

氏 名 玄 知奉

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2065 号

学位授与の日付 平成 31年 3 月 22日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Study of tunable narrow-band THz and high-intensity
channeling radiation sources with a 50 MeV class
photo-injector

論文審査委員 主 査 教授 中村 典雄
教授 帯名 崇
准教授 宮島 司
准教授 佐藤 政則
准教授 吉田 光宏
教授 早川 恭史 日本大学理工学部

(Form 3)

Summary of Doctoral Thesis

Name in full: Jibong Hyun

Title: Study of tunable narrow-band THz and high intensity channeling radiation sources with a 50 MeV class photo-injector

This thesis describes the generation of THz radiation and hard X-rays using a 50 MeV class photo-injector. The final goal is to develop a compact, energy tunable, and high intensity THz and hard X-ray sources for applications in many fields. The objectives of this thesis are 1) to propose feasible THz/hard X-ray sources which can generate narrow-band THz waves with a frequency of over 1 THz and quasi-monochromatic hard X-rays in an energy range from 50 keV to 110 keV, and 2) to demonstrate that the proposed methods can lead to compact and frequency tunable high intensity THz/hard X-ray sources.

We employed channeling radiation (CR) as a hard X-ray source. Recently, the theoretical model of CR was improved with a model of de-channeling and re-channeling characterized by a free parameter nf . This parameter nf was determined using data measured at CR experiments in the ELBE facility in Germany. As a result, within 20% error bars, the theoretical CR yields agreed with yields measured at 14, 17, and 30 MeV in the ELBE facility. As one of the final goals, we verified the updated model and improved the CR theory using data measured at ~ 50 MeV to resolve the remaining discrepancy between experiments and theory.

In scientific fields, there are demands for THz waves and hard X-ray. However, the development and application of their regions have lagged compared with other wavelength ranges. A while ago, it was difficult to generate and detect THz radiation with a frequency range of from 0.1 THz ($\lambda=0.3$ mm) to 30 THz ($\lambda=10$ μm) due to technical difficulties. Recently, THz sources have been proposed and developed, but they cannot be said to be compact high intensity radiation sources with frequency tunability. As for hard X-rays with an energy of over 100 keV, broadband hard X-rays can be generated by bending 8 GeV class electron beams, with quasi-monochromatic hard X-rays generated using an insertion device and monochromators. Therefore, experiments such as high energy fluorescent X-ray spectroscopy need to be performed in a limited number of high energy synchrotron radiation facilities such as national laboratories.

Our method to generate tunable narrow-band THz radiation is the use of a slit-mask and a chicane in an electron linac. We create a micro-bunched beam by combining them and radiate THz waves when the electrons traverse a metallic foil or when passing through a small wiggler. On the other hand, we use CR which can emit quasi-

monochromatic hard X-rays with a single crystal and an electron beam with an energy of below 100 MeV. These are simple methods, which does not require any insertion device, they just require electron beams with an energy of at most 50 MeV. The footprint of an accelerator facility depends on the electron beam energy. Since electron beams with an energy of 50 MeV can be accelerated at a comparatively smaller facility compared with synchrotron radiation facilities, the proposed methods can be compact THz and hard X-ray sources.

The demonstration experiments on THz and hard X-ray generation were performed with <50 MeV electron beams at the FAST (Fermi Accelerator Science and Technology) facility in Fermilab. The FAST injector consists of a Cs₂Te photocathode RF gun surrounded by two solenoid coils (bucking and main coils), two superconducting RF (SRF) TESLA-style 9-cell cavities, quadrupole magnets, a chicane, a vertical bending magnet, and a beam dump. The RF gun is identical to the one developed for the FLASH facility at DESY and can generate low emittance electron beams. All RF cavities (RF gun, two capture cavities) are operated at an RF frequency of 1.3 GHz. The electrons produced at the photocathode have an energy of ~5 MeV with an energy spread of ~0.2% at the exit of the RF gun, and are then accelerated up to a maximum energy of 50 MeV through the SRF cavities. Transverse beam size is controlled with some triplets and a doublet of quadrupoles, and measured using Yttrium aluminum garnet (YAG) screens. For producing a micro-bunched beam, a tungsten slit-mask with slit spacing, widths, and thickness of 950 μm , 50 μm , and 0.5 mm respectively is installed in the middle of the chicane. For the CR experiments, we used instead a diamond crystal installed inside a goniometer, which is placed after the chicane.

Using the slit-mask installed in the chicane and energy chirped beams, we created micro-bunched beams. The advantage of this method is that frequency can be controlled by varying the RF phases in accelerating structures. We showed the theory and the simulations related to the production of micro-bunched beams, for observing the micro-bunching on a transverse screen with a skew quadrupole magnet, and also presented the expected frequency spectra. As the result of the simulations, we found that narrow-band frequencies with 0.30 THz - 4 THz can be generated for a round beam (emittance ratio $\epsilon_y/\epsilon_x = 1$). The energy density generated from CTR and a wiggler are about 0.15 $\mu\text{J}/\text{THz}$ and 100 $\mu\text{J}/\text{THz}$ at the second harmonic frequency ~0.8 THz. Also, we showed that the intensities at high frequencies were increased when a flat beam with an emittance ratio of $\epsilon_y/\epsilon_x = 200$ is used.

Moreover, we performed the demonstration experiments to verify the theory and simulations of the micro-bunched beams. The results of the experiments agreed with the theory and simulations. On the other hand, we could not observe reproducible frequency spectra. By Geant4 simulations, we identified that the cause was bremsstrahlung from the slit-mask and beam pipe. Therefore, for the upcoming THz radiation experiments, we will add radiation shielding and a new THz detector system which consists of a

Michelson interferometer and a cryogenic bolometer which can sensitively measure THz radiation.

As for hard X-rays, we simulated beam optics to emit both high yields and high brightness CR, and included bremsstrahlung background from a diamond crystal, and the X-ray detector system to avoid pile-up. The expected energies of CR are 50 keV, 68 keV, and 110 keV, which are comparable with the energies emitted at a few GeV class synchrotron radiation source. Also, we showed in simulations that the photon flux of over 10^9 photons/s, which is required to use X-rays for imaging and structural analysis, can be radiated.

We performed the demonstration experiments of CR with 43 MeV electron beams, however, the expected energy spectrum could not be obtained due to pile-up in the detectors. We did simulations with Geant4 and identified that the X-ray detectors measured bremsstrahlung radiated from beam pipe caused by the dark currents and detected the characteristic X-rays of lead from shielding around the detectors emitted from bremsstrahlung. For the next CR experiments, we need more radiation shielding around the detectors and around the chicane or may need to put the detectors at other places.

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 玄 知 奉

論文題目 Study of tunable narrow-band THz and high-intensity channeling radiation sources with a 50 MeV class photo-injector

テラヘルツ光と硬 X 線は共に、基礎研究と産業利用の様々な分野で幅広い応用が考えられるが、その応用の普及・拡大のために高強度で波長可変のコンパクト光源の研究開発は重要である。玄氏は、米国のフェルミ国立加速器研究所にある 50 MeV クラスの入射リニアックを使ったテラヘルツ光と硬 X 線の 2 つの光源に関する研究開発を行った。使用した入射リニアックは光陰極 RF 電子銃で電子ビームを発生させて、2 つの 9 セル超伝導加速空洞でビームを加速する。

研究開発したテラヘルツ光源は、超伝導加速空洞の off-crest 加速によってエネルギーチャープを付けた約 30 MeV の電子バンチを加速空洞下流に配置された縦・水平方向共に分散のあるシケイン内のタングステン製スリットマスク（スリット幅: 50 μm , スリット間隔: 950 μm ）に通すことでマイクロバンチを生成させて、シケイン通過後にアルミホイルによるコヒーレント遷移放射（CTR）で狭帯域のテラヘルツ光を発生させるもので、マイクロバンチ間隔を RF 位相制御によって変えることで波長可変となる。CTR の代わりに小型ウイグラーによるシンクロトロン放射を使うことで格段に強度を上げることも可能である。玄氏は、この光源における電子ビームのオプティクス設計とシミュレーションを行って、スリット位置でベータatron関数を最適化して水平分散によるエネルギー分解能を最小化するとともに、マイクロバンチ化されたビームの電子分布を求めた。また、マイクロバンチから発生するテラヘルツ光のスペクトルを計算し、0.3 - 4 THz の波長をカバーできることを示した。スリット通過前のバンチ電荷 1 nC（スリット通過後バンチ電荷 50 pC）の場合、CTR で発生する 1 バンチあたりのテラヘルツ光の強度は 0.8 THz で約 0.15 $\mu\text{J}/\text{THz}$ で、1.5 m のウイグラーを使うと約 100 $\mu\text{J}/\text{THz}$ になる。さらに、垂直と水平のエミッタンス比を 1 から 200 に変えて “flat beam” を作り出すことで、スリットでのエネルギー分解能を上げて高い周波数領域においてテラヘルツ光強度を上げられる可能性があることもシミュレーションによって示した。実験的には、ビーム運転においてスリットマスク直後に設置したスキュー四極電磁石の励磁によって垂直方向の分散を発生させて、計算から期待されたマイクロバンチの生成を実際に確かめることに成功した。その他にも、テラヘルツ光発生実験のためにテラヘルツ検出器や制動放射バックグラウンド除去のための放射線シールドの検討なども行っている。

一方、硬 X 線光源は、狭帯域で 100 keV までのエネルギー可変の硬 X 線を生成するために電子ビームをダイヤモンド結晶に通すことで発生するチャネリング放射（CR）を用いるもので、入射リニアックからの低エミッタンス電子ビームを利用することで X 線の輝度やフラックスを高めることができる。玄氏は、シミュレーションを使ってダイヤモンド

結晶で高輝度および高フラックス X 線を発生させるのにそれぞれ適した電子ビームオプティクスを設計した。また、約 43 MeV の電子ビームに対して CR によって発生する 3 つの狭帯域 X 線 (50 keV, 68 keV, 110 keV) と制動放射バックグラウンド X 線のスペクトルを理論モデルとシミュレーションを使って計算した。結果として、3 つの狭帯域 X 線全てで制動放射バックグラウンドに対して十分に高い強度を発生できることを確認するとともに、バンチ電荷 200pC、バンチ繰り返し 3 MHz、マクロパルス幅 1ms、マクロパルス繰り返し 5Hz に対して 10^8 photons/s を越える硬 X 線の発生が可能であることを示した。さらに、CR の有無でダイヤモンド結晶通過後の電子ビーム分布がどう変化するかもシミュレーションによって調べた。その他、硬 X 線発生実験のためにスペクトル検出器のセットアップと検出器のパイルアップを防ぐためのコンプトン散乱用ターゲットの検討も行った。以上のように、玄氏は上述した一連の系統的な研究開発を実行し、テラヘルツ光と硬 X 線の 2 つの光源を本格的な光発生実験が行える段階にまで進展させた。

論文審査会での発表は、玄氏が主体性を持って上記の研究を行ってきたことが強く感じられるもので、質問に対して的確に答えていた。また、米国で延べ 2 年間の研究活動を行い、学位申請論文も明瞭な英語で書かれていて、英語の能力も問題ない。学位申請論文の内容の中で、CR を用いた硬 X 線光源に関する研究論文は 2018 年に既に学術雑誌 (Nuclear Instruments and Methods A) に掲載され、テラヘルツ光源に関する研究論文も同じ学術雑誌に 2019 年 2 月に掲載されることが決まっている。以上により、審査会は本論文が学位を授与するに値するものと判断し、審査員全員一致で合格とした。