

真空紫外光源近十年的发展

陈星旦

真空紫外辐射的光子能量为几十电子伏到数百电子伏,真空紫外光源不可能用常用的紫外、可见和近红外光源来代替。热辐射光源适用于近紫外到红外,但不适用于真空

紫外。例如白炽固体的最高温度为4000 K,在该温度下的黑体的光谱亮度,具有如下的波长分布特征:

λ	1 微米	7500埃	5000埃	3000埃	2000埃	1000埃	500埃
B_λ/B_{λ_m}	0.997	0.68	7×10^{-2}	1.4×10^{-3}	7×10^{-10}	5×10^{-24}	

显然白炽灯是不能用作真空紫外光源。另外,普通激发原子谱线的线光谱光源,也不适用于真空紫外,因为大多数原子和分子的最高光谱项的能量除原子 He、Ne、Ar 和 F 外,不超过15电子伏,而大多数元素低于10电子伏。

真空紫外光源种类繁多。一方面是因为真空紫外辐射物理实验的要求多样,没有一种单一的光源能满足所有实验的需要。例如研究吸收光谱要求具有连续光谱分布的光源;研究光电子谱和引发、研究光化学反应需要高亮度的单色光,因而线光谱光源更为适合。研究某些时间过程则需要脉冲光源;标定和校准仪器的波长和能量则需要各种标准光源。另一方面,因为真空紫外复盖很宽的波段,应用于不同波长范围的光源需要采用不同的工作物质和激发方式。

真空紫外光源从五十年代开始有较快的发展,至六十年代已奠定了制造各类光源的理论与技术基础。六十年代后期, Samson^[1]和 Заидел^[2]所写的真空紫外光谱的书,以很大的篇幅对真空紫外光源作了系统而详细的叙述。那时候,真空紫外光源的类型可简述如下,从这里可以大体看出一个眉目。

连续谱光源

氢辉光放电 连续谱从1600埃延伸到

5000埃。

惰性气体连续 Hopfield在1930年发表He的连续发射谱从600埃延伸到1000埃; Huffman和Tanaka等在六十年代初完善了惰性气体的连续谱研究。

Lyman连续 Lyman于1924年发表从可见到900埃的连续光源; Garton从降低电路中的电感以提高放电的电流密度出发而设计的光源,迄今仍为许多真空紫外光谱仪采用。

同步辐射 六十年代是同步辐射发展的初期阶段。

韧致辐射 x光管在x光谱区和远真空紫外区产生连续谱和线谱。

线谱光源

冷阴极放电 Hunter型毛细管放电,产生惰性气体共振谱线; Penning放电产生高次电离火花谱线。

热灯丝弧光放电 Hartman光源产生原子氢的Lyman线系。

双等离子体 Samson将加速器中的离子源用于产生真空紫外辐射,得到惰性气体的高次电离谱线。

微波和射频放电 这种放电的特点是不用电极,因而能产生不受电极材料影响的单色谱线。

电容火花放电 Millikan 于 1918 年用高压火花在真空中放电产生真空紫外，最短波长到 140 埃；其后 Lyman 在 Millikan 光源中引入工作气体，降低了着火电压，其辐射具有工作气体的特征。

近十年来，关于真空紫外光源的资料发表了不少，大多数属于技术上的改进，原理上的新发展不多。下面分别就目前在真空紫外研究中较为引起注意的几种光源予以评述。

惰性气体共振线光源 和连续谱光源

惰性气体在真空紫外产生很强的共振谱线，这种光源在光电子光谱学和光电离等研究中得到广泛应用。共振辐射可以用直流放电、电容火花、微波、射频等不同激发方式产生。最常用的共振线光源为 He I 584.33₄ 埃，He II 303.781 埃。He I 比较容易产生和具有较好的光谱纯度，He II 需要较大的激发功率，较低的 He 压，强度比 He I 要弱。Nobuo Ueno 等^[3]研究了 He II 共振辐射的强度与 He 气压的关系。

在与产生 He I 共振线的相近条件下，可产生 Ne, Ar, Kr 和 Xe 共振线。惰性气体（除 He 外）的主要共振线是 Ne I 735.895 埃，743.718 埃；Ar I 1048.219 埃，1066.659 埃；Kr I 1164.867 埃，1235.838 埃；Xe I 1295.586 埃，1469.610 埃。

惰性气体连续谱是在一定的光谱范围内适用的真空紫外光源。He, 580—1100 埃；Ne, 740—1000 埃；Ar, 1050—1550 埃；Kr, 1250—1800 埃；Xe, 1480—2000 埃。惰性气体连续谱最好是用电容火花放电激发，气体必须是高纯度。

Radler 等^[4]将高功率脉冲 He 连续光源与同步辐射进行了实验比较，他的结论是：在 800 埃附近，两种光源的有效辐射输出（指从单色仪狭缝的输出）差不多相等；在 60 0

埃以下，同步辐射明显的要强；到 584 埃，He 连续几乎没有了。Демилов 等^[5]及 Волк-ква 等^[6]设计了结构简单的脉冲 Ar 光源。

BRV 光源

1960 年 Balloffet 在研究真空中电容火花放电时，发现使用高原子序数金属如钨、铂作电极材料，能产生连续辐射，而用铝、镁作电极时观察不到任何连续谱。1961 年 Balloffet, Romand, Vodor 用铀作阳极，观察到在阳极附近产生小体积的高温高密度等离子体，发射的连续谱从 2000 埃延伸到 80 埃。1969 年 Garton 从结构上作了改进并命名为 BRV 光源，至今已成为在紫外和真空紫外研究原子和分子的很有用的连续光源。这种光源的典型放电参数为 22 千伏，0.5 微法，0.08 微亨，压力 10^{-5} — 10^{-8} 托。由于从这种光源观察到的最短波长发射为 ~ 1 埃，与 22 千伏电子产生的韧致辐射短波长限（0.56 埃）相接近，因此可以认为这种短波长辐射是由于通常的韧致辐射效应所产生。

近几年，发表了不少关于 BRV 光源的工作。Fox 等^[7]测定了它的光谱纯度和强度，得出强度是波长的函数 ($1/\lambda^2$)，这也表明这种光源是韧致型的发射。他用不同阳极材料拍摄了 1700~500 埃的光谱，进一步证明了铀所发射的光谱在整个波段都是连续的，没有发射线；而铝、钢、不锈钢等则只有发射线而没有连续谱。Cautu 等^[8]将电容器由通常的 0.5 微法增加到 2.5 微法，在阳极上加一直径 0.7 毫米毛细管以增加放电密度，能提高光源亮度达 400 倍。Kumer^[9]，Kuhne^[10]，Lucatorto^[11]等分别测定了 BRV 光源在 300 埃附近的输出特性，Kumer 得出 BRV 光源在某些应用上可以与同步辐射相比拟的结论。

Penning放电

Penning放电广泛用作加速器上的离子源。它主要是由两个相对安装的冷阴极和一个置于它们之间的圆环形或圆筒形阳极所构成。在两阴极之间垂直地加以磁场，在压力 10^{-8} 托以下（充惰性气体）产生稳定放电。

Penning放电用作真空紫外光源可产生高次电离谱线。1963年Deslatters等观测到了Ne III和Ne IV 200—360埃的谱线。电极电压500—100伏，放电电流约1安，磁场强度约1千高斯。这种光源的主要缺点是阴极腐蚀很快。

Warden等^[12]将Deslatters的设计加以改进，加大磁场（~3千高斯）和提高放电功率（~5千伏1安），得到了Ne IV和Al IV（阴极）强谱线，其谱线强度（Al IV 160埃）可与Tokamak放电中高度电离的谱线相比。

Finley等^[13]进一步将这种光源扩展到50埃。他们试验了多种电极材料，结果在50—170埃以铝电极氩放电最好；170—200埃镁电极最好；200埃以上以铝电极氩放电最好。阴极溅射率在氩气500毫安放电时，镁为每小时2毫米，铝为每小时0.5毫米。因为阴极不在光路上，对光栅的污染很少。

Penning放电是一种在短波长范围（200埃以下）内较强的线光源。

激光等离子体连续谱

激光聚焦在固体靶上产生高次电离谱线，较早进行过许多工作。近年来，研究它产生的真空紫外连续谱用作光源引起了兴趣。Breton等^[14]用钹玻璃激光和红宝石激光照射在钨和钽上，研究了1000—2000埃特别是在1216埃的连续发射光谱，在不同激光能量（ 10^{-8} —10焦耳）下得到光谱输出与激光能量成正比的结论。Carroll等^{[15][16]}进一步用调Q红宝石激光照射了原子序数 $Z = 50$

以上的近三十种元素，发现稀土元素从钐（Sm, 62）到铪（Hf, 72）在整个真空紫外区（35—2000埃）能得到很强的连续谱。连续谱的强度分布因元素而异。一般来说，在40—200埃，从镧（La, 57）开始，线发射减弱，到钐仅有少数发射线，再向前到铽（Yb, 70）连续谱变得既均匀而广阔。在200—2000埃，所有稀土元素都发射连续谱，但在1800埃以后有强的线光谱出现。钐的线光谱较弱，原子序数增加，线光谱出现更多和更强。

稀土元素被激光照射后产生的真空紫外连续谱，适于用作吸收光谱光源。它具有如下的特点：

1. 宽的光谱范围：40—2000埃，低 Z 靶适于长波长，高 Z 靶适于短波长。
2. 好的光谱纯度：没有明显的发射线。
3. 输出脉冲短：半宽度20~25毫微秒。
4. 对环境压力不灵敏：在 10^{-10} 托压力范围内不影响辐射输出。不像BRV光源仅能在 10^{-8} 托左右使用，同步辐射则要求高真空。
5. 具有点光源特性：发光点线度小于0.5毫米。

进一步提高激光功率和重复频率，还可改善辐射输出。

同步辐射

同步辐射是目前真空紫外和x光谱区最强大的光源。近年来得到广泛应用，发表了不少综述性文章和专著，例如[17]—[20]。

本世纪四十年代，人们开始对同步辐射发生兴趣。那时候，同步辐射的理论计算工作已经完成，已完整地得出了辐射特性的各个细则。五十年代，在实验上取得了与理论完全一致的结论，并指明了它作为真空紫外和x光源的优越性。从六十年代开始，利用当

时现成的电子同步加速器进行真空紫外光谱学的研究，获得了很大成功，由此引起了人们的重视。近年来，各国相竞建造专为产生同步辐射用的大型装置。据统计，目前世界上已运行使用的同步辐射装置约廿台，正在建造和计划建造中的约十余台。同步辐射的应用，已扩展到许多基础科学和应用科学领域。

同步辐射作为真空紫外和X光源，具有某些理想的性质。它的主要特点是：

1. 光谱是连续谱，从红外直到硬X射线。光谱分布曲线的形状，很像黑体的普朗克曲线。

2. 光子总辐射功率达数百千瓦。

3. 光束集中在轨道平面内的小立体角内（ ~ 1 毫弧度），电子能量越高，光束越集中。

4. 偏振，在轨道平面内100%偏振。

5. 具有很好的时间结构，脉冲宽度100微微秒—1毫微秒，脉冲间隔100—1000毫微秒。

6. 辐射参数具有可以进行精确的理论计算的特点，是真空紫外最好的标准光源。

国外的同步辐射装置最初就是高能物理实验用的电子同步加速器，由于两者使用要求不同，给同步辐射研究带来许多限制。后来设计的专用装置（电子贮存环），具有束流稳定（因而辐射输出稳定）和工作参数可以自由选择（例如改变光谱分布和时间结构）等性能，对开展光谱研究是极为方便的。但由于同步辐射装置设备庞大，造价高，不能提供给更多的实验室使用。

Cerenkov辐射

当高能带电粒子通过某一物质，其速度大于光在该物质中的速度时（即 $v > c/n$ ）产生Cerenkov辐射。它可以在可见直到紫外提供一个高强度的连续辐射源。Piestrup等⁽²¹⁾⁽²²⁾利用斯坦福大学的直线加速器产生

500兆电子伏，1毫安电子束流通过1.4米氦气（一个大气压），在室温下观察到6—20电子伏真空紫外辐射。

Cerenkov辐射的截止波长 λ_c 决定于介质：

介 质	He	Ne	Ar	LiF	CaF ₂	兰宝石	石英
λ_c (埃)	584	736	1048	1050	1350	1425	1650

Cerenkov辐射的发射集中在一个很窄的锥角内（ ≈ 20 毫弧度），这一点与同步辐射很相似。但同步辐射是沿着电子轨道切线地发射，在 2π 角度内只有约10毫弧度能收集到。

由于Cerenkov辐射是在 ≈ 1 大气压力下工作，这对于有些实验，例如研究气体的吸收光谱和光电离是特别重要的。

利用Cerenkov辐射进行真空紫外光谱工作，还没有见到更多的资料发表。

壁稳弧标准光源

在真空紫外，有三种可以计算光谱辐射度的标准光源：同步辐射，产生连续发射的高功率氢弧和产生黑体限线发射的氩弧。氢弧和氩弧都是属于壁稳等离子体电弧，弧被限制在由多片相互绝缘连接的水冷铜环所形成的通道内，这种弧具有稳定和可复现的特点，直流工作。

Ott等⁽²³⁾发展的高功率氢弧，是一种绝对标准光源。当弧电流约100安时，放电轴的温度接近20000K。在该温度下，连续发射系数达到最大，光谱辐射度可以理论计算。这种弧的特点是不需要采用光谱诊断来测定温度，而只要观察达到最大发射系数时的点，其光谱发射度的精度主要受有效弧长的误差的限制。该光源用于140—360毫微米，校准误差小于 $\pm 5\%$ 。

氩弧用作辐射度标准是采用Boldt最早发展的在弧中加入痕量杂质气体产生光学厚

($K, t \gg 1$) 共振谱线 (例如 C, Kr, N, O) 的方法。这些谱线中心的辐射度为黑体限, 可以根据其温度来计算。这个方法的缺点是只能有少数的谱线可用, 而且需要 0.01 毫微米级的光谱分辨率, 以分辨黑体限谱线的平顶。这种光源的准确度决定于测温的准确度, Preston^[24] 改进了测温方法而使得在 110—200 毫微米的共振线辐射度的测定误差小于 4—2.5%^[25]。

壁稳弧已被世界各国广泛采用作为真空紫外标准光源。Bridges 等^[26] 发展的微型氩弧是一种很稳定的二级标准光源。功率小于 1.5 千瓦, 在 114—330 毫微米发射很强的连续谱, 只有很少的杂质谱线。

短于 110 毫微米, 除同步辐射外, 还没有一种稳定和复现性好的光源, 可以作为真空紫外辐射标准。这方面的工作, 有待进一步发展。

参 考 文 献

- [1] J. A. R. Samson, *Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy*, 1967.
- [2] А. Н. Зайдел, И. Я. Шредер, *Vacuum Ultraviolet Spectroscopy*, 1970 (英译本)。
- [3] Nabuo Ueno et al., *Jap. J. A. P.* **16** (1977), 1655.
- [4] K. Radler, J. Berkowitz, *J. O. S. A.* **68** (1978), 1181.
- [5] М. И. Демидов, *ОМП*, 1975, No. 11, 21.
- [6] Г. А. Волкова, А. М. Пухов, *ЖПС* **28** (1978), 935.
- [7] J. N. Fox et al., *J. phys.* **E6** (1975), 655.
- [8] A. M. Cautu et al., *Appl. Opt.* **14** (1975), 996.
- [9] V. Kumer et al., *Appl. Opt.* **15** (1976), 1856.
- [10] M. Kuhne et al., *Appl. Opt.* **16** (1977), 1786.
- [11] T. B. Lucatorto et al., *Appl. Opt.* **18** (1979), 2916.
- [12] E. S. Warden et al., *Appl. Opt.* **16** (1977), 1902.
- [13] D. S. Finley et al., *Appl. Opt.* **18** (1979), 649.
- [14] C. Brestom, R. Papoular, *J. O. S. A.* **63** (1973), 1225.
- [15] P. K. Carroll et al., *Optica Letters* **2** (1978), 72.
- [16] P. K. Carroll et al., *Appl. Opt.* **19** (1980), 1454.
- [17] E. M. Rowe, J. H. W. Weaver, *Sci. Amer.* **236** (1977), No. 6, 32.
- [18] E. J. Ansaldo, *Contemp. Phys.* **18** (1977), 521.
- [19] R. E. Watson, M. L. Perlman, *Science* **199** (1978), 1295.
- [20] C. Kunz (Editor), *Synchrotron Radiation*, 1979.
- [21] M. A. Piestrup et al., *J. Appl. Phys.* **44** (1973), 5160.
- [22] M. A. Piestrup et al., *Appl. Phys. Lett.* **78** (1976), 92.
- [23] W. R. Ott et al., *Appl. Opt.* **14** (1975), 2121.
- [24] R. C. Preston, *J. Q. S. R. T.* **18** (1977), 337.
- [25] P. J. Key, R. C. Preston, *Nature* **265** (1977), 717.
- [26] J. M. Bridges, W. R. Ott, *Appl. Opt.* **16** (1977), 367.