固氩闪烁探测器与移波光纤研究进展

四川大学 CDEX 课题组 张磊

2023.5.8

目录

1、研究背景

2、固氩原型探测器设计及结果

3、固氩探测器进展

4、固氩探测器近期与后续实验

5、移波光纤研究进展

1 研究背景

1.1 液氩（LAr）暗物质探测器的独特优势

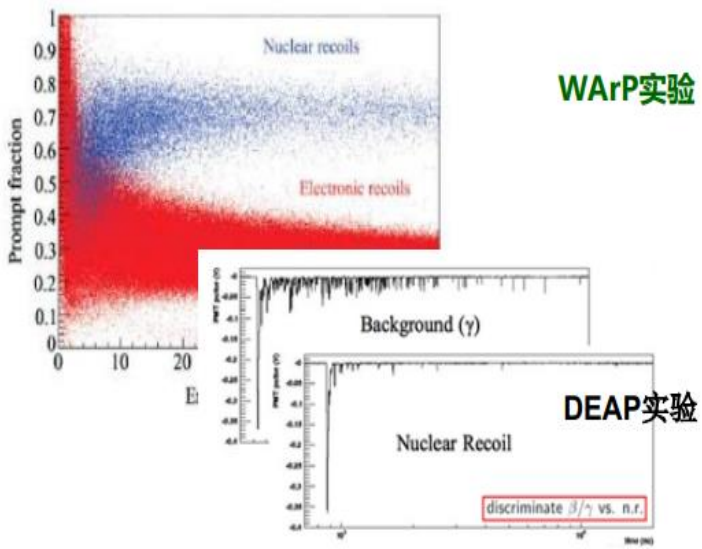
1、暗物质探测的关键是减小本底，其中探测器内部的 γ 本底及中微子散射的本底很难去除。

液氩液氙的发光衰减时间

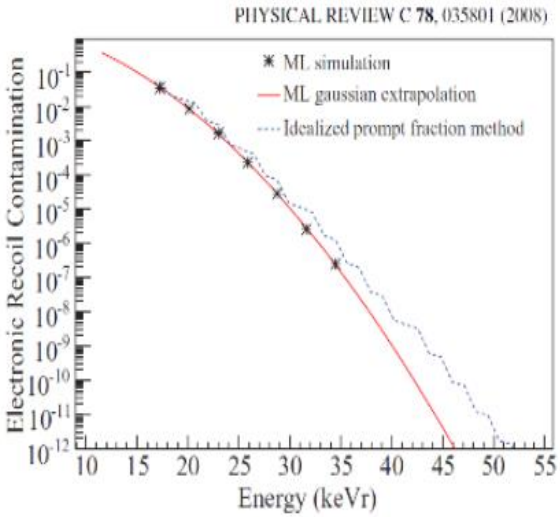
Property (unit)	Xe	Ar	Ne
Triplet lifetime (ns)	27	1600	15000
Singlet lifetime (ns)	3	7	<18

2、液氩具备特殊的发光衰减时间性质，可以根据信号波形的不同进行粒子的鉴别（PSD），液氩 n-γ 分辨能力强烈依赖收集到的光电子数，液氩探测器对于光电探测器的光探测效率要求高。

3、PSD能力可以用来极大地（＞10^8）压低液氩探测器的类电子本底，这个能力是液氩探测器独有的。



ER和NR的快慢发光成分不同



液氩n-γ分辨能力强烈依赖收集到的光电子数

1.1 液氙探测器可实现超强本底压制

外部本底

“零本底”（本底<0.1个@总曝光量）

1、环境天然放射性

2、宇宙线造成的本底，影响最大的是次生中子。

对策：到地下做实验，建立纯净水屏蔽VETO，增加中子VETO，基本可以将这些本底减到<0.1。

液氙是非常好的闪烁体（128nm@VUV，~40000光子/MeV

液氙具备好的电子漂移性能：收集电离电子

内部本底

1、探测器靶材料的天然放射性，^{39}Ar，^{85}Kr等。

2、太阳中微子电子散射本底（XENON实验：太阳中微子-电子散射本底的存在无法消除，估算约为0.3个事例/吨年）

3、氡气污染带来的长寿命^{210}Pb等放射性。

4、液氙的PSD能力足够将类电子事例降低到<0.1。

氙极为便宜：
~40元/公斤（大气氙）
~200元/公斤（贫氙）
~20000元/公斤（氙气）

PSD能力随探测器收集到的光子数指数增加，

需要使用贫氙（低放射性氙材料）。

1.1 CDEX实验中固氩（SAr）作为反符合探测器较液氩（LAr）的优点

HPGe+SAr反符合探测器示意图

1、SAr 做反符合，将 HPGe 包裹在 SAr 内，防止**容器和管道材料中的氡（^{222}Rn, ^{220}Rn）及其子体**及**氩中的宇生放射性核素（^{39}Ar，^{42}Ar）**漂移吸附在 HPGe 表面。

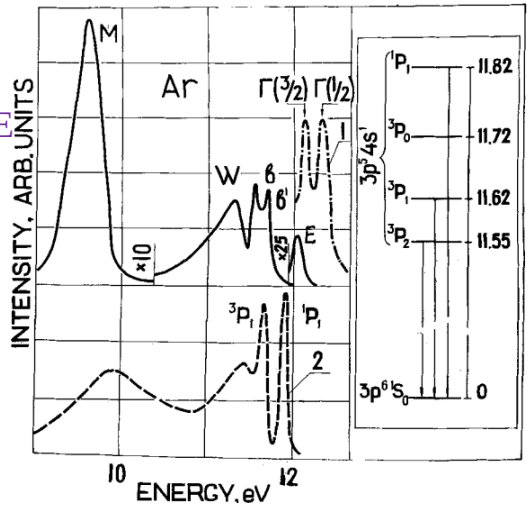
2、LAr 与LN_2接触，需要额外的制冷、温控、循环系统以保持氩液态和纯度，使工程和系统运行复杂。SAr 做反符合，外层为大体积 LN_2 屏蔽层，直接利用 LN_2 固化 SAr，**无氩气循环系统维持固氩，减少 LAr 探测器所需的结构材料，减少了氩气的流通路径，减少了进入 Ar 中的本底**。

3、$\rho_{SAr} > \rho_{LAr}$，SAr 较 LAr 线性电子阻止本领大。

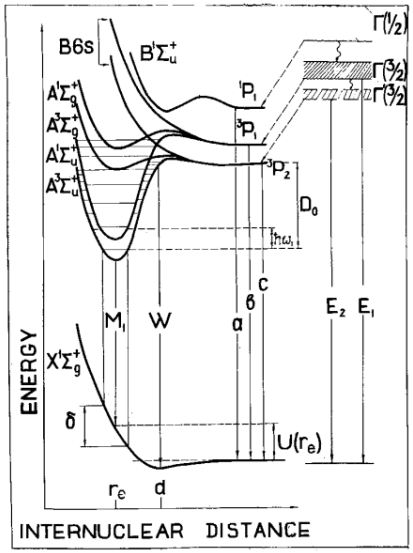
1.2 SAr发光原理

稀有气体固体（RGS）中同时存在有好几种发光中心，其中包括自由激子发光（FE），原子型的自陷激子发光（a-STE），非弛豫的分子型自陷激子发光和弛豫的分子型自陷激子发光（m-STE）。SAr中这四个发光中心都已观察到。

E为FE峰，B^0，B^1为a-STE峰。W峰对应气体发光的第一连续带。M峰对应气体发光的第二连续区，相应于气体中的分子发光，为驰豫的m-STE发光。



实线为SAr晶体的发射光谱（T=5K），1为SAr吸收光谱，2为GAr发射光谱，右图为Ar最低原子能级。



R_2^*表示准分子激发态，左图右边为晶体中的激子带，中间为原子型自陷激子态，左边为分子型自陷激子态。图中的E_1，E_2，a，b，c，W，M_1为相应的发光带标号。

RGS中的R_2^*相对于原子核间距的势能曲线及发射过程的定性图。

SAr发光带及强度

	energy				relative intensity			
	a	b	c	d	a	b	c	d
Ne		16.5	13 - 16			1.0	1.0	
Ar	12.1	11.64 , 11.58	11.37	9.8	$1\cdot10^{-4}$	$3\cdot10^{-2}$	$5\cdot10^{-2}$	1.0

Nikolaus Schwentner, Ernst-Eckhard Koch, Joshua Jortner - Electronic Excitations in Condensed Rare Gases-Springer Berlin Heidelberg (1985)

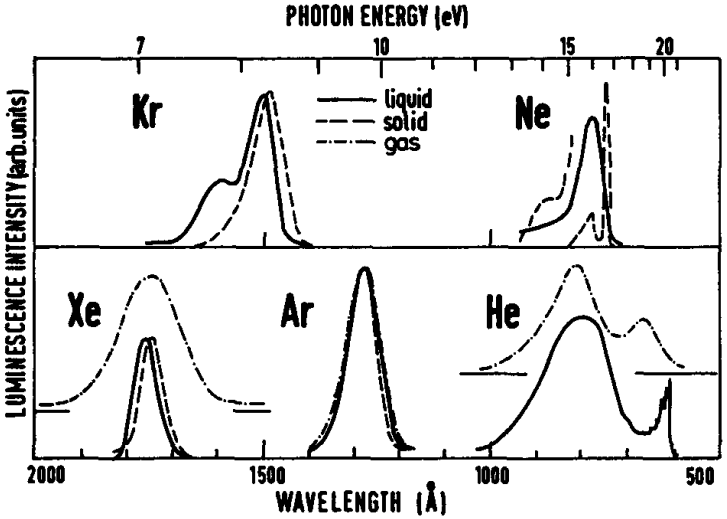
RGS发光光谱中分子型自陷激子发光峰值位置及相应的分子跃迁

元素	带标号	峰值波长 Å	相应的能量 (eV)	温度区 T°K	相应的气体分子跃迁波长 Å	跃迁
Ar	W	1090	11.37	2—40	1100—1080	$A^1\Sigma_u^+—X^1\Sigma^+$
	M_1	1280	9.63	2—40	1300—1270	$A^3\Sigma_u^+—X^1\Sigma_g^+$
	M_2^+	1630	7.6	2—25		
	M_2	2000	6.2	2—25		

1.3 LAr发光带

All the emission bands of Xe, Kr, Ar and Ne in the *liquid phase* are attributed to the decay of *excimer-like molecular centres* R_2^* from *the lowest excited bonding molecular states* $^1\Sigma_u^+$ *and* $^3\Sigma_u^+$ *to the ground state* $^1\Sigma_g^+$.

Xe and *Ar* the *emission bands* in the *three phases* are almost *identical*. *Liquid Ar*, Kr and Xe exhibit *only the d-type molecular emission band*.



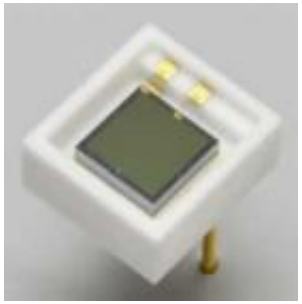
稀有气体不同状态发射带汇编

Nikolaus Schwentner, Ernst-Eckhard Koch, Joshua Jortner - Electronic Excitations in Condensed Rare Gases-Springer Berlin Heidelberg (1985)

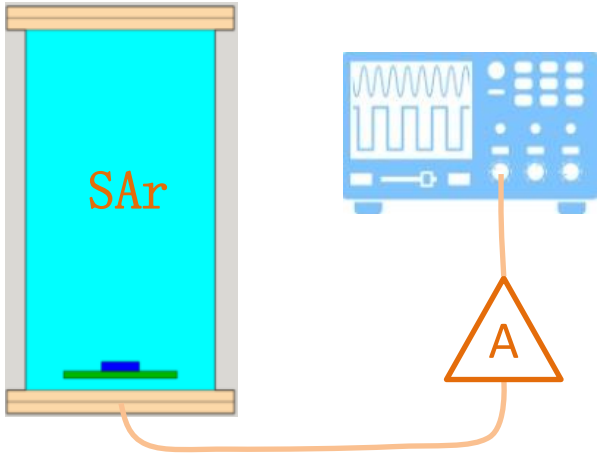
SAr实验可以参考LAr。

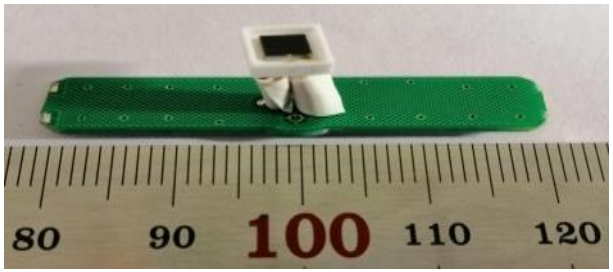
2 SAr原型探测器的设计及结果

2.1-原型探测器的设计



MPPC——
S13370-3050CN



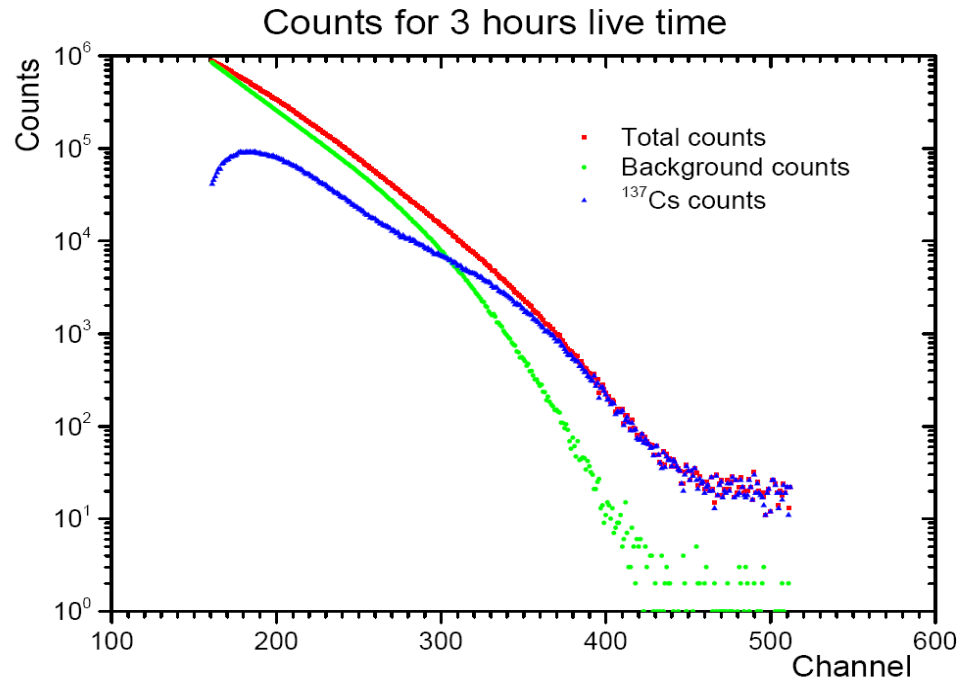


SAr灵敏体积 Ø=46 mm×h=234 mm

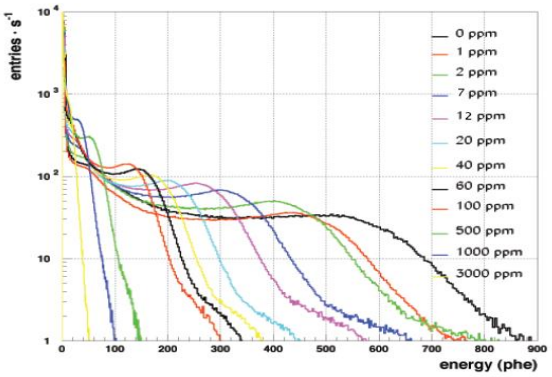
2.2-原型探测器性能&文献结果

5N SAr (Ø=46 mm×h=234 mm)

国标5N氩固体测得的^{137}Cs脉冲幅度谱

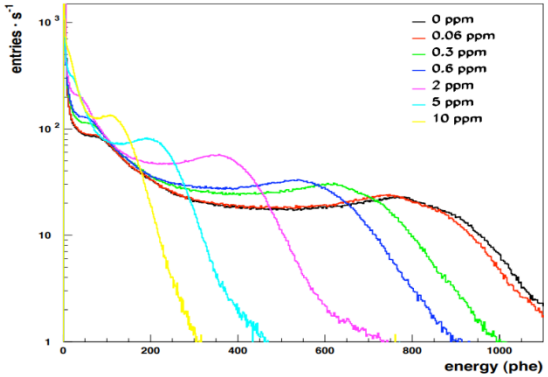


LAr (Ø=85 mm×h=120 mm)



不同[N_2]杂质浓度时^{60}Co的脉冲幅度谱（实心黑线对应于未受污染的情形）

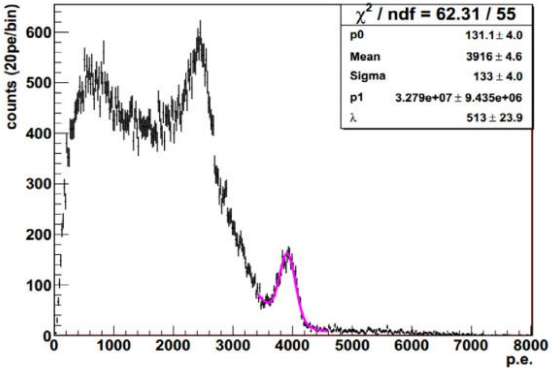
doi:10.1088/1748-0221/5/06/P06003



不同[O_2]杂质浓度时^{60}Co的脉冲幅度谱（实心黑线对应于未受污染的情形）

doi:10.1088/1748-0221/5/05/P05003

LAr (Ø=80 mm×h=105 mm)



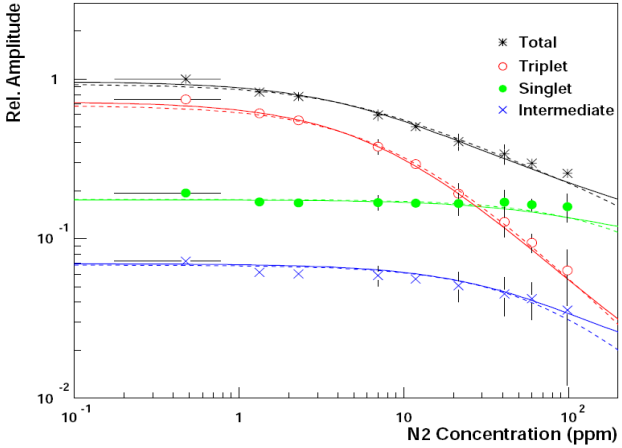
^{22}Na的能谱，紫色线是511keV的全能峰的拟合结果（氩经过纯化）。

doi:10.1016/j.nima.2020.164488

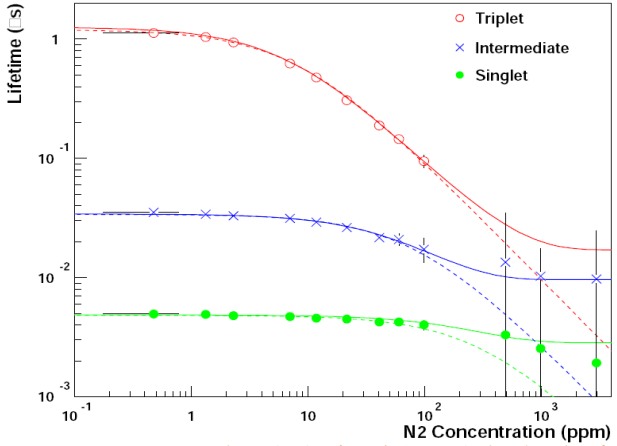
2.3-大体积透明SAr制备

成功制备较大体积（约Ø=200 mm×h=170 mm）的整体透明SAr

2.4-氩纯度对探测器性能的影响



不同[N2]杂质浓度时闪烁光各成分的有效幅度，总幅度为相应淬灭因子值。

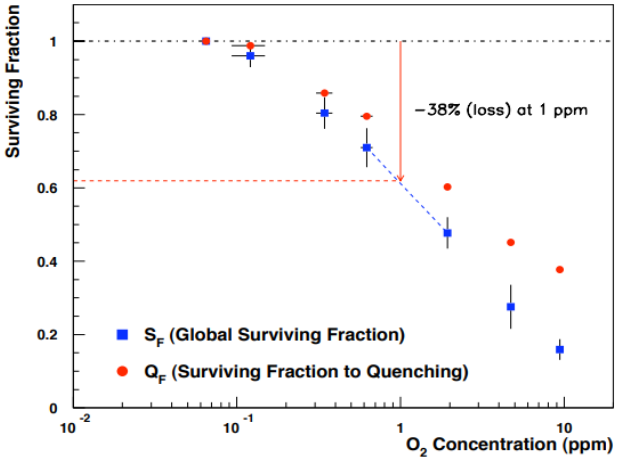


不同[N2]杂质浓度时闪烁光各成分的有效衰减时间。

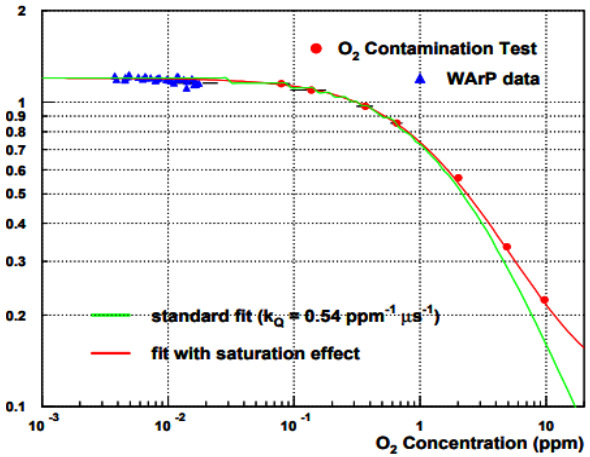
doi:10.1088/1748-0221/5/06/P06003

原型探测器缺陷：

1. 氩气纯度太低，
2. 收光面积太小。



光产额存余分数S_F和淬灭因子Q_F与$[O_2]$浓度的关系， $S_F = Q_F \cdot T_A$。



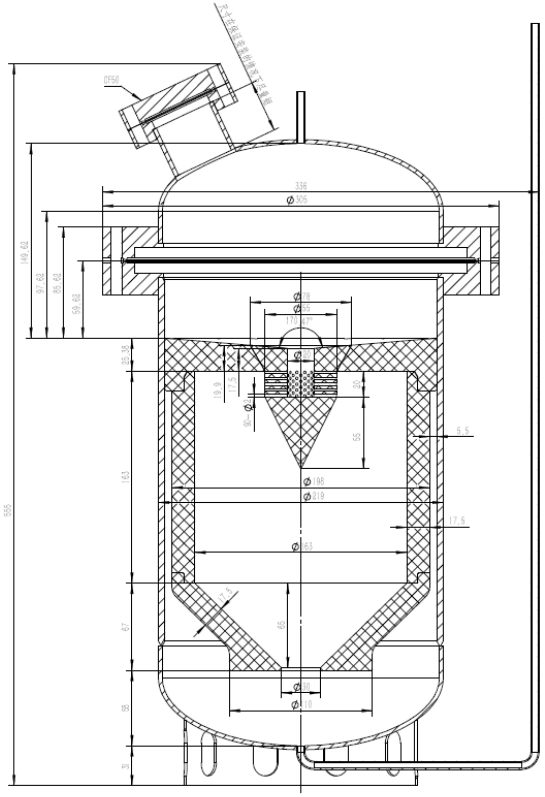
长寿命闪烁光衰减常数τ_T与$[O_2]$浓度的关系

doi:10.1088/1748-0221/5/05/P05003

3. 固氩探测器研究进展

3.1-固氩探测器外形尺寸设计

固氩探测器设计图

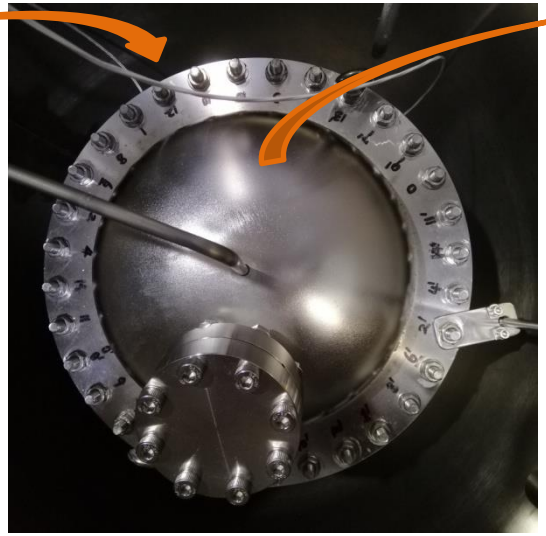


特点：

1、上下封头结构，近似纺锤形。
2、有出气口。
3、聚四氟乙烯筒内外均可流气。

目的：

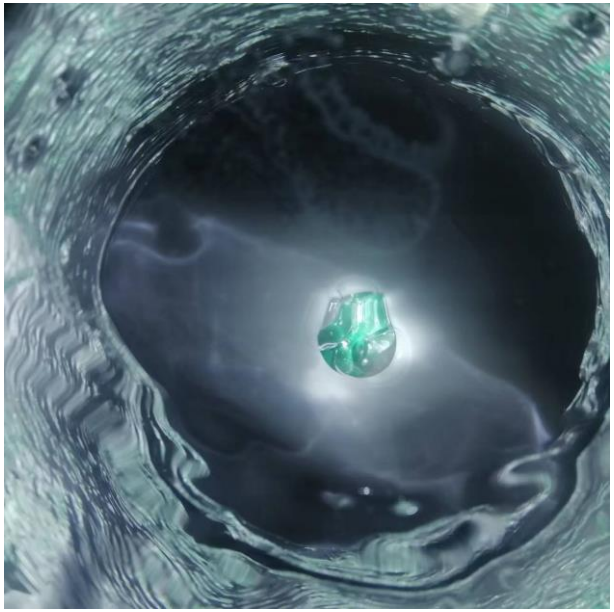
吹洗容器，利于提高氩纯度。



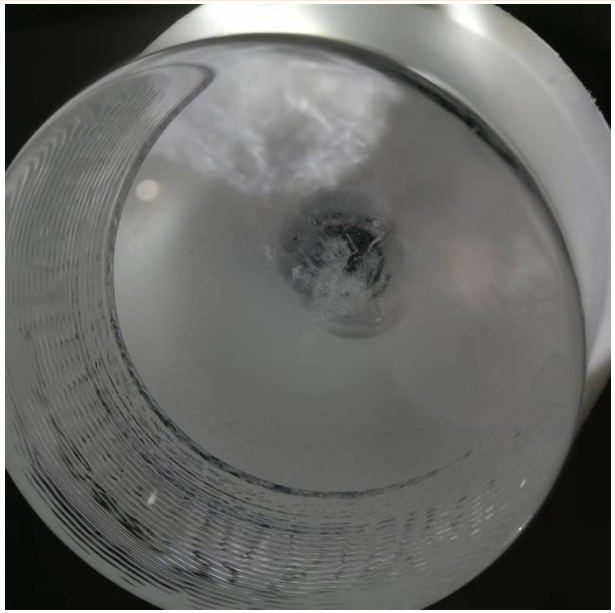
3.2-固氩制备

贯通结构且有 PTFE 反光层，与密闭结构且无 PTFE 反光层时，制备难度不同。PTFE传热性能与固氩有较大差异。

带有聚四氟乙烯反光层时制备成功效果：



带有聚四氟乙烯反光层时，容易出现的问题：晶体中心有气泡。



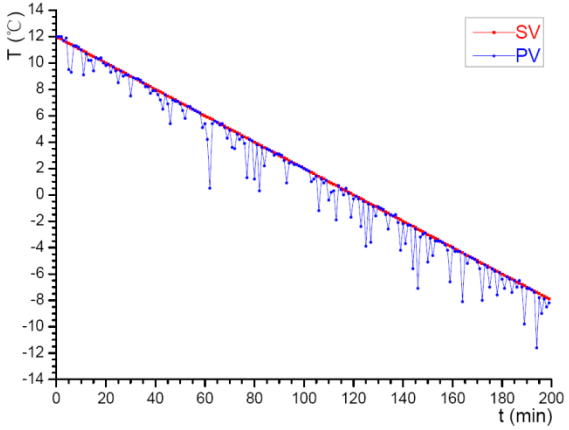
原因：降温速率没能控制好。

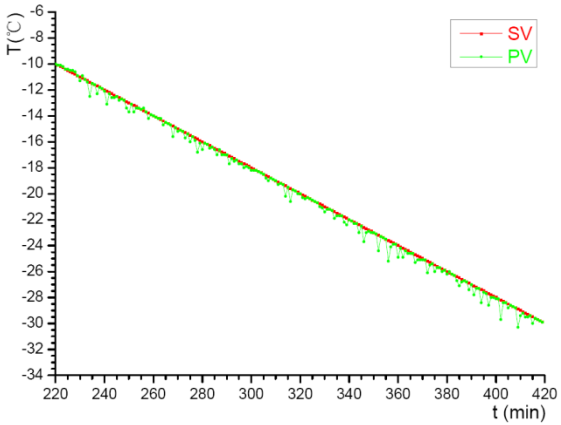
3.3-液氮喷淋系统升级

杜瓦罐自身压力喷淋 ⟹ 液氮自重力喷淋

优点：温度控制更容易，降温更平稳。

温控均匀性对比



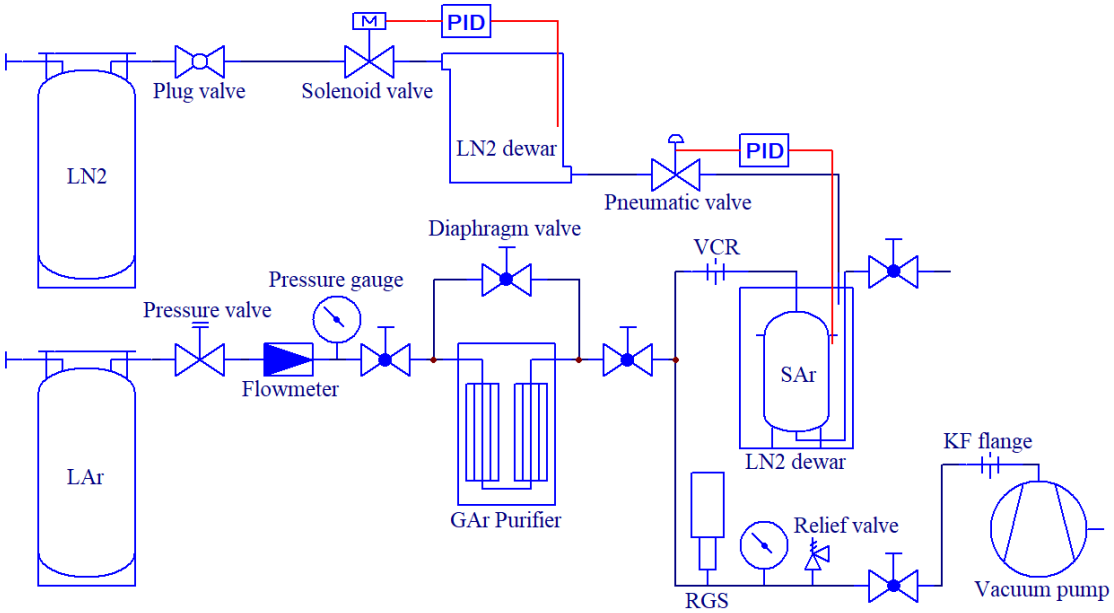


液氮喷淋系统

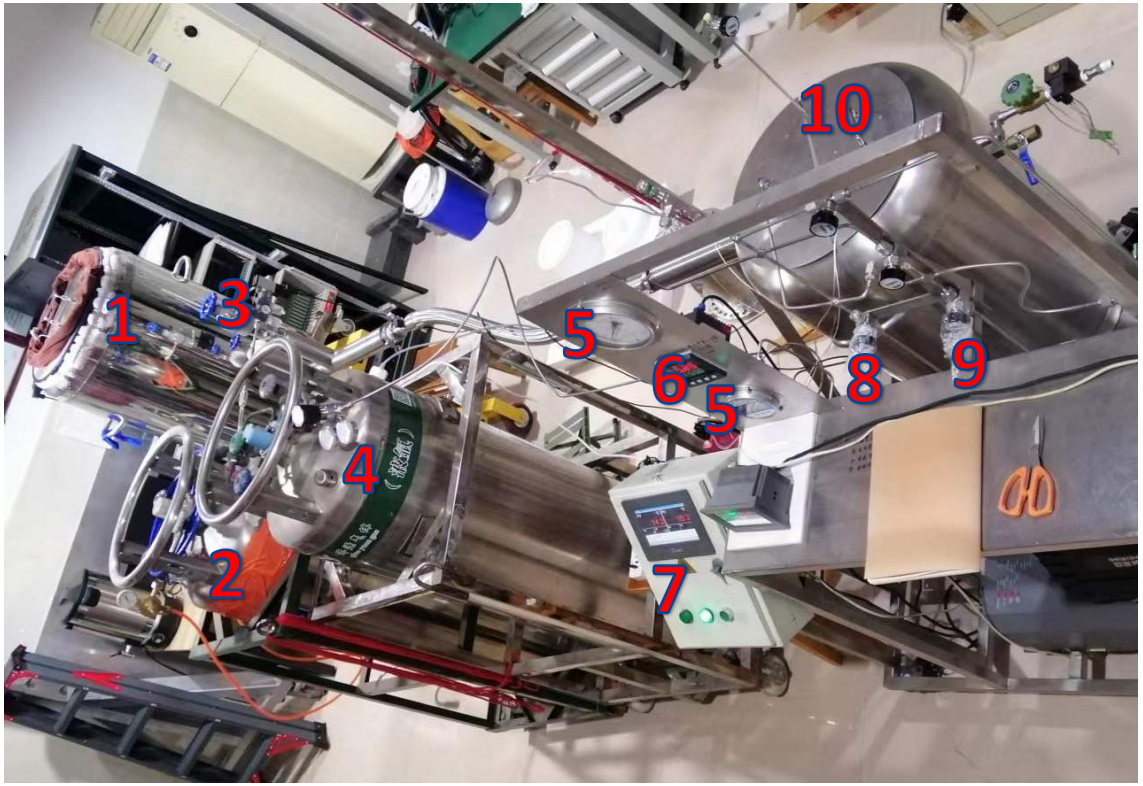
1：液氮重力罐
2：液氮压力罐
3：气动控制阀
4：手动控制阀
5：重力罐液氮液位控制柜
6：液氮流通真空隔热管道

3.4-整体实验系统

实验系统示意图



实验系统实物图



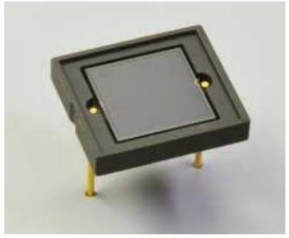
1：液氮杜瓦罐
2：气动阀供气源
3：气动阀
4：氩气供气源
5：压力表
6：流量计显示屏
7：PID温控仪
8：氩气纯化器出口
9：氩气纯化器进口
10：液氮杜瓦（内装固氩罐）

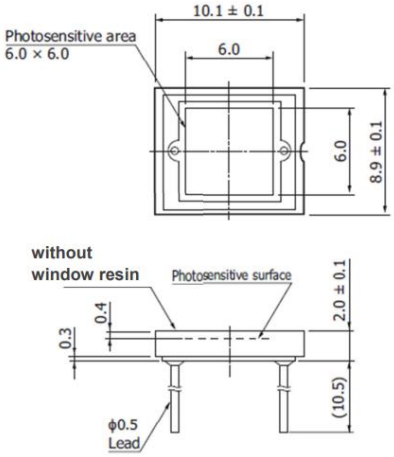
3.5-电子学器件设计

光电探测器

4片Hamamatsu S13370-6050CN MPPC并联，同一电源供电。

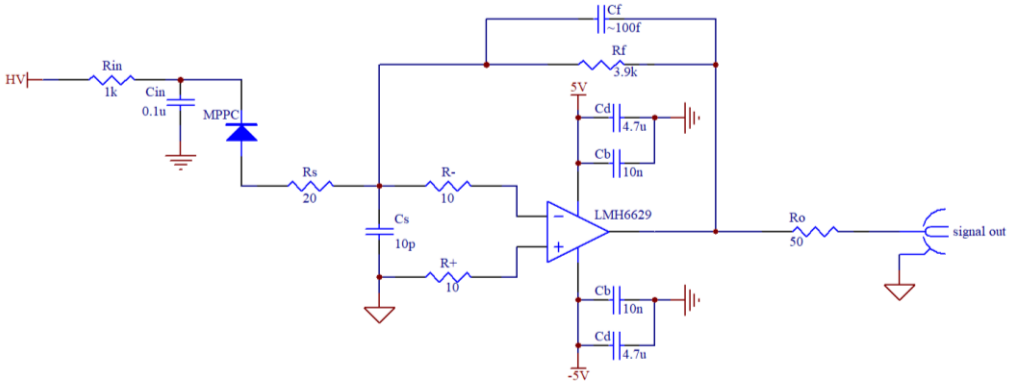
优点：电路简单，少用真空法兰电极。
缺点：无法使每一个 MPPC 达到最佳工作性能，器件间死区较大。

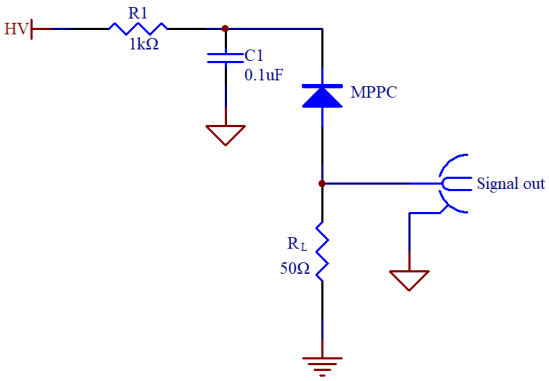




前置放大器

TEXAS INSTRUMENTS
LMH6629
SNOSB18I – APRIL 2010 – REVISED DECEMBER 2014
LMH6629 Ultra-Low Noise, High-Speed Operational Amplifier with Shutdown





M. D'Incecco *et al* IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 65, no. 4, pp. 1005-1011, April 2018
L. Wang *et al* 2021 *JINST* 16 P07021

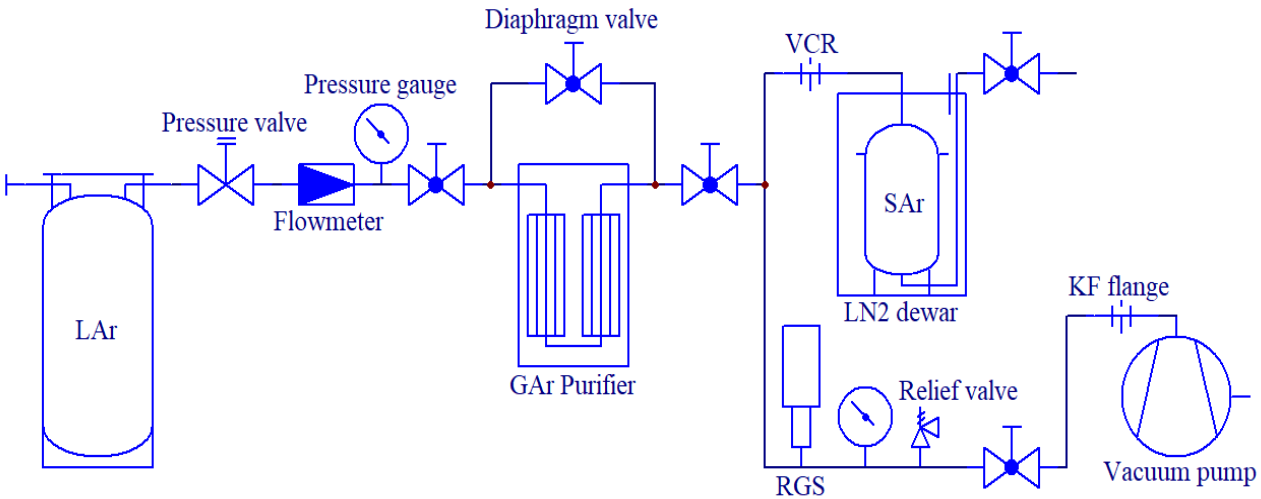
3.6-氩气纯化系统设计与安装

纯化指标

气体类型*	可纯化气体*	去除杂质	纯化指标
稀有气体 – R	Ar, He, Xe, Ne, Kr	H2O, O2, CO, CO2, H2, CH4, NMHC, N2	<1ppb
氢气 – H	H2	H2O, O2, CO, CO2, CH4, NMHC, N2	
氮气 – N	N2	H2O, O2, CO, CO2, H2, CH4, NMHC	

*表格中仅列出典型的气体类型和常见的可纯化气体，更多气体纯化应用请与先普联系。

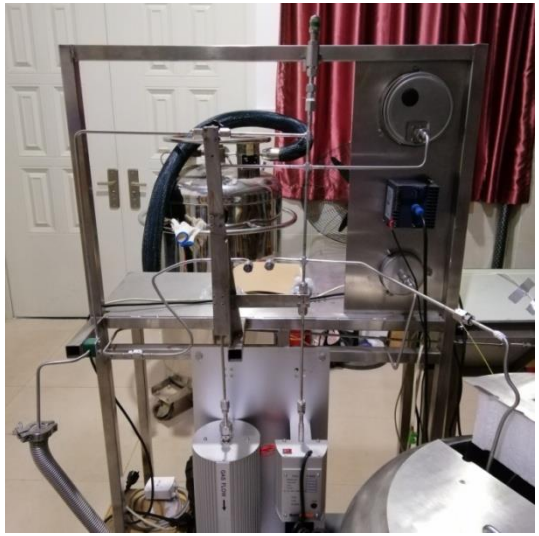
氩气纯化管路示意图



纯化管路安装注意事项：

- 管路为 EP 级316L管，VCR 接头；
- 少用阀门、接头；
- 采用氩气保护、自动焊接方式；
- 阀门采用 EP 级隔膜阀。

氩气纯化管路正面



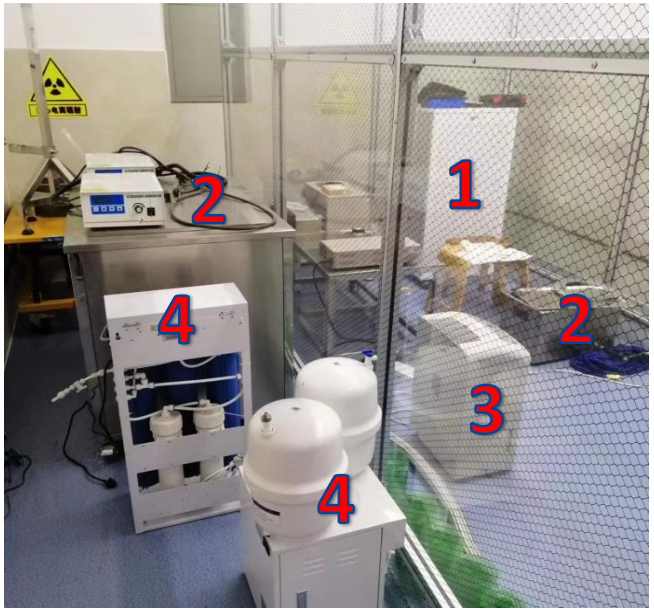
氩气纯化管路背面

3.7-辅助设备与仪器配置

1、超声清洗机
2、百级无尘棚
3、空气净化器
4、除湿机
5、去离子水供应系统-超纯水机
6、残余气体分析仪（RGA）
7、Alconox 清洗剂
8、干泵+分子泵

百级无尘棚

1：空气净化器
2：超声清洗机
3：除湿机
4：超纯水机（18 MΩ·cm）



4. 固氩探测器的近期与后续实验

4. 1–近期实验

1：MPPC的响应函数

1.1、利用飞秒（**301fs**）激光测量 **MPPC** 器件的响应函数

1.2、再利用响应函数反解闪烁体的发光衰减时间

2：组装探测器，获取固氩闪烁信号，测量能谱，分析时间。

探测器灵敏介质分别为：

2.1、未纯化液氩

2.2、未纯化固氩

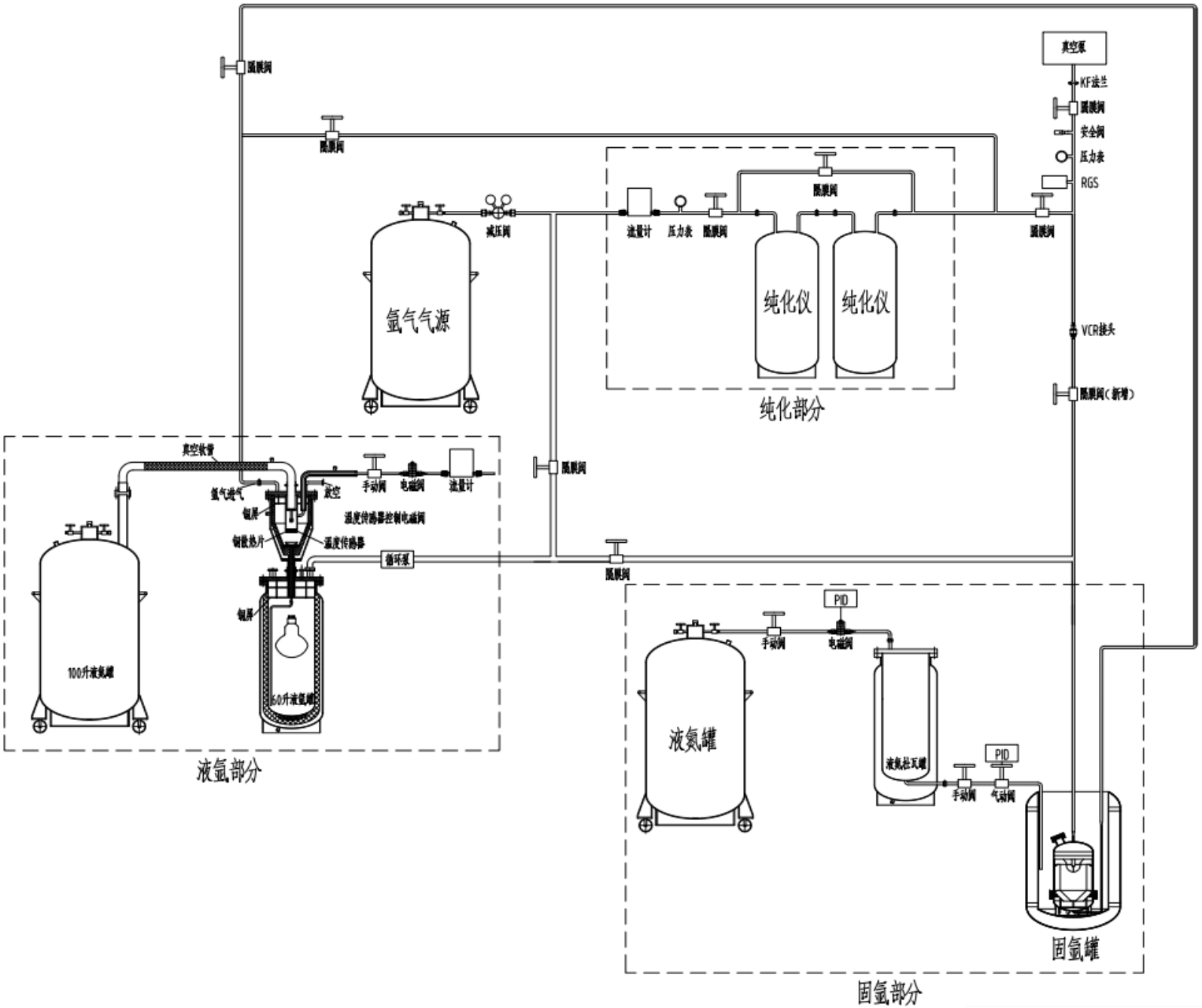
2.3、纯化后液氩

2.4、纯化后固氩

4.2-后续实验：SAr荧光性质测量

1、荧光衰减常数 τ
2、光衰减系数 λ
3、不同 LET 值的粒子分辨
4、荧光产额
5、Ar 纯度对固氩发光的影响
6、Xe-Ar 固体混合物的发光性能

4.3-实验平台建设：氩气循环纯化系统



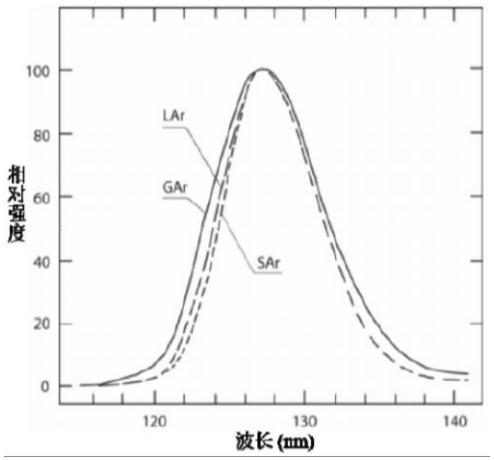
固氩工作小结

1. 制备成较大体积固氩，
2. 搭建完固氩试验系统，
3. 电子学器件测试基本完成。

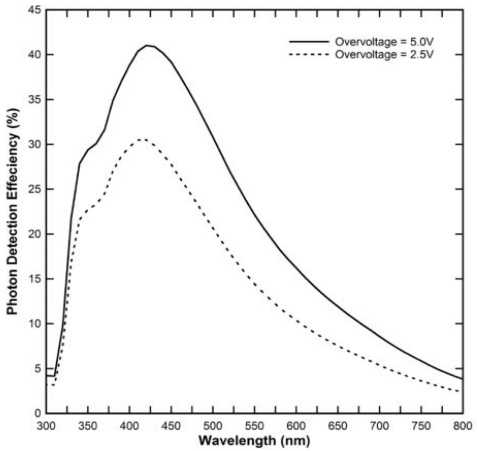
5 移波光纤研究进展

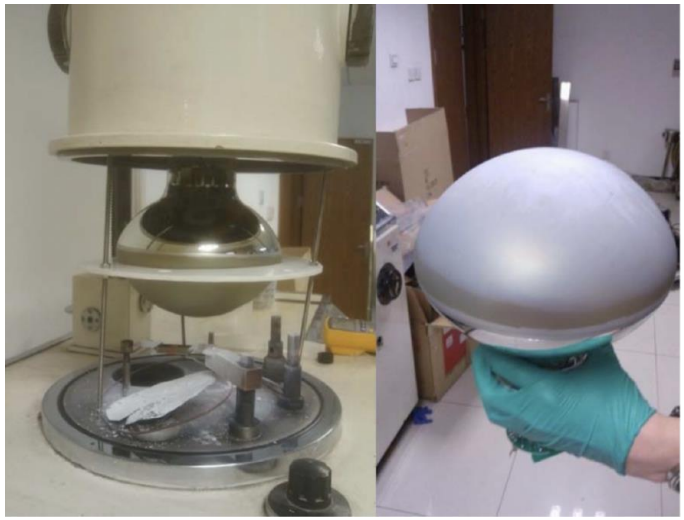
5.1 移波剂作用

128nm



425nm





PMT镀膜

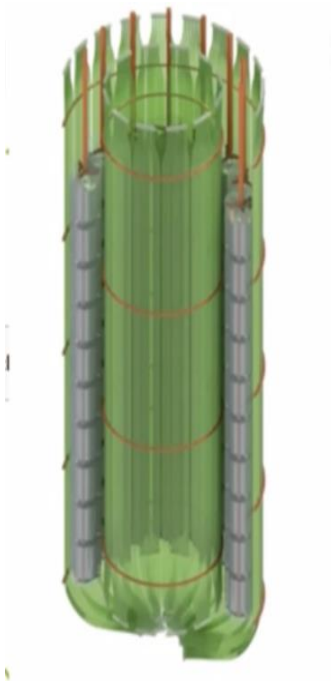
国际上液氩实验的TPB镀膜厚度

实验组	TPB镀膜厚度（mg/cm²)
ArDM	0.2~1.0
Darkside	0.22~0.26
DEAP	0.2~0.3

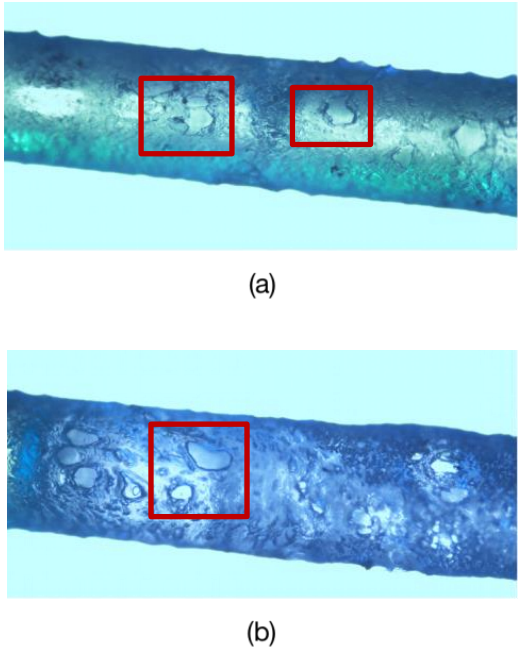
为保证光收集效率，蒸镀的TPB厚度有限，移波效率会受到限制。

5.2 光纤镀膜

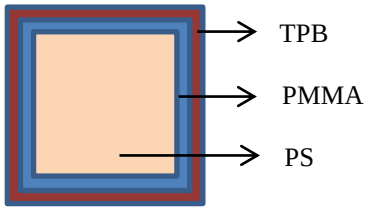
GERDA的光收集模块，光纤组件。



LEGEND-200
的探测器模型



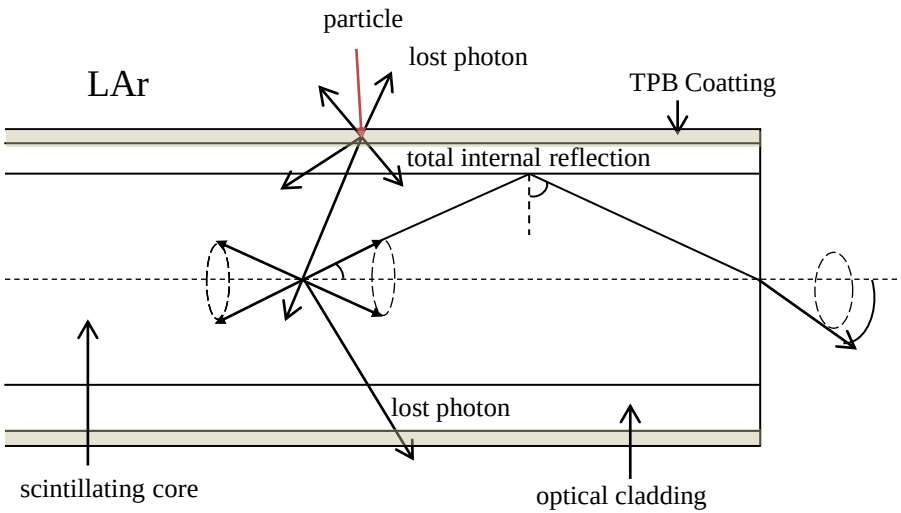
光纤（BCF-91A）表面
覆盖TPB膜（甲苯）
（a）涂抹（b）浸没



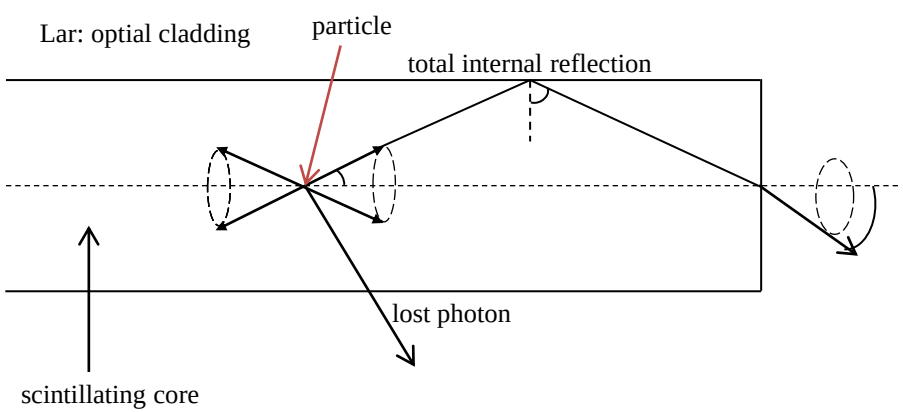
材料	折射率
LAr	1.31
TPB	1.635
PMMA	1.49
PS	1.6

光纤加 SiPM 读取氩的发光信号

5.3 新型移波光纤设计



将移波剂（TPB—四苯基丁二烯）与塑料基质（PS-聚苯乙烯）融合，制备出透明度高的移波光纤基材。



目的：提高光纤的光转换效率。

5.4 材料制备

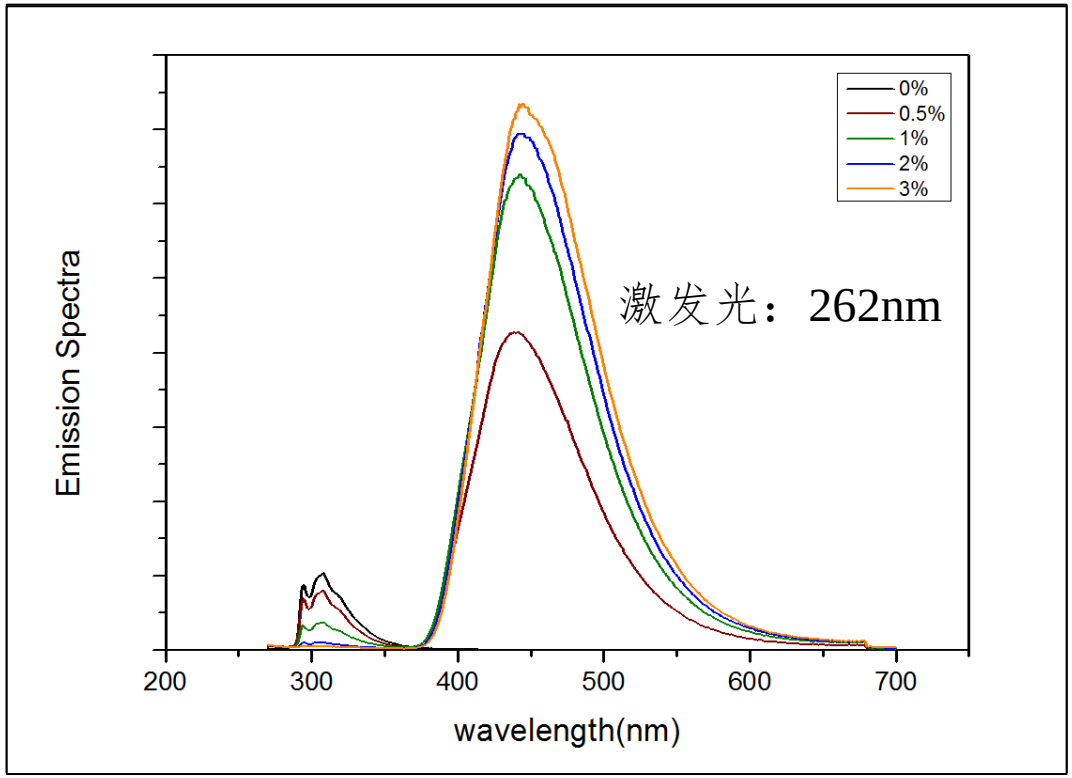
左图是不同材料在紫外光下的发光效果，从左至右依次是纯PS，在玻璃管内的PS+TPB，PS+TPB。右图是左图中玻璃管内的PS+TPB的端面图。

AIBN（偶氮二异丁腈）

TMCH（1,1-双叔丁基过氧化-3,3,5-三甲基环己烷）

PS与TPB相融合的材料对紫外光有移波效果。

5.5 TPB含量对发射光谱的影响

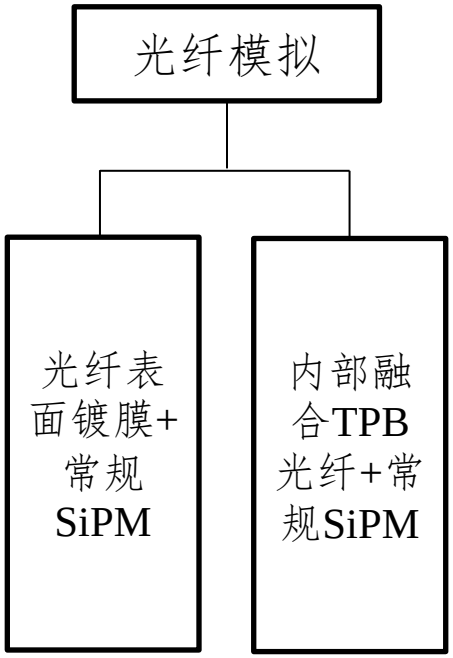


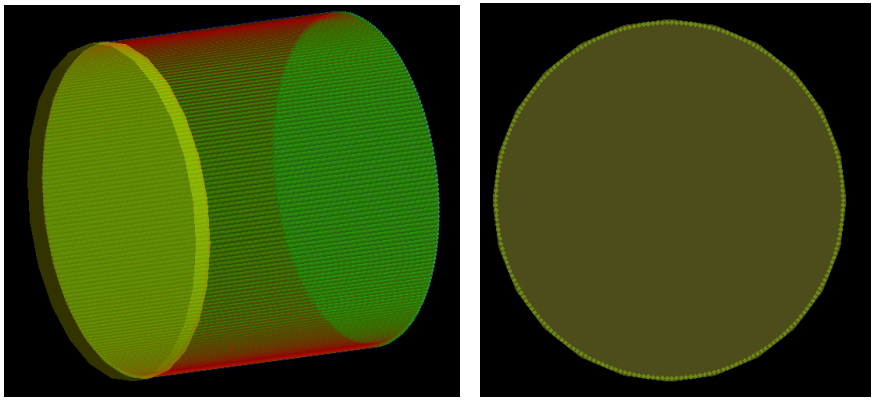
不同浓度TPB的样品的发射光谱，0.2%TMCH。

在塑料基质中添加TPB的含量增加，440nm附近的发射光强度会增加。

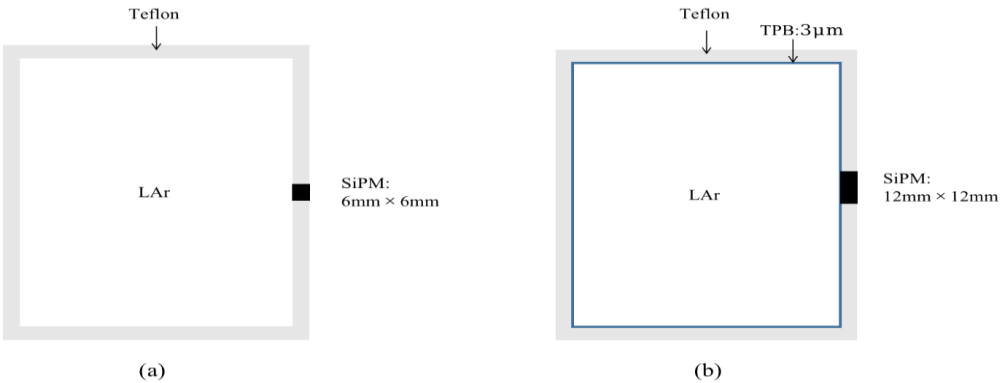
由于TPB在苯乙烯内的溶解度有限，目前TPB的含量最大做到3%。

5.6 模拟对比四种不同收光方式



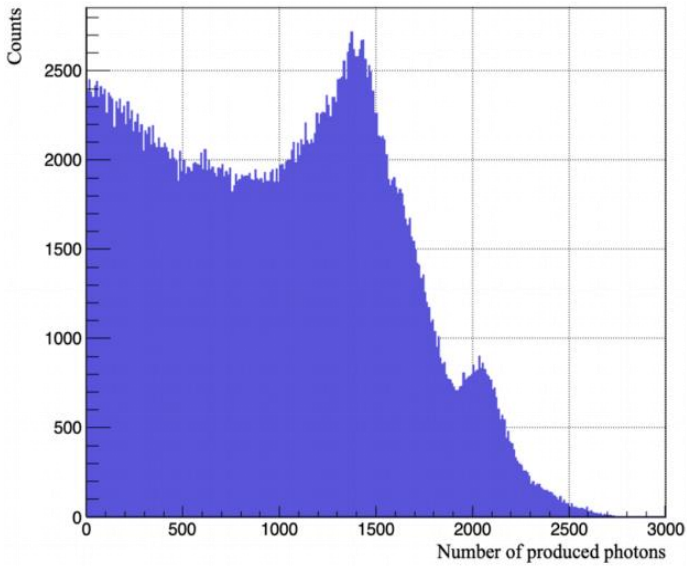


光纤排布方式



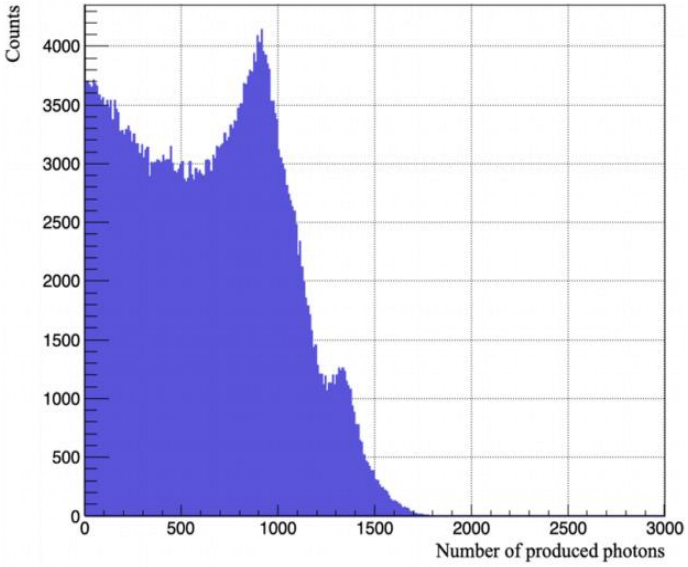
5.7 模拟光子数分布

TPB in Optical Fiber



(a)

Optical Fiber coated with TPB



(b)

与在光纤外镀 TPB 膜的结构相比，内部融合 TPB 的光纤光收集效率有明显的提高。

5.8 总结与后续计划

制备可行性

探索了方法，制备透明材料

光学测试

测量了新型光纤材料的吸收谱和发射谱，证明了其移波效果。

模拟结果

模拟了新型光纤，发现其可有效提高液氩探测器的光收集效率。

优化比例，提高效率

改进制备方法，期望制备出长度足够的无空腔的光纤基材。

完成光学参数测试

更细致模拟及测试以进一步研究新型光纤在液氩探测器的应用。

谢 谢 ！