



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2004–23
ОЭФ

С.А. Белянченко¹, В.В. Бреховских, В.А. Дятченко, Д. Имре²,
В.А. Качанов, В.Г. Лапшин, М.В. Медынский, В.В. Рыкалин³,
В.И. Рыкалин, В.А. Смолицкий¹, П. Хобсон²

ФОТОТРИОДЫ И ФОТОТЕТРОДЫ С ВЫСОКИМ УСИЛЕНИЕМ

¹МЭЛЗ (Московский электроламповый завод)

²Brunel University, UK

³NICADD NIU, USA

Аннотация

Белянченко С.А., Бреховских В.В., Дятченко В.А. и др. Фототриоды и фототетроды с высоким усилением: Препринт ИФВЭ 2004–23. – Протвино, 2004. – 8 с., 9 рис., 2 табл., библиогр.: 6.

Описаны новые результаты по характеристикам фототриодов с усилением 30–50 и фототетродов с усилением до 200. Эти фотоприёмники были разработаны и изготовлены в ИФВЭ и на МЭЛЗе в течение последних четырёх лет. На МЭЛЗе освоено производство фототриодов с высоким усилением и радиационно стойким окном фотокатода. Обсуждаются возможности использования результатов разработок для создания фотоумножителей, работающих в магнитных полях более 4 Т, многоканальных фотоумножителей и детекторов частиц с высоким временным разрешением.

Abstract

Belyanchenko S.A., Brekhovskikh V.V., Dyatchenko V.A. et al. Phototriodes and Phototetrodes with High Gain: IHEP Preprint 2004–23. – Protvino, 2004. – p. 8, figs. 9, tables 2, refs.: 6.

The new results on the design and characteristics of phototriodes with a gain of 30–50 and phototetrodes with a gain up to 200 are described. These photoreceivers were designed and produced at IHEP and MELZ in the last four years. MELZ has started to produce such phototriodes with radiation hardened Ce-doped photocathode window. The possibilities of using these results for photomultipliers designing which can operate in magnetic fields more than 4 T, multichannel photomultipliers and particle detectors with high time resolution are discussed.

Введение

Энергетическое разрешение переднего калориметра электромагнитного калориметра CMS определяется, в том числе, усилением фототриодов, которое определяет величину эквивалентного шума [1].

Минимально допустимая величина требуемого усиления составляет около 10 в аксиальном магнитном поле величиной 4 Т. В то же время средняя величина усиления известных фототриодов с бищелочным динодом отражающего типа и fine-mesh-анодом не превышает 12–16 [1, 2] и уменьшается почти вдвое в магнитном поле 4 Т.

В рамках CERN–INTAS-проекта 99-0424 в ИФВЭ совместно с МЭЛЗ были разработаны и успешно испытаны первые образцы фототриодов с усилением более 30. МЭЛЗ освоил производство fine-mesh-фототриодов с усилением 30–50 и радиационно стойким окном из стекла С1-96.

Разработка фототетродов с динодом на прострел и отражающим динодом, имеющих усиление до 200, была следующим шагом в разработке фотоприёмников, работающих в больших магнитных полях.

Первые данные по вторично-эмиссионному усилению K_2CsSb -бищелочных динодов и Na_2KCsSb -мультищелочных динодов были получены А.Х. Соммером [3]. При энергии электронов в 800 эВ величина усиления указанных динодов составляет 25–30 соответственно. Следовательно, не все возможности бищелочных динодов были реализованы в испытанных фототриодах [1, 2]. Наши результаты для усиления подобных динодов отличаются от усиления динодов промышленных приборов (т.е. фототриодов Hamamatsu, Philips, Петербургского объединения “Электрон”) и составляют в три раза большую величину.

1. Основные характеристики фототриодов с большим усилением

Эскиз конструкции ИФВЭ- и МЭЛЗ-фототриодов и зависимости усиления фототриодов от различных параметров показаны на **рис. 1–3**.

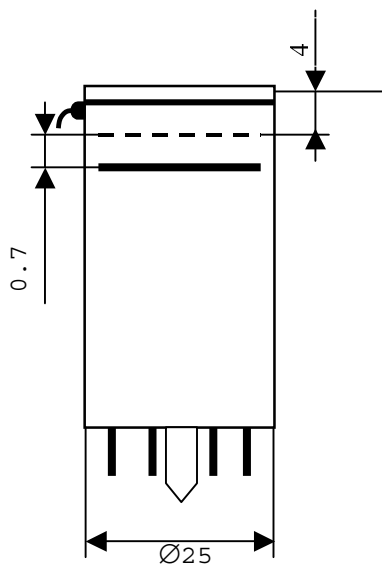


Рис. 1. Эскиз конструкции фототриодов.

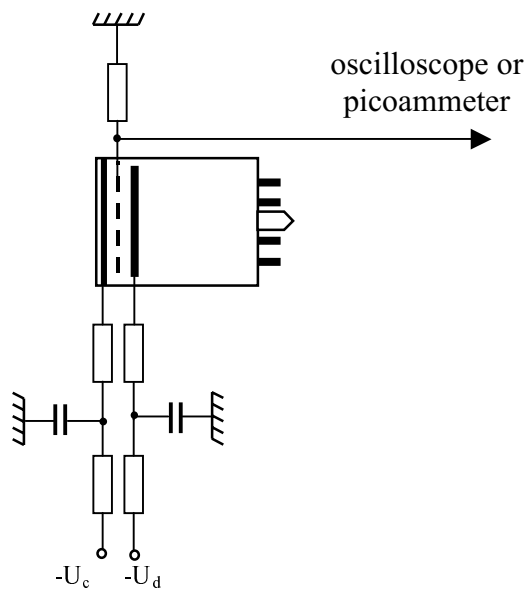


Рис. 2. Схема измерения характеристик.

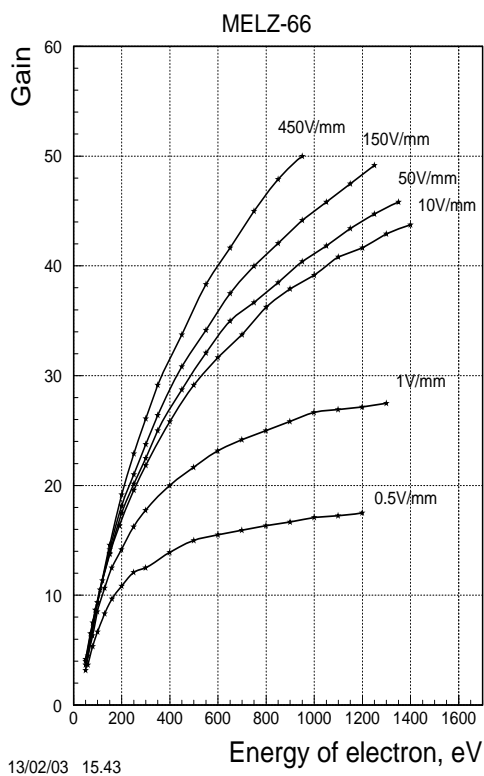
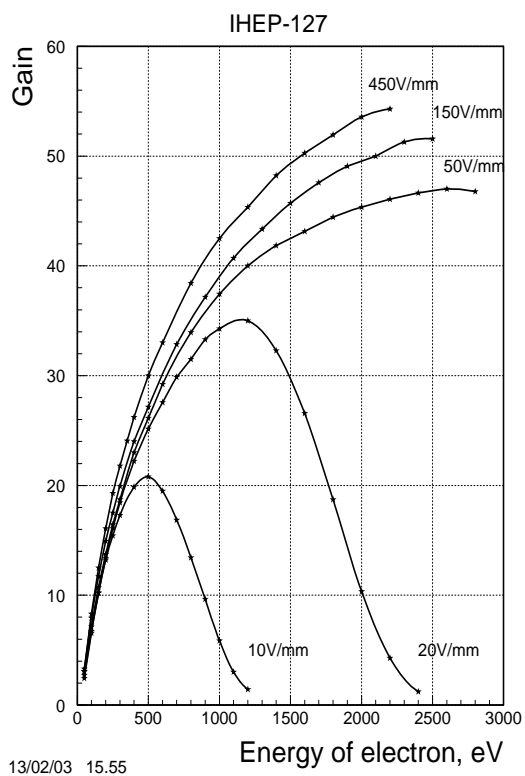


Рис. 3. Зависимость усиления от энергии фотоэлектронов и электрического поля в промежутке динод-анод для ИФВЭ- и МЭЛЗ-фототриодов.

Основные характеристики разработанных фототриодов с радиационно стойкими окнами представлены в табл. 1 в сравнении с характеристиками Hamamatsu R2148 вакуумного фототриода.

Таблица 1.

№, Manufacturer	$S_{ph\ cath}$ 410 nm mA/W	Gain	HV_{nom} (kV)	HV_{max} (kV)	Anode signal ampl. LED, 430 nm	Photo- cathode signal ampl. LED, 430 nm	Type of mesh
Hamamatsu	80	9	1	1	1	1	
48, MELZ	54	47	1.85	2.4	2.34	0.3	Cu, 60 l/mm
50, MELZ	50	39	1.85	2.4	2.2	0.34	Cu, 60 l/mm
54, MELZ	51	46	1.85	2.05	3.1	0.42	Cu, 60 l/mm
57, MELZ	62	20	1.85	2.4	2	0.64	Cu, 100 l/mm
59, MELZ	47	44	1.85	2.4	2.6	0.38	Cu, 100 l/mm
61, MELZ	62	35	1.85	2.85	2.65	0.47	Si, 100 l/mm
63, MELZ	51	35	1.85	2.45	2.5	0.44	Cu, 100 l/mm
64, MELZ	44	37	1.85	2.45	2.2	0.36	Si, 100 l/mm
65, MELZ	40	36	1.85	2.4	1.8	0.3	Si, 100 l/mm
66, MELZ	49	35	1.85	2.05	2.2	0.38	Cu, 60 l/mm
69, MELZ	52	41	1.85	2.45	2.5	0.38	Cu, 60 l/mm
71, MELZ	53	52	1.85	2.45	2.24	0.24	Cu, 60 l/mm
74, MELZ	40	49	1.85	1.9	1.7	0.45	Cu, 60 l/mm
Mean, MELZ	50.4	40	1.85	2.4	2.3	0.39	

Как видно из табл. 1, усиление МЭЛЗ-фототриодов в несколько раз больше, чем у Hamamatsu R2148. При этом достигнутый уровень синей чувствительности фотокатода в 1,3÷1,5 раза меньше, чем у Hamamatsu R2148.

2. Возможный механизм высокого усиления

На рис. 4 приведены результаты измерений коэффициента вторичной эмиссии (δ) для K_2CsSb -, Na_2KCsSb -, Cs_3Sb -, GaP- и Cu-BeO-Cs-диодов.

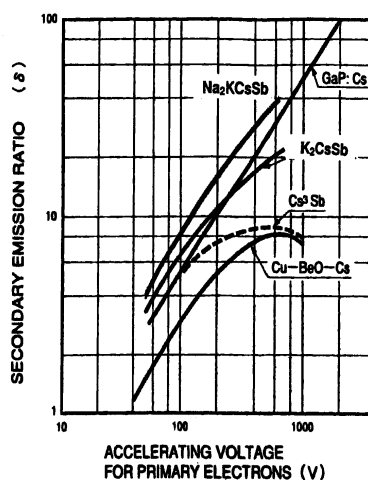


Рис. 4. Зависимости коэффициента вторичной эмиссии различных типов эффективных диодов от энергии электрона.

Как можно видеть на рис. 4, не наблюдается заметного насыщения величины δ от ускоряющего напряжения (энергии электронов) для случаев бищелочного и мультищелочного динодов. Кроме того, неизвестно, при какой величине электрического поля, “собирающего” вторичные электроны, проводились эти измерения. В то же время, результаты наших измерений (см. рис. 3) показывают, что зависимость усиления от величины “собирающего” электрического поля может быть достаточно сильной.

Представляется, что объяснение высокой величины вторичной эмиссии бищелочных и мультищелочных динодов только эффективным отрицательным электронным средством (NEA) [4], как и в случае GaP(Cs), является недостаточным для случая K_2CsSb -динода. Зависимости рис. 3 показывают, что усиление фототриодов увеличивается с ростом электрического поля в промежутке анод–динод, а насыщение усиления и затем его уменьшение имеет место только для малых значений величины электрического поля в этом промежутке. Это может указывать на то, что электрическое поле проникает в активный материал динода, по крайней мере, на глубину пробега падающих на K_2CsSb -динод электронов. Это вполне возможно, так как K_2CsSb является полупроводником с очень высоким сопротивлением (несколько кОм/см) и число носителей может быть недостаточным, чтобы компенсировать внешнее электрическое поле. При такой модели, при малых значениях электрического поля в промежутке падение усиления с ростом энергии фотоэлектронов объясняется тем, что в приповерхностных слоях динода, в которые проникает электрическое поле, количество вторичных электронов с ростом энергии фотоэлектронов падает, что связано с уменьшением величины ионизационных потерь в приповерхностных слоях.

Следующая качественная модель представляется наиболее реальной:

1. K_2CsSb -слой имеет относительно малую величину поверхностного потенциального барьера.
2. Электрическое поле внутри K_2CsSb -динода “разогревает” и транспортирует вторичные электроны к поверхности, но не уменьшает величину потенциального барьера на поверхности динода, так как имеет место очень слабая зависимость усиления от электрического поля в области малых величин энергии фотоэлектронов (рис. 3).

3. Фототетроды с тонкопленочным динодом на прострел

В рамках упомянутого INTAS-проекта был разработан новый тип фотоприёмников – фототетроды с тонкопленочными динодами на прострел. Эскиз конструкции фототетродов и схема измерения их характеристик показаны на **рис. 5** и **6** соответственно.

Зависимости усиления динодов на прострел (d_1), отражающих динодов (d_2) и фототетрода в целом представлены на **рис. 7-9**. Максимальное усиление динодов было достигнуто при минимальной толщине пленки, обеспечивающей достаточную механическую прочность. Эта толщина составляет около 50 нм при плотности $(0,1 \pm 0,01)$ мг/см². Вполне возможно и дальнейшее уменьшение толщины плёнки.

В то же время длина пробега электрона с энергией 2 кэВ составляет $(4,5 \pm 3) \cdot 10^{-3}$ мг/см², т.е. в 22 раза меньше. В случае электронов с энергией 0,5 кэВ это отношение (22) будет больше на два порядка величины, однако вторичная эмиссия ещё имеет место. Отсюда следует, что:

1. Все вторичные электроны термализованы.
2. Диффузионная длина вторичных электронов внутри активной плёнки должна быть сравнимой с толщиной плёнки.

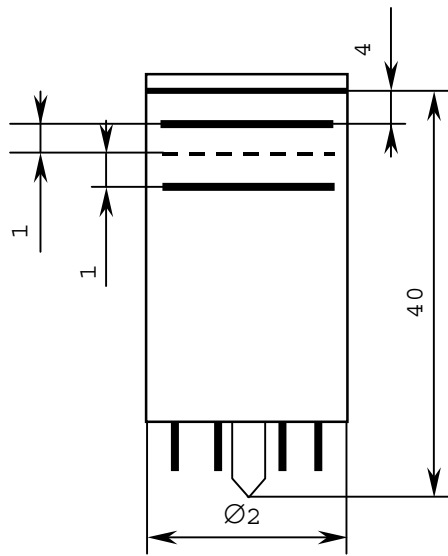


Рис. 5. Эскиз конструкции фототетрода.

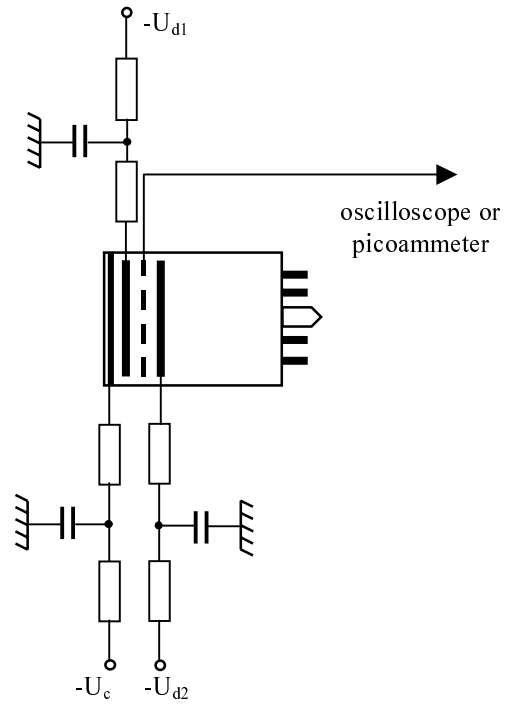
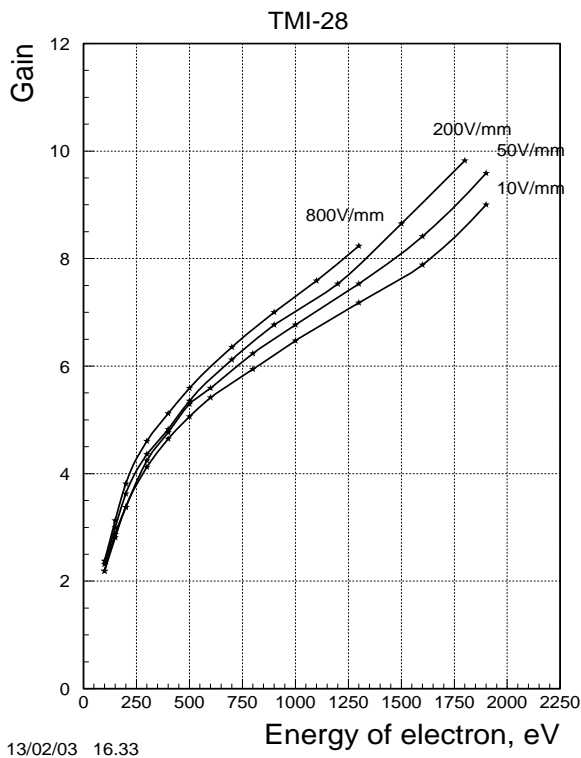
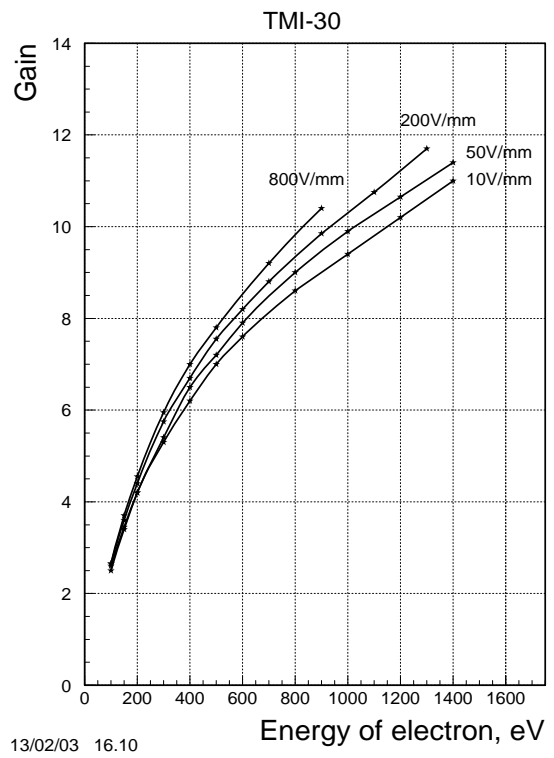


Рис. 6. Схема измерения характеристик.



13/02/03 16.33



13/02/03 16.10

Рис. 7. Зависимость усиления динодов на прострел от энергии фотоэлектронов и электрического поля между динодом и анодом для фототетродов TMI-28 и TMI-30.

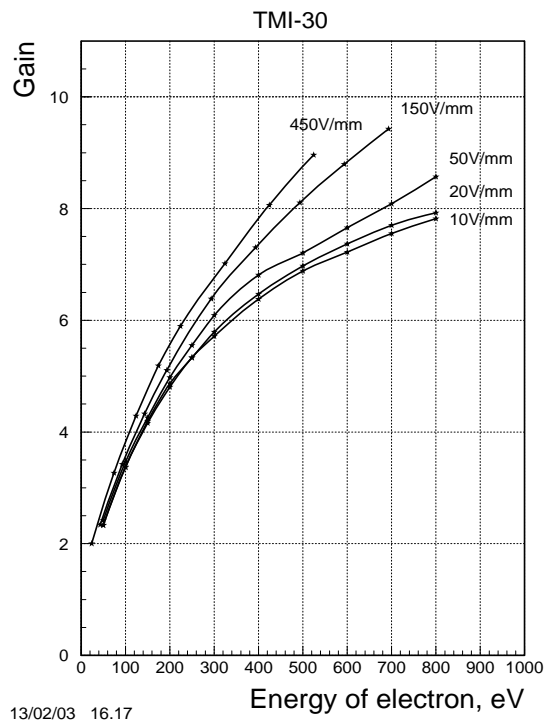
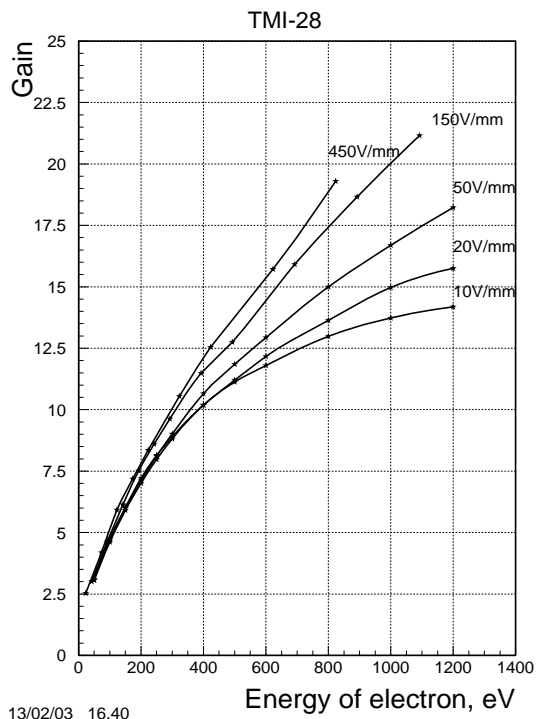


Рис. 8. Зависимость усиления отражающих динодов от энергии вторичных электронов и электрического поля между этим динодом и анодом для TMI-28 и TMI-30.

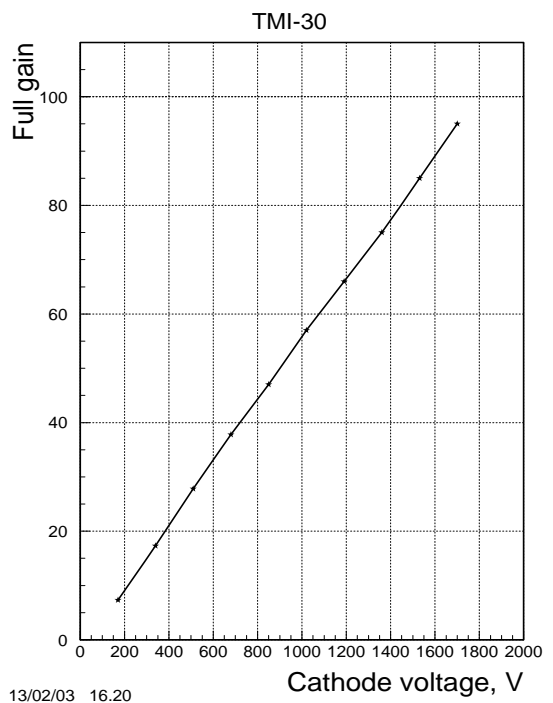
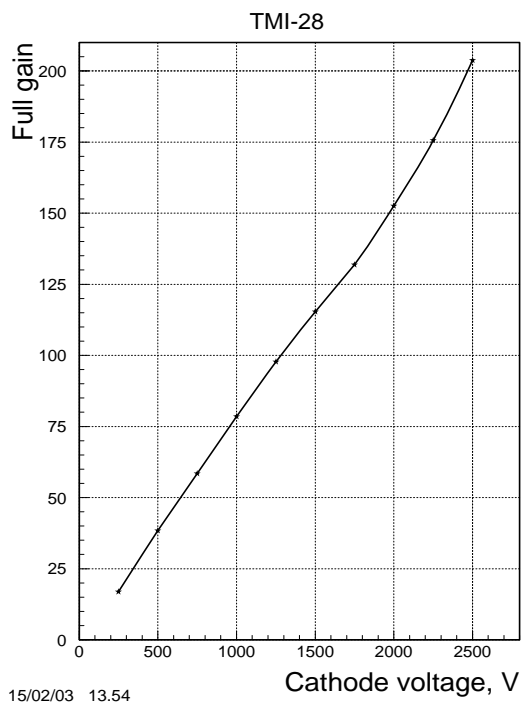


Рис. 9. Зависимость усиления фототетродов при пропорциональном увеличении напряжения на всех электродах.

Усиление динодов на прострел сравнительно слабо зависит от электрического поля в промежутке анод–динод (рис. 7). Это означает, что электрическое поле практически не проникает в объём динода и не может “разогреть” и транспортировать вторичные электроны к эмиттирующей поверхности динода.

Все эти факты можно объяснить в предположении, что поверхность разработанной активной плёнки динода на прострел обладает NEA подобно кристаллу GaP(Cs).

4. Некоторые оценки энергетического разрешения переднего электромагнитного калориметра CMS при использовании разработанных фототетродов

Разработанные фототетроды имеют усиление 100–200, и мы надеемся на дальнейшее повышение усиления. Представляется интересным понять, какие преимущества можно получить при использовании разработанных фототетродов в переднем электромагнитном калориметре.

Логично предположить, что магнитная стойкость этих фототетродов должна быть, по крайней мере, сравнимой со стойкостью триодов с мелкоструктурными сетками, т.к. диноды на прострел представляют собой плоскую проводящую плёнку и, следовательно, вторичная эмиссия должна слабо зависеть (подобно плоскому фотокатоду) от продольного магнитного поля.

Давайте оценим зависимость энергетического разрешения переднего электромагнитного калориметра CMS от усиления фотоприемников. Из работы [6] следует, что

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{\sigma_n}{E} \oplus C,$$

где a – стохастический член, σ_n – шум, C – константа.

Вклад фотостатистики в стохастический член при использовании VPT с типичным квантовым выходом фотокатода $\varepsilon=0,15$, полученный с помощью LED, составляет $a_{\text{phe}} = (3,5 \pm 0,55) \%$.

Для σ_n /ГэВ и C из этой работы следует, что $\sigma_n = 0,53$ и $C = 0,5 \%$.

Вклад от шума $\sim 1/G$, где G – усиление фотоприёмника, следовательно, этот вклад может быть представлен как

$$\text{noise} = \frac{0,53}{E \cdot \frac{G}{G_0}},$$

где $G_0 = 10$ – есть типичное усиление промышленных фототриодов.

Посмотрим теперь на зависимость (σ_{tot}/E) – т.е. на сумму вкладов от фотостатистики (основной вклад в стохастический член) и шума от энергии для случаев $G=10; 50; 100; 150; 200$.

Таблица 2.

E (ГэВ)	1	10	50	100	500	1000
σ_{tot}/E (G=10)	$5.31 \cdot 10^{-1}$	$5.41 \cdot 10^{-2}$	$11.7 \cdot 10^{-3}$	$6.35 \cdot 10^{-3}$	$1.89 \cdot 10^{-3}$	$1.23 \cdot 10^{-3}$
σ_{tot}/E (G=50)	$1.12 \cdot 10^{-1}$	$1.53 \cdot 10^{-2}$	$5.38 \cdot 10^{-3}$	$3.66 \cdot 10^{-3}$	$1.58 \cdot 10^{-3}$	$1.11 \cdot 10^{-3}$
σ_{tot}/E (G=100)	$0.635 \cdot 10^{-1}$	$1.23 \cdot 10^{-2}$	$5.06 \cdot 10^{-3}$	$3.54 \cdot 10^{-3}$	$1.57 \cdot 10^{-3}$	$1.108 \cdot 10^{-3}$
σ_{tot}/E (G=150)	$0.497 \cdot 10^{-1}$	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$4,98 \cdot 10^{-3}$	$3.51 \cdot 10^{-3}$	$1.57 \cdot 10^{-3}$	$1.107 \cdot 10^{-3}$
σ_{tot}/E (G=200)	$0.439 \cdot 10^{-1}$	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$4,98 \cdot 10^{-3}$	$3.51 \cdot 10^{-3}$	$1.56 \cdot 10^{-3}$	$1.107 \cdot 10^{-3}$

Из табл. 2 мы видим, что до 100 ГэВ вариант $\varepsilon=0,15$; $G \geq 100$ существенно лучше, чем вариант $\varepsilon=0,15$; $G=10$. В то же время известно, что при энергиях более 100 ГэВ вклады от фотостатистики и шума становятся существенно меньшими, чем другие вклады.

Заключение

1. Технология, разработанная в ИФВЭ и на МЭЛЗе, позволяет изготавливать радиационно стойкие фототриоды с усилением 30–50.

2. Разработанные фототетроды с динодами на прострел имеют усиление до 200, и возможно дальнейшее увеличение усиления.

3. При использовании нескольких динодов на прострел вполне возможно создание одно- и многоканальных фотоумножителей, которые могут работать в любых продольных магнитных полях (в том числе и более 4 Т).

4. В таких фотоумножителях разброс времён пролёта между фотокатодом и первым динодом, последовательными динодами на прострел, отражающим динодом и сеточным анодом при зазорах между ними около 1 мм не будет превышать 10 псек. Следовательно, например в случае шестикаскадного ФЭУ, при усилении более 10^6 суммарный разброс времен пролёта электронов будет составлять менее 35 псек, что почти на два порядка величины меньше разброса времен пролёта у обычных временных фотоумножителей (которым в основном определяется длительность одноэлектронных импульсов на выходе) и на порядок меньше временного разброса фотоэлектронов в их катодных камерах.

Применение фотоумножителей с динодами на прострел, по-видимому, позволит значительно повысить разрешение времяпролётных спектрометров на основе сцинтилляционных и черенковских счетчиков.

Список литературы

- [1] The Electromagnetic Calorimeter Project. TDR, CERN/LHCC 97-33 CMS TDR4, p. 128–138.
- [2] N.A.Bajanov et al. CMS Note 1998/000, p. 3.
- [3] A.H.Sommer. J.Appl.Phys. Vol. 43. № 5, 1973.
- [4] Photomultiplier tube. Principle to application. Hamamatsu, 1994.
- [5] RCA. Photomultiplier handbook theory. Design. Application. 1984, p. 23.
- [6] G.J.Davis et al. Energy resolution of prototype Lead Tungsten Crystal Matrix with..., CMS Note, 25 March 1999.

Рукопись поступила 9 июня 2004 г.

С.А. Белянченко, В.В. Бреховских, В.А. Дятченко и др.
Фототриоды и фототетроды с высоким усилением.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.
Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 10.06.2004. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.
Печ.л. 1. Уч.–изд.л. 0,8. Тираж 100. Заказ 283. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2004-23, ИФВЭ, 2004
