

誘電体管多モードテラヘルツ波による電子ビーム加速・減速の研究

ACCELERATION AND DECELERATION OF ELECTRON BEAM USING MULTIMODE THZ-WAVE IN DIELECTRIC TUBE

菅晃一^{#,A)}, 楊金峰^{A)}, 小方厚^{A)}, 近藤孝文^{A)}, 神戸正雄^{A)}, 野澤一太^{A)}, 樋川智洋^{A)}, 法澤公寛^{A)}, 小林仁^{A)}, 吉田陽一^{A)}, 萩行正憲^{B)}, 黒田隆之助^{C)}, 豊川弘之^{C)}
K. Kan^{#,A)}, J. Yang^{A)}, A. Ogata^{A)}, T. Kondoh^{A)}, M. Gohdo^{A)}, I. Nozawa^{A)}, T. Toigawa^{A)}, K. Norizawa^{A)}, H. Kobayashi^{A)}, Y. Yoshida^{A)}, M. Hangyo^{B)}, R. Kuroda^{C)}, H. Toyokawa^{C)}

^{A)} Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University, Osaka 567-0047, Japan

^{B)} Institute of Laser Engineering (ILE), Osaka University, Osaka 565-0871, Japan

^{C)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Ibaraki 305-8568, Japan

Abstract

Beam diagnostics for electron bunch length using spectrum analysis of multimode terahertz (THz) -wave have been studied in ISIR, Osaka University. The multimode THz-wave was generated by coherent Cherenkov radiation (CCR) using hollow dielectric tubes and femtosecond/picosecond electron bunches. In this study, numerical calculation of acceleration and deceleration of electron beam using multimode THz-wave was carried out.

1. はじめに

フェムト秒・ピコ秒領域の超短パルス電子ビーム[1,2]は、自由電子レーザー、レーザーコンプトン X線発生、パルスラジオリシス[3]等の加速器物理、物化学の研究に応用されている。一方では、1 ps の逆数は1 THzに相当するため、超短パルス電子ビームは、テラヘルツ領域の電磁波生成にも利用されている[4,5,6]。同時に、より短いパルス幅を持つ電子ビームは、電子ビームの分布をフーリエ変換することにより得られるバンチ形状因子[4]の観点から、より高帯域のテラヘルツ波を生成できることが知られている。更に、パルス幅よりも長波長の電磁波を放射する場合は、位相の揃った(コヒーレントな)放射が可能となり、電磁波の強度は電子数(例えば、電荷量1 nCの場合、電子数: 10^9 個)の2乗に比例する高強度な放射が可能となる。

これまでに、阪大産研では、ビーム診断技術開発の一環として、誘電体管と電子ビームを用いてテラヘルツ波を扱うコヒーレントチェレンコフ放射(coherent Cherenkov radiation, CCR)と呼ばれる手法についても研究が行われてきた。CCRでは0.4 THz程度の単色[5]のみならず多モード[6]のテラヘルツ波発生が報告されている。このような電子ビームによるテラヘルツ波発生は、ビーム診断、ポンプ・プローブ計測、電子ビーム加速等への応用が期待されている。もし、テラヘルツ電場により、電子ビームを加速できれば、新たな加速機構への応用研究へ展開することが可能である。一方、電子ビームを減速できれば、効率的な電子ビームのエネルギーロスを助長し、得られるテラヘルツ波強度の増幅を利用したテラヘルツ波光源開発への応用が予想される。これらの現象は、電子ビームの放射電磁場を、電子ビームの加速

エネルギーとして用いるか電磁波放射を増強するかの違いがあるが、いずれの場合もエネルギー保存則に従うと考えられる。

そこで、本研究では、誘電体管による多モードテラヘルツ波(CCR)と電子ビームとの相互作用における電磁気学的な理解を目指して、電子ビーム加速・減速特性を数値計算により研究を行った。

2. 計算体系と解析方法

図1に、計算体系を示す。数値計算はOOPIC計算コード(Tech-X Corporation)[7]により行われた。マップには1つの電子ビームが誘起する多モードテラヘルツ波の軸方向電場分布を示す。CCRは、電子ビームが誘電体(石英)管の中空領域を通過する時に、外側の導体が電子ビームの発生するチェレンコフ放射(電場)を管中に閉じ込め、同時に遅波回路として働く誘電体により多モードのテラヘルツ波(準周期的電場)を誘起する方法である。また、多モードテラヘルツ波の位相速度は、電子ビームの位相速度と等しく、進行波のように管中を伝搬する。従って、先行する(前の)電子ビームが多モードテラヘルツ波を誘起し、後続する(後の)電子ビームを加速・減速することが可能となる。本研究では、計算パラメータとして、2つの電荷量: 100 pC/pulse 毎の電子ビームの遅延時間 t_d を25 psまで変化させて計算を行った。電子ビームのエネルギー、ビーム径はいずれも30 MeV、0.25 mm rmsと固定した。また、後続電子ビームの加速・減速を行う誘電体管の長さについても50 mmと固定し、後続電子ビームが管出口に到達した時に計算を終了した。その際に、誘電体管の条件(管内径、肉厚)を固定して電子ビームのパルス幅を200, 500, 1000 fsと変化させた場合の後続電子ビーム加速・減速について計算を行った。逆に、電子ビームのパルス幅を固定して、誘電体(比誘電率

[#]koichi81@sanken.osaka-u.ac.jp

$\varepsilon = 3.8$) の肉厚を 0.5 mm に固定し、管内径 a を変化させた場合の後続電子ビーム加速・減速についても計算も行った。

解析では、図 1 から分かるように、後続の電子ビームが、先行する電子ビームの誘起する多モードテラヘルツ波のどこに位置するか(位相関係)は遅延時間 t_d に依存するため、後の電子ビームの加速・減速は、遅延時間 t_d に依存することが予想される。また、CCR により得られる次数 n の多モードテラヘルツ波の周波数 k_n は、

$$\frac{s_n}{k_n \varepsilon} \frac{I_1(k_n a)}{I_0(k_n a)} = \frac{\psi_0}{\psi_1} \quad (1)$$

により表されることが理論的[8]・実験的[5,6]に知られている。ここで、高次のモードにも影響されるエネルギーゲイン E_g を後の電子ビームと前の電子ビームエネルギーの差と定義し、

$$E_g = \sum a_n \cos(\omega_n t_d) \quad (2)$$

のように“波の足し合わせ”を仮定して、周波数モードの次数 n 毎の強度 a_n をフィッティングパラメータとした。

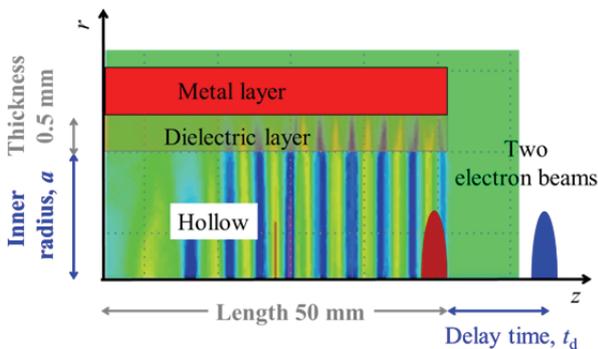


Figure 1: Geometry in the calculation.

3. 計算結果

3.1 電子ビームパルス幅の影響

図 2 に、誘電体管内径 a / 外径 = 1 / 1.5 mm に固定し、電子ビームパルス幅を変化させた場合の、エネルギーゲインの遅延時間 t_d 依存性を示す。それぞれの曲線は表示のためオフセットのみ調整されている。いずれの電子ビームパルス幅の場合も、エネルギーゲインが振動することが分かった。さらに、式(2)を用いて、それぞれの曲線をフィッティングすることができた。短パルス電子ビームはバンチ形状因子[4]の観点から、高次のモードを誘起することができることが実験的にも知られている[6]。従って、短パルス電子ビームを用いた場合は高次のモードの強度 a_n が増加し、曲線に歪みが生じた。更に、短パルス幅

の場合は、高次の“波も足しあわせれ”、エネルギーゲインの最大値も増加することが明らかとなった。

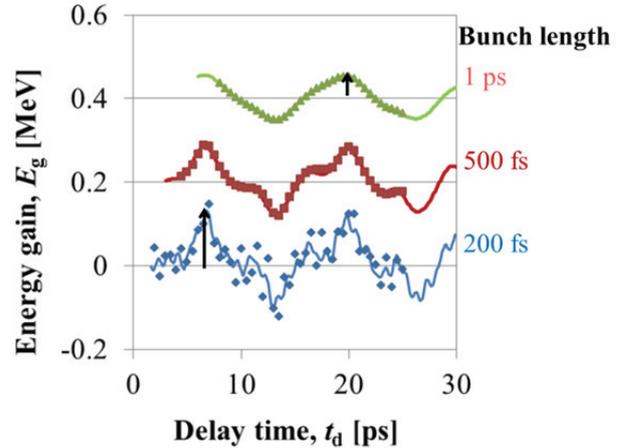


Figure 2: Energy gain as a function of delay time, t_d , for 200, 500, and 1000 fs bunch lengths with only the offsets adjusted for comparison. The lines denote the fitting results using Eq. (2).

3.2 管径の影響

図 3 に、電子ビームパルス幅を 200 fs に固定し、誘電体管の管内径 a を変化させた場合の、エネルギーゲインの遅延時間 t_d 依存性を示す。前節と同様に、オフセットの調整、式(2)を用いた曲線でフィッティングを行った。その結果、細い管内径の場合には、多モードテラヘルツ電場が増加する[5]ため、エネルギーゲインの最大値が増加することが分かった。しかし、実用上の問題として、管内径は電子ビームのアクセプタンスを左右するため、実験時はできるだけ細い管内径を用いる必要があると考えられる。

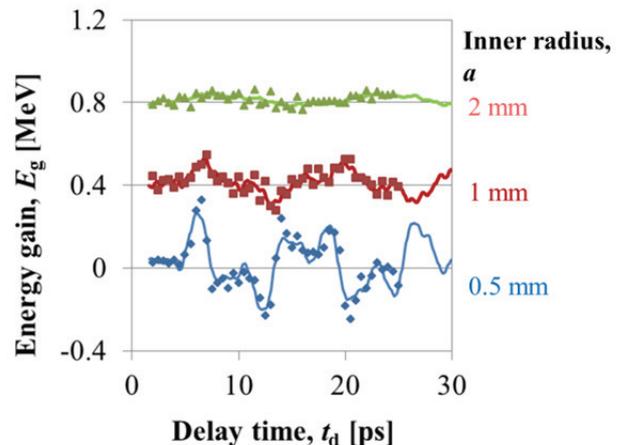


Figure 3: Energy gain as a function of delay time, t_d , for 0.5, 1, and 2 mm inner radii with only the offsets adjusted for comparison. The tube wall thickness was a constant of 0.5 mm. The lines denote the fitting results using Eq. (2).

3.3 電子ビーム分布

図 3 に、本研究のパラメータで最大エネルギーゲインとなった場合の電子ビーム分布を示す。計算条件は、電子ビームパルス幅：200 fs、管内径：0.5 mm、管肉厚：0.5 mm であった。後の電子ビームエネルギーと前の電子ビームエネルギーの差であるエネルギーゲイン E_g は 0.3 MeV と得られたが、初期のビームエネルギー：30 MeV を考慮すると、正味の加速エネルギーは 0.1 MeV と減少した。この理由は、短パルス電子ビームほど自分自身の電場により減速するためであることが、計算により分かった。従って、加速を効率的に行う場合は、細い管内径、短パルス電子ビームのみならず、前と後のビーム電荷量比率等も最適化が必要であると考えられる。今後、2 つの電子ビーム発生[9]や多モードテラヘルツ波の基礎的な理解[10]を行うと同時に加速・減速の実証を目指す。

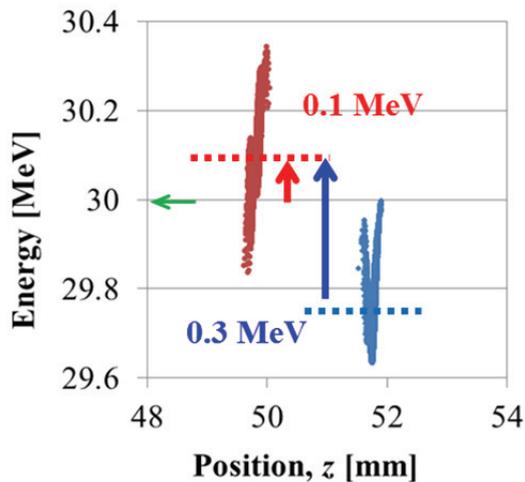


Figure 4: (a) Distribution of electron beams. The conditions of 200 fs bunch length and 0.5 mm inner radius were used in the calculation.

4. まとめ

誘電体管による多モードテラヘルツ波と電子ビームとの相互作用における電磁気学的な理解を目指して、電子ビーム加速・減速について数値計算を行った。エネルギーゲインは、電子ビームパルス幅、管径、ビーム遅延時間、電荷量に依存した。前のビーム：100 pC、後のビーム：100 pC の電荷量、電子ビームパルス幅：200 fs、管内径：0.5 mm、管肉厚：0.5 mm の時、エネルギーゲイン E_g ：0.3 MeV と得られた。しかし、正味の加速エネルギーは 0.1 MeV と減少した。今後、多モードテラヘルツ波の基礎・応用研究（時間領域の多モードテラヘルツ波の分光、管・電子ビームの最適化、ビーム加速による加速構造への検討・減速によるテラヘルツ波増幅の検証）へ展開する。

謝辞

本研究の一部は、科研費 (21226022, 23109507, 25870404)、受託研究(産総研、高出力テラヘルツ光源を用いた不正薬物・爆発物探知に係る調査研究)、基礎科学研究助成(住友財団、多モードテラヘルツ波を用いた荷電粒子加速構造の研究)により支援された。また、大阪大学産業科学研究所附属量子ビーム科学研究施設の教員、技術職員の方々にも、実験装置の立ち上げや運転において、支援を頂いた。関連する方々に深く感謝したい。

参考文献

- [1] G. Berden et al., Phys. Rev. Lett. 99, 164801 (2007).
- [2] J. Yang et al., Nucl. Instrum. Methods A 556, 52 (2006).
- [3] J. Yang et al., Nucl. Instr. and Meth. A 629, 6 (2011).
- [4] T. Takahashi et al., Phys. Rev. E 50, 4041 (1994).
- [5] A. M. Cook et al., Phys. Rev. Lett. 103, 095003 (2009).
- [6] K. Kan et al., Appl. Phys. Lett. 99, 231503 (2011).
- [7] <http://www.txcorp.com/>
- [8] B.M. Bolotovskii, Sov. Phys. Usp. 4, 781 (1962).
- [9] K. Kan et al., Rev. Sci. Instrum. 83, 073302 (2012).
- [10] K. Kan et al., Appl. Phys. Lett. 102, 221118 (2013).