

# 激光驱动光阴极高亮度电子束源 以及新型光阴极的研究\*

耿荣礼 宋进虎 于进

(北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

1995-12-14 收稿

## 摘 要

介绍了北京大学激光驱动光阴极高亮度电子束源,给出了其物理设计.该装置采用激光照射光阴极,通过100kV直流加速结构,产生35—100ps的高亮度电子束.给出了新型离子注入型光阴极和碲化铯光阴极的实验研究结果.讨论了即将建造的超导光阴极高亮度注入器.

**关键词** 高亮度电子束, 光阴极, 激光驱动, 超导腔.

## 1 引 言

自由电子激光、高能直线对撞机、尾场加速器以及皮秒X射线源的研究都要求高亮度强流短脉冲电子束.光阴极微波电子枪因此应运而生,并在过去的十年中得到了迅速的发展<sup>[1]</sup>.由于微波电子枪有很高的阴极表面场,电子在短距离内被迅速加速到相对论能量,因而有效地抑制了空间电荷效应引起的发射度增长,提高了束流的亮度( $10^{10}$  A / m<sup>2</sup>rad<sup>2</sup>).光阴极电流发射密度可达100—600 A / cm<sup>2</sup>,它的采用进一步提高了束流的亮度( $10^{11}$ — $10^{12}$  A / m<sup>2</sup>rad<sup>2</sup>)<sup>[2]</sup>.而且超短脉冲激光的使用省去了传统注入器中的聚束器,这对抑制发射度的增加也是有益的.光阴极电子枪还可以突破传统注入器的脉宽极限,甚至产生飞秒电子束<sup>[3]</sup>.最近,应B粒子工厂和 $\tau$ -C工厂研究的需要,更用偏振光产生了极化电子束.超导腔以其极低的高频损耗和CW模式的高平均梯度正日益受到人们的关注,其深冷的环境(液氮温度)还为光阴极提供了有利的条件.对超导腔光阴极微波枪的研究已经起步<sup>[4]</sup>.TESLA计划中已将超导光阴极微波电子枪作为其候选方案之一<sup>[5]</sup>.

北京大学超导腔组自1992年底开始了超导光阴极微波电子枪的研究.首先对其中的关键部件光阴极进行了实验研究.在国内首次提出离子注入型光阴极,并取得比纯金属量子效率高一个数量级的结果<sup>[6]</sup>.之后,于1994年在国内首次进行了碲化铯光阴极的

\*国家自然科学基金部分资助.

大电流实验,测得了4.3%的量子效率和 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度<sup>[7]</sup>.与此同时,成功地研制出了两只1.5GHz国产超导铈腔,在2.5K温度下测得品质因数为 $2\times 10^9$ ,加速度超过 $10\text{MV}/\text{m}$ <sup>[8]</sup>.作为超导光阴极微波电子枪的前期实验装置,首先建造了一台直流光电子枪.采用100kV直流加速结构,产生35—100ps的高亮度电子束.本文将重点介绍新型光阴极的研究以及直流高亮度电子束源的设计和研制.

## 2 直流高亮度电子束源

### 2.1 总体结构

图1是北京大学激光驱动高亮度电子束源的总体结构图,它主要由四部分组成,即光阴极制备室、直流加速腔、锁模激光器和束流诊断室.

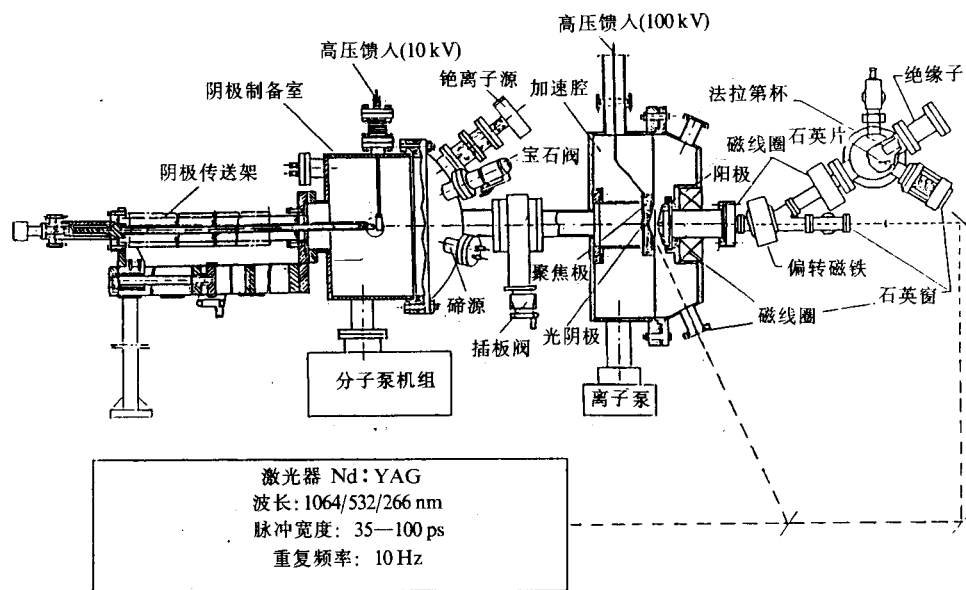


图1 北京大学激光驱动高亮度电子束源

光阴极制备室主要包括以下部件:高真空室、具有1.5m长波纹管的传送机构、铯及铈的蒸镀装置、铯离子源(用于制备离子注入型光阴极)、氩离子枪(用于阴极样品的表面清洗)、电子枪(用于阴极基底的预热去气处理)、激活加热组件和监测系统.该装置可以采用三种方法制备光阴极,即化学气相沉积法、离子注入法和离子束增强沉积法.直流加速腔主要由聚焦极、阳极和100kV高压馈入端子构成.阴阳极间距可作小范围调节.100kV高压端子是特殊设计的,防止漏电和打火.在加速室的前端面上,开有两个石英窗作为激光入口,另外还开有两个观察窗.在加速室出口位置有一个磁线圈,用以抑制在其后的漂移段中束流的发散效应.该装置中采用的光源为一台主被动双锁的Nd:YAG激光器,由本振级和放大级组成,经倍频后可工作在三个波长,即1064、532

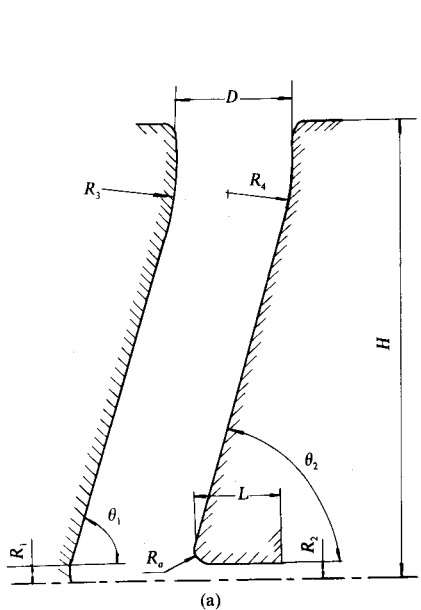


图 2(a) 加速间隙几何结构

阴极半径  $R_1=4\text{mm}$  引出孔半径  $R_2=4\text{mm}$ ,  
 聚焦极圆弧半径  $R_3=43\text{mm}$ , 阳极圆弧半径  $R_4=8\text{mm}$ ,  
 聚焦极倾角  $\theta_1=73^\circ 45'$ , 阳极倾角  $\theta_2=73^\circ 45'$ ,  
 引出孔长  $L=12\text{mm}$ , 阳极半径  $H=60\text{mm}$ ,  
 阳极鼻锥半径  $R_0=1.8\text{mm}$ , 间隙宽度  $D=15\text{mm}$ .

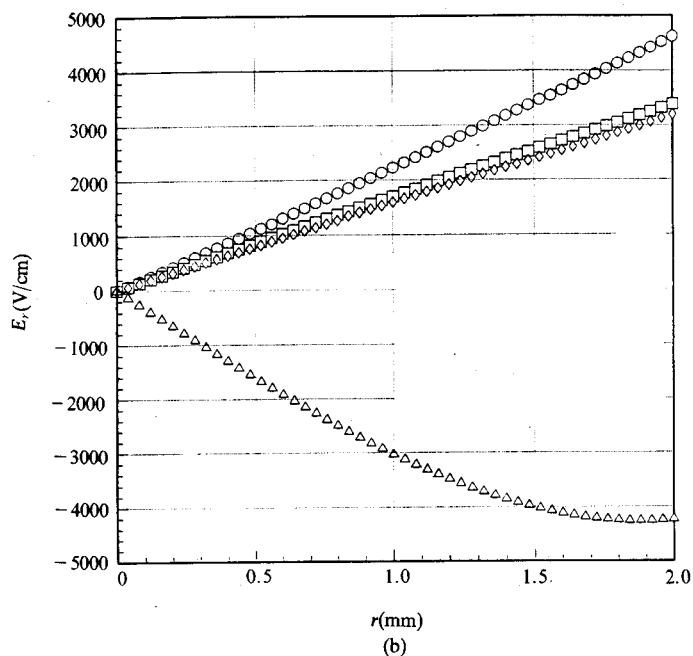


图 2(b)  $E_r$  随  $r$  的变化

- $z=2.0\text{mm}$ ,
- $z=6.0\text{mm}$ ,
- ◇  $z=10.0\text{mm}$ ,
- △  $z=14.0\text{mm}$ .

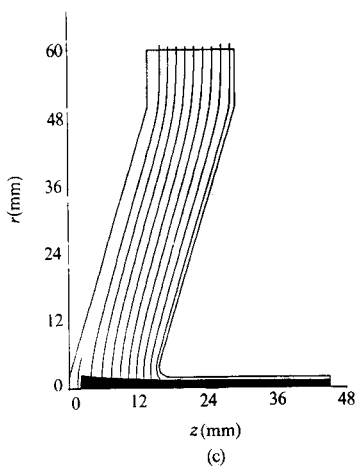


图 2(c) 枪内电子轨迹

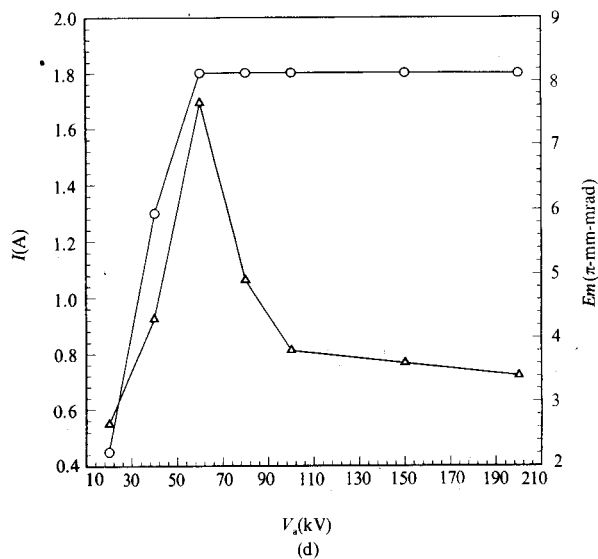


图 2(d) 峰值电流和归一化发射度随引出电压的变化

- 峰值电流  $I$ , △ 发射度  $Em$ .

和 266nm. 激光器脉冲宽度为 35—100ps, 重复频率为 10Hz. 束流诊断部分主要由快响应法拉第杯和发射度测量仪组成, 用以测量流强和发射度. 由于电子束能量较低, 束流发射度较小, 将采用 Pepper-Pot 法进行真实发射度测量.

## 2.2 直流光电子枪的物理设计

为优化束流和场型参数, 首先用 EGUN 和 POISSON 程序对直流加速间隙进行了设计. 由于采用皮秒脉冲激光驱动, 省去了传统 DC 枪中的栅控极, 设计中主要是确定聚焦极倾斜角和阳极鼻锥形状, 以保证良好的聚焦效果和尽可能高的阴极表面场. 最后确定出聚焦极倾角为  $16^{\circ}15'$ , 阳极鼻锥圆弧半径为 1.8mm, 阴阳极间距约为 15mm. 图 2(a) 给出了电极结构. 图 2(b) 是 POISSON 程序对间隙内径向电场的计算结果, 从中可以看出在加速间隙中径向电场  $E_r$  和半径  $r$  有很好的线性关系, 这正是减小空间电荷力引起的发射度增加所必需的. 还可以看出在阳极鼻锥处电子受到非线性散焦力. 如调整阳极鼻锥形状, 可以减小散焦效应, 但同时也会使阴极表面电场减小. 目前使用的高压仅为 100kV, 所以设计中优先考虑了尽可能高的阴极表面场. EGUN 的模拟结果表明, 在 100kV 引出高压下, 峰值电流为 1.8A, 规一化发射度为  $3.8\pi\text{mm-mrad}$ , 规一化亮度为  $1.2 \times 10^{10}\text{A/m}^2\text{rad}^2$ . 图 2(c) 给出了枪内电子的轨迹. 图 2(d) 给出了峰值电流  $I$  和规一化发射度  $Em$  随极间引出高压  $V_a$  的变化曲线. 表 1 列出了直流光电子枪的主要设计参数. 作为对比, 同时还给出了国际上同类装置的参数<sup>[9]</sup>.

表 1 直流光电子枪设计参数及同类装置参数比较

参数	北京大学	CEBAF	SLAC	Ref [10]
高压 (kV)	80—100	400—500	60—120	30—60
阴极表面场 (MV/m)	3.6	6—10	1.8	15
每脉冲电荷 (nC)	0.05—0.10	0.07—0.20	16	0.02—0.60
阴极直径 (mm)	6	25	14	—
发射面直径 (mm)	4	2—6	14	2
激光脉宽 $\sigma_t$ (ps)	15	15	500	38
平均流强 (nA)	0.5—1.0	$5 \times 10^6$	$4 \times 10^3$	0.2—6.0
重复频率 (Hz)	10	$37 \times 10^6$	120	10

## 2.3 束流发射度的测量

本实验中, 电子束脉冲宽度为 35—100ps, 能量为 100keV. 由于其能量较低, 束流相图不是理想椭圆, 所以发射度测量不能使用常用的双屏法和三梯度法. 必须进行真实发射度测量, 为此将采用 Pepper-Pot 法. 遗憾的是目前国内还没有采用这种方法测量单次皮秒脉冲的先例可循. 需要解决的主要问题有: 具有 20—50 $\mu\text{m}$  直径小孔的胡椒靶的制作、快响应发光体的获得、弱光检测和快速图象获取系统的建立. 目前这部分工作正在设计之中.

### 3 光阴极

#### 3.1 离子注入型光阴极

用于光阴极微波电子枪的光阴极主要有半导体型和金属型两类。半导体型主要有  $\text{Cs}_3\text{Sb}$ 、 $\text{CsK}_2\text{Sb}$ 、 $\text{NaK}_2\text{Sb}$  和  $\text{GaAs}(\text{Cs})$  等, 其中都含有铯。半导体光阴极的特点是量子效率通常较高, 在  $532\text{nm}$  下可达  $1\%$  以上, 但阴极寿命较短。由于其表面性质活泼, 制备过程中要求很高的真空度(一般在  $10^{-8}\text{Pa}$  以上)。在强激光的照射下, 表面结构和成分会发生变化, 甚至导致表面的分解和溅射, 这对加速器是不利的。又由于其功函数较低, 在强场作用下, 暗电流效应和场致发射效应难以避免。金属光阴极主要有  $\text{Cu}$ 、 $\text{Y}$ 、 $\text{Mg}$ 、 $\text{Ag}$ 、 $\text{W}$ 、 $\text{Au}$ 、 $\text{Ta}$  等, 它们具有很长的寿命, 能够耐恶劣环境。但由于功函数较高(一般  $4-5\text{eV}$ ), 量子效率通常在  $10^{-5}-10^{-6}$  之间。故需要使用紫外光源来激发光电流。金属光阴极的另一个优点是具有较好的电导和热导性能, 这对于超导腔是有利的。

用于超导腔中的光阴极应满足如下要求<sup>[1]</sup>: 光电发射响应时间短( $<1\text{ps}$ ); 能提供较高的电流密度( $>500\text{A}/\text{cm}^2$ ); 较长的寿命(至少为几个小时); 不易发生场致发射; 对能量小于超导腔材料铌的功函数( $4.6\text{eV}$ )的光子有较高的量子效率; 厚度小于  $30\text{nm}$  以便利用超导近邻效应。

有鉴于此, 我们提出用离子注入法制备光阴极。它有以下优点: 量子效率比金属高, 电导率和热导率比半导体光阴极高, 表面高频损耗较低。阴极表面没有明显的起伏, 高场强下不易发生场致发射。注入金属基底的杂质元素与基底元素之间以原子力结合, 活性物质不易受到环境的污染, 因而阴极寿命很长。离子注入光阴极可以在大气中传送, 经简单的处理后光电发射性能可以得到恢复。实验中采用 TRIM90 程序进行了注入参数的设计, 包括注入剂量、注入能量和注入剂量率。光电实验中所用的测试设备为二极管结构和同轴靶结构。所用的光源有三台:  $532\text{nm}$  的 ps 级 YAG、 $532/355/266\text{nm}$  的 ns 级 YAG 和  $248\text{nm}$  的 ns 级 KrF 激光。制备离子注入光阴极所选用的金属基底有  $\text{Cu}$ 、 $\text{Al}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Ag}$ 、 $\text{Nb}$  等, 掺杂元素主要为  $\text{Cs}$  和  $\text{K}$ 。实验结果表明,  $\text{Cs}-\text{Cu}$  光阴极的量子效率比金属  $\text{Cu}$  提高了一个数量级, 达到  $2.5 \times 10^{-4}$ 。图 3 为  $\text{Cs}-\text{Cu}$  阴极在  $248\text{nm}$  激光照射下的光电流波形。图 4 为  $\text{Cs}-\text{Cu}$  阴极在  $355\text{nm}$  激光照射下, 不同阶段光电流  $I_e$  与激光能量  $E_p$  的关系。

除  $\text{Cs}-\text{Cu}$  光阴极外,  $\text{Cs}-\text{Al}$ 、 $\text{Cs}-\text{Ni}$

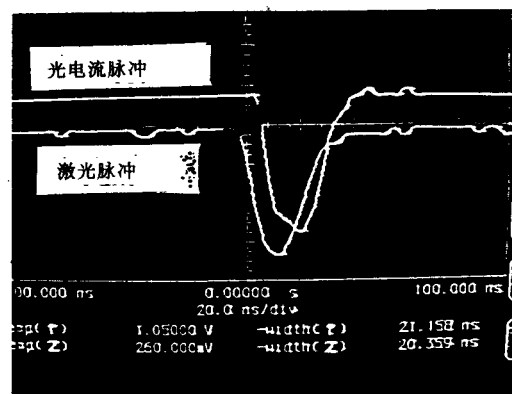


图3  $\text{Cs}-\text{Cu}$  阴极在  $248\text{nm}$  激光照射下的光电流波形  
激光脉冲宽度为  $25\text{ns}$

光阴极的量子效率也比相应的纯金属提高数倍. 实验中没有观察到 Cs-Nb、K-Ag 光阴极比相应金属量子效率的提高.

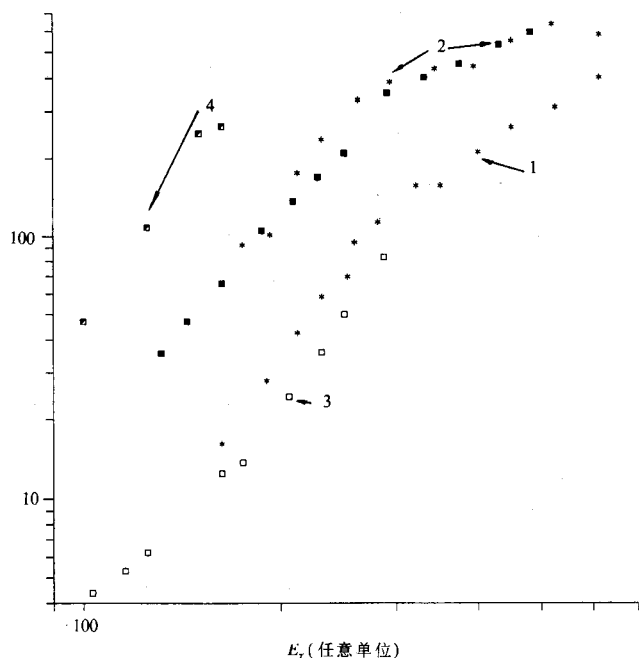


图4 Cs-Cu 阴极在不同处理阶段下光电流与激光能量的关系

激光波长为 355nm, 脉冲宽度为 7ns,

1. 加热前, 2. 加热 35 分钟后, 3. 加热 75 分钟后,
4. 加热 75 分钟后对激光进行聚焦.

电子的逸出深度较深, 量子效率高. 在 263nm 下量子效率可达 13%. 由于 Cs<sub>2</sub>Te 中 Cs 与 Te 比 Cs<sub>3</sub>Sb 中 Cs 与 Sb 结合得紧固, 具有类似晶体的结构, 因此它的稳定性较好, 寿命较长. CERN 的研究结果表明, 在 10MV/m 的 DC 场强下, 其寿命可达 60 小时, 而且没有明显的暗电流<sup>[13]</sup>. 美国 Los Alamos 实验室使用该种阴极成功地实现了 FEL 振荡. 阴极量子效率在 263nm 激光下为 12%, 寿命超过 100 小时. 并且, 经 150—200℃ 的热处理后, 被大气污染的阴极可以再生<sup>[14]</sup>. 我们采用化学蒸镀法制备了三只 Cs<sub>2</sub>Te 光阴极, 在较低的真空度下进行了光电发射实验. 当引出高压为 11kV 时, 测得量子效率为 4.3%, 光电流密度达到 100A/cm<sup>2</sup>. 而且在两个月内阴极光电性能没有明显变坏<sup>[7]</sup>. 图 5 为量子效率  $Q_e$  随引出高压  $V$  的变化曲线. 从中可以看出, 如果继续增加高压, 量子效率会进一步增加.

经 SEM 和 RBS 检测表明在 Cs-Nb 样品表面有一层 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 其量子效率没有提高是由于该氧化层的作用. 由于以前光阴极制备要暴露大气, 这层氧化物难以去除. 在目前的设备中, 将采用氩离子枪对铌材表面进行清洗, 然后在不破坏真空的状态下进行 Cs-Nb 阴极的制备和传送, 可以去除表面氧化层. K-Ag 样品的量子效率没有明显提高归因于对样品的热处理不够. 实验中还采用 AES 对杂质的扩散行为以及聚焦激光阴极的破坏行为进行了研究, 详见文献[12].

### 3.2 碲化铯光阴极

最近几年, 人们开始进行 Cs<sub>2</sub>Te 光阴极用于高亮度电子源的研究. 其禁带宽度与电子亲和势之比高于一般的半导体, 因此

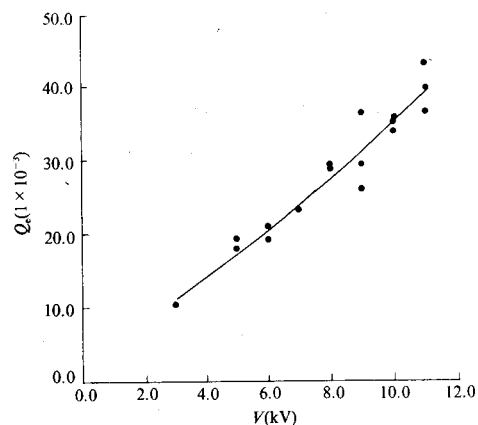


图5 Cs<sub>2</sub>Te 光阴极量子效率随引出高压的变化

## 4 结 论

采用离子注入法制备了新型光阴极, 量子效率比纯金属提高了一个数量级.  $\text{Cs}_2\text{Te}$  光阴极大电流实验证明了它是用于高亮度电子源的理想材料. EGUN 和 POISSON 的模拟表明, 在 100kV 引出电压下, 电子枪规一化亮度可以达到  $1.2 \times 10^{10} \text{A} / \text{m}^2 \text{rad}^2$ . 目前, 整个系统已基本安装完毕, 并已开始进行光阴极制备. 在解决了水平恒温器的设计和激光-超导腔的等时问题之后, 将采用超导腔代替直流加速腔, 产生 CW 高亮度电子束, 甚至产生高亮度极化电子束.

感谢赵夔教授、王丽芳工程师、张保澄副教授的指导和支持. 感谢陈佳洱先生的指导.

## 参 考 文 献

- [1] C. Travier, *Particle Accelerators*, **36**(1991)33.
- [2] R. L. Sheffield, E. R. Gray, J. S. Fraser, *NIM*, **A272**(1988)222.
- [3] C. Travier *et al.*, EPAC94, (1994) 1462, London.
- [4] A. Michalke *et al.*, EPAC92, (1992) 1014, Berlin.
- [5] C. Pagani *et al.*, Proc. of the 1st Int. TESLA Workshop, (1990)217, New York.
- [6] Zhao Kui *et al.*, LINAC94, (1994), Tsukuba.
- [7] 王 彤, 于 进, 第三届全国激光科学技术青年学术交流会论文集, 1995 年, 杭州.
- [8] 王莉芳等, 国产超导铌腔的研制, 强激光与粒子束, 待发表.
- [9] H. Liu *et al.*, PAC95, 1995, Dalas.
- [10] A. Aleksandrov *et al.*, *Phys. Rev.*, **E51**(1995)449.
- [11] P. Michelato *et al.*, EPAC94, (1994)1456, London.
- [12] Geng Rongli, Novel Photocathodes Based on Ion Beam Implantation Method, IHIP Internal Report (1993).
- [13] E. Chevally *et al.*, *NIM*, **A340**(1994)146.
- [14] S. H. Kong *et al.*, Private communication.

## Studies on a Laser Driven Photoemissive High-Brightness Electron Source and Novel Photocathodes

Geng Rongli   Song Jinhua   Yu Jin

*(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871)*

Received 14 December 1995

### Abstract

A laser driven photoemissive high-brightness electron source at Peking University is reported. Through a DC accelerating gap of 100kV voltage, the device is capable of delivering high-brightness electron beam of 35—100ps pulse duration when irradiated with a mode-locked YAG laser. The geometry of the gun is optimized with the aid of simulation codes EGUN and POISSON. The results of experimental studies on ion implanted photocathode and cesium telluride photocathode are given. The proposed laser driven superconducting RF gun is also discussed.

**Key words** high-brightness electron beam, photocathode, laser driven, superconducting cavity.