

某些类氙离子和类镍离子等离子体 状态对应关系的研究*

燕 飞 张 杰 鲁 欣

(中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100080)

(2002 年 9 月 9 日收到 2002 年 11 月 30 日收到修改稿)

利用一维拉格朗日流体动力学程序 Med103 详细研究了产生类镍 Ag, Cd, In, Sn, Sb 离子和类氙 Fe, Co, Ni, Cu, Zn 离子的等离子体状态. 通过对电子温度、离子丰度、离子数密度等状态参量的分析比较, 得到了这两类等离子体状态之间的对应关系. 即类镍银的等离子体状态与类氙铁的相近, 类镍镉的与类氙钴的相近, 依次类推. 利用这一对应关系可以方便地由类氙机理 x 射线激光的等离子体状态来对相应元素的类镍 x 射线激光的等离子体状态进行判断.

关键词: 类氙, 类镍, 等离子体状态, x 射线激光

PACC: 5225, 5250J, 4255, 8220W

1. 引 言

自从 1984 年 Matthews 等人在实验上观测到软 x 射线激光(XRL)以来^[1], 人们对其进行了深入的实验和理论研究, 取得了多方面的显著进展. XRL 的转换效率有了很大的提高. 到目前为止电子碰撞激发机理被认为是最可靠产生饱和及高能输出的方法, 人们对它的工作机理已有了全面的了解. 其中类氙 x 射线激光由于具有较高的增益及增益长度积, 直到今天它仍是产生 x 射线激光的主要机理. 但是由于类氙机理的量子效率较低, 所以以目前的抽运能量, 很难产生更短波长的 x 射线激光. 在相同的抽运能量下类镍机理容易产生更短波长的 x 射线激光. 实验上已经用 100J 左右的抽运激光产生了类镍 Ag 的 14nm^[2]和 Sm 的 7.3nm^[3]的饱和 x 射线激光输出.

理论分析和设计 x 射线激光主要依靠复杂的一维和二维流体力学及原子动力学的数值模拟, 另外也可利用简单的自相似模型来分析 x 射线激光的流体力学特征和等离子体状态^[4]. 对于模拟激光等离子体相互作用和 x 射线激光的产生, 应该考虑多个因素, 其中激发能级的原子数据必须完整和正确. 但是对于类镍机理来说, 由于其具有比类氙机理更为复杂得多的能级结构和原子数据, 因此对类镍 x 射线激光的模拟研究就更为困难. 本文比较了类镍和

类氙等离子体的流体力学特征, 得到了这两类等离子体状态之间的对应关系, 因此可以通过对某些类氙 x 射线激光的等离子体参数的理论模拟来判断有对应关系的元素的类镍 x 射线激光的等离子体状态.

2. 类氙铁与类镍银等离子体状态的比较

本文利用 Med103 程序^[5]对驱动脉冲结构进行了优化计算. 此程序是一维拉格朗日流体力学程序, 能够对激光等离子体相互作用、x 射线激光增益的产生进行理论模拟. 使用此程序对实验进行模拟的可行性已经得到证实而且也被广泛应用^[6-8], 驱动激光脉冲采用高斯型, 激光波长为 1.05 μm , 平板靶的材料是可变的, 厚度固定为 100 μm .

首先对类氙等离子体状态进行模拟计算. 在我们以前的工作中^[9]曾对类氙铁的等离子体状态进行过模拟讨论, 在抽运脉宽为 2ns、强度为 $6 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 的抽运条件下得到了较高的类氙铁离子丰度, 适合产生高增益 x 射线的激光. 本文使用此抽运条件对类镍等离子体状态进行了流体力学模拟, 得到类镍银的等离子体状态与类氙铁的大致相似的结论. 下面进行详细的比较说明. 图 1 描述了类镍银与类氙铁离子丰度随时空分布的等高线. 模拟中所用的抽运激光的传播方向从右向左, 靶表面位置在 100 μm 处, 抽运脉冲的峰值时刻在 3000ps 处. 由图可

* 国家自然科学基金(批准号: 10176034)和国家高技术惯性约束聚变主题资助的课题.

以看出类镍银和类氦铁都能达到高的离子丰度 (>70%) ,而且离子丰度在时间和空间上的分布形状大致相似.但是在相同丰度的情况下类氦铁离子的时空范围都大于类镍银的,而且出现高离子丰度的时刻也早于类镍银的.在此抽运条件下比较了类镍和类氦的下一个电离度的情况(见图2).我们可以看到类钴银离子丰度不管是在大小还是在时间和空间上都大于类氟铁的,类钴银离子丰度达到10% ,而类氟铁离子丰度只有5%.为了减小在类镍银等离子体中产生过多的类钴离子,我们减小抽运强度进行了计算,当产生的类钴离子丰度的大小类似于类氟离子时(5%) ,此时得到的类镍银离子丰度太小,远远达不到所需的能产生高增益的合适的等离子状态(高的类镍银离子丰度).这也说明了类镍离子更容易过电离到类钴离子,因此在相同的抽运条件下,产生的类镍银 x 射线激光的增益系数应该要比类氦铁的小一些.图3给出了类镍银和类氦铁离子的粒子数密度随时空变化的等高线.由图可以看出,类镍银离子密度在时间和空间上的分布大致与类氦铁离子相似.当密度达到 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时,类镍银离子明显比类氦铁离子少,这也与此时等离子体中的类钴银离子增多有很大的关系,而类氟铁离子所占比例较小,因此类氦铁离子密度要比类镍银离子密度大一些.图4给出了类镍银和类氦铁电子温度(T_e)随时空的变化曲线.由图可以看出,在两种等离子体中各电子温度阶段的分布形状相似,但是类镍银的电子温度要比类氦铁的电子温度低,在本文所用的抽运条件下,类镍银的电子温度能达到130eV,类氦铁的电子温度能达到200eV.而且在相同的温度段,类氦铁的 T_e 在时间和空间上的持续范围要大于类镍银的.

3. 其余元素的对应关系

以下详细模拟了类氦钴、镍、铜、锌的等离子体状态.固定抽运脉冲的宽度为2ns,对抽运强度进行了模拟优化,以便产生类似于类氦铁的能产生高增益 x 射线激光的合适的等离子体状态.得到的所需抽运强度如表1所示.

表1 对于不同元素产生合适的类氦等离子体状态所需的抽运激光强度

元素	铁	钴	镍	铜	锌
抽运强度(10^{12} W/cm^2)	0.6	0.8	1.2	1.7	2.1

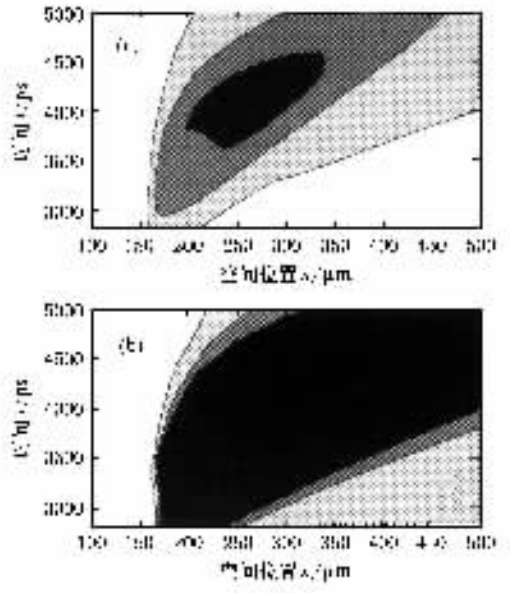


图1 强度为 $6 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$,宽度为2ns的脉冲产生的类镍银(a)类氦铁(b)离子丰度相对于时间和空间分布的等高线(图中颜色由浅到深分别代表了类氦和类镍离子丰度大于10% ,50% ,70% .脉冲峰值时刻在3000ps处,靶表面的位置在100 μm 处)

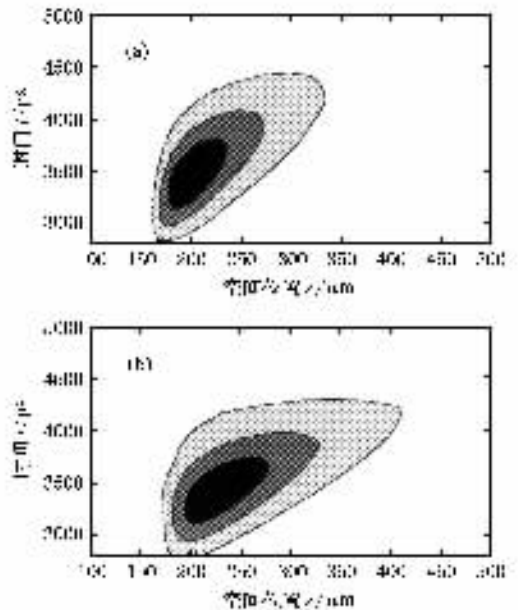


图2 类钴银(a)类氟铁(b)离子丰度相对于时间和空间分布的等高线(a)图中颜色由浅到深代表了类钴离子丰度大于1% ,5% ,10% (b)图中颜色由浅到深代表了类氟离子丰度大于1% ,3% ,5%)

与所给强度相对应的各元素的类氦等离子体状态大致相似,都能产生高的类氦离子丰度(>70%) ,而且类氟离子丰度相对较小,避免了过电离,相比较

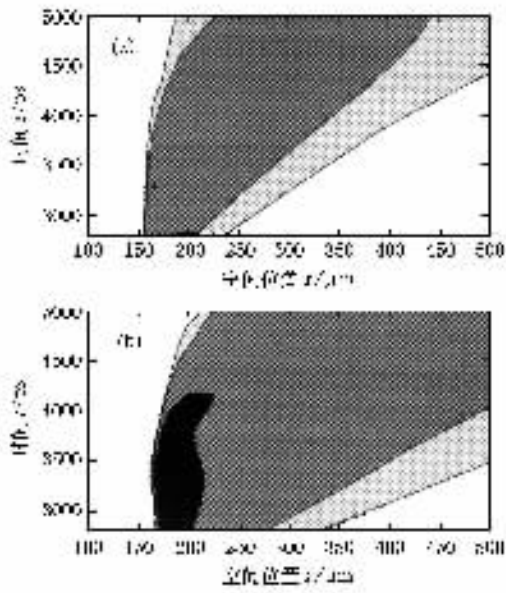


图3 类镍银(a)类氩铁(b)离子密度随时空变化的等高线(图中颜色由浅到深分别代表了类镍和类氩离子密度 $> 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $> 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $> 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)

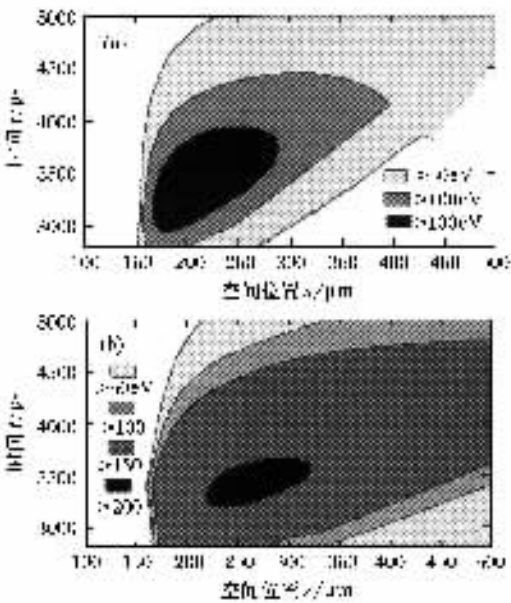


图4 类镍银(a)类氩铁(b)等离子体中电子温度随时空变化的等高线

我们得到的类氩铁等离子体状态,可以相信在此状态下加入高强短脉冲同样能够得到高的 x 射线激光增益.用与表 1 中相同的抽运强度分别对不同元素的类镍等离子体的流体力学行为进行了模拟计算,得到了与表 1 中抽运强度一一对应下的类镍 Cd, In, Sn, Sb 等离子体的状态,用类似于分析类氩铁等离子体状态的方法,对离子丰度、电子温度、离子密度

等状态参量进行了分析比较,得到了在此抽运条件下产生的等离子体状态如同前面所得到的类氩铁的状态,是最适合产生 x 射线激光的.我们对模拟得到的各元素的类镍等离子体状态与类氩的进行了分析比较.下面给出了在相同的抽运条件下(脉宽 2ns、强度 $17 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$)产生的类镍锡和类氩铜等离子体状态的比较.图 5 给出的是类镍锡离子丰度和类氩铜离子丰度的时空变化.由图可以看出,两类离子丰度都达到 70%,它们的时空分布形状也都类似于类氩铁和类镍银的离子丰度的相似分布.图 6 描述的是类钴锡和类氟铜离子丰度在时空上的分布.类钴锡的离子丰度要高于类氟铜的,虽然类钴离子丰度要大一些,但是相比于其他抽运强度下的类钴和类镍的离子丰度分布,此状态是最合适的.这同样说明了类镍机理比类氩机理更容易过电离.这与实验中类钴激光比类氟激光容易观测到是相对应的,应该尽量避免.图 7 给出了类镍锡离子和类氩铜离子的粒子数密度随时空的变化.两类离子的分布曲线同样很相似,尤其是密度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的时空区域,两者非常接近.不过当密度达到 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时,类镍锡离子在时间和空间上的分布范围要小于类氩铜的,类镍锡 $< 10 \mu\text{m}$,类氩铜 $> 40 \mu\text{m}$.图 8 是类镍锡和类氩铜的 T_e 的时空分布.两者各温度段出现的时间和空间大致相似,类镍的 T_e 要比类氩的低一些,相同温度的时空区域也要小一些.

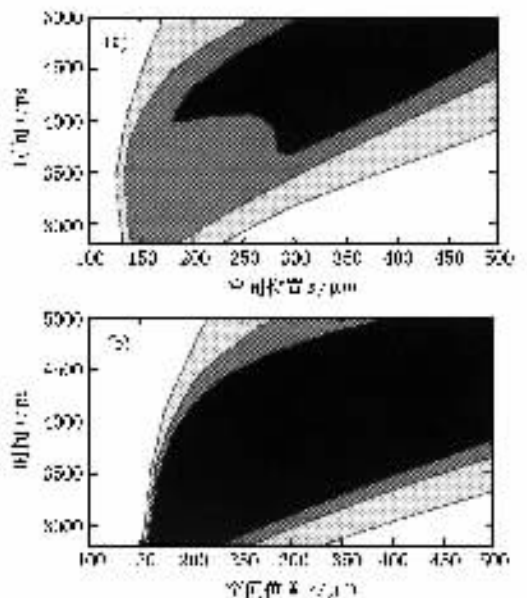


图5 强度为 $17 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 宽度为 2ns 的脉冲产生的类镍锡(a)类氩铜(b)离子丰度相对于时间和空间分布的等高线(图中颜色由浅到深分别代表了离子丰度大于 10%, 50% 70%)

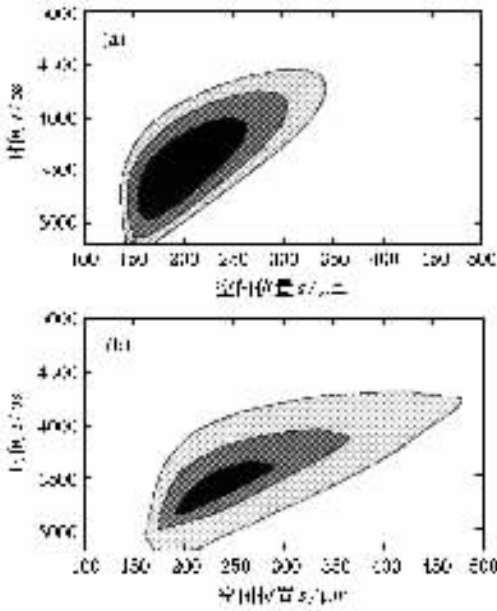


图 6 类钴镍(a)类氟铜(b)离子丰度相对于时间和空间分布的等高线(a)图中颜色由浅到深代表了类钴离子丰度大于10% ,15% ,20% (b)图中颜色由浅到深代表了类氟离子丰度大于1% ,5% ,10%)

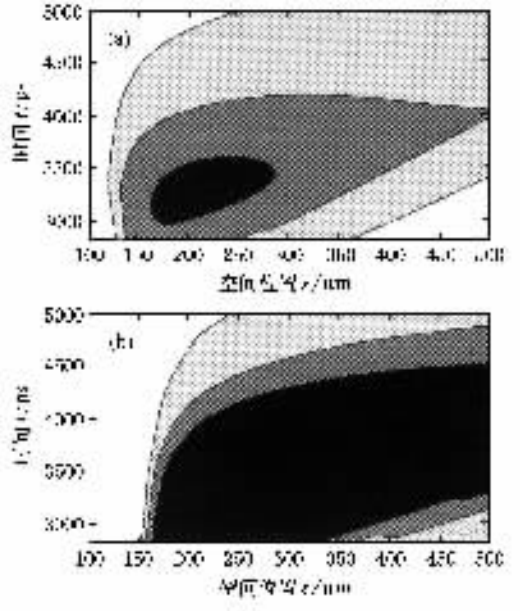


图 8 类钴镍(a)类氟铜(b)等离子体中电子温度随时空变化的等高线(图中颜色由浅至深分别表示电子温度大于100eV ,200eV ,250eV)

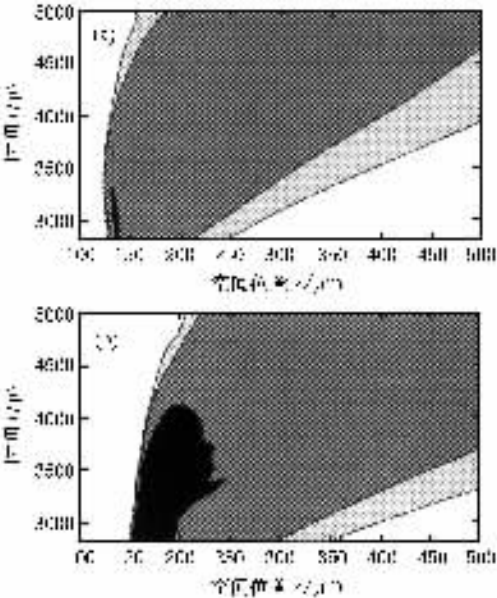


图 7 类钴镍(a)类氟铜(b)离子密度随时空变化的等高线(图中颜色由浅到深分别代表了密度 $> 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $> 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $> 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)

在相同的分析比较方法下,我们得到类镍和类氩等离子体状态之间有一个对应关系,在相同的抽运脉冲条件下类镍银等离子体状态和类氩铁的相

似,类镍锡的和类氩铜的相似,依次类推,见图9.图中箭头从左到右逐渐变细代表了这种相似关系逐渐减弱.类氩 Fe ,Co ,Ni 和类镍 Ag ,Cd ,In 有着比较强的相似关系,正如以上讨论所显示的.不过随着原子序数的增加,这种相似程度逐渐减弱.在类氩 Cu ,Zn 和类镍 Sn ,Sb 之间的相似程度已逐渐减弱,主要是随着原子数的增加,类镍离子更容易过电离到类钴离子,当类氩等离子体达到我们所需的合适的状态时,类镍离子的丰度及粒子数减少.虽然相似程度逐渐降低,但是仍然反映了这些元素的类氩和类镍等离子体状态之间存在着一个大致相似的趋势.因此我们可以确定用对类氩机理的模拟来判断分析类镍 x 射线激光的等离子体状态是可行的.由于相同抽运条件下类镍等离子体中的类镍离子丰度、粒子数密度、电子温度等状态参量的大小以及在时空上的分布区域要比类氩的小一些,因此可以预测类镍 x 射线激光增益要比类氩的小一些,而且高增益区域也要小一些.

4. 对应元素各价离子电离能的比较

我们比较了不同元素各对应价离子的电离能(见表2).表中所给出的各电离能数据,主要是根据 Cowan 和 MCDF 原子数据库模拟程序计算得到.

26 Fe 铁 55.85	27 Co 钴 58.93	28 Ni 镍 58.69	29 Cu 铜 63.55	30 Zn 锌 65.39			
			47 Ag 银 107.9	48 Cd 镉 112.4	49 In 铟 114.8	50 Sn 锡 118.7	51 Sb 锑 121.8

图 9 类氦等离子体与类镍等离子体之间的对应相似关系(箭头从左到右逐渐变细代表了这种相似关系逐渐减弱)

Fe¹⁵⁺ 和 Ag¹⁸⁺ 的电离能分别为 489.26 和 499eV, 两者大致相近, Fe¹⁴⁺ 和 Ag¹⁷⁺ 的电离能分别为 457 和 469eV, 也大致相近. 因此我们可以认为类氦铁和类镍银驱动激光的条件基本相同. 同理, 根据表中所给出的数据, 可以看出对应元素的对应离子的电离能在数值上基本相同, Fe, Co, Ni 和 Ag, Cd, In 的对应离子的电离能在数值上比较接近, Cu, Zn 和 Sn, Sb 对应离子电离能的差别逐渐加大. 这与我们的流体力学模拟结果基本一致.

表 2 对应元素各价离子的电离能

铁	Fe ¹⁵⁺ : 489.26	Fe ¹⁴⁺ : 457	银	Ag ¹⁸⁺ : 499	Ag ¹⁷⁺ : 469
钴	Co ¹⁶⁺ : 546.8	Co ¹⁵⁺ : 512	镉	Cd ¹⁹⁺ : 544	Cd ¹⁸⁺ : 513
镍	Ni ¹⁷⁺ : 607.2	Ni ¹⁶⁺ : 571	铟	In ²⁰⁺ : 592	In ¹⁹⁺ : 559
铜	Cu ¹⁸⁺ : 671	Cu ¹⁷⁺ : 633	锡	Sn ²¹⁺ : 641	Sn ²⁰⁺ : 607
锌	Zn ¹⁹⁺ : 737	Zn ¹⁸⁺ : 689	锑	Sb ²²⁺ : 691	Sb ²¹⁺ : 657

5. 结 论

本文主要模拟计算了类镍 Ag, Cd, In, Sn, Sb 和类氦 Fe, Co, Ni, Cu, Zn 的等离子体状态, 通过对类镍银和类氦铁以及类镍锡和类氦铜的离子丰度、电子温度、离子数密度等参量的流体力学特征的详细比较, 得到在相同的抽运脉冲条件下产生的类镍银的等离子体状态与类氦铁的比较相近, 类镍镉的和类氦钴的相近, 依次类推. 在这一对应关系中类镍 Ag, Cd, In 与类氦 Fe, Co, Ni 的相似程度比较强, 而类镍 Sn, Sb 与类氦 Cu, Zn 的相似程度弱一些. 因此我们可以根据这些元素的类镍和类氦等离子体状态之间的这种对应关系, 用对类氦离子等离子体状态的模拟来判断分析类镍 x 射线激光的等离子体状态.

[1] Matthews D L et al 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 110
 [2] Zhang J et al 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 3856
 [3] Zhang J et al 1997 *Science* **276** 1097
 [4] Li Y J, Zhang J and Teng A P 2001 *Chin. Phys.* **10** 516
 [5] Evans R G, Bell A R and MacGowan B J 1982 *J. Phys. D* **15** 711

[6] Lu X, Li Y J and Zhang J 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 1353
 [7] Zhang J et al 1994 *Phys. Rev. A* **19** 4024
 [8] Christiansen J P et al 1974 *Comput. Phys. Commun.* **7** 271
 [9] Yan F and Zhang J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2524 [in Chinese] 燕飞、张杰 2002 物理学报 **51** 2524]

Similarity study on plasma conditions of some Ne-like and Ni-like x-ray lasers^{*}

Yan Fei Zhang Jei Lu Xin

(*Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

(Received 9 September 2002; revised manuscript received 30 November 2002)

Abstract

The plasma conditions of Ni-like Ag, Cd, In, Sn, Sb, and Ne-like Fe, Co, Ni, Cu, Zn x-ray lasers are numerically simulated, using a one-dimensional hydrodynamic code. The results suggest that there is a correspondence of plasma conditions between some Ni-like x-ray lasers and Ne-like x-ray lasers by comparing the hydrodynamic characteristics of electron temperature, ion abundance and ion population density. For example, the plasma condition of the Ni-like Ag x-ray laser is similar to that of the Ne-like Fe x-ray laser and the Ni-like Cd x-ray laser is similar to that of Ne-like Co, etc. Due to this correspondence, we can use the simulation of those Ne-like x-ray lasers to give suggestions of performance of this partner Ni-like x-ray lasers.

Keywords : Ne-like, Ni-like, plasma condition, x-ray laser

PACC : 5225, 5250J, 4255, 8220W

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10176034).