

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2013

課題番号：21540514

研究課題名(和文)フェムト秒電子バンチが誘起するコヒーレントチェレンコフ放射によるテラヘルツ分光法

研究課題名(英文)terahertz spectroscopy based on the coherent Cherenkov radiation emitted from femto-second electron bunch

研究代表者

浅川 誠 (ASAKAWA, Makoto)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：30280704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：光波長より短い電子バンチはコヒーレントかつ強力な放射光を発生する。また、誘電体近傍を伝搬する電子は、その進行速度が誘電体内での光の位相速度を超えれば、誘電体内にチェレンコフ放射光を誘起する。この二つの現象を組み合わせた新しいテラヘルツ帯分光法の開発を行った。本研究の鍵技術となる超短パルス電子バンチ源の開発研究では、(1)超短パルス電子銃特有の飽和現象を明らかにし、(2)飽和状態では電子バンチのパルス幅が急激に伸びることを明らかにした。テラヘルツ分光実験では、放射光発生しきい加速エネルギーと誘電率の関係が理論値と一致する事を実験で確認した。以上の成果により新分光法の原理が実証された。

研究成果の概要(英文)：A novel terahertz spectroscopy method has been investigated. The method is based on two phenomena: the coherent radiation emitted from the ultra-short electron bunch and Cherenkov radiation induced by electron passing vicinity of the surface of dielectric materials. Coherent Cherenkov radiation is produced when the electron velocity exceeds the phase velocity of the radiation inside the dielectric. Development of a 100 femto-second photoinjector revealed that the saturation current density was much higher than that of the long-pulsed electron gun, and the remarkable elongation of the electron bunch length under the saturation. In the study of the radiation, the threshold acceleration voltage for the generation of the Cherenkov radiation was observed. Measured threshold was agreed well with the theoretical prediction. We conclude that the principle of the Coherent Cherenkov radiation spectroscopy could be demonstrated.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：応用光学・量子光工学 量子ビーム 粒子線 テラヘルツ/赤外材料・素子

1. 研究開始当初の背景

フェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ時間領域分光法(テラヘルツ TDS)の出現により,新しい光技術が創成されている.なかでもテラヘルツ・イメージングは分子を同定できる非破壊検査技術として注目され積極的に研究が進められているが,その実用化には高出力・小型・安価なテラヘルツ光源の開発が最重要課題である.様々な方式の高出力光源が開発されているなかで,量子カスケードレーザーは既に 100mW を超える出力を記録し産業利用光源の最有力候補である.しかしながらこの方式では光の周波数を狭い範囲でしか走査できない.広範囲の指紋スペクトルを調べるためには周波数走査帯域の広い高出力光源が必要であり,ジャイロトロンや自由電子レーザー(FEL)のような電子ビーム駆動型的光源も重要視されている.この種の光源の問題点は超伝導磁石や電子加速器などを用いるため,大型かつ高価になってしまうことである.この問題を克服するべく我々はチェレンコフ放射を利用した小型 FEL を提案し,開発を進めている.

チェレンコフ放射は電子が光の位相速度を超える場合に光が発生する現象である.光速は誘電体によって下げるのだが,より高誘電率の材料を使えばより低速度の電子で光を発生でき,FEL 装置を小型化できる.我々の装置ではテラヘルツ帯で比誘電率 11.6 を持つ Si を用い,従来の FEL と比べ遥かに低エネルギーである加速エネルギー 40keV の電子によってチェレンコフ放射光を発生させている.一方で high-K 材料は次世代 100GHz~1THz プロセッサの絶縁膜として Intel に代表される多数のデバイス研究チームにより研究されており,既にサブテラヘルツ帯で比誘電率 120~170 を持つチタンオキサイドなどが開発されている.このような材料を用いれば,加速エネルギー 2keV の電子で駆動する非常に小型のチェレンコフ FEL を実現できる可能性がある.このためには High-K 材料のテラヘルツ特性調査が必要であるが,今回我々はテラヘルツ TDS 法とは異なる原理の新技术,「実際に high-K 材料を用いてテラヘルツ帯のチェレンコフ放射光を発生させ誘電率を評価する手法」を考案した.

2. 研究の目的

本研究では,パルス幅が 100fsec 以下の極短電子バンチによって高誘電率材料(high-K 材料)内に誘起されるコヒーレント・チェレンコフ放射の特性からテラヘルツ帯複素屈折率を評価する手法を確立するとともに,チェレンコフ FEL 用に適した材料を見いだすことを目標とする.端的に言えば「試料にテラヘルツ光を照射するのではなく,試料を使ってテラヘルツ光を発生させる」のである.

3. 研究の方法

光波長より短い長さの電子バンチは集団的運動によりコヒーレントかつ強力な放射光を発生する.比誘電率 ϵ_r が 100 を超える high-K 材料の内部および近傍を伝搬するテラヘルツ光の波長は 30 μm 程度になり,光速は 0.1c にまで下がる.一方で,パルス幅 100fsec / 加速エネルギー 10keV の電子バンチの速さは 0.2c であり光速より速く,長さは 6 μm であり光波長より短い.したがって材料表面の近傍を通過する電子バンチ(材料に電子バンチは当てない)はテラヘルツ帯のコヒーレント・チェレンコフ放射光を誘起できる.チェレンコフ放射は電子速度が光速 $c/\sqrt{\epsilon_r}$ を超えるところでしきりに発生するから,このしきい電子速度から誘電率を知ることができる.

4. 研究成果

(1) 誘電体導波路の分散関係と Cherenkov しきい値

図 1 は誘電率測定のための high-K 材料の配置図である.電磁波の伝搬方向を z 軸にとり,解析を容易にするため導波管は y 軸方向に無限に広いと仮定した.電子ビームの電流密度が低い場合,電磁波の電場に対して波動方程式

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{\epsilon(x)c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

が成立する.誘電体導波路では比誘電率は x 軸の位置の関数であり,真空領域 ($|x| < D$) では

$$\epsilon(x) = 1$$

シリコン板領域 ($D < |x| < D + d$) では

$$\epsilon(x) = \epsilon_r$$

である.これをシリコン板-真空領域の境界(すなわち $|x| = D$)で電磁波の位相および連続,金属表面(すなわち $|x| = D + d$)で電場の境界に平行な成分が 0(すなわち $E_z = 0$)という境界条件の下で解くと,角周波数 ω と波数 k を持つ TM モードの電場は,真空中間隙で

$$\begin{aligned} E_x &= E_0 \frac{k_z}{k_0} \sinh(qx) \exp i(k_z z - \omega t) \\ E_y &= 0 \\ E_z &= E_0 \frac{p}{\epsilon_r k_0} \left[\sinh(qD) \sin p(x-D) + \epsilon_r \frac{q}{p} \cosh(qD) \cos p(x-D) \right] \exp i(k_z z - \omega t - \pi/2) \end{aligned} \quad (4)$$

シリコン板中で

$$\begin{aligned} E_x &= E_0 \frac{k_z}{\epsilon_r k_0} \left[\sinh(qD) \cos p(x-D) + \epsilon_r \frac{q}{p} \cosh(qD) \sin p(x-D) \right] \exp i(k_z z - \omega t) \\ E_y &= 0 \\ E_z &= E_0 \frac{p}{\epsilon_r k_0} \left[\sinh(qD) \sin p(x-D) + \epsilon_r \frac{q}{p} \cosh(qD) \cos p(x-D) \right] \exp i(k_z z - \omega t - \pi/2) \end{aligned} \quad (5)$$

である.式中のパラメータはそれぞれ

$$\begin{aligned} k_0 &= \omega/c \\ p &= \sqrt{\epsilon_r k_0^2 - k^2} \\ q &= \sqrt{k^2 - k_0^2} \end{aligned}$$

である.また分散関係は

$$\epsilon \frac{q}{p} \cos(pd) \cosh(qD) - \sin(pd) \sinh(qD) = 0 \quad (6)$$

である.これは金属表面で $E_z = 0$ となる条件である.すなわち(6)式が満たされれば(5)式のが 0 になる.真空中間隙の電場は,シリコン板からの距離とともに指数関数的に減少し, $x=0$ で最も弱くなる.これは真空領域の電磁

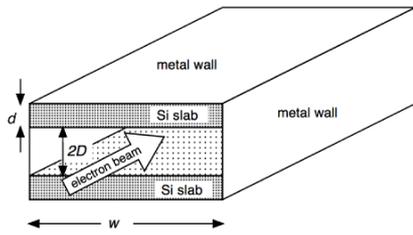


図 1

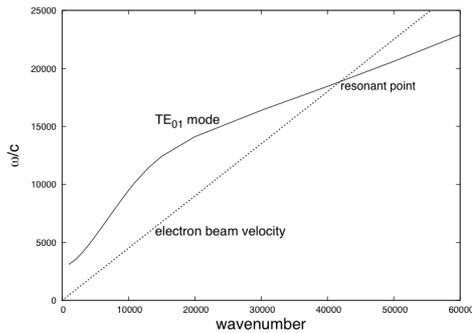


図 2

波がエバネッセント波であることに起因する。電磁波は主に誘電体中を光速 c より遅い速度で伝搬しており、その一部が真空領域に漏れだしていると解釈すれば、このモードが真空中であっても c より遅い位相速度を持つことが理解できる。

厚さ $d=30\mu\text{m}$ のシリコン板を間隔 $D=30\mu\text{m}$ で配置した場合の分散関係を図 2 に示す。図中実線が式(6)に基づく分散曲線であり、破線は加速エネルギー 50keV の電子と同じ速さの位相速度を持つ電磁波の分散関係である。以下、これをビームモード分散直線とよぶ。図 2 の分散関係は、ある波数に対して根となる角周波数を無数に持つが、それらの中で最も周波数が低い根を TE_{01} モードと呼ぶことにし、これを図中に示した。 TE_{01} モードの分散曲線とビームモード分散直線の交点にあたる周波数では、電子速度と電磁波の位相速度が一致し増幅が起こる。この条件を共鳴条件と呼ぶ。上記の構造での共鳴周波数は 1THz であり、これより高い周波数の電磁波の位相速度は電子速度より遅くチェレンコフ放射発生条件を満たす。電子速度を遅くするとビームモード分散直線の傾きは小さくなり、共鳴周波数が高くなることがわかる。電子ビーム加速エネルギーを 27keV にまで下げると、共鳴周波数は 2THz まで上昇する。このようにして CFEL では周波数を連続的に調整できる。加速エネルギーを 26keV より低くすると、すべての周波数の TM モードの位相速度よりも電子速度は遅くなり、チェレンコフ放射は発生しなくなる。

(2)フェムト秒電子バンチ源の開発とコピー

レント放射光発生実験

光電子銃システムは、図 3 のように、静電電子銃とチタンサファイアレーザーからなる。チタンサファイアレーザーはパルス幅 $95\text{-}105\text{ fs}$ の基本波（波長 800 nm ）を、 1 ms 毎に出力する。この出力光は 3 倍高調波発生器により、波長 266 nm （光子エネルギー $h\nu = 4.66\text{ eV}$ ）の紫外光に変換される。3 倍高調波のパルスあたりのエネルギーは 0.3 mJ である。レーザー光のエネルギーは、レーザー光軸に対するビームスプリッターの角度を変えることにより、 0.02 mJ から 0.26 mJ の間で調節される。そしてレーザー光は集光用レンズを通過後、融解石英真空窓を介して電子銃真空容器内に導光される。レーザーの陰極に対する入射角度は 60° である。陰極表面でのレーザースポット断面積 SL は $1.5 \times 5 = 24\text{ mm}^2$ であり、最大のレーザー照射強度は $1.1 \times 10^{11}\text{ W/cm}^2$ である。

陰極の材質はタングステン（仕事関数 $= 4.5\text{ eV}$ ）である。形状は直径 19 mm 、厚さ 2 mm の円盤である。陰極は高圧真空端子で絶縁された支持具に取り付けられており、これには最大 -50 kV の加速電圧 VAK が印加される。光電子放出の際、電子は 0 から $h\nu = 0.16\text{ eV}$ までの運動エネルギー広がりを持って放出される。

光電子放出後、電子は陽極に向かって加速される。陰極から陽極までの距離 d は 10 mm である。陽極は直径 14 mm 、厚さ 1 mm の円板であり、その中心には直径 2 mm のピンホールがあけられている。ピンホール通過後、電子バンチは長さ 83 mm の無電場空間を伝搬し、フォスファープレートに衝突する。蛍光像は CCD カメラで撮影され、その発光強度分布から電子バンチの直径は評価される。

図 4 は、陽極に到達する電子バンチ電気量と陰極に照射されたレーザーエネルギーの関係である。加速電圧が 10 kV の場合、レーザーエネルギーが 0 から $50\text{ }\mu\text{J}$ まで増えると、電子バンチ電気量は 0 から 110 pC まで比例的に増加する。しかし、レーザーエネル

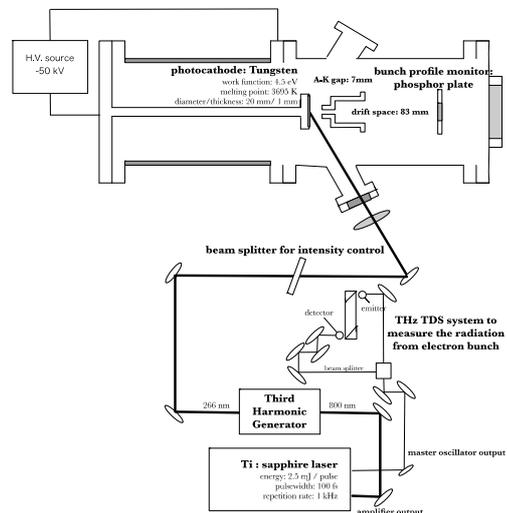


図 3

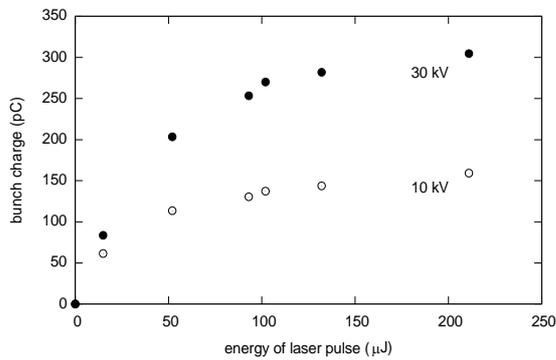


図 4

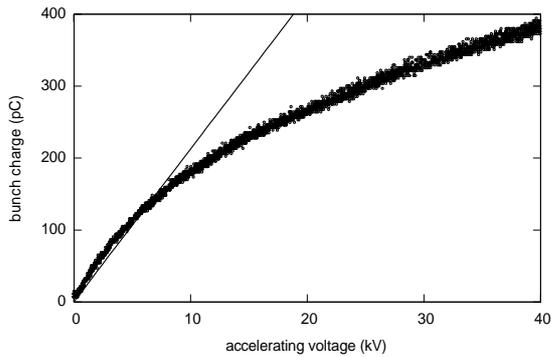


図 5

ギーが 50 μJ から 230 μJ (4.6 倍) に増えても、バンチ電気量の増加量は 155-110=45 pC (1.4 倍) でしかない。このようなバンチ電気量の飽和傾向は、加速電圧が 30 kV の場合にも見られる。レーザーエネルギーが 0 から 100 μJ に達するまでバンチ電気量はレーザーエネルギーが増えるにつれ増加する。しかし、それ以上レーザーエネルギーが増えても、バンチ電気量は 300 pC 程度ではほぼ一定である。この飽和電気量は電流密度に換算すると、300 pC/100 fs/0.24 $\text{cm}^2=12.5 \text{ kA/cm}^2$ である。直流電子ビームに対しては、電子銃が出力できる最大電流密度(空間電荷制限電流密度)は

$$j_{\text{CL}} = \frac{4\epsilon_0}{9d^2} \sqrt{\frac{2e}{m}} V_{\text{AK}}^{1.5} = 2.33 \times 10^{-6} \frac{V_{\text{AK}}^{1.5}}{d^2} [\text{A/m}^2] \quad (7)$$

で与えられる。 ϵ_0 は真空の誘電率、 m は電子の静止質量である。式(7)は Child-Langmuir 則と呼ばれ、空間電荷制限電流密度が加速電圧の 1.5 乗に比例するという特徴を持つ。パルス幅が ns や 100 ps オーダーのレーザーにより励起される光電子銃の飽和電流も、この制限を受けることが報告されている。これは電子ビームの伝搬方向の長さが陰極-陽極間隔より長く、直流電子ビームのように振る舞うためである。しかし、我々の実験で得られた最大動作電流密度は、式(7)が規定する電流密度の 400 倍以上の値であった。このように、長パルス電子銃と比べ、非常に高い電流密度で動作できることがフェムト秒電子銃の大きな特徴である。

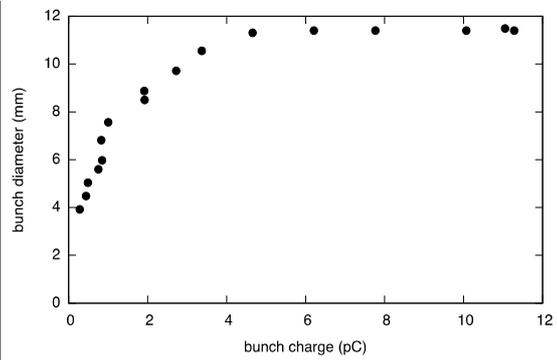


図 6

図 5 はバンチ電気量の加速電圧に対する依存性である。照射したレーザーのエネルギーはパルスあたり 210 μJ である。加速電圧が 0 V から 8 kV まで増加する間は、バンチ電気量は加速電圧に比例して増加した。加速電圧が 8 kV より高い場合には、加速電圧の上昇とともに、電気量の増加率 dQ/dV は徐々に減少した。パルス電子銃は非定常状態にあり、その空間電荷制限電流密度の定式化は複雑な問題であるが、パルス幅が非常に短い極限では空間電荷制限電荷密度が

$$\sigma_{\text{sat}} = \epsilon_0 \frac{V_{\text{AK}}}{d} [\text{C/m}^2] \quad (8)$$

に従うことが理論的に示されている。加速電圧が低く電子銃が空間電荷制限状態にあると考えられる Fig.3 の $V_{\text{AK}} < 8 \text{ kV}$ の領域の電気量-電圧特性は

$$Q_{\text{sat}} = \sigma_{\text{sat}} S_L = \epsilon_0 \frac{V_{\text{AK}}}{d} S_L [\text{C}] \quad (9)$$

に良く一致しており、この実験結果は式(8)を支持している。

図 6 はピンホールを通過した電子バンチ電気量とフォスファールプレート上での電子バンチの直径の関係である。加速電圧は 30 kV であった。アパーチャを通過したバンチ電気量が 0.1 pC から 4.6 pC まで増えると、フォスファールプレート上でのバンチ直径は 3.9 mm から 11.5 mm まで増加した。しかし電気量が 4.6 pC から 11.3 pC まで増えても、直径は 11.5 mm のまま一定であった。グラフ中の最大電気量 11.3 pC は、陽極に到達したバンチ電気量が 310 pC であったときに測定されたものである。電子銃は空間電荷制限を受けており、これ以上電気量を増やすことはできなかった。アパーチャを通過した電子バンチの電気量が 4 pC から 11.3 pC まで約 3 倍増えても、フォスファールプレートでの径が同じであるという実験結果は、電気量が増えても電流密度は同じであったことを示唆する。4 pC 以上の電気量ではパルス幅が電気量の増加とともに長くなり、電荷密度が一定となっていたものと考えられる。

電気量が同じでも電流密度の高い電子バンチほど電子同士の反発力は大きい。従って、電気量が同じでもパルス幅が短いほど電子バンチは発散する。今回の実験では電子バンチの 83 mm 伝搬後の電気量と直径（およびアパーチャ通過直後の電子バンチ径=アパーチャ径）は測定されている。これらのデータからパルス幅を逆算する手法を開発し、電子バンチのパルス幅を推定した。

図7は図6に示した実験結果から算出した、電気量とパルス幅の関係である。電気量が 0.1 pC から 4.6 pC に増えても、パルス幅は 0.1 ps から 0.4 ps にしか伸びない。しかし 4.6 pC を境にパルス幅は急激に伸び、電気量 11.3 pC では 3.3 ps に達する。境目である 4.6 pC は、電子銃が空間電荷制限を受けているときの電気量である 11.3 pC の 40%にあたる。電気量が空間電荷制限電気量の 40%に達するとパルス幅が急激に伸びるという傾向は、加速電圧が 20 kV および 38 kV の場合にも確認された。

図8は電子バンチ電気量とボロメータで測定したチェレンコフ放射光のエネルギーの関係である。使用した誘電体はシリコン（厚さ 0.6mm, 幅 5mm, 長さ 110mm）であり、電子バンチの加速エネルギーは 35 keV である。チェレンコフ放射光が発生するしきい電子バンチ加速エネルギーは 27keV である。ボロメータの測定波長範囲は 0.2mm~4mm である。放射光エネルギーは電子バンチ電気量の 1.6 乗に比例した。このような非線形な依存性は、今回測定した放射光がコヒーレント放射光である事を示唆する。

電子バンチ長が光波長より十分に短ければ、コヒーレント放射光のエネルギーは電気量の 2 乗に比例する。実験で観測された 1.6 乗則は、電子バンチ長が波長の 1/2 程度に長くなっていることを示唆する。これは電子バンチ源開発研究において明らかになった、電子バンチ長は電気量の増加とともに長くなり、電気量が 310pC でパルス幅が 11ps まで伸びる、すなわちバンチ長が 11ps × 0.4c=1.3mm まで伸びるという実験結果とよく一致する。

電子バンチの加速エネルギーを徐々に減少させてゆくと、25 keV で放射光が確認されなくなった。これは理論的に予測されたチェレンコフ放射しきい加速エネルギーに良く一致している。本研究で提案したテラヘルツ分光法の基本原理は実証されたといえる。

今後の課題として、しきい加速エネルギー付近での弱い放射光を精度よく測定することがあげられる。このような条件下でテラヘルツ時間領域分光ができれば、誘電率評価の精度が向上する。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

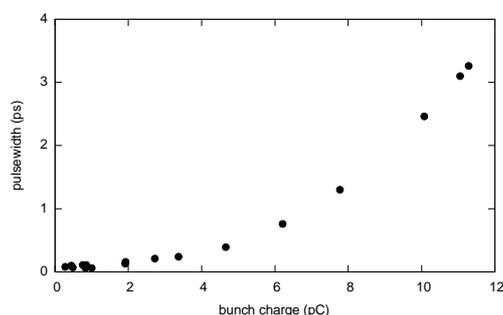


図 7

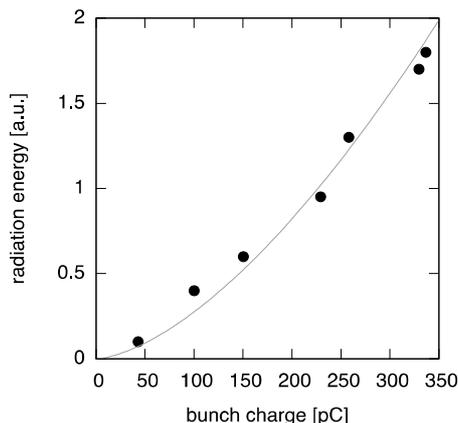


図 8

〔雑誌論文〕(計 10 件)

李曉龍, 岡崎文音, 真柴雄司, 川人大希, 山口聡一郎, 浅川誠, フェムト秒電子バンチのパルス幅伸長, 日本赤外線学会誌, 査読有, 23 巻, 2013, 55~60

浅川誠, 低エネルギー電子ビームにより駆動されるチェレンコフ自由電子レーザーの発振過程, プラズマ・核融合学会誌, 査読なし, 第 88 巻第 10 号, 2013,

吉田裕哉, 宗本尚也, 木村隆洋, 佐野匠, 山口聡一郎, 浅川誠, ダブルスラブ型チェレンコフ自由電子レーザー共振器の解析, 査読有, 電気学会論文誌 A, 132 巻, 2012, 141-146.

D. Li, M. Hangyo, Y. Tsunawaki, Z. Yang, Y. Wei, S. Miyamoto, M. R. Asakawa, K. Imasaki, Growth rate and start current in Smith-Purcell free-electron lasers, 査読有, APPLIED PHYSICS LETTERS, vol. 100, 2012, 191101 1~4.

D Li, M Hangyo, Y Tsunawaki, Z Yang, Y Wei, S Miyamoto, M.R. Asakawa, and K Imasaki, Super-radiant Smith-Purcell radiation from periodic line charges, 査読有, Nuclear Instruments and Methods A, Vol. 674, 2012, 20~23.

Hiroko Yamamoto, Hiroaki Hamabe, Shintaro Sone, Soichiro Yamaguchi, and Makoto R. Asakawa, Space-Charge

Limitation of a Femtosecond Photoinjector, International Journal of Optics, 査読有, vol. 2011, 2011, 1~5.

D. Li, Y. Tsunawaki, M. R. Asakawa, M. Hangyo, S. Miyamoto, K. Imasaki, Improve growth rate of Smith-Purcell free-electron laser by Bragg reflector, 査読有, APPLIED PHYSICS LETTERS, vol. 98, 2011, 211503-1~3.

D. Li, M. Hangyo, Z. Yang, M. R. Asakawa, S. Miyamoto, Y. Tsunawaki, K. Takano, K. Imasaki, Smith-Purcell radiation from a grating of negative-index material, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 査読有, vol. 637, 2011, 135~137.

D. Li, Z. Shi, Z. Yang, M. R. Asakawa, G. Huo, Y. Tsunawaki, K. Imasaki, Output of Super-radiant Smith-Purcell radiation: A theoretical analysis, Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 査読有, vol. 31, 2010, 1271~1277.

山本寛子, 曾根慎太郎, 吉田裕哉, 浅川誠, フェムト秒電子バンチの生成とコヒーレント放射過程, 電気学会 光応用・視覚研究会資料, 査読なし, LAV-10-30, 2010, 33 ~ 37.

〔学会発表〕(計 11 件)

吉田裕哉, 船越壮亮, 仲嶺 亮, 眞柴雄司, 野村洋佑, 岡崎文音, 山口聡一郎, 浅川誠, ダブルスラブ型チェレンコフ自由電子レーザー共振器と高耐性小型電子銃の開発, レーザー学会, 姫路商工会議所, 2013/1/28-30.

川人大希, 山本寛子, 鷺田浩人, 李 暁龍, 和田弓規, 小川琢巳, 山口聡一郎, 浅川誠, フェムト秒電子バンチのパルス幅伸長, 電気学会 基礎・材料・共通部, 2012/12/2, 大阪産業大学.

山本寛子, 川人大希, 鷺田浩人, 山口聡一郎, 浅川誠, フェムト秒電子バンチの6次元体積発散と放射過程, 第22回日本赤外線学会研究発表会資料集, 2012/11/1, 関西大学.

川人大希, 鷺田浩人, 山本寛子, 山口聡一郎, 浅川誠, フェムト秒 Photoinjector での電子バンチ放射光測定系の開発, 第22回日本赤外線学会研究発表会資料集, 2012/11/1, 関西大学.

吉田裕哉, 木村隆洋, 宗本尚也, 佐野匠, 山口聡一郎, 浅川誠, 綱脇恵章, チェレンコフ自由電子レーザー共振器の最適設計と電子銃の動特性, 第21回(平成23年度)日本赤外線学会研究発表会, 2011/10/20, 浜松市アクトシティー浜松.

山本寛子, 濱部裕晃, 嶋裕充, 山口聡一郎, 浅川誠, フェムト秒電子バンチのパルス幅発展と放射過程, 第21回(平成23年度)日本赤外線学会研究発表会, 2011/10/20, 浜

松市 アクトシティー浜松.

山本寛子, 曾根慎太郎, 吉田裕哉, 浅川誠, フェムト秒電子バンチの生成とコヒーレント放射過程, 電気学会, 光応用・視覚研究会, 2010/12/27, 大阪産業大学

Makoto R. Asakawa, Shintaro Sone, Hiroko Yamamoto, Ryota Sonomura, Soichiro Yamaguchi, Yoshiaki Tsunawaki, Photo-electron gun generating sub-pico second bunch

35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves 2010年9月8日 Rome, Italy

浅川誠, 小型 THz チェレンコフ自由電子レーザーの開発, レーザー学会研究会, 2010年2月12日, 大阪産業大学梅田サテライト(大阪)

浅川誠, チェレンコフ放射に基づくテラヘルツ波発生の研究, 電気学会学会研究会, 2010年1月17日, 大阪産業大学梅田サテライト(大阪)

浅川誠, Compact radiation sources driven by moderate energy electron beam, TeraTech '09, 2009年12月1日, 大阪大学中之島センター(大阪)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅川 誠 (ASAKAWA, Makoto)
関西大学・システム理工学部・教授
研究者番号: 30280704

(2) 研究分担者

山口 聡一郎 (YAMAGUCHI, Soichiro)
関西大学・システム理工学部・准教授
研究者番号: 30413991

綱脇 恵章 (TSUNAWAKI, Yoshiaki)
大阪産業大学・工学部・教授
研究者番号: 90030056

(平成23年度まで)