

条纹相机中栅网的特性研究

顾礼^{1,2}, 李翔³, 周军兰¹, 杨勤劳^{1*}, 郭宝平¹

¹深圳大学光电工程学院光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060;

²深圳大学信息工程学院, 广东 深圳 518060;

³深圳大学高等研究院, 广东 深圳 518060

摘要 栅网是条纹相机等电子光学仪器的重要组成部分。通过使用有限差分法对栅网的丝径、网孔进行精细建模, 分析了栅网对均匀电场的扰动以及对电子运动的子透镜效应; 使用电子碰撞自由程 Gryzinski 理论研究了电子和栅网碰撞的二次电子发射问题。结果发现, 对于条纹相机中常用的 10, 33, 50 line/mm 栅网, 其结构参数的不连续性对均匀电场的扰动分别为 0.31%、0.07%、0.04%; 对于入射能量为 15 keV 的电子, 栅网金属原子 Ni、Cr 和 Cu 的非弹性散射碰撞自由程分别为 6.85, 10.34, 7.25 nm, 碰撞很难产生二次电子发射。研究结果对电子光学仪器的设计和栅网参数的优化具有参考意义。

关键词 成像系统; X 射线探测器; 条纹相机; 栅网; 二次电子; 电场扰动; 子透镜效应

中图分类号 O436; TN143

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1204004

Characteristics of Mesh in Streak Camera

Gu Li^{1,2}, Li Xiang³, Zhou Junlan¹, Yang Qinlao¹, Guo Baoping¹

¹College of Optoelectronic Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;

³Institute for Advanced Study, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China

Abstract Mesh is an important component of electronic optical instruments such as streak cameras. In this paper, the finite difference method is used to model the wire diameter and wire hole of the mesh. The effects of the mesh on the disturbance of uniform electric field and the sub-lens effect of electron motion are analyzed. The secondary electron emission problem of collisions of electrons and mesh is studied by Gryzinski theory. The results show that the disturbances of the structural parameters are 0.31%, 0.07% and 0.04%, respectively, for the 10 line/mm, 33 line/mm and 50 line/mm mesh in the streak camera. For the electrons with energy of 15 keV, the non-elastic scattering collision free paths of Ni, Cr and Cu atoms are 6.85 nm, 10.34 nm and 7.25 nm, respectively, and it is difficult to produce secondary electron emission. The results have reference significance for the optimization of electronic optical instrument design and mesh parameters.

Key words imaging system; X-ray detector; streak camera; mesh; secondary electron; electric field disturbance; sub-lens effect

OCIS codes 110.7440; 340.7440; 320.2250; 320.7160

1 引 言

Bradley 等^[1-2]在变像管中引入加速栅网, 并将其置于光电阴极附近, 大幅提高了光电子的加速场强, 降

收稿日期: 2017-07-12; 收到修改稿日期: 2017-08-16

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2014YQ230659)、国家自然科学基金青年科学基金(11705119)、广东省自然科学基金(2017A030310142)、深圳市科技计划(JCYJ20170302152748002)

作者简介: 顾礼(1983—), 男, 博士后, 助理研究员, 主要从事超快诊断方面的研究。E-mail: flutelad@126.com

* 通信联系人。E-mail: qlyang@szu.edu.cn

低了电子因初能量弥散和空间电荷效应而引起的时间和空间上的展宽,从而将变像管相机的时间分辨率提升到 ps 量级。目前,使用加速栅网形成强大加速电场或屏蔽场的做法广泛用于条纹相机^[3-5]、分幅相机^[6-9]、电子衍射仪^[10-11]、离子能量分析仪^[12]、扫描电子显微镜等电子光学仪器中。在条纹相机这种高时间、空间分辨率的诊断仪器中,栅网的丝径通常为几到十几 μm ,栅网的特性很难详细考察。为增加信号电子数量,提高系统的信噪比,需要扩大栅网网孔的面积,而网孔附近形成的场不是理想的均匀场,因此提高电子透过率与提高加速或屏蔽电场均匀性是矛盾的。激光惯性约束聚变研究对时、空、能谱分辨诊断的 X 射线条纹相机提出了精密化的要求^[13-16]。因此,条纹相机中栅网对均匀电场和电子运动的影响需要进一步研究。

本文使用有限差分法对条纹相机中常用的 10, 33, 50 line/mm (line/mm, 每毫米丝线数) 栅网进行了精细模拟,对比了两种模型的模拟差异,分析了栅网孔宽(81, 20, 12 μm)和丝径(15, 8, 7 μm)对电场均匀性的扰动,以及栅网孔附近形成的子透镜效应对电子运动的影响。采用 Gryzinski 理论研究了电子和栅网的非弹性散射,得出了栅网中二次电子的碰撞自由程;讨论了二次电子的发射问题。研究结果对电子光学仪器设计和栅网参数的优化具有一定参考。

2 理论模型

2.1 条纹相机中的栅网

条纹相机中使用的栅网是由纯镍(Ni4、Ni6)或镍铬、镍铜合金丝为原料编织而成的精细网,具有良好的导电、导热性能和易加工、易除气特性。部分栅网规格如表 1 所示。栅网的主要参数为线数、丝径、孔宽和间距;透射率是由孔宽和间距之比求平方计算得出的。由表 1 可以看出,不同线数的栅网,间距、孔宽和丝径宽度都有所不同。线数越小的栅网,其开孔越大,信号电子的透射率越大,对成像性能的提高越有利,但形成均匀场的效果较差。

表 1 栅网的规格参数
Table 1 Specifications of the meshes

Line number / (line·mm ⁻¹)	Wire diameter / μm	Hole width / μm	Interval / μm	Transmittance
10	15	81	96	0.7119
33	8	20	28	0.5102
50	7	12	19	0.3989

在条纹相机中,栅网根据需求可以放置在光电阴极后(用于加速初始发射的光电子)、阳极孔上(屏蔽外场)、荧光屏前(提高电子入屏能量)。在这三个位置处,栅网的作用类似,均为形成均匀场和加速场。以栅网放置在荧光屏前为例分析栅网结构的不连续性对加速电场的扰动,以及该场分布所形成的栅网子透镜效应对电子运动的影响。如图 1 所示,栅网边缘的网丝通过底座和管壳焊接在一起;栅网电压 U_M 和前端阳极一致,以保持电子漂移区的等势场;荧光屏电压 U_P 可以提高电子入屏的能量; d_{MP} 为栅屏距离, $2r_M$ 为网丝直径。

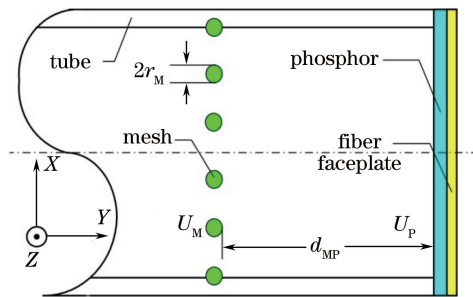


图 1 栅网-荧光屏结构示意图

Fig. 1 Diagram of mesh-phosphor screen structure

2.2 栅网的有限差分

若要解决精细圆形网丝的边界赋值,首先需要解决圆形电极的边界问题^[17]。在二维模型下,栅网网丝截面可以处理为直径为 $2r_M$ 的圆形,或者简化为边长为 $2r_M$ 的正方形。如图 2 所示,10 line/mm 栅网网丝

的直径为 $15\ \mu\text{m}$ ，可以将其处理为直径为 $15\ \mu\text{m}$ 的圆形或边长为 $15\ \mu\text{m}$ 的正方形。网格节点为空间上离散位置的电位，选取有限差分网格大小为 $1\ \mu\text{m}$ ，这相比几十个 μm 的栅网网格和几个 mm 的栅屏距离都足够小。各个节点把电场方程中的偏微商转换为相邻节点间的电位差值，从而将偏微分方程变为电位之间的差分方程，进而求解差分方程组，最终可得到各离散点的电位。

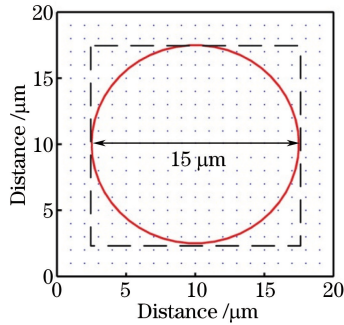


图 2 $10\ \text{line}\cdot\text{mm}^{-1}$ 栅网的有限差分

Fig. 2 Finite difference of $10\ \text{line}\cdot\text{mm}^{-1}$ mesh

2.3 静电场求解

直角坐标系下的电位分布拉普拉斯方程为

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

式中 φ 为电位分布。根据变像管电极结构和电位分布可得到边界条件，从而可以利用有限差分法求解电位分布方程。

在异步迭代法的基础上，使用超松弛迭代法的杨-富兰克尔(Young-Frankel)公式可得到电位分布的矩阵，求解梯度便可得到电位分布矩阵^[18]。超松弛迭代法的杨-富兰克尔(Young-Frankel)公式为

$$\varphi_{i,j,k}^{(N+1)} = (1 - \omega) \cdot \varphi_{i,j,k}^{(N)} + \omega \cdot \frac{\varphi_{i-,j,k}^{(N+1)} + \varphi_{i+,j,k}^{(N)} + \varphi_{i,j,k-}^{(N+1)} + \varphi_{i,j,k+}^{(N)} + \varphi_{i,j,k-}^{(N+1)} + \varphi_{i,j,k+}^{(N)}}{6}, \quad (2)$$

$$\omega = 2 - \pi \cdot \sqrt{\frac{1}{N_x^2} + \frac{1}{N_y^2} + \frac{1}{N_z^2}}, \quad (3)$$

式中 N 和 $N+1$ 为计算次数， i, j, k 为网格节点， ω 为超松弛迭代因子， $1 < \omega < 2$ ； N_x, N_y, N_z 分别为网格矩阵在 3 个方向上的网格数。自适应的最佳超松弛因子仅与电极结构的几何形状有关，与迭代次数和电位初值无关。在计算第 $N+1$ 次任意网格区域节点上的电位值时，部分网格点的第 $N+1$ 次计算值 $\varphi_{i,j,k}^{(N+1)}$ 已在上次运算中求出。

3 电场扰动和子透镜效应

对于 $10\ \text{line}/\text{mm}$ 栅网，以栅网加载电压 $U_M = 8\ \text{kV}$ ，荧光屏电压 $U_P = 14\ \text{kV}$ ，栅屏距离 $d_{MP} = 6\ \text{mm}$ 为例，取 10 个网丝和 9 个网孔，边界厚度为 $3\ \mu\text{m}$ ，高度为 $885\ \mu\text{m}$ ，这已经远大于系统的典型分辨元 $20\ \mu\text{m}$ （此时空间分辨率为 $25\ \text{lp}/\text{mm}$ ）。图 3(a)和图 3(b)分别给出了 $10\ \text{line}/\text{mm}$ 栅网圆形网丝和方形网丝网孔处的电压分布。从图中可以看出，网丝电压为加载电压 $8\ \text{kV}$ ，网孔区域电压则大于 $8\ \text{kV}$ ，电压分布向高电压的荧光屏一侧弯曲，均匀电场产生了周期性扰动。中间网丝的电压峰值大致相同，边缘网丝的电压峰值略低于中间网丝的电压，这是因为边缘网丝和电极底座焊接在一起，边缘网丝加载了电极电压，加速区电压渗透相对较弱。与方形网丝相比，圆形网丝的网孔更大，荧光屏一侧的高电压向低电压场区渗透得更大，所以电压曲线峰值更高，电压不均匀性更大。

采用类似的方法可以得到 $33\ \text{line}/\text{mm}$ 和 $50\ \text{line}/\text{mm}$ 栅网圆形网丝和方形网丝网孔处的电压分布图，如图 3(c)-(f)所示。表 2 给出了栅网电场的扰动和非均匀性， $10\ \text{line}/\text{mm}$ 栅网的网孔最大，电压最高，为 $8024.8\ \text{V}$ ，电压的扰动也最为剧烈； $50\ \text{line}/\text{mm}$ 栅网的电场均匀性最好， $33\ \text{line}/\text{mm}$ 栅网的电场均匀性次之。

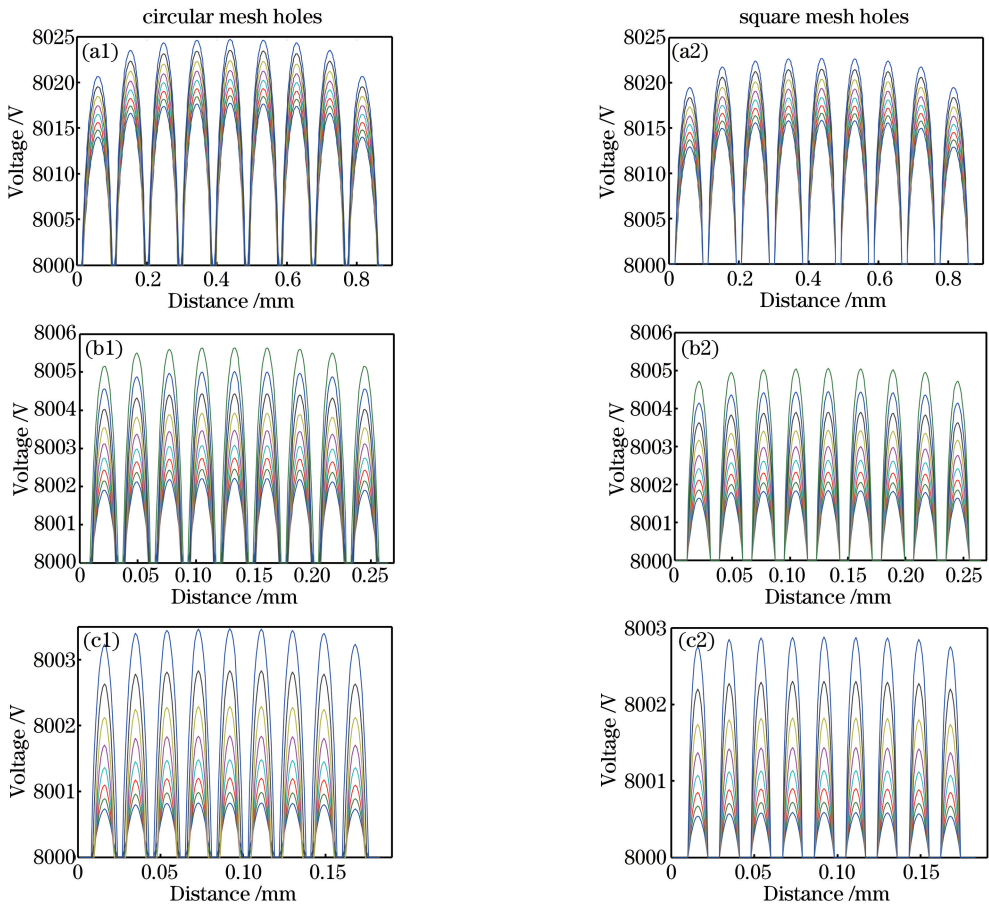


图 3 圆形和方形网丝孔内电位分布。(a) $10 \text{ line}\cdot\text{mm}^{-1}$; (b) $33 \text{ line}\cdot\text{mm}^{-1}$; (c) $50 \text{ line}\cdot\text{mm}^{-1}$

Fig. 3 Potential distributions in circular and square mesh holes. (a) $10 \text{ line}\cdot\text{mm}^{-1}$;

(b) $33 \text{ line}\cdot\text{mm}^{-1}$; (c) $50 \text{ line}\cdot\text{mm}^{-1}$

表 2 栅网电场的扰动和非均匀性

Table 2 Disturbance and nonuniformity of mesh electric field

Mesh / ($\text{line}\cdot\text{mm}^{-1}$)	Voltage / V	Disturbance / V	Nonuniformity / %
10	8000	24.8	0.31
33	8000	5.7	0.07
50	8000	3.5	0.04

后加速栅网前后 0.05 mm 处轴向电压分布以及电压的一、二阶导数如图 4 所示。图中可以看出,轴向电压的一阶导数在栅网前后附近出现了弯曲,二阶导数大于 0,可知电子在后加速区呈聚焦状态。电子和网孔的相对位置决定了会聚的不同状态,导致成像中的图像会有微小的变化。这些栅网孔阵列对电子运动的

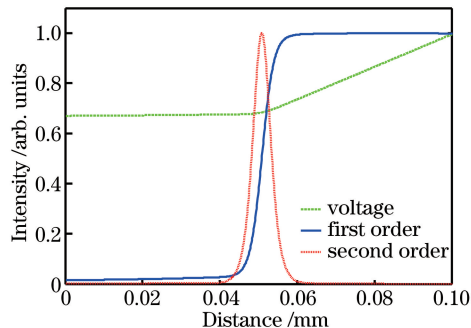


图 4 栅网附近轴向电位及其一、二阶导数分布

Fig. 4 Axial potential near the mesh and its first order and second order derivative distributions

会聚作用是一种阵列式的子透镜效应。

在电子飞离偏转板后,电子束团已经包含了诊断信号的时间和空间信息,这样在已经成像的后加速场区,希望电子被均匀投射在荧光屏上,电场不均匀性的扰动越小越好,电子离开阳极光阑后的速度和能量很大,电位的扰动相对较小。均衡考虑后加速电场的均匀性与电子透过率这两个矛盾的因素,在后加速系统中选择 33 line/mm 的栅网作为后加速栅网,这样既保证了电场较高的均匀性,又保证了足够的电子透过率。

4 电子与栅网碰撞

栅网材料中的 Ni、Cr、Cu 元素都是良导体,在强大的外加电场作用下,电子打入栅网内被迅速导出,即使在入射栅网表面区域出射的数量极少的电子也会被迅速拉回导出。即使没有强大的引出场,十几 keV 能量的电子在这些金属材料中的穿透深度也很小。电子和金属原子发生非弹性散射时,电子的碰撞自由程计算公式^[19-20]为

$$\frac{1}{\lambda_c} = \sum \frac{1}{\lambda_c^i}, \quad (4)$$

其中

$$\frac{1}{\lambda_c^i} = \frac{10^7 M_e}{N_A Q \rho}, \quad (5)$$

$$Q = 6.56 \times 10^{-14} f_g n^i / E_b^{i2}, \quad (6)$$

$$f_g = x_c^{-1} \left(\frac{x_c - 1}{x_c + 1} \right)^{1.5} \left[1 + \frac{2}{3} \left(1 - \frac{1}{2x_c} \right) \ln(2.7 + \sqrt{x_c - 1}) \right], \quad (7)$$

$$x_c = E_e / E_b^i, \quad (8)$$

式中 λ_c 为总的碰撞自由程, nm; λ_c^i 为入射电子与第 i 层电子非弹性散射的碰撞自由程; N_A 为阿伏加德罗常数, 6.02217×10^{23} ; Q 为碰撞截面, cm^2 ; M_e 为相对原子质量; ρ 为材料密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; n^i 为原子第 i 层电子的数目; E_b^i 为第 i 层电子的结合能, eV; E_e 为入射电子的能量, eV。表 3 中计算了栅网金属原子(Ni、Cr、Cu)和 15 keV 电子非弹性散射的碰撞自由程。

表 3 15 keV 电子与栅网金属原子的碰撞自由程

Table 3 Collision free path for 15 keV electrons and mesh

Atom	M_e	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	n^5	n^6	E_b^5 / eV	E_b^6 / eV	λ_c^5 / nm	λ_c^6 / nm	λ_c / nm
Ni	58.69	8.90	8	2	10.21	7.64	9.20	26.85	6.85
Cr	52.00	7.19	5	1	8.34	6.77	12.96	51.63	10.34
Cu	63.55	8.96	10	1	10.62	7.73	8.27	58.51	7.25

电子入射到金属中和原子的外围电子发生碰撞的几率远远大于与内层电子发生碰撞的几率,十几 keV 能量的电子在每次非弹性碰撞中都会损失几十到几百 eV 甚至更多的能量。15 keV 的电子入射栅网金属原子后,电子的最大碰撞自由程为 10.34 nm,在 10 μm 左右厚度的栅网里,电子和原子需要发生 10^3 次碰撞才能从背面出射,因此电子能从栅网背面逸出的几率极小。

将栅网引入条纹相机后会出现背景噪声增大的现象,噪声中杂散电子的来源尚未具体研究,除了已明确量子涨落是重要因素外,尚不清楚电子、栅网原子的弹性散射,以及电子掠入射和畸变电场的相互作用等是否是杂散电子的来源。通过研究 15 keV 电子与栅网金属原子(Ni、Cr、Cu)的非弹性散射可知,非弹性散射的二次电子不是杂散电子的主要来源。

5 结 论

电子光学仪器中的栅网因自身结构的特点,其提高加速、屏蔽电场均匀性与提高电子透过率相互矛盾。经过详细的栅网模拟得出了条纹相机中 10, 33, 50 line/mm 栅网对静电场均匀性的扰动分别为 0.31%、0.07%、0.04%,栅网附近的子透镜效应会影响电子的运动轨迹。栅网金属原子与 15 keV 电子碰撞后会发发生复杂的非弹性散射效应,二次电子的自由程比栅网丝径小很多,很难产生二次电子发射。设计用于激光聚

变诊断的精密化条纹相机等电子光学仪器时,栅网二次电子发射的影响较小,应综合考虑仪器内均匀场的建立和电子透过率来选择合适的栅网,同时也应考虑栅网阵列式子透镜效应对电子运动的影响。

参 考 文 献

- [1] Bradley D J. Recent developments in optoelectronic and spectroscopic techniques at Queen's University, Belfast[J]. Applied Optics, 1969, 8(10): 1957.
- [2] Bradley D J, Higgins J F, Key M H. Nanosecond gating of an image intensifier capable of triggered picosecond photography[J]. Applied Physics Letters, 1970, 16(2): 53-55.
- [3] Zong Fangke, Lei Baoguo, Gu Li, *et al.* Design of traveling-wave deflector for high speed streak camera[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 043201.
宗方轲, 雷保国, 顾礼, 等. 应用于高速条纹相机的行波偏转器设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 043201.
- [4] Gu Li, Zong Fangke, Li Xiang, *et al.* Designment of a femtosecond streak camera with a novel accelerating structure [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1134001.
顾礼, 宗方轲, 李翔, 等. 一种新型加速结构飞秒条纹相机的设计[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1134001.
- [5] Hui Dandan, Tian Jinshou, Lu Yu, *et al.* Streak tube with large work area and small size used in lidar detection system [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1232001.
惠丹丹, 田进寿, 卢裕, 等. 用于激光雷达的大探测面积超小型条纹管[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1232001.
- [6] Cai H Z, Zhao X, Liu J Y, *et al.* Dilation framing camera with 4 ps resolution[J]. APL Photonics, 2016, 1(1): 016101.
- [7] Bai Yanli, Long Jinghua, Cai Houzhi, *et al.* Influence of double magnetic lenses on performance of pulse-dilation framing tube[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 013201.
白雁力, 龙井华, 蔡厚智, 等. 双磁透镜对时间展宽分幅变像管性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 013201.
- [8] Lei Yunfei, Long Jinghua, Liu Jinyuan, *et al.* Design of framing image tube with large detection area[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(9): 0904009.
雷云飞, 龙井华, 刘进元, 等. 大探测面积分幅变像管设计[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0904009.
- [9] Liu J Y, Niu L H, Peng W D, *et al.* Application of a fast electrical pulse in gated multichannel plate camera[J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(5): 055104.
- [10] Tian Jinshou, Zhao Baosheng, Wu Jianjun, *et al.* Transfer property of electron pulse in a femtosecond electron diffraction system[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(1): 123-128.
田进寿, 赵宝升, 吴建军, 等. 电子脉冲在飞秒电子衍射系统中的传输特性[J]. 物理学报, 2007, 56(1): 123-128.
- [11] Liu Yunquan, Liang Wenxi, Zhang Jie, *et al.* Static properties of a femtosecond electron diffraction system[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(12): 6500-6505.
刘运全, 梁文锡, 张杰, 等. 飞秒电子衍射系统的静态特性研究[J]. 物理学报, 2006, 55(12): 6500-6505.
- [12] Pan Yongqiang, Wang Feifei, Hang Lingxia, *et al.* Simulation of grid characteristics of gridded ion energy analyzer[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33(11): 1065-1068.
潘永强, 王飞飞, 杭凌侠, 等. 栅网式离子能量分析仪中栅网特性的模拟研究[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(11): 1065-1068.
- [13] Benstead J, Moore A S, Ahmed M F, *et al.* A new streaked soft X-ray imager for the National Ignition Facility[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(5): 055110.
- [14] Zuber C, Bazzoli S, Brunel P, *et al.* Picosecond X-ray streak camera dynamic range measurement [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(9): 093501.
- [15] Wang C K, Li J, Hu X, *et al.* Realization of a flat-response photocathode for X-ray streak cameras[J]. Optics Express, 2015, 23(15): 19793.
- [16] Wang Feng, Peng Xiaoshi, Yan Yadong, *et al.* Backscattered light diagnostic technique based on Shen Guang-III laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0902011.
王峰, 彭晓世, 闫亚东, 等. 基于神光 III 主机的背向散射光诊断技术[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0902011.
- [17] Guli. Research on X-ray femtosecond streak tube design and performance improvement [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2015: 72-76, 91-92.

- 顾礼. X射线飞秒条纹变像管设计与性能提高研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2015: 72-76, 91-92.
- [18] Du Bingchu, Wang Jianru. Electron optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 117-124.
杜秉初, 汪健如. 电子光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 117-124.
- [19] Gryzinski M. Classical theory of atomic collisions. I. Theory of inelastic collisions[J]. Physics Review A, 1965, 138 (2A): 336-358.
- [20] Sevier K D. Atomic electron binding energies[J]. Atomic Data & Nuclear Data Tables, 1979, 24(4): 323-371.