

氏 名 DESHPANDE ABHAY PRALHAD

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1378 号

学位授与の日付 平成 22 年 9 月 30 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 Multi Bunch Beam Generation using a Mode  
Separated Photocathode RF Gun

論文審査委員 主 査 教授 大澤 哲  
教授 浦川 順治  
准教授 照沼 信浩  
助教 杉村 高志  
助教 福田 将史  
教授 鷺尾 方一 （早稲田大学）

## 論文内容の要旨

The Accelerator Test Facility (ATF) at KEK designed the RF gun with Cesium-Telluride ( $\text{Cs}_2\text{Te}$ ) photo-cathode for the Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX) and ATF linac. The first gun made at KEK was based on Brookhaven National Laboratory (BNL) gun design.

Subsequently many improvements were made and an improved gun design was established.

Based on the improved gun, eight guns were made at KEK and installed at various institutions in Japan. The expertise thus evolved at KEK for the RF guns from 2002 to 2008. The next request was now to further reduce the beam emittance and make beam energy spread stable over wider range in laser injection phase. It was also essential to increase the charge per bunch and number of bunches per train for increasing the x-ray flux from the LUCX. Around 2005, the Linac Coherent Light Source (LCLS) group at Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) suggested that by increasing mode separation, more stability over injection phase variations could be achieved. LCLS group changed their own design to increase the mode separation up to 15 MHz. Following this approach, we decided to increase the mode separation. An advantage in our case is that we also made a new profile for the new gun to achieve high Q (unloaded quality factor) and high shunt impedance.

In this thesis we discuss the evolution of the design of the new gun structure and the procedure which we established to fabricate and process the RF gun. We show the experimental results of measurements and details of the tuning process to achieve the desired  $\pi$  mode frequency of 2856 MHz with mode separation of 8.6 MHz maintaining the field balance at 1.0. The new gun has higher Q, higher shunt impedance and large mode separation than any gun made at KEK as well as the LCLS gun or the BNL gun. The observed dark currents are also less than earlier gun. Our experience with new large mode separation gun coupled with 130 MV/m fields and  $\text{Cs}_2\text{Te}$  cathode is a very essential experience for making  $\text{Cs}_2\text{Te}$  a well acceptable material for photo cathode guns.

Beam dynamics simulations were done to estimate the trends of parameter variations. At present, PARMELA, ASTRA, GPT are the three most widely used codes for beam dynamics simulations of the RF guns. We decided to use ASTRA for the beam dynamics simulations of new RF gun mainly because it is much simple to use, free-of-charge and has been bench marked using many new RF gun.

The main focus of beam quality measurement was to compare the parameters for new RF gun with those for the old RF gun, where ever possible. The dependence of emittance was measured as a function of solenoid field, laser injection phase, laser spot size and charge. These measurements played crucial role to fix the optimum operational parameters for the RF gun. We

measured the emittance value of 1.89  $\pi$ -mm-mrad at 1nC charge. Efforts are on-going to check system alignment to push this emittance down to 1.0  $\pi$ -mm-mrad. Variation in energy spread over the injection phase was also a parameter that we focused upon. The larger mode separation helps to maintain low energy spread over wider phase range. This was observed after careful experimentation.

Another striking feature of the work done at LUCX is to establish the methods for generation of long multi bunch beam. We succeeded in generating 100-bunches with 0.5 nC per bunch at 40 MeV with peak to peak energy difference less than 0.7%. In other experiment we generate low energy beam of 5 MeV. In this case we succeed to generate 300-bunches with 0.55 nC per bunch with peak to peak energy difference less than 0.85%. These results are very important results for our efforts to make 8000-bunches per train as a first step. We hope to achieve this goal by the end of this year (2010).

At LUCX we are trying to establish the generation of very long pulse trains and we wish to achieve 8000 bunches per train. It will be possible in near future to accelerate such long bunchtrains and thereafter collide with laser to achieve high flux x-ray from such sources. The present thesis is focused on new design of large mode separation gun, fabrication and tuning of the gun. Then tuning this gun to get a low emittance beam and there after generate 300-bunches per train is described.

Deshpande Abhay Pralhad氏の博士論文の趣旨は、光カソードRF電子銃による多バンチビーム生成に関するもので、特筆すべきことは次の2点である。

①まず1.6セル加速空洞を新規設計・製作してその高周波特性を改善することにより、ビームの低エミッタンス化に成功した。②またレーザーのタイミングやスポットサイズなどを詳細に最適化し、RFの立ち上りを利用した多バンチビーム負荷の相殺法により、300バンチまでの多バンチビームの生成に成功した。

#### ① RF電子銃の高周波特性の改善

RF電子銃はSバンドの1.6セル空洞を用いている。この種の空洞には、加速に使用する $\pi$ モードの他に、周波数の異なるゼロモードの共振が存在する。これらの共振周波数の差を大きくすることにより有害なゼロモードの強度を下げるのが、エミッタンスの悪化とエネルギー変動の両方を防止することにつながる。このアイデア自身は、2005年頃、SLACのLCLSグループによって提唱されていたものであるが、Deshpande氏はKEKのLUCXにおいて新たな構造の高いQ値(14700)の空洞を製作し、同時に従来3.5MHzであった共振周波数差を8.6MHzまで改善した。そして運転パラメータの最適化と相まって、以前は7 $\mu$ mであったエミッタンスが2 $\mu$ m (@1nC) 以下まで減少することを実験的に実証した。尚、この実験で得られたエミッタンスの最小値は1.25 $\mu$ m (@1nC, 2bunch)であった。

#### ② 多バンチビームの生成法の確立

2.8ns間隔のレーザーパルスにCs<sub>2</sub>Te陰極に照射して、多バンチ電子ビームを生成するが、ビーム負荷が大きいため、電子ビームのエネルギーを均一にすることは容易でない。RFの立ち上りを利用して多バンチビームの負荷を相殺するため、最適なタイミングはRFパワーとビーム電荷でただ1点に決まる。一方ビーム電荷は、長期変動を別にすると、レーザーパワーとRFのどの位相にレーザーが入射するかで決まる。従ってビームエネルギーの安定度は、RFとレーザーの安定度で決まる。Deshpande氏はまず、100バンチ(0.5nC/バンチ)をRF電子銃と3m加速管で40MeVまで加速した場合に、エネルギー差が0.7%以下になることを示した。更にバンチ数を増やした試験をRF電子銃単体で行い、300バンチ(0.55nC/バンチ)の5MeV・160nCの場合でも、エネルギー差を0.85%以下に抑えられることを実証した。これは光RF電子銃による多バンチビームの生成とエネルギーの均一化が、実用的であることを示したことになる。

多バンチビームの低エミッタンス化とエネルギーの安定化と均一化は、レーザービームとの衝突によってX線を発生させる逆コンプトン法にとって極めて重要な課題である。Deshpande氏の成果は、X線生成の強度増強に大きく寄与する重要な研究であり、審査員全員が一致して、Deshpande氏の論文は博士論文に値すると判定した。