

共振光泵 X 射线激光的抽运谱线和 吸收谱线波长匹配实验

范品忠

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

E. FILL

(Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching, 85748 Germany)

(1994年10月25日收到)

用 octadecyl hydrogen maleate(OHM)晶体谱仪进行了 4.5 nm 附近如下三组共振光泵 X 射线激光的抽运谱线和吸收谱线对波长匹配实验研究: SiX II 3d—2p, 4.4021 nm, MgX2s—4p, 4.4050 nm; CuXIX4f—3d, 4.7329 nm, MgX2p—4d, 4.7310 nm; 和 AlXI3p—2s, 4.8338 nm, MgIX2s²—2s4p, 4.8340 nm. 其中第二组线对据我们所知尚未见报道. 比较并讨论了这三组线对的优缺点.

PACC: 4255V; 3220R; 0785

1 引 言

共振光激发是实现软 X 射线激光的重要抽运方法之一. 该抽运方法首先由 Vinogradov 等^[1]及 Norton 和 Peacock^[2]独立提出. 其原理是用一个跃迁(抽运跃迁)发射的强辐射选择激发另一个跃迁(吸收跃迁)的上能级. 该能级可能就是激光跃迁的上能级, 也可能是十分靠近激光上能级并能通过碰撞或其他弛豫过程将粒子数转移至激光上能级的能级. 共振光泵要求抽运谱线和吸收谱线波长尽可能一致, 一般为一个谱线宽度数量级, 即 $\Delta\lambda/\lambda \approx 3 \times 10^{-4}$; 抽运谱线和吸收谱线都要求有很高的强度; 吸收跃迁的上能级要尽可能靠近激光上能级, 以及光抽运源中不含使激光下能级集居的有害辐射. 因此抽运谱线和吸收谱线线对的选择对共振光泵 X 射线激光是至关重要的.

文献[3]已发表了许多有希望的抽运谱线和吸收谱线线对. 这些线对的波长值大多取自发表的波长表和能级图, 或从个别有关理论计算或实验测量文献中引用. 由于抽运谱线和吸收谱线波长实验测量条件的差异, 要对这些线对的波长匹配作出评价比较困难. 最好的办法是在同一的光谱测量条件下进行抽运谱线和吸收谱线的波长比较以减少测量的系统误差, 并能给出直观的结果. 最近 Gabel 等^[4]利用高分辨晶体谱仪和混合靶材实验检验了波长在 0.7 nm 以下的 5 个波长匹配线对. 另外, 在 MPQ 已成功演示了 Si-Mg 共振光泵 X 射线激光^[5]. 因此很有必要研究一下长波长抽运谱线和吸收谱线的波长匹配情况.

本文报道用长波软 X 射线晶体谱仪进行的 Si-Mg, Cu-Mg 和 Al-Mg 等三组共振光泵

抽运谱线和吸收谱线波长匹配的实验结果,并从波长匹配、谱线强度、被抽运能级与预期激光上能级重合等方面比较和讨论了这三组线对的优缺点.

2 实验安排

实验是在 MPQ 高功率钕玻璃激光装置上进行的.激光二倍频($\lambda = 0.53 \mu\text{m}$)输出能量约为 10 J,脉宽为 3 ns.二倍频输出光束沿靶面法线方向点聚焦在平面靶表面,焦斑直径约为 $100 \mu\text{m}$,靶面功率约为 $4 \times 10^{13} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$.实验中用一台 OHM 软 X 射线晶体谱仪记录 4.4—5.0 nm 波长范围里的点状激光等离子体光谱^[6].谱仪坐落在几乎与靶表面一致的平面内;谱仪观察方向与激光等离子体喷射方向垂直,以减少了谱线的多普勒增宽.谱仪窗口中心至靶点的距离远达 10 cm,以减少源尺寸对光谱分辨率的影响,这时谱仪的 $\Delta\lambda/\lambda \approx 1000$.谱仪窗口中心和靶点连线与水平面的夹角约为 37° .

3 实验及其结果

实验中,谱仪入射窗口的宽度约为 $400 \mu\text{m}$,在底片上获得的光谱高度接近 1 mm.在真空靶室外通过软轴能使谱仪沿靶面法线方向作微小平移,这样就能在不破坏靶室真空的情况下在同一底片上获得数条相互平行的光谱.在实验中每打一发,使谱仪作 1 mm 平移.由于谱仪相对靶点有位移,谱仪的参数,如 F 值会有微小的变化^[7],因此,这些相互平行的光谱沿色散方向有微小位移.当然也可以固定谱仪不动,将几发不同靶材的曝光叠加在一起,在同一条光谱中同时出现不同靶材的光谱线,可以精确比较不同靶材光谱线的波长.本实验用这种方法测量抽运谱线与吸收谱线的波长差值.这时由于谱仪固定不动,激光打靶发与发之间实验条件的唯一差别是因靶位的重新调整带来的靶点位置变动,这也会引起谱仪参数的变化.由于实验中对靶位调整有精密的监视,这种靶点位置沿激光轴线的变化不会超过 $25 \mu\text{m}$,它引起谱线在底片上沿色散方向的位移不会超过 $5 \times 10^{-4} \text{nm}$ (在 4.4 nm 波长).实验程序如下:首先打一发得到 A 靶材的光谱后,移动谱仪约 1 mm;再在 A 靶上打一发重新获得 A 靶材的光谱,然后保持谱仪不动而换打 B 靶,把 B 靶光谱叠加在 A 靶光谱上;最后再移动谱仪约 1 mm,用 B 靶获得一条 B 靶材光谱.这样在底片上共获得三条光谱,其中前后两条光谱分别是 A 和 B 靶光谱,中间一条是 A + B 光谱.

表 1 所研究的三组抽运谱线和吸收谱线的有关参数

抽运跃迁波长/nm	吸收跃迁波长/nm	激射跃迁波长/nm	$\Delta\lambda/10^{-4}\text{nm}$	$\Delta\lambda_m/10^{-4}\text{nm}$
SiXII 3d—2p 4.4021	MgX2s—4p 4.4050	MgX4f—3d 18.7	-29	-27
CuXIX4f—3d 4.7329	MgX2p—4d 4.7310	MgX4f—3d 18.7	19	18
AlXI3p—2s 4.8338	MgIX2s—4p 4.8340	MgIX4f—3d 22.5	-2	-8

$\Delta\lambda$ 为表列值; $\Delta\lambda_m$ 为本实验测量值.

实验研究了波长在 4.4, 4.7 和 4.8 nm 附近的三组谱线对.有关这些谱线的参数列于表 1.所获得的光谱扫描曲线如图 1 和 2 所示,图 1 中曲线 a—e 分别对应于 Si, Si + Mg,

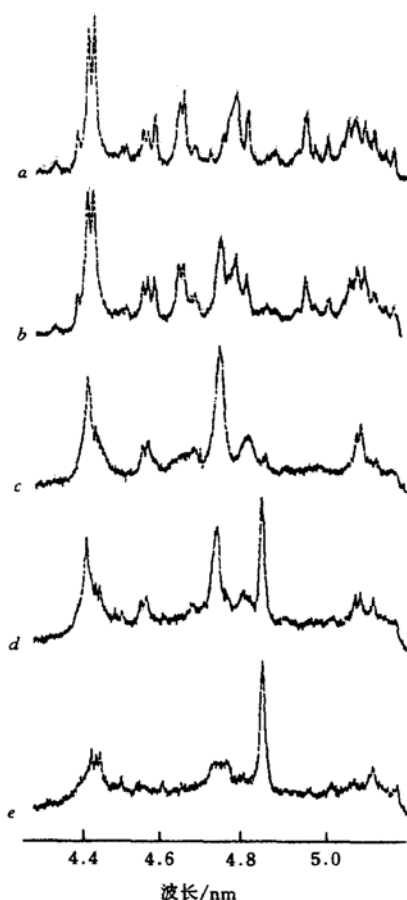


图1 光谱扫描曲线 曲线 a—e 分别对应 Si, Si + Mg, Mg, Al + Mg 和 Al

Mg, Al + Mg 和 Al 的光谱;图2 曲线 a—c 分别对应 Cu, Cu + Mg 和 Mg 的光谱. 这些光谱表明, 在谱仪光谱分辨率内, Si, Cu 和 Al 的抽运谱线与 Mg 吸收谱线交叠很好. 作为一个例子, 图3 给出在 4.73 nm 波长附近放大的 Cu, Cu + Mg 和 Mg 光谱.

在波长匹配研究中, 不需要波长的绝对值, 只需要波长的差值即可. 由公式^[6]

$$\Delta\lambda = (2d/F)\Delta L \sin^2(\alpha + \theta) \cos\theta$$

只要知道实验所用谱仪的 $2d$, α 和 F 值, $\Delta\lambda$ 就能从 ΔL 推得. 这时 θ 值由表1 列的波长决定, 这对 $\Delta\lambda$ 的确定仅带来很小的二级误差 ($<0.1\%$). F 值可以从已辨认的谱线波长 SiX II 3d—2p, 4.4165 nm, SiX II 3d—2p, 4.5692 nm, MgX4d—2p, 4.7310 nm, SiX12p3d—2p², 4.7899 nm 和 SiX12s3d—2s2p, 4.9222 nm 以及这些谱线的相对位置求得. 获得平均值 $F = (172.9 \pm 0.5)$ mm. ΔL 可以由放大的光谱图上测得. 由上式得到的上述线对的波长差 $\Delta\lambda_m$ 值分别为 $-27, 18$ 和 -8×10^{-4} nm, 一起列于表1. 测量结果表明上述三个线对的 $\Delta\lambda_m/\lambda_p$ 值分别为 -6.1×10^{-4} , 3.8×10^{-4} 和 -1.7×10^{-4} .

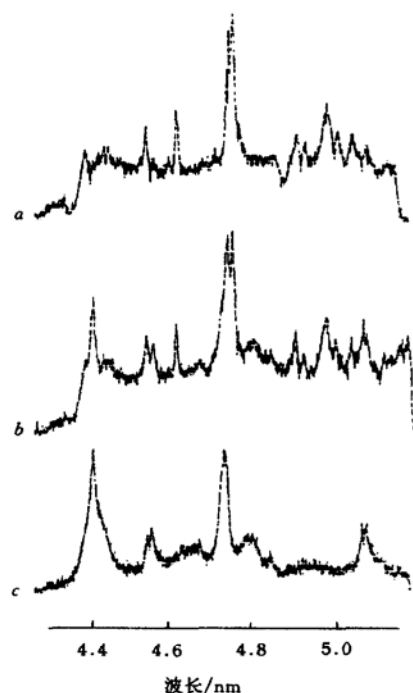


图2 光谱扫描曲线 曲线a—c分别对应Cu, Cu+Mg和Mg

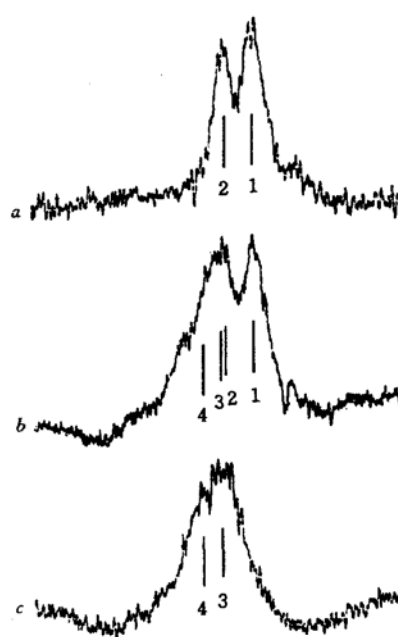


图3 4.73 nm附近放大的光谱扫描曲线
1 为 CuXIX 4f—3d, 4.7437nm; 2 为 CuXIX 4f—3d, 4.7329nm; 3 为 MgX4d—2p, 4.7310 nm; 4 为 MgX4d—2p, 4.7231 nm; 其余图注同图2

4 讨论与结论

作为共振光泵 X 射线激光的候选线对, 选择标准应是: 抽运谱线的中心波长尽可能与吸收谱线的中心波长相一致; 不仅抽运谱线要求有很高的强度, 吸收谱线也要求有很高的强度; 吸收跃迁的上能级要尽可能靠近激光跃迁上能级. 根据这些标准, 下面讨论所研究的三组谱线对的优缺点.

(1) Si-Mg

对于 Si 和 Mg 线对, 抽运谱线和吸收谱线都很强, 中心波长匹配尚可, $\Delta\lambda_m = -2.7 \times 10^{-3}$ nm, 但吸收跃迁上能级与激光跃迁上能级间隙很大, 高达 8000 cm^{-1} . 对于这一线对, Fill 等^[5]已成功地进行了激光总体实验, 获得了增益系数约为 1 cm^{-1} 的结果. 值得一提的是在这实验中反向喷射的抽运等离子体和吸收等离子体产生的多普勒位移被用来补偿中心波长差. 对于典型的等离子体喷射速度为 $10^7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 估算的多普勒位移补偿值为 $\Delta\lambda = +1.3 \times 10^{-3}$ nm, 大大改善了中心波长匹配状况.

(2) Al-Mg

对于 Al 和 Mg 线对, 中心波长匹配很好, $\Delta\lambda_m = -8 \times 10^{-4}$ nm, 但吸收跃迁上能级与

激光跃迁上能级间隙也较大, 而且吸收谱线强度很低, 因此抽运吸收效率不会很高. 其原因可能是实验中靶面功率密度太高, 导致激光等离子体中类铍 Mg 离子成份很低.

(3) Cu-Mg

对于 Cu 和 Mg 线对, 不仅中心波长匹配得很好, $\Delta\lambda_m = 1.8 \times 10^{-3}$ nm, 抽运谱线和吸收谱线强度都很高, 而且吸收跃迁上能级与激光跃迁上能级间隙很小, 仅为 460 cm^{-1} , 是所研究的三组线对中最有希望的线对. 为了用多普勒位移补偿其中心波长差, 必须采用这样的靶结构使产生的抽运等离子体与吸收等离子体相对喷射.

实验表明谱线加宽大大限制了中心波长差值的测量精度. 所示的光谱表明, 谱线的表观宽度一般都在 0.01 nm 左右, 强线的宽度还要大一些. 源的有限尺寸是谱线加宽的主要原因. 为提高中心波长差值的测量精度以搞清抽运谱线与吸收谱线交叠的真实情况, 必须采用光谱分辨率更高的谱仪 ($\Delta\lambda/\lambda \leq 3 \times 10^{-4}$), 如带狭缝的晶体谱仪 (用狭缝来限制源尺寸), 或增加谱仪至激光等离子体源的距离, 以减少源加宽.

- [1] A. V. Vinogradov, I. I. Sobelman and E. A. Yukov, *Sov. J. Quantum. Electron.*, **5**(1975), 59.
- [2] B. A. Norton and N. J. Peacock, *J. Phys.*, **B8**(1975)989.
- [3] R. C. Elton, *X-Ray Lasers* (Academic Press, New York, 1990).
- [4] K. Gabel, Ch. Bergmann, E. Fill, E. Forster and I. Uschmann, *Appl. Phys.*, **B56**(1993), 3.
- [5] E. Fill, C. Bergmann, A. Lyras and Th. Schlegel, *X-Ray Lasers 1992* E. Fill ed. (IOP Publishing, Bristol 1992), p. 147.
- [6] 范品忠、E. Fill、关铁堂, *光学学报*, **15**(1995), 923.
- [7] 范品忠、张正泉, *中国激光*, **18**(1991), 88.

EXPERIMENT ON WAVELENGTH MATCHES BETWEEN PUMPING AND ABSORBING LINES IN PHOTO-RESONANT X-RAY LASERS

FAN PIN-ZHONG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica,
Shanghai 201800)

E. FILL

(Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching, 85748 Germany)

(Received 25 October 1994)

ABSTRACT

Wavelength match experiment was carried out with a soft X-ray crystal spectrograph for three pumping and absorbing line pairs at wavelengths around 4.5 nm: SiXII3d—2p, 4.4021 nm, MgX2s—4p, 4.4050 nm; CuXIX4f—3d, 4.7329 nm, MgX2p—4d, 4.7310 nm and AlXI3p—2s, 4.8338 nm and MgIX2s²—2s4p, 4.8340 nm. The second line pair was found in this experiment and never appeared in published work. The pros and cons these line pairs for photo-resonant X-ray lasers were compared and discussed.

PACC: 4255V; 3220R; 0785