

高亮度电子束及其作用

王之江 徐至展

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文建议用脉冲激光形成的高温等离子体作为高亮度电子束源, 估算表明亮度可能比热电子枪高百万倍。这种电子束源也许会对电子显微术和自由电子相干辐射有用。

High brightness electron beam source and its effects

Wang Zhijiang Xu Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: We proposed to adopt high temperature laser plasma as an electron beam source. The evaluated results demonstrated that this electron source can be a millionfold as bright as thermal electron guns. The source may be useful to electron microscopy and free electron lasers.

大家知道, 光学上常以亮度作为光源的一个特征, 这是由于按照光学定律, 亮度不能由任何传输方式而增大, 因此光束的亮度在任何情况下不能大于光源的发光亮度, 从而使光学技术受到严格的限制。激光技术形成了极高亮度的光源, 它给光学技术以革命性推动的原因也就在于此。至于相干度则不是光源的特征, 它是一个可变的量, 原则上总可以在光束中选出单色的而且方向性为衍射限的部分光束, 而使此光束的相干度为 1。亮度和相干度的关联在于: 相干度为 1 的 (单模式) 光束的光功率值就是单色亮度。从普通光源选出的高相干度光束的缺点是功率太小。

对于电子束技术也存在同样的问题。电子光学的传输规律与光学相似, 从而也同样存在电子束亮度在自由空间中不变的定律,

因此是否能够获得高亮度电子枪——电子束源, 就是一个重要问题。热发射电子枪亮度随温度而增, 当钨丝温度 2700 K 以求有较长寿命时, 表面发射率约为 1 安培/厘米², 亮度则约为 10⁵ 安培/厘米²/立体角^[1], 用 LaB₆ 作为发射体时为达到这种亮度仅需 1600 K, 从而有更长的寿命或可达十倍的亮度^[2]。场发射电子枪的亮度随电场强度而增, 仅在阴极针尖部分的直径很小 (1000 Å) 而且加以高场强 (1000 伏) 时, 可以得到高亮度 10⁸~10¹⁰ 安培/厘米²/立体角, 亮度可由尖端直径 (场强) 微小变化而发生很大变动, 因此对工作条件 (包括真空度) 要求很高^[3]。至今亦不存在类似激光的技术以使电子束亮度显著提高, 这就使电子光学技术受到限制, 例如难以运用全息技术形成高分辨率的象, 再如自由电

收稿日期: 1980 年 10 月 20 日。

子相干辐射的亮度也与电子束亮度有密切关联。

对于前一个问题,对电子束的相干度要求是以电子波波长为模体积作为计量单位的,例如将电子束聚焦后以双棱镜分成两束而干涉^[4],若电子束之一通过样品,则干涉条纹即样品的全息图,对于这种干涉条纹的性质类似于杨氏双缝实验那样,电子束源的直径和单色度都可以由条纹的能见度分析出来,看来这种工作尚未有人做过。

对于后一个问题,涉及的是电子束所发出的光的相干度和相位的关系,因此是以光波波长为模式体积的计量单位,也就是容许电子处在更大的模体积内仍然会发出相干的光辐射。显然可见,自由电子的相干辐射亮度与电子束亮度成正比,由于模体积加大,电子枪提供的束流可比前一情况大得多。

利用激光形成电子束源也许是可取的,有人用连续激光加热钨到 3500 K,达到 10^8 安培/厘米²/立体角,即场发射枪的水平^[5]。本文考虑用激光将物质加热到更高温度,以高温高密度等离子体作为电子束源,以求得到更高亮度的电子束。估算结果表明,这是可能的,估算如下。

若考虑用毫微秒脉宽的大功率激光(靶面功率密度为 10^{13} 瓦/厘米²)辐照平面固体靶,我们即可按 H. Puell 所提出的流体力学模型^[6]进行估算。该模型将激光从靶面产生的粒子流动视作稳态过程,并把等离子体分成如图 1 所示的三个部分。在一维流动区 II 中,令入射激光通量与等离子体流动而运输的粒子能通量相等;并认为在 $x=R$ 特征面处,等离子体流动速度已达到定域声速值。于是,即可推导出 $x=R$ 处关于电子温度 (kT_e)、电子密度 (n_e) 以及电子速度 (u_e) 的表达式,并由此而得到从该特征面所发射出的电子流通量密度为:

$$S_e = n_e u_e = \alpha^{-1/3} \left(\frac{2}{3m_i C R} \right)^{2/9} \left(\frac{\phi_L}{5} \right)^{5/9}$$

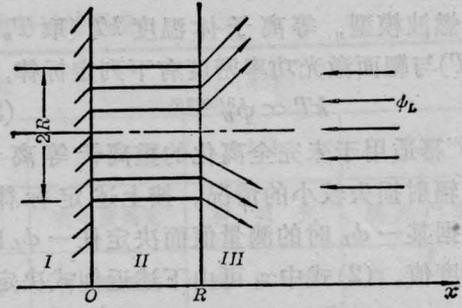


图 1

I—未扰动靶; II—一维高密度流动区;
III—三维近绝热膨胀区

这里, m_i 为离子质量; $2R$ 是激光聚焦焦斑直径; $\alpha = \frac{\bar{z}_i + 1}{z_i}$, 而 \bar{z}_i 为离子平均电荷数; ϕ_L 是激光功率密度; $C = 3.46 \times 10^{-47} \lambda_L^2$ CGS 单位,而 λ_L 为激光波长。

如取 $\phi_L = 10^{13}$ 瓦/厘米², $2R = 100$ 微米; 对于 A1 靶:

$$S_e \cong 1.8 \times 10^{28} \text{ 电子/厘米}^2 \cdot \text{秒} \\ = 2.9 \times 10^9 \text{ 安培/厘米}^2$$

而对于 W(钨)靶,则有:

$$S_e \cong 1.2 \times 10^{28} \text{ 电子/厘米}^2 \cdot \text{秒} \\ = 1.9 \times 10^9 \text{ 安培/厘米}^2$$

考虑到反射损耗、电离能与辐射损失后,实际所用的靶面功率密度可取 2×10^{13} 瓦/厘米²,相应的钨玻璃激光器的输出功率应为 1.6×10^9 瓦。若取脉宽(FWHM)为 5 毫微秒,激光器输出能量即为 8 焦耳。

如我们再利用平面一维辐射爆燃波模型^[7,8]来估算钨玻璃激光($\geq 10^{13}$ 瓦/厘米²)轰击高 z 重元素(如钨)靶的情形,也能得到类似的结论。在估算中,我们将电子流通量表述为:

$$S_e = n_{ec} C_s \quad (1)$$

这里, n_{ec} 是爆燃波面附近的电子密度,它等于对应 1.06 微米激光辐射的临界密度值

$$n_{ec} = \frac{1.1 \times 10^{13}}{\lambda_L^2};$$

C_s 是等温声速:

$$C_s = \left[\frac{(\bar{z}_i + 1) kT}{m_i} \right]^{1/2} \quad (2)$$

按爆燃波模型, 等离子体温度 kT (取 $T_e = T_i = T$) 与靶面激光功率密度有下列定标律, 即

$$kT \propto \phi_L^{3/5 \text{ 或 } 2/3} \quad (3)$$

“3/5”幂适用于未完全离化的重离子等离子体和辐射损失较小的情况。按上述定标律, 可根据某一 ϕ_L 时的测量值而决定任一 ϕ_L 时的温度值。(2) 式中 z_i 可由下述近似式决定:

$$\bar{z}_i \approx \frac{2}{3} [AT_e (\text{电子伏})]^{1/3} \quad (4)$$

A 是元素的原子量。K. M. Glibert 等人^[9] 最近给出了脉宽为 8 毫微秒的钹玻璃激光加热平面固体靶的温度与 x 光产额。他们对于 Be 到 U 的 36 种元素的打靶结果表明, 当

$$\phi_L = 4 \times 10^{13} \text{ 瓦/厘米}^2$$

时, 温度测量值 $T_e = (365 \pm 89)$ 电子伏, 而 x 光产额相对于入射激光能量的转换率 $\leq 10\%$ 。我们现估算 W ($A = 183.85$) 靶的情况, 将温度测量值代入(4), 得到

$$\bar{z}_i = 25 \sim 29;$$

而按(2)式, $C_e \approx (6.1 \sim 8.4) \times 10^6$ 厘米/秒; 对于 $\lambda_L = 1.06 \mu\text{m}$, $n_{e0} = 10^{21}$ 电子/厘米³; 最后, 根据(1)式可得到电子流通量为:

$$S_e \approx (6.1 \sim 8.4) \times 10^{27} \text{ 电子/厘米}^2 \cdot \text{秒} \\ \approx (1.0 \sim 1.4) \times 10^9 \text{ 安培/厘米}^2$$

对于其他功率密度情况, 可按(3)式定标关系求出 T_e , 再得到 \bar{z}_i , C_e , 最后估算出 S_e 。例如, 取 $\phi_L = 2 \times 10^{13}$ 瓦/厘米², 经估算

$$S_e \approx (4.9 \sim 6.9) \times 10^{27} \text{ 电子/厘米}^2 \cdot \text{秒} \\ \approx (0.8 \sim 1.1) \times 10^9 \text{ 安培/厘米}^2。$$

上述几种估算表明, 利用毫微秒脉宽, 聚

焦功率密度为 10^{13} 瓦/厘米² 量级的钹玻璃激光辐照平面固体靶(如钨), 即易得到通量为 $\sim 10^9$ 安培/厘米² 量级的电子束源, 该值大约是热发射时表面发射率(~ 10 安培/厘米²)的 10^8 倍。

另外, 用毫微秒脉冲激光时, 虽然靶面功率密度较低(例如 10^{10} 瓦/厘米² 以下), 但也可以得到高亮度电子束。由于持续时间较长, 可以提供的总通量较大。

可以认为, 高亮度电子束源将使场发射电镜(STEM)达到更高分辨水平, 将使电子显微全息术成为可能。高亮度电子束源也将提高自由电子相干辐射的效率, 可以认为, 某些实验的辐射效率显著低于理论值^[10], 其主要原因之一也许就在电子束中包含大量无效部分, 改进电子枪的结构将是一个重要课题。

参 考 文 献

- [1] Haine M. E.; *Brit. J. Appl. Phys.*, 1952, **3**, 40.
- [2] Broess A. N.; *J. Sci. Instr.*, 1969, **2**, 273.
- [3] Crowe A. V.; *Progr. Opt.*, 1973, **11**, 225. Feist W. F.; *Adv. Electronics and El. Phys.*, 1968, Sup. 4.
- [4] Tonomura A.; *J. Electron Microsc.*, 1979, **28**, 1.
- [5] Van der Mast; *Electron Microsc.*, 1974, **1**, 120.
- [6] Puell H.; *Z. Naturforsch.*, 1970, **25a**, 1870.
- [7] Fauquignon C., F. Flonx; *Phys. Fluids*, 1970, **13**, 386.
- [8] Colombant D., G. F. Tonon; *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**, 3524.
- [9] Glibert K. M. et al.; *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**, 1449.
- [10] McDermott D. B. et al.; *Phys. Rev. Lett.*, 1978, **41**, 1368.

(上接第 53 页)

眼底的激光能量。由于激光进入眼底已不再聚焦, 所以即使有少量激光进入这里也不至于烧伤视网膜。有不少闭角性青光眼的睫状突比较大, 向前突出, 往往能挡住部份进入虹膜洞的多余激光。因此只要使用的激光能量适量, 是比较安全的。我们的临床工作至今没有一例发生这一类合并症。

(5) 有一个简单的激光能量监视装置是很有用的, 它好比操作者的眼睛, 能掌握每一次治疗所用的激光能量, 随时了解激光腔体因老化而引起的能量输出衰减现象, 比较正确地估计不同虹膜结构、不同角膜老年环所需要的能量, 有利于帮助操作者总结经验, 减少盲目性。