

大功率太赫兹返波管的数值模拟研究

张海¹, 王建国^{1,2}, 童长江²

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西北核技术研究所, 710024, 西安)

摘要: 为了提升传统超高频小功率返波管的工作频率和输出功率, 提出了一种过模表面波太赫兹返波管的紧凑结构. 其中, 慢波系统是在一段过模圆柱波导内壁沿圆周方向平行挖去若干个均匀环形槽构成的, 相邻槽间距固定不变. 该结构较之传统的单模结构能有效地降低管内电场强度、避免场击穿, 提高系统在太赫兹频段的功率容量. 采用数值模拟的方法对该慢波系统的结构参数进行了筛选, 最终选取波导内半径为 2 mm、槽深为 0.2 mm、槽宽为 0.6 mm、单周期长度为 1 mm, 共采用 17 个周期. 利用 2.5 维粒子模拟程序对系统进行了热测实验, 在电子注电压为 550 kV、电子注电流为 350 A 的条件下, 模拟得到了 14.4 MW 的峰值功率输出, 其能量转换效率达到 7.5%, 振荡频率高于 0.14 THz, 时域波形及频谱特性良好.

关键词: 大功率; 太赫兹返波管; 表面波; 慢波系统; 2.5 维粒子模拟

中图分类号: TN128 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)12-1446-15

Numerical Simulation Research on High Power Terahertz Backward Wave Oscillator

Zhang Hai¹, Wang Jianguo^{1,2}, Tong Changjiang²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: In order to increase the work frequency and output power capacity of the conventional microwave backward wave oscillator (BWO), a compact high power THz BWO was proposed. This THz BWO consisting of a large cross-section slow wave system operated as an overmoded surface wave oscillator. The slow wave system (SWS) was constructed as follows: a series of annular slots were formed in parallel in the Phi direction along the inner wall of an overmoded cylindrical wave guide, and the distance between every two slots was equivalent. This kind of SWS decreased the field strength in the structure efficiently and enhanced the power capacity of the device obversely in the THz regime. The structural parameters were optimized with the numerical simulation method, and a set of best parameters were presented. The hot test simulation of the device was implemented with the 2.5-dimensional particle-in-cell simulation programme. Under the condition of 550 kV voltage and 350 A current, the output power of 14.4 MW was achieved at the frequency of 0.146 THz. And an efficiency of 7.5% was also obtained with a perfect time plot and fine spectrum characteristic.

Keywords: high power; terahertz backward wave oscillator; surface wave; slow wave system; 2.5-dimensional particle-in-cell simulation

太赫兹(THz)波是指频率在 0.1~10 THz(波长为 3 000~30 μm)范围内的电磁波^[1]. 它在长波

段与毫米波(亚毫米波)相重合,而在短波段则与红外线相重合.由于在频谱中所处的特殊位置(处于宏观经典理论向微观量子理论的过渡区),太赫兹波具有一系列不同于其他电磁辐射的特殊性质以及与之相关的重要应用^[2-3].

然而,由于缺乏高效、稳定的辐射源,THz 科学技术的发展受到很大的限制^[4].目前,自由电子激光器是性能较好的宽带可调 THz 辐射源之一^[5],但该系统体积庞大、造价昂贵,不适合一般的研究实验和商业应用.非线性差频技术是另一种很有潜力的 THz 辐射技术^[6],可是该技术产生的 THz 辐射功率很小(一般为 mW 量级),且多为窄脉冲形式,不能适用于大功率长脉冲应用场合.自 2000 年起,THz 真空电子学有了很快的发展并取得了重要的成果^[7-9].到目前为止,仅真空电子学及等离子体电子学的方法可以产生大功率长脉冲太赫兹辐射.本文在传统真空返波管设计基础之上,引入过模结构^[10-11]和表面波^[12]等机制,使得管内电场强度减小、击穿阈值增高、注-波相互作用效果增强,输出功率和振荡频率大幅度提高.

1 THz 返波管的作用原理及其关键技术问题

图 1 为 THz 返波管(THz BWO)的示意图,主要包括:电子枪、截止颈、慢波系统和磁场系统等.其中,慢波系统是返波管的注-波相互作用区,它的作用是把结构波(即慢波系统中传输的复杂行波)的相速 v_p 减小到小于真空中的光速,即 $v_p < c$,使结构波相速 v_p 和电子速度 v_e 能够满足同步条件,即 $v_p \approx v_e$.由于周期性慢波系统的每一个模式或结构波都包含着无穷多个空间谐波,电子注实际上是与其中某一个模式(如 TM_{01} 模)的负一次空间谐波发生相互作用,从而产生和放大微波.

工作时,由电子枪产生的薄的环形电子注在强磁场引导下,经过截止颈,进入慢波系统与结构波的负一次空间谐波相互作用.先进入慢波系统的电子注与结构波发生作用,产生微波.辐射的能量沿着与电子注运动方向相反的方向传播,进一步与随后进入的电子注相互作用,形成正反馈,这样微波被迅速放大,直至达到非线性饱和.最后,微波在慢波系统的起始端被截止颈反射,重新经过慢波系统后进入传输波导和模式转换器、天线辐射系统.

THz 返波管是一个非常复杂的物理系统,其设

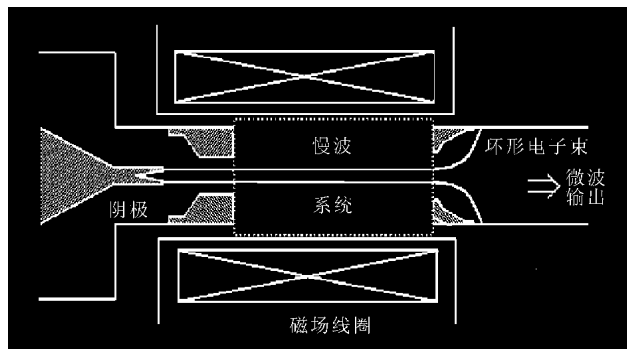


图 1 THz 返波管的示意图

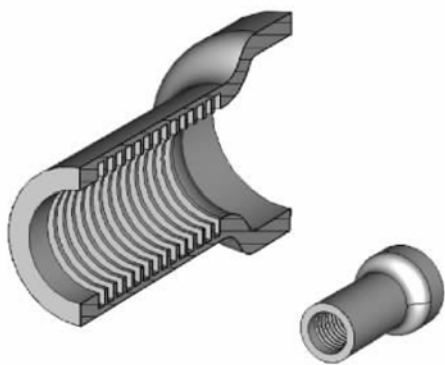
计中需要解决的关键技术如下:新型慢波结构的设计,即采用何种慢波结构,使之具有涵盖 0.14 THz 频率的高频特性,并使其结构波与强电流相互作用能产生兆瓦级的辐射功率;电子光学系统的设计和高发射电流密度、长寿命阴极的制备;注-波相互作用非线性过程的理论分析及计算机模拟等.本文给出了在研究 0.14 THz 兆瓦级 THz 返波管方面取得的初步进展,着重计算了慢波系统的色散特性及系统输出功率.

2 研究方法及初步计算结果

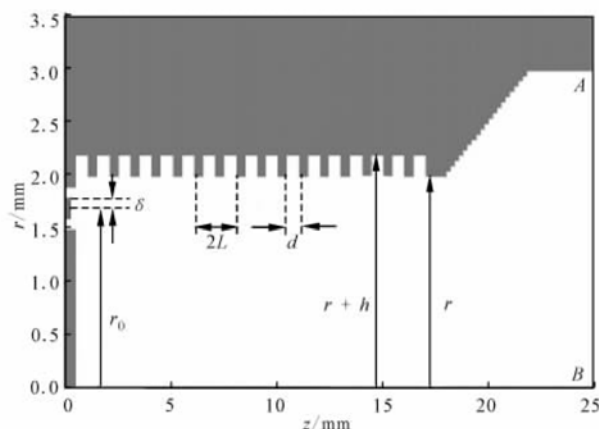
2.1 慢波系统色散特性研究

返波管所能使用的慢波系统种类繁多,根据所要达到的设计目标,本文采用如图 2 所示的慢波系统.它是在半径为 r 的圆柱波导(由理想导体构成)内壁沿 ϕ 方向平行挖去若干个均匀环形槽构成的.该系统是旋转对称结构,其纵剖面如图 2b 所示,结构参数如下:圆柱波导的内半径为 r ;环形槽的宽度为 d 、深度为 h ;慢波结构单周期的空间长度为 L ,共采用 17 个空间周期;阴极中心位于半径为 r_0 的轴线上,它将产生厚度为 2δ 的均匀环形电子注.

根据返波管理论^[13],慢波系统中沿 Z 轴传播的复杂行波沿横截面方向,即 r 方向成指数衰减状态,即随着与波纹壁距离的增大,轴向电场强度 E_z 将逐渐降低.当 $\beta L = \pi$ (β 是慢波系统中行波的相位常数),即系统工作在 π 模式时,管内的电磁波将几乎完全集中在矩形波纹壁表面附近^[11-12].也就是说, E_z 的幅值在接近于波纹壁处最大,而在远离波纹壁时迅速降低.这时,管内电磁波具有“表面波”的性质,工作在该模式的 BWO 便称为表面波振荡器(SWO),本文所研究的对象便是这种 SWO, π 点是我们所关心的工作点.同时,为了提高管子的功率容量,避免器件内部场击穿,本文选择“过模”慢波系统



(a)慢波系统的三维结构图



(b)完整慢波系统的二维结构图

图2 THz BWO慢波系统结构图

(即 $D/\lambda \geq 2$, 其中 D 为慢波系统的平均直径, λ 为所产生电磁波的工作波长), 在该慢波系统中, 存在如下色散关系

$$\beta L = \pi \quad (1)$$

$$\beta \lambda_g = 2\pi \quad (2)$$

$$\lambda_g f = v_p \quad (3)$$

式中: λ_g 和 v_p 分别为该慢波系统中结构波的一1次空间谐波的导波波长和相速度; f 为结构波的频率。由式(1)~式(3)可得

$$L = v_p / f \quad (4)$$

由慢波系统的理论分析^[13]可知, 增加波纹壁深度 h , 可以有效地降低结构波的相速度 v_p , 同时也将导致 π 点的频率值 f 降低。结合式(4), 为了保证相速度有效降低的同时振荡频率亦能满足要求, 必须减小周期长度 L 。可见, L 和 h 对该慢波系统的色散特性有着非常显著的影响。下面, 选取结构参数 $r=2$ mm, $d=0.6$ mm, 计算不同周期长度 L 时, π 点的频率随槽深 h 的变化情况, 结果如表1所示。

从表1中可以看出, 随着波纹深度 h 的增加, 一1次空间谐波的频率有所降低, 同时在相同深度 h

表1 不同周期长度及槽深时 π 点频率的变化情况

h/mm	f/GHz		
	$L=0.95$ mm	$L=1$ mm	$L=1.05$ mm
0.150	165.2	158.0	151.4
0.200	155.0	148.5	143.7
0.225	149.1	144.2	140.0
0.250	144.4	140.0	135.3

时(例如: $h=0.200$ mm), 谐振频率 f 则随空间周期 L 的减小而增加, 这两点与理论分析的结论基本一致。根据表1所得数据, 并综合考虑目前最高加工精度水平(即加工误差在 ± 0.05 mm 之间)以及实际实验条件的限制, 选择 $L=1$ mm、 $h=0.2$ mm 作为分析和实验对象。也就是说, 慢波系统的几何参数 $r=2$ mm、 $L=1$ mm、 $d=0.6$ mm、 $h=0.2$ mm。在该组参数下, 慢波系统色散曲线的模拟结果如图3所示。由图3可以看出, π 点的频率近似为 149 GHz, 与理论计算值(148.5 GHz)近似相等。

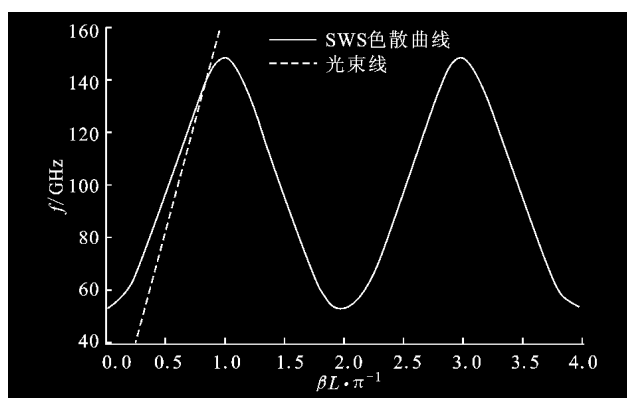


图3 系统色散曲线数值模拟结果

2.2 THz 返波管粒子模拟及结果分析

THz 返波管是一个多参数系统, 这些参数包括慢波系统的几何参数、电子能量、电子束半径、结构波的相速和群速、起振电流大小、引导磁场大小等。实际有效的大功率太赫兹返波管是工作于一个稳定的非线性状态, 和线性状态相比, 这种状态具有更高的微波输出功率和转换效率。为了合理地控制这些非线性因素, 获得高功率和高转换效率, 目前最有效的方法是建立非线性模型并进行数值模拟仿真。

本文采用 2.5 维全电磁粒子模拟程序, 对所提出的 THz 返波管进行了初步的仿真实验。根据慢波系统的色散特性和实际加工精度水平, 为了确保在加工误差范围内, 振荡频率始终满足 $f \geq 0.14$ THz 的要求, 选取如下仿真参数 $r=2$ mm, $r_0=1.7$ mm, $\delta=0.1$ mm, $L=1$ mm, $d=0.6$ mm, $h=0.2$ mm,

$U_0=550$ kV, $I_0=350$ A, 仿真时间总长 $T=8$ ns, 其中, U_0 和 I_0 分别为电子注电压和电流。

引导磁场的分布模拟实际螺线管磁场, 仅有的 z 和 r 方向分量为

$$B_z(z, r) = \frac{B_0}{1 + \exp(z - z_a/z_b)} \quad (5)$$

$$B_r(z, r) = \frac{B_0}{2z_a} \frac{1 + \exp(z - z_a/z_b)}{[1 + \exp(z - z_a/z_b)]^2} r \quad (6)$$

式中: $B_0=2.5$ T. 调节 z_a 和 z_b 的值可保证废电子打在输出管壁上。

同时, 在模型左端设置了理想导体板, 其作用与“截止颈”类似。由电子注所产生的 THz 电磁波在此处被完全反射, 从而沿着 z 轴正向传播。最后, 在右侧输出窗口(半径为 AB)处设置完全匹配层进行吸收, 同时测定输出功率、转换效率等物理量。

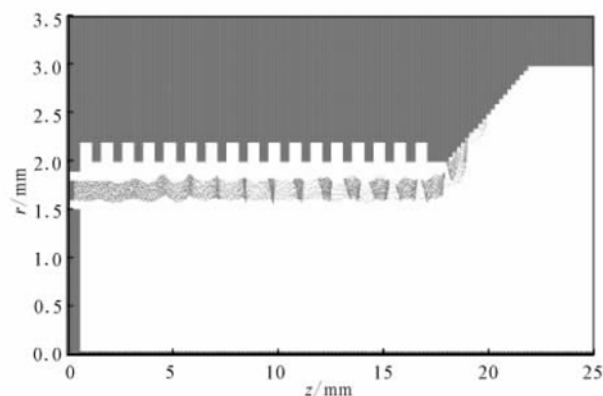
图4为 $t=8$ ns 时, THz 返波管中粒子模拟程序中电子运动的相空间图。从图4a中可以清楚地看到, 在上述给定的结构参数和电子注参数下, 由阴极发射的均匀电子注在管内同结构波相互作用, 受到良好的速度调制和密度调制, 群聚效果理想。图4b所示为 $t=8$ ns 时电子注能量沿 z 轴的分布情况。从图中亦可以清楚地看出, 此时电子注的运动状态稳定, 调制效果良好, 绝大多数电子群聚中心位于 400 keV 以下, 这说明电子向高频场交出能量, 从而产生连续稳定的功率输出。

图5给出了从左端算起向右第5个周期结构处, 槽间高频电压的时域波形, 图5b为图5a的局部放大效果。由图5可见, 在 $U_0=550$ kV、 $I_0=350$ A 的电流驱动下, 返波管在 $t=1.4$ ns 附近开始起振, 在 $t=2.1$ ns 时趋于饱和, 随后便开始稳定地工作, 信号呈正弦变化。图6为高频电压的频谱图, 从图中可以看出, 振荡中心频率大约在 146 GHz 附近, 这恰好能满足我们的设计目标, 即 $f \geq 0.14$ THz。另外, 调节电压 U_0 的值可以在一定范围内对振荡频率 f 进行动态调谐。

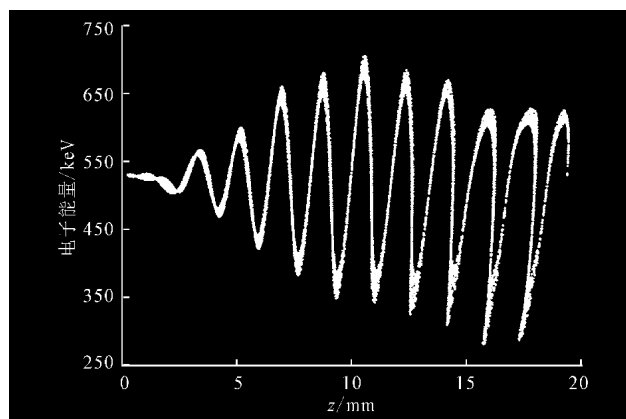
对输出窗口截面进行功率流积分, 得到截面上的辐射功率, 其峰值功率随时间的变化情况如图7所示。由图可得, 该 THz 返波管的输出功率约为 14.4 MW, 效率为 7.5%。综合考虑图4~图7, 可以看出, 本文系统工作状态稳定, 电子注群聚效果理想, 信号频率及相位稳定性好, 输出功率较高。

3 结束语

大功率 THz 返波管是返波管领域里的一个方

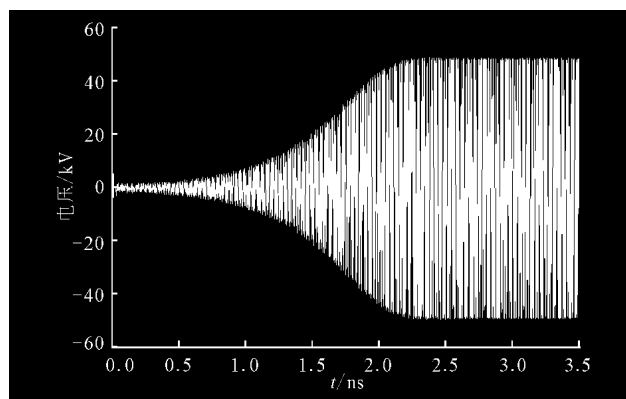


(a) r - z 空间相图

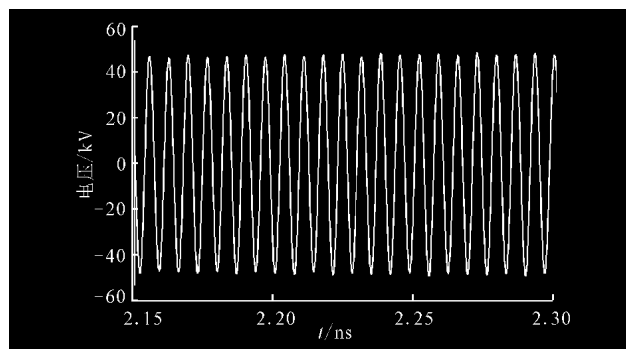


(b) 电子能量- z 空间相图

图4 电子运动的相空间图



(a) 高频电压的时域波形



(b) 高频电压波形局部放大效果

图5 槽间隙处高频电压波形

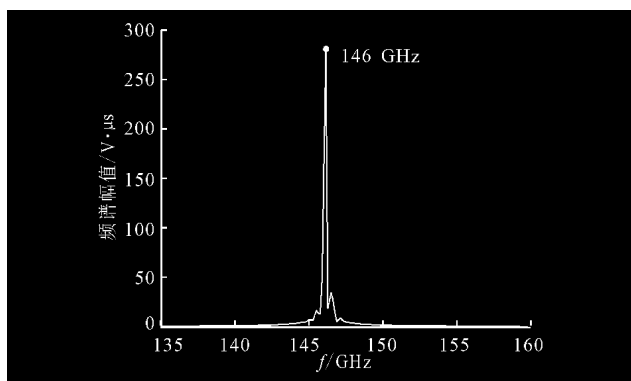


图6 高频电压的傅里叶频谱

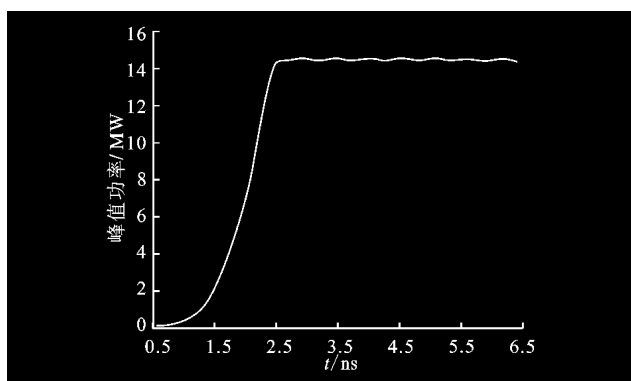


图7 输出峰值功率曲线

兴未艾的研究课题,其振荡频率高、输出功率高、体积小等独特优点,正在吸引世界上许多技术先进国家投巨资进行研究.我们在 0.14 THz 兆瓦级 THz 返波管的慢波系统设计和注-波相互作用数值模拟方面,进行了一些初步探索,取得了一些阶段性的研究成果.然而,要很好地解决其关键技术问题,研制出性能稳定的返波管,还需要较长时间的努力.目前,我们正在对电子光学系统和高频相互作用系统进行三维计算,其他方面的研究也在进行中.

参考文献:

- [1] Dragoman D, Dragoman M. Terahertz fields and applications [J]. Progress in Quantum Electronics, 2004, 28(1):1-66.
- [2] Siegel H P. Terahertz technology [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2002, 50(3):910-928.
- [3] 胡永生, 陈钱. 太赫兹技术及其应用研究进展[J]. 红外, 2006, 27(1):11-15.
Hu Yongsheng, Chen Qian. Recent development of

terahertz technology and its applications [J]. Infrared, 2006, 27(1): 11-15.

- [4] 曹俊诚. 太赫兹辐射源与探测器研究进展[J]. 功能材料与器件学报, 2003, 9(2):111-117.
Cao Juncheng. Research progress of terahertz sources and detectors [J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2003, 9(2): 111-117.
- [5] Carr G L, Martin M C, McKinney W R, et al. High power terahertz radiation from relativistic electronics [J]. Nature, 2002, 420:153-156.
- [6] Taniuchi T, Nakanishi H. Continuously tunable terahertz-wave generation in GaP crystal by collinear difference frequency mixing [J]. Electronics Letters, 2004, 40(5): 327-328.
- [7] Garcia-Garcia J, Martin F, Miles R E. Optimization of micromachined reflex klystrons for operation at terahertz frequencies [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2004, 52(10): 2366-2370.
- [8] Ives L, Kory C, Read M, et al. Development of backward wave oscillators for terahertz applications [C]// Terahertz for Military and Security Applications. Orlando, USA: SPIE Press, 2003:71-82.
- [9] 廖复疆. 微型真空电子器件和太赫兹辐射源技术进展[J]. 电子学报, 2003, 31(9):1361-1364.
Liao Fujiang. Micro-vacuum electron devices and terahertz vacuum sources [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(9): 1361-1364.
- [10] 张军, 钟辉煌. 过模慢波结构高频特性[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(2):66-69.
Zhang Jun, Zhong Huihuang. The high-frequency characteristics of the overmoded slow-wave structures [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2004, 26(2):66-69.
- [11] Vlasov A N, Shkvaruntse A G, Rodgers J C, et al. Overmoded GW-class surface-wave microwave oscillator [J]. IEEE Trans on Plasma Sci, 2000, 28(3): 550-560.
- [12] Mill S M, Antonsen T M, Levush J B, et al. Theory of relativistic backward wave oscillators operating near cutoff [J]. Phys Plasmas, 1994, 1(3): 730-740.
- [13] 刘盛纲. 微波电子学导论[M]. 成都: 国防工业出版社, 1985.

(编辑 刘杨)