

1次元PIC法を用いた電子管における波動粒子相互作用シミュレータの開発 Development of wave-particle interaction simulator for electron tubes using 1D PIC method

曾我之泰, 石黒菜摘, 佐藤政行, 吉田光宏^A
Y.Soga, N.Ishiguro, M.Sato, M.Yoshida^A

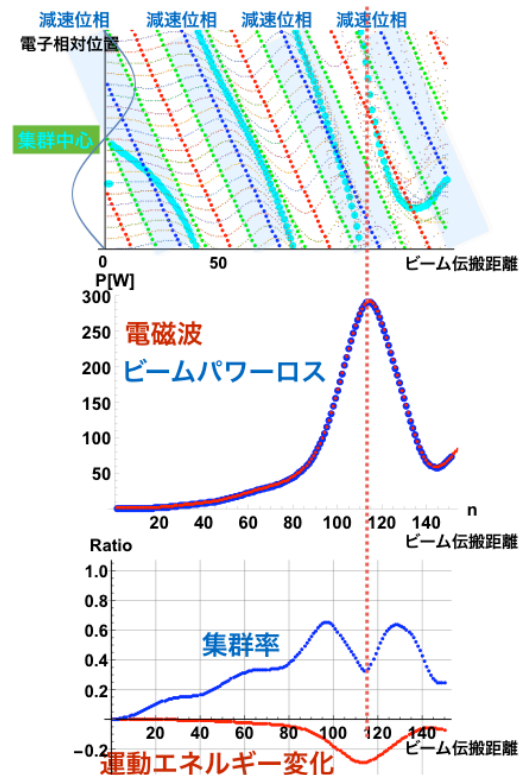
金沢大学, 高エネルギー加速器研究機構^A
Kanazawa Univ., ^AHigh Energy Accelerator Research Organization

周波数が数 100 GHz から 1 THz の電磁波を発生するデバイスの市場規模は拡大を続けており, THz イメージング, 非破壊検査, および通信分野への応用が期待されている。これらの応用に必要とされる高出力・定常放射の THz 光源は, レーザーよりも電子管が有利であると考えられる。しかし実用的な光源・検出器の開発は遅れている。後進波発振管 (BWO) は小型で定常放射する光源であり THz 帯のものも市販されているが, 高価な上に出力は 1mW 程度と弱い。本研究の最終目標は BWO をはじめとする電子管について, その動作原理の把握と問題点の抽出の後, 高出力化に向けた新構造発振管の設計・製作をおこない, 小型・定常動作・高出力・安価な THz 光源を開発することである。

我々は電子管の設計に必要な不可欠である電磁波と電子群の相互作用を短時間で計算可能なシミュレータを開発した。従来用いていた CST STUDIO SUITE は代表的な 3次元電磁界解析ソフトであり, 電磁波の透過特性から発振解析を含む電子管開発に関するすべての計算が可能であるが[1], 発振解析については 3次元 PIC コードを用いるため計算に長時間を要する。これは試行錯誤が必要とされる遅波構造の構想段階での使用は現実的ではない。我々のシミュレータでは発振する電磁波のうち, 電子ビームと結合する空間高調波の 1 波長領域のみを考慮するという大幅な簡略化を行い, さらに強磁場にガイドされる電子の運動は 1次元であることを考慮し 1次元 PIC 法を用いて発振解析に要する計算時間を大幅に短縮している。まず, 時間変化する振幅 $E(t)$ を適当に与えた電場のもとで, ビーム系から見た電子群の運動方程式を解き, 電子ビームが失うパワー $P(t)$ を評価する。次に, 電磁波パワーは $P(t)$ からのみ得られるとして $E(t)$ を更新し, 新たな電場のもとで電子群の運動を再計算するという手順を繰り返し, $P(t)$ と $E(t)$ の自己無撞着な解を決定し定常解を得る。

最も基本的な電子管である進行波管について本シミュレータで発振解析をおこなった一例を図に示す。横軸は電子ビームの伝搬距離である。電子ビームが遅波構造を進むにつれて, ビーム系から見た超粒子の軌道が集群(バンチ)を形成する様子が判る(上段)。電子集群の中心が電磁波の減速位相に乗り続けることで, 電子ビームの運動エネルギーが減少し電磁波にエネルギーが輸送される(中段)。発振出力の最大値は電子ビームの運動エネルギーが最小値となるところで得られる(下段)。本シミュレータによる発振解析は電磁波と電子ビームの相互作用を 1次元に近似できる BWO, 進行波管, Clinotron 等, O 型電子管全般へ適用できると考えている。

[1] <https://www.cst.com>



図：進行波管中を伝搬する電子ビームの軌道(上段), 電磁波出力・ビームパワー損失(中段), および電子集群率, 運動エネルギー変化分(下段)。