

背面照射における透過光型スピンプラズマ電子源のパルス応答性測定(II) MEASUREMENT OF PULSE RESPONSE WITH TRANSMISSION-TYPE SPIN- POLARIZED PHOTOCATHODES BY BACKSIDE-RADIATION (II)

山口健太^{#,A)}, 山本尚人^{B)}, 金秀光^{B)}, 真野篤志^{C)},
保坂将人^{C)}, 持箸晃^{C,A)}, 高嶋圭史^{C,A)}, 加藤政博^{D,C,B)}
Kenta Yamaguchi^{#,A)}, Naoto Yamamoto^{B)}, Xiuguang Jin^{B)}, Atsushi Mano^{C)},
Masahito Hosaka^{C)}, Akira Mochihashi^{C,A)}, Yoshifumi Takashima^{C,A)}, Masahiro Katoh^{D,C,B)}
A) Graduate School of Engineering, Nagoya University
B) High Energy Accelerator Research Organization KEK
C) Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University
D) UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

Abstract

We have developed a temporal structure measurement system for a 20kV electron beam with an radio-frequency (rf) deflecting cavity, in order to evaluate the pulse response of the transmission type NEA – GaAs/GaAsP superlattice samples. For the purpose to improve the temporal synchronization of a laser system and an rf field in the cavity, we modified the exist temporal synchronization system by using a photodiode and a bandpass filter. As a result, the effective laser pulse width with synchronization jitter was reduced to be 1.1 ps, and the charge decay structure of the electron bunch could be obtained with the temporal resolution of 2.1 ps. In addition, the temporal responses for different QE (0.0004%~0.004%) samples were evaluated and no significant difference was observed.

1. はじめに

透過光型 NEA-GaAs フォトカソードは高輝度・高スピ
ン偏極度の電子ビーム生成に用いられる。我々は歪み
補償型超格子構造を採用することで結晶性の改善と活
性層膜厚の増加を実現し、スピンプラズマ 92%と量子効
率 1.6%[1]を両立している。

この透過光型フォトカソードは上記の特徴を生かし、ス
ピンプラズマ透過電子顕微鏡 (SP-TEM) [2] やスピンプラズ
マ低速電子顕微鏡 (SPLEEM) [3]へ応用されている。加え
て、Electron-Ion-Collider[4]や ILC (国際リニアコライ
ダー) [5]での応用も期待され、電子源として重要な役割
を果たす可能性がある。

上記の応用において、電子源には優れたパルス応答
性能も必要になる。透過光型フォトカソードはその励起
方式からカソード活性層の深層部に最も多くの電子が励
起され、拡散過程を経て表面から取り出されるため、応
答性劣化を引き起こす可能性がある。しかし、これまでこ
の電子源に関するパルス応答性の評価は行われていな
い。

そこで我々は電子源のパルス応答性を評価するため、
20 kV 電子銃[6]と RF 偏向空洞[7]を用いた測定システ
ムを開発した[8]。本システムは励起用パルスレーザーと
同期した RF 偏向空洞により、電子ビームの時間情報を
空間情報に変換することで取得することができる。

本発表ではこの測定システムによる透過光型
GaAs/GaAsP 歪み超格子フォトカソードのパルス応答性
の計測結果を報告する。

2. フォトカソード

本測定では電子源サンプルに GaAs/GaAsP を活性層
に持つ、歪み薄膜超格子フォトカソードを使用した。本
電子源のサンプル構造を Figure 1 に示す。基板材料に
は GaP を採用し、励起用レーザーの透過が可能となっ
ている。また、活性層は歪み超格子層 (GaAs/GaAs_{0.67}P_{0.33})
7.3 nm を 12 組形成している。スピンプラズマと量子効率
(QE)はレーザー波長 780 nm において 84%と 0.13%を
観測しており、今回使用しているレーザー波長 785 nm で
も 83%と 0.1%を達成している[9]。

本測定における NEA 表面はヒートクリーニング (460°C,
1h)を行った後、Cs と O₂ を少量ずつ交互に表面に蒸着
させ、作成した。ここでは QE 0.004%以下の異なる条件
における NEA 表面について、パルス応答性の評価を
行った。

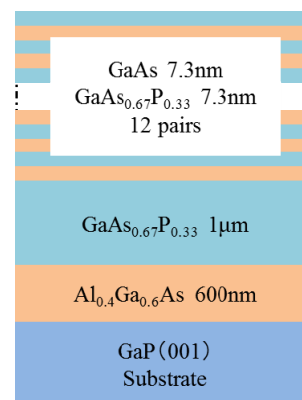


Figure 1: Structure of the GaAs photocathode sample. Pump laser comes from the bottom side and electrons are extracted from the top side.

[#] yamaguchi.kenta@a.mbox.nagoya-u.ac.jp

3. 測定方法と条件

3.1 パルス応答性測定システム

装置の概要を Figure 2 に示す。フォトカソード励起用レーザーはモードロック Ti:Sapphire レーザー (COHERENT,MIRA) を使用し、繰り返し周波数 90.1 MHz で照射した。レーザー中心波長は 785 nm、半値幅は 17 nm である。電子ビーム像の測定は蛍光板と CMOS カメラ (アルゴ社製、DMK23GM021) を用いて行った[10]。後述するが、本測定ではバンチ構造測定時、CMOS カメラの露光時間を 100 μ s とした。

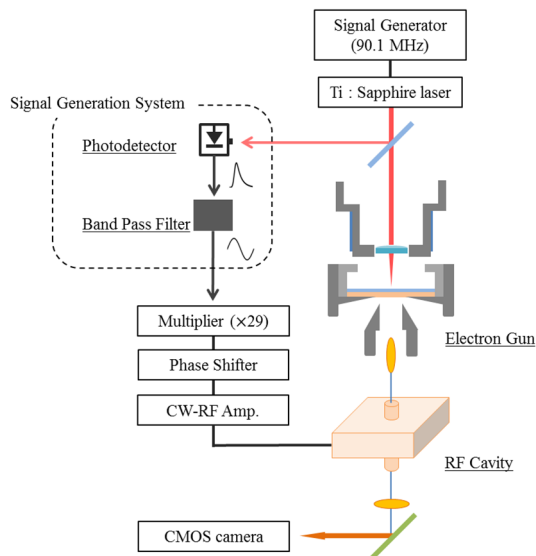


Figure 2: Temporal bunch structure measurement system and signal generation system.

3.2 フォトダイオードを用いた同期システム

本測定システムでは電子ビームのパルス繰り返しを偏向空洞の RF 電磁場と同期させる必要がある。従来のシステム[9]では周波数通倍器の入力信号にレーザーシステムに入力するのと同じ signal generator の信号を使用していたが、レーザーとのジッターが大きく電子ビームと RF 電磁場との同期性が損なわれていた[10]。これにより得られた電子ビーム像はジッター効果を含んだものとなり、テール構造を高精度で評価できなかつた。

この問題を解決するため、新たな同期 RF 信号生成システムを導入した。Figure 2 に示すように、本システムではフォトダイオード (EOT,ET-2030A) を用いて発振したレーザー光から直接、信号を検出している。またその信号を Band Pass Filter に通すことで 90.1MHz の正弦波信号を生成し、その後は従来と同じ経路をたどり、RF 偏向空洞に入力している。

従来のシステムと本システムにおけるレーザー発振タイミングとの同期性を比較検証するため、ストリークカメラ (浜松ホトニクス,C5680) を用いて測定を行った。この測定ではストリークカメラ掃引方向のトリガ信号に signal generator の信号と同期 RF 信号生成システムの信号をそれぞれ使用し、レーザー発振タイミングのジッターを確認

した。本測定において、ストリークカメラの focus mode におけるレーザースポットサイズの測定から掃引方向の時間分解能は RMS で 1 ps と見積もられた。なお、計測時間は 20 ms で行った。

Figure 3 に従来のシステムによる計測結果を、Figure 4 に新たに導入したシステムによる計測結果を示す。2 つの結果から、新システムではジッターを大幅に抑制できていることがわかった。また計測時間を CMOS カメラの露光時間と同じ 100 μ s にし、得られたストリーク像について計測時間方向への投影を行った。結果、正規分布をしたパルス波形が得られた (Figure 5)。これにより、レーザーと RF とのジッターを含めた実効的なレーザーパルス長は RMS で 1.11 ± 0.03 ps と確認できた。

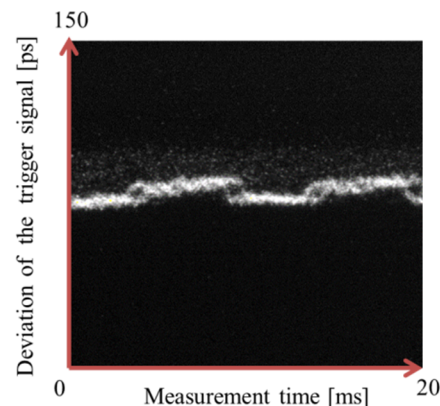


Figure 3: Streak image of the pump laser for the previous timing system.

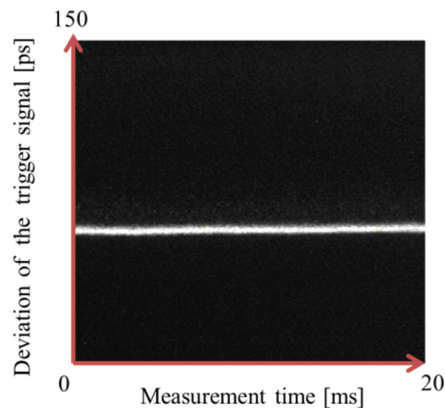


Figure 4: Streak image of the pump laser for the modified timing system.

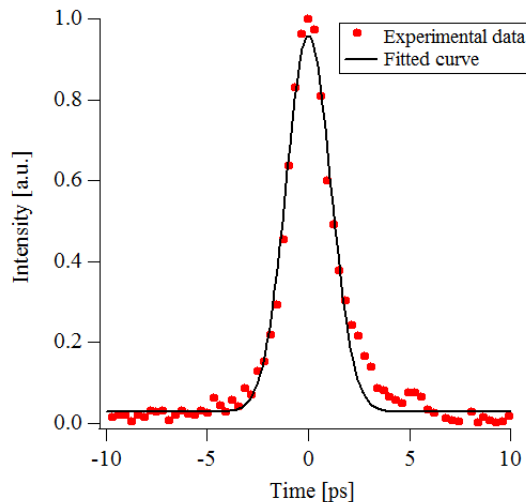


Figure 5: Projected laser pulse profile obtained by using the modified timing system.

3.3 測定条件と時間分解能

測定によって得られる電子ビーム構造は生成電荷量（電子ビームのバンチ内散乱）、カメラの露光時間（測定環境の長周期変動）の影響を受ける可能性がある。そこでこれらの影響を見積もるため、それぞれに対するビームサイズ変化を評価した。

Figure 6 に生成電荷量に対して得られたビームサイズの測定結果を示す。本測定における、CMOS カメラの露光時間は $100\mu\text{s}$ である。これにより、 3 nA 以下ではビームサイズが一定であり、バンチ内散乱によるビームサイズ増大が生じないことがわかった。したがって本測定では、電子ビームの平均的な電荷量を 3 nA 以下として計測を行った。

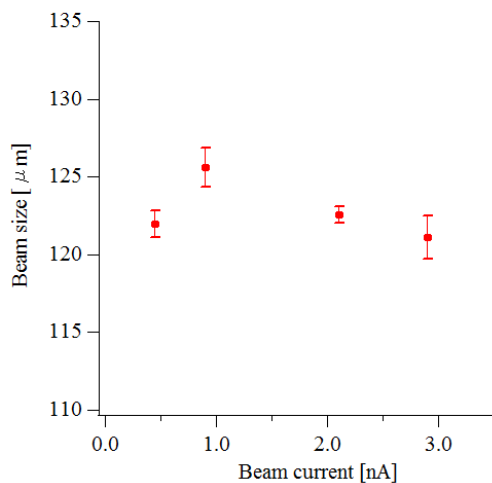


Figure 6: Measurement beam size as a function of the beam current at the electron gun exit.

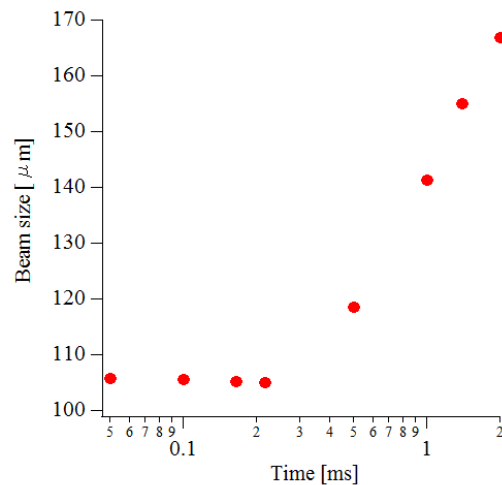


Figure 7: Measurement beam size as a function of the exposure time of the CMOS camera.

Figure 7 に CMOS カメラの露光時間に対するビームサイズ変化を示す。Figure 7 により、露光時間が $200\mu\text{s}$ 以下ではほぼ一定のビームサイズが得られたが、それ以上になると増大傾向になることがわかった。これは電子銃システムに何らかの微小振動等が存在することが原因だと考えられる。本測定では電子ビーム像が小さくなり、CMOS カメラが飽和しない条件として露光時間を $100\mu\text{s}$ に設定した。

以上の条件のもと、RF 電磁場を加えない時の電子ビームサイズを測定した結果、RMSで $129\pm 17\mu\text{m}$ となった。また、本測定では空洞へ 13.9 W(CW) の電力を入力しており、その際の実効的な磁場強度は [10] $3.75\times 10^{-4}\text{ T}$ と見積もられた。これらから、本装置の電子ビームサイズに依存する時間広がりには $1.73\pm 0.32\text{ ps}$ となる。

パルス応答性測定では電子ビームサイズに依存する時間広がり他に、レーザーパルス長に依存する時間広がりがある。本装置ではパルス長 1.11 ps のレーザーを照射するため、生成される電子ビームの最短時間構造はこれと同じになる。よって、得られたビーム像はこの 2 つの影響を考慮する必要があり、全体の時間広がりには $2.1\pm 0.3\text{ ps}$ になると見積もられる。

4. 測定結果

4.1 パルス応答性の測定結果

測定により得られた電子ビーム像 (QE 0.0004%) を Figure 8 に示す。Figure 8 では電子ビームの伸長方向を右側として示した。また Figure 8(a) は RF 電磁場を加えない時の電子ビーム像、Figure 8(b) は RF 電磁場を加えた時の電子ビーム像である。

Figure 8(b) をビーム進行方向と垂直に射影することで得られた電子ビームの時間構造を Figure 9 に示す。Figure 9 から電子ビームにテール構造が存在することが観測できた。

電子ビームのテール構造を分析するためピーク値(輝

度 1) を基準に、輝度 0.7 になる時間 ($t_{0.7}$) と輝度 0.4 になる時間 ($t_{0.4}$)、輝度 0.1 になる時間 ($t_{0.1}$) を設定し、応答性を見積もった。その結果、Figure 9 において $t_{0.7}$ は 2.0 ± 0.4 ps、 $t_{0.4}$ は 3.9 ± 0.5 ps、 $t_{0.1}$ は 10.7 ± 0.6 ps であることが分かった。

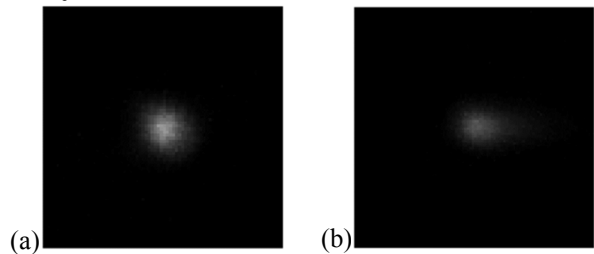


Figure 8: Obtained beam images (a) with and (b) without rf powers.

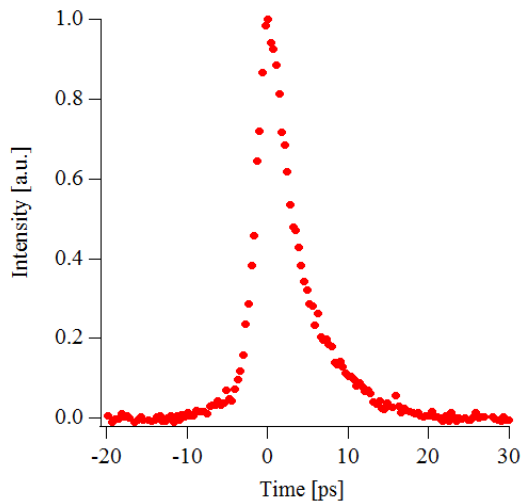


Figure 9: Projected profile of a screen image.

4.2 QE に対するパルス応答性の比較結果

NEA 値[11]の絶対値が大きい場合、バンドベンディング領域の底深くにトラップされた電子も真空中に生成することが可能となり、より高い QE が期待できる。しかし、これはパルス応答性を劣化させる要因にも成り得ると考えられる。そこで、QE とパルス応答性の関係を直接比較する目的で異なる QE (0.0004~0.004%) を持つフォトカソード表面のデータについて応答性を計測し、その傾向を評価した。QE は NEA 表面成膜の結果、始めに 0.004% が得られ、まずこの状態でパルス応答性の測定を行った。さらに、時間経過に伴う量子効率劣化を利用して残りの 3 点を取得した。ここで初期に得られた QE 0.004% は通常期待される値に比べ、1/100 程度低い値であった。これは初期状態において十分な NEA 値を得られていない可能性を示唆しており、よって上述した現象を確認するには QE の測定範囲が不十分である可能性がある。

得られた 4 つの電子ビーム時間構造を Figure 10 に示した。Figure 10 より異なる QE ごとのテール構造を比較するため、節 4.1 で定義した $t_{0.7}$ 、 $t_{0.4}$ 、 $t_{0.1}$ を用いて評価した (Figure 11)。この結果、今回の測定条件では $t_{0.7}$ 、 $t_{0.4}$ 、

$t_{0.1}$ に有意な差は得られなかった。

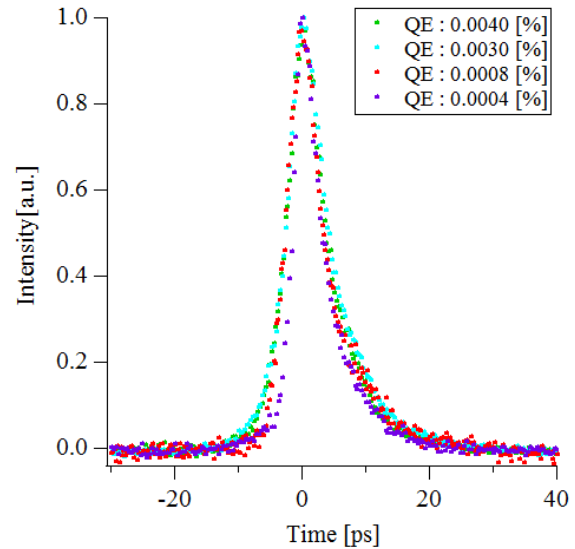


Figure 10: Measurement beam profile for a series of the various QE samples.

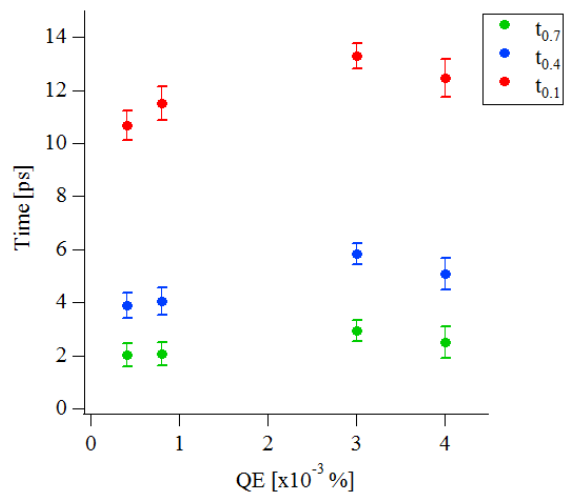


Figure 11: Evaluated values of $t_{0.7}$, $t_{0.4}$, and $t_{0.1}$ for a series of the various QE samples.

5. まとめと考察

NEA-GaAs/GaAsP 歪み薄膜超格子サンプルのパルス応答性を計測するため、RF 偏向空洞を用いた測定システムを開発した。加えて、フォトダイオードによる同期システムを採用することで、レーザーシステムのジッター抑制に成功し、パルス長 1.11 ± 0.03 ps のレーザー照射が可能になった。これにより本装置の時間広がり 2.1 ps と見積もられ、電子ビームのテール構造の観測に成功した。また、異なる QE を持つサンプルから得られた測定結果についてテール構造を比較した結果、明らかな有意性は観測されなかった。

ここで報告した QE に対するパルス応答性の測定結果は、通常期待される QE に比べ 1/100 程度低い値におけるものであった。よって、節 4.2 で述べた現象を確認する

には QE の測定範囲を広げ、評価する必要がある。

今後はダイナミックレンジのより大きい QE に対するパルス応答性の測定を行う予定である。また、超格子膜厚の異なる電子源についてもパルス応答性の測定を行い、膜厚増大に伴う電子ビームテール構造の比較評価を行う予定である。

謝辞

分子科学研究所 UVSOR の禿子徹成氏には真空装置の取り扱いについてご指導を頂き感謝致します。本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費基盤研究(C)No.11007344 (財)による助成(代表者 山本尚人)と、高エネルギー加速器研究機構大学等連携支援事業による支援を受けて行った。

参考文献

- [1] X.G. Jin *et al.*, Applied Physics Letters 105, 203509 (2014).
- [2] M. Kuwahara *et al.*, Applied Physics Letters 101 (3) (2012) 033102.
- [3] M. Suzuki *et al.*, Applied Physics Express 3 (2010) 026601.
- [4] <http://web.mit.edu/eicc/>
- [5] <http://www.linearcollider.org/>
- [6] N. Yamamoto *et al.*, "Generation of low emittance and high brightness electron beam by using NEA-GaAs photocathodes" Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan).
- [7] T. Niwa *et al.*, "Development of an electron beam bunch length measurement system for the transmission-type polarized electron source", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 8-11, 2012, Osaka, Japan).
- [8] T. Inagaki *et al.*, "Measurement of temporal response of transmission-type spin polarized photocathodes (II)", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 9-11, 2014, Aomori, Japan).
- [9] X.G. Jin *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 51 (2012) 108004.
- [10] K. Yamaguchi, *et al.*, "Measurement of pulse response with transmission-type spin-polarized photocathodes by backside-radiation", Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 5-7, 2015, Fukui, Japan).
- [11] T. Miyauchi *et al.*, "Study of energy state of near surface of the NEA-GaAs type photocathode", Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 5-7, 2015, Fukui, Japan).