

## 光陰極の2次元高解像度 QE 分布測定装置の開発

### DEVELOPMENT OF HIGH RESOLUTION QE MAP ACQUISITION SYSTEM FOR PHOTO-INJECTOR

亀田吉郎<sup>#,A)</sup>, 山本将博<sup>B)</sup>, 帯名崇<sup>B)</sup>, 金秀光<sup>B)</sup>, 宮島司<sup>B)</sup>, 西森信行<sup>C)</sup>  
Yoshiro Kameta<sup>#,A)</sup>, Masahiro Yamamoto<sup>B)</sup>, Takashi Obina<sup>B)</sup>, Xiuguang Jin<sup>B)</sup>, Tsukasa Miyajima<sup>B)</sup>,  
Nobuyuki Nishimori<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> East Japan Institute of Technology Co., Ltd.

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>C)</sup> National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

#### Abstract

To clarify two-dimensional distribution about the photocathode quantum efficiency (QE-map) is one of the critical information to generate a beam with ideal distribution. In addition, the analysis of the degradation of the photocathode surface from the QE-map result is essential to clear up cathode damage problems and it helps to know how to keep high QE condition as long as possible in the electron gun operation. Based on these backgrounds, we have developed a new QE-map acquisition system with a spatial resolution about 0.1 mm and it can scan in about ten minutes including more than 10,000 data points. In this paper, we report about the QE-map acquisition system in detail.

#### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では 2013 年より次世代放射光源として Energy Recovery Linac(ERL)の実証機である compact-ERL (cERL) のコミッションが行われてきた。2014 年春にはエネルギー回収運転に成功し、2016 年春まで段階的に電流増強を行い、1mA 運転を 2 時間半に渡って保持できることが確認された[1,2]。Figure 1 に cERL の全体図を示す。

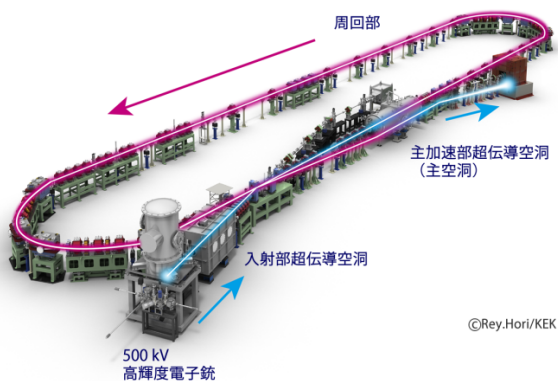


Figure 1: Figure of compact ERL.

ERL の開発において電子銃は重要な要素の一つであり、なかでも光陰極の量子効率(QE)について詳細な 2 次元分布を知ることは、発生するビームの初期分布を知る、あるいは制御する上で重要である。また、QE 分布測定は光陰極薄膜の作成後の評価はもちろんのこと、様々な要因によって起こる光陰極の劣化の分析にも活用できる。

現在 cERL で稼働中の電子銃において光陰極の QE 分布を測定するシステムは既に構築されており運用はさ

<sup>#</sup> hig-kame@post.kek.jp

れているものの、位置分解能は 1 mm 程度で、1 回の測定に 10 分程度を要している。これはカソード全体の特性を評価するには十分であるが、より詳細な状況を把握することは困難であった。

そこで我々はカソード準備系においてより高分解能かつ高速に QE 分布を測定可能な装置を開発した。目標性能としては 0.1 mm 程度の空間分解能で 10 分以内にスキャン出来ることとし、今後の保守性を考慮して構成する計測装置や制御機器類は比較的入手が容易な機器を選定する方針とした。Figure 2 に電子銃およびカソード準備系の配置図を示す。

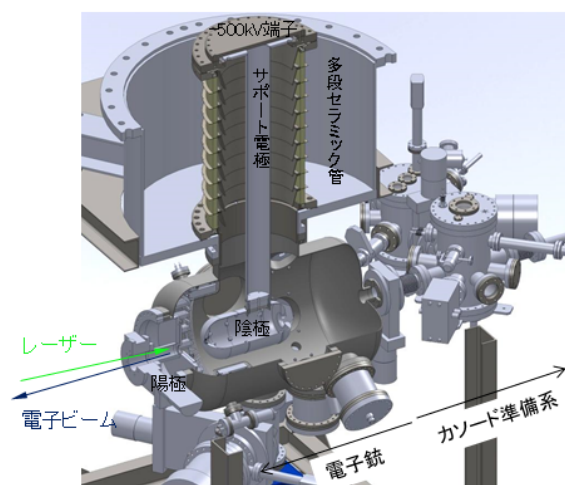


Figure 2: Layout of DC electron gun and cathode preparation system.

光学系は安価なレーザーモジュール、ミラーとレンズが各 1 枚とフィルターで構成され、照射レーザーの位置は 2 台のアクチュエータで制御する。検出系では真空中に簡易なコレクタ電極を設置して汎用 DC 電源で電極に数十ボルトの正電位を印加することで光電子を収集し

デジタルマルチメータで測定する。一般的な光陰極のサイズは 10 mm 程度あり、周囲を含め全域を 0.1 mm 間隔で測定すると測定点は 1 万点を超えてしまうため、全ての測定点で位置制御と情報取得を行う方法では非常に時間がかかる。そこでアクチュエータの特性を考慮しつつ、レーザーの照射位置を一定速度でスキャンさせながら一定間隔でデータを測定しバッファする方法を採用した。

## 2. 測定機器の構成

### 2.1 QE 分布測定光学系の構成

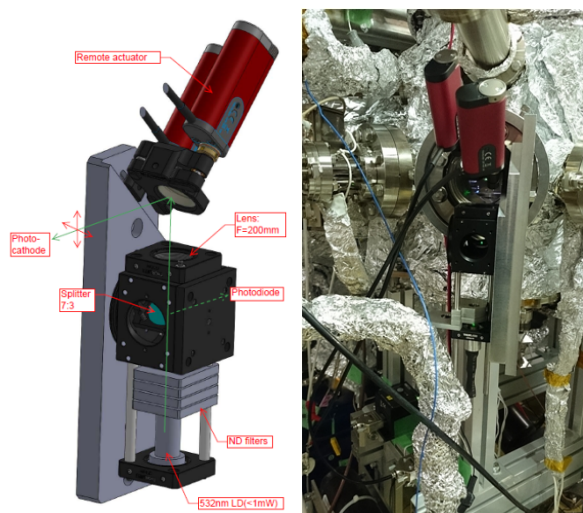


Figure 3: Drawing of laser and optical system (left) and photograph (right).

Figure 3 に光学系の図および写真を示す。光学系は、図に示されているようなコンパクトな cage system で構成されている。光源には簡易的な波長 532 nm の LD 励起固体レーザーモジュール(秋月電子:JPM-1-3)を使用し、その前方に複数の ND filter を設置してそれらの組合せによって photocathode へ照射するレーザーパワーを調節する。その後、7:3 の beam splitter を介してメインのレーザーは焦点距離 200 mm のレンズを通り、遠隔操作のアクチュエータ (Thorlabs:ZFS06) を実装したキネマティックマウントのミラーで反射され、photocathode に向けて照射される。ミラーから photocathode までの距離が 15 cm 程度であり、このセットアップで photocathode 上の水平、垂直方向に対して約±10 mm の範囲をスキャンすることが可能である。splitter で分けられたもう一方のレーザーは photodiode モジュールを使用することで照射レーザーパワーを逐次モニターすることができるが、今回の測定では測定中のレーザーパワーの変化は 1%程度かそれ以下と小さいため、測定の前最初に測定したレーザーパワーを使用して QE を計算している。比較的短い焦点距離のレンズでレーザーを絞るため、photocathode 上でレーザースポット径は 0.1 mm 程度のサイズとなる。これらのシステムが、カソード準備系の ICF114 viewing port に簡易な自作の金具によって固定されている。

### 2.2 光電流検出系の構成

Figure 4 左に光電流検出系の概略図を示す。photocathode 上で約  $\phi 0.1$  mm サイズに絞られたレーザーの照射位置より発生した光電子は、その前方に配置されたワイヤー状のコレクタ電極に集められる。コレクタ電極には 1 M $\Omega$  の抵抗を介して +40 V の電圧が印加されている。コレクタ電極で受けた光電子の電流は、接地-チャンネル絶縁型でかつ高インピーダンス入力 of デジタルマルチメーター (DMM) によって 1 M $\Omega$  の両端の電圧を測定することで計測している。

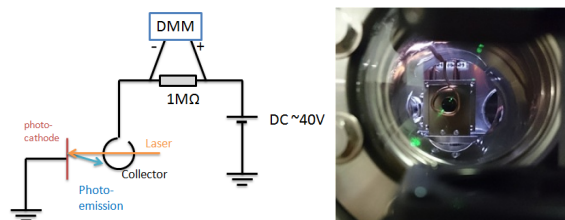


Figure 4: Block diagram of photo-current monitor system (left) and photograph of photocathode and collector (right).

後で述べるが、高解像度の QE map 測定を行う場合、多数の測定点の計測を素早く処理することが求められる。そのため、DMM には上記の条件に加え LAN 通信およびバッファ機能を持つ KEITHLEY 製の 2701 を使用した。

Figure 4 右に ICF114 の viewing port より覗いたカソード準備装置内の photocathode およびコレクタ電極の写真を示す。photocathode およびコレクタ電極は  $1 \times 10^{-9}$  Pa の超高真空状態の中に配置されている。photocathode は回転ステージ上に固定されており、装置と同じ接地電位にある。コレクタ電極は  $\phi 2$  mm の銅線の先端を photocathode の全体がのぞける程度のリング状の輪を作り、photocathode の前方 5 mm 程度の距離に配置されている。銅線のもう一端は、カソード準備装置の上方に設置された電流導入端子と接続されており、大気側のシステムと接続する。

## 3. 制御ソフトウェア

### 3.1 制御ソフトウェアと機器構成

制御ソフトウェアとして National Instruments 社製の LabVIEW を採用した[3]。QE 測定専用の制御用 PC を用意し、この PC で機器制御、測定制御、表示制御を単体で行う LabVIEW アプリケーションを作成し動作させている。LabVIEW は多種多様なデバイスを容易に接続・制御することができ、開発工数を抑えることが可能であることから採用することとした。

照射レーザー位置制御用のアクチュエータ (Thorlabs:ZFS06) とコントローラ (Thorlabs:TST101) を水平用、垂直用に 2 セット使用する。インターフェイスは USB であり、制御 PC に直接接続している[4,5]。光電子量を計測する DMM (Keithley:2701) のインターフェイスは 10/100BaseTX Ethernet であり、制御用 PC と

同一ネットワークに接続している[6]。Figure5 に機器構成の全体概略図を示す。

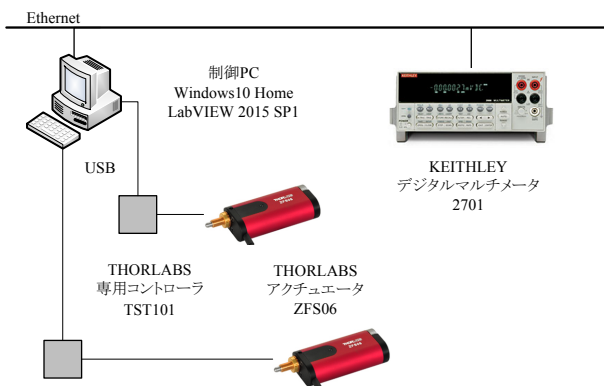


Figure 5: Control PC and devices.

### 3.2 測定の基本方針

目標とする0.1 mm程度の空間分解能を維持しつつ出来る限り高速に測定するには、アクチュエータを移動させながら随時電子の測定を行い、水平方向1ラインの測定後に1ライン分の値を読み出すといった手法が必須である。このときアクチュエータが一定の速度で動作している間に測定する必要がある一方で、アクチュエータには移動開始時の加速や停止時の減速といった動作を行うため、この区間中は測定しないように考慮しなければならない。

また、測定時間短縮のためには測定方向を一方からだけではなく、奇数ラインと偶数ラインごとに測定方向を左右に反転させる必要がある。この異なった方向から測定したデータをデータ処理で2次元分布データに再構成する。

### 3.3 測定制御

測定制御する上で重要なパラメータは3つある。1) 測定範囲、2) アクチュエータの速度/加速度、3) デジタルマルチメータの積分時間である。

測定範囲には原点  $X_0$ 、原点  $Y_0$ 、 $X$ (幅)、 $Y$ (高さ)、 $Y$  Step があり、原点と  $X$ 、 $Y$  で矩形が決定される。 $Y$  Step では垂直方向の移動量になるのでこれが解像度となる。

水平方向の解像度はアクチュエータの速度とデジタルマルチメータの積分時間によって決めることができる。積分時間が同じでもアクチュエータの速度が変わることによって解像度が変わってくる。

水平方向の移動距離についてはアクチュエータの加速や減速を考慮する必要がある。この部分においては測定しないようにする必要があるので、測定したい範囲よりも水平方向に移動量を大きくとり、加速/減速領域として考慮する。本装置で使用しているアクチュエータには加速度の設定はあるが減速度の設定はないため、加速に必要な移動距離と減速に必要な移動距離は同じとして扱っている。Figure 6 に座標系や測定範囲などの模式図を示す。

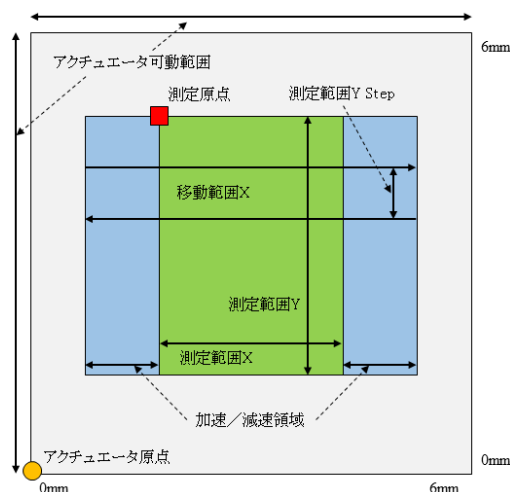


Figure 6: Coordinate and measurement range.

水平方向の電圧測定にあたっては、アクチュエータとデジタルマルチメータで厳密な同期は行えないため、LabVIEW のタイマーを使用して同期をとっている。計測は以下に示す手順で実施する。アクチュエータの移動開始と同時に加速に必要な時間をタイマーとして設定する。タイマー発火と同時にデジタルマルチメータによる測定を開始し、測定距離分の時間を計算しタイマーを設定する。タイマー発火後はデジタルマルチメータによる測定を停止し、アクチュエータが減速し移動停止するまで待つ。Figure 7 に1ライン測定時の制御方法を示す。

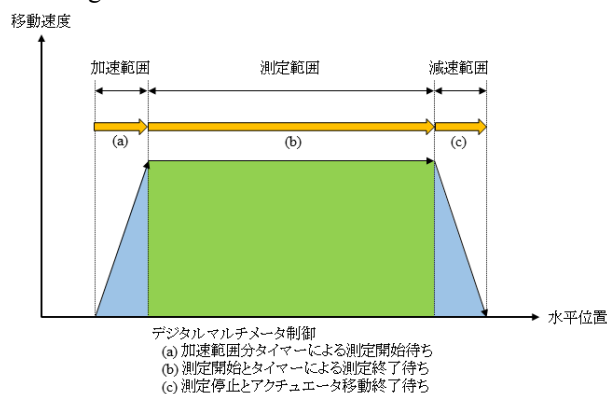


Figure 7: Mechanism of single line scan.

その後、垂直方向のアクチュエータを移動させ、逆方向へ同様の動作でスキャンしていく。この動作を繰り返しながら測定範囲全体をスキャンしていく。

前述の通り、スキャン終了時の測定データは偶数ラインと奇数ラインで並び順が反転している。また、制御 PC で LabVIEW によるタイマーでの同期制御のため厳密な位置での測定がなされず、設定によっては要素数が測定ライン毎に異なってしまう。このデータを本来の並び順に変え、要素数を統一する処理を行う必要がある。具体的には、左上を制御の原点として、奇数ラインは正順になり偶数ラインは逆順になる。よって偶数ラインのみ配列を反転させる。要素数に関しては測定データ全体で要素数が最も少ないラインを探し、ライン毎にリサイズを行っている。このような処理を行うことにより2次元分布

データを再構成している。Figure 8 に計測データを再構成する方法を示す。

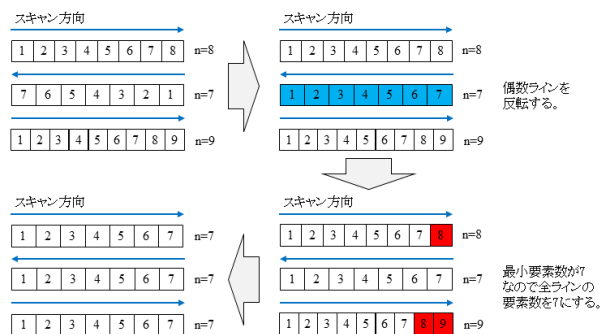


Figure 8: Mechanism of data correction.

### 3.4 ユーザーインターフェイス

機器制御、測定制御、表示制御を単体で行う LabVIEW アプリケーションになっているため、画面に使用されている部品などは LabVIEW 標準のものを使ってデザインされている。Figure 9 に制御パネルの例を示す。

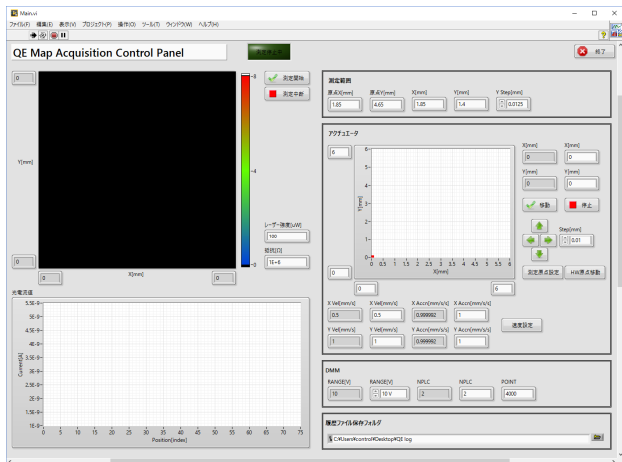


Figure 9: Control Panel.

QE 分布を測定する上での機能として、測定開始/停止ボタンやレーザー強度設定、抵抗の設定の他に、測定範囲設定、アクチュエータ設定、デジタルマルチメータ設定を実装している。また、計測と並行してリアルタイムに QE 分布測定の過程やアクチュエータの現在位置、1 ライン分の電子測定結果がモニター出来るようになっている。

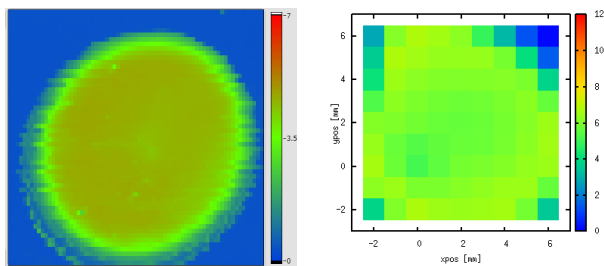
その他の機能として、アクチュエータとコントローラの状態不一致を解消する HW 原点移動や、アクチュエータの現在位置を測定原点として設定する測定原点設定、アクチュエータの手動移動や Step 移動を実装している。これらは測定装置の調整などに使用している。

また、測定結果を csv 形式でファイルに出力しており、出力先であるディレクトリの変更もできるようになっている。この出力された csv ファイルは解析のために他のツールで利用している。

## 4. QE 分布の測定結果

2015 年 6/19 に電子銃で測定した QE 分布(Figure10

右)では、位置分解能は 1mm で測定に 10 分程度かかっている。詳細まで把握するには至らないが全体的に変化を観察できるようになっている。2016 年 1/24 にカソード準備系で測定した QE 分布(Figure 10 左)では、位置分解能は 0.2mm 程度で測定時間は 5 分程度で済み、電子銃で測定した結果よりも詳細に観察できるようになっている。



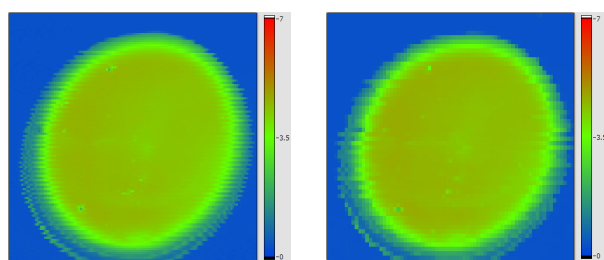
(a) Measurement result of QE map at the cathode preparation system in January 24, 2016

(b) Measurement result of QE map at the electron gun in June 19, 2015

Figure 10: Examples of measurement result of QE map.

これにより NEA 表面作製時の QE の一様性および使用後のダメージエリアをカソード準備系で詳細に分析することが可能になった。

次に Y Step と X Velocity の設定による差異を検証する。Y Step は 0.0125 と 0.025 とし、X Velocity は 0.5 と 1.0 とした結果を Figure11 に示す。水平方向、垂直方向ともに 2 倍の解像度になり面積で 4 倍の解像度にするによって、より詳細に観察することが可能になった。ただし、解像度を 4 倍にすることで測定時間も単純に 4 倍になってしまうため、目的に応じて設定を変える必要がある。



(a) Y Step:0.0125, X Velocity:0.5

(b) Y Step:0.025, X Velocity:1.0

Figure 11: Measurement result of QE map at the cathode preparation system in January 26, 2016.

次に測定したデータの要素数がどのように変化するかを検証する。測定範囲 X を 1.85、X Velocity を 0.5 とした場合の要素数の変化を Figure 12 に示す。

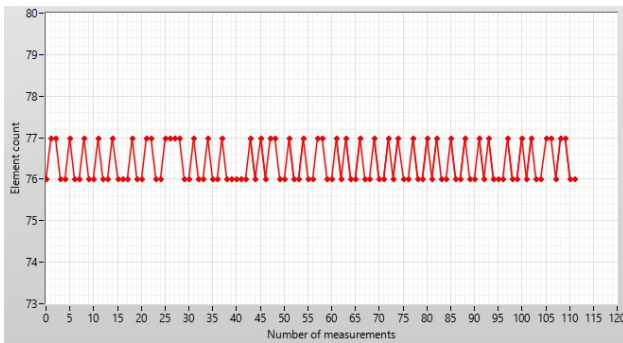


Figure 12: Element count of each line.

要素数は 76~77 でその差は 1 になっており、無効とするデータも 1 ライン当たり 1.3%程度と低いいため許容できる範囲であることを確認した。

## 5. まとめと今後の予定

目標とする 0.1 mm 程度の空間分解能でかつ 10 分以内に QE 分布を得られる装置を開発した。本システムを構築したことによって、NEA 表面作製時の QE の一様性および使用後のダメージエリアをカソード準備系で詳細に分析することが可能になった[7]。

KEK で開発が進められている ERL 第二電子銃でも本システムの構築を計画しており、同様に観察、分析が行えるようになる予定である。

制御アプリケーションについては稀にアクチュエータとデジタルマルチメータ共に、接続が切断された状態になり制御できなくなる現象が見受けられた。測定結果に影響はなく、電源の OFF/ON による再起動で復旧する。今後、原因の追究と対策を行う必要がある。

## 謝辞

ERL 推進室 河田洋 教授、加速器第7研究系 小林幸則 教授をはじめとする cERL 関係者の皆様より多くのサポート、ご支援を頂きました。この場をお借りして感謝申し上げます。本研究の一部は東芝-KEK 共同研究「ERL をベースとした大強度 EUV 光源の研究開発」によって行われました。

## 参考文献

- [1] 坂中章悟 他、”コンパクト ERL におけるビーム電流約 1mA の運転”, WEOM15, in these proceedings.
- [2] 西森信行 他、”コンパクト ERL 電子銃の高性能化”, MOP048, in these proceedings
- [3] LabVIEW システム開発ソフトウェア;  
<http://www.ni.com/labview/ja/>
- [4] 小型ステッピングモーターアクチュエータ、移動量 6 mm;  
[https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=1881](https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1881)
- [5] TST101 - T-Cube ステッピングモーターコントローラ;  
<https://www.thorlabs.co.jp/thorproduct.cfm?partnumber=TST101&pn=TST101#4614>
- [6] ケースレー2700 シリーズ・マルチメータ/データ・アキュイジション/スイッチ・システム;  
<http://jp.tek.com/keithley-switching-and-data-acquisition-systems/keithley-2700-multimeter-data-acquisition-switching-sys>

[7] 山本将博 他、”大電流 CW ビーム運転前後の半導体フォトカソード QE 分布測定”, MOP043, in these proceedings