

# Ka 波段同轴多注相对论速调管的电子束引入\*

党智伟<sup>1,2</sup>, 李士锋<sup>1,2</sup>, 王战亮<sup>1</sup>, 黄 华<sup>2</sup>, 王腾钊<sup>2</sup>, 刘振帮<sup>2</sup>, 宫玉彬<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学 电子科学与工程学院, 成都 610054;

2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 首先通过理论分析确定影响多注电子束引入效率的主要因素, 确定初步的结构参数; 其次利用三维粒子模拟软件建立 Ka 波段相对论多注二极管模型进行仿真优化, 使电子束引入效率达到 89%; 并开展了电子束的产生与传输实验研究, 验证了粒子模拟仿真结果。在电子束电压 502 kV、束流 4.34 kA、轴向磁感应强度 0.76 T 的条件下, 电子束引入效率达到了 72%, 由电子束轰击尼龙靶材获得的电子束束斑图表明, 电子束在产生与传输过程中形状未发生畸变, 产生的电子束直径约为 2 mm。模拟和实验研究验证了设计的强流多注二极管可以产生高品质的电子束和实现高效率的电子束引入。

**关键词:** 高功率微波; 同轴多注相对论速调管; 相对论多注二极管; 多注电子束引入

中图分类号: TN62

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190192

## Electron beam introduction of Ka-band coaxial multi-beam relativistic klystron amplifier

Dang Zhiwei<sup>1,2</sup>, Li Shifeng<sup>1,2</sup>, Wang Zhanliang<sup>1</sup>, Huang Hua<sup>2</sup>, Wang Tengfang<sup>2</sup>, Liu Zhenbang<sup>2</sup>, Gong Yubin<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on High Power Microwave Technology, Institute of Applied Electronics,

China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** This paper firstly determines the main factors affecting its the efficiency of multi-injection electron beam introduction and preliminary structural parameters through theoretical analysis. Secondly, the Ka-band relativistic multi-beam diode model is established by three-dimensional particle simulation software to optimize the structural parameters. The final efficiency of electron beam introduction can reach 89%. An experimental study on the generation and transmission of electron beams was carried out to verify the results of particle simulation. Under the condition of electron beam voltage 502 kV, beam current 4.34 kA, axial magnetic induction strength 0.76 T, the electron beam introduction efficiency reached 72%. The electron beam pattern obtained by electron beam bombardment of the nylon target indicates that the shape of the electron beam is not distorted during generation and transmission. The generated electron beam diameter is about 2 mm. The simulation and experimental results show that the designed high-current multi-beam diode can generate high-quality electron beams and achieve efficient electron beam introduction.

**Key words:** high power microwave; coaxial multi-beam relativistic klystron; relativistic multi-beam diode; introduction of multi-beam electron beam

相对论速调管放大器(RKA)是一种高效率、高增益、输出信号相位和幅度稳定的高功率微波器件, 在高性能粒子加速器、高功率雷达、新型通信系统等方面有着重要的应用<sup>[1-2]</sup>。目前, RKA 研究主要集中在 L, S, X 等工作频段。中国工程物理研究院刘振帮团队<sup>[3-5]</sup>设计了 GW 级 X 波段同轴多注 RKA, 在实验中实现了 2.2 GW 的功率输出, 是目前国际上在 X 波段输出功率最高的 RKA。随着毫米波科学与技术的发展, 需要 RKA 往 Ka 波段甚至更高频段发展。为了产生 Ka 波段高功率微波放大, 李士锋等人<sup>[6]</sup>设计了 GW 级 Ka 波段大尺寸同轴 RKA 并开展了初

\* 收稿日期: 2019-05-30; 修订日期: 2019-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(61531010, 11605191); 国家重点实验室基金项目(9140A23010415DZ02001)

作者简介: 党智伟(1994—), 男, 硕士研究生, 从事高功率微波器件方面的研究; 670380664@qq.com。

通信作者: 王战亮(1978—), 男, 副教授, 从事高功率微波器件方面的研究; wangzl@uestc.edu.cn。

步研究,但是研究表明,同轴漂移管对 TEM 模式不截止容易导致自激振荡产生。在 Ka 波段,同轴多注 RKA 继承了同轴高频结构的高功率容量优点,采用的圆柱漂移管可以截止  $TM_{01}$  模式、TEM 模式和高阶 TE 模式,从而抑制自激振荡并解决了内导体支撑问题<sup>[7]</sup>。在同轴多注 RKA 中,电子束的产生、成形和聚焦直接影响整个器件的效率<sup>[8]</sup>,然而多注 RKA 二极管内部结构和场形分布复杂,导致强流相对论电子束引入效率低,是影响多注 RKA 整管效率的重要因素<sup>[9]</sup>,所以二极管中高品质电子束产生和高效率引入对 Ka 波段同轴多注相对论速调管的研究来说至关重要。本文通过理论分析影响强流多注电子束引入效率的主要参数,采用仿真软件对 Ka 波段多注二极管参数进行优化,并进行电子束引入实验,以验证其可行性。

## 1 多注二极管参数选择

### 1.1 结构模型

用于 Ka 波段同轴多注 RKA 的多注二极管模型如图 1 所示,该模型由阴极底座、阳极筒、多注阴极和一段漂移管构成。由于实验平台条件限制,阳极筒外径为 150 mm。在电子束的束流不超过漂移管空间电荷限制流的情况下,为了增加电子束总电流,电子束数目选为 26 注。选择多注阴极环绕半径为 27.7 mm,每注阴极直径为 1.2 mm。根据冷阴极爆炸发射理论,阴极底座材料选择不锈钢,多注阴极材料选择石墨。

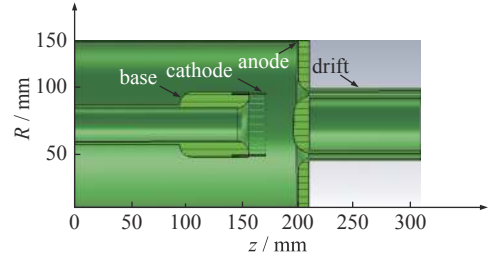


Fig. 1 Schematic of multi-beam diode

图 1 多注二极管结构示意图

### 1.2 结构参数的确定

多注二极管阴极的电子束产生方式为爆炸发射。爆炸发射最初从场致发射开始,因此,可以从场致发射近似得出爆炸发射与多注二极管阴极几何结构的关系。由 Fowler-Nordheim 公式得<sup>[10]</sup>

$$j = k_1(\beta E_0)^2 e^{-k_2/\beta E_0} \quad (1)$$

式中: $j$  为场致发射束流密度; $k_1, k_2$  为常数,取决于金属中电子的逸出功函数; $E_0$  为宏观场强; $\beta$  为电场放大倍数。由式(1)可知,电场放大倍数  $\beta$  不变的情况下, $E_0$  的选择将影响发射电流大小。 $E_0$  的大小与二极管电压  $V$ 、阴阳极间距  $D$  的值有关,因此二极管电压  $V$ 、阴阳极间距  $D$  的值将影响发射电流大小。简化几何形状突起的情况下,将多注阴极近似为底座上的微小凸起,使得电场局部增强,得到电场放大倍数  $\beta$  与单注阴极几何参数的关系

$$\beta = \frac{L}{r} + 2 \quad (2)$$

式中: $L$  为多注阴极长度; $r$  为多注阴极半径。由式(2)可知,阴极半径  $r$  不变的情况下,阴极长度  $L$  的选择将影响  $\beta$ ,从而影响发射电流的大小。

电子束产生后,在静电力的排斥作用下,电子束趋向于发散,须外加均匀聚焦磁场,维持束流形状,并引导其进入漂移管。由均匀磁场强度与束流半径公式<sup>[11]</sup>得

$$R_b^2 = \frac{r_0^2}{\sqrt{1 - \frac{L_0^2}{R_b^2}}} \quad (3)$$

$$L_0^2 = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\gamma \beta} \frac{e \eta_0 I}{e c B_0} \frac{m c^2}{e c B_0} \quad (4)$$

式中: $R_b$  为单注束流半径; $r_0$  为电子产生位置的半径; $\gamma$  为相对论因子; $e$  为电子带电量; $\eta_0$  为真空阻抗; $I$  为总电流; $m$  为电子质量; $c$  为真空中光速; $B_0$  为磁场强度。最终束流半径确定为

$$R_b^2 = \frac{1}{2} (L_0^2 + \sqrt{L_0^4 + 4r_0^4}) \quad (5)$$

由式(5)可得,束流半径随  $L_0$  单调递增,因此对给定  $r_0$ ,在引导磁场或动能增加时,磁场对电子束约束增加,束流半径将减小,使电子束在传输过程中不易发散,提高引入效率。

在初始结构参数  $L=8$  mm,  $D=35$  mm,  $B_0=0.8$  T,  $V=400$  kV 时,分别在多注阴极发射端口(图 1 中  $z=170$  mm)、

阳极端面(图1中  $z=196\text{ mm}$ )、漂移管入口(图1中  $z=210\text{ mm}$ )以及漂移管末端位置(图1中  $z=310\text{ mm}$ )设置监测面,得到如图2所示的电子束斑图。束斑图电子束界面形状不规则且连接严重,需要优化其参数。

## 2 多注二极管优化

### 2.1 各参数对电子束引入效率的影响

由上述理论分析,通过改变多注阴极长度  $L$ 、引导磁场强度  $B_0$ 、二极管电压  $V$  以及阴阳极间距  $D$  研究其对多注电子束引入效率的影响。

根据理论分析,多注阴极前端会有局部电场增强现象。图3为阴极前端电场分布图,阴极前端电场明显强于阴极底座,与理论推导相符。表1为多注阴极长度对电子束引入效率的影响,当阴极长度增加时,发射总束流增加,阴极底座与阳极的间距将会增加,使阴极底座发射电流减小,电子束引入效率增加。由于阴极是石墨材料且直径较小,长度过长易折断,因此在保证能够实现加工装配的前提下,应尽量增加阴极长度以提高其引入效率。由表1仿真结果,确定多注阴极长度为  $15\text{ mm}$ 。

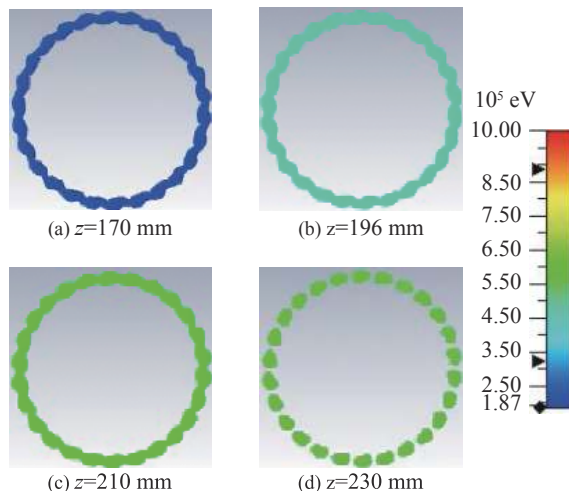


Fig. 2 Initial multi-beam electron beam  
图2 初始多注电子束斑图

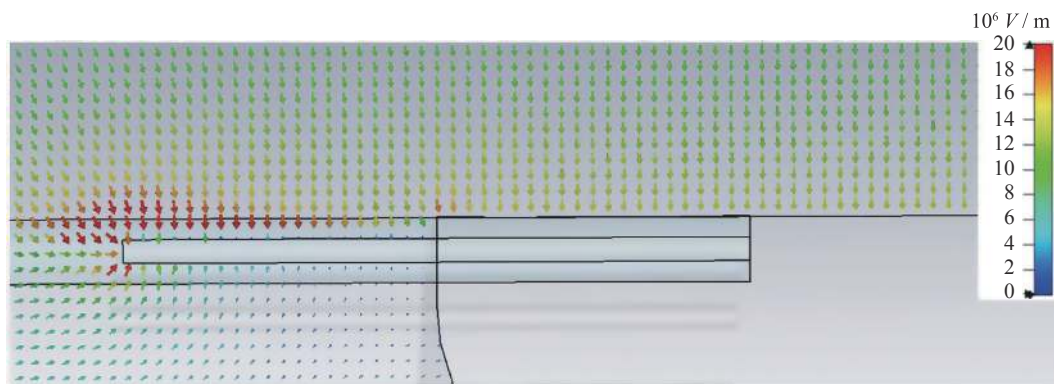


Fig. 3 Electric field distribution on cathode  
图3 阴极电场分布

在确定多注阴极长度为  $15\text{ mm}$  情况下,研究磁场强度对电子束引入效率的影响如表2所示。引导磁场增加,注入漂移管的电流增加,引入效率增加。磁场强度对电子束引入效率的仿真结果与式(5)理论分析相符,确定磁场强度为  $1\text{ T}$ 。

表1 多注阴极长度对引入效率的影响

Table 1 Effects of multi-beam cathode length on injection efficiency

$L/\text{mm}$	total beam current/kA	drift tube current/kA	efficiency/%
8	5.56	3.9	70.1
10	5.65	4.2	74.3
15	5.76	4.4	76.4

表2 磁场强度对引入效率的影响

Table 2 Effects of magnetic field intensity on injection efficiency

$B_0/\text{T}$	total beam current/kA	drift tube current/kA	efficiency/%
0.8	4.36	3.3	75.7
0.9	4.33	3.6	83.1
1.0	4.35	3.7	85.1

表3 电压对引入效率的影响

Table 3 Effects of voltage on injection efficiency

$V/\text{kV}$	total beam current/kA	drift tube current/kA	efficiency/%
400	3.12	2.7	86.5
500	4.35	4.1	86.3
600	5.64	4.8	85.1

在确定多注阴极长度为  $15\text{ mm}$ , 磁场为  $1\text{ T}$  情况下,研究电压对电子束引入效率的影响如表3所示。在  $V=400\text{ kV}$  时,注入功率仅有  $1.08\text{ GW}$ ,无法产生需要的电子束功率;在  $V=600\text{ kV}$  时,会产生过大的束流,使空间电荷力增加,反而会导致引入效率的降低。因此选择  $V$  为  $500\text{ kV}$ ,既保证了电子束功率,也不会导致引入效率的降低。

在确定多注阴极长度为 15 mm、磁场为 1 T、电压为 500 kV 的情况下,研究阴阳极间距对电子束引入效率的影响。其结果显示,阴阳极间距增加,总束流有所降低,阻抗提高,引入效率有所降低。为了保证引入效率,最终选择阴阳极间距为 25 mm。

### 2.2 仿真结果分析

通过参数优化,在参数  $L=15\text{ mm}$ ,  $D=25\text{ mm}$ ,  $B_0=1\text{ T}$ ,  $V=500\text{ kV}$  时,得到了经过参数优化后的二极管电子束斑图,如图 4 所示。与图 2 对比,优化后的束斑图电子束截面形状规则不连接,束流品质良好,引入效率提高。图 5 为优化参数后二极管的总束流与引入漂移管的电流图。通过对二极管参数优化,由表 4 可知,电子束引入效率可达到 89%。从仿真上验证了 Ka 波段多注二极管电子束高效率引入的可行性。

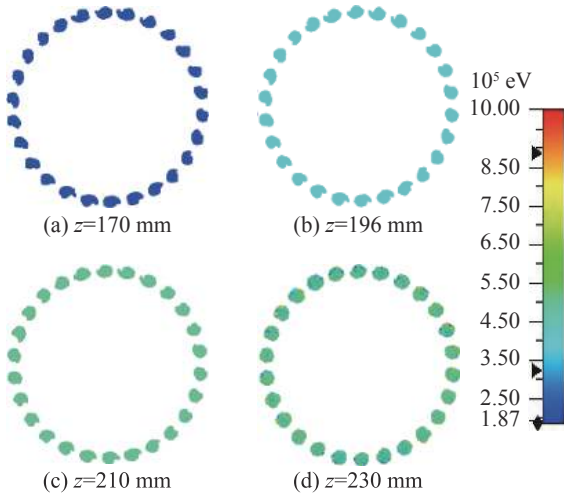


Fig. 4 Optimized multi-beam electron beams

图 4 优化后的多注电子束斑图

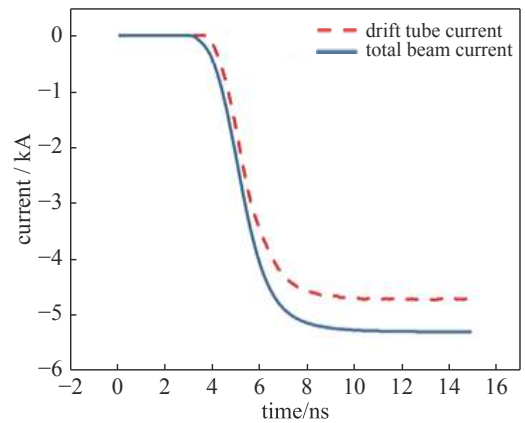


Fig. 5 Total beam current and drift tube current

图 5 总束流与引入电流曲线图

表 4 阴阳极间距对引入效率的影响

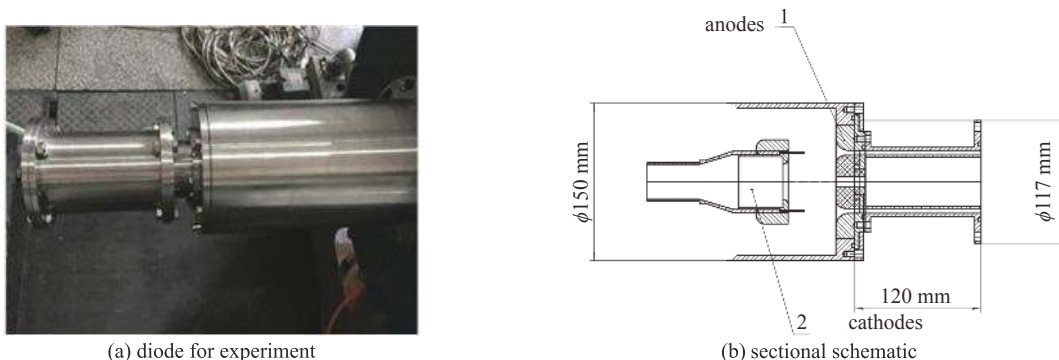
Table 4 Effects of distance between anode and cathode on injection efficiency

$D/\text{mm}$	total beam current/kA	drift tube current/kA	efficiency/%
25	5.28	4.7	89.0
30	4.75	4.1	86.3
35	4.35	3.7	85.0

## 3 强流相对论多注电子束产生的实验研究

### 3.1 实验装置

根据仿真模型,设计多注二极管实验装置和内部结构如图 6(a)所示,图 6(b)中 1 为阳极系统,2 为阴极系统。实验中使用不锈钢阴极底座,电子注数目为 26 注,每注阴极直径为 1.2 mm,长度为 15 mm,阴极实物图如图 7 所示。分别在漂移管前端口(图 1 中  $z=210\text{ mm}$ )和漂移管末端口(图 1 中  $z=310\text{ mm}$ )放置尼龙挡板获取电子束斑,



(a) diode for experiment

(b) sectional schematic

Fig. 6 Photo of the diode for experiment and its sectional schematic

图 6 实验装置和实验结构

在漂移管末端接法拉第筒用以测量注入漂移管束流。法拉第筒电流、总束流和束压信号经过衰减器衰减后由示波器记录读取。整个系统处于聚焦磁场中,由于实验平台条件限制,磁场强度最高可到 0.76 T,实验真空度为  $1.2 \times 10^{-2}$  Pa。

### 3.2 实验结果

实验中,阳极筒后接长度为 100 mm 的多注漂移管,实验波形图如图 8 所示。阴阳极电压为 502 kV 时,阴极发射总束流为 4.34 kA,法拉第筒测得束流为 3.12 kA,电子束引入效率为 72%。漂移管前端束斑如图 9(a) 所示,电子束形状规则不连接且分布均匀,说明大部分电子都集中在漂移管端口处。然而根据观察,束斑板边缘有浅黄色束斑,说明仍有少量电子没有进入漂移管,分析认为,此为实验效率与模拟效率之间存在误差的主要原因,在后续研究中需要提高磁场强度并对二极管结构进一步修改和完善。图 9(b) 为电子束在漂移管末端的束斑图,可观察到电子束在漂移管中传输一段距离后,电子束在产生与传输过程中形状未发生畸变,产生的电子束直径  $d$  约为 2 mm,电子束半径与漂移管半径比为 0.43,满足同轴多注 RKA 设计要求。



Fig. 7 Cathodes of the diode  
图 7 阴极实物图

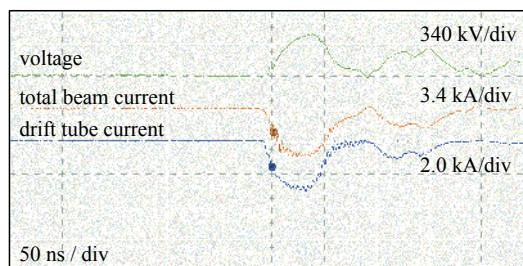


Fig. 8 Experimental waveforms  
图 8 实验波形图



(a) on the drift tube port



(b) on the drift tube end

Fig. 9 Multiple electron beam spots on the drift tube port and on the drift tube end  
图 9 漂移管端口和末端的束斑

## 4 结 论

本文通过理论分析、模拟仿真与实验验证,对 Ka 波段同轴多注 RKA 的电子束高效率引入的可行性进行了研究。通过对多注二极管参数的仿真优化,有效抑制了多注电子束之间的连接,能够注入形状规则的电子束,使电子束引入效率达到 89%。并通过电子束引入实验,得到初步实验结果,在电子束电压 502 kV,束流 4.34 kA,轴向磁感应强度 0.76 T 的条件下,得到了引入效率为 72% 的高束流品质的电子束。研究结果表明,Ka 波段多注二极管能产生高引入效率和高束流品质的电子束,为后续开展 Ka 波段同轴多注 RKA 器件的研究提供了稳定的多注电子束。

### 参考文献:

- [1] Benford J, Swegle J A. 高功率微波[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 293-335. (Benford J, Swegle J A. High power microwaves. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 293-335)
- [2] Robert J B, Edl S. 高功率微波源与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 57-63. (Robert J B, Edl S. High power microwave sources and technologies. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 57-63)

- [3] 黄华, 范植开, 马乔生, 等. 长脉冲相对论速调管放大器的初步实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(6): 915-919. (Huang Hua, Fan Zhikai, Ma Qiaosheng, et al. Progress on a long pulse relativistic klystron amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(6): 915-919)
- [4] Huang Hua, Chen Zhaofu, Li Shifeng, et al. Investigation on pulse-shortening of S-band, long pulse, four-cavity, high power relativistic klystron amplifier[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26: 033107.
- [5] Liu Zhenbang, Huang Hua, Jin Xiao, et al. Investigation of an X-band long pulse high-power high-gain coaxial multibeam relativistic klystron amplifier[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66: 722-728.
- [6] Li Shifeng, Duan Zhaoyun, Huang Hua, et al. Extended interaction oversized coaxial relativistic klystron amplifier with gigawatt-level output at Ka band[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25: 043116.
- [7] 刘振帮, 金晓, 黄华, 等. X波段长脉冲同轴多注相对论速调管放大器的分析与设计[J]. 物理学报, 2012, 61: 128401. (Liu Zhenbang, Jin Xiao, Huang Hua, et al. Analysis and design of X-band coaxial multi-beam relativistic klystron amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61: 128401)
- [8] 丁耀根. 大功率速调管的设计制造和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 129-132. (Ding Yaogen. Design, manufacture and application of high power klystron. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 129-132)
- [9] 李乐乐, 黄华, 刘振帮, 等. 强流多注电子束高效率引入的模拟研究[J]. 强激光与电子束, 2016, 28: 123003. (Li Lele, Huang Hua, Liu Zhenbang, et al. PIC simulation of high efficient injection of intense relative multi-beam[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 123003)
- [10] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 186-187. (Liu Xisan. High pulsed power technology. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 186-187)
- [11] 雷维·夏奇特. 周期与准周期结构中的束波互作用[M]. 黄华, 何琥, 王冬, 等, 译. 北京: 中国原子能出版社, 2018: 122-125. (Levi S. Beam-wave interaction in periodic and quasi-periodic structures. Huang Hua, He Hu, Wang Dong, et al, Trans. Beijing: Atomic Energy Press, 2018: 122-125)