

核探测与核电子学国家重点实验室

State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics

CEPC量能器用国产SiPM及注 塑闪烁体研究

俞伯祥 蒋杰臣

核探测与核电子学国家重点实验室&核物理
与核技术国家重点实验室2019年联合年会





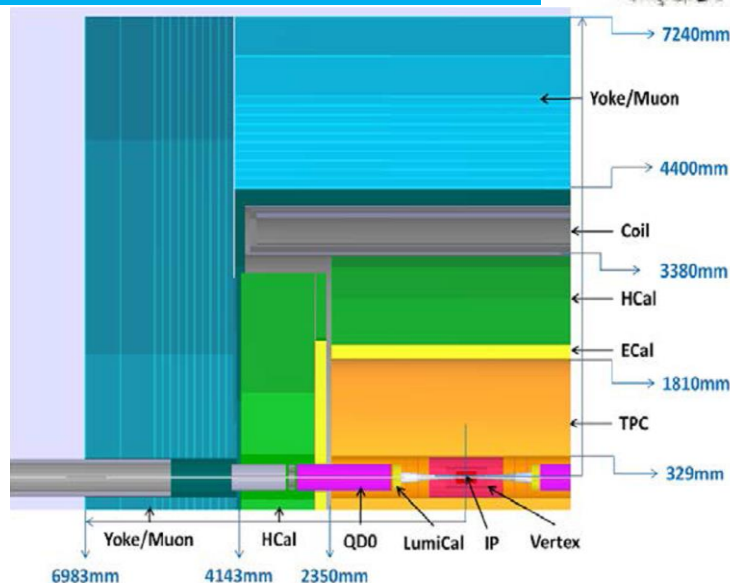
- 研究背景
- 注塑闪烁体的优化
- NDL-SiPM测试
- 总结和展望

研究背景



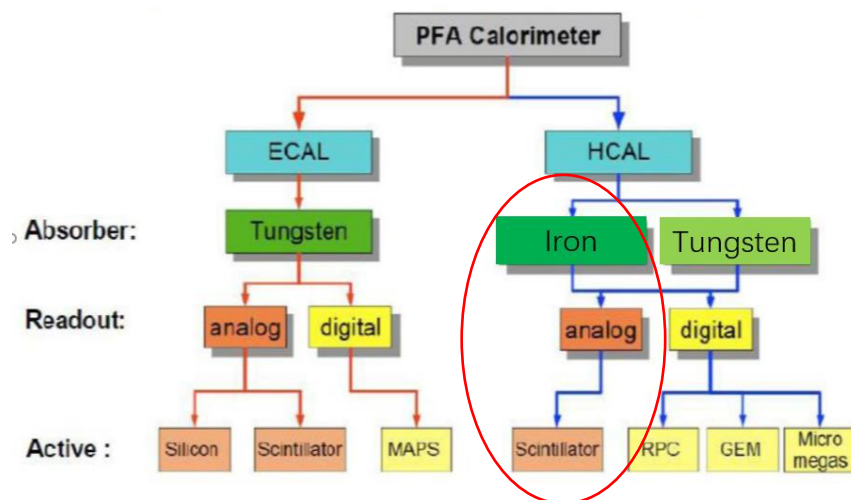
CEPC量能器的要求

- Jet的能量分辨率(基于PFA)
- $\sigma_E/E \approx (3\% - 4\%) @100\text{GeV}$
- 电磁量能器 $16\%/\sqrt{E}$
- 强子量能器 $50\%/\sqrt{E}$
- 高颗粒度, 紧凑的簇射(小的辐射长度和莫里哀半径), 小的死区。



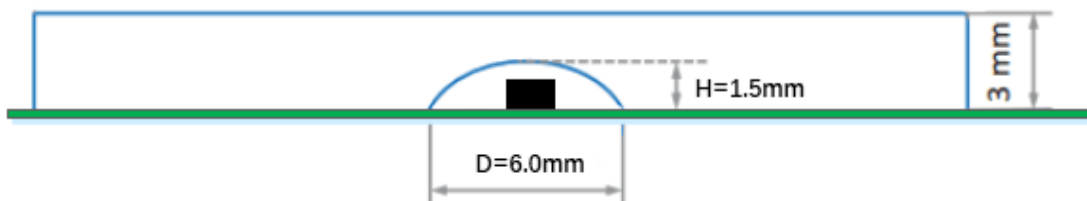
模拟型强子量能器(AHCAL):塑料闪烁体+SiPM

- 670万 通道;
- 满足大批量生产需求;
- 减少探测单元的成本;





探测单元结构



均匀性测试：探测单元的光产额均匀性基本上在10%以内。

特点：

- 高光产额
- **机械钻孔抛光复杂**
- 一致性偏差
- **成本较高**
- 工期较长



闪烁体要求

- 批量生产
- 一致性好
- 成本低



国外的塑料闪烁体(BC408)



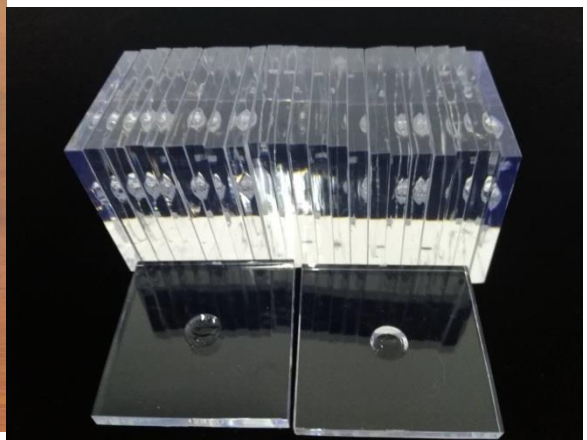
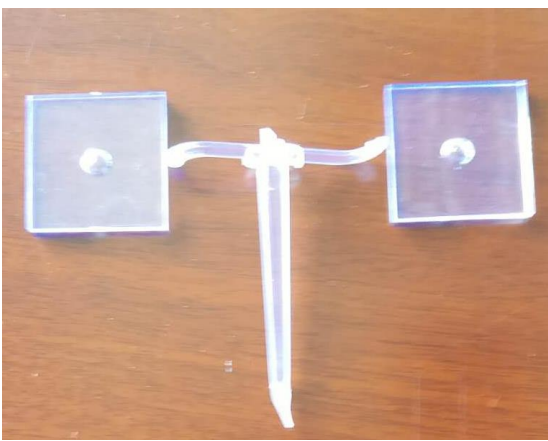
国产注塑闪烁体

- 加工周期短
- 无需抛光
- 尺寸一致

高能科迪注塑塑料闪烁体测试

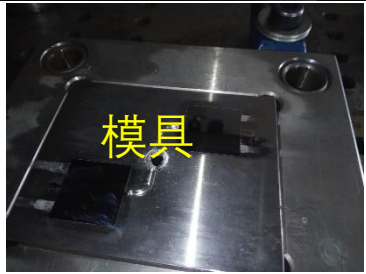


- 目的：
实现AHCAL大批量探测单元的需求
- 特点：
- 注塑闪烁体不需要表面抛光处理。尺寸基本一致。
 - ESR膜切割方便自动包装。

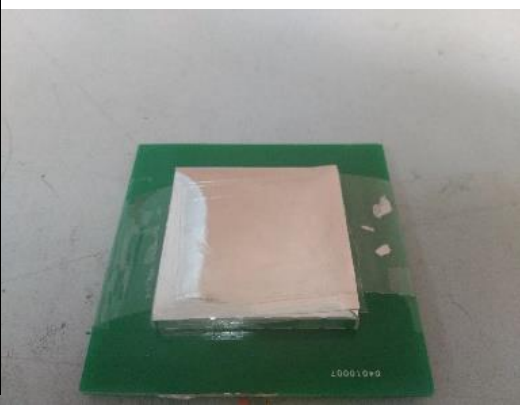
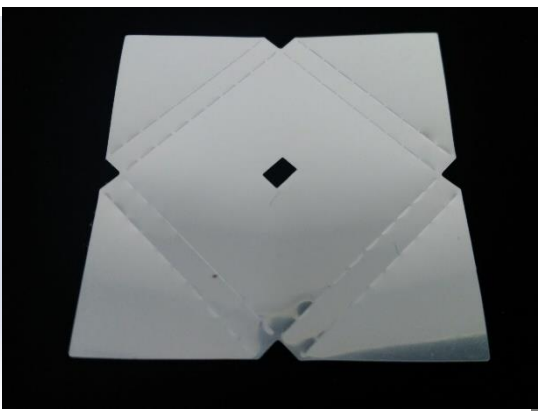
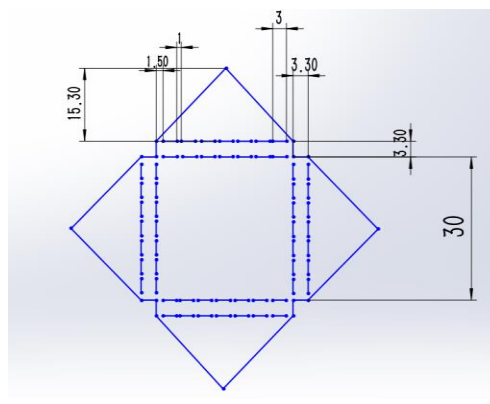


Area(mm2)	30.08x30.01	30.07x30.04	30.04x30.02	30.09x30.09	30.05x30.03
Thickness(mm)	3.08	3.09	3.09	3.09	3.09

注塑闪烁体尺寸差异小于50um



模具切割的ESR膜及包装效果



高能科迪批量注塑闪烁体



目的：合理的配方及工艺

要求：光产额23p.e.,偏差 $\pm 10\%$

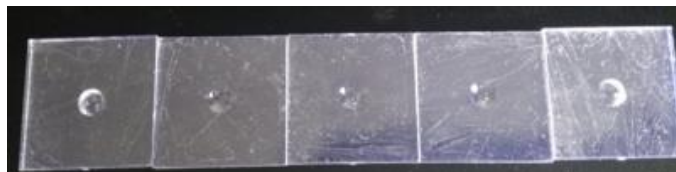
探测单元：

闪烁体尺寸:30mm*30mm*3mm

SiPM:S12571-029P

刀模ESR膜包装

第一批(表面污染)



闪烁体尺寸 (mm ³)	30.08x30.01 x3.08	30.07x30.04 x3.09	30.04x30.02 x3.09	30.09x30.09 x3.09	30.05x30.03 x3.09
光产额(p.e.)	15.24	13.55	13.03	12.08	

第二批(配比与第一批一致)

第二批注塑	闪烁体1	闪烁体2	闪烁体3	闪烁体4	闪烁体5	闪烁体6
光产额(p.e.)	18	8.16	18.36	15.61	17.93	19.26
第二批注塑	闪烁体7	闪烁体8	闪烁体9	闪烁体10	闪烁体11	闪烁体12
光产额(p.e.)	18.32	17.11	15	9.86	10.78	9.94

测试结果:

- 光差额普遍偏低
- 不同闪烁体均匀性太差

改进方案:

- 增加发光物质浓度
- 搅拌融合均匀



第三、四、五批注塑闪烁体

第三批注塑	闪烁体1	闪烁体2	闪烁体3	闪烁体4	闪烁体5	闪烁体6
光产额(p.e.)	17.79	18.06	18.12	16.7	16.26	16.5

- 第三批均匀性较好，光产额偏低
- 第四批增加发光物质后，均匀性较差
- 第五批光产额还是不够；

第四批闪烁体	1	2	3	4	5
光产额(p.e.)	22.35	22.18	19.58	19.62	21.59
第四批闪烁体	6	7	8	9	10
光产额(p.e.)	20.63	21.01	18.98	19.13	19.08

第五批闪烁体	1	2	3	4	5
光产额(p.e.)	20.3	20.77	20.82	20.96	20.21
第五批闪烁体	6	7	8	9	10
光产额(p.e.)	21.68	18.77	19.73	20.04	20.18



第六批注塑闪烁体

第六批闪烁体	1	2	3	4	5
光产额(p.e.)	23.52	23.95	22.98	23.77	21.79
闪烁体	6	7	8	9	10
光产额(p.e.)	23.68	22.77	21.35	22.12	21.44

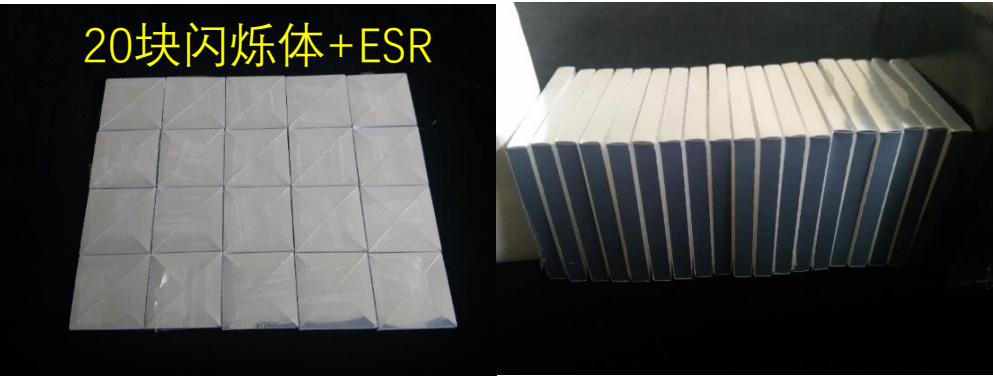
第七批注塑闪烁体

第七批闪烁体	1	2	3	4	5
光产额(p.e.)	21.64	21.84	21.72	20.35	20.60

- 第六批闪烁体光产额平均22.74p.e., 偏差小于3p.e.。
- 第七批闪烁体光产额偏低, 还需改进。

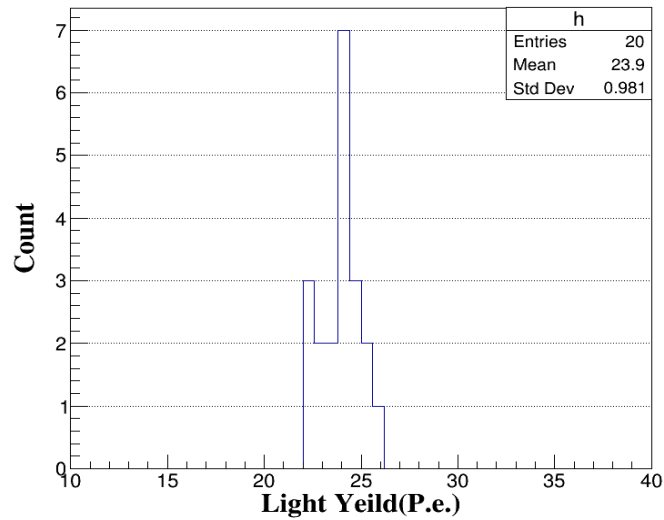
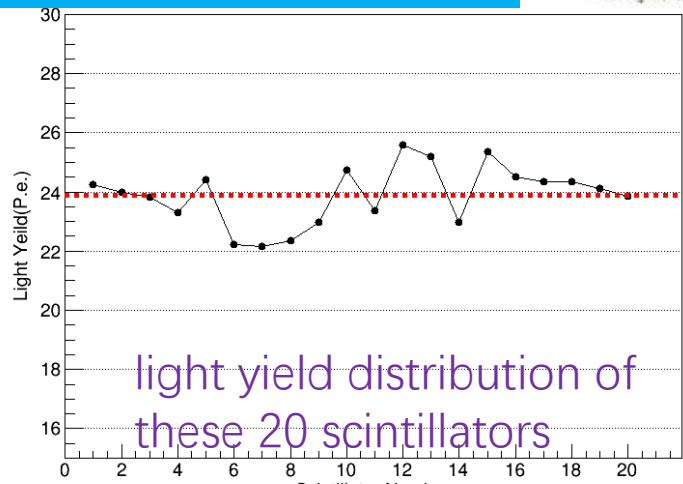


第八批注塑闪烁体



Scintillator	1	2	3	4	5
Light yield(p.e.)	24.25	23.97	23.82	23.29	24.23
Scintillator	6	7	8	9	10
Light yield(p.e.)	22.22	22.17	22.34	22.98	24.73
Scintillator	11	12	13	14	15
Light yield(p.e.)	23.38	25.6	25.21	22.98	25.36
Scintillator	16	17	18	19	20
Light yield(p.e.)	24.52	24.33	24.36	24.12	23.85

第八批生产了100片，测试其中20片。
第八批光产额平均值在23p.e.左右，均匀性偏差3p.e.左右。



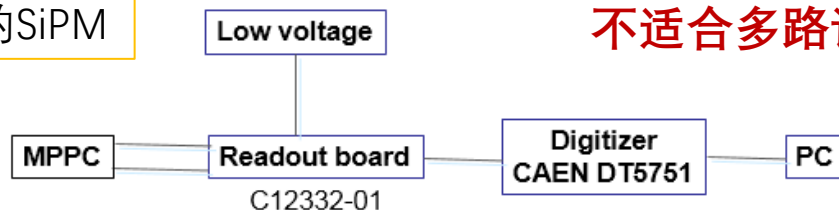
根据之前的结果闪烁体尺寸、ESR膜的均匀性和第八批闪烁体光产额达到预期要求

SiPM研究背景



滨松电子学：
成本较高
不适合多路读出

根据我们要求，NDL流片的SiPM



滨松SiPM

- 研究成熟
- 种类很多
- 价格昂贵

SiPM要求

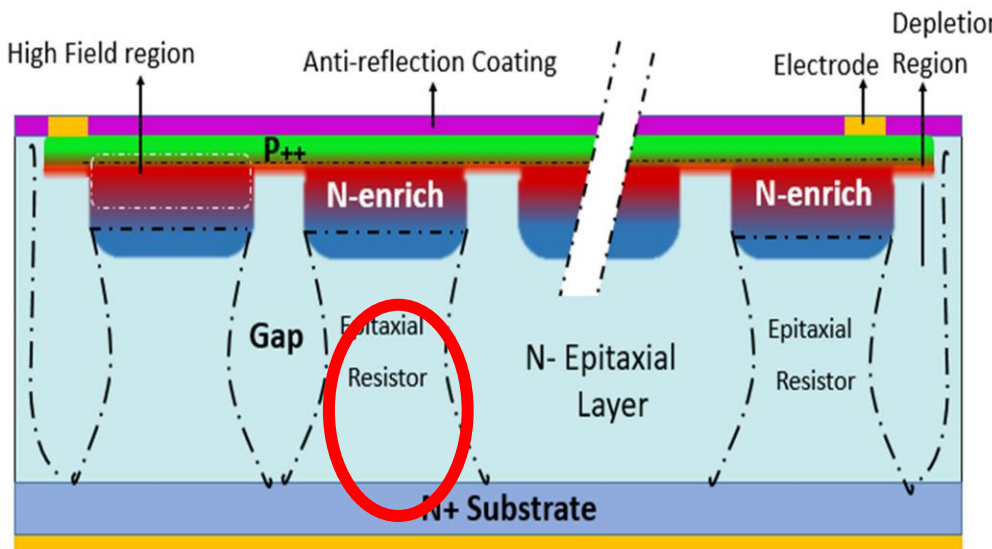
- 高增益
- 低串扰
- 价格便宜



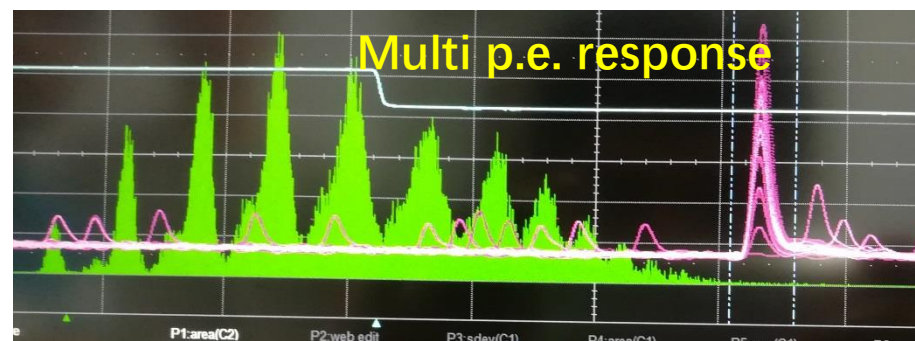
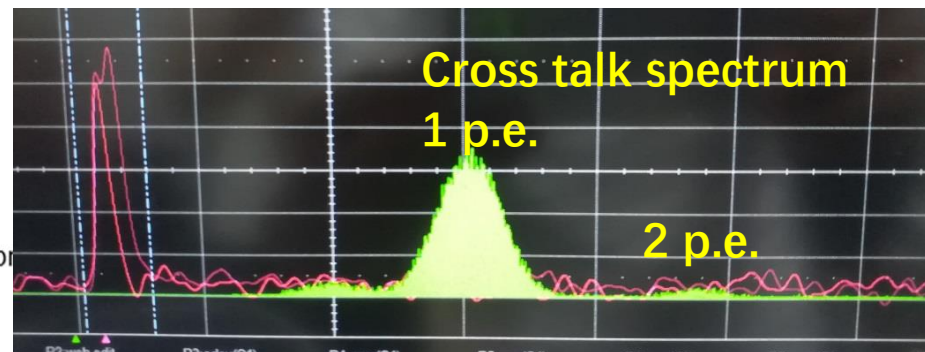
北师大研制出一种具有向下外延伸展淬灭电阻(EQR)特点的SiPM.

特点：

- 内部有本征连续均匀帽型电阻层
- 表面有更大的填充因子
- 更大的增益
- 价格便宜



EQR SiPM原理图

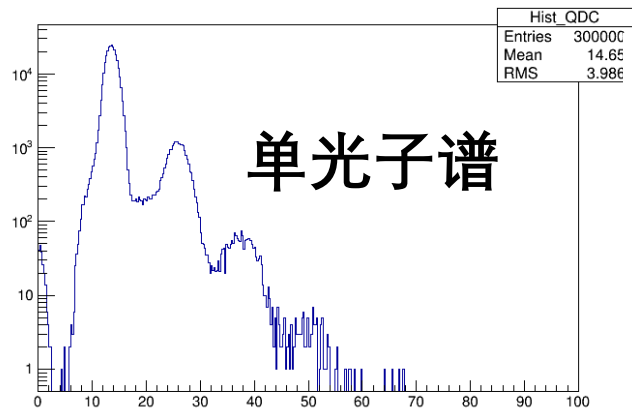
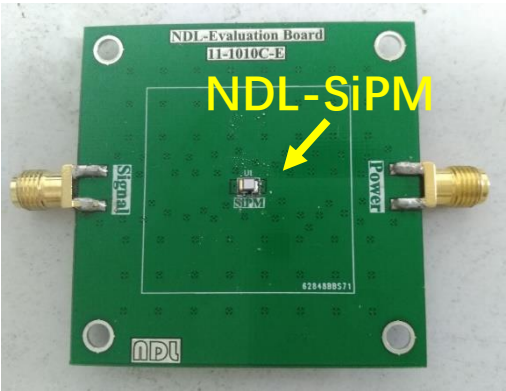




NDL-SiPM测试结果(BC408闪烁体30mmx30mmx3mm)

SiPM1	SiPM2	SiPM3	SiPM4	SiPM5	SiPM6
25.43p.e.	25.77p.e.	25.12p.e.	24.06p.e.	23.44p.e.	24.61p.e.

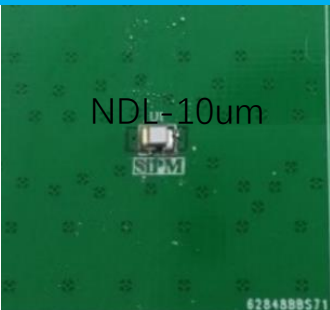
光产额偏差小于2p.e. (所有的SiPM偏压为35V，并且刻度后的结果)



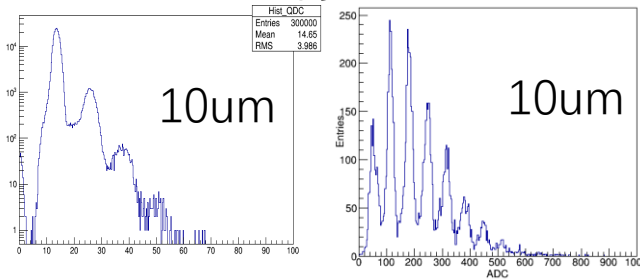
NDL-SiPM 11-1010C 参数

Parameter	Value	Parameter	Value
Effective Active Area	1×1mm ²	Peak PDE@420nm*	39%
Effective Pitch	10 μm	Dark Count Rate*	~500 kHz
Micro-cell Number	~10000	1 p.e. Pulse Width	5 ns
Operating Temperature	-196°C - +40°C	Temperature Coefficient For V _b	25 mV/°C
Breakdown Voltage (V _b)	25.5±0.2 V	Gain	≥2×10 ⁵
Max. Overvoltage (ΔV _{max})	8 V	Single Photon Time Resolution	≤70 ps

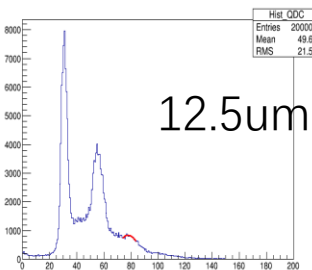
北师大SiPM测试



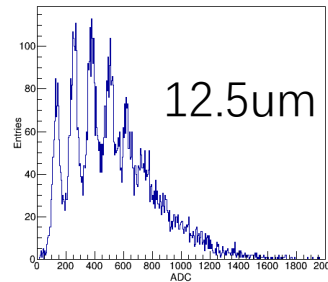
NDL前放



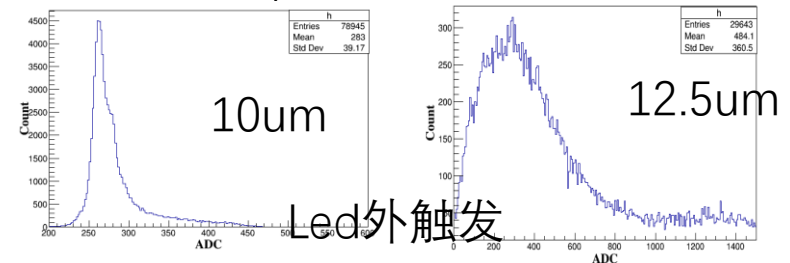
自触发



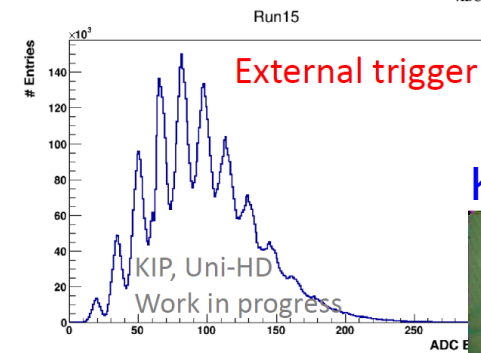
Led外触发



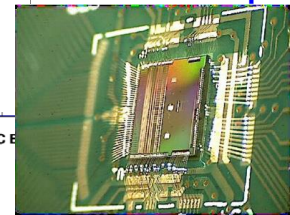
Spiroc2b刻度



Led外触发



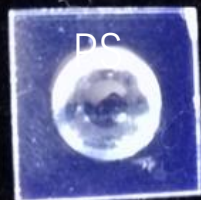
KLauS Chip



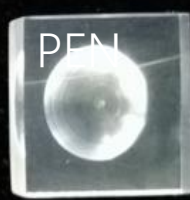
Pitch	10um	12.5um	15um (evaluation)
Peak PDE @420nm	31%	32%	35%
Gain	2×10^5	3×10^5	5×10^5
Breakdown Voltage(V)	27.5	21.5	
Crosstalk (over Voltage 4.5V)	2.5%	13%	

- 用SPIROC2b测试北师大SiPM单光子和多光子谱都不能分辨。
- 15umNDL-SiPM即将研究具有更高的增益和PDE。

PEN注塑闪烁体



10mmX10mmX3mm



特点

- ❑ 不透明
- ❑ 不发射蓝光

材料	PS	PS	PEN	PEN
Size(mm)	10.09X10.07X3.00	10.13X10.08X3.00	9.96X9.98X3.14	10.00X9.99X3.05
Light Yeild(p.e.)	77.85	83.44	14.46	12.85
Size(mm)	30.04x30.01x3.00	30.04x30.04x3.01		
Light Yeild(p.e.)	22.95	22.27		

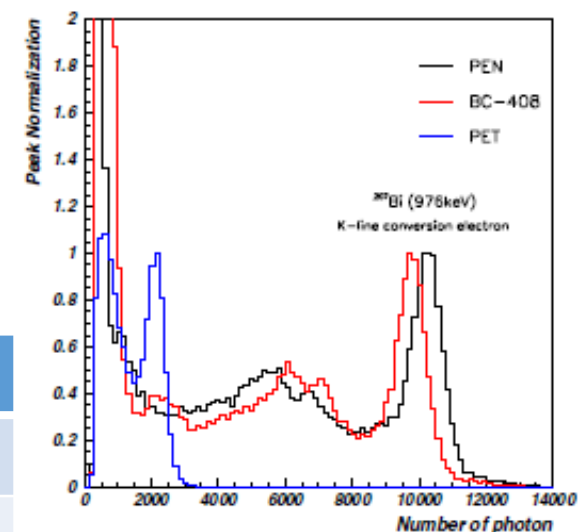
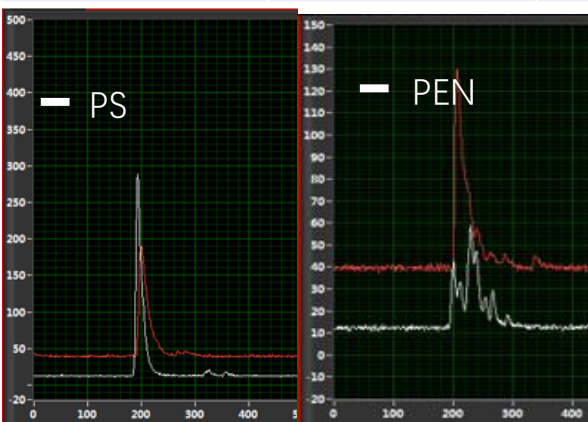


Fig. 2: Light output spectra of polyethylene naphthalate (PEN; black line), commercial organic scintillator (BC-408 (ref. [14]); red line) and a plastic bottle (PET; blue line).



波形特点

- ❑ 多峰
- ❑ 信号更宽

目前光产额：

- ❑ 只有PS的1/7
- ❑ 大约 4~5 p.e. 对于 30mmx30mmX3mm PEN 注塑闪烁体



会议报告：

1. “The status of CEPC HCAL”, ICHEP2018会议报告, 2018-07;
2. “ The R&D progress of CEPC HCAL”,香港会议报告, 2019-01;
3. “The R&D progress of CEPC AHCAL”, CALICE合作组报告, 2019-04;

发表文章：

1. Wu, Z., Xia, D., Wang, Z. et al. Radiat Detect Technol Methods (2018) 2: 22;
2. 吴哲等, 基于国产SiPM的量能器探测单元研究 [J]. 核电子学与探测技术, 2018, 1 (已接收)
3. Boxiang Yu, The R&D progress of CEPC HCAL, ICHEP2018 proceedings 430 ;

小结和展望



- 基于塑料闪烁体的CEPC强子量能器(AHCAL)进行了大量的探测单元测试, 30mmx30mmx3mm的探测单元满足AHCAL光产额和均匀性要求
- 国产注塑闪烁体进行了前后八批优化测试, 第八批注塑PS闪烁体平均光产额大于23p.e.偏差小于 $\pm 10\%$ 。满足AHCAL探测单元要求。
- 北师大SiPM相同尺寸增益好于MPPC, 并且价格低于MPPC好几倍。目前根据我们要求正在研制更高增益的SiPM来适用于更广泛的研究中。
- AHCAL小模型项目已经启动, 新的注塑材料PEN以及探测单元自动化包装正在进行中。
- 经费主要用于闪烁体模具及配方研究, 以及SiPM流片。

The background of the top banner features a blue-toned image of a particle detector, showing complex curved structures and glowing points of light, suggesting a high-tech scientific environment.

核探测与核电子学国家重点实验室

State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics

感谢国家重点实验室