

K₂CsSb 光阴极在电子加速器领域的研究与发展

张帆^{1,2} 李小平¹ 金莹²

(1 中国科学院高能物理研究所 100049; 2 北京科技大学国家材料服役安全科学中心 100083)

1. 引言

作为人们探索微观世界的一种手段，基于加速器的同步辐射光源及相关的光子科学在过去几十年取得了长足的发展，并极大地促进了基础科学和工业技术领域的革新。物质科学领域的不断发展，对下一代新型光源的性能也提出了新的要求，其中的一个显著特点是要求光子具有高的平均通量和亮度。作为下一代先进光源的两个重要发展方向，基于电子直线加速器的高增益 X 射线自由电子激光装置 (XFEL) 和基于能量回收型直线加速器的 X 射线光源装置 (XERL) 是当前国际先进加速器技术发展的热点和前沿。XFEL 和 XERL 装置示意图如图 1 和图 2 所示。XFEL 是在波荡器中发生光子和电子的相互作用而产生相干 X 射线。XERL 则是将已被直线加速器加速或使用过的电

子束，经过磁场回转，返回到直线加速器，施加反向电场力让电子束减速，这样电子束的能量会以电磁波的形式返还给加速结构可用于加速新的电子束产生 X 射线，从而极大的降低加速器结构需要的高频功率，提高能量利用率。因此 XFEL 具有高峰值亮度、超短脉冲和高相干性，而 XERL 的峰值亮度不如 XFEL，但具有高平均亮度、波长覆盖宽、高稳定性和重复性、极高的能量回收效率等优点。可以说，XERL 和 XFEL 各有所长、互为补充且相互不可取代，都是当前国际先进加速器技术发展的热点和前沿。目前，世界上已建成的 XFEL 装置主要基于常温直线加速结构，可以产生高峰值亮度、横向相干、超短脉冲的光子束。正在建造的欧洲 XFEL 和计划建造的 LCLSII(美国劳伦斯伯克利国家实验室直线加速器。相干光源二期项目) 都将采用超导直线加速器驱动的方案，可以大大

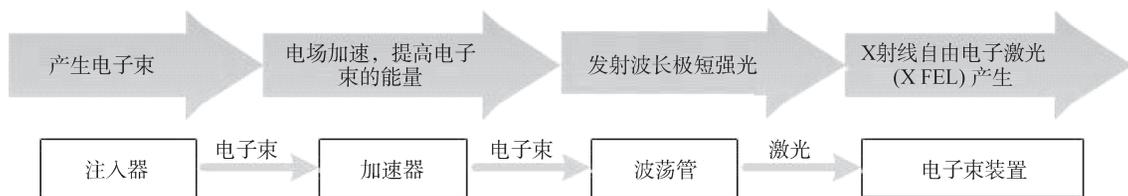


图 1 自由电子激光 (FEL) 装置示意图

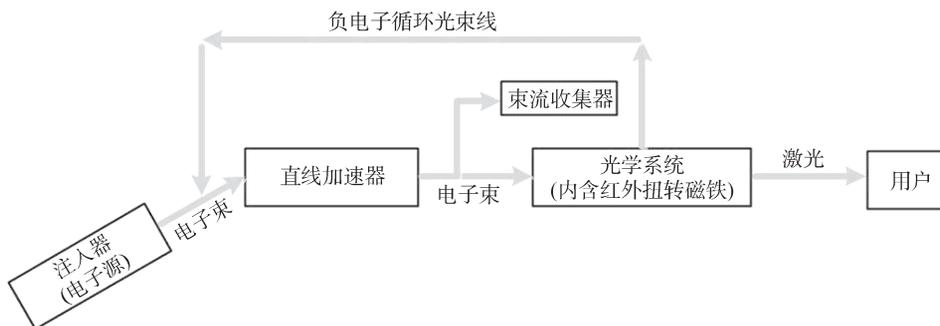


图 2 能量回收型直线加速器 (ERL) 装置示意图

提高电子束流的平均流强(几十 μA 至 mA 量级)和光脉冲的重复频率(MHz 量级)。另一方面,如 JLab(美国杰斐逊国家实验室)、Cornell(美国康奈尔大学)、KEK(日本高能加速器研究机构)和 ALLCE(欧洲核子中心大型强子对撞机实验室)等研究部门的 XERL 光源利用能量回收技术将大大提高能源利用效率,有效降低所需功率,这将进一步提高电子束流的平均流强(几十 mA 至百 mA)和光脉冲的重复频率(GHz 量级),使其具有更高的平均亮度。总的来说,下一代先进光源对直线加速器注入器的束流品质提出了更高的要求。作为 XERL 和 XFEL 所需电子束的最初源头,注入器部分的设计变得极其关键,尤其是其核心部分——高平均流强、低发射度电子枪系统的设计,而电子枪系统中最为关键的则是光阴极,光阴极作为光电效应的直接承受着,直接决定了束流品质。

目前常用的可行电子枪方案三种;分别是光阴极常温微波电子枪(NC RF-gun)、超导光阴极微波电子枪(SC RF-gun)和光阴极直流高压电子枪(Photo Dc-gun),各有优势和局限。光阴极微波电子枪在高频段阴极表面的电场梯度可以达到几十甚至上百 MV/m ,有利于在电子枪出口处获得小发射度(一束粒子在垂直于前进方向的横向平面中有一个空间分布范围,先前运动时,还有一定的张角,发射度定义为束流尺寸与张角的乘积)、单束团电荷量高的电子束流,但射频占空比(一个脉冲循环内通电时间所占的比例)受限于腔体内表面平均功率密度、腔体体积小和水冷等原因,从而限制了束团的重复频率(每秒种产生的触发脉冲数目);通过降低微波电子枪的射频频率,增大腔体体积可以有效的提高占空比,从而提高束团的重复频率,但这会导致腔体内阴极表面所能达到的最高加速电场梯度相应降低,不利于高束团电荷量存在时对空间电荷效应的抑制。光阴极直流高压电子枪的阴极和阳极间为直流场,束团重复频率主要取决于激光脉冲频率,因此这类电子枪一般可以工作在极高的重复频率(1.3GHz)下,有利于高平均流强的实现。随着阴极材料制备技术及激光技术的发展,直流高压电子枪的最高平均流强将有望达到 100mA ;但直流高压电子枪阴极表面的加速电场较小,很难保证在电子

枪出口处获得小发射度且单束团电荷量高的电子束流,这就需要进一步提高电子枪的工作电压和阴极表面加速电场梯度,从而降低空间电荷效应在对电荷量增大后对早期发射度的影响,然而此时直流高压电子枪枪体内的场致发射问题将大大增加电子枪的设计难度。

从总体看,光阴极直流高压电子枪技术相对成熟,是目前开展低发射度、高平均流强 XERL 光源装置的首选。世界上多个实验室例如 JLab-ERL 装置、Cornell-ERL 装置、KEK-cERL 装置及 ALICE-cERL 装置均选用光阴极直流高压电子枪作为电子源的首选方案。常温高频(L 波段到 S 波段)光阴极微波电子枪阴极表面最高加速电场梯度可达几十甚至上百 MV/m ,非常有利于在电子枪出口获得小发射度、高束团电荷量的电子束流,因此,这种电子枪普遍应用在现有的 XFEL 装置中,例如 Euro XFEL(欧洲 XFEL)和 FLASH(德国汉堡自由电子激光装置)所采用的 1.3GHz 电子枪及 LCLS XFEL 所采用的 2856MHz 电子枪。超导光阴极微波电子枪是获得高平均流强、低发射度电子束流的另一种方案,比如 BNL(美国布鲁克海文国家实验室)研制的 704MHz 超导微波电子枪,理论上出射的最大平均流强将达到 500mA 。相比于技术成熟的直流高压电子枪和常温微波电子枪,超导光阴极微波电子枪目前还处于关键技术的攻关阶段,需要长期的研究和束流性能的验证。

作为光阴极电子枪系统的核心部分,光阴极材料的选择非常重要。为了获得高平均流强、低发射度的高品质电子束流,理想情况下,要求激光驱动的电子枪内置光阴极应该具备以下基本特性

- (1) 高量子效率(QE 值)
- (2) 快速响应时间($\sim 1\text{ps}$)
- (3) 大电流密度
- (4) 合理的寿命
- (5) 低的热发射度

光阴极 QE 值和寿命是电子枪用光阴极十分关键的性能参数。QE 是光电效应过程中产生的光电子数与入射到光阴极上的激光光子数之比,可以用如下公式来计算。电荷寿命的测量是通过 QE 值和积累电荷量的函数关系确定,即 QE 值降到某一数值(如初始

值的 $1/e$ 时), 用被提取出的电荷量来界定。

$$QE = \frac{n_1}{n_2} = \frac{It/e}{Pt/h\mu} = \frac{Ih\mu}{Pe} = \frac{Ihc}{Pe\lambda} = \frac{124.3 \times I}{P\lambda}$$

式中: n_1 为光电子数; n_2 为入射光子数; I 为光电流 (μA); t 为激光驱动时间; e 为单位点电荷量; P 为入射激光功率 (mW); h 为普朗克常量; μ 为激光频率; c 为光速; λ 为激光波长 (nm)。

光阴极必须具有一定量子效率和足够的寿命才能保证电子枪的大通量、高亮度束流持续性发射; 光阴极在所处的真空环境下仍能保持原始的活性, 才能保证足够的寿命, 但这历来是许多光阴极的致命弱点。同时, 驱动激光最好处于红外和可见光波长范围。现代完善的激光系统应用于性能优良的光阴极, 可以很容易获得 10mA 的平均流强; 对激光系统和常用的光阴极作进一步改进, 也可以满足 100mA 的要求。以目前的激光技术和阴极制备技术, 产生 0.5A 的平均流强十分困难, 此时阴极寿命也使得这类光阴极的实际应用受到限制。

在实际应用中, 满足上述全部要求的光阴极材料目前还不存在, 一些光阴极材料只能满足其中部分要求。因此我们在为电子枪选取光阴极时, 必须看中其应该具备的功能性特点, 注意各功能参数的平衡, 力求选取能满足电子枪需求的最优性能光阴极。

2. 常见的几种光阴极

常用于光阴极电子枪的阴极材料包括金属阴极和半导体阴极两类。金属阴极主要包括铜、镁等; 半导体阴极主要有单碱性光阴极 (光阴极化学成分中反含有一种碱金属元素) GaAs、Cs₂Te 和双碱性光阴极 (光阴极化学成分中含有二种及以上的碱金属元素) K₂CsSb 等。其中 GaAs 属于负电子亲和势光阴极 (Negative Electron Affinity, 简称 NEA), Cs₂Te 和 K₂CsSb 属于正电子亲和势光阴极 (Positive Electron Affinity, 简称 PEA)。所谓电子亲和势可定义为半导体带底部到表面势的能量值, 它表征发生光电效应时, 电子逸出材料的难易程度。阴极材料电子亲和势越小, 电子越容易逸出。如果电子亲和势为零或负值, 则表示电

子处于随时可以脱离阴极材料的状态。因此 GaAs 属于 NEA 单碱性光阴极, Cs₂Te 属于 PEA 单碱性光阴极, K₂CsSb 属于 PEA 多碱性光阴极。

2.1 金属光阴极

金属光阴极主要应用于高加速梯度 NCRF (常温射频) 电子枪, 提供的电子束流在 1mA 以上。它的主要优点是: 热发射度较低, 瞬时响应, 可用于制备短束流脉冲。金属光阴极敏感度低, 对真空度要求不高, 寿命较长, 制备和使用都很方便, 并不需要 load-lock 装置 (光阴极制备系统中实验金属源在源室, 制备室和外界真空有储室之间转换运动的传动装置)。Mg 和 Cu 是最常见的金属光阴极, 由于其功函数很高, 暗电流小, 因此常用于强电场环境, 为了克服高能量势垒, 需要超强激光驱动, 但是 QE 值依旧很低, 266nm 激光驱动下, Mg 光阴极 QE 值仅为 5×10^{-4} 。目前, 随着激光二极管增益介质抽运技术的发展, 商用低功率激光系统可以满足这类需求。

2.2 NEA 单碱性光阴极

最初, GaAs 光阴极凭着能发射自旋束的特性被斯坦福直线加速器中心应用于直流高压电子枪。从此 GaAs 直流高压电子枪一直被应用于 FEL 和 ERL 发射高质量束流。GaAs 光阴极为负电子亲和势材料, 有利于光电子的逸出, 它在驱动激光波长为 780nm 时, 热发射度最低, 但是此时量子效率较低, 由于响应时间较长, 短脉冲激光照射时, 电子束团会产生 $20\text{-}40\text{ps}$ 的拖尾效应, 不利于短脉冲电子束团的发射。因此选用 GaAs 作为光阴极材料时, 一般都会折中选取 532nm 的驱动激光, 既能保证高量子效率, 又可实现瞬时响应和较低的热发射。实验表明: 532nm 的激光驱动时, GaAs 光阴极量子效率可达 10% , 响应时间低于 1ps , 热发射度低于 $0.4\mu\text{m}/\text{mm}\text{-rms}$ 。但是 GaAs 光阴极易被污染, 制备基底须达到原子级别洁净, 同时它的性能受真空环境影响非常大, 通常需要不低于 10^{-9}Pa 真空度来降低化学毒性和少量离子轰击以保证较高的量子效率和电荷寿命。然而直流高压电子枪具备低真空、高压放电和低水平场发射的特点, GaAs 光阴极装配后,

往往会因为离子轰击的缘故,导致阴极寿命降低, QE 值极易衰减。目前, GaAs 虽然使用寿命受到限制但仍被应用于射频枪结构中发射连续波束流。

2.3 PEA 单碱性光阴极

常见的 PEA 单碱性光阴极材料包括 Cs_2Te 、 Cs_3Sb 等。其中 Cs_2Te 光阴极在 266nm 的激光驱动下, QE 值为 10%, 寿命长, 瞬时响应 (ps 量级), 没有明显的拖尾, 暗电流小 (上限 $0.4\text{mA}/\text{cm}^2$) 等优点, 但是它的禁带宽度为 3.3eV, 需要用紫外光激发, 因此这种光阴极对激光技术要求较高。实验发现: Cs_2Te 光阴极在常导射频电子枪中以最小的 QE 值衰减可持续运行 120 天, 在 10^{-7}Pa 真空中仍具有良好的电荷寿命, 利于阴极长时间的稳定运行。因此 Cs_2Te 光阴极将是下一代基于超导的 XFEL 装置中光阴极电子枪常用的阴极材料。 Cs_3Sb 光阴极材料是多层膜结构, 驱动激光波长为 532nm, 量子效率达到 2%, 10^{-5}Pa 真空中寿命仅仅是几个小时, 实现 Cs_3Sb 的研究突破可以降低 PEA 单碱性光阴极对驱动激光的技术要求。

2.4 PEA 多碱性光阴极

多碱铯光阴极大多用于光电倍增管 (PMTs)、电视摄像管以及少量的电子枪中, 这类光阴极按照成分的不同分为多种。其中, 最常见也是性能最优良的电子枪用碱铯光阴极是 K_2CsSb 光阴极, 它只能在合适的基底上依次沉积不同元素制备得到, 并通过特殊的真空传送装置 (load-lock 装置) 传递到电子枪体内。虽然 K_2CsSb 光阴极是正电子亲和势阴极材料且热发射度略高于 GaAs, 但是其响应时间更短, 束流拖尾效应不明显; 此外, K_2CsSb 光阴极最大的优势在于它对真空的要求不像 GaAs 那么苛刻, 高平均流强下具有更长的电荷寿命, 这对实现长时间的稳定运行意义重大。但是要实现这种光阴极在电子枪的应用仍面临不少挑战: 如常导射频枪中真空度较低, 使得 K_2CsSb 光阴极寿命仅有几个小时, 但是超导射频枪对脉冲重复率和占空比限制因素较少, 而且腔体内部真空度提高了一个数量级, 有利于阴极长时间稳定运行。因此随着超导光阴极电子枪技术的研究与发展, K_2CsSb 光阴极

势必得到更广泛的应用。

从近几年光阴极研究应用状况来看, GaAs、 Cs_2Te 和 K_2CsSb 是世界范围内公认的可以用来产生高平均流强、低发射度电子束流的两种光阴极材料。但是由于 GaAs 光阴极在电子枪应用中寿命和量子效率 (QE) 衰减问题严重, Cs_2Te 光阴极需要紫外激光驱动, 以目前的激光技术手段并不容易实现, 于是 K_2CsSb 光阴极得到国内外研究人员更多的青睐。下面就 K_2CsSb 光阴极材料在国内外电子加速器 (先进电子枪) 领域的研究与应用展开详细的叙述。

3. K_2CsSb 光阴极在国外的研究与发展

1955 年, 索默 (A. Sommer) 首次成功制备多碱金属光阴极, 他初步发现多碱金属铯化物如 Sb-K-Na 和 Sb-K-Na-Cs 具备很高的灵敏度, 从此迎来了碱金属光阴极的研究热潮, 在接下来的三十多年, 碱金属光阴极在 PMT (光电倍增管)、电子枪等领域的应用都有了长足的发展, 而在先进电子枪领域, 用途最广的双碱金属光阴极 K_2CsSb 主要应用于三种类型的电子枪:

3.1 K_2CsSb 在常温微波电子枪的研究应用

考虑到双碱金属光阴极高 QE、长寿命, 瞬时响应等特点, 1992 年, 道尔 (Dowell) 等人在 Boeing (波音公司) 常导射频枪 (NCRF) 中, 采用双碱金属光阴极 K_2CsSb , 占空比为 25% 时, 得到 32mA 的束流, 量子效率为 5%~12%, 达到当时射频枪束电流的世界纪录, 但是电子枪内真空度很低, 阴极寿命仅有几个小时。

2000 年初, LANL/AES (美国洛斯阿拉莫斯国家实验室) 启动了 2.5 腔的 700 MHz 常温 CW 微波电子枪研制, 通过精心设计水冷系统并经过束流测试, 该电子枪在连续波射频模式工作时成功获得了 2.5 MeV 的电子束流, 阴极表面的加速电场最高达到 10 MV/m, 但是进一步提高加速电场梯度的限制因素主要是水冷问题。近几年来, 为了获得小发射度、高重复频率和高束团电荷量的束流, 国际科学界提出将微波电子枪

的频率进一步降低到 30 MHz 至 300 MHz 频段，比较典型的当属 LBNL(美国劳伦斯伯克利国家实验室)提出并为 LCLS II 超导 XFEL 设计的 186 MHz 连续波微波电子枪，束流重复频率的设计值为 1MHz，采用 K_2CsSb 和 Cs_2Te 光阴极进行测试，阴极表面的加速电场设计梯度为 19.5 MV/m，电子束流在电子枪出口的设计能量为 750 KeV，动力学模拟计算表明这种电子枪束流完全可以满足下一代 XFEL 光源的小发射度要求，目前该型号电子枪是 LCLS II 的首选方案。

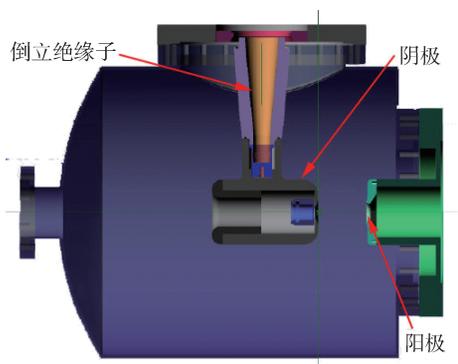


图3 JLab 直流高压电子枪示意图

3.2 K_2CsSb 在高压直流电子枪的研究应用

美国 JLab 实验室于 2003 年在直流高压电子枪(如图 3)上采用 GaAs 光阴极获得 350kV、9mA 的束流，但是 GaAs 光阴极每次重新铯化后可以发射的总电荷量只有 200C(库仑)。于是，他们转向双碱金属光阴极 K_2CsSb ，考虑到这种光阴极通常无法直接购买，性能优异的 K_2CsSb 光阴极需要在实验室通过超高真空室镀膜生长来获得。2012 年，他们通过小的真空装置将 BNL 实验室研制的 K_2CsSb 光阴极运送至 JLab 并安装在同一电子枪上，获得了 20mA 平均流强的电子束流， K_2CsSb 光阴极发射的总电荷量达到了 3000C。

Cornell-ERL 装置最初选用 GaAs 光阴极在光阴极直流高压电子枪(见图 4)上获得平均流强为 50mA 的束流，但束流在 50mA 仅维持了几分钟便开始下降，最终发射的总电荷量超过 100C。由于 GaAs 光阴极的电荷寿命对真空的依赖性太高，尤其是在高平均流强下电荷寿命很短，2011 年底 Cornell-ERL 宣布放弃

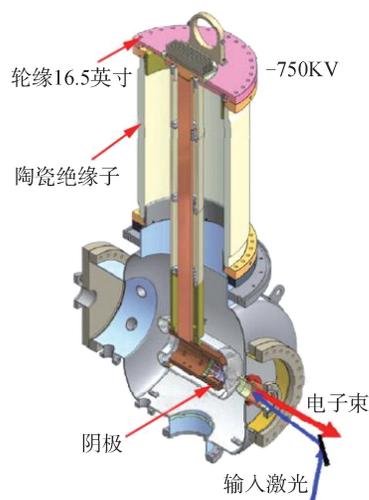


图4 Cornell 直流高压电子枪示意图

GaAs 方案，开始重点研究双碱金属光阴极 K_2CsSb 。他们采用钾铯铷依次沉积的传统工艺制备这种阴极，通过不低于 1×10^{-9} mba 真空度的环境传输到电子枪中，直流电子枪真空度也达到 10^{-10} Pa，最后获得的平均电流为 20mA，阴极寿命接近 8h，最大 QE 值超过 10%，从 K_2CsSb 光阴极上发射的总电荷量达到了 3000C。2012 年，Cornell 采用直流光阴极枪与超导射频枪模块结合的方式，利用 K_2CsSb 光阴极获得了 65mA 平均流强的稳定束流，最终发射的总电荷量超过 2000C。

3.3 K_2CsSb 在超导微波电子枪的研究应用

国际上多个实验室正在开展 K_2CsSb 超导光阴极微波电子枪研究，以期对其可行性和束流性能进行验证研究。HZB-ERL(德国亥姆霍兹柏林 REL)采用 K_2CsSb 光阴极超导微波电子枪(见图 5)，理论证明可以满足 ERL 的高束流强度(100mA)且电子能量为 50 MeV 需求，目前枪体已经在 Jlab 制造并测试完毕。同样采用 K_2CsSb 光阴极的 KEK 超导微波电子枪目前正处于研制阶段，这种电子枪可以为 KEK-ERL 提供 3 GeV 的高质量束流，包括平均流强为 100mA、束团为 77pC 的束流以及平均流强为 10mA、束团为 7.7pC 的束流。BNL-ERL 装置也采用超导微波电子枪，这种电子枪可提供 50mA 和 0.5A 两种强度的束流：采用 K_2CsSb 光阴极，获取 50mA 束流；为了获取更大强度

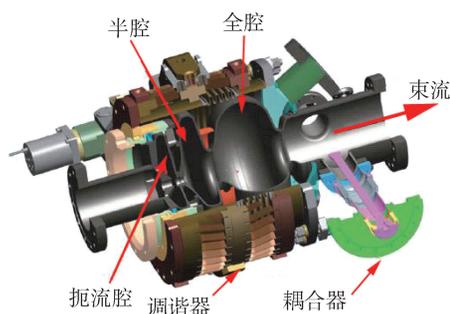


图5 HZB-ERL 光阴极超导射频电子枪结构

的束流，同时有效降低驱动功率，他们发明以 K_2CsSb 为电子源的金刚石薄膜放大阴极。此外， K_2CsSb 光阴极在高流强超导射频光电注入器中的关键问题是激光持续照射下阴极稳定寿命、发射均匀性以及量子效率，而这些问题在 BNL 都得到了很好的解决。

目前世界上最先进的超导微波电子枪是 HZDR-ELBE(德国德累斯顿高亮度低发电子直线加速器) 彩用的电子枪(见图5)，该枪采用两种模式：13MHz 高重复频率下束团低于 $80pC$ 的 FEL 模式和 0.5MHz 低重复频率下 $1nC$ 的大束团模式，前者采用 Cs_2Te 阴极，预设束流最大值 $400\mu A$ ，后者采用 Cu 阴极，束流预计达到 $0.1\mu A$ ，目前两种模式电子枪处于测试阶段。

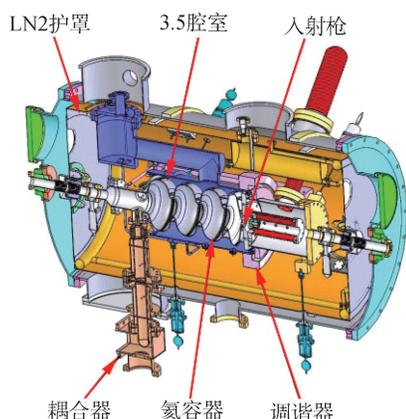


图6 北京大学 DC-SRF 光阴极注入器示意图

4. 光阴极电子枪在国内的研究与发展

国内对光阴极电子枪的研究也有一定的历史。2007年，清华大学加速器实验室研制的 S 波段光阴

极微波电子枪系统采用铜阴极，最大量子效率达到 7.0×10^{-5} 。该系统在上海应用物理所的自由电子激光和清华大学康普顿散射实验平台等装置上投入使用，取得了非常好的实验结果。

北京大学 ERL-FEL 装置采用直流电子枪和超导加速腔相结合的 DC-SC 光阴极注入器(见图6)，阴极材料为 Cs_2Te 。2015年，射频占空比为 7%、重复频率为 10Hz 时，北大获得平均流强为 $0.55mA$ 的稳定电子束流，宏脉冲达到 $1mA$ 。按照设计，该电子枪平均流强输出为 $5mA$ 。目前，北大正在筹备 K_2CsSb 光阴极的研制工作。

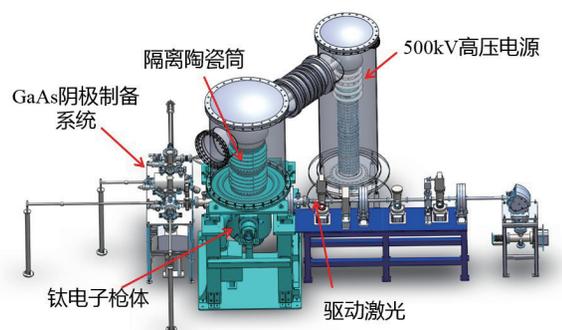
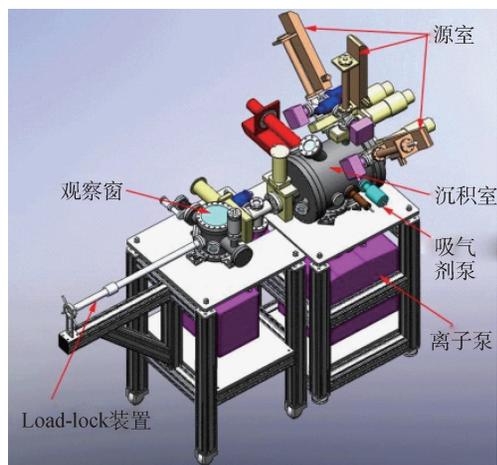


图7 高能所 500kV 光阴极直流高压电子枪

图8 双碱金属光阴极 K_2CsSb 制备系统

中国工程物理研究院将 GaAs 光阴极直流高压电子枪系统用于 THz 波实验研究，直流高压设计值为 $350kV$ ，2013年在 $230kV$ 高压时获得最高 $4mA$ 的束流，但维持时间较短，后期已经获得 $300kV/5mA$ 的束流，维持时间有所提高。

上海应用物理研究所正在开展 K_2CsSb 光阴极的研究，用于 250MHz 光阴极微波电子枪，目前光阴极

制备系统已搭建完成，并开展了制备实验。

高能物理研究所一直在推进 XFEL 和 XERL 关键技术的研究，提出了 XERL-XFEL“一机两用”的先进光源方案，得到了国际加速器领域专家的认可和好评。作为 XERL 先进光源关键技术研究的预研项目，基于 500KV 高压直流电子枪系统（见图 7），高能所设计了一套 K_2CsSb 光阴极制备系统，目前系统处于搭建阶段（见图 8）。制备的光阴极将在该系统平台已有的 1.3GHz 重复频率大功率激光器驱动下获得高平均流强的实验束流，完成高平均流强下 K_2CsSb 光阴极电荷寿命、束流发射度等关键参数的测试研究，后期将开展离子反轰对光阴极电荷寿命影响的实验研究。

5. K_2CsSb 光阴极研究展望

以 XFEL 和 XERL 为代表的下一代新型光源要求光子具有高的平均通量和亮度，这需要高量子效率且长寿命的光阴极，驱动激光为可见光且真空度要求低。国际前沿研究显示双碱金属光阴极 K_2CsSb 可以作为一种发射高平均流强、低发射度的光阴极材料。目前世界多个国家考虑采用这种材料作为电子枪阴极，期

望获得长时间稳定输出且平均流强达到几十 mA 甚至百 mA 的高品质束流，这对于基于超导直线加速器的下一代先进光源来说，具有相当大的吸引力。目前，在先进光阴极电子枪领域，国外对 K_2CsSb 光阴极相关理论和工艺研究较为深入，但是国内同行还没有利用 K_2CsSb 光阴极获得高平均流强束流并进行相关束流实验研究的经验，而且结构性能优异的光阴极电子枪设计能力相对薄弱。另外，在 K_2CsSb 光阴极制备工艺方面，国内外工艺研究与优化都一直领先于理论研究，确切组分、基本结构、光电效应机理等仍没有达成共识，理论对工艺的指导有限，因此电子枪要获得高平均流强、高亮度的束流，必须进一步提高光阴极量子效率，这就需要深入理论分析，建立成熟的 K_2CsSb 光阴极理论结构模型，很好的解释 K_2CsSb 光阴极薄膜生长机理以及内部光电子输送的光电效应机理，这样才能找到优化制备工艺的根本途径，提高光阴极性能。因此要更好地为下一代高亮度光源的发展储备关键技术，我国加快先进 K_2CsSb 光阴极电子枪的设计、 K_2CsSb 光阴极生长制备工艺及其光电效应机理的研究具有重要的战略意义。



科苑快讯

驱蚊产品并没有广告中宣传的效果

香茅蜡烛有助于营造气氛，但是并没有广告宣传中的驱蚊效果。这是一项最新研究做出的结论，研究者检测了 11 种驱避埃及伊蚊的驱虫剂，埃及伊蚊是寨卡病毒、黄热病、登革热和其他疾病的传播者。为了找出哪种产品的驱蚊效果最好，科学家开发出一种实验室测试方法，模拟一个人处于庭院天井中的情况。他们让一个人坐在风洞的一端作为诱饵，测试的驱蚊用品包括 5 种喷雾、5 种可穿戴设备和一种香茅蜡烛，科学家每次选取其中一种，测量有多少蚊子会向这个靶子移动。

多数驱蚊产品都没有达到产品标签上承诺的效果。在距离 1 米时，避蚊胺（DEET）和柠檬桉叶油（oil of lemon eucalyptus）喷雾驱走了 60% 的蚊子。唯一无效的可穿戴设备是含有甲氧苄氟菊酯（metofluthrin）杀虫

剂的别针式小风扇。其他产品只有微弱的驱蚊效果或者与完全不采取驱蚊措施并无差别。研究者在《昆虫科学杂志》（*Journal of Insect Science*）上做了报告。其中两种设备受到科学家的严厉批评：含有草药提取物的手镯和声称利用高频声波驱走蚊子的声波驱蚊器。

（高凌云编译自 2017 年 2 月 16 日 www.science-mag.org）

