

大功率激光器及应用

K.-L. 考帕 H. 屋泽 著

科学出版社



大功率激光器及应用

K. -L. 考帕 H. 屋泽 著

陈大庆 傅德棣 译

科学出版社

1983

1111024

内 容 简 介

本书介绍了大功率真空紫外、紫外、可见光、红外范围的准分子激光器、化学激光器、频率转换以及其他大功率激光系统与应用。同时也讨论了它们的性能、原理、工艺等技术性的问题，涉及到在非线性光学、化学动力学及光谱学中的某些应用，特别讨论了分离同位素方面的某些应用。

本书可供激光方面的科研人员、工程技术人员阅读，也可作为高等院校光学专业师生的参考书。

K. -L. Kompa & H. Walther
HIGH-POWER LASERS AND APPLICATIONS
Springer-Verlag 1979

大功率激光器及应用

K. -L. 考帕 H. 屋泽 著

陈大庆 傅德棣 译

王 英 校

责任编辑 刘海龄

中 华 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983年5月第一版	开本：787×1092 1/32
1983年5月第一次印刷	印张：8 3/8
印数：0001—4,500	字数：181,000

统一书号：15031·490

本社书号：3051·15-4

定 价：1.30 元

序 言

1977年6月20—22日在慕尼黑举行了大功率激光器及其应用会议。与此同时，在慕尼黑的市场举办了“1977年度激光器国际商品交易会”。这次会议是以往在美国举行的一系列电子跃迁激光器讨论会的继续。会议的主要议题是：大功率真空紫外、紫外、可见和红外激光器，内容包括激光系统的分析、工艺及激光概念等，还讨论了非线性光学、化学动力学和光谱学中的某些应用，特别讨论了与同位素分离有关的一些应用。

代表澳大利亚、加拿大、英国、芬兰、西德、东德、法国、意大利、荷兰和美国的95名科学家出席了这次会议。

会议组织者感谢西德科学研究学会、美国空军科学研究所、美国空军宇航发展研究署、美国陆军欧洲研究局以及相干辐射公司、光谱物理公司和低温物理公司的财政资助。

此外，我们感谢我们的同事 Steven N. Suchard 博士和 Jeffrey I. Steinfeld 教授为会议协助美国捐款，并感谢 Frau Maischberger 在会务方面对我们的帮助。

卡尔·路德维格·康帕
赫伯特·沃尔瑟

1977年12月

目 录

第一部分 准分子激光器

准分子激光器.....	Ch. A. Brau(1)
短波长(真空紫外和超紫外脉冲)相干辐射的产生.....	D. J. Bradley(9)
电子束泵浦的 ArF^* 和 KrF^* 激光器中主要的形成和猝灭过程.....	M. Rokni, J. H. Jacob, J. A. Mangano, J. Hsia 和 A. M. Hawryluk(21)
电子束控制和氛稳定的 XeF 激光器.....	L. F. Champagne(37)
汞卤化物中新的可见激光跃迁.....	J. H. Parks(43)
带气体循环系统的高重复率 XeF 激光器.....	C. P. Christensen(53)
用同轴电子束泵浦的简易真空紫外高压气体激光器.....	G. L. Oomen 和 W. J. Witteman(57)
长脉冲电子束激励的 XeF 激光器.....	B. Forestier 和 B. Fontaine(61)

第二部分 化学激光器

电子跃迁激光器.....	S. N. Suchard(67)
大功率激光器中的激活速率和退激活速率.....	J. I. Steinfeld(75)

- 基于氯原子的化学反应产生的 $3.8\mu\text{m}$ 和 $10.6\mu\text{m}$ 连续波
激光辐射.....S. J. Arnold,
K. D. Foster, D. R. Snelling 和 R. D. Suart(84)
- 锡原子和锆原子的气相反应.....
.....J. R. Wiesenfeld 和 M. J. Yuen(90)
- 通过从 $\text{I}(^2\text{P}_{1/2})$ 能量转移或与 $\text{I}(^2\text{P}_{1/2})$ 反应碰撞进行
激光泵浦的可能性.....P. L. Houston(94)

第三部分 其它激光系统

- 紫外离子激光器.....J. R. McNeil,
R. D. Reid, D. C. Gerstenberger 和 G. J. Collins(99)
- 连续波光泵浦碘分子激光器.....
.....J. B. Koffend, F. J. Wodarczyk 和 R. W. Field(108)
- I_2 和 Br_2 中的紫外激光跃迁J. Tellinghuisen(125)
- 气相激光器和其它新型染料激光器的进展.....
.....F. P. Schäfer(130)
- 注入锁定和不稳定谐振腔染料激光器I. J. Bigio(133)
- 连续波离子激光器的短波长多谱线特性.....
.....H. R. Luthi 和 W. Seelig(137)
- 大功率碘原子激光器K. Hohla(143)
- ASTERIX II, 一种兆瓦碘激光器.....
.....K. J. Witte, G. Brederlow, K. Eidmann,
R. Volk, E. Fill, K. Hohla 和 R. Brodmann(166)
- 一种简易的、大能量横向激励大气压 CO 激光器.....
.....W. E. Schmid(174)
- 一种振荡 CO_2 激光跃迁的带宽.....
.....W. J. Witteman 和 A. H. M. Olbertz(182)

掺杂横向激励大气压 CO ₂ 激光器中的彭宁电离·····	B. J. Reits(187)
--	------------------

第四部分 频率转换

红外和紫外区域的非线性过程·····	C. K. Rhodes(192)
Sn 蒸汽 285nm 的喇曼辐射·····	N. Djeu(206)
聚变激光器 351nm 辐射的下转换·····	J. Wilson 和 D. Ehrlich(209)

第五部分 应 用

放热反应终态的能量分布·····	S. Fischer(215)
原子与振动受激分子的反应·····	M. Kneba, K. J. Schmatjko 和 J. Wolfrum(228)
通过对 CF ₃ I 的多光子离解进行碳同位素分离·····	S. Bittenson 和 P. L. Houston (242)
四甲基二氧化物的红外激光离解·····	Y. Haas 和 G. Yahav(246)
可调谐激光引发光栅凹陷的观测·····	F. Keilmann(250)
气体 UF ₆ 可见荧光的研究·····	A. Andreoni, R. Cubeddu, S. De Silvestri 和 F. Zaraga(254)

第一部分 准分子激光器

准分子激光器

Ch. A. Brau

目前, 光谱范围从绿光到真空紫外的许多准分子激光器已得到证实, 而且还提出了另外一些准分子激光器。虽然各种类型的准分子激光器具有相当不同的特性, 以使其能用于不同的目的, 但是, 稀有气体卤化物激光器已证明有最大的功率和最高的效率, 因而可望得到最广泛的应用。从氟化氩激光器中获得的总效率已经超过了1%, 且脉冲能量高达350焦耳, 并预计有更高的效率和更大的脉冲。利用受激喇曼散射, 可得到各种紫外波长。

准分子是一些束缚在电子受激态中的分子, 而不是束缚在基态中的分子, 并发射特有的宽带无束缚的辐射, 见图1。激光跃迁无束缚的性质, 保证了粒子数反转, 并且在低激光能级上不致发生瓶颈效应。然而尽管激光跃迁的宽带性质提供了一些可调谐性, 但它却使增益降低, 从而导致准分子激光器必须具有高阈值的泵浦功率。目前已经证实了几种不同类型的准分子激光器, 其中包括稀有气体、稀有气体氧化物、稀有气体单卤化物和汞(只有增益)的准分子激光器。类似的激光器还有氢、钠、卤素和最近发现的汞单卤化物激光器。在这些激光器中, 较低的激光能级是束缚的, 而激光作用发生在离解极限点附近。正如表1所概括的, 准分子激光器的

1111024

• 1 •

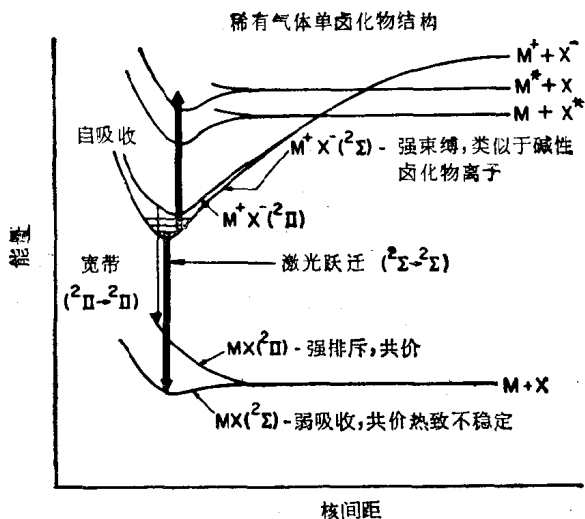


图1 表示激光跃迁和自吸收跃迁的稀有气体卤化物分子势能图

表1 准分子激光器的波长

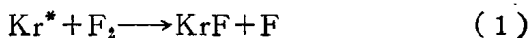
种 类	波 长 (毫微米)	参 考 文 献
Xe ₂	172	Kochler, et al., <i>Appl. Phys. Lett.</i> 21, 198(1972)
Kr ₂	146	Hoff, et al., <i>Appl. Phys. Lett.</i> 23, 245(1973)
Ar ₂	126	Hughes, et al., <i>Appl. Phys. Lett.</i> 24, 488(1974)
XeO	540	Powell, et al., <i>Appl. Phys. Lett.</i> 25, 730(1974)
KrO	558	Powell, et al., <i>Appl. Phys. Lett.</i> 25, 730(1974)
ArO	558	Hughes, et al., <i>Appl. Phys. Lett.</i> 28, 81(1976)
XeBr	282	Searles and Hart, <i>Appl. Phys. Lett.</i> 27, 435(1975)
XeF	353	Brau and Ewing, <i>Appl. Phys. Lett.</i> 27, 435(1975)
XeCl	308	Ewing and Brau, <i>Appl. Phys. Lett.</i> 27, 350(1975)
KrF	249	Ewing and Brau, <i>Appl. Phys. Lett.</i> 27, 350(1975)
ArF	193	Hoffman, et al., <i>Appl. Phys. Lett.</i> 28, 350(1976)
KrCl	222	Murray and Powell, <i>Appl. Phys. Lett.</i> 29, 252(1976)
Hg ₂	335	Schlie, et al., <i>Appl. Phys. Lett.</i> 28, 393(1976)

波长范围是从绿光到真空紫外光谱区。

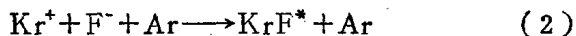
已经提出一些其它的准分子激光器，包括汞的络合物激光器和掺各种金属原子的稀有气体激光器，并正在进行积极的研究。但是，最为成功的准分子激光器一直是稀有气体单卤化物激光器，这是目前市场上唯一可买到的准分子激光器。这些激光器，以前只能用于红外波段，现已证明有高的效率和大的脉冲能量。然而，这些激光器仍有其本身的一些困难和局限性。鉴于稀有气体单卤化物激光器的现实重要性，本报告的其余部分将集中讨论这类激光器。

为了更好地了解稀有气体卤化物的性能，有必要对这些系统的光谱学和动力学问题作些论述。一些激光跃迁完全允许，其寿命可为10毫微秒量级，增益截面超过 10^{-16} 厘米²。然而，还有许多紫外的吸收体，包括一些卤化物分子和许多瞬间出现的粒子，诸如受激稀有气体的原子和准分子、稀有气体二聚物离子、卤化物离子，甚至受激稀有气体卤化物分子本身。

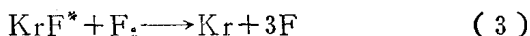
稀有气体卤化物激光器具有较高的功率和效率的基本原因在于其非常有利的形成激光上能级的动力学过程。电激励稀有气体混合物的结果是产生受激稀有气体的原子、离子和电子。并按以下反应形成稀有气体卤化物：



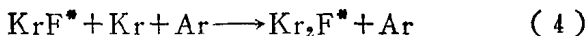
和



这两种反应过程极其迅速，进行反应的典型时间为10毫微秒量级。在多数情况下，在产生受激稀有气体卤化物产物时，这两种反应的效率基本上为100%。但是，这些受激产物还会被一些快速过程猝灭，例如：



和



为了获得达到阈值所需要的泵浦速率，已采用几种技术，包括高强度相对论电子束、快速横向放电以及电子束稳定的放电。今后，如用一个脉冲核反应堆在激光器中引发裂变反应，可直接实现核泵浦。当电子束用于泵浦激光时，相对论电子形成受激稀有气体的原子和离子，对于所产生的每个离子或受激态，贮存在这种气体中的平均能量 $\bar{w} \approx 20$ 电子伏特。这样，在光子能量为 $h\nu$ 的 KrF 激光器中，其最大可能的效率 $\eta(\text{最大}) = h\nu(\text{KrF})/\bar{w}(\text{Ar}) = 25\%$ 。从 $\text{KrF}^{(1)}$ 中已观测到高达 15% 的本征效率（激光能量 ÷ 在气体中的储能），但总（“壁塞”）效率要低得多⁽²⁾。如果采用大面积的电子束，从 KrF 中得到了高达 350 焦耳的脉冲⁽³⁾。更大的脉冲是可能的，但由于电子束枪的截止以及电子束的自收缩问题，每米激光长度的脉冲能量最终被限制在 1 千焦耳量级。激光的总长度受到光子吸收过程的限制，但高达 1 千焦耳的脉冲显然是可能的。因此，脉冲重复频率和平均功率，受箔膜（电子束通过箔膜进入激光器）能被冷却的速率以及激光介质被气流和声阻尼清除速率的限制。

放电泵浦可能比电子束泵浦更为有效，因为放电泵浦生成带热电子的受激稀有气体原子所消耗的能量比电子束泵浦生成带相对论电子的离子消耗的能量少。除氦外⁽⁴⁾，80% 以上的放电能量可以看作是稀有气体的电激励能量⁽⁵⁾，见图2。诚然，最大可能的效率受光子能量 $h\nu$ 与稀有气体激励能量 E^* 之比的限制。因此，在 KrF 激光器中， $\eta(\text{最大}) = h\nu(\text{KrF})/E^*(\text{Kr}) = 50\%$ 。实际上，由于种种原因，观测到的

效率要低得多。负电性气体中的放电基本上是不稳定的，而如果放电是外部不稳定的话，那么在击穿之后，阻抗就迅速减弱，并且空间不均匀性扩大。因此，这种放电不能在最佳状态运转。尽管如此，这种简单、低电感的快速横向放电已得到 700 毫焦耳以上的脉冲，其脉冲宽度约为 20 毫微秒，总效率（激光能量/存储能量）超过 1%^[6]。在一次单独的试验中^[7]，已证实脉冲重复频率为 100 赫兹。把脉冲重复频率提高一个数量级以上看来是可能的，但这要依赖于开关技术的发展。如果采用电子束电离气体使放电稳定，有可能获得更大的脉冲^[8]。用这种方法，已经获得了功率高达 50 焦耳和脉冲宽长达 300 毫微秒的脉冲^[8]。但是，用这种放电方法，其电场及增益均受到限制，因此，要有效地提取激光能量是困难的，见图 2。

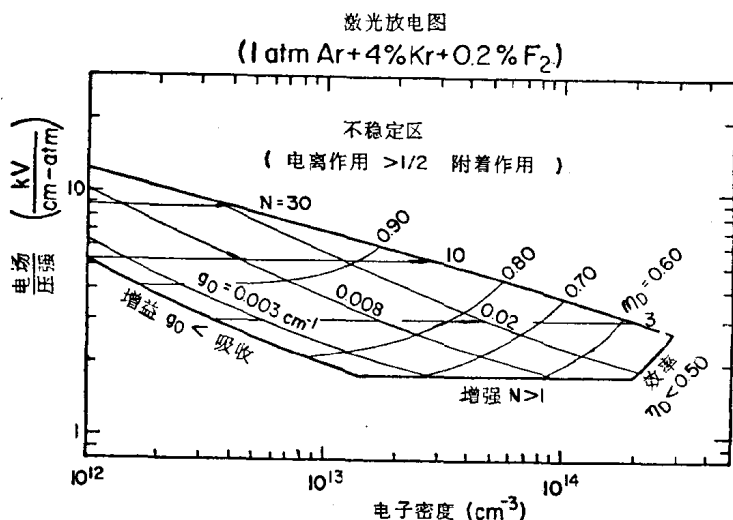


图 2 放电泵浦氟化氦激光器的工作图，含 4% Kr 和 0.2% F₂ 的 Ar，总压强为 100 千巴

稀有气体卤化物激光器的脉冲长度和波长,可用许多方法加以调整。用电子束泵浦已获得长达1微秒的脉冲,但是,长度超过10微秒的脉冲受气体中分子卤化的消耗和介质不均匀性增大的限制。短脉冲可通过锁模得到,但最短脉冲长度则受增益脉冲持续时间的限制^[10]。在所用的带宽内可使较短的脉冲放大,但是,稀有气体卤化物短的寿命和高的增益,使它们不可能从单个强脉冲里提取贮存的大量能量。当需要强而短的脉冲时,这种稀有气体卤化物可以作为其它激光器(例如碘光致离解激光器)的有效强泵浦源^[12],或者可以应用拉曼脉冲压缩技术^[13]。也可用其他许多方法使波长位移。XeF(350毫微米)激光器可以用于泵浦可见激光的染料,而KrF(248毫微米)激光器已经用于泵浦近紫外区的染料^[14]。通过泵浦其它较简单的分子,至少应该有可能使不连续的可调谐性深入到紫外区。在钡蒸气中,已经应用受激喇曼散射,使XeF的波长(351毫微米)频移到585毫微米^[15],而且,让从H₂、D₂、CH₄和液态氮中得到的KrF和ArF的辐射发生喇曼散射,在整个紫外区已得到许多波长^[16](见图3)。从用Xe₂激光器所进行的实验来看^[17],将来通过把稀有气体卤化物激光器进行三倍频(四波混频),还有可能获得更短的波长。

稀有气体卤化物激光器这种高的功率和效率将使它们能用于许多应用领域。对于化学处理,稀有气体卤化物的激光光子,每克分子(对于电量)只需花几个便士就可以买到,而稀有气体卤化物激光器用于分离氧^[18]和氢^[19]同位素,也已经讨论过。将来,这些激光器可用于微型加工、平版印刷、外层空间的通信、大气遥感、光雷达以及任何需要使用这种廉价的紫外光子的地方。

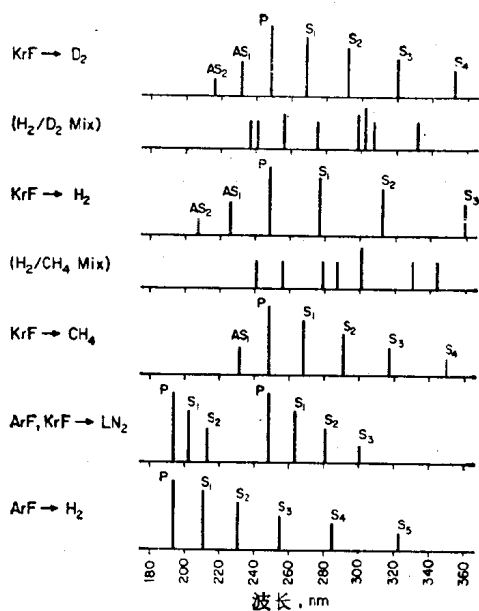


图3 对ArF和KrF激光器进行受激喇曼散射得到的波长

参 考 文 献

- 1 C.A. Brau and J.J. Ewing in Electron Transition Lasers, ed. J.I. Steinfeld, 195-198 (MIT Press, Cambridge, MA, 1976).
- 2 M.L. Bhaumik, R.S. Bradford and E.R. Ault, Appl. Phys. Lett., 28, 23, (1976).
- 3 R. Hunter, 7th Winter Colloquium on High Power Visible Lasers, Park City, Utah, Feb. 16-18, 1977.
- 4 A.E. Greene, C.A. Brau, T.R. Loree, R.C. Sze, and S.D. Rockwood, 5th Conference on Chemical and Molecular Lasers, St. Louis, MO, April 18-20, 1977.
- 5 J.H. Jacob and J.A. Mangano, Appl. Phys. Lett., 28, 724 (1976).
- 6 W.J. Serjeant, private communication.
- 7 B. Goddard and M. Vannier, Opt. Commun., 18, 206 (1976).
- 8 J.D. Daugherty, J.A. Mangano, and J.H. Jacob, Appl. Phys. Lett., 28, 581 (1976).
- 9 L.F. Champagne, J.G. Eden, N.W. Harris, N. Djeu, and S.K. Searles, Appl. Phys. Lett., 30, 160 (1977).
- 10 C.P. Christensen, L.W. Braverman, W.H. Steier, and C. Wittig, Appl. Phys. Lett., 29, 424-425 (1976).
- 11 I.V. Tomov, R. Fedosejevs, M.C. Richardson, W.J. Serjeant, A.J. Alcock, and K.E. Leopold, Appl. Phys. Lett., 30, 146 (1977).
- 12 J.C. Swingle, C.E. Turner, Jr., J.R. Murray, E.V. George, and W.F. Krupke, Appl. Phys. Lett., 28, 387 (1976).
- 13 J.R. Murray and A. Szöke, 7th Winter Colloquium on High Power Visible Lasers, Park City, Utah, Feb. 16-18, 1977.
- 14 D.G. Sutton, and G.A. Capelle, Appl. Phys. Lett., 29, 563 (1976).
- 15 N. Djeu and R. Burnham, Appl. Phys. Lett., 30, 473 (1977).
- 16 T.R. Loree, R.C. Sze, and D.L. Barker, Appl. Phys. Lett., 30 in press, (1977).
- 17 M.H.R. Hutchinson, C.C. Ling, and D.J. Bradley, Opt. Commun., 18, 203 (1976).
- 18 R.K. Sander, T.R. Loree, S.D. Rockwood, and S.M. Freund, Appl. Phys. Lett., 38, 150 (1977).
- 19 J.B. Marling, Chem. Phys. Lett., 34, 84 (1975).

短波长(真空紫外和超紫外脉冲)

相干辐射的产生

D. J. Bradley

摘要 可调频率的稀有气体准分子和受激络合物振荡器的最新发展,使激光辐射的范围扩展到真空紫外区域。通过三次或更高次谐振增强的非线性过程,能够在短至35毫微米(超紫外)的波长上发生相干辐射。本文考虑了这些新的短波长相干辐射脉冲光源的一些应用。

1. 引言

由于要求的激光泵浦功率粗略估计至少为激射频率的四次方,因此,短波长激光器的发展有待于足够强的泵浦光源的出现。1970年和1971年,曾看到把高压电子束技术引用于泵浦氙分子真空紫外激光器^[1]和电子束控制放电激励的大气压二氧化碳激光器^[2]。早些时候,运转在337毫微米的氮激光器^[3]的发明,促进了较短波长激光器所要求的快速放电技术的发展。正如 Houtermans 在1960年首次提出的那样^[4],氮激光器与染料激光器一起显示出引起激光作用的分子电子跃迁的能力。1970年用快速放电高压泵浦方法^[5],实现了在氢分子的赖曼谱带上运转的第一台真空紫外激光器。以后不久,在116毫微米的沃纳谱带^[6]中发生了激光作用。这至今仍然是激光振荡器工作的最短波长。由于在六十年代对大电流电子束源进行了广泛的研究,到了七十年代初期,这项技术已

能用于解决紫外和真空紫外光谱区域的高效可调频激光器的生产问题。主要由于 Awre Aldermaston 实验室的 Martin 及其同事进行了开拓性研究, 电流为千安培、能量为兆瓦级的电子束^[7], 能用来快速泵浦高压气体, 其泵浦速率足以克服激光高能级的短荧光寿命, 并能产生足够密度和体积的惰性气体准分子^[4], 从而为宽带真空紫外的激光作用提供足够的增益。这样, 到1972年, 高压分子激光器很有希望在真空紫外光谱区¹⁾ 用于有效地产生可调谐的相干辐射, 后来这种希望成了现实。

现在, 产生真空紫外波段的窄带、可调频、低光束发散度的兆瓦级激光脉冲^[12, 13], 象运转在可见区的染料激光器一样容易。

电子束激励的惰性气体还被视为最理想的泵浦源, 通过光解泵浦或激发转移方式, 可用于聚变研究的新型大功率激光系统^[14, 15] (见表 1)。

表 1 氙准分子激光器的一些典型特性

	不 调 谐	调 谐
气体压强	7—10千托	7—10千托
脉冲能量	15—55毫焦耳	2—20毫焦耳
脉冲持续时间	3—16毫微秒	3—16毫微秒
峰值功率	约 5 兆瓦	约 1 兆瓦
光束发散度	1—4毫弧度	1—3毫弧度
调谐范围	—	170—176毫微米
带宽	约10埃	约1.5埃 (在0.2—0.3兆瓦时为0.15埃)

- 1) 紫外波长为 200—400毫微米;
真空紫外波长为100—200毫微米;
超紫外波长为10—100毫微米。