

# 双短脉冲驱动类镍钐 X 光激光的模拟\*

张国平 张覃鑫 吴建周

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京市8009信箱, 100088)

**摘 要** 介绍了模拟产生类镍离子电子碰撞激发 X 光激光全过程的系列程序。利用它模拟了英国 RAL 实验室的双短脉冲驱动类镍钐 X 光激光实验。与实验结果进行了比较。还研究了不同弯曲度的靶及驱动激光功率密度不均匀性对输出激光强度的影响。对驱动激光的脉宽、主脉冲的功率密度以及主脉冲的延迟时间等进行了优化设计。

**关键词** X 光激光 电子碰撞激发机制 类镍钐 数值模拟 多脉冲驱动

**中图分类号** TN 241; TL 612.3

美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)最早在水窗波段及其附近成功进行了类镍钐、钐和金等离子体的电子碰撞激发 X 光激光实验<sup>[1]</sup>。他们首先提出了用双短脉冲驱动薄膜靶的设想<sup>[2]</sup>, 又进行了双短脉冲驱动类镍钐弯曲双靶对接实验<sup>[3]</sup>。日本大阪大学 LE 实验室首先用脉宽为100ps 的多脉冲驱动类镍银、碲、镉、铊、镱、钐、钐、钐、铊、铊、铊等元素的弯曲靶均观察到了增益<sup>[4,5]</sup>。英国 RAL 实验室用脉宽为70ps 的双脉冲驱动类镍银、钐、锡以及钐平板靶, 并用18mm 靶长的平板靶进行了双靶对接实验, 在类镍机制上首次取得了饱和增益<sup>[6]</sup>。

采用短脉冲是为了减少达到饱和和所需的驱动激光能量。采用短脉冲之后, 驱动激光的功率密度要比长脉冲时有所增加, 但总能量还是大幅度减少, 离子温度会降低, 达到同样的电离度时, 电子温度可以更高, 两者都会导致增益系数增加, 进一步降低了驱动激光的能量。预脉冲的首要作用是通过一段时间的膨胀产生电子密度梯度比较小的等离子体以减少折射损失。采用预脉冲技术后, 实验可调参数包括: 驱动激光的波长、脉宽、主脉冲的功率密度、主脉冲的延迟时间及预脉冲的大小等。如何优化这些参数以提高输出 X 光激光的质量和能量转换效率, 完全依靠实验是很难确定的。需要用理论模拟对类镍离子电子碰撞激发机制进行全面的研究。对实验进行定性甚至定量的指导。在类钐的实验中, 我们曾经用系列程序成功地对实验进行了指导。

## 1 系列程序的简单介绍

用 JB 19 程序模拟激光打靶所产生的非平衡辐射流体动力学状态<sup>[7]</sup>, JB 19 程序采用双向假二维近似, 用一维程序模拟线聚焦打靶的二维问题。假二维的曲率半径为线聚焦焦斑宽度的四倍。JB 19 程序提供了电子密度和温度、离子温度、流体速度以及类镍离子丰度的一维分布。ALPHA 程序是简化的一维类镍离子速率方程组程序, 用逃逸概率近似考虑了4p 能级(激光下能级)以及4f 能级到基态的线跃迁的自吸收效应。ALPHA 程序提供激光线的增益系数和自发辐射强度。XBPA 程序是在几何光学旁轴近似下, 模拟 X 光激光小信号放大的二维程序。

\* 国家863激光技术领域资助项目  
1998年1月20日收到原稿, 1998年3月26日收到修改稿。  
张国平, 男, 1941年10月出生, 研究员, 博士生导师

为了模拟线聚焦的功率密度不均匀性以及等离子体的老化效应对X光激光放大的影响,在类镍钐的模拟中,每隔1mm,即每隔333ps换一套状态。该程序能提供时间分辨的X光激光输出强度的近场和远场分布。

### 2 Sm 01模型增益区状态

所模拟的英国RAL 实验室所作的类镍钐实验的模型叫做 Sm 01模型,其条件和主要结果有:驱动激光的波长为1.053μm,脉宽为70ps,预脉冲强度为主脉冲强度的10%,主脉冲延迟时间为2.2ns,总能量为75J,线聚焦的长度大约为2.5cm,宽度大约为70μm,平板靶,单靶的最大长度为18mm。实验观察到的X光激光波长为7.3nm。实验测定的小信号增益系数为8.4cm<sup>-1</sup>。18mm长的单靶输出X光激光的脉宽为37ps,发散角为1.8mrad,折射角约为2.5mrad。用双靶对接获得了饱和增益。双靶的轴向间距为0.5mm。当双靶之间的垂直间距为175μm时,输出X光激光能量达到最大值约为300μJ。

图1描述了在驱动激光主脉冲峰值后40ps时增益区的状态,这相当于18mm长单平板靶输出激光强度峰值时刻。如果以G(增益系数)达到最大值的一半作为增益范围的话,增益区在离初始靶面距离x=34~58μm处。增益区分成前后两个部分。当离初始靶面距离x大于42μm时,电子密度梯度都小于3×10<sup>23</sup>cm<sup>-4</sup>,这一部分称为增益区后部。该区域电子密度为8×10<sup>20</sup>~5×10<sup>20</sup>cm<sup>-3</sup>,电子密度梯度平均值大约为2×10<sup>23</sup>cm<sup>-4</sup>。X光激光的波长为7.3nm,根据折射定律,相应的折射度为4.8mrad/cm,对于18mm长的平板靶,总的折射角为8.6mrad。如果X光激光以-4.3mrad入射,则走了9mm后与靶面保持平行,在沿靶面法线方向共折射了19μm,最后以4.3mrad出射。x小于42μm的部分称为增益区的前部。电子密度梯度为3×10<sup>23</sup>~20×10<sup>23</sup>cm<sup>-4</sup>,其平均值大约为10<sup>24</sup>cm<sup>-4</sup>,是后部的5倍。电子密度为17×10<sup>20</sup>~8×10<sup>20</sup>cm<sup>-3</sup>,临界面在38μm处。临界面附近,等离子体状态很容易受超热电子以及其它非线性效应的影响,所以增益区前部的状态的不确定性比较大。图2给出了G随时间变化的情况,随着时间增加,增益区不断向外移动。t=0是驱动激光主脉冲的峰值时刻,40ps是X光激光输出能量的峰值时刻,10ps时X光激光从靶的始端出发,70ps时到达靶的末端。在这段时间里,G峰值的移动距离约为20μm。这时,等离子体的老化是很严重的。

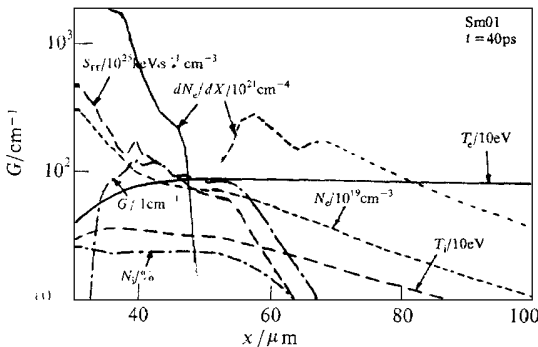


Fig 1 The gain region status in the model Sm01  
图1 Sm01模型增益区的状态

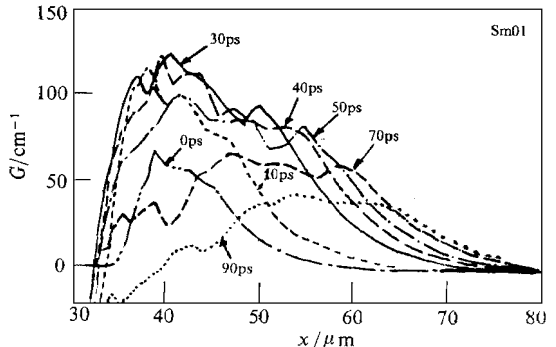


Fig 2 The gain vs x for different time  
图2 Sm01模型不同时刻增益系数对离初始靶面距离的关系

### 3 Sm 01模型 X 光激光输出强度的模拟结果

对于靶长为18mm 的平板靶, 理论模拟的 X 光激光时间积分的远场分布如图3所示. X 光激光输出能量与时间的关系如图4所示. 时间积分的 X 光激光的折射角为4. 2m rad, 发散角为 3. 3m rad. X 光激光近场分布的极大值在离初始靶面64μm 处, 宽度为22μm. X 光激光的脉宽为29ps, 增益系数为5. 8cm<sup>-1</sup>. 假定在与靶面相平行的平面里的 X 光激光的发散角取几何发散角, 则对18mm 长的单靶, 发散角为3. 89m rad, X 光激光输出总能量  $E = 1\mu\text{J}$ . 在求增益系数时, 如果丢掉了18mm 这一点, 则  $G$  为6. 3cm<sup>-1</sup>.

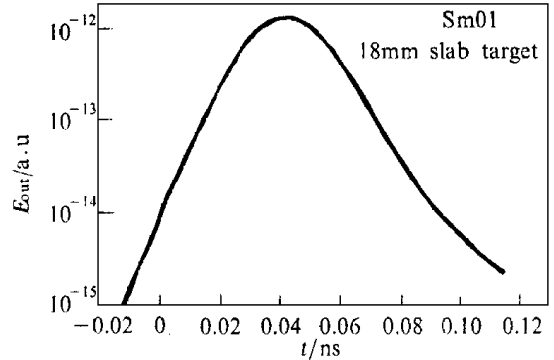
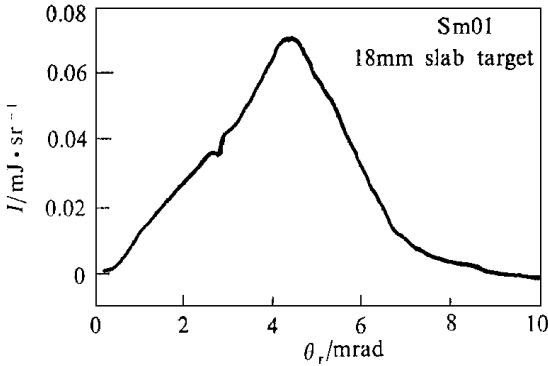


Fig 3 The far- field distribution for output intensity of X- ray laser in time- integrated

Fig 4 The output energy of X- ray laser vs time

图3 Sm01模型 X 光激光时间积分输出强度的远场分布

图4 Sm01模型 X 光激光输出能量对时间的关系

双靶对接可以检验增益区的位置和厚度, 为此作了双平板靶对接模拟, 每靶长18mm, 相互平行. 双靶轴向距离为0. 5mm. 注意到双靶对接小信号  $GL$  已大于20, X 光激光输出能量达到饱和. 主要结果见表1, 其中  $Y_{12}$  为双靶的垂直距离,  $E$  为 X 光激光输出总能量.

表1 Sm01模型双靶对接模拟结果

Table 1 Simulation results for double targets opposition coupling in model Sm01

$Y_{12}/\mu\text{m}$	100	110	120	125	130	140	150	160	180	200
$\theta_r/\text{m rad}$	5. 542	4. 185	4. 289	4. 389	4. 394	3. 141	3. 141	3. 454	3. 080	4. 602
$\theta_d/\text{m rad}$	2. 787	2. 094	2. 307	2. 113	2. 591	3. 303	2. 896	2. 654	2. 473	3. 484
$E/\text{mJ}$	2. 22	18. 69	31. 53	35. 25	33. 47	20. 59	10. 41	4. 840	. 8404	. 1452

$\theta_r$  is refracted angle;  $\theta_d$  is divergence angle

当  $Y_{12}$  为125μm 时, 对接效果最好. 在饱和增益时, 输出口径大一些, 输出能量会大一些. 考虑到增益区的厚度大约有20μm, 单靶时输出 X 光激光的近场宽度也有22μm. 口径可能会增大20μm, 依此推算饱和增益时,  $Y_{12}$  为145μm 时, 对接效果最好. 而实验结果是当  $Y_{12}$  为175μm 时, 对接效果最好. 这表明理论模拟的增益区的位置离靶面近了15μm. 当  $Y_{12}$  为110和150μm 时, 输出 X 光激光的能量大约降至一半. 而在实验中, 当  $Y_{12}$  为150和210μm 时, 输出 X 光激光的能量大约降至一半. 这可能是由于 X 光激光的增益区厚度比实验小了10μm, 也可能是饱和效应所致.

利用弯曲靶可以检验增益区电子密度梯度. 为此模拟了不同弯曲度靶的 X 光激光放大情况. 靶长为18mm, 弯曲靶的曲率半径200cm,  $\theta$  为靶的弯曲度,  $E$  为输出 X 光激光总能量. 开始  $E$  随  $\theta$  的增加而增加, 当  $\theta$  为16m rad/cm 时,  $E$  达到最大值35. 6μJ, 以后随  $\theta$  的增加,  $E$  单调下降.  $\theta$  为5m rad/cm 时,  $E$  是平板靶的10倍多, 该折射度所对应的电子密度梯度为  $2 \times 10^{23}$

$\text{cm}^{-4}$ , 与增益区后部的平均电子密度梯度差不多。当  $\theta$  为  $16\text{m rad/cm}$  时,  $E$  是平板靶的 35 倍多, 该折射度所对应的电子密度梯度为  $6.7 \times 10^{23} \text{cm}^{-4}$ 。考虑到增益区前部状态的不确定性,  $\theta$  为  $5\text{m rad/cm}$  时, 理论模拟结果是可靠的。大于  $10\text{m rad/cm}$  时, 理论模拟结果可能是靠不住的。

将  $18\text{mm}$  长的平板靶分成 18 个小靶, 其中奇数靶的功率密度比 Sm 01 模型高某个百分点, 偶数靶的功率密度则低同样的百分点, 用这样的方式研究驱动激光功率密度的不均匀性的影响, 其结果如图 5 所示,  $\epsilon$  为功率密度不均匀性,  $\epsilon$  起伏  $\pm 10\%$ , 输出激光峰值强度  $I$  将降低 20%。对线聚焦, 要求功率密度在焦线长度方向上的起伏应低于  $\pm 10\%$ 。

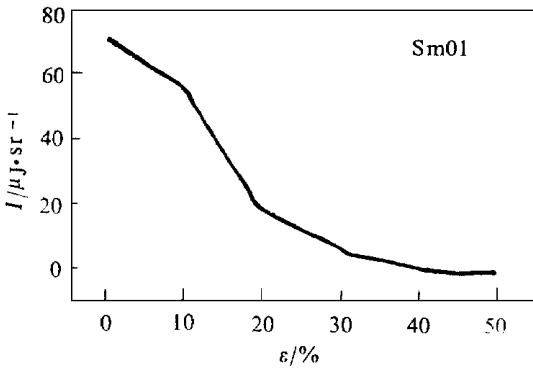


Fig 5 The results for fluctuation of driven intensity  
图5 Sm 01模型驱动功率密度不均匀性模拟结果

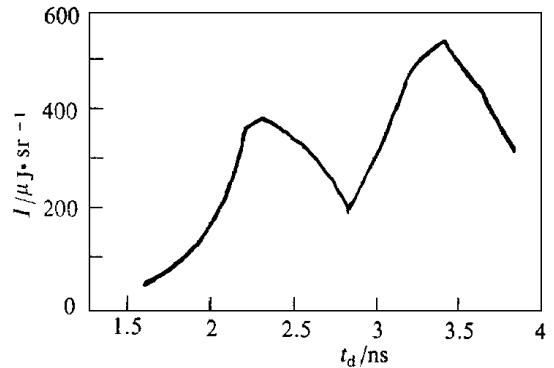


Fig 6 Optimizatin in the delay time  
图6 延迟时间的优化设计

### 4 Sm 的优化设计

在以下的设计中, 驱动激光波长仍为  $1.053\mu\text{m}$ , 靶型均为平板靶, 靶长为  $18\text{mm}$ 。首先, 在 10% 的预脉冲强度以及主脉冲的延迟时间为  $2.2\text{ns}$ , 驱动激光主脉冲功率密度为  $5.57 \times 10^{13}$  和  $6.68 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$  两种条件下, 对驱动激光的脉宽进行优化设计。在功率密度为  $5.57 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$  时,  $85\text{ps}$  脉宽为最好。在功率密度为  $6.68 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$  时,  $70\text{ps}$  脉宽为最好。前者的输出 X 光激光强度是后者的 2.35 倍。

第二, 在预脉冲强度和延迟时间保持不变, 驱动激光的脉宽取  $70\text{ps}$  和  $85\text{ps}$  两种条件下, 对驱动激光功率密度进行优化设计。 $85\text{ps}$  脉宽时, 功率密度以  $5.29 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$  最好。 $70\text{ps}$  脉宽时, 功率密度以  $6.68 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$  最好。前者的输出 X 光激光强度是后者的 2.5 倍。

第三, 在脉宽为  $85\text{ps}$ , 驱动激光主脉冲功率密度为  $5.29 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$  和预脉冲强度为主脉冲强度 10% 的条件下, 对主脉冲的延迟时间进行了优化。结果如图 6 所示, 有明显的双峰现象。

最后, 在脉宽为  $85\text{ps}$  和预脉冲功率密度为  $5.29 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$  以及主脉冲的延迟时间为  $3.4\text{ns}$  条件下, 再对主脉冲的功率密度进行优化。X 光功率输出峰值在驱动功率  $5.57 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$  处, 其全半宽有  $1.15 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$ 。考虑到功率密度低时上升很快, 功率密度高时下降较慢, 最后选取的主脉冲的功率密度为  $5.82 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$ 。此模型的代号为 Sm 64, 主要结果为折射角  $3.98\text{m rad}$ , 发散角  $2.74\text{m rad}$ , 近场分布峰值离初始靶面  $82\mu\text{m}$ , 宽度  $23\mu\text{m}$ , 增益系数  $7.10\text{cm}^{-1}$ , 时间积分角分布峰值强度  $899.3 \mu\text{J/sr}$ , 输出 X 光激光总能量的峰值时刻  $56.7\text{ps}$ , 脉宽  $28.5\text{ps}$ , 总能量  $10.9 \mu\text{J}$ 。

## 6 结束语

与英国的RAL实验室的实验结果相比,本文理论模拟的增益系数 $G$ 低了25%,脉宽窄了22%,增益区离靶面的位置近了 $15\mu\text{m}$ ,增益区的厚度窄了不到 $10\mu\text{m}$ 。根据理论模拟,如果线聚焦引起的驱动激光功率密度的不均匀性小于 $\pm 10\%$ ,则对X光激光增益放大影响不大;采用18mm长、半径2m的弯曲靶以及18mm长的平板靶优化打靶条件都可能使X光激光的输出能量增加10倍;在驱动激光功率密度达到最佳值时,功率密度 $\pm 10\%$ 的变化就会引起输出X光激光强度显著的变化。我们希望实验工作者能检验理论的上述估计。

致 谢 工作得到于敏院士的指导,并与英国RAL实验室的张杰教授进行过有益的讨论。

## 参考文献

- 1 MacGowan B J and Da Silva L B et al *Phys Fluid*, 1992, B4(7): 2326
- 2 Maxon S and Estabrook K G et al *Phys Rev. Lett*, 1993, 70(15): 2285
- 3 Nilsen J and Moreno J C, *Opt Lett*, 1995, 20(12): 1386
- 4 Daido H et al *Phys Rev Lett*, 1995, 75(6): 1074
- 5 Daido H et al *Opt Lett*, 1996, 21(13): 958
- 6 Zhang J and A. G MacPhee et al *Science*, 1997, 276: 1097
- 7 张国平等 强激光与粒子束, 1990, 2(3): 298

# RESEARCH ON Ni-LIKE Sm X-RAY LASER PUMPED BY DOUBLE SHORT DURATION PULSE

Zhang Guoping, Zhang Tanxin, and Wu Jianzhou

*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088*

**ABSTRACT** Ni-like Sm X-ray laser pumped by double short duration pulse was simulated with series code. Simulation results were compared with experiments done by RAL in U.K. The curved target and the ununiformity on line focus were also researched. The optimization in duration, intensity and delay time were done. Using curved target with radius of 200cm and with 85ps duration, 3.4ns delay time, 9% prepulse and  $5.82 \times 10^{13} \text{W}/\text{cm}^2$  main pulse intensity, the output X-ray laser energy was also increasing to 10 times in 18mm length single target.

**KEY WORDS** X-ray laser, electronic collisional exciting scheme, Ni-like Sm, simulation, multiple pulse technique