

半導体微小電子源からの変調電子ビームを用いたミリ波・サブミリ波発生に関する研究 (0212012)

Generation of millimeter or sub millimeter waves using a modulated electron beam emitted from semiconductor field emitters

三村秀典 静岡大学電子工学研究所
Hidenori Mimura Research Institute of Electronics Shizuoka University

細田 誠[†] 菜嶋茂喜[†] 根尾陽一郎^{††}
Makoto Hosoda[†] Shigeki Nashima[†] Yoichiro Neo^{††}
[†]大阪市立大学 ^{††}静岡大学
[†]Osaka City University ^{††}Shizuoka University

研究期間 平成 14 年度～平成 16 年度

概要

本研究は、ミリ波・サブミリ波 (THz) 領域の光源 (超小型自由電子レーザ) の開発を目的とする。まず、半導体電界放射微小電子源を製作し、微小電子源からの直流状電子ビームを回折格子面上を走行させ、紫外から赤外領域におけるスミスパーセル (SP) 放射光の発生検出を行った。次に、微小電子源を用いたサブミリ (THz) 波領域における SP 放射の発生と検出の前実験として、熱カソードからの直流状電子ビームによるサブミリ波領域における SP 放射の発生と検出を行った。自由電子レーザを実現するため、SP 光のハイパワー化と共振器構造を検討し、変調電子ビームが SP 光のハイパワー化に、ファブリペロー共振器が共振器構造として有効であることを示した。最後に、半導体微小電子源を用いれば変調電子ビームを発生させることが可能であることを示し、これらの研究を通して、ミリ波・サブミリ波 (THz) 領域の超小型自由電子レーザの開発の基礎とした。

Abstract

The aim of this research is the development of a compact electro-magnetic source (a compact free electron laser) in a millimeter-wave or submillimeter-wave (THz) region. We have fabricated a semiconductor field emitter, and have generated and detected the Smith-Purcell (SP) radiation in the wave range from visible to infrared by skimming the direct electron beam on a metal grating. Moreover, we have generated a pulsed electron beam (a modulated electron beam) directly from the semiconductor field emitter by the pulsed light illumination on the field emitter. We also found the condition of the pulsed electron beam which enhanced the SP radiation for a compact free electron laser.

図 1 に示す Si を用いたゲート電極付き 1 ティップ電界放射微小電子源を製作した。スミスパーセル (SP) 放射は荷電粒子が金属回折格子面上を走行する際、鏡像電荷による双極子が振動するため電磁波が放射される現象である。従来この実験は、熱陰極を用いた加速エネルギー 100keV 以上の電子線に対して、大掛かりな装置で行われてきた。本研究では、陰極として微小電子源を用いて、超小型光源の開発を目標とするため、テーブルトップサイズの装置で行った。放射電磁波の波長(λ)と回折格子のピッチ(d)、電子の速度(V)、放射角(θ : 回折格子に平行な方向を $\theta=0$ とする)、次数 n との関係は式(1)で表される。

$$\lambda = \frac{d}{n} \left(\frac{c}{V} - \cos \theta \right) \quad (1)$$

ここで、 c は光速である。

(1)式より主に回折格子のピッチを変化することにより、様々な波長の電磁波を発生できることがわかる。微小電子源から放射された電子ビームはウエネルト電極で絞られ、スリット付き偏向器によって、回折格子の表面近傍を回折格子と平行に走行するよう調節された。今回、電子引き出しのための電子源のゲート電圧は 80V とした。この場合、電子源からは約 5 μ A の放射電流が得られるが、スリットで大部分はカットされるため、回折格子面上を走行する電子ビームは約 200nA であった。SP 放射光の検出は、回折格子に対して約 90° で放射される光をレンズで集光し、分光器で分光した後、紫外・可視・近赤外域は冷却 CCD で、赤外域に関しては冷却 InGaAs ダイオードアレイで検出した。用いた金属回折格子は 416nm ピッチである。図 2 にこの回折格子を用いて測定した放射光の紫外域から赤外域のスペクトルを示す。図に示すように、第 1 次から第 4 次までの SP 放射光が得られていることがわかる。SP 光放射において、直流状電子ビームの代わりにパルス電子ビーム (変調電子ビーム) を用いれば、SP 光のハイパワー化が図れる。図 3 にその原理図を示す。直流状電子ビームの場合、電子 1 個からの放射強度を I とすると N 個の電子ビームからは NI の放射が得られる。回折格子上に 1 個のパルスビームが走行している場合は、同位相に N 個の電子が存在するため干渉によって出力は N^2I になる。さらに、パルスビームと回折格子の周期が一致した場合、それぞれのパルスからコヒーレント放射 (N^2I) が放射され、さらにそれらが干渉し強めあう。計算によれば、パルスの数が増えると、干渉の効果により発振が強められる放射角が現れる。この時の強度は、コヒーレント・スミス・パーセルに比べて数桁にわたり増幅される結果となった。p 型半導体で製作した微小電子源では、電子は少数キャリアのため、電子引き出しのゲート電圧を上昇するにつれ、放射電流の飽和が現れる。その状態に、光照射を行うと、伝導帯に光励起キャリアが補給されるので、放射電流の増加が見られる。この現象を用いると、微小電子源から直接変調電子ビームを取り出すことができる。これは、熱陰極では、実現不可能な半導体微小電子源の利点である。図 3 に示す、連続コヒーレント放射を起こすためには、2~3psec の周期で、数百 fsec 程度的高速パルス

が必要である。そこで、**p型Si**半導体微小電子源の光応答特性を測定した。図 1 と同じ構造であるが、**p型Si**基板を用いて、**Si**半導体微小電子源を製作した。この微小電子源に**GaAlAs**レーザ（波長 830nm）からのパルス光を照射し、放射電流の光応答特性を測定した。図4に**p型Si**微小電子源に**GaAlAs**レーザのパルスビームを照射した場合の、放射電流のゲート電圧依存性を示す。図中のPD波形は、参照信号として、**GaAlAs**レーザのパルスビームの一部をホトダイオードに照射し、その光電流波形を測定したものである。ゲート電圧が高くなるにつれて、PD波形と同様な放射電流波形が得られており、**p型Si**微小電子源にパルス状のレーザビームを照射することにより、変調電子ビーム（パルス状電子ビーム）が得られることがわかる。しかし、**Si**を用いた微小電子源からは、**Si**のキャリア寿命が長いため、放射電流の光応答特性が遅く連続コヒーレント放射の条件を満足する変調電子ビームを得ることは困難であることがわかった。そこで、変調電子ビーム用電子源として、キャリア寿命の極めて短い低温**GaAs**を用いた微小電子源の提案を行った。これらの研究を通して、ミリ波・サブミリ波（THz）領域の超小型自由電子レーザの開発の基礎を確立できた。

図 1 製作した 1 ティップ **Si** 電界放射微小電子源

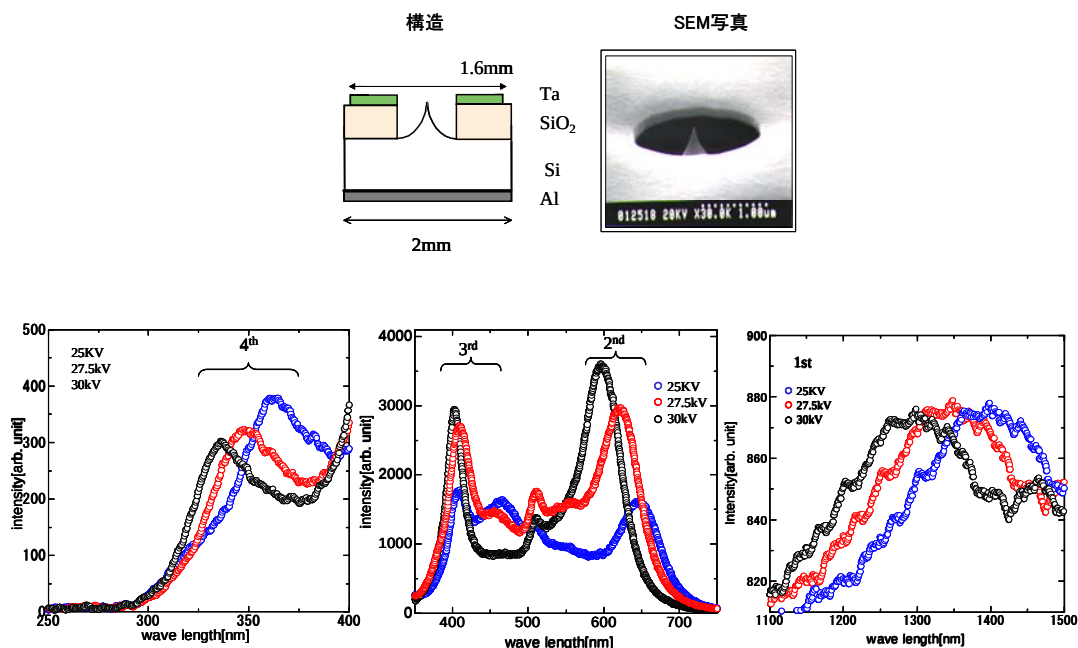


図 2 416nm ピッチの回折格子を用いて測定した放射光の紫外域から赤外域のスペクトル

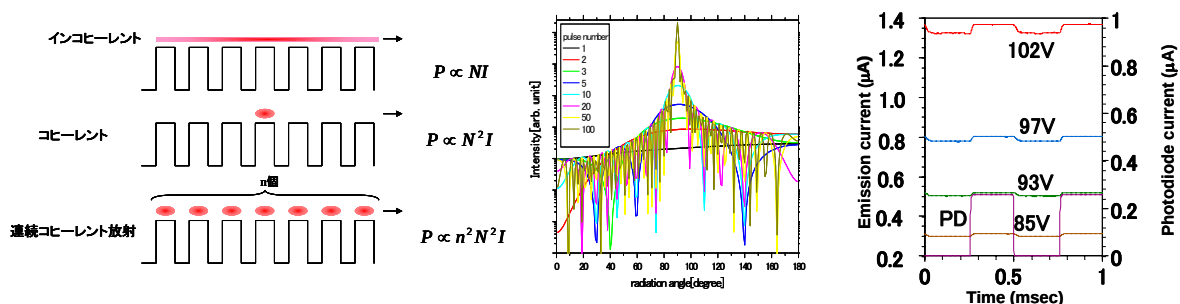


図 3 パルス電子ビームによりスミスパーセル光のハイパワー化が図れる原理。パルスの数が増えると、干渉の効果により発振が強められる放射角が現れる。

図 4 **p 型 Si** 微小電子源に **GaAlAs** レーザのパルスビームを照射した場合の放射電流のゲート電圧依存性

誌上発表リスト

- [1] H. Mimura, T. Ukeba, H. Shimawaki and K. Yokoo, “Photoresponse of a p-type Si field emitte”, J. Vac. Sci. Technol. B Vol. 22 No.3 pp1218-1221 (2004)
- [2] H. Mimura, H. Ishizuka and K. Yokoo, “Future concept for compact FEL using a field emission micro-cathode”, Nuclear Instr. Meth. Phys. Resear. A Vol. 528 pp497-501 (2004)
- [3] Y. Neo, Y. Suzuki, K. Sagae, H. Shimawaki and H. Mimura, “Smith-Purcell radiation using a single-tip field emitter”, J. Vac. Sci. Technol. B Vol. 23 No. 2 pp840-842 (2005)