Laser TPC研制现状及计划

高能物理研究所

Huirong QI, Haiyun Wang, Yulian Zhang, Jin Li

2016.01.27

主要内容

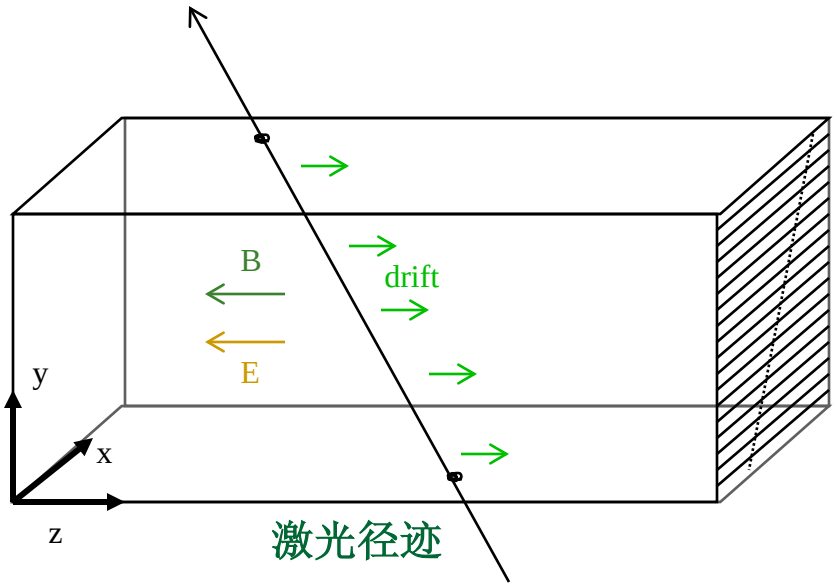
- Laser选型调研
- 光电效应影响评估
- 测试腔体设计
- 下一步工作计划

2016年度目标

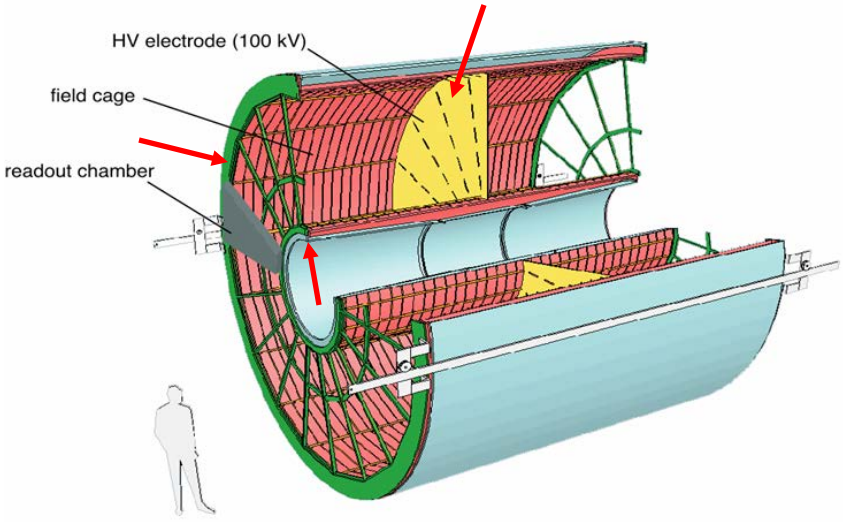
- 模拟工作气体性能、激光径迹重建方法、及评估激光光路的设计
- 研制和测试原型GEM腔体，根据测试信号给出电子学信号设计的主要基本参量
- 面向基本物理目标，评估激光光路设计的关键技术难点，给出可行的解决方案
- 年底给出带有激光光路的TPC腔体基本设计方案，并完成方案的改进与评估
- 购置高压、激光器、倍频器等设备

激光校正

- 激光校正的原理
  - 工作气体的杂质气体双Gamma激发过程（2γ）
    - 比如：2×4.66eV （2γ）
    - N2气径迹跟踪，电离能5~8eV
    - Ne,CO2气体，电离能~10eV
  - 金属层可以激光光电子
    - 光电效应机制
    - PCB 板上的铜层、镍层
- 激光校正的功能
  - 校准验证的时钟频率
  - 计算漂移速度
  - 校正外部触发偏移量



激光径迹



光电子激发原理（金属层）

激光校正原理与优势

- 与杂质有机气体反应

—气体探测器所用工作气体电离电位较高（高于激光光子能量Nd：YAG 4.68eV）：

Ar：15.7eV，CO_2：14.4eV，CH_4：13.1eV，C_2H_6:11.6eV

— 杂质有机气体分子的电离电位：C_7H_8: 8.82eV，$C_{10}H_{14}$: 8.69eV，使得激光可与杂质有机气体发生双光子电离作用。

- 双光子电离？

—气体分子同时吸收两个激光光子（ Nd：YAG 4.68eV×2 = 9.36eV ）而电离。

Additive [a]	Ionisation potential (eV)	Vapour pressure (Torr) 20°C (0°C)	Melting point/ boiling point (°C)	Ionisation (e^-/cm) for 1 μJ in 1 mm^2 and 10^{-3} Torr additive
Benzene C_6H_6	9.24	77	55/80	266: 5×10^3 [26,27]
Toluene C_7H_8	8.82	22	−95/110	266: 5×10^4 [26,27]
				0.5×10^4 [19]
Cumene C_9H_{12}	8.69	3.8	−96/152	266: 11×10^4 [26,27]
n-Butylbenzene $C_{10}H_{14}$	8.69	1	−88/183	266: 5×10^4 [26,27]
m-Xylene C_8H_{10}	8.56	6	−48/139	266: $\leqq 4\times10^4$ [26,27]
TMA $(CH_3)_3N$	8.5 [21]		−117/2.9	266: 60–130 [15,17]
	7.8 [26]			80 [24]
1,3,5 Mesithylene C_9H_{12}	8.40	1.5	−45/165	266: 1.8×10^4 [26,27]
Phenole C_6H_5OH	8.3		41/	266: > 250 [25]
	8.51 [17]			
Naphthalene $C_{10}H_8$	8.12 [17]		81/	266: 560 [25]
TEA $(CH_3CH_2)_3N$	7.5 [26]	50 (12)	−114.7/893	266: 200 [17]

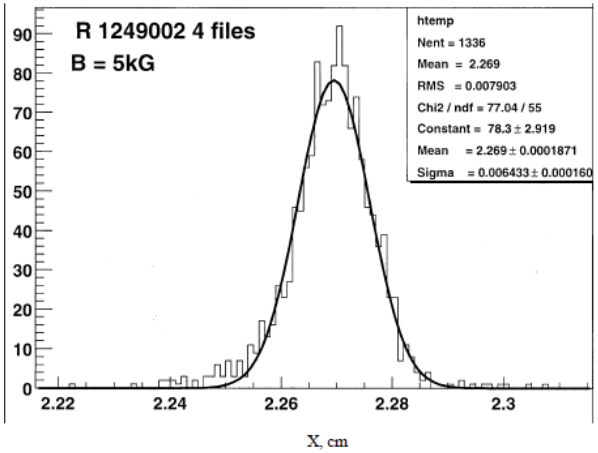
有机杂质气体分子特性表

激光性能需求

- 目标实现sigma=100μm的校正，要求的激光径迹的sigma必须<100μm
  - 波长的选择为266nm（~4.68eV）
  - 1~2uJ/mm²的激光能量密度相当于一个相对论粒子（1MIP）电离，~10uJ/mm²能量密度的激光径迹分散σ~64μm
  - 单光束的激光能量密度需要>20uJ/mm²
  - 激光光路传输受限于反射镜面上平面波衍射的影响，由菲涅尔公式，对于波长为266nm的激光，在漂移区<1000mm的范围内，菲涅尔数为

$$N=d^2/4\lambda z>1 \quad (z<1m)$$

    这时激光被限制在1mm以内
  - 激光的分离后光束直径~1mm@STAR-TPC /聚焦后
  - 激光的光学引起的电子分散对于直径1mm，约为0.17mrad



STAR TPC激光系统(~10MIP)
激光分散（64μm）

- 激光的全角指向稳定性70~100 μrad，在30mm的传输距离上带来的指向不确定性<30 μm

参考激光器

- 满足需求的激光器主要性能
  - 钇晶石激光器 **Nd-YAG**
  - 波长：**266nm**
  - 功率：**~ 15mJ**
  - 脉冲宽度：**5ns**
  - 公司： **Litron Lasers NanoSG**

- 估算：按照**5mm**光斑的高斯分布，**2.5mm**内的光束能量聚焦在**1mm**的直径上，那么单光束的激光能量密度需要**>20uJ/mm²**，至少可以分出约**150**束
- 三层分束计算，每层**50**束，每层**6**个分束器，单分束器至少可以分数**8**束

Model	Nano SG 150-10
Max. Repetition Rate (Hz)	**10**
Output Energy (mJ)	
1064nm	150
532nm	75
355nm	30
266nm	15
213nm	3
Parameter	
Pulse - pulse Stability (±%)	2
Beam diameter (mm)	5
Beam divergence (mrad) (1)	<0.7
Fit to Gaussian N/F field (%)	70/95
M^2	<2
Pulse length @ 1064nm (ns)	4-6
Pointing stability (µrad) (2)	<100
Lamp life (pulses)	>5x10⁷
Timing jitter (ns) (3)	<0.5
Services	
Voltage (VAC)	90-250
Frequency (Hz)	47-63
Power	Single Phase
Ambient (4) (°C)	5-35
Consumption (W)	<350
PSU Type	LPU250 (5)

满足需求的激光器主要参量

激光器选型

工作原理:电源给泵浦系统（激光头）供电，由泵浦系统辐射的光能，经过聚焦腔后，使工作物质中的粒子发生受激辐射而发射特定能量的光子（原来处在高能级的原子，在其他光子的刺激或感应下，跃迁到低能级，同时发射出一个同样能量的光子），从而实现对特定波长的光辐射的放大，通过谐振腔（倍频器）后，输出所需能量的激光。

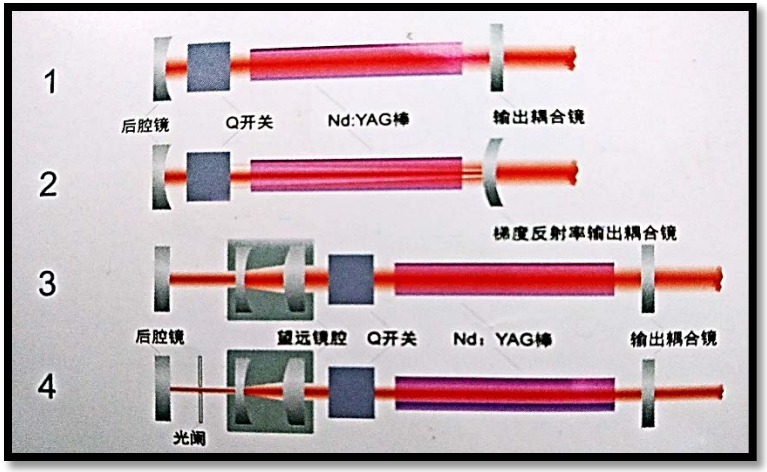
产品参数:

高斯耦合谐振腔	Nano SG 150-10
最大重复频率 (Hz)	10
输出能量 (mJ)	
1064nm	150
532nm	75
355nm	30
266nm	15
213nm	3
脉冲稳定性 (±%)	2
光束直径 (mm)	5
光束发散角 (mrad) [1]	<0.7
Fit to Gaussian N/F field (%)	70/95
M^2	<2
脉冲宽度 @ 1064nm (ns)	4-6
指向稳定性 (μrad) [2]	<100
灯泡寿命 (pulses)	$>5x10^7$
时间抖动 (ns) [3]	<0.5

稳腔	Nano S 130-10
最大重复频率 (Hz)	10
输出能量 (mJ) [1]	
1064nm	130
532nm	65
355nm	25
266nm	16
213nm	3
脉冲稳定性 (±%) [2]	3
光束直径 (mm)	4
光束发散角 (mrad) [3]	<2.5
脉冲宽度 @ 1064nm (ns)	6-8
指向稳定性 (μrad)	<70
谐振腔类型 [5]	稳腔
TEM_{00} (mJ) @ 1064nm [6]	15
灯泡寿命 (pulses)	$5x10^7$
时间抖动 (ns) [7]	<0.5

稳定望远镜谐振腔	Nano T 290-10
最大重复频率 (Hz)	10
输出能量 (mJ) [1]	
1064nm	290
532nm	145
355nm	50
266nm	27
213nm	4
脉冲稳定性 (±%) [2]	2
光束直径 (mm)	6.35
光束发散角 (mrad) [3]	<0.8
脉冲宽度 @ 1064nm (ns)	7-11
指向稳定性 (μrad)	<70
谐振腔类型 [5]	望远镜腔
TEM_{00} (mJ) @ 1064nm [6]	45
灯泡寿命 (pulses)	$5x10^7$
时间抖动 (ns) [7]	<0.5

激光器选型



高斯耦合谐振腔	Nano SG 150-10	稳腔	Nano S 130-10	稳定望远镜谐振腔	Nano T 290-10
最大重复频率 (Hz)	10	最大重复频率 (Hz)	10	最大重复频率 (Hz)	10
输出能量 (mJ)		输出能量 (mJ) [1]		输出能量 (mJ) [1]	
1064nm	150	1064nm	130	1064nm	290
532nm	75	532nm	65	532nm	145
355nm	30	355nm	25	355nm	50
266nm	15	266nm	16	266nm	27
脉冲稳定性 (±%)	2	脉冲稳定性 (±%) [2]	3	脉冲稳定性 (±%) [2]	2
光束直径 (mm)	5	光束直径 (mm)	4	光束直径 (mm)	6.35
光束发散角 (mrad) [1]	<0.7	光束发散角 (mrad) [3]	<2.5	光束发散角 (mrad) [3]	<0.8
Fit to Gaussian N/F field (%)	70/95	脉冲宽度 @ 1064nm (ns)	6-8	脉冲宽度 @ 1064nm (ns)	7-11
M^2	<2	指向稳定性 (μrad)	<70	指向稳定性 (μrad)	<70
脉冲宽度 @ 1064nm (ns)	4-6	谐振腔类型 [5]	稳腔	谐振腔类型 [5]	望远镜腔
指向稳定性 (μrad) [2]	<100	TEM_{00} (mJ) @ 1064nm [6]	15	TEM_{00} (mJ) @ 1064nm [6]	45
灯泡寿命 (pulses)	>$5x10^7$	灯泡寿命 (pulses)	$5x10^7$	灯泡寿命 (pulses)	$5x10^7$
时间抖动 (ns) [3]	<0.5	时间抖动 (ns) [7]	<0.5	时间抖动 (ns) [7]	<0.5

1、稳腔 2、高斯耦合谐振腔 3、多模望远镜腔 4、TEM_{00}望远镜腔

- 稳腔：光斑模式为多膜，多膜运转导致在强度上会出现无规则的局部最大值。其能量分布不如高斯腔集中，光斑质量较为一般。仅用在所需能量较大且不需太好光束质量的地方。
- 高斯腔：输出耦合镜的构造及其上的T型镀膜使输出光束呈高斯分布（基膜or TEM00膜），高斯光斑光束质量好，分散角小。
- 望远镜腔：用一组望远镜腔来约束光斑，使光束收拢，优化光斑质量。在望远镜腔内插入环形光阑，从多模中选出“基膜”，即为TEM00望远镜腔，但其光斑能量要比高斯腔的小。

不同厂家产品对比

— Manufacturer ： Innolas laser GmbH（Germany）

Products & Descriptions ：

SpitLight Compact 100技术参数：

型号	SpitLight100-10	SpitLight100-20
波长（nm）	1064, 532, 355，266，213	
重复频率	10Hz	20Hz
脉冲能量1064nm	110mJ/1064nm	10mJ/1064nm
	55mJ/532nm	50mJ/532nm
	20mJ/355nm	17mJ/355nm
	15mJ/266nm	12mJ/266nm
	3mJ/213nm	2mJ/213nm
脉冲宽度1064nm	6-8ns	
脉冲宽度 532nm	5-7ns	
光斑大小	6mm	
能量稳定性	+/- 1.0%	
发散角	<0.5mrad	
指向稳定性	+/-0.25mrad	
抖动	<1ns	
甫浦灯寿命	2000，0000脉冲（两千万）	
激光头尺寸,重量	253x147x125mm,5kg	
运行条件：	220V，50/60Hz, 2.5KW，闭环水冷	

- Litron NanoSG150-10发散角0.7mrad稍差于0.5mrad， 但经过倍频晶体后，发散角均会变大，后续可以配备一套透镜以约束光斑，对能量的影响很小。
- Litron NanoSG150-10指向稳定性100urad，时间抖动0.5ns，泵浦寿命7×10^7发等性能参数均优于这款SpitLight Compact 100。
- 且Litron NanoSG150-10冷却设备为water-to-air，内部冷却水1.5L，无需更换，在腔体内循环，利用风扇把冷却水的热带走。

不同厂家产品对比

Products & Descriptions ：

— Manufacturer ： Quantel laser（France）

Q-smart 100 Specifications

Model	QSM100-20-G
REPETITION RATE [Hz]	20
PULSE ENERGY [mJ] (1)	
1064 nm	100
532 nm	60 (2)
355 nm	30 (3)
266 nm	20 (4)
PULSE WIDTH [ns]	
1064 nm	< 10
532 nm	< 10
355 nm	< 10
266 nm	< 10
ENERGY STABILITY [% rms]	
1064 nm	< 1
532 nm	< 1.5
355 nm	< 2
266 nm	< 4
BEAM DIAMETER [mm]	
1064 nm	5
532 nm	5
355 nm	5
266 nm	5
BEAM DIVERGENCE [mrad]	
1064 nm	< 1

POINTING STABILITY [µrad]	< 100
TRANSVERSE MODE	Single
RESONATOR CONFIGURATION	GRM
POLARIZATION DIRECTION	
1064 nm	H
532 nm	H
355 nm	V
266 nm	V
SPECTRAL PURITY	
532 nm	> 98 %
355 nm	> 95 %
266 nm	> 95 %
POWER	100 - 240 VAC, 50/60 Hz, < 6.3 A
COMPUTER INTERFACE	Ethernet (RJ45 connector)
OPERATING TEMPERATURE [°C]	15 - 30
STORAGE TEMPERATURE [°C]	5 - 70
CABLE LENGTH	3 m [10 ft], 10 m [33 ft], 15 m [50 ft]
Certification	
CE	EN 60825-1, 61010:2001, 61000-6-1:2001
CDRH	CDRH 21 CFR 1040.10

产品名称	产品型号	产品描述
ND:YAG 激光器	QSM100-20-G	固体激光器 Q-Smart100 1 灯泵调 Q 固体激光器，军工级设计，稳定性高，性能卓越，维护简单，可适应野外环境 2. 输出波长 1064nm 3. 能量 60mJ@532nm 4. 重复频率 1-20Hz 5. 脉冲宽度<10ns 6. 光斑直径 5mm 7. 发散角 <1mrad 8. 军工专利设计，倍频模块支持即插即用 9. 体积小巧，重量轻，便于移动携带 10. 波长切换方便 11. 水路电路可插拔，安装使用方便
2倍频模块	QSM100-SHG-KTP	60mJ@532nm，军工专利技术、支持可插拔，无需任何人工校准。
4倍频模块	QSM100-FHG	20mJ@266nm，军工专利技术、支持可插拔，无需任何人工校准。

法国**Q-smart 100**最大的特点军工级设计，对环境适应性高，倍频及水路电路均支持可插拔。但搭建好的激光设备仅放在实验室里，不需过多的搬运，且实验室环境比野外环境优良许多，因此对激光器的结实程度无需做过高的要求。

Litron NanoSG150-10在光束发散度**0.7mrad**等性能参数上尚优于**Quantel Q-smart**。

不同厂家产品对比

Manufacturer：
Continuum laser（USA）

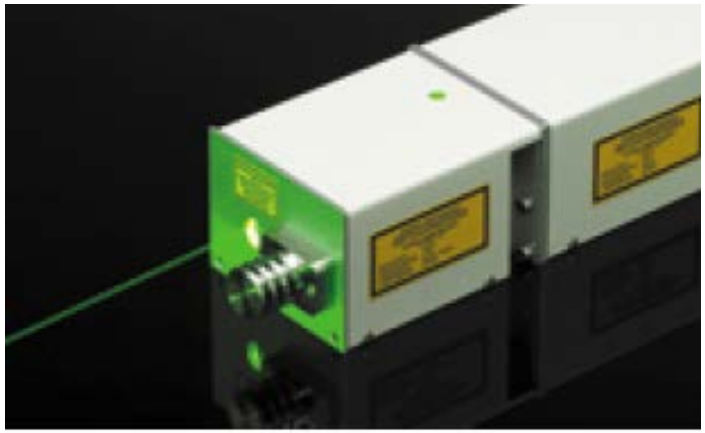
Products & Descriptions：

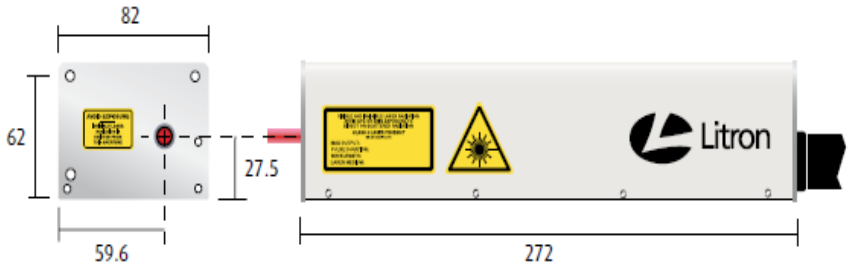
Inlite II Specifications

Description	Inlite II-20	Inlite II-30
Repetition Rate (Hz)	1-30	30
Energy (mJ)		
1064 nm	250	200
532 nm	125	100
355 nm	40	35
266 nm	20	15
Pulsewidth[1] (nsec)		
1064 nm	6-8	7-9
532 nm	5-7	6-8
355 nm	5-7	6-8
266 nm	5-7	6-8
Linewidth (cm^{-1})	1	1
Divergence[2] (mrad)	<0.75	<0.75
Beam Diameter[3] (mm)	6	6
Jitter[4] (±ns)	0.5	0.5
Energy Stability[4] (±%)		
1064 nm	2.0;0.6	2.0;0.6
532 nm	4.0;1.3	4.0;1.3
355 nm	6.0; 2.0	6.0;2.0
266 nm	8.0;2.6	8.0;2.6
Polarization		
1064 nm	Horizontal	Horizontal
532 nm	Vertical	Vertical
355 nm	Horizontal	Horizontal
266 nm	Horizontal	Horizontal

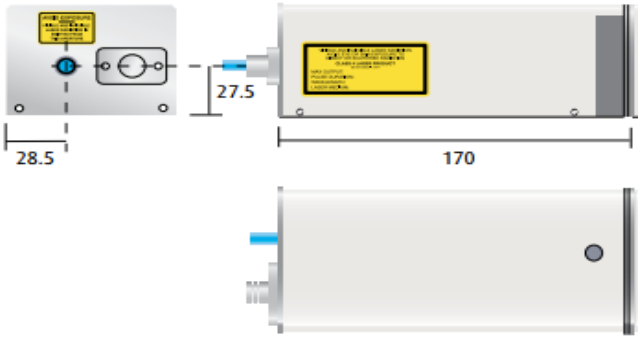
激光器选型

商品名称： Nd:YAG固体激光器
品牌：Litron
型号：Nano SG150-10
产品图片

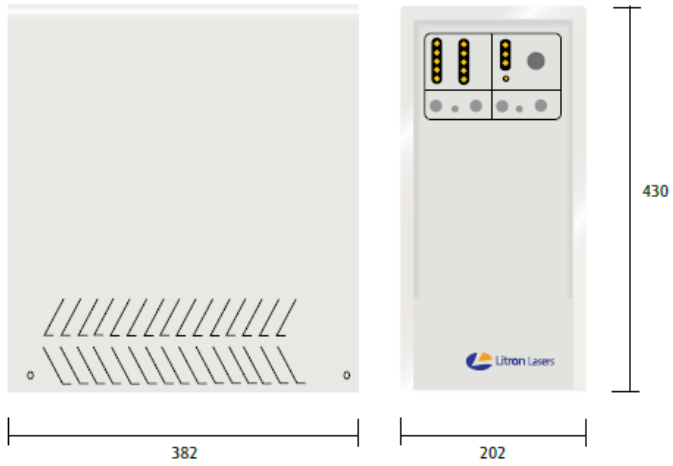




激光头



倍频器（谐波振荡器）



电源

激光器触发信号

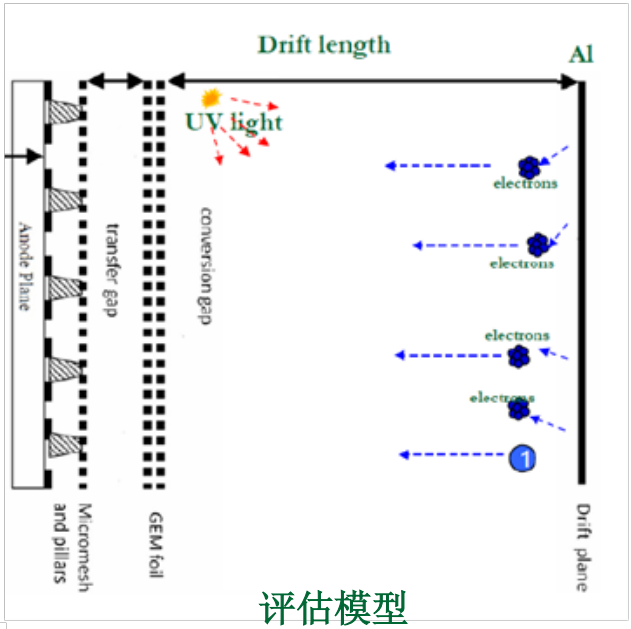
机箱前面板有4个接头：

既可以用灯出又可以用Q出作为触发信号。Q出比灯出延迟~100μs（内部触发）
①灯入：很少用，给灯入输入一个5V方波脉冲，一段时间后灯出闪一下，再一段时间以后，Q出（与激光同时）会有输出。
②灯出：可用作触发信号
③Q入：如想用外部触发来控制出束时间（特定某时间出束），则给Q入输入一个5V脉冲
④Q出：可用作触发信号(与激光光束同时输出)

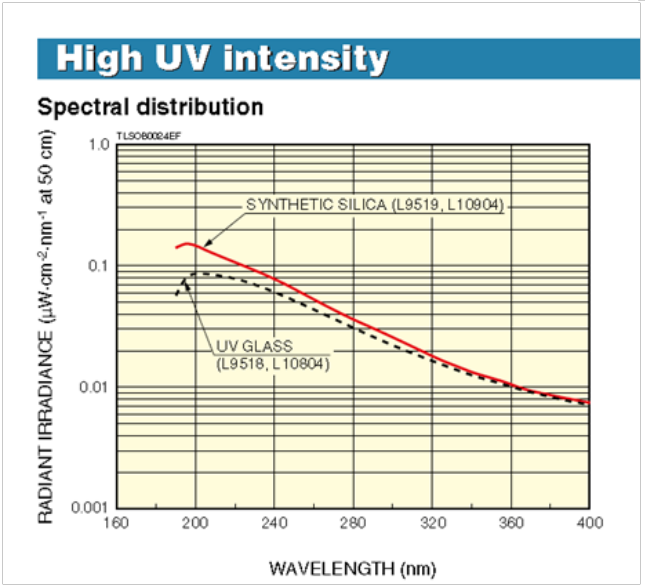
品质因数Q：表征激光谐振腔质量的参数，与激光谐振腔的损耗成反比，Q值越高，越容易产生激光振荡。调Q的目的在于：在激光器开始工作时，先使激光谐振腔处于低Q值状态，此时工作物资不断积累粒子。当粒子数积累到最大值的时刻，使Q值突然阶跃性升高，激光谐振腔立即雪崩式地建立起极强的激光振荡，在极短的时间内输出激光巨脉冲。

光电效应影响评估

- UV light光源，HAMAMATSU X2D2 L10904
- 分别计算不同材料所能产生的光电效应过程中，逸出光电子的最大初动能、不同光源功率（μW/cm^2）下光电效应产生的光电子数（photos/s/cm^2）的关系
  - 铝板
  - 铜板
  - 镍板
  - 金板
  - 锡板



评估模型




UV光源

光电效应影响评估

一些金属的功函数 [编辑]

单位：电子伏特，eV

金属	功函数	金属	功函数	金属	功函数	金属	功函数	金属	功函数	金属	功函数
Ag	4.26	Al	4.28	As	3.75	Au	5.1	B	4.45	Ba	2.7
Be	4.98	Bi	4.22	C	5	Ca	2.87	Cd	4.22	Ce	2.9
Co	5	Cr	4.5	Cs	2.14	Cu	4.65	Eu	2.5	Fe	4.5
Ga	4.2	Gd	3.1	Hf	3.9	Hg	4.49	In	4.12	Ir	5.27
K	2.3	La	3.5	Li	2.9	Lu	3.3	Mg	3.66	Mn	4.1
Mo	4.6	Na	2.75	Nb	4.3	Nd	3.2	Ni	5.15	Os	4.83
Pb	4.25	Pt	5.65	Rb	2.16	Re	4.96	Rh	4.98	Ru	4.71
Sb	4.55	Sc	3.5	Se	5.9	Si	4.85	Sm	2.7	Sn	4.42
Sr	2.59	Ta	4.25	Tb	3	Te	4.95	Th	3.4	Ti	4.33
Tl	3.84	U	3.63	V	4.3	W	4.55	Y	3.1	Zn	4.33
Zr	4.05										

$\lambda = 200nm$时逸出光电子的最大初动能：

Al:$E_k = E_{200} - W = 6.204 - 4.28 = 1.924eV$,

Cu:$E_k = E_{200} - W = 6.204 - 4.65 = 1.554eV$,

Ni:$E_k = E_{200} - W = 6.204 - 5.15 = 1.054eV$,

Au:$E_k = E_{200} - W = 6.204 - 5.1 = 1.104eV$,

Sn:$E_k = E_{200} - W = 6.204 - 4.42 = 1.784eV$,

$\lambda = 200nm$ 时，L10904 在 50cm 处的光谱辐照度约为：，

$P = 0.13\mu W \cdot cm^{-2} \cdot nm^{-1}$,

$$N_\gamma = \frac{P}{E_{200}} = 1.31 \times 10^{11} cm^{-2} s^{-1},$$

若考虑金属板接收的灯光立体角（×41%），光电转换效率 100%，且不考虑二次光电效应，则由光电效应产生的光电子数为$5.36 \times 10^{10} cm^{-2} s^{-1}$

光电效应影响评估

$\lambda = 266\text{nm}$时逸出光电子的最大初动能：

Al:$E_k = E_{266} - W = 4.665 - 4.28 = 0.385eV$,

Cu:$E_k = E_{266} - W = 4.665 - 4.65 = 0.015eV$,

Ni:$E_k = E_{266} - W = 4.665 - 5.15 < 0$，不能发生光电效应

Au:$E_k = E_{266} - W = 4.665 - 5.1 < 0$，不能发生光电效应

Sn:$E_k = E_{266} - W = 4.665 - 4.42 = 0.245eV$,

$\lambda = 266\text{nm}$ 时，L10904 在 50cm 时的光谱辐照度约为：,

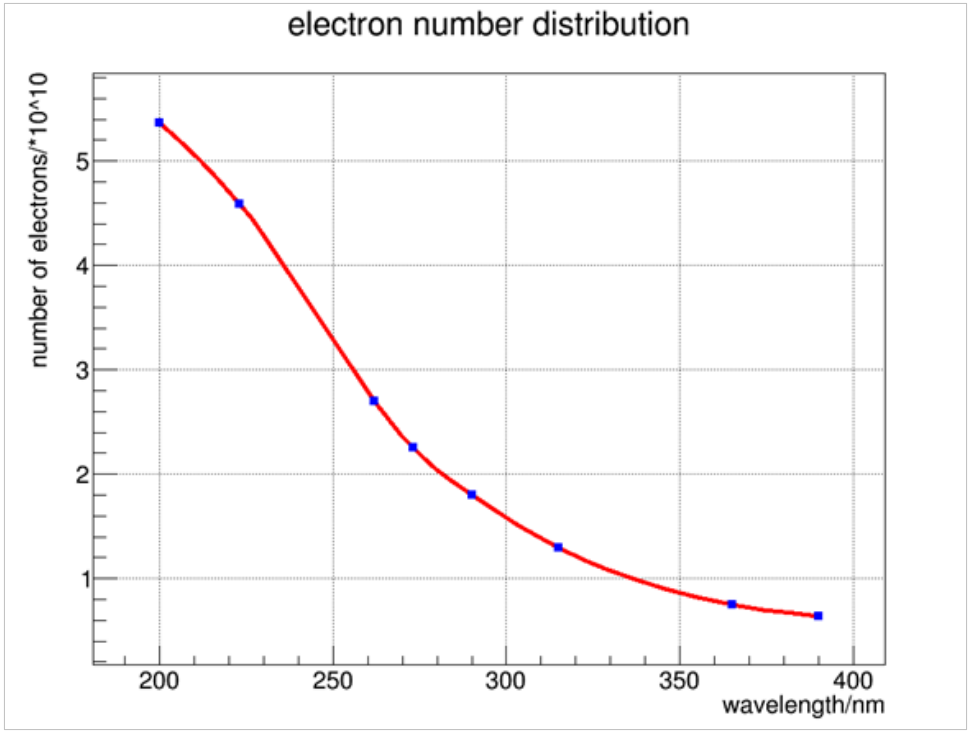
$\mathrm{P} = 0.05\mu\mathrm{W} \cdot \mathrm{cm}^{-2} \cdot nm^{-1}$,

$$N_\gamma = \frac{\mathrm{P}}{E_{266}} = 6.68 \times 10^{10}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1},$$

若考虑金属板接收的灯光立体角（× 41%），光电转换效率 100%，且不考虑二次光电效应，则由光电效应产生的光电子数为$2.74 \times 10^{10}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$（其中镍板、金板在 266nm 下不发生光电效应）

光电效应影响评估

- 光电效应是产生激光标定过程中一个重要的影响因素，因此腔体的设计、**Field Cage**的设计部分对于材料的考虑需要斟酌
- 光电效应产生的光电子数目是比较大的
- 电极板需要镀金

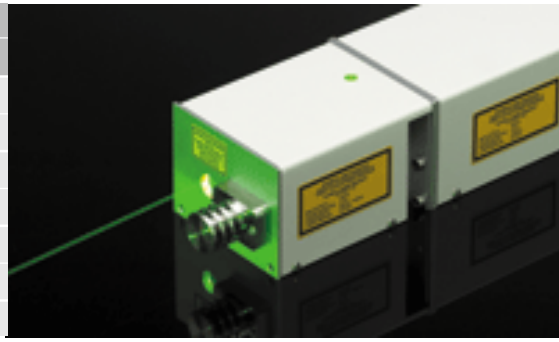


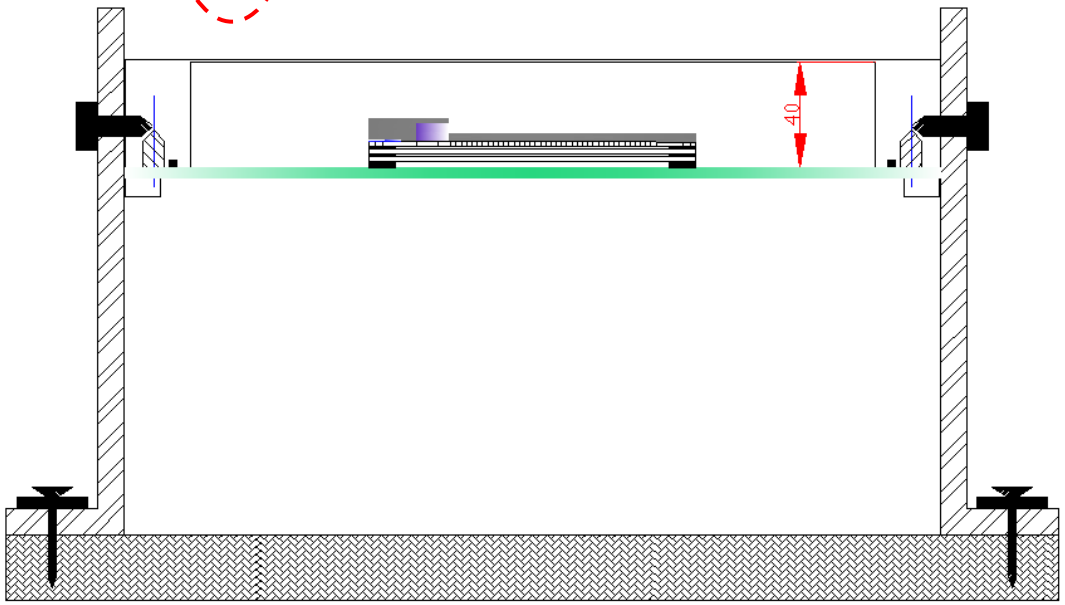
考虑金属板接收的立体角，光电转换效率**100%**，且不考虑二次光电效应，则由光电效应产生的光电子数分布图。

探测器模块激光测量设计

- 主要考虑
  - 调研并准备购置Litron Nano-150mJ激光器
  - 设计侧窗入射探测器模块，目标测试激光与探测器的主要性能
  - 可以安装100mm^2的GEM探测器，两层
  - 读出采用100mm单面读出，一路
  - 高度可以满足安装新的Micromegas或者GEM的空间
  - 激光器备用品可以提供进行测量

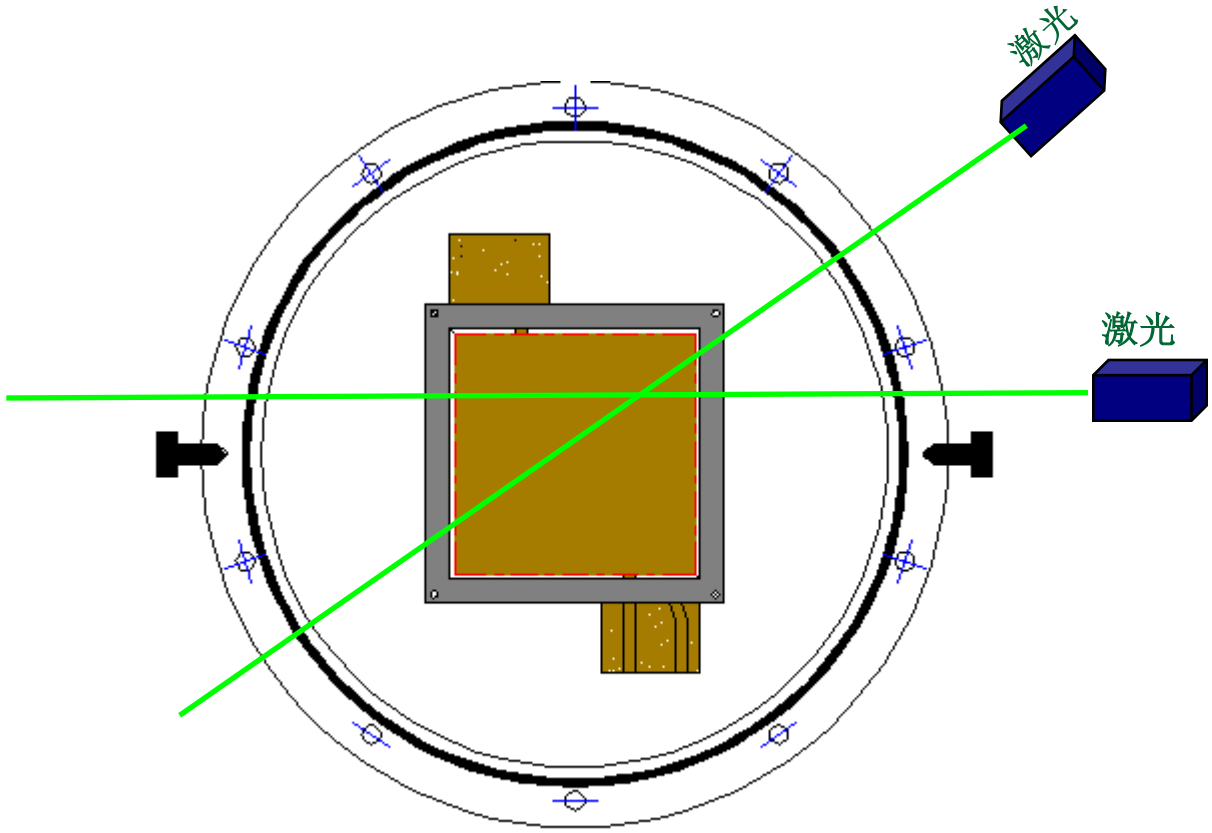
Model	Nano SG	Nano SG	Nano SG
	150-10	120-20	60-30
Repetition Rate (Hz)	10	20	30
Output Energy (mJ)			
1064nm	150	120	60
532nm	75	65	35
355nm	30	15	10
266nm	15	12	6
213nm	3	2	1





测试安装图改进设计

探测器模块激光测量设计



安装图侧视图

研制计划@2016

- 测量探测器信号的部分性能
- 设计和制作测试气室体
- 模拟和评估光路方案

需要协调、配合

- 电子学：100mm GEM探测器单路信号测量后需要与电子学部分对于信号动态范围、信号大小、信号系能等指标的沟通与协调
- 模拟：模拟部分需要对于激光测量信号与光电效应结果部分，协商进行进一步沟通和模拟计算
- 激光：腔体设计部分需要与激光光路设计部分进行密切的协商与沟通，特别对于材料、光路布局等关键部分，为最终方案确定给出主要参量

人员及经费使用计划

- 高能所参与人员以组会的形式组织，并加入每月的例会工作汇报管理中。
  - 模拟（王海云，张余炼 ）
  - 实验测量（张余炼，王海云）
  - 光路设计（祁辉荣、张建、王海云）
  - 方案顾问与讨论（李金、李玉兰）

- 经费使用计划
  - 购置激光器、高压、倍频器等预算内设备，约**15**万。（张建）
  - 设计制作测试腔体、电路板、测试线缆等材料费，约**15**万。
  - 差旅和人员等费用，约**10**万。
  - 详细列支基本依据任务书执行

谢谢各位老师！