高品質ビームの発生及びその応用研究

研究代表者 鷲尾 方一

(先進理工学部 応用物理学科 教授)

1. 研究課題

我々は非常に良く制御された高品質ビーム、ここでは電子ビーム・X 線ビーム・レーザービ ーム等を発生し、それを用いることによる応用研究を行っている。これらはエネルギーフロン ティアである高エネルギー実験用加速器施設のベースとなる技術であるとともに、非常に高品 質であるが故、様々な応用が可能である。これらのテーマの中から最近大きな成果のあがって いるものに関して記載する。

1つ目の成果報告は高品質電子線の傾き計測、2つ目としては、電子線傾き制御を用いたコヒ ーレントチェレンコフ光によるテラへルツイメージング応用試験に関する報告を記載する。

2. 主な研究成果

我々の研究プロジェクトでは喜久井町キャンパスに設置したレーザーフォトカソード高周波 電子銃(RF-Gun)と呼ばれる高品質電子ビーム発生装置が基幹となっている。この装置ではレー ザー光を光陰極に照射することによって電子ビームを取出し、即座に加速できることから世界 トップレベルの高品質ビーム生成に成功している。2.1 節より具体的な当該年度の成果に関して 述べる。まずは通常、まっすぐ生成されていると考えられている電子線に対して、機器の調整 次第では傾きを持つことを我々の開発した高周波偏向空胴を用いることで計測することができ たため、報告する。また、2.2 節では傾きを計測するのではなく、積極的に傾きを付与すること で得られるコヒーレントテラヘルツ放射を用いた応用成果として、テラヘルツイメージングの 試験結果を示す。

2.1 電子線の傾き角計測

レーザーフォトカソード高周波電子銃では、レーザーパルスを光カソードに照射することに よって光電子をかたまりとして取出し、即座に加速することによって高品質な電子ビームを得 ている。レーザーの入射方法としては、鷲尾研究室で用いている手法は2つあり、カソードに 対して斜めから照射する『斜め入射』、レーザーをカソードのほぼ正面から入射する『垂直入射』 である。垂直入射においても、電子ビームの通過する穴が必要であるため、1度程度垂直から はずれていることを注意されたい。垂直入射はより高品質な電子ビームを取り出すことができ る。その一つの理由は斜め入射では電子線が傾いてしまうのに対して、まっすぐ生成されると いう点である。斜め入射ではカソードにおけるレーザー光の吸収を最大化することが可能で、 より電荷量を得ることが可能である。実験に応じてそれぞれ使い分けている。今回の実験では、 傾きを持たずに生成されていると認識していた垂直入射においても電子線が傾く現象を明らか にしたとともに、斜め入射においてもどの程度傾いて生成されているのかを明らかにすること ができたので報告する。

以下の Fig. 1 に実験のセットアップを示す。レーザーフォトカソード高周波電子銃から生成 された電子ビームは左から右へ進んでいくことになる。途中に設置された RF-Deflector (高周 波偏向空胴)によって、傾きを計測する。高周波偏向空胴は高周波によって電子線を傾けること が可能な装置であり、その供給する高周波の電力を変化させることで電子線を任意の角度に傾 けることができる。また、高周波の半周期ずれた位相を用いることで、逆向きの傾きに傾ける ことも可能である。レーザー装置に関しては図中に示していないが、垂直入射の場合には Faraday Cup の後ろの真空容器からほぼ垂直に入射し、斜め入射の場合には RF-Gun に設置さ れた入射ポート (入射角約 67.5 度)から入射される。



Fig.1:電子線傾き計測実験セットアップ図

傾きはセットアップ最下流に設置しているプロファイルモニタースクリーンによって傾けた後 のビームの大きさを複数点において評価することで算出することが可能である。その結果の一 例を以下の Fig. 2 に示す。左図は垂直入射のほぼ電子線が傾いていない状況の測定結果であり、 右図は斜め入射の際の傾いている様子を示している。横軸は高周波偏向空胴の傾ける強度にあ たり、縦軸はその際に測定されたビームの大きさの2乗である。つまり、横軸が0の位置にお いて測定結果が最小値を示していれば電子線は傾いておらず、ずれていればその最小値を示す 横軸の値の分だけ傾いていることになる。右図を見れば明らかに0以外のところで最小値を示 しており、これによって傾いていることを明らかにすることができた。



(A)垂直入射におけるほぼ傾いていない計測結果 (B)斜め入射における傾いている時の計測結果 Fig.2:電子線傾き角計測の一例

この傾き角計測をそれぞれの入射方法で加速高周波位相を変化させて行った。その結果を以下のFig.3に示す。左図に傾き角計測結果、右図はその際のバンチ長(電子線の進行方向長さ)の測定結果を表わしている。まず図より明らかなこととして、斜め入射と比較して垂直入射の場合にはほぼ傾くことなく電子線が生成されている。ただし、加速位相が高位相側に行くに従い、多少傾きが観測されている。斜め入射においては低位相側で大きく傾いており、その傾きは45度近くに及ぶことがわかる。



Fig.3:加速位相と電荷量・THz光強度の関係

これは非常に大きな傾きであり、今後斜め入射法を用いる場合には留意する必要があることが わかる。バンチ長に関しては、これまでも計測してきた結果と同等であるが、斜め入射の方が 大きく生成されていることがわかる。これは3次元的に大きさを持ったものを斜めから見ると 長く見えることに等しい。

次に垂直入射においても傾きが生じることに関して詳細な計測を行った。様々な測定中に傾いたり、傾かなかったりするといった現象が見られ、その原因を探求した。結論として、レーザー光を照射する位置、つまり電子線を生成する位置を多少変化させることで傾きが変化するという現象が確認できた。以下の Fig. 4 にその結果を示す。中心は電子銃のほぼ中心で生成させるように調整した位置、これに対して X 軸方向は 0.7mm ずつ、Y 軸は 1.3mm ずつ変化させ、測定した。図中の数字は傾き角(度)を示している。



Fig.4:位相整合チェレンコフ放射の概念図

明らかに照射位置を変えることが傾きが変化していることがわかる。これは電子銃内における 加速の際にアイリス部に向かう高周波電場によって多少の横方向加速が行われるが、これの影 響が偏ってしまうことで傾きが生じていると考えている。また、これまで調整で中心と考えて いた点は多少中心からずれており、傾きによって評価するとX軸プラス方向、Y軸マイナス方 向へ多少ずらした方が良いことがわかった。この傾きに関しては計算機シミュレーションによ っても評価しており、同様のメカニズムによって傾くことが明らかとなった。

2.2 コヒーレントテラヘルツ光を用いたテラヘルツイメージング試験

昨年度報告したように、電子線に傾きを与えて、その傾きをチェレンコフ放射の放射角と合 致させることによって高強度のテラヘルツパルスを得ることが可能である。詳細に関しては ASTE Vol. A23 を参照いただきたい。このテラヘルツパルスはピーク強度が大きいことから、 様々な応用が可能である。テラヘルツ光の紙・プラスチック等への透過特性を利用した非破壊 イメージングやテラヘルツ分光を用いた物質同定などが挙げられる。本節ではその利用のうち、 テラヘルツイメージングに関して報告する。特に、透過特性を利用した透過イメージングと金 属による反射特性を利用した反射イメージングを行った。

テラヘルツ波生成のセットアップ図を以下の Fig. 5 に示す。前節でも利用した高周波偏向空 胴を用いて電子線に傾きを付与し、制御することで、コヒーレントテラヘルツ放射を得る。得 られたテラヘルツ光を用いて、テラヘルツイメージングを行った。



Fig.5:実験セットアップ図

以下の Fig. 6 に透過・反射イメージングのセットアップに関して示す。左図が透過イメージ ングを示しており、サンプル上でテラヘルツ光を集光し、それを検出器で計測する。サンプル を走査することによってイメージを得ることが可能である。右図は反射イメージングを示して おり、同様にサンプル上で集光したテラヘルツ光を反射側で検出器で受けつつ、走査させる。 これによってサンプルのテラヘルツ光イメージが得られる。



A)透過イメーシンク Fig.6:テラヘルツイメージング手法の概念図

以下の Fig. 7 に透過イメージングによって得られた PASMO (IC カード)のテラヘルツイメージを示す。左図がテラヘルツイメージ、右図が X 線を用いて取得したイメージである。表面の

プラスチック材料は透過し、中の IC やアンテナの回路構造が確認できることがわかる。また X 線のイメージと比較しても同様の形状が見て取れる。分解能に関しては、市販の X 線管と比較 してしまうと落ちることがわかるが、もともとテラヘルツ波の波長が 300 µ m 程度であるため、 予想していた通りと言える。今回は強度のみのイメージングであったが、現在構築している分 光システムと組み合わせ、物質同定も導入することによって、どの位置にどのような物質があ るのを特定する分光イメージングへと展開することによって、X 線よりも付加価値のあるイメ ージング技術として進展が期待できる。



(A)テラヘルツイメージ (B)X 線によるイメージ Fig.7: IC カード PASMO のテラヘルツ透過イメージング試験結果

次に反射イメージングを行った。サンプルとしては、10円硬貨を用いている。このように表 面に凹凸のある構造に対して反射イメージングを行うことで、Fig. 8のようなイメージを得る ことができた。透過イメージ同様に分解能が足りず細かな構造まで分解できていないが、『10』 の文字は明らかに見えていることがわかる。このようなイメージングはX線ではできないもの である。今回は金属を直接用いたが、透過特性と組み合わせて封筒の中の金属の反射イメージ やコンクリート内部の鉄筋の透過・反射イメージなども取得することが可能であると考えてい る。



Fig.7:1THz 放射強度と電子線の傾き・位置の関係

3. 共同研究者

遠藤 彰 (理工学研究所・客員教授) 坂上 和之 (高等研究所・助教)

4. 研究業績

4.1 学術論文

"Feedback-free optical cavity with self-resonating mechanism" Y. Uesugi, Y. Hosaka, Y. Honda, A. Kosuge, K. Sakaue, T. Omori, T. Takahashi, J. Urakawa, M. Washio, *Appl. Phys. Lett. Photonics* in press.

4.2 学会及び社会的活動 日本放射線化学会 副会長 日本放射線研究連合(JARR) 副会長 日本アイソトープ協会 理事

5. 研究活動の課題と展望

本研究課題では電子線のさらなる高品質化に向けた詳細計測を推進するとともに、これを用 いた応用研究を推進してきた。特に電子線の傾きに関しては非常に新しい成果であり、学会に 大きなインパクトを与えるものである。今後の課題としては、電子線が傾いているという事実 はわかったが、これを補正もしくは完全に直進させるということを再現性良く実現させる必要 がある。レーザー入射のみならず、電子銃とその後の電磁石の位置関係などが非常に緻密に結 びついており、これらを解き明かしていく必要がある。本成果は今後の電子銃設計に関しても 一定の指針を与えるものであり、電子線が傾かないように生成する電子銃の設計など、新たな 研究テーマとして広がっていく成果である。また、傾き制御によるコヒーレント放射の応用と して、イメージング技術を開発し、一定の成果を得ることができた。これまでに実施してきた コヒーレント放射手法が非常に良いことを示すことができた。より高分解能なイメージングや 安定な光源として構築していくため、今後イメージングシステムとともに光源としても改良を 行っていく予定である。特に強度の揺れに関しては電子線の強度揺れや時間揺れに非常に大き く依存するため、より安定に電子線を生成するためのレーザー強度・時間同期の安定化を推進 していく予定である。