

选通电脉冲宽度和幅度对微通道板选通软 X 射线 皮秒分幅相机时间分辨的交互作用

杨文正¹, 白永林¹, 刘百玉¹, 赵军平², 白晓红², 秦君军², 田进寿¹

(1. 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西西安 710119;
2. 中国科学院超快诊断技术重点实验室, 西安光学精密机械研究所, 陕西西安 710119)

摘 要: 微通道板(MCP)选通软 X 射线皮秒分幅相机(XPFC)的动态时间分辨率是其重要的性能指标之一. 通过基于均匀设计分析法建立的 MCP-XPFC 的动态时间分辨率回归方程着重分析了选通电脉冲的宽度和幅值对 MCP-XPFC 的动态时间分辨率的交互影响. 在选通电脉冲 $V_1(t)$ (250ps, 1200V) 和 $V_2(t)$ (170ps, 1400V) 的作用下, 利用 MCP-XPFC 的选通理论模型、均匀分析法回归方程、以及飞秒激光系统分别对相机的动态时间分辨率进行了理论计算和实验测试, 并对结果误差进行了分析. 对于 250ps 的选通脉冲适合的电压范围约为 800 ~ 1200V, 而对于 170ps 的选通脉冲适合的电压范围为 1100 ~ 1200V.

关键词: 微通道板; 均匀设计; 分幅相机; 时间分辨率; 选通电脉冲

中图分类号: TB872 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 03-0603-05

Interaction of Gating Electric Pulse s Width and Amplitude on Temporal Resolution of Soft x-ray Picoseconds Framing Camera Based on Gated Microchannel Plate

YANG Wen-zheng¹, BAI Yong-lin¹, LIU Bai-yu¹, ZHAO Jun-ping², BAI Xiao-hong², QIN Jun-jun², TIAN Jin-shou¹

(1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics Technology, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;
2. Key Laboratory of Ultrafast Photoelectric Diagnostics Technology, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Abstract: The soft X-ray picosecond framing camera based on the gated microchannel plate (MCP-XPFC) is a type of ultrafast diagnostic tool that applied widely for ICF and plasma researches. By using the uniform design, a temporal-resolved regression equation of MCP-XPFC was presented. The analytic emphasis is the interaction of the gating electric pulse s width and amplitude on the temporal resolution. The temporal resolution of camera was computed by the gating theoretic model and the regression equation respectively, and measured by femtosecond laser system on the base of two groups parameters, the gating electric pulses applied on the micro-strip lines of the MCP-XPFC with $V_1(t)$ (250ps, 1200V) and $V_2(t)$ (170ps, 1400V). At last, the theoretic and experimental error was analyzed. The optimized voltage range are 800 ~ 1200V for electric pulse of 250 ps and 1100 ~ 1200V for electric pulse of 170ps.

Key words: microchannel plate (MCP); uniform design; framing camera; temporal resolution; gating electric pulse

1 引言

微通道板(Microchannel Plate, 简称 MCP) 行波选通软 X 射线皮秒分幅相机(Soft X-ray Picosecond Framing Camera, 简称 XPFC) 是一种新型超快诊断工具(简称 MCP-XPFC), 是我国开展高能量密度物理学、惯性约束核聚变(ICF)、Z 箍缩等离子物理、材料科学、光物理、光化学、超快光谱学等方面研究的重要技术支撑, 其测量

数据是分析超快过程的重要依据^[1~5]. MCP-XPFC 的时间分辨与选通负电脉冲的幅度和宽度或称选通幅度和选通宽度有直接的关系. 最小时间分辨受微通道板中电子的渡越时间及其弥散限制, 显然缩短选通宽度有利于提高相机的时间分辨, 而提高 MCP 上的选通幅度可以减少电子在 MCP 通道中的渡越时间, 有利于提高相机时间分辨, 同时也能大幅度提高增益^[6]. 但由于 MCP 中的电子平均渡越时间的限制, 如果选通电脉冲过窄, 将

直接导致增益大幅度降低,最终影响相机使用.既然选通宽度和幅度分别对相机时间分辨均有影响,那么我们有必要讨论一下两者对时间分辨的共同影响或者交互影响,以便更好的研究 MCP-XPFC 的时间分辨特性.

2 相机时间分辨预估模型仿真

2.1 相机动态时间分辨的理论模型

设 MCP 上施加高斯型负高压选通电脉冲 $V(t)$ (峰值为 V_m , 脉冲的半高全宽 FWHM 为 T_n), 仅考虑脉冲的形状, 暂不考虑脉冲的正负方向, 即

$$V(t) = V_m \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{t - T_n}{T_n} \right)^2 \right], t \in [0, 2T_n] \quad (1)$$

光电子能量 E_x 抽样分布依据 $f(E_k) = A \frac{E_k}{(E_k + 3.7)^4}$ ^[7], 光电子发射角度抽样分布依据 Lambert 分布(余弦分布). 共抽样 $n = 5000$ 个光电子. 为方便计算, 阴极光电子和二次电子的发射角选取同样的余弦分布抽样值, 且只考虑同一轴面上的电子运动轨迹, 不考虑方位角. 分析 MCP 通道内第 i 次碰撞, 有

$$\text{碰壁总能量为: } eV_i = eV_{oi} + \frac{e^2}{2mL^2} \left[\int_{t_{i-1}}^{t_i} V_m(t) dt \right]^2 \quad (2)$$

进入通道内倍增的电子在窄脉冲的作用下, 每一次的碰撞过程参考“能量正比假设”^[8], 产生的二次电子发射能量为:

$$eV_{o(i+1)} = eV_i/4^2, \text{ 为 MCP 的特征参数} \quad (3)$$

$$\text{第 } i \text{ 次碰壁时刻: } t_i = t_{i-1} + D / \sqrt{(2eV_{o(i-1)})/m} \quad (4)$$

第 i 次碰壁轴向位移为:

$$Z_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \sqrt{\frac{2eV_{o(i-1)}}{m}} dt + \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{e}{mL} V_m(t) dt \quad (5)$$

第 i 次碰撞产生的二次电子发射系数

$$i = (V_i/V_c)^k \quad (6)$$

V_{or}, V_{α} 分别表示二次电子发射能量的径向和轴向分量, V_c 表示微通道板第一跨越电位, k 表示二次发射曲线曲率半径, 取 $V_c = 29.4 \text{ eV}$, $k = 0.75$, $\alpha = 2.47$ ^[8]. $j(j = 1 \sim n)$ 个抽样光电子产生的 MCP 的平均总增益为

$$\bar{G} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\prod_{i=1}^j i \right) \quad (7)$$

取增益相对时间的变化曲线的 FWHM 值定义为分幅相机的时间分辨率.

2.2 相机动态时间分辨的预估模型

首先基于 MCP-XPFC 的皮秒脉冲选通理论模型, 利用多因素试验均匀设计方法 (Uniform Design) 建立分幅相机动态时间分辨的预估模型. 试验设计的目的一

是揭示变量 (Y) 与各因素之间的定性的关系, 二是寻求最优的试验条件. 将相机动态时间分辨的理论模型作为试验设计的系统模型, 选通电脉冲的宽度 T 和幅度 V 是分幅相机时间分辨研究中最优先的两个因变量. 由于因变量常常会有交互作用, 于是多采用二次型回归模型^[9]:

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 T^2 + \beta_3 T \times V + \beta_4 V + \beta_5 V^2 + \epsilon \quad (8)$$

其中, β_i 为回归系数, ϵ 为随机误差.

选通宽度水平范围参考 MCP 中电子渡越时间及其弥散量, 选取 $170 \sim 255 \text{ ps}$; 选通幅度水平范围参考 MCP 分幅管实验参数范围, 选取 $700 \sim 1200 \text{ V}$; 均匀设计表选择 $A1.20 U_{18}^*$ 表 ($D = 0.0779$)^[9]; 两参数被设计为 18 组试验参数组, 总共进行 18 次计算. 根据动态时间分辨理论值, 采用二元逐步回归法, 建立关于时间分辨的回归方程式, 相关系数 $R^2 = 0.9999$:

$$Y = 98.4677323 - 0.1398946 \times T - 0.1008837 \times V + 6.472 \times 10^{-4} \times T^2 + 1.842 \times 10^{-4} \times T \times V + 2.88 \times 10^{-5} \times V^2 \quad (9)$$

式(9)表明, 在一定的试验水平下, 选通宽度 T 或是选通幅度 V 对于时间分辨 Y 来说, 都是抛物线型变化趋势, 且降低脉宽相比增大脉冲幅值对提高时间分辨更显著. 回归方程中的二阶 $T \times V$ 项, 表明两因素对回归模型的 Y 响应还具有交互影响作用. 说明脉宽所引起的时间分辨变化的大小与脉冲幅度取值有关, 反之, 脉冲幅度的变化对时间分辨的影响也与脉宽取值有关. 通过此模型进行了选通脉宽和幅度对动态时间分辨的交互作用分析, 结果如图 1, 图 2 所示.

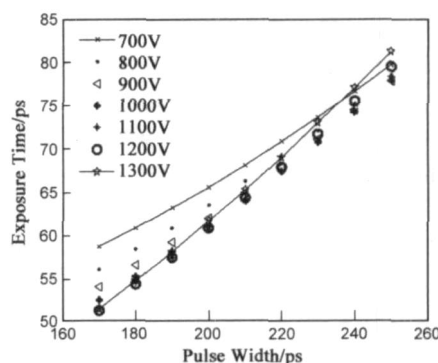


图1 不同选通幅值下, 曝光时间随选通脉宽的变化曲线

由图 1 可知, 不同选通幅度下, 曝光时间随选通脉宽的变化曲线在 $230 \sim 240 \text{ ps}$ 范围内相交. 当选通脉宽比此值小时, 提高脉冲幅度能够在一定程度上提高时间分辨, 脉宽越窄, 脉冲幅度影响越大; 但是窄脉冲 (200 ps 以下) 应选择较高选通幅度 (900 V 以上), 以保证有效的增益值, 获得好的图像信噪比; 而当选通脉宽和此值相当时, 说明改变脉冲幅度对时间分辨率影响不大; 当选通脉宽比此值大时, 提高脉冲幅度并不能改善

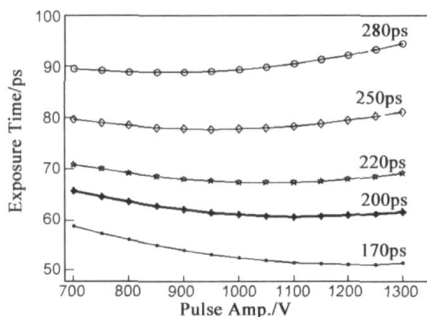


图2 不同选通脉宽下,曝光时间随选通电脉冲幅值的变化曲线。由图2可知,对于不同的脉宽,有一个合适的幅度选择范围能使相机的时间分辨达到最佳。但是在实际应用中,除了考虑时间分辨率外,还不可忽略相机的增益、空间分辨率以及信噪比等因素,必须综合考虑选择合适的选通电脉冲参数。

对于选通脉冲幅度值为700~1300V时,对应的平均电压值为350~650V。基于MCP-XPFC的直流倍增理论模型,在MCP加载直流电压350~650V时,可计算出MCP中电子的平均渡越时间为230ps,平均渡越时间弥散为61ps,结果如图3所示。可见图1中曲线的相交范围对应的选通脉冲宽度是在MCP中电子平均渡越时间及其渡越时间弥散范围内。

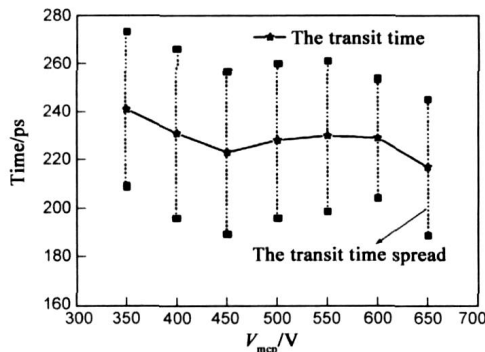


图3 MCP上板压为350~650V时, MCP中电子渡越时间及其弥散分布

因此对于较窄选通脉冲,如170ps选通脉冲,MCP上高选通电压作用时间很短,增益不易饱和,提高选通脉冲的幅度能够在一定程度上减小电子的渡越时间,缩小电子渡越时间弥散,提高相机的时间分辨率,但是其影响最终是不可逾越电子渡越时间弥散对相机时间分辨率的限制。而对于较宽的选通脉冲,MCP上高选通电压作用时间大于电子的平均渡越时间,MCP易达到增益饱和和增大电子的平均渡越时间弥散,而过高的电压长时间作用也会较窄脉冲而言有更多的电子入射到通道壁的深处而不能引发二次电子,从而最终影响相机的时间分辨。

由于我们要求的选通电脉冲是属于高压、快变化

的皮秒脉冲,脉冲的宽度和幅值无法达到连续变化,因此一台脉冲发生器只能产生一组固定脉宽和幅值的脉冲,两者不能随便改变。我们使用已研制出的两台脉冲发生器进行了相机动态时间分辨率测试实验,并和时间分辨率预估模型结果相比较。

3 相机时间分辨率实验测试

相机时间分辨的测试原理是利用一个飞秒光脉冲作用在微带上,在时域上相当于一个时间函数,选通电脉冲传输过阴极微带,相当于选通电脉冲的不同时刻点与一个光脉冲函数作用产生光电子,并在MCP内倍增,最终得到电子增益和时间的关系,其FWHM值所代表的就是相机的时间分辨。时间分辨率测试原理如图4所示,在CCD图像上则是用积分强度与位置的曲线来表示,结果如图5所示,其和电子增益与时间的换算关系如下:

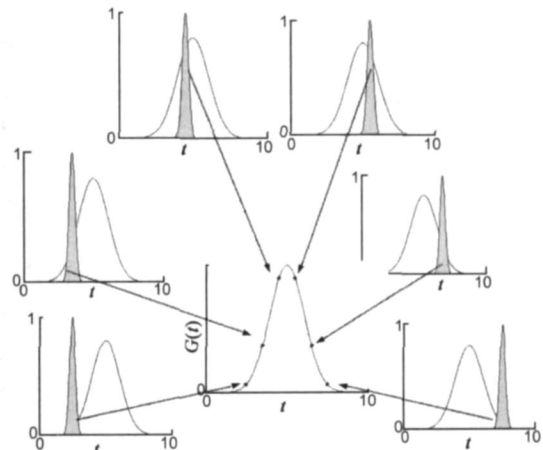


图4 利用飞秒激光测试相机时间分辨率原理示意图

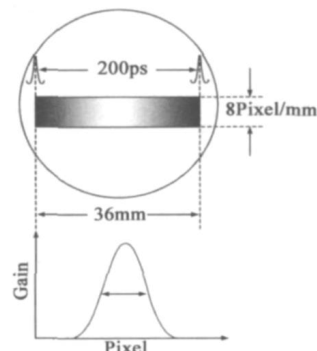


图5 MCP-XPFC选通图像数值分析示意图

$$\text{时间分辨率} = \frac{\text{CCD增益曲线的FWHM像素数}}{\text{脉冲传输速度} \times \text{CCD像素数/单位尺寸图像}} \text{ps}$$

首先利用美国Agilent的86100C型,采样频率70GHz的取样示波器测试了分幅管MCP上,电脉冲在36mm微带线上的传输时间是200ps,计算得电脉冲的传输速度为0.18mm/ps;而6mm微带宽度在CCD图像上占48像素,计算得单位图像长度上的像素数为8pixel/

mm;时间分辨率为:

$$\text{时间分辨率} = \frac{\text{FWHM}}{1.44} \text{ ps} \quad (10)$$

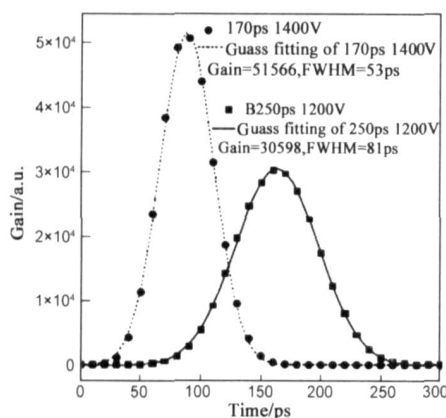


图6 选通脉冲 V_1 (250ps,1200V)和 V_2 (170ps,1400V)的增益理论值及高斯拟合曲线

两组脉冲发生器输出脉宽和幅值分别为: V_1 (250ps,2500V), V_2 (170ps,2800V).微带线阻抗约15欧姆,实际加载在分幅相机MCP微带线上的选通脉宽和选通脉冲幅度约为 V_1 (250ps,1200V), V_2 (170ps,1400V),由基本理论模型计算时间分辨 $\gamma_1=81\text{ps}$, $\gamma_2=53\text{ps}$,如图6所示增益曲线理论值及其高斯拟合曲线.由回归方程计算时间分辨 $\gamma_1=79.61\text{ps}$, $\gamma_2=52.44\text{ps}$.

实验光源是 KrF_2 准分子激光器,波长248.8nm,脉宽500fs,能量2~5mJ,重复频率0.5~5Hz可调.图像记录系统为分辨率2K×2K的CCD相机.激光被分成两束,一束经延迟并扩束后,均匀照射在分幅管微带阴极上,另一束通过PIN光电二极管探测器触发电控箱产生高压选通电脉冲.调节电控箱上的电路延迟,使光信号和电脉冲到达阴极微带的时间同步.实验结果如图7所示

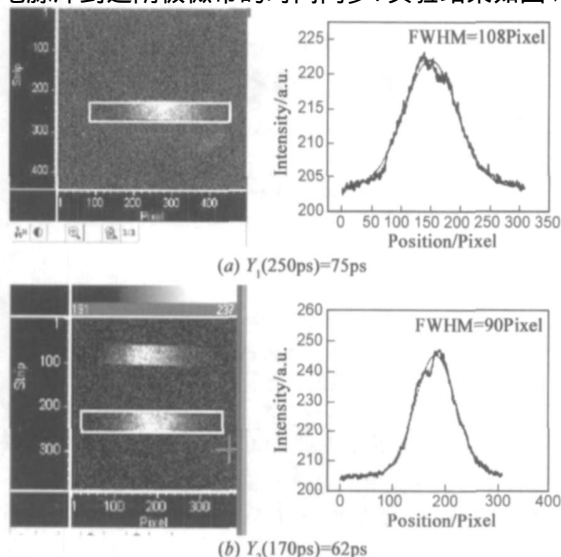


图7 选通电脉冲 V_1 (250ps,1200V)和 V_2 (170ps,1400V)作用下MCP-XPFC的选通图像及增益曲线图

示:

250ps的选通脉冲作用的实验结果和理论计算结果基本吻合,对170ps脉宽的选通电脉冲作用而言,两者差异较大.实验误差的来源主要包括实验中采用MCP的特性参数、248.8nm波长飞秒激光轰击Au阴极产生光电子分布、飞秒激光脉冲的稳定性、飞秒激光脉冲和选通脉冲的同步情况、选通脉冲沿微带线传输时的波形变化以及电子在选通状态下的电子渡越时间及其弥散分布等等.影响窄脉冲选通结果的最主要原因是对于0.5mm的MCP,在直流板压作用下,MCP中电子平均渡越时间弥散约61ps,而渡越时间弥散决定了分幅相机的极限时间分辨率.因此对于170ps脉冲而言,MCP中电子的平均渡越时间弥散的影响要更大些,也限制了分幅管的极限时间分辨约为61ps.在采用快速预估模型仿真时,必须保证选通脉冲的脉宽应大于电子的最短渡越时间.平均650V板压时,MCP中电子渡越时间约185~250ps,若选用1300V峰值脉冲,则最好选择大于185ps的选通脉冲,否则电子渡越时间弥散将最终限制相机的极限时间分辨.

参考仿真结果,结合图像的增益、空间分辨率及信噪比等因素,对于250ps脉冲而言,加载在微带线上的电压幅值最佳范围为850~1000V;对于170ps脉冲而言,加载在微带线上的电压幅值最佳范围为1100~1200V,这给我们指出进一步研制选通脉冲发生器的最佳参数选择.

4 结论

基于特定条件下(例如MCP特性参数、选通电脉冲的宽度和幅值取值范围、光电子的分布、光电子产生时刻等),利用均匀设计试验分析法建立了的MCP皮秒分幅相机时间分辨率的预估模型.该模型更简便直观地揭示了变量与各因素之间的定性关系,其中交互项的存在提醒我们在研究反射式阴极MCP-XPFC的动态特性时,必须同时考虑选通电脉冲的宽度和幅值共同对相机时间分辨率的影响,并给出了宽度分别为250ps和170ps选通脉冲的最佳脉冲幅值设计范围.在实际使用中,还必须综合考虑相机的增益、空间分辨率和信噪比等指标.最后通过飞秒激光超快测量技术对所研制的两台MCP-XPFC进行了时间分辨率的测试,实验结果表明在使用快速预估模型仿真时,必须考虑MCP中电子渡越时间及其弥散对选通脉冲宽度的要求,否则将引入误差.

参考文献:

- [1] Bradley D K, Bell P M, Kilkenny J D, et al. High-speed gated X-ray imaging for ICF target experiment (invited) [J]. Review

- of Scientific Instruments, 1992, 63(10): 4813 - 4817.
- [2] Ze F, Kauffman R L, Kilkenny J D, et al. A new multichannel soft X-ray framing camera for fusion experiments [J]. Review of Scientific Instruments, 1992, 63(10): 5124 - 5126.
- [3] Katayama M, Nakai M, Yamanaka T, et al. Multiframe X-ray imaging system for temporally and spatially resolved measurement of imploding inertial confinement fusion targets [J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62(1): 124 - 129.
- [4] 常增虎, 山冰, 刘秀琴, 等. 微通道板选通 X 射线皮秒分幅相机[J]. 光子学报, 1995, 24(6): 501 - 508.
CHANG Z H, SHAN B, LIU X Q, et al. Picosecond x-ray framing camera using gated MCP[J]. Acta Photonica Sinica, 1995, 24(6): 501 - 508. (in Chinese)
- [5] 杨家敏, 丁耀南, 郑志坚, 王耀梅, 等. 时空分辨软 x 射线谱诊断技术研究[J]. 物理学报, 2003, 52(6): 1427 - 1431.
YANG J M, DING Y N, ZHENG Z J, et al. Diagnostic technology of time-and space-resolved soft-x-ray spectra [J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(6): 1427 - 1432. (in Chinese)
- [6] 常增虎. 微通道板皮秒选通特性的数值模拟[J]. 光子学报, 1995, 24(4): 347 - 352.
CHANG Z H. Numeric modeling of the mcp characteristics gated by ps pulse[J]. Acta Photonica Sinica, 1995, 24(4): 347 - 352. (in Chinese)
- [7] Burton L H, Jerel A S. 0.1 ~ 10-keV X-ray-induced electron emissions from solids-models and secondary electron measurements [J]. Journal of Applied Physics, 1977, 48(5): 1852 - 1866.
- [8] Eberhardt E H. Gain model for microchannel plates [J]. Applied Optics, 1979, 18(9): 1418 - 1423.
- [9] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994. 33 - 77.
FANG Kai-Tai. Uniform Designs and Uniform Designs Charts [M]. Beijing: Science Press, 1994. 33 - 77. (in Chinese)

作者简介:



杨文正 女, 1975 年 1 月出生于陕西省咸阳市. 1997 年本科毕业于西北大学电子科学与技术系, 2008 年博士毕业于中国科学院西安光学精密机械研究所物理电子学专业. 现为助理研究员、硕士生导师. 主要研究方向为超快过程信息获取技术和高速相机时空分辨特性研究.
Email: ywz @opt. ac. cn



白永林 男, 1972 年 3 月出生于陕西省宝鸡市. 1997 年本科毕业于西北大学物理系理论物理专业, 1999 年硕士毕业于西北大学光学专业, 2003 年博士毕业于中国科学院西安光学精密机械研究所光学专业. 现为副研究员、硕士生导师. 主要研究方向为高速光电信息获取与处理技术.
Email: baiyonglin @opt. ac. cn