。Fig. 4.1 より U-band の放射は  $TM_{07}$  モードの Ledatron 放射である。U-band の放射パターンは  $TM_{07}$  モードの相当する  $\pm 70^\circ$  のピークを持つ。放射パターンは  $TM_{01}$ ,  $TM_{03}$ ,  $TM_{05}$  モードのピークもそれぞれ  $10^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$  に現れている。しかし  $TM_{07}$  モード以外のこれらのモードはこの電圧では  $2\pi$ -point 付近では励起できず、このような出力で放射し得ない。 $TM_{07}$  モードによる Ledatron 放射が生じ、コルゲート導波管に接続された直管を通る際、速波領域に形成される直管の  $TM_{01}$ ,  $TM_{03}$ ,  $TM_{05}$  モードへ変換されたと考えられる。

F-band の放射パターンは点 T で生じた SP 放射である。F-band の放射パターンは U-band の放射より狭く、 $60^\circ$  から  $40^\circ$  の間に分布している。これは点 T で生じる SP 放射の放射角

度  $\theta \approx 45^\circ$  に矛盾しないものである。なお、75 GHz 付近の 3 倍 Ledatron 放射が F-band で検出されないのは、F-band のカットオフ周波数に近すぎるためである。

#### 4.5 考察と結論

文献[38]の particle-in-cell シミュレーションによれば Ledatron 放射の出力は電流密度に線形に比例する。このシミュレーションでは Ledatron 放射のみが強く生じ、表面波放射は抑制されている。電子ビームは高次モードでバンチングされ、表面波ではバンチングされない。一方、我々の研究では表面波放射と Ledatron 放射は共存する。Fig. 4.6 は(a)が  $TM_{05}$ , (b)が  $TM_{08}$  の Ledatron 放射だが、どちらも電流に対して線形よりも大きく増加する。これは高次モードではなく表面波によりビームがバンチングされていることを示している。

SP 放射については電流依存が文献[39]で解析されている。この解析において自然放射の SP 放射は電流に対して線形に比例して出力が増加する。一方、出力の強い SP 放射は  $I_b^3$  から  $I_b^6$  までの間の値に比例して出力を増加させる。我々の実験では Fig. 4.8 に示したとおり、電流は  $I_b^4$  に比例している。このことから、SP 放射は表面波の 4 倍の高調波によって大強度化されていることが分かる。

結論として、以上に示したとおり、25 GHz 帯コルゲート導波管を用いて表面波放射と Ledatron 放射、SP 放射を確認した。表面波との相互作用によりビームがバンチングされており、それによって生じた時間的高調波によって Ledatron と SP 放射が増強されることが示された。Ledatron 放射の出力はフロケ高調波の次数が上がることによって減少し、表面波の時間的高調波による増強よりもフロケ高調波の次数が増えることによる減衰の方が支配的である。

## 第5章 時間的高調波による Smith-Purcell 放射の大強度化確認実験

### 5.1 実験の目的

1.5 節で述べたように、SP 放射はビームバンチングによりその強度を増大させることができる。コルゲート導波管内に電子ビームを入射すると、ビームと表面波の相互作用によってビームはバンチングされる。このときビームは表面波の整数倍の周波数で時間的高調波を生じる。時間的高調波と SP 放射が一致するとき、SP 放射の出力の増大が期待できる。先行研究において、4 倍までの時間的高調波の影響が調べられてきた。しかしそれ以上高い次数の高調波に関しては著者の知る限り報告されていない。先行研究において、周期構造の周期数は 10 から 35 の間で様々な値が使われている。しかし周期数が SP 放射と時間的高調波に与える影響も明らかでない。そこで本実験では 30 周期と 60 周期の二つの周期数を持つコルゲート導波管に電子ビームを入射し、4 倍と 6 倍高調波について放射を観測する。出力特性を比較し、高次の時間的高調波の特性や周期数の影響を明らかにする。

実験に用いるコルゲート導波管は K-band コルゲート導波管を用いる。その周期数は、二つもしくは三つの導波管を組み合わせる。30 周期の導波管は 10 周期導波管の後ろに 20 周期の導波管を接続して得られる。60 周期の導波管は 20 周期の導波管を 3 つ組み合わせる。

### 5.2 Smith-Purcell 放射と時間的高調波

Fig. 5.1 に  $TM_{01}$  モードと SP 放射の分散関係を示す。点線はそれぞれ 40 と 55 keV のビーム線であり、点 A と点 B で  $TM_{01}$  モードの分散関係と交わる。これらの点で電子ビームと表面波は相互作用し、ビームはバンチングされ、表面波の整数倍の周波数に時間的高調波を生じると考えられる。緑の曲線はそれぞれ  $TM_{01}$  モードの 4 倍と 6 倍の周波数と波数を表しており、この曲線とビーム線との交点で時間的高調波が生じる。点 A (点 B) で表面波と電子ビームが相互作用した場合、点 A<sub>4</sub>(点 B<sub>4</sub>)と点 A<sub>6</sub> (点 B<sub>6</sub>) にそれぞれ 4 倍と 6 倍の時間的高調波が生じる。赤と青の実線は式(1-1)に  $\theta = 0$  と  $180^\circ$ を入れて計算した SP 線である。赤の実線が  $n = -1$ 、青の実線が  $n = -2$  を表している。これらの SP 線は  $TM_{01}$  モードと同様に波数空間で  $k_0 = 2n/z_0$ の周期で周期的になる。また、水色の点線はそれぞれ検出システムのカットオフ周波数を表している。

Fig. 5.2 に電子ビームのエネルギーに対する規格化した SP 放射の周波数の関係をプロットした。オレンジ色の領域と青い縞模様の領域はそれぞれ  $|n| = 1$  と 2 の SP 放射を表している。この領域の範囲で SP 放射が生じる。それぞれの領域は 32 keV 以上で重なる。一点鎖線と点線はそれぞれ 4 倍と 6 倍高調波の規格化した周波数を示している。4 倍高調波は 45 keV 以上で  $|n| = 1$  の領域と重なり、17 から 70 keV の間で  $|n| = 2$  の領域と重なる。6 倍高調波は 75 keV 以上で  $|n| = 1$  の領域と重なり、32 keV 以上で  $|n| = 2$  の領域と重なる。

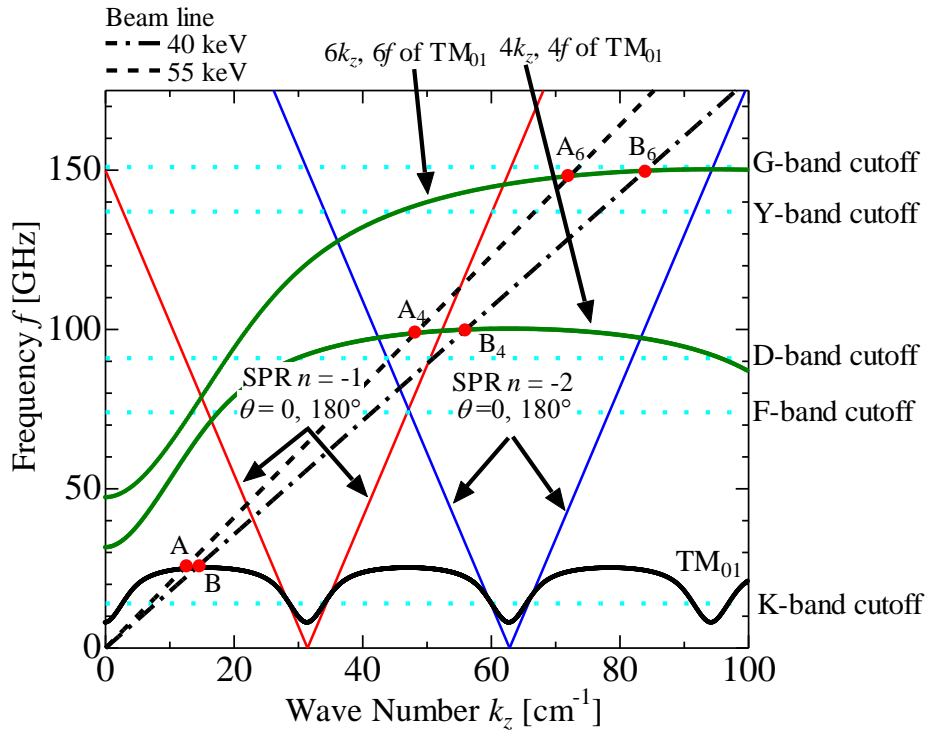


Fig. 5.1 Dispersion relation of  $TM_{01}$  mode and SP radiation with  $\theta = 0$  and  $180^\circ$ . Red and blue lines are indicate dispersion relation of SP radiation  $n = -1$  and  $-2$ , respectively. Dashed and dot-dashed lines are 55 and 40 keV beam lines. Points A and B are intersections between beam lines and  $TM_{01}$  mode. Green curves indicate fourth and sixth temporal harmonics of  $TM_{01}$  mode. Temporal harmonics are generated at intersections between green curves and beam lines, such as points  $A_4$ ,  $A_6$ ,  $B_4$ , and  $B_6$ . Dotted lines are cutoff frequencies of detecting systems. (Reproduced by [33]).

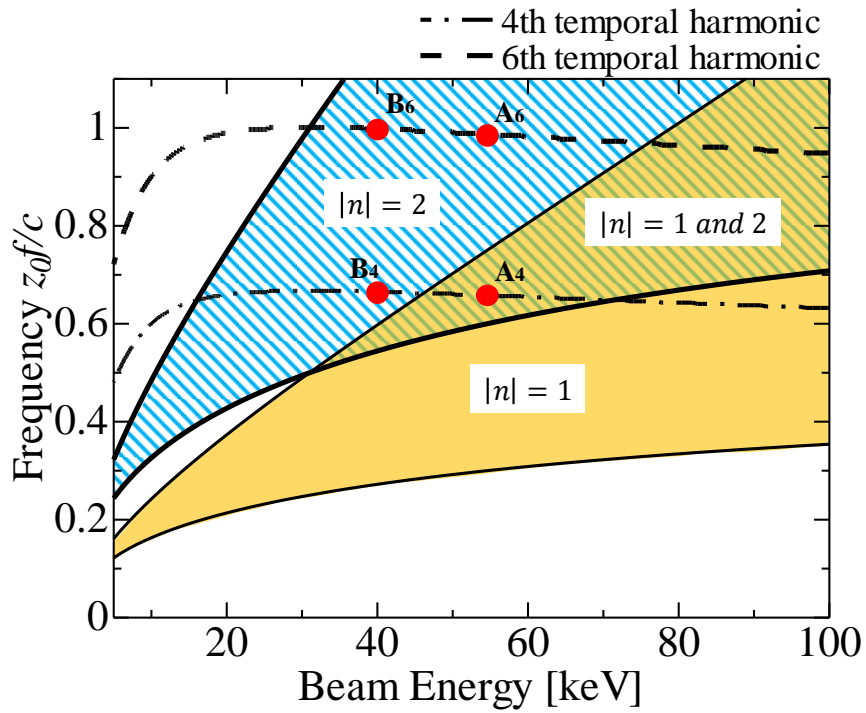


Fig. 5.2 Dependence of normalized frequency of Smith-Purcell radiation with  $|n| = 1$  and 2 on beam energy. Regions of  $|n| = 1$  and 2 are indicated by orange and blue stripe, respectively. Upper and lower bounds of regions indicate frequencies of Smith-Purcell radiation with  $\theta = 0$  and  $180^\circ$ , respectively. Dot-dashed and dashed lines respectively indicate fourth and sixth temporal harmonics of surface wave. See Fig. 5.1 for points  $A_4$ ,  $A_6$ ,  $B_4$ , and  $B_6$ . (Reproduced by ref. [33].)



### 5.3 Smith-Purcell 放射の周期数依存実験

30 周期のコルゲート導波管に電子ビームを入射して得られたカソード電圧とビーム電流、マイクロ波検出波形の時間変化を Fig. 5.3 に示す。用いた検出システムは K-band, F-band, D-band である。K-band 検出器は減衰器により 1/1000 に信号を減衰させて検出している。K-band と F-band の最初のパルスと、D-band 信号は 150 から 200 ns の間で同時に検出されている。このとき電圧と電流は 46 から 54 kV, 108 から 150 A の間で変化する。K-band と F-band の二番目のパルスは 200 から 250 ns の間で検出され、このとき電圧と電流は 40 から 49 kV, 140 から 158 A の間で変化する。一番目のパルス信号のピークは 169 ns に観測される。このとき電圧は 55 kV, 電流は 140 A である。ピークにおける出力は K-band が 5.2 W, F-band が 2.8 mW, D-band が 25.6 mW である。検出システムの周波数帯域から、K-band 信号は表面波発振によるものである。また、カットオフ周波数が十分表面波の周波数より高いことから、F-band と D-band 信号は表面波発振によるものではない。F-band と D-band 信号は出力が大きく違うことから、両者は別の放射を検出していると考えられる。カットオフ周波数より F-band 信号は表面波の 4 倍の周波数における SP 放射を検出している。このとき SP 放射は Fig. 5.1 の点 A<sub>4</sub> で 4 倍高調波と一致している。D-band 信号は F-band 信号より高い周波数の放射を見ていると思われる。これについては次の段落に記す実験で確認する。F-band 放射は 213 ns で二番目のピークが検出される。このとき電圧は 43 kV で、電流は 141 A である。このときの F-band 出力は 1.8 mW であり、K-band は 2.5 W である。ここで F-band 信号は点 B<sub>4</sub> における  $n = -2$  の SP 放射を観測している。

続いて F-band より高い周波数を試すために、K-band, Y-band, G-band の検出システムを置いて実験を行った。なお、G-band は 2.5 節で述べた 151-GHz ハイパスフィルターを接続している。ホーンアンテナの出力窓からの距離は K-band と Y-band が 600 mm で、G-band が 100 mm である。計測されたカソード電圧と電流、検出された信号の時間変化の波形を Fig. 5.4 に示す。検出された信号は二つのパルス信号を持ち、最初のパルスは 160 から 220 ns の間に観測されている。このとき電圧と電流はそれぞれ 52 から 64 kV, 140 から 190 A の間で変化する。二番目のパルスは 220 から 290 ns の間で観測され、電圧は 30 から 52 kV, 電流は 190 から 210 A の間で変化する。最初の信号のピークは 193 ns に観測され、このときの電圧と電流はそれぞれ 57 kV と 166 A である。193 ns における K-band と Y-band の出力はそれぞれ 11.6 W と 4.2 mW である。Y-band 信号はピークにおいて点 A<sub>6</sub> で生じる SP 放射である。K-band と Y-band の信号は 250 ns で二つ目のピークが観測される。ここでカソード電圧は 42 kV であり、電流は 207 A である。このときの出力は K-band が 14.8 W で Y-band が 8.3 mW である。ピークにおいて Y-band 信号は点 B<sub>6</sub> ので生じる SP 放射である。Y-band で検出される SP 放射は 6 倍高調波により出力が増大されていると考えられる。G-band では信号が検出されなかったことから、Y-band 信号の周波数は Y-band と G-band のカットオフ周波数 137 GHz から 151 GHz の間となる。この周波数帯は 6 倍高調波の周波数帯とよく合致する。

カソード印加電圧を変化させ、F-band と Y-band 信号出力の電圧依存性を Fig. 5.5 にプロットした。白抜き丸が 30 周期のコルゲート導波管を用いた実験結果であり、赤い三角が 60 周期のコルゲート導波管を用いた実験結果である。このデータを集めるのに 100 shots 以上のデータを計測した。60 周期において、F-band 信号は 20 から 90 kV の間で観測された。BWO 領域と TWT 領域の両方で観測されており、BWO 領域では出力は 1 mW オーダーである。TWT 領域では 70 kV 付近で最大 100 mW となる。30 周期の導波管の実験では BWO 領域でのみ信号が検出された。F-band の出力レベルは 10 mW であり、これは 60 周期の出力レベルの 10 分の 1 である。

Fig. 5.5(b)には Y-band の実験結果を示した。Y-band 信号は 30 周期と 60 周期両方で TWT 領域にのみ観測されている。30 周期の Y-band 信号は 50 kV 付近で 10 mW の出力が計測された。45 から 60 kV において 30 周期導波管からの Y-band 信号の出力は 60 周期のものよりも 10 倍大きくなっている。F-band と Y-band の信号を比べると 30 周期では両者は同程度の出力レベルになっている。一方 60 周期では Y-band 信号のほうが 10 倍 F-band 信号より出力が大きい。

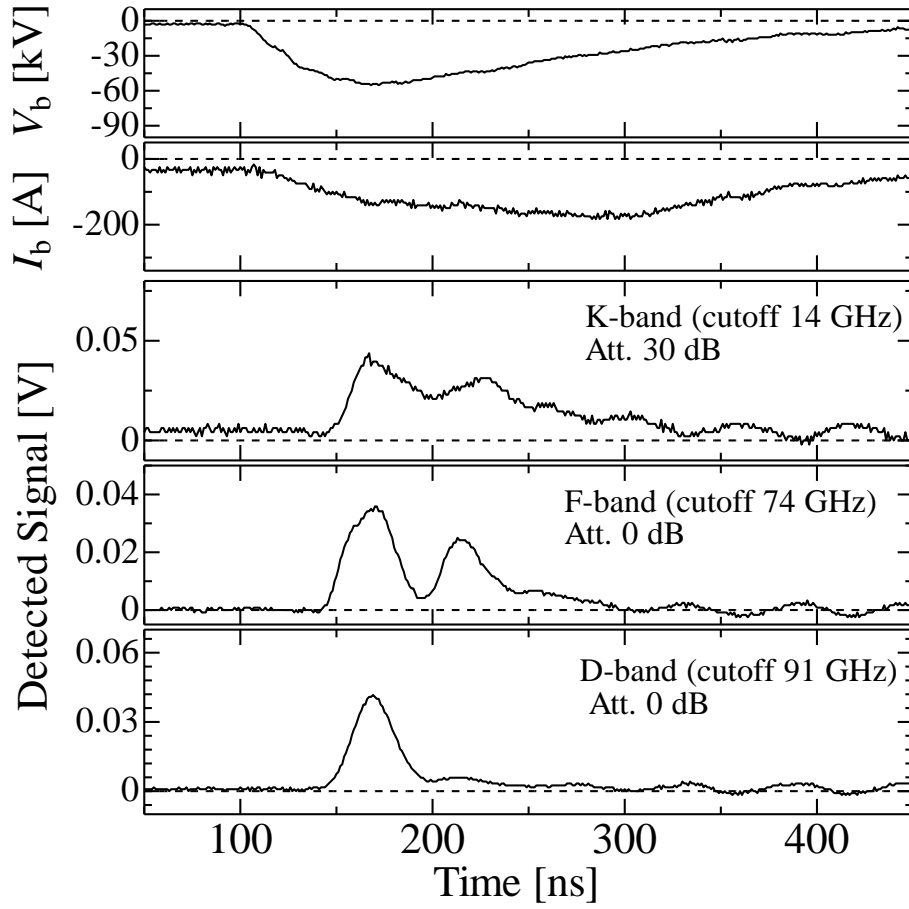


Fig. 5.3 Time evolution of cathode voltage, beam current, K- and F-band signals with 30-period corrugated waveguide. Angles of horn antennas  $\varphi$  are  $0^\circ$  for K-band,  $-10^\circ$  for F-band, and  $10^\circ$  for D-band. Distance  $D$  is 600 mm for K-, F- and D-band horn antennas. At 169 ns, F-band signal arises due to SP radiation at point A<sub>4</sub>. At 213 ns, F-band signal arises due to SP radiation at point B<sub>4</sub>. See Fig. 5.1 for points A<sub>4</sub> and B<sub>4</sub>. (Reproduced by ref. [33]).

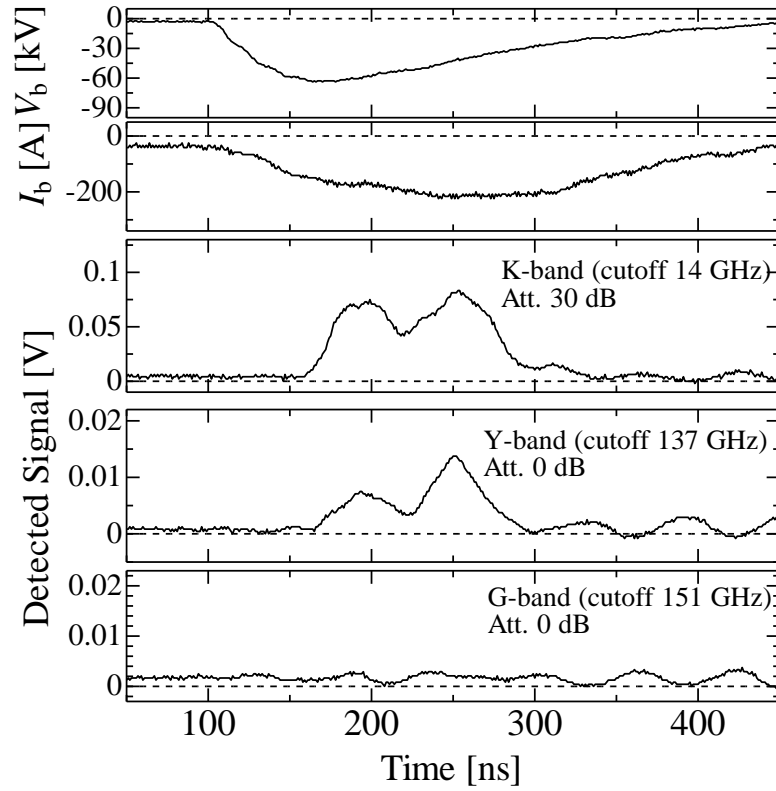


Fig. 5.4. Time evolution of cathode voltage, beam current, K-, Y-, and G-band signals with 30-period corrugated waveguide. Angles of horn antennas  $\varphi$  are 0 for K-band,  $10^\circ$  for Y-band and  $-10^\circ$  for G-band. Distances  $D$  are 600 mm for K- and Y-band and 100 mm for G-band. At 193 ns, Y-band first peak is due to SP radiation at point  $A_6$ . At 250 ns, Y-band second peak is due to SP radiation at point  $B_6$ . See Fig. 5.1 for points  $A_6$  and  $B_6$ . (Reproduced by ref. [33]).

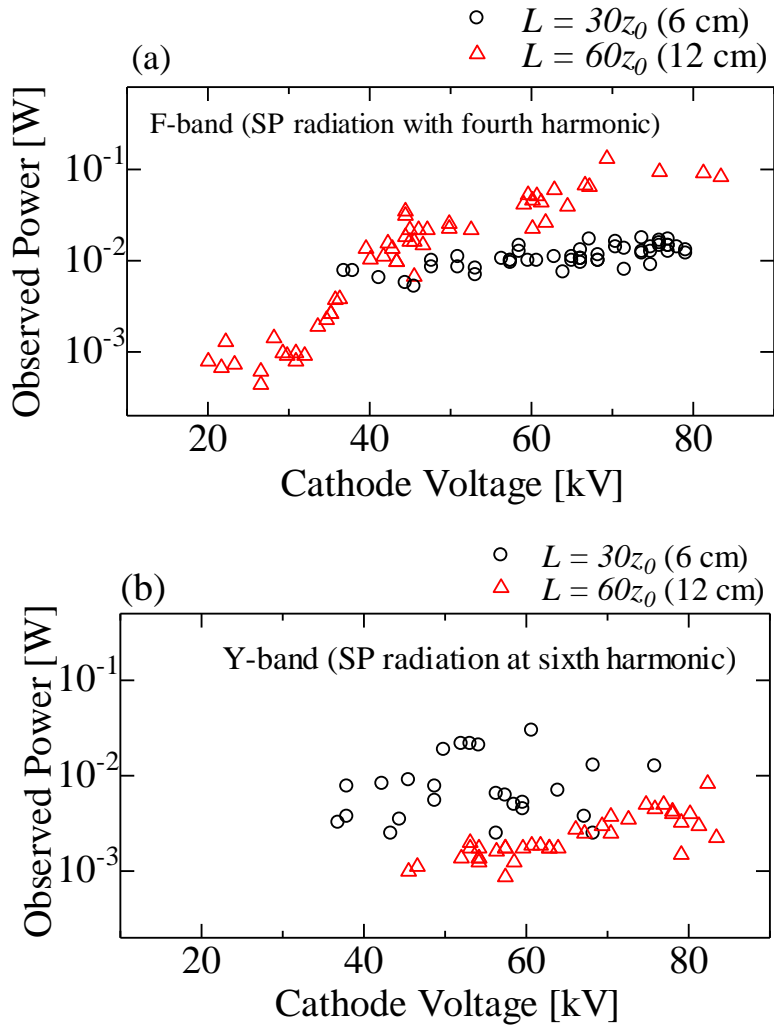


Fig. 5.5(a) Dependences of F-band power on cathode voltage with 30- and 60-period corrugated waveguides. Angle of horn antenna  $\varphi$  is  $10^\circ$ . (b) Dependences of Y-band observed power on cathode voltage with 30- and 60-periods corrugated waveguides. Angle of horn antenna  $\varphi$  is  $10^\circ$ . (Reproduced by ref. [33]).

## 5.4 考察と結論

実験において、表面波放射が K-band 検出システムにより検出され、SP 放射が F-band, D-band, Y-band 検出システムにより検出された。F-band と Y-band 信号はそれぞれ表面波の 4 倍と 6 倍の時間的高調波を伴う SP 放射である。Fig. 5.3 における D-band 信号は出力レベルが Fig. 5.5(b)の Y-band 信号に一致することから、6 倍の高調波を伴う SP 放射だと考えられる。Fig. 5.3 の 170 ns 付近において、K-band と F-band 信号が観測されているのにも関わらず D-band 信号は観測されていない。K-band 信号の二つ目のピーク出力が一つ目と比べて小さいことから、表面波の時間的高調波は弱くなると考えられる。よって D-band 信号が検出されないのは、6 倍高調波における SP 放射の大強度化が不十分だったからである。

Fig. 5.5 に示したように、6 倍高調波における出力は周期数を 30 から 60 に増やしたときに減少する。これは 30 周期のコルゲート導波管が 6 倍高調波に対して 60 周期よりも適していることを示唆する。一方で 4 倍高調波の出力は周期数を 30 から 60 に増やすことで増加する。このことから 4 倍高調波に対しては 60 周期のコルゲート導波管が適していると言える。

第 4 章で行った実験では 20 周期の K-band 導波管から、4 倍高調波に一致した周波数の SP 放射が D-band 検出器により検出された。上述のように、30 周期の導波管からは D-band 検出器により 6 倍高調波に一致する SP 放射が検出されている。このことから周期数によって特定の次数の高調波が支配的になることが示されている。

以上より表面波の時間的高調波の SP 放射は周期構造の周期数によって最適化できることが示された。これにより SP 放射の大強度化が高調波の次数ごとに制御できる可能性があり、テラヘルツ波源の開発へ大きく貢献するものだと言える。

## 第6章 結論

3章、4章、6章で表面波動作、Ledatron 放射、SP 放射によるテラヘルツ波の発生実験を行ってきた。第4章において、25 GHz 帯 SWO を用いて行った Ledatron 放射実験では 80 kV のカソード電圧で表面波と同程度の出力の放射が 75 GHz 付近で発生する。この出力は第1章の Fig. 1.2 で示した文献[18]の 25 GHz 帯 BWO の出力の 10 分の 1 程度である。一方、第6章において 25 GHz 帯 SWO を用いた SP 放射実験を行った。表面波の周波数の4倍と6倍にあたる 0.1 THz、0.15 THz の周波数で SP 放射が得られた。その出力は周期構造の長さに依存して変わり、最適な長さにおいては、第3章で述べた 0.1 THz 帯 SWO の表面波動作の出力と比べて 10 分の 1 程度である。25 GHz BWO における Ledatron の出力が表面波の 100 分の 1、SP 放射が 10000 分の 1 だったのを考慮すると、今回の実験結果で Ledatron 放射と SP 放射の出力の大幅な向上が実現された。

今回の実験により、表面波の周波数の6倍までの周波数で、表面波動作の 0.1 から 1 倍程度の Ledatron や SP 放射が得られることが示された。これは周期構造を利用したテラヘルツ波源を開発する上で、製作精度の問題を解決するのに大変興味深い成果である。

## 参考文献

- [1] K. Vijayraghavan, R. W. Adams, A. Vizbaras, M. Jang, C. Grasse et al., *Appl. Phys. Lett.* 100, 251104 (2012)
- [2] K. Fujita, M. Hitaka, A. Ito, M. Yamanishi, T. Dougakiuchi, and T. Edamura, *Opt. Exp.*, 24, 15, 16358-16365 (2016)
- [3] M. Asada, S. Suzuki, N. Kishimoto, *Jpn. J. Appl. Phys.* 47, 4375 (2008).
- [4] Y. Takida, K. Nawata, S. Susuki, M. Asada, AND H. Minamide, *Opt. Exp.* 25, 5, 5389-5396 (2017)
- [5] M. Yu. Glyavin, et. al. *Phys. Rev. Lett.* 100, 015101 (2008)
- [6] M. Yu. Glyavin, et. al. *Appl. Phys. Lett.* 101, 153503 (2012)
- [7] T. Idehara and S. P. Sabchevski, arXiv:1607.04964 (2016)
- [8] A. N. Vlasov, A. G. Shkvarunets, J. C. Rodgers, Y. Carmel, T. M. Antonsen, Jr., T. M. Abuefadel, D. Lingze, V. A. Cherepenin, G. S. Nusinovich, M. Botton, and V. L. Granatstein, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 28, 550 (2000).
- [9] A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. N. Ohshima, Y. Morita, C. Otani, and K. Kawase, *Appl. Opt.* 43, 5637 (2004).
- [10] N. S. Ginzburg, A. M. Malkin, A. S. Sergeev, and V. Y. Zaslavsky, *Appl. Phys. Lett.* 99, 121505 (2011).
- [11] N. S. Ginzburg, A. M. Malkin, A. S. Sergeev, and V. Y. Zaslavsky, *Appl. Phys. Lett.* 100, 143510 (2012).
- [12] S. Magori, K. Ogura, T. Iwasaki, J. Kojima, K. Yambe, S. Kubo, T. Shimozuma, S. Kobayashi, and K. Okada, *Plasma Fusion Res.* 9, 3406032 (2014).
- [13] M. T. San, K. Ogura, K. Yambe, Y. Annaka, S. Gong, J. Kawamura, T. Miura, S. Kubo, T. Shimozuma, S. Kobayashi, and K. Okada, *Plasma Fusion Res.* 11, 2406085 (2016).
- [14] M. T. San, K. Ogura, K. Yambe, Y. Annaka, and J. Fujita, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 45, 30 (2017).
- [15] M. T. San, K. Ogura, K. Kubota, Y. Annaka, K. Yambe, and A. Sugawara, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 46, 530 (2018).
- [16] K. Mizuno, S. Ono, and Y. Shibada, *IEEE Trans. Electron Devices* 20, 749 (1973).
- [17] S. J. Smith and E. M. Purcell, *Phys. Rev.* 92, 1069 (1953).
- [18] K. Ogura, K. Yambe, S. Hasegawa, T. Iwasaki, K. Yamamoto, and Y. Kobari, *Plasma Fusion Res.* 8, 2401085 (2013).
- [19] F. S. Rusin, and G. D. Bogomolov, *Proc. IEEE (Lett.)*, 57, 720, (1969).
- [20] R. Braakman and G. A. Blake, *J. Appl. Phys.* 109, 063102 (2011)
- [21] V. L. Bratman, B. S. Dumesh, A. E. Fedotov, P. B. Makhalov, B. Z. Movshevich, and



- F. S. Rusin, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 38, 1466 (2010).
- [22] V. L. Bratman, A. E. Fedotov, and P. B. Makhlov, *Appl. Phys. Lett.* 98, 061503 (2011).
- [23] J. Urata, M. Goldstein, M. F. Kimmitt, A. Naumov, C. Platt, and J. E. Walsh, *Phys. Rev. Lett.* 80, 516. (1998).
- [24] N. Yamamoto, F. Javier García de Abajo, and V. Myroshnychenko, *Phys. Rev. B* 91, 125144 (2015)
- [25] S. E. Korbly, A. S. Kesar, J. R. Sirigiri, and R. J. Temkin, *Phys. Rev. Lett.* 94, 054803 (2005).
- [26] A. Aryshev, A. Potylitsyn, G. Naumenko, M. Shevelev, K. Lekomtsev, L. Sukhikh, P. Karataev, Y. Honda, N. Teruma, and J. Urakawa, *Phys. Rev. Accel. Beams* 20, 024701 (2017).
- [27] J. T. Donohue and J. Gardelle, *Phys. Rev. Spec. Top.—Accel. Beams* 8, 060702 (2005).
- [28] J. T. Donohue and J. Gardelle, *Phys. Rev. Spec. Top.—Accel. Beams* 9, 060701 (2006).
- [29] L. Liang, W. Liu, Q. Jia, L. Wang, and Y. Lu, *Opt. Exp.* 25, 3, 2960-2968 (2017)
- [30] H. Oe, K. Ogura, Y. Kazahari, K. Bansho, H. Iizuka, A. Sugawara, and W. S. Kim, *J. Plasma Fusion Res. Ser.*, 8, 1477 (2009).
- [31] K. Yambe, K. Ogura, S. Hasegawa, T. Shinada, T. Iwasaki, T. Furuichi, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 41, 2781 (2013).
- [32] 安中裕大、山家清之、小椋一夫、*電気学会論文誌A*, 137, 3, 165-170 (2017)
- [33] Y. Annaka, K. Ogura, K. Ozawa, K. Sekine, and Min Thu San, *Phys. Plasmas* 25, 063115 (2018)
- [34] S. Silver, *Microwave Antenna Theory and Design*, (McGraw-Hill, New York 1949), Chap. 10, P. 334.
- [35] K. Ogura, R. Yoshida, K. Komiyama, M. Sakai, and H. Yamazaki, *IEEJ Trans. FM*, 124, 456 (2004).
- [36] S. Gong, K. Ogura, K. Yambe, S. Nomizu, A. Shirai, K. Yamazaki, J. Kawamura, T. Miura, S. Takanashi, and M. T. San, *J. Appl. Phys.* 118, 123101 (2015).
- [37] K. Ogura, A. Shirai, M. Ogata, S. Gong, K. Yambe, *IEEE. Trans. Plasma Sci.* 44, 201 (2016).
- [38] Peng Zhang, L. K. Ang, and A. Gover, *Phys. Rev. ST. Accel. Beams*, 18, 020702 (2015)
- [39] C. A. Flory, *J. Appl. Phys.* 99, 054903 (2006).

## 研究業績目録

### 学会誌発表論文

1. 安中 裕大、山家 清之、小椋 一夫：

「弱い相対論的電子ビームを用いた大口径 W-band 表面波発振器による大強度マイクロ波の発振特性」

平成 29 年 3 月発行 電気学会論文誌 A 第 137 巻, 第 3 号, 165～170 頁に発表

2. Y. Annaka, K. Ogura, K. Ozawa, K. Sekine, and Min Thu San:

“Enhancement of Smith-Purcell radiation with temporal harmonics of surface wave on cylindrical corrugated waveguide”

(円筒コルゲート導波管の表面波の時間的高調波を伴うスミス・パーセル放射の大強度化)

平成 30 年 6 月発行 Physics of Plasmas, Vol. 25, no. 6, pp 063115-1～063115-6 に発表

### 関連論文

1. Y. Annaka, K. Ogura, J. Kawamura, T. Miura, T. Kawamura, S. Takanashi, S. Gong, Min Thu San, and K. Yambe :

“Experimental Study on Slow Cyclotron Interaction under Anomalous Doppler Effect in W-band Backward Wave Oscillator”

(W-band 後進波発振器を用いた異常ドップラー効果による遅波サイクロトロン相互作用の実験的研究)

平成 27 年 11 月 The 25th International Toki Conference , Toki, Japan, P1 - 46 にて発表

2. Y. Annaka, K. Ogura, S. Matsui, Min Thu San, K. Iwato, and K. Yambe :

“Enhancement of Smith-Purcell Radiation with Temporal and Spatial Harmonics”

(時間的・空間的高調波によるスミス・パーセル放射の大強度化)

平成 29 年 11 月 Plasma conference 2017, Himeji, Japan, 21P-128 にて発表

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、御指導及び御助言を賜りました小椋一夫教授、山家清之准教授に心より感謝し、深く御礼申し上げます。また審査委員を務めていただいた福井聡教授、加藤景三教授、菅原晃准教授に深く御礼申し上げます。

また、ともに研究を行い、日ごろ様々な面でお世話になった、小椋研究室の皆様に深く御礼申し上げます。加えて、論文を参考にさせていただいた諸先輩方にも心より感謝いたします。

最後に、日ごろから応援し、支えてくれた両親、兄弟、友人たちに感謝いたします。