

光電子増倍管の性能試験測定

1.はじめに

直径 8 mm のUBA (ウルトラバイアルカリ) の光電面を持つ光電子増倍管 R9880U-210 について、LED を用いた性能試験測定 (Gain の測定) を行った。測定には 9 個の光電子増倍管(型番 R9880U-210 BAC7244, R9880U-210 BHB4970, R9880U-210 BHB4859, R9880U-210 BHB4977, R9880U-210 BPA7937, R9880U-210 BHB4867, R9880U-210 BHB4252, R9880U-210 BHB4199, R9880U-210 BHB4869) を用いた。本稿ではその測定結果を示す。浜松ホトニクスが公称する仕様と比較し、性能の妥当性及び使用するにあたり光電子数の校正係数を決定した。また測定精度を評価した。

Type No.	Spectral Response		Photo-cathode Material	Window Material	Dynode Structure / Stages	Maximum Ratings		Cathode Characteristics				
	Range (nm)	Peak Wavelength (nm)				Supply Voltage Between Anode and Cathode (V)	Average Anode Output Current in Total (mA)	Luminous		Blue Sensitivity Index (CS 5-58) Typ.	Red/White Ratio (R-68) Typ.	Radiant Typ. (mA/W)
								Min. (μA/lm)	Typ. (μA/lm)			
R9880U-210	230 to 700	400	UBA	K				100	135	15.5	—	130

Anode to Cathode Supply Voltage (V)	Anode Characteristics								Operating Ambient Temperature (°C)	Storage Temperature (°C)	Type No.
	Luminous		Gain Typ.	Dark Current (After 30 min)		Time Response					
	Min. (A/lm)	Typ. (A/lm)		Typ. (nA)	Max. (nA)	Rise Time Typ. (ns)	Transit Time Typ. (ns)	TTS Typ. (ns)			
100	270		1	10							R9880U-210

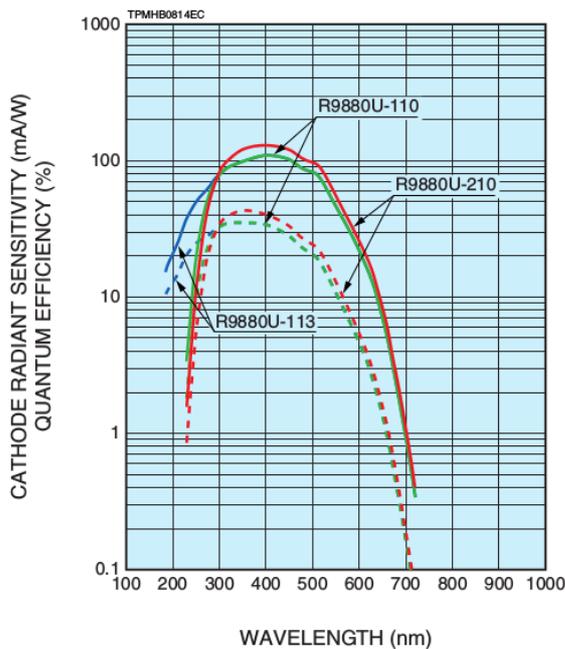


Figure 2: Typical Gain

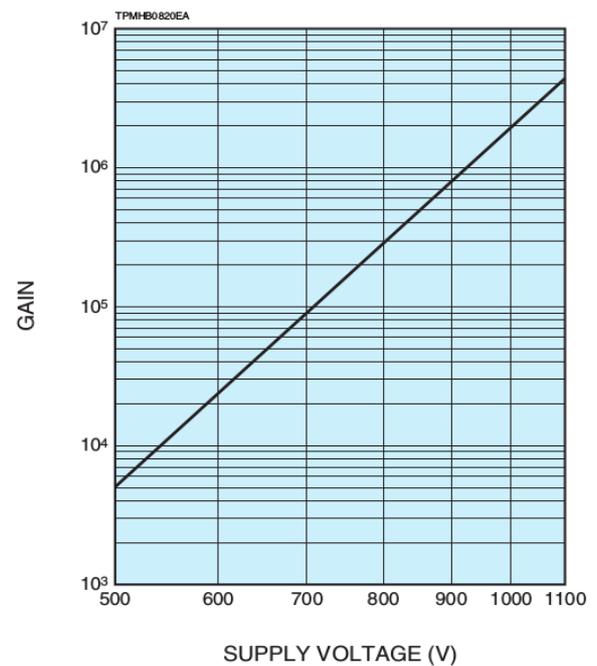


図 1. 浜松ホトニクスが公称しているカタログデータ

2. セットアップ

LEDは波長470 nmのものを用いる。波形生成器 (F.G.: Function Generator) から1 kHz のパルス電流(幅30 ns, 電圧2.2 V) をLED に送り発光させる。同時にF.G. のsync から出力されるTTL規格の信号はTTL-NIM変換器およびLogic Unit を経由してCAMAC ADC のGate 端子に入力される。PMT アノードからの信号は同軸ケーブルの遅延を用いてF.G. からのトリガー信号幅の範囲内に収まるように同期された。CAMAC ADC のアナログ入力端子に同期したPMT 信号を入力し、トリガー信号時刻だけのPMT 信号の電圧値を積分し電荷にしてA/D変換する。ADC のA/D変換係数は事前に0.278 pC/ADC と校正されている。

3. 結果

CAMAC ADC で取得したADC 分布の一例を図2に示す。青線はLED 発光時のヒストグラムであり、赤線はヒストグラムをガウシアンでフィットしたものである。単一光子領域ではPMT からの信号は離散的なピーク構造を持ち、0 p.e. と1 p.e. のそれぞれのピーク間隔からPMT の増幅率を算出できる。増幅率 $\mu(V)$ は次式で表される。

$$\mu(V) = \frac{(M_1 - M_0) \times C_{ADC}}{|e|}$$

ここで e は素電荷 (1.602×10^{-19} C)、 C_{ADC} はADC の変換係数、 M_i は光電子数 $i=0,1$ 相当のピーク値をそれぞれ示す。PMT の印加電圧はダイノードで分割されて光電面からの電子を加速し増倍させるため、増幅率は印加電圧に依存する傾向を持つ。その結果を表1に示す。

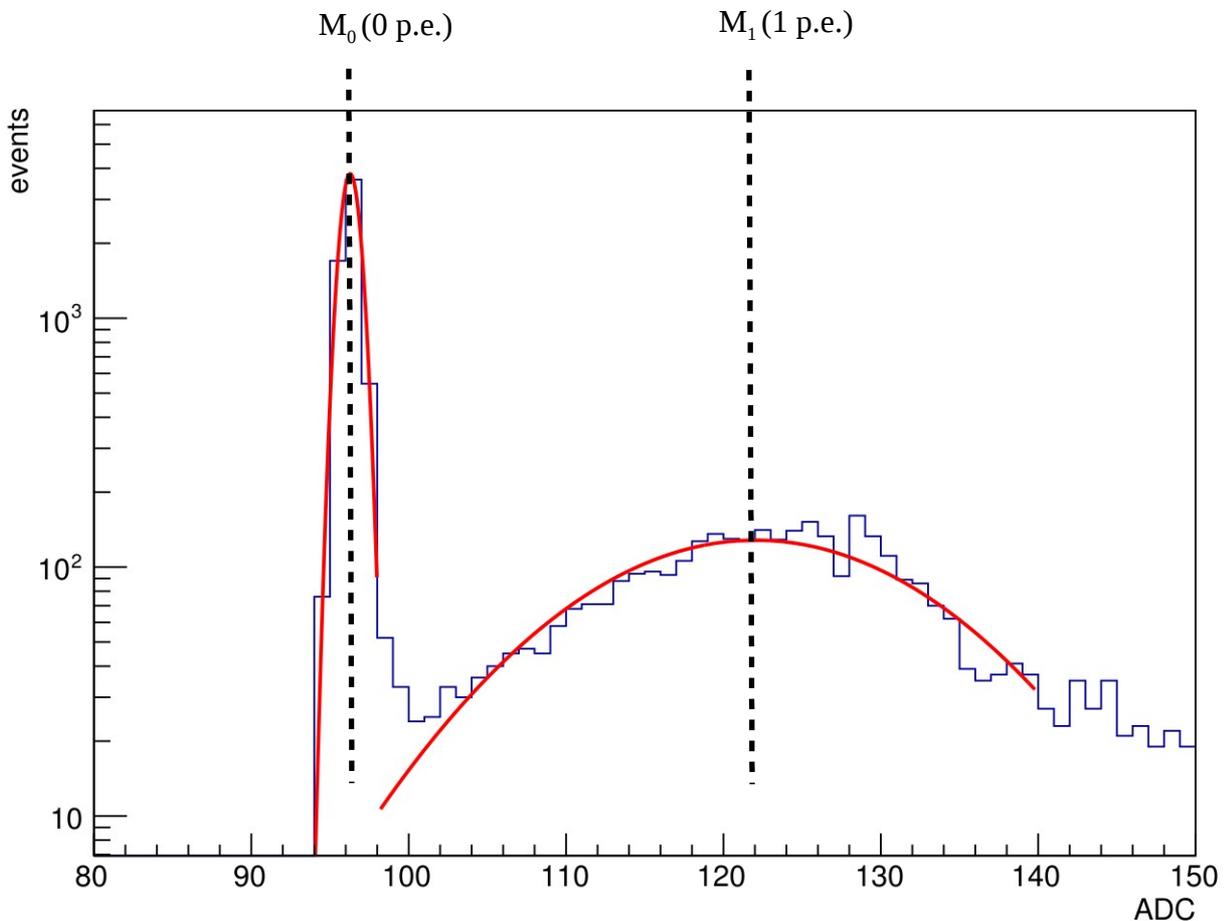


図2. ADC 分布の一例

PMT Calibration
2016年12月13日
水野貴裕

印加電圧[V]	増幅率								
	BAC7244	BHB4970	BHB4859	BHB4977	BPA7937	BHB4867	BHB4252	BHB4199	BHB4869
1200			$(2.99 \pm 0.19) \times 10^7$	$(2.87 \pm 0.17) \times 10^7$	$(1.95 \pm 0.07) \times 10^7$	$(2.17 \pm 0.16) \times 10^7$	$(3.03 \pm 0.07) \times 10^7$	$(3.09 \pm 0.09) \times 10^7$	$(2.45 \pm 0.08) \times 10^7$
1220			$(3.16 \pm 0.10) \times 10^7$	$(3.05 \pm 0.20) \times 10^7$	$(2.14 \pm 0.08) \times 10^7$	$(2.40 \pm 0.10) \times 10^7$	$(3.25 \pm 0.09) \times 10^7$	$(3.33 \pm 0.08) \times 10^7$	$(2.60 \pm 0.14) \times 10^7$
1240			$(3.33 \pm 0.17) \times 10^7$	$(3.19 \pm 0.10) \times 10^7$	$(2.34 \pm 0.08) \times 10^7$	$(2.58 \pm 0.19) \times 10^7$	$(3.48 \pm 0.11) \times 10^7$	$(3.49 \pm 0.08) \times 10^7$	$(2.84 \pm 0.07) \times 10^7$
1260			$(3.62 \pm 0.14) \times 10^7$	$(3.43 \pm 0.12) \times 10^7$	$(2.60 \pm 0.16) \times 10^7$	$(2.77 \pm 0.07) \times 10^7$	$(3.74 \pm 0.10) \times 10^7$	$(3.80 \pm 0.09) \times 10^7$	$(3.06 \pm 0.07) \times 10^7$
1280			$(3.80 \pm 0.12) \times 10^7$	$(3.63 \pm 0.10) \times 10^7$	$(2.83 \pm 0.13) \times 10^7$	$(2.96 \pm 0.12) \times 10^7$	$(3.91 \pm 0.11) \times 10^7$	$(3.98 \pm 0.08) \times 10^7$	$(3.30 \pm 0.12) \times 10^7$
1300	$(1.02 \pm 0.04) \times 10^7$	$(4.60 \pm 0.15) \times 10^7$	$(4.03 \pm 0.13) \times 10^7$	$(3.79 \pm 0.11) \times 10^7$	$(3.05 \pm 0.12) \times 10^7$	$(3.20 \pm 0.09) \times 10^7$	$(4.20 \pm 0.09) \times 10^7$	$(4.21 \pm 0.10) \times 10^7$	$(3.53 \pm 0.11) \times 10^7$
1320	$(1.17 \pm 0.09) \times 10^7$	$(4.77 \pm 0.13) \times 10^7$	$(4.24 \pm 0.11) \times 10^7$	$(4.04 \pm 0.10) \times 10^7$	$(3.28 \pm 0.15) \times 10^7$	$(3.41 \pm 0.13) \times 10^7$	$(4.40 \pm 0.13) \times 10^7$	$(4.48 \pm 0.11) \times 10^7$	$(3.69 \pm 0.11) \times 10^7$
1340	$(1.30 \pm 0.09) \times 10^7$	$(5.05 \pm 0.14) \times 10^7$	$(4.59 \pm 0.13) \times 10^7$	$(4.23 \pm 0.09) \times 10^7$	$(3.44 \pm 0.09) \times 10^7$	$(3.62 \pm 0.09) \times 10^7$	$(4.71 \pm 0.10) \times 10^7$	$(4.72 \pm 0.10) \times 10^7$	$(3.95 \pm 0.11) \times 10^7$
1360	$(1.42 \pm 0.14) \times 10^7$	$(5.26 \pm 0.15) \times 10^7$	$(4.82 \pm 0.13) \times 10^7$	$(4.45 \pm 0.13) \times 10^7$	$(3.64 \pm 0.12) \times 10^7$	$(3.82 \pm 0.11) \times 10^7$	$(4.95 \pm 0.12) \times 10^7$	$(5.01 \pm 0.11) \times 10^7$	$(4.15 \pm 0.09) \times 10^7$
1380	$(1.56 \pm 0.09) \times 10^7$	$(5.47 \pm 0.12) \times 10^7$	$(5.05 \pm 0.13) \times 10^7$	$(4.68 \pm 0.13) \times 10^7$	$(3.82 \pm 0.09) \times 10^7$	$(4.03 \pm 0.12) \times 10^7$	$(5.32 \pm 0.12) \times 10^7$	$(5.36 \pm 0.15) \times 10^7$	$(4.39 \pm 0.10) \times 10^7$
1400	$(1.69 \pm 0.12) \times 10^7$	$(5.65 \pm 0.14) \times 10^7$	$(5.45 \pm 0.18) \times 10^7$	$(4.93 \pm 0.12) \times 10^7$	$(4.04 \pm 0.12) \times 10^7$	$(4.19 \pm 0.12) \times 10^7$	$(5.82 \pm 0.14) \times 10^7$	$(5.99 \pm 0.16) \times 10^7$	$(4.61 \pm 0.11) \times 10^7$

表 1. 各 PMT における電圧と増幅率の関係

ダイノードで倍々と増幅されることを考慮すると印加電圧に対して指数関数的に増幅すると考えられる。そこでフィット関数 $F(V) = \alpha V^\beta$ でフィットした。このフィッティングの係数 α, β を表 2 に示す。

フィット関数のパラメータ	BAC7244	BHB4970	BHB4859	BHB4977	BPA7937	BHB4867	BHB4252	BHB4199	BHB4869
α	$(2.88 \pm 1.18) \times 10^{-15}$	$(5.49 \pm 0.93) \times 10^{-2}$	$(3.34 \pm 9.45) \times 10^{-5}$	$(4.75 \pm 11.33) \times 10^{-4}$	$(7.30 \pm 12.82) \times 10^{-8}$	$(4.37 \pm 12.09) \times 10^{-6}$	$(1.05 \pm 1.57) \times 10^{-5}$	$(1.59 \pm 2.39) \times 10^{-5}$	$(7.09 \pm 12.62) \times 10^{-6}$
β	6.92 ± 0.06	2.87 ± 0.02	3.88 ± 0.39	3.50 ± 0.33	4.69 ± 0.24	4.13 ± 0.39	4.05 ± 0.21	3.99 ± 0.21	4.07 ± 0.25

表 2. 各 PMT における電圧 vs. 増幅率のグラフのフィッティングパラメータ

また、各観測値の精度を誤差の伝搬式

$$\sigma^2 = \sum_i \left(\frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \right)^2 \delta f(x_i)^2$$

を使用して求めたところ、それぞれの PMT における増幅率の観測値の最大誤差は表 3 のようになった。結果として ±12 % 未満の測定精度が保証されていることが確認できた。

	BAC7244	BHB4970	BHB4859	BHB4977	BPA7937	BHB4867	BHB4252	BHB4199	BHB4869
誤差の最大値	0.107	0.034	0.074	0.067	0.093	0.118	0.054	0.078	0.076

表 3. 各 PMT における増幅率の観測値の最大誤差

光電子数を校正した分布において一般に 0.5 p.e. をしきい値にして検出効率を評価する。LED 消灯時の熱雑音頻度は全事象のうち 0.5 p.e. を超える信号が観測された事象の比として定義された。この結果を表 4 に示す。一般的には印加電圧と熱雑音の間には正の相関があるが、今回の測定でも印加電圧と熱雑音の間に正の相関関係が見られた。

PMT Calibration
 2016年12月13日
 水野貴裕

印加電圧[V]	熱雑音頻度								
	BAC7244	BHB4970	BHB4859	BHB4977	BPA7937	BHB4867	BHB4252	BHB4199	BHB4869
1200			3×10^{-5}	0	9×10^{-5}	0	2×10^{-5}	3×10^{-5}	2×10^{-5}
1220			1×10^{-5}	0	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	2×10^{-5}	0
1240			2×10^{-5}	1×10^{-5}	2×10^{-5}	2×10^{-5}	3×10^{-5}	6×10^{-5}	0
1260			0	0	0	0	2×10^{-5}	1.0×10^{-4}	1×10^{-5}
1280			1×10^{-5}	0	2×10^{-5}	0	2×10^{-5}	1.9×10^{-4}	0
1300	2×10^{-5}	2×10^{-5}	2×10^{-5}	0	1×10^{-5}	1×10^{-5}	2×10^{-5}	2.0×10^{-4}	0
1320	0	4×10^{-5}	3×10^{-5}	0	0	0	5×10^{-5}	3.0×10^{-4}	0
1340	2×10^{-5}	6×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-5}	0	0	7×10^{-5}	4.6×10^{-4}	1×10^{-5}
1360	2×10^{-5}	1.4×10^{-4}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	0	4×10^{-5}	4.7×10^{-4}	2×10^{-5}
1380	1×10^{-5}	1.1×10^{-4}	3×10^{-5}	7×10^{-5}	0	0	1.3×10^{-4}	7.4×10^{-4}	0
1400	0	1.3×10^{-4}	5×10^{-5}	4×10^{-5}	2×10^{-5}	2×10^{-5}	1.3×10^{-4}	7.6×10^{-4}	0

表 4. 各 PMT における供給電圧と熱雑音の関係

4.まとめ

光電子増倍管 (R9880U-210 BAC7244, R9880U-210 BHB4970, R9880U-210 BHB4859, R9880U-210 BHB4977, R9880U-210 BPA7937, R9880U-210 BHB4867, R9880U-210 BHB4252, R9880U-210 BHB4199, R9880U-210 BHB4869) の性能試験測定を行った。結果として印加電圧と増幅率の関係が得られた。測定精度は 12 %未満であった。熱雑音の測定により、印加電圧と熱雑音の間の関係を確認した。