

电子束轰击半导体偏转调制放大器 带状层流电子束的设计*

屠聿善

(中国科学院电子学研究所)

提 要

本文给出了用于电子束轰击半导体器件的带状层流电子束的设计考虑、计算机分析和实验结果。采用特殊校正透镜获得了截面为 $1 \times 3 \text{ mm}^2$ 的带状层流束。校正透镜的使用对于有限宽度带状束的实现是一个重要措施,可推广应用于其他场合。

一、前 言

七十年代微波器件领域中出现了一种新型器件——电子束轰击半导体器件(简称EBS)。在文献[1]中对该器件的性能及应用作了全面的阐述。其中,偏转调制功率放大器,在高增益、高效率、宽频带等方面性能可以与行波管、晶体三极管匹敌。尽管近几年EBS发展并不快,但它很有发展前途^[2]。例如美国W-J公司研制的偏转调制放大器在50—400MHz输出225—375W,最小增益17dB,频带内效率38—50%;可望在100—500MHz获得400W输出,效率45%。如果在电子束及半导体两方面努力提高可靠性,则在高速开关及米波、分米波器件方面具有重要意义,有“第三代”微波器件之称。

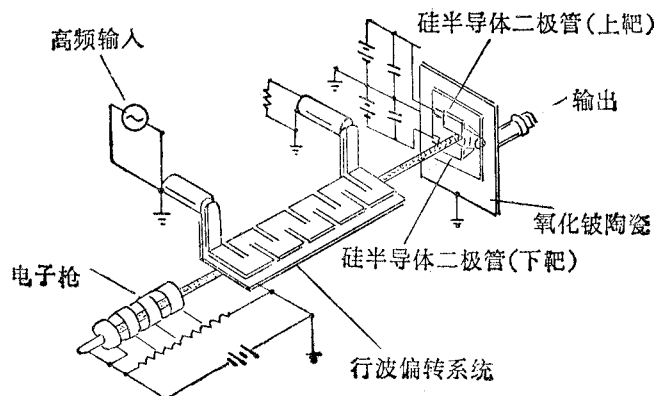


图1 乙类推挽放大 EBS 偏转调制放大器示意图

* 1979年12月8日收到。

图 1 为偏转调制功率放大 EBS 器件的示意图。包括电子枪、电子束偏转调制系统、半导体靶和输出网络。它的基本原理为电子枪产生的高能电子束 (10—20kV) 经偏转调制, 乙类推挽工作, 轰击硅半导体二极管; 平均每 3.6 eV 产生一对电子空穴对, 因此一个能量为 10 KeV 的电子可产生约 2000 对电子空穴对, 即可以获得 2000 倍的电流增益。对上下两块半导体乙类推挽调制, 则在靶的输出回路中可获得与偏转调制相同频率的高功率输出。本文主要讨论偏转功率放大器电子束的设计问题。

对电子束的基本要求为: (1) 为了保证足够大的电流增益及极间耐压, 枪加速电压应选择为 10—20kV。 (2) 为了减小电子束调制功率, 即高频信号输入, 保证足够偏转距离, 电子束聚焦应在离枪出口平面 100—200 mm 处。 (3) 为了获得一定功率输出和靶寿命, 到达靶上的电流密度要求为 1—5 mA/mm²。考虑到靶电容与器件工作波段有关, 在 300 MHz 左右的频率下工作时, 靶面尺寸为 1×3 mm², 相应束流应为 3—15 mA。 (4) 要求束电流密度均匀, 束边缘尽可能陡。对于乙类放大器件, 效率为靶上电流密度均匀程序的函数。图 2 表示靶上不同束形与输出波形的关系。因此不能用束电流密度分布为高斯型的交叉点电子枪, 必须用阴极均匀发射的无交叉点层流枪。靶上为阴极像或者电子束腰处。 (5) 为了与矩形截面半导体靶配合, 要求用矩形电子束。这比用圆形束、圆形靶可获得高效率, 并可减少电流放大的非线性畸变。

对于给定的束电压 U (kV), 偏转板入口处间距 S (mm), 偏转板入口到靶距离 L (mm), 靶上束厚度 S_T (mm), 带状束宽度 D (mm), 允许的最大束流 (见图 3):

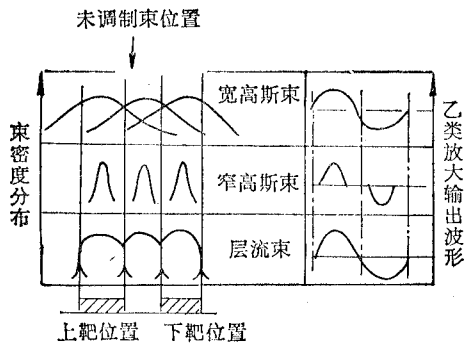


图 2 在靶上束电流密度的几种可能分布及在乙类放大时形成的信号失真

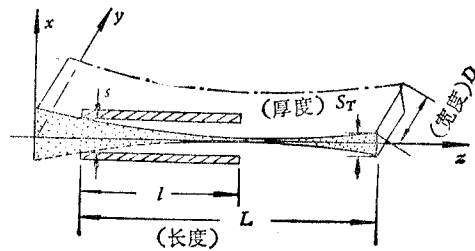


图 3 空间电荷对偏转调制电子束的影响。图上示出束的宽度和厚度的定义

$$I_{\max} = 0.663 U^{3/2} \frac{S}{L^2} \left[1 + \left(\frac{S_T}{S} \right)^{1/2} \right]^2 D (\text{mA}) \quad (1)$$

总之, EBS 偏转型功率放大器要求矩形层流枪; 要求高电压 (10—20kV)、小电流 (1—15mA), 静电聚焦。为了配合 EBS 偏转调制放大器的研制, 我们进行了矩形层流带状束的实验研究。在原理性设计基础上、用计算机模拟进行纵向电极尺寸设计; 用放大三倍模型作热测性能研究; 从实验中获得保证束形要求的校正透镜; 最后在 1:1 电子束管中进行测试, 获得了预期的结果; 束形为 1×3 mm², 束流为 3mA, 出枪口漂移空间长 160mm。为研制这类器件提供一实用电子束。

二、设计考虑、计算机计算和热测结果

米波 EBS 器件偏转调制放大器的功率输出 200W 左右时,对电子束的要求为: 无交叉点层流,漂移空间长 160mm,束电压 10kV,束截面 $1 \times 3\text{mm}^2$,束流 3mA.

根据上述束参数,在 160mm 漂移空间,宽度不变时,带状束空间电荷发散为:

$$\frac{y - y_0}{y_0} = 2.4 \times 10^4 \frac{I}{V^{3/2}} \times \frac{z^2}{\omega y_0} \quad (2)$$

式中, y_0 、 y ——带状束发散前后束的厚度, ω ——电子束宽度, I ——束流 (A), V ——束电压 (V), 将参数代入上式得 $\frac{y - y_0}{y_0} = 1.23$, 即 $y = 2.23y_0$. 电子束经过 160mm 漂移空间仅扩展一倍多,空间电荷发散作用不强. 所以自电子枪出口,只要以很小的收敛角抵消空间电荷影响,即可获得接近于平行的电子束.

但是,要设计成 10kV、3mA 平行流电子枪用普通皮尔斯枪是不可能的,原因是: (1) 由于偏转系统接高频信号输入,直流必须接地,因此不能用后加速工作方式,电子束出电子枪的出口时已具有最终速度. 如果设计为单阳极枪,根据二分之三次方定律,阴极与阳极间距离达 50 多 mm,结构上不允许; (2) 如果用通常方法设计成双阳极枪,由于第一、第二阳极间的强烈聚焦作用,在离阳极口不远就聚焦,即使加网也不能消除这透镜效应. 此外,理论分析面对称带状束时,都考虑束为无限宽,但实际上束都有一定的宽度,例如 $1 \times 3\text{mm}^2$ 的束截面,宽度仅为厚度的 3 倍,必然有宽度方向的聚焦或散焦作用存在.

因此 EBS 偏转功率放大器电子枪设计实际困难可归结为: (1) 合理的电极布置,使电子束以很小的收敛角进入漂移空间; (2) 考虑宽度方向 (y 方向) 的透镜作用,在厚度和宽度 (即 x 、 y) 两方向同时获得均匀聚焦.

(一) 设计考虑

由于电子束离开阴极后,首先应获得一弱发散透镜作用,尔后在加速区获得一小收敛角进入漂移区. 因此电子束在获得最后速度前,在枪区的包络不能按皮尔斯直线流通原理 (即通常强流电子束设计方法) 给出^[3]. 为了求得主要电极间纵向距离、阴极发射区特性 (阴极发射电流值及发射电流密度均匀性等) 和电子束进入漂移区时束收敛特性与极间距离、电极电压的关系,我们将直接采用数字计算方法模拟设计.

在结构上首先确定下列几项原则: (1) 为了靶上电流密度均匀,必须阴极表面发射均匀,即阴极表面电场均匀. 考虑到加工方便,不采用 67.5° 控制极,而采用平板形电极,并使控制极孔为阴极面积的 2—3 倍. (2) 当用平板控制极,且其工作电位比阴极电位低时 (这是调制束流及防止控制极截获电流所必须),为了阴极前电场垂直阴极表面,必然要使阴极发射面伸出控制极;但为了避免截止电压过高,选择伸出 0.15 mm (热态). (3) 靶面上成阴极像,因此阴极尺寸固定为 $1 \times 3\text{mm}^2$. 其余电极的纵向尺寸、电压值均由数字计算模拟调整.

(二) 计算机计算

用电子计算机数字求解给定电极尺寸及电压条件下电子束特性的一般方法为: 首先

解泊松方程

$$\nabla^2 U = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (3)$$

式中， U ——空间电位， ρ ——空间电荷， ϵ ——介电常数。在有限宽度带状束情况下，即解：

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (4)$$

求得空间电位场，然后根据一定初始条件求解电子运动方程：

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} &= \eta \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{d^2 y}{dt^2} &= \eta \frac{\partial U}{\partial y} \\ \frac{d^2 z}{dt^2} &= \eta \frac{\partial U}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中， η 为电子荷质比。理论上可得到电子束在漂移空间及枪区包络、层流性及电流密度分布等；实际上由于有限宽度带状束为三度空间问题，特别当求解细长的 EBS 长焦距电

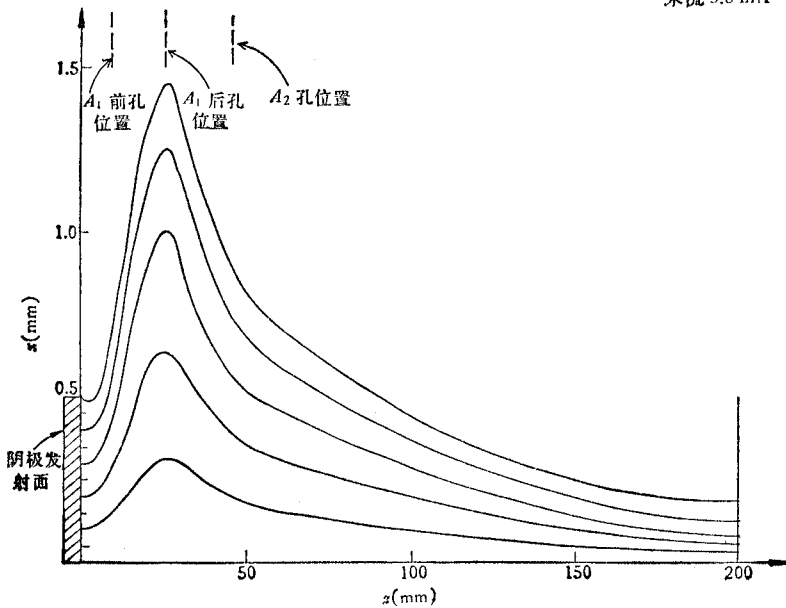
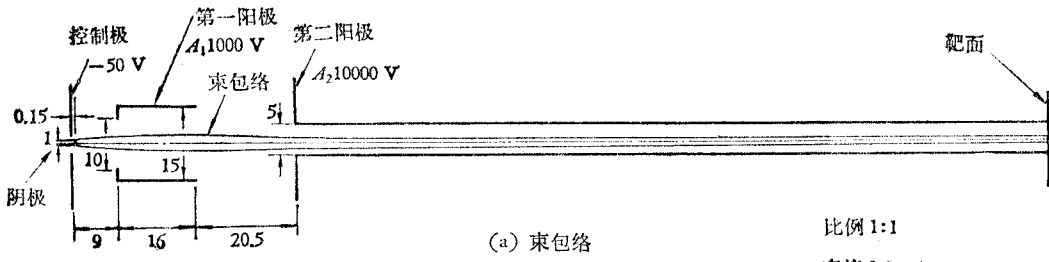


图 4 按二度空间计算的四极枪电子束轨迹

子束时,受计算机容量及速度的限制,所以数字计算时简化为二度问题,即作为无限宽带束处理。然而计算这样细长的电子束轨迹(从阴极至靶面),积累误差较大,并且处理带状束的横向热初速影响也很复杂,因此计算机数字计算主要是提供阴极发射区及电子枪加速区特性,从而分析各主要电极尺寸对电子束特性的影响,以选择合理的几何尺寸。图 4 为按二度空间计算所得的电子轨迹一例,其中图 4(a) 为束包络,图 4(b) 为 z 方向与 x 方向按不同比例(100:1),显示出轨迹的层流性。

(三) 热测结果

由于上述原因,数字计算的结果必然是近似的,不能直接作为有限宽束的模拟,因此非常重要的一个步骤为将计算结果在放大模型上(我们选择放大三倍),用电子束分析器进行热测。测量沿漂移空间束形的变化时,采用脉冲荧光屏法;测量电流密度分布时,采用小孔对电子束扫描,再把通过小孔的电流放大后,用 xy 记录仪画出来的方法。

热测中首先发现阴极侧壁发射的影响。这是由于所用阴极是钨钨阴极,发射面为矩形,用电火花加工制成,阴极侧壁有发射,因此在靶上分别形成 3 个像(中心及两个边缘侧壁)。在阴极侧壁覆盖上钽皮后,即可解决这一问题。

放大模型的热测结果表明,发射电流,即导流系数与数字计算结果很一致。

放大模型热测的主要目的是解决宽度方向的聚焦和发散问题,即解决设计和调整校正透镜问题。诚如前述,计算机数字计算是在二度空间条件下进行的,当电子束为有限宽度时,由于实际电极不是无限长的狭缝,而是有一定长度的,这狭缝边缘的场势必影响中心部分场强,使与二度空间条件下计算的结果不一致。Klemperer^[4] 曾对有限宽度带状束电极孔形作过一些分析,但仅是示意性的。从图 4 可见,电子枪主透镜在 A_1 与 A_2 之间,

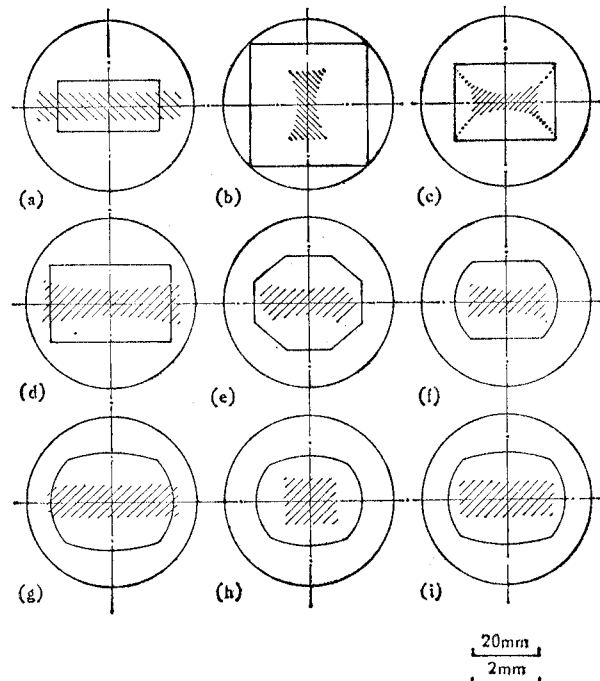


图 5 热测得到的以不同形状第一阳极后孔作为校正透镜时对电子束形的影响

而电子束在 A_1 处由于速度低, 所受透镜作用强, 我们设计的校正透镜主要是 A_1 后孔起作用. 图 5 表示在不同的 A_1 后孔下, 靶上束形的变化. 由图 5 中 (a) 与 (b) 可见, 当用正方形孔时, 由于宽度方向聚焦作用极强, 结果相当于使电子束旋转 90° . 比较图 5 中 (a) 至 (i) 可见, 当其他电极完全相同时, 不同形状第一阳极后孔给出不同厚宽比的束形. 利用 (h) 的孔形, 会出现接近正方形的电子束.

实际上, 当实验调整好 A_1 孔形后, 其他电极的纵向尺寸采用数字计算结果, 即可获得所要求的束流和束形. 由于整个电子枪都采用大孔, 不仅保证无截获, 同时还保证了像差小, 束边缘陡. 用图 5 中 (i) 的电极孔形, 用直径为 0.1 mm 小孔扫描电子束横截面, 并用 xy 记录仪记录, 得到的电流密度分布如图 6 所示. 图 6 中两尖峰的束密度分布是由于矩形阴极边缘局部强电场形成的发射. 若采用 67.5° 控制极可消除此现象.

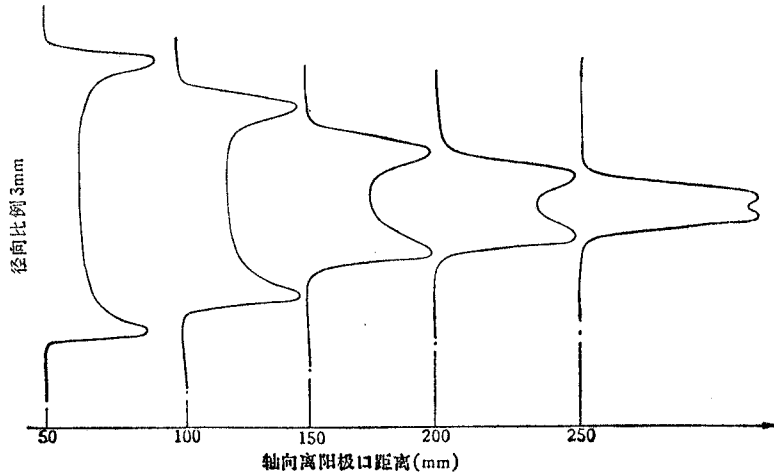


图 6 在电子束分析器中测得的四极枪放大三倍模型的束电流密度分布

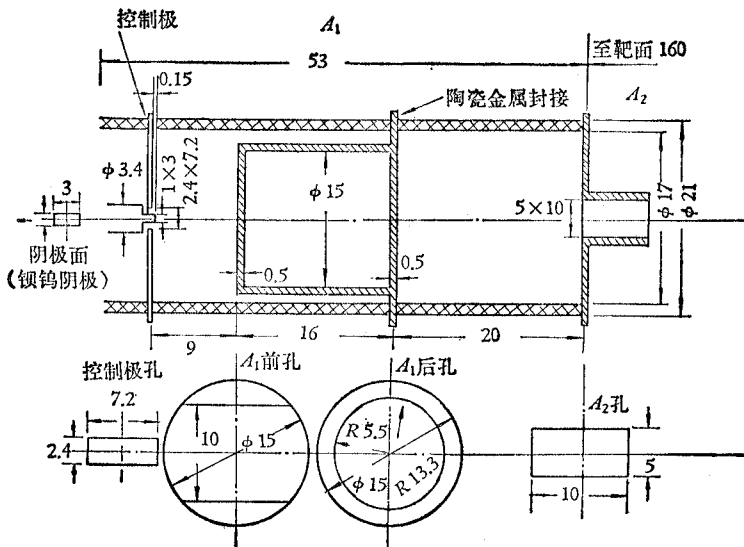


图 7 四极矩形束层流枪的实际结构

经过计算机计算和电子束分析器热测,确定了全部电极尺寸。然后装成电子束管进行 1:1 热测试验。用红宝石作靶,电子束轰击后发光,观察工作状态下束形。在 10kV 下,获得束流 3mA;当漂移空间为 160mm 时,靶上束形为 $1 \times 3\text{mm}^2$,满足了设计要求。图 7 为四极矩形束层流枪的实际结构。

三、结 束 语

1. 电流密度均匀的矩形层流电子束是 EBS 偏转放大器的核心之一。本文提出的结构设计的优点为结构简单、束利用率高。这是一种新型电子枪,为米波段 EBS 放大器提供了一个有限宽度 ($1 \times 3\text{mm}^2$) 截面的电子束;

2. 采用校正透镜对有限宽度电子束是一关键措施。由图 5 可见,改变校正透镜的形状可以直接改变靶上的束形。当前电子束曝光机的一个新进展为采用矩形束,如果利用活动光阑形式改变透镜孔型,可以容易地获得不同厚宽比的束形,较之其他改变矩形束型方法,例如四极透镜要简便。

3. 如果在 A_1 、 A_2 电极之间增加一电极,就成为五极式矩形束层流枪。这种枪的优点为束电流与聚焦相互独立调节,靶上束形保持不变,束流可变化 1 倍左右。这对器件使用时,改变功率输出特别有利。电极尺寸见图 8。

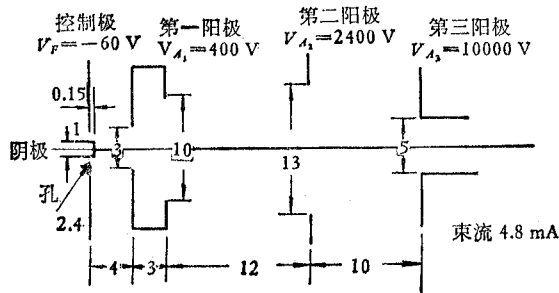


图 8 五极式矩形束层流枪主要电极尺寸

参 考 文 献

- [1] A. Silzars, et al., PIIEM, 62(1974), 1119.
- [2] D. J. Bates and R. I. Knight, *Technical Digest 1977 International Electron Devices meeting* P. 132.
- [3] J. R. Pierce, *Theory and Design of Electron Beams*, Chapter 10, P. 174, 2nd ed., D. Van Nostrand Compang, Inc., Torondo, 1954.
- [4] O. Klemperer, *Electron optics*, Chapter 10, p. 239, 2nd ed., *Combridge uni. Press*, London, 1953.

DESIGN OF LAMINAR FLOW ELECTRON BEAM OF RECTANGULAR CROSS-SECTION FOR THE DEFLECTION MODULATED ELECTRON-BOMBARDED SEMICONDUCTOR AMPLIFIER

Tu Li-shan

(Institute of Electronics, Academia Sinica)

This paper presents design, computer analysis and experimental result of laminar flow electron beam with rectangular cross section. The beam is used in a deflection-modulated electron-bombarded semiconductor amplifier. This kind of amplifier is a new device in microwave field developed during the last decade.

Owing to employing special correcting lens, laminar flow beam with rectangular cross section of $1 \times 3 \text{ mm}^2$ is obtained. Using correcting lens to obtain rectangular beam of finite width is a useful method. This method may be applied to other fields.