

饱和情况下微通道板短脉冲信号放大特性研究

谢运涛, 张玉钧, 王 玺, 孙晓泉

(国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘 要: 采用传输线方法研究了微通道板的短脉冲信号放大特性。分析了单脉冲信号的波形畸变以及微通道增益的变化情况。当信号饱和参数大于 1 时, 脉冲前沿消耗的电荷会对脉冲后沿的放大造成影响, 造成脉冲后沿增益下降。研究了多脉冲间的互扰问题。若前一脉冲放大消耗的电荷得不到及时补充, 将影响后续脉冲的放大过程。分析了信号频率对微通道板输出特性的影响。信号单脉冲电荷量恒定的情况下, 提高信号频率将使得微通道板增益显著下降; 信号平均电流恒定时, 通道增益以及输出电流基本不随信号频率发生变化。通过脉冲激光对像增强器的辐照实验, 验证了上述分析结果的正确性。

关键词: 传输线方法; 短脉冲信号; 增益饱和; 微通道板

中图分类号: TN248 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1204005

Study on short pulse signal amplification of a microchannel plate in a saturation mode

Xie Yuntao, Zhang Yujun, Wang Xi, Sun Xiaoquan

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: The short pulse signal amplification of a microchannel plate was studied by the transmission line method. The distortion of a single pulse signal and the change of the gain of the channel were discussed in detail. When the signal saturation parameter was more than 1, charges extracted by the pulse front edge can decrease the gain of the pulse trailing edge, resulting in the decrease in the gain of the pulse back edge. In addition, the mutual interference between multiple pulses was analyzed. If the next pulse arrived before the electron charge extracted by the previous pulse was fully replenished, the amplification of the latter pulse would also be affected. The effect of signal frequency on the gain of a microchannel plate was studied. When the total charges of a single pulse were constant, increasing the signal frequency could decrease the gain of microchannel plate. And the effect of signal frequency on the gain of the microchannel was not significant for signals with a same average current. The correctness of the above analysis was verified by the irradiation experiment of pulse laser on the image intensifier.

Key words: transmission line method; short pulse signal; gain saturation; micro-channel plate

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-08-03

基金项目: 国家杰出青年基金(41605015); 脉冲功率激光技术国家重点实验室基金(SKL2016ZR06)

作者简介: 谢运涛 (1990-), 男, 博士生, 主要从事激光干扰损伤技术方面的研究。Email: wsqjian@126.com

导师简介: 孙晓泉 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光学技术方面的研究。Email: sunxq@ustc.com

0 引言

随着紫外激光技术的发展^[1-3],直升机、航空飞机以及卫星等平台上的紫外成像告警设备^[4]将面临高强度激光辐照的威胁。紫外成像告警设备中,像增强器是核心部件。对于连续光源辐照像增强器的饱和现象,王冰^[5]、Ivanov^[6]、Fraser^[7]和 Giudicotti^[8]已经开展了相关研究。脉冲激光在军事领域中应用广泛^[9],但有关脉冲激光辐照像增强器的研究,尚未查询到公开报道。研究脉冲激光辐照对像增强器输出特性的影响,对于提升干扰效果具有重要意义^[10-11]。

研究高强度光源辐照对像增强器性能的影响主要有两种方法:第一种是数值法,主要基于 Monte Carlo 法对独立电子的加速、碰撞、倍增等过程进行轨迹追踪,通过对电子进行数量、位置、轨迹等参量的统计分析,确定像增强器的性能参数。该方法被 Shymanska^[12-13]、Kruschwitz^[14]等人广泛使用,目前已经成功应用于模拟高强度入射粒子的倍增过程^[15]。由于该模型考虑了每一个粒子的倍增,包含了每一个二次粒子的随机过程,可用于描述光子计数过程。该方法的缺点是计算量大,尤其是大量电子入射微通道板时,对所有电子都进行追踪需要消耗大量的计算资源。第二种是解析法,该方法起源于 Eberhardt 离散打拿模型^[16],由 Berkin^[17]、Giudicotti^[18]进一步发展成传输线方法。该方法将像增强器内的微通道板(MCP)等效为一系列分布式无方向的电气网络,通过求解 Kirchhoff 方程得到像增强器的增益特性。

文中根据 Giudicotti 提出的传输线模型^[18],利用其关于电流倍增过程的瞬态解,研究了饱和情况下短脉冲信号的 MCP 传输特性,分析了多脉冲之间的串扰问题,得到了信号频率与 MCP 增益之间的关系,研究结果对于确定脉冲激光的工作频率,提升紫外成像告警器的激光干扰效果具有一定的参考价值。

1 短脉冲信号 MCP 传输特性

微通道板增益恢复时间一般为毫秒量级^[19],军用调 Q 激光的脉宽为纳秒量级。军用脉冲激光信号宽度远小于通道恢复时间,可视为短脉冲信号。文中采用 Giudicotti^[18]等改进的传输线方法研究短脉冲信

号的 MCP 传输特性。

1.1 传输线模型

传输线法是一种依靠模拟电路理论对物理系统进行建模分析的方法。将 MCP 等效为无限多个电阻电容的串联模型,如图 1 所示。设 MCP 总长度为 L ,电阻为 R ,电容为 C 。将其分为 n 份,每一级的电阻为 R/n ,电容为 nC 。其中, $r=R/L$, $h=1/CL$,分别表示单位长度的电阻和电容。可以看出,电流包含三部分,分别是:电阻电流 $i_s(z, t)$,电容电流 $i_c(z, t)$ 以及信号电流 $i(z, t)$ 。通道内的电压分布由 $V(z, t)$ 表示,不考虑增益饱和的影响时, $V(z)$ 沿通道轴向均匀分布,等势线始终垂直于通道轴线。

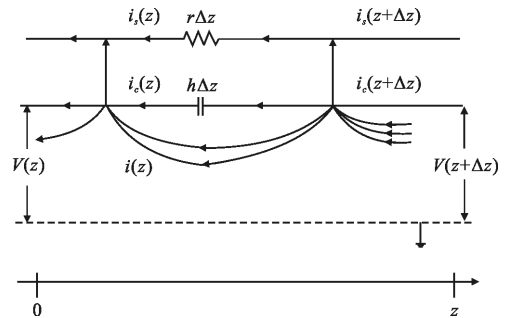


图 1 微通道板等效电路模型

Fig.1 Equivalent circuit model of microchannel plate

Giudicotti 等^[18]采用传输线方法,对上述模型进行求解,得到增益随通道轴向位置和时间变化关系,如下式:

$$G(x, t) = \exp\left\{gx + \int_0^x \ln[1 + \Psi(x', t)] dx'\right\} \quad (1)$$

$$\Psi(x, t) = \Psi(x, 0) + \frac{1}{Q_s} [Q_{w0}(t) + Q_0(t) - Q(x, t)] \quad (2)$$

式中: $Q(x, t)$ 表示通道增益随轴向位置和时间变化; $\Psi(x, t)$ 表示通道电压偏移量; $Q_s = CV_s$ 为通道中的存储电荷, C 为通道电容, V_s 为通道两端电压; g 为非饱和情况下通道增益系数,输入端信号电荷 $Q_0(t) = \int_0^t i_0(t') dt'$, $i_0(t)$ 为输入电流信号,通道内信号电荷 $Q(x, t) = \int_0^t i_0(t') G(x, t') dt'$, 墙电荷 $Q_{w0}(t)$ 可采用如下公式计算:

$$\frac{Q_{w0}(t)}{Q_s} = -\frac{Q_0(t)}{Q_s} + \frac{1}{L} \int_0^L \frac{Q(x', t)}{Q_s} dx' \quad (3)$$

式中: L 表示通道总长度。

1.2 单脉冲信号瞬态传输特性

对于短脉冲信号,信号放大过程中,通道内壁电荷的补充可以忽略不计,可由公式(1)分析其增益特性。为方便研究,引入短脉冲信号饱和参数 s ,定义如下:

$$s = \frac{Q_0 e^{gL}}{Q_s}$$

式中: e^{gL} 为非饱和情况下通道的总增益。由此, s 表示理想情况下,原本应该从通道内消耗的电荷量与初始存储于通道内的总电荷量之比。采用脉冲宽度为 50 ns, 电流幅值为 7.44×10^{-4} A, 饱和参数 $s=1$ 的矩形脉冲进行仿真。仿真对象为 LPZ-18SUVC-2T1 像增强器,其内置 MCP 的参数如表 1 所示。

表 1 MCP 性能参数

Tab.1 Parameters of MCP performance

Quantity	Symbol	Value
Length/ μm	L	320
Resistance/ Ω	R	6×10^8
Capacitor/F	C	5.29×10^{-11}
Gain factor/ m^{-1}	g	2.193×10^4
Bias voltage/V	V_s	800
Strip current/A	I_s	1.33×10^{-6}
Unsaturated gain	e^{gL}	1116

仿真得到微通道板放大后的信号波形,如图 2 所示。可以看出,脉冲形状发生了明显变化。 t_1 时刻,信号幅度为 0.83 A,对应的通道增益为 1116,与非饱和状态时的增益相等,表明微通道板尚未进入饱和状态。随着时间增加,信号幅度逐渐下降。 t_6 时刻,脉冲后沿幅度降为 0.539 A,对应的通道增益为 725,仅为非饱和时增益的 65%,通道处于增益饱和状态。

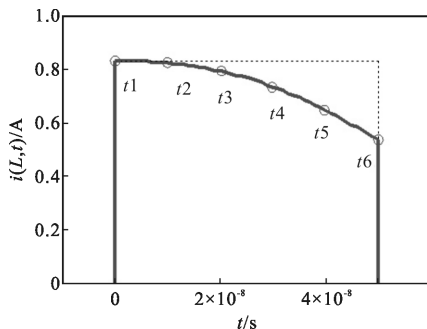


图 2 饱和与非饱和情况下的输出波形

Fig.2 Saturated and non-saturated output waveform

图 3 为不同时刻,通道增益随轴向的变化情况。可以看出, t_1 时刻,增益沿通道轴向呈指数规律增长,与非饱和时的增益变化规律完全相同。随着时间推移,增益逐步偏离指数分布。表现为,通道前端增益大于非饱和时的增益,而通道后端出现增益下降的情况。表明在脉冲后期,临近通道出口处为负增长,电子数量逐渐下降。意味着,在通道末端电子是被吸收,而不是倍增。

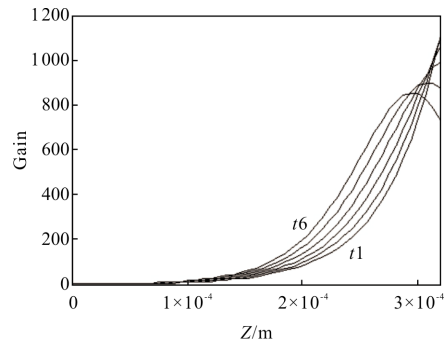
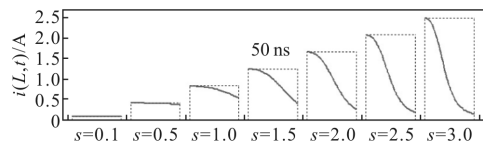


图 3 不同时刻通道增益分布图

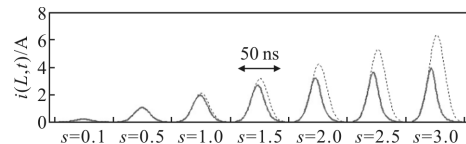
Fig.3 Gain along the channel at different times

图 4 为不同饱和参数对应的输出波形分布,图 4(a)和图 4(b)分别对应输入信号为矩形信号和高斯信号。两种信号的宽度都为 50 ns,虚线为非饱和和模式下的输出结果。可以看出,仅当饱和参数 s 大于 1 时,信号波形才会出现比较明显的变化。



(a) 矩形脉冲

(a) Rectangular pulse



(b) 高斯脉冲

(b) Gaussian pulse

图 4 不同饱和参数输入脉冲对应的输出波形

Fig.4 Output waveforms for input pulse with different saturation parameters

1.3 多脉冲信号瞬态传输特性

对短脉冲信号进行倍增之后,通道内电荷被消

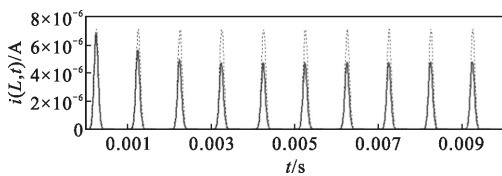
耗,导致内部电压发生偏移。此后,由于通道电荷的补充,通道内的电压将逐步恢复到原始分布。通道电压完全恢复原始状态之前,第二个脉冲的增益将受到前一个脉冲消耗电荷的影响。考虑到脉冲间隔内电荷的补充,通道增益可采用如下公式进行计算^[18]:

$$G(x, t) = \exp\left\{gx + \int_0^x \ln \left[1 + e^{-t/RC} \frac{Q_{w0}'(t) + Q_0'(t) - Q'(x, t)}{Q_s} \right] dx' \right\} \quad (4)$$

式中:R为通道电阻,输入信号电荷 $Q_0'(t) = \int_0^t e^{t'/RC} i_0(t') dt'$, 通道信号电荷 $Q'(x, t) = \int_0^t e^{t'/RC} i(x, t') dt'$, 墙电荷 $Q_{w0}'(t)$, 可采用如下公式计算:

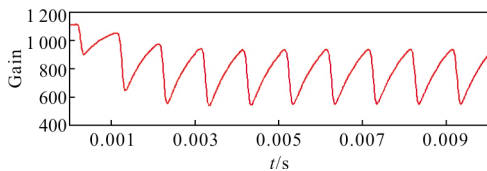
$$\frac{Q_{w0}'(t)}{Q_s} = -\frac{Q_0'(t)}{Q_s} + \frac{1}{L} \int_0^L \frac{Q'(x', t)}{Q_s} dx' \quad (5)$$

图 5 展示了脉宽为 50 μs, 单脉冲饱和参数 s=1, 频率为 1 kHz 的高斯脉冲信号的仿真结果。图 5(a) 为输出端脉冲波形随时间的变化图, 可以看出前三个脉冲峰值逐渐下降, 之后达到稳态, 后续脉冲基本处于同一高度。图 5(b) 为输出端信号增益随时间的变化图, 可以清晰地看出, 第三个脉冲之后, 信号增益随时间呈周期性变化。脉冲结束后, 通道增益逐渐恢复, 但在增益恢复至初始状态之前, 由于下一个脉冲到来, 增益又开始下降。



(a) 输出波形随时间变化关系

(a) Output waveform vs time



(b) 增益随时间变化关系

(b) Gain vs time

图 5 多脉冲信号的放大特性

Fig.5 Amplification characteristics of a multi pulse signals

1.4 脉冲频率对微通道板输出特性的影响

采用激光干扰像增强器时, 激光经光电阴极转

化为电信号, 电信号再经微通道板放大后最终成像于像增强器的荧光屏。干扰信号在荧光屏上的成像亮度越高, 对目标的压制也越强。对于不同频率的干扰激光, 由于脉冲之间的相互干扰, 信号频率对干扰信号的成像亮度有显著的影响。可采用公式(4)计算不同频率干扰信号的平均增益, 从而得到频率对通道增益的影响情况。

图 6(a)和图 6(b)分别为保持干扰信号单脉冲电荷量不变, 脉冲频率为 400 Hz~10 kHz 时, 通道增益以及输出电流随干扰信号频率变化情况, 图中五条曲线分别对应饱和参数 s 等于 0.1、0.25、0.5、1 和 2 时的情况。从图 6(a)可以看出, 单脉冲能量相同的情况下, 提高脉冲频率将使得通道平均增益显著下降。信号频率相同时, 单脉冲电荷量越大, 通道的增益越低。从图 6(b)可以看出, 单脉冲电荷量相同时, 提高脉冲频率, 通道输出电流逐渐增大, 但增长的速度越来越慢。频率相等的情况下, 单脉冲电荷量越大, 通道输出电流越大。

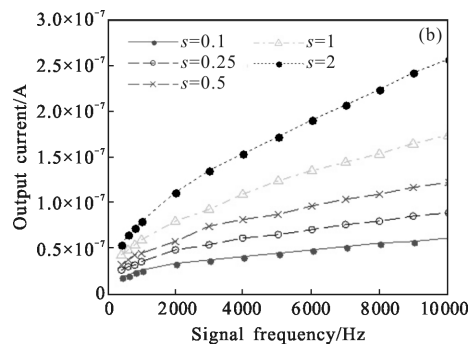
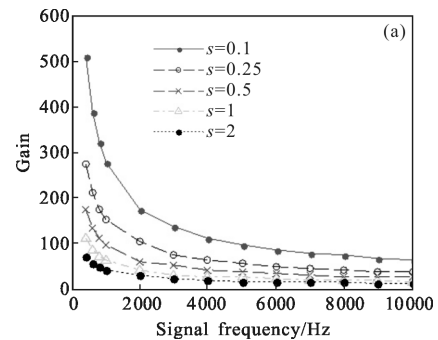


图 6 单脉冲电荷相等时通道增益(a)及通道输出电流(b)与信号频率的关系

Fig.6 Variation of average gain (a) and output current (b) as a function of signal frequencies for signals with constant charges per pulse

图 7 为干扰信号平均电流相等的情况下, 信号

频率对 MCP 增益特性的影响。图 7(a)和图 7(b)分别为干扰信号增益以及通道输出电流随信号频率的变化情况,图中四条曲线分别代表饱和参量 s 等于 0.5、0.7、1 和 2 时的情况,此时 s 定义为 $s=(i_0 e^{\mu})/I_s$ 。从图 7(a)可以看出,饱和参数越大,相应的通道增益越小。干扰信号平均电流相等的情况下,频率对通道增益影响比较小。信号频率小于 300 Hz 时,随信号频率升高,通道增益会有小幅度的提升。信号频率大于 300 Hz 时,通道增益几乎不随频率发生变化。从图 7(b)可以看出,信号饱和参数越大,通道输出电流越大。信号频率大于 300 Hz 时,通道输出电流趋于稳定,几乎不随频率发生变化。

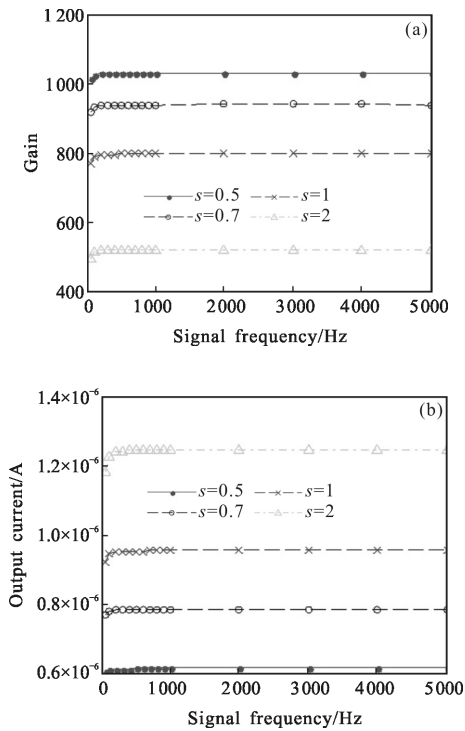


图 7 信号电流相等时通道增益(a)及通道输出电流(b)与信号频率的关系

Fig.7 Variation of average gain (a) and output current (b) as a function of signal frequencies for signals with constant currents

2 脉冲激光对像增强器干扰实验

为验证上述结果,开展了脉冲激光对像增强器的辐照实验。实验装置如图 8 所示,主要包括脉冲激光源、激光功率计、衰减片、半透半反镜、扩束器以及像增强器等器件。激光器与像增强器之间的距离为 10 m,两者光轴重合。采用分束器对主光路进行分

光,分光后,一束光照射到功率计,由功率计对激光器的输出功率进行实时监测,另一束经衰减、扩束后照射到像增强器。激光器波长为 266 nm,脉宽为 5.5 ns,单脉冲能量为 5 μ J,频率在 1~5 kHz 范围内可调。像增强器型号为 LPZ-18SUVC-2T1,像增强器光阴极在 266 nm 波长处的光谱灵敏度为 20 mA/W。

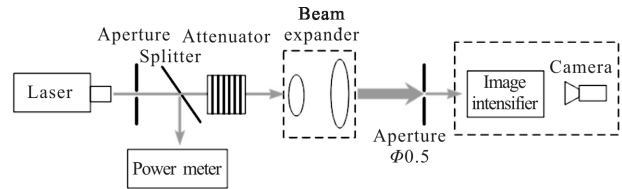
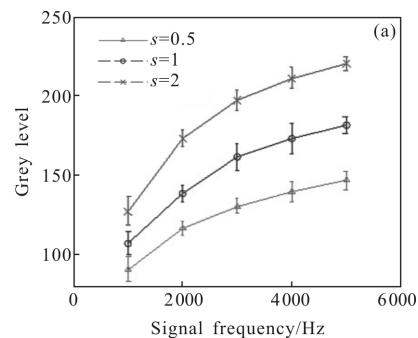


图 8 激光辐照像增强器示意图

Fig.8 Experiment schematic of laser irradiation on imager intensifier

微通道板参数如表 1 所示,经计算,单脉冲能量相等时,饱和参数 s 为 0.25、0.5 和 1 时,对应的像增强器表面激光能量密度为 0.33×10^{-5} 、 0.66×10^{-5} 、 1.32×10^{-5} J/m²。信号电流相等时,饱和参数 s 等于 0.5、1 和 2 时,对应的像增强器表面激光功率密度为 1.87×10^{-4} 、 3.73×10^{-4} 、 7.47×10^{-4} W/m²。采用工业摄像机对像增强器荧光屏进行拍摄,将荧光屏亮度转化为灰度值。为降低噪声对测量结果的影响,每次测量时均采集 30 幅图像,然后进行平均处理。

图 9(a)和图 9(b)分别为激光单脉冲能量恒定以及激光功率恒定的情况下,灰度值随激光频率的变化关系。从图 9(a)可以看出,单脉冲能量恒定时,灰度值随频率升高而升高,与图 6(b)中曲线的变化趋势相似。图 9(b)中,随着激光重复频率的升高,图像灰度值基本维持恒定。饱和参数 s 分别为 2、1 和 0.5 时,得到的图像灰度值之比约为 1.94:1.47:1。图 7(b)中,以上三种饱和参数情况下,微通道板输出电流之比为 2.02:1.55:1。两个比值非常接近,验证了上述分析结果的正确性。



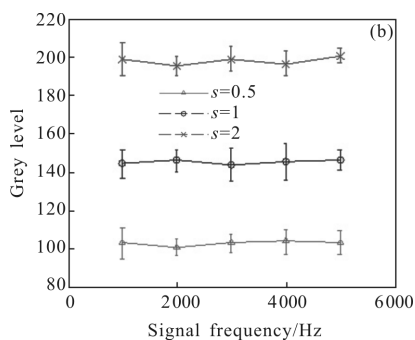


图 9 图像灰度值与信号频率的关系(a)单脉冲电荷相等, (b)信号电流相等

Fig.9 Image grey level as a function of signal frequencies for (a) signals with constant charges per pulse (b) signals with constant current

3 结 论

文中采用传输线方法研究了微通道板电子倍增的瞬态过程,分析了单脉冲信号以及多脉冲信号的MCP放大特性。结果表明,饱和情况下,通道的增益将发生明显改变,在下一个脉冲到来之前,若通道增益未恢复至初始状态,则前一个脉冲将影响后一个脉冲的放大过程。研究了脉冲重复频率对MCP增益的影响。结果表明,脉冲重复频率越高,MCP增益越低。意味着,采用脉冲激光干扰像增强器时,激光输出功率一定的情况下,当激光重复频率大于300 Hz时,继续提高激光重复频率对干扰效果的改善并不明显。但当激光单脉冲能量恒定时,重复频率越高,干扰光也越强,干扰光对目标信号的压制效果也越明显。需要指出的是,文中使用的传输线方法仅适用于分析大量电子入射,入射电流足够大的情况。对于单电子计数过程,由于存在很大的随机性,以上结论不一定成立。

参考文献:

[1] Zhang Yongsheng, Zheng Guoxin. 500 fs UV laser system and its application to fluorescence test of thin film scintillators [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19 (2): 475-481. (in Chinese)

[2] Shen Gao, Tan Huiming, Liu Fei. Optimization design for all-solid-state 355 nm continuous-wave ultraviolet laser [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(5): 731-735. (in Chinese)

[3] Mao Xiaojie. New progress in high-power picosecond ultraviolet laser[J]. Chinese Optics, 2015, 8(2): 182-190. (in Chinese)

[4] Wang Xi, Fang Xiaodong, Nie Jinsong. Military ultraviolet technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42 (S1): 58-61. (in Chinese)

[6] Wang Bing, Zhao Wei, Chai Guoqing, et al. Research on intense light disturbance to super Gen II +LLL image intensifier[J]. Infrared Technology, 2014, 36(10): 844-848. (in Chinese)

[7] Ivanov V, Insepov Z, Antipov S. Simulation of gain and timing resolution in saturated pores [J]. Nucl Instrum Methods A, 2011, 639: 158-161.

[8] Fraser G W, Pain M T, Lees J E, et al. The operation of microchannel plates at high count rates [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 1991, 306(1-2): 247-260.

[9] Giudicotti L. Time dependent model of gain saturation in microchannel plates and channel electron multipliers [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 2011, 659(1): 336-347.

[10] Wang Ming, Wang Tingfeng, Shao Junfeng. Analysis of femtosecond laser induced damage to array CCD camera[J]. Chinese Optics, 2013, 6(1): 96-102. (in Chinese)

[11] Zhao Qian, Liu Zhiguo, Wang Shicheng, et al. Jamming effect of high repetition laser on laser guidance's decoding [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44 (5):1438 - 1443. (in Chinese)

[12] Zhang Shuai, Liu Zhiguo, Wang Shicheng, et al. Research on modeling and simulation of high repetition laser jamming laser guidance weapon [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(3): 0306008. (in Chinese)

[13] Shymanska A. Effect of High-Efficiency Emitter on Noise Characteristics of Electron Amplifiers [M]. New York: Springer-Verlag, 2015.

[14] Shymanska A, Babakov V. Computational models for investigation of channel amplifier's optimal parameters [J]. Journal of Computational Electronics, 2014, 13(1): 161-169.

[15] Kruschwitz C A, Wu M, Rochau G A. Monte Carlo simulations of microchannel plate detectors. II. Pulsed voltage results [J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(2): 023102.

[16] Wang Q, Yuan Z, Cao Z, et al. Three-dimensional particle-in-cell simulation on gain saturation effect of microchannel plate [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87 (7): 073303.

- [17] Eberhardt E H. Gain model for microchannel plates [J]. *Applied Optics*, 1979, 18(9): 1418-1423.
- [18] Berkin A B, Vasil'ev V V. A new approach to modeling current amplification in the channel of a Microchannel plate [J]. *Technical Physics Letters*, 2007, 33(8): 664-666.
- [19] Giudicotti L, Talli G. Transmission line modeling of gain saturation in microchannel plate detectors [C]//*SPIE*, 2000, 156(5): 274-278.
- [20] Pan J S, Qi L, Xiao H L, et al. Influence analysis of saturation effect of microchannel plate on dynamic range of streak cameras [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61 (19): 194211.