

抽运激光在光靶中的局域及其对 X 射线 激光特性的影响*

贾天卿¹⁾ 陈鸿²⁾ 李宏强²⁾ 李儒新¹⁾ 徐至展¹⁾

¹⁾中国科学院上海光学精密机械研究所强激光光学开放研究实验室,上海 201800)

²⁾同济大学物理系波耳固体物理研究所,上海 200092)

(2001 年 7 月 9 日收到,2001 年 8 月 13 日收到修改稿)

新型 X 射线靶设计为:由 SiO_2 和 TiO_2 组成具有 12 个周期的一维光子晶体,在它的中间嵌入光靶材料层作为缺陷层。 SiO_2 、 TiO_2 和光靶层的光学厚度分别为 $\lambda/4$ 、 $\lambda/4$ 和 $\lambda/2$ (λ 为抽运激光波长)。与普通平板光靶相比,当抽运光垂直照射到这种光靶时,靶层内部的光强将提高 2 个数量级,所以抽运激光的阈值强度将降低 2 个数量级,这有利于 X 射线激光的小型化。在同样的抽运激光照射下,X 射线激光的强度将提高 4 个数量级,转换效率也将提高约 4 个数量级。由于平均电离度随抽运激光强度的提高而提高,所以采用这种光靶有利于使 X 射线激光向短波长推进。

关键词: X 射线激光,光子晶体,光波局域

PACC: 9870Q, 4270Q

1 引 言

作为亮度高、脉冲短、频带窄的短波长相干光源, X 射线激光可以应用于活的生物细胞成像、激光等离子体密度构成的诊断和材料超快结构变化的探测等领域^[1]。近十几年来, X 射线激光的研究取得了很大的进展^[2-16],但仍存在一些问题,如 X 射线激光转换效率很低^[3],只有 10^{-6} ;当波长小于 6nm 时 X 射线激光仍达不到饱和输出;目前 X 射线激光的体积太大,不利于它的推广使用等^[12]。

以前,人们主要通过改进抽运激光和抽运机制来提高 X 射线激光的特性。本文通过设计新的光靶,使激光在靶材料中局域,从而改进 X 射线激光的特性。

2 光靶的设计

1999 年,日本的 Nishikawa 等人利用阳极氧化(anodic oxidation)技术,在铝板上腐蚀出直径为几十 nm,方向与铝板表面垂直的小孔阵列。实验表明,用

这种纳米多孔铝板光靶得到的波长在 5—25nm 之间的 X 射线激光的总能量比通常的平板铝靶高出大约 30 倍^[15]。由此可见,通过改进 X 射线光靶,可以有效地提高 X 射线激光的转换效率。

Nishikawa 等人通过增加光靶中吸收激光能量的体积来增加 X 激光的强度。我们通过实现抽运激光在光靶中的局域,提高抽运激光在光靶中的强度来提高 X 射线激光的特性。为此,我们把掺杂光子晶体的基本思想应用到光靶的设计中。

光子晶体是两种以上具有不同介电常数的材料在空间周期分布形成的人工结构^[17-20]。与晶体中电子的能带结构类似,这种材料也具有光子的能带结构。某些波段的光能自由地通过光子晶体,称为光子导带;其他波段的光被高度反射,称为光子带隙。当光子晶体中有缺陷态时,就有局域模,这种模式的光将在缺陷态附近局域^[19,20]。例如,把由非线性光学材料做成的缺陷层嵌入一维光子晶体(即周期排列的多层膜)的中间,其有效的非线性将大大提高。这是因为入射光被强烈地局域在缺陷层附近,其中的光强大大提高了。

本文用掺杂一维光子晶体中激光能量在杂质层

* 中国博士后科学基金、国家自然科学基金(批准号:60108002,19974058)、国家杰出青年基金(批准号:69925513)、上海应用物理中心(批准号:99JC14006)、上海市自然科学基金(批准号:01Z1A14070)、国家重点基础研究发展规划项目(批准号:G1999075200)、国家 863 项目、中国科学院“百人计划”项目和“引进国外杰出人才”项目资助的课题。

中高度局域的特性,把光靶作为杂质层嵌入光子晶体的中间,使激光在其中局域.我们设计的新型光靶如图 1 所示.在光靶层 T 的两边是 $N=6$ 对层 SiO_2 (A) 和 TiO_2 (B).其光学厚度 D 分别为 $\lambda/2$, $\lambda/4$ 和 $\lambda/4$. $\lambda=1053\text{nm}$ 为抽运激光的波长.抽运激光是这种光子晶体的局域模,其频率位于光子带隙的中间.

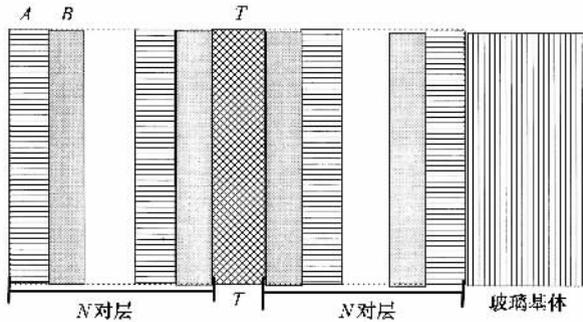


图 1 新型光靶结构示意图

产生 X 射线激光的机制有两种:三体复合和电子碰撞激发.前者的光靶通常是化合物,如 LiF , NaF 和 CaF_2 等^[4,5,13],其消光系数很小.后者的光靶通常是金属和半导体^[3,8,12].下面分别讨论这两种情况.

用 KrF 激光照射 LiF 光靶,得到波长为 13.5nm 的 X 射线激光的增益系数高达 $11/\text{cm}$ ^[5].这里用 LiF 做成光靶层嵌入一维光子晶体中间,把这种新型光靶作为三体复合 X 射线激光的代表,研究抽运激光在光靶中的分布.计算结果如图 2 所示,实线表示用玻璃做基体的情况,虚线为没有基体的情况.在这两种情况下,光靶层中激光电场的峰值强度分别提高了 17 倍和 13 倍.这里 D 表示靶层的光学厚度, E 和 E_0 分别表示光靶中和空气中抽运激光电场强度.有基体时靶层中激光电场强度更高,这是因为用玻

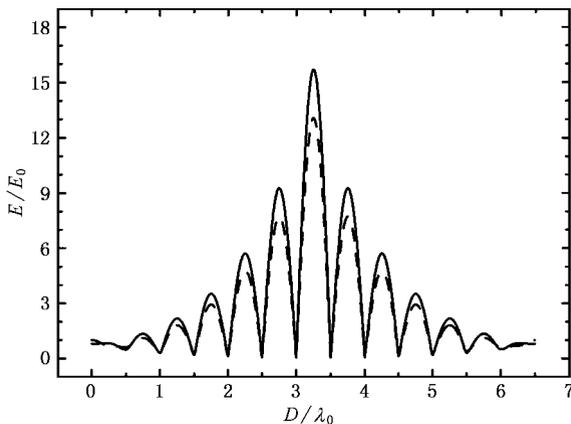


图 2 抽运激光的电场强度在光靶中的分布

璃做基体相当于光靶多了半个周期.在光子晶体中周期越多,入射光的局域越强.

电子碰撞激发机制的 X 射线激光的光靶通常是金属和半导体,如锗、硒、银、铯等.常用的抽运激光的波长在 248nm 和 1064nm 之间,这些材料的消光系数为 $1-10^{21}$.为了实现激光在其中局域,靶材料的消光系数必须很小.实验表明,用 LiF , NaF , CaF_2 等化合物代替 Li , Na , Ca 等金属做 X 激光的光靶,也能得到增益系数较高的 X 射线激光^[4,5,13].因此,我们用金属和半导体的化合物代替金属和半导体作为光靶材料,把它们嵌入一维光子晶体的中间作为新的光靶.实际上我们在选择光靶材料时,主要考虑材料的上、下能级和它们的寿命,而不是这种材料的消光系数.

最近人们对类 Ni X 射线激光产生了浓厚的兴趣,主要是因为 X 激光向短波长推进时所需抽运激光的强度较缓慢地增加.用银作光靶,当抽运激光的强度约为 $10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$ 时就实现了饱和输出^[3,12].因此,在发展小型化 X 射线激光时,银是很好的光靶材料.我们用 AgCl 代替 Ag 作为光靶材料,并把它嵌入一维光子晶体的中间.计算结果如图 3 中的实线所示,与普通的平板靶相比,激光的电场强度提高了 11 倍.

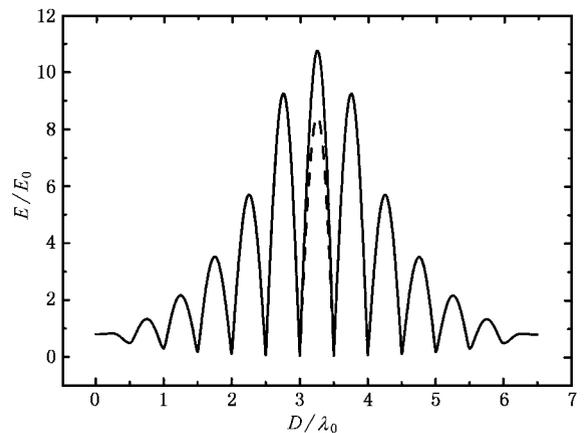


图 3 抽运激光的电场强度在光靶中的分布

需要指出的是,在复合机制的 X 射线激光中,金属和半导体光靶也可以用它们的化合物代替.例如用碳作为光靶材料,人们已实现了波长为 18.2nm 的软 X 射线激光^[11].令人遗憾的是,由 C^{5+} 离子发出的波长为 3.37nm 的 X 射线激光还没有实现.这是因为它所需要的抽运激光强度非常高.这里我们用 SiC 代替 C 作为光靶材料.计算结果如图 3

的虚线所示,光靶层中激光的电场强度提高了约 9 倍.

图 4 给出了抽运激光在我们设计的新型光靶中光强的分布,实线、虚线和点线分别是 LiF、AgCl 和 SiC 作为光靶的情况.与普通平板靶相比,抽运激光的强度在光靶材料层中分别提高了约 250、100 和 80 倍.显然,激光主要汇聚在了光靶材料中.

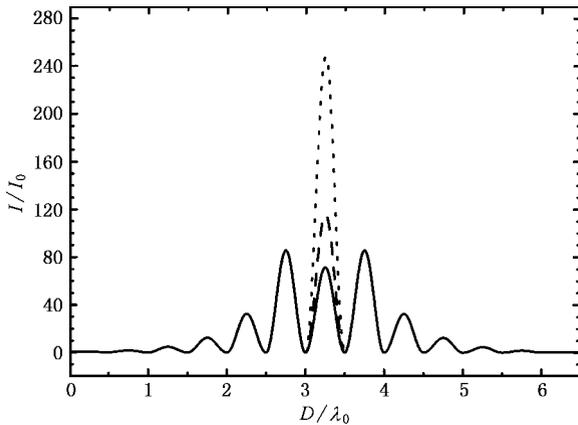


图 4 抽运激光的光强在光靶中的分布

3 对 X 射线激光特性的影响

与普通平板靶相比,抽运激光的光强在这种新型光靶的光靶材料层中提高了约 2 个数量级,这对提高 X 射线激光的特性具有重要的意义.

自由电子吸收抽运激光的能量是决定 X 射线激光能量的重要因素.随着抽运激光强度的提高,自由电子吸收激光能量的速率也将相应提高,所以电子的温度也将提高.数值计算表明,电子温度 T_e 与抽运激光的强度 I_i 之间有幂指数关系: $T_e \propto \sqrt{I_i}$ ^[7,16].与普通平板靶相比,光靶材料中抽运激光的强度提高了 2 个数量级,所以电子的温度将提高约 1 个数量级.

随着电子温度的提高,类 Ne 和类 Ni 基态离子向上能级碰撞激发的速率也迅速提高,增益系数也将提高^[6].实验表明,用钨玻璃激光器照射钨平板靶,当激光的强度从 0.8 提高到 $2.2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 时,波长为 23.6nm 的软 X 射线激光的增益系数从 1.6 提高到 4.4/cm^[8].图 5 的空心正方块给出了实验结果.实心的菱形块表示理论计算给出的波长 19.6nm X 射线激光的增益系数随抽运激光强度增加的情况^[9].图中的实线和虚线是用函数 $G \propto \ln(I_i/I_{th})$ 拟

合的结果.在这两种情况下,软 X 射线激光的波长和激发机制(稳态增益和瞬态增益)都不同,然而增益系数都与抽运激光强度有对数关系.我们推测这种对数关系是广泛适用的.这种推测也是合理的,因为实验结果表明 X 射线激光强度与抽运激光强度之间存在幂指数关系(见下面的讨论).实验结果表明,当抽运激光的强度是阈值强度 I_{th} 的 2 倍时, X 射线有明显的增益^[10].取当 $I_i = 2I_{th}$ 时的增益系数为 1,我们得到与普通平板靶相比,用这种新型光靶时增益系数将提高 5 倍.

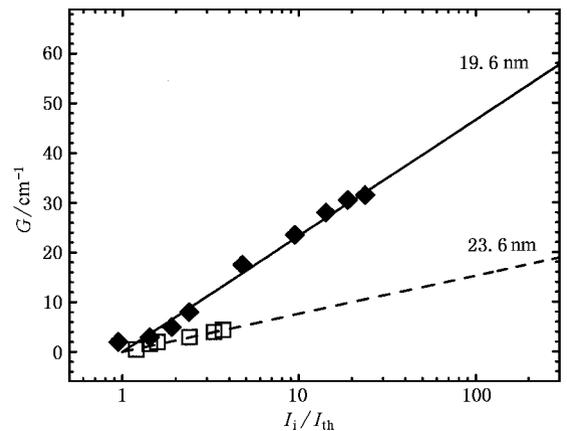


图 5 实验和理论给出的增益系数对抽运激光强度的依赖关系

增益饱和的 X 射线激光能够提供高亮度而且比较稳定的光源,具有广阔的应用前景.目前主要用双靶对接法得到饱和的 X 射线激光^[3,6,12],而实现双靶对接是很麻烦的.它要求两个光靶沿 X 射线传播方向和垂直传播方向的距离与两束抽运激光的方向和时间差精确协调.实验表明,当激光的增益长度积达到 15 时 X 射线激光趋于饱和^[3].当采用这种新型光靶时,增益系数提高了 5 倍,达到增益饱和所需的光靶长度减小到普通平板靶的 1/5.因此, X 激光束在等离子体柱中传播时折射效应很小,用单个光靶就很容易实现饱和输出.

X 射线激光强度和抽运激光强度之间存在幂指数关系^[8,10,14-16]

$$I_X \propto (I_i)^\gamma, \quad (1)$$

这里 γ 依赖于具体的实验条件.对 C 和 Al 光靶, γ 大约等于 2.2^[15].在复合机制的 X 射线激光实验中,指数 γ 一般在 1.4 和 3 之间变化^[14-16].用 1.4cm 长的 Ge 平板作光靶,当抽运激光的强度从 0.4 增加到 $2.2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 时,波长 23.6nm 的 X 激光的强度提高了 50 倍^[9].利用(1)式可以得到指数 $\gamma = 2$.在电子

碰撞激发机制的 X 射线激光实验中, 指数的变化范围为 $1-5^{[8-10]}$. 总的来讲, 尽管指数 γ 随着光靶材料、光靶长度和抽运机制而改变, 但它总是在 2 附近变化. 与普通平板靶相比, 抽运激光的强度在我们设计的新型光靶的光靶材料层中提高了 2 个数量级, 所以 X 射线激光束的强度将提高 4 个数量级, 从而激光-X 射线激光的转换效率也提高了 4 个数量级.

实验表明, 当抽运激光的强度提高一个数量级时 Al 靶的主要电离态将从类 Be 提高到类 H 状态^[14]. 人们对 C 靶进行了深入的研究, 发现电离度与抽运激光强度之间存在关系: $Z^* \propto (I_i)^{0.21[16]}$. 随着抽运激光强度的提高, 电子的温度不断升高. 在电子的碰撞激发下, 离子被激发的速率迅速提高, 所以电离度随着抽运激光强度的提高而提高.

实验表明, 当抽运激光的强度从 6×10^{14} 增加到 $3 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 时, 从 C 靶发出的主要的 X 射线波长从 4.03nm 缩短到 3.37nm^[16], 光子能量提高了 60eV. 与普通平板靶相比, 光靶材料中抽运激光的强度大大提高了, 靶材料的电离度也提高了. 电离度越

高, X 射线的波长越短, 所以采用这种新型光靶有利于 X 射线激光向短波长推进.

4 结 论

把光靶材料层作为缺陷层嵌入到由 SiO_2 和 TiO_2 组成的具有 12 个周期的一维光子晶体中间, 构成新型的光靶. 与普通平板光靶相比, 当抽运光垂直照射到这种光靶时, 靶层内部的光强将提高 2 个数量级, 所以抽运激光的阈值强度将降低 2 个数量级, 这有利于 X 射线激光的小型化. 在同样的抽运激光照射下, X 射线激光的强度将提高 4 个数量级, 所以转换效率将提高约 4 个数量级. 由于电子温度和平均电离度随抽运激光强度的提高而提高, 所以采用这种光靶有利于使 X 激光谱向短波长推进.

感谢中科院物理所张杰教授和同济大学陈玲燕教授的有益讨论.

- [1] Peng H M, Wang S J *et al* 1997 *X-ray lasers* (Beijing: Publishing company of national defence industry) (in Chinese) [彭惠民、王世绩等 1997 X 射线激光(北京: 国防工业出版社)]
- [2] Matthews D L, Hagelstein P L, Rosen M D *et al* 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 110
- [3] Zhang J, MacPhee A G *et al* 1997 *Science* **276** 1097; 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 3856
- [4] Azuma H, Kato Y, Yamakawa K *et al* 1990 *Opt. Lett.* **15** 1011
- [5] Korobkin D V, Nam C H and Suckewer S 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 5206
- [6] Wang S, Gu Y, Zhou G *et al* 1992 *J. Opt. Soc. Am.* **B9** 360; Daido H, Ninomiya S, Imani T *et al* 1997 *Int. J. Mod. Phys.* **B11** 945
- [7] Holden P B, Healy S B, Lightbody M T M *et al* 1994 *J. Phys.* **B27** 341
- [8] Neely D, Lewis C L S, O'Neill D M *et al* 1992 *Opt. Commun.* **87** 231
- [9] Healy S B, Janulewicz K A, Plowes J A and Pert G J 1996 *Opt. Commun.* **132** 442
- [10] Tommasini R, Lowenthal F and Balmer J E 1999 *Phys. Rev.* **A59** 1577; Lin J Y, Tallents G J, Smith R *et al* 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 672
- [11] Zhang J, Key M H *et al* 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 1335
- [12] Dunn J, Li Y, Osterheld A L *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4834; Nickles P V, Shlyaptsev V N, Kalachnikov M *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2748
- [13] Xu Z Z, Fan P Z, Lin L H *et al* 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 1023
- [14] Teubner U, Missalla T *et al* 1996 *Appl. Phys.* **B62** 213; 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 794
- [15] Nishikawa T, Nakano H, Uesugi N *et al* 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 4079
- [16] Altenbernd D, Teubner U, Gibbon P *et al* 1997 *J. Phys.* **B30** 3969
- [17] Zhu S Y, Yang Y P, Chen H, Zheng H and Zubairy M S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 2136; Zhu S Y, Liu N H, Zheng H and Chen H. 2000 *Opt. Commun.* **174** 139
- [18] Li H Q, Gu G C and Chen H 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 3260; He Y J, Su H M, Tang F Q *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 892 (in Chinese) [何拥军、苏慧敏、唐芳琼等 2001 物理学报 **50** 892]
- [19] Hattori T, Tsurumachi B and Nakatsuka H 1997 *J. Opt. Soc. Am.* **B14** 348
- [20] Balakin A V, Bushuev V A, Koroteev N I *et al* 1999 *Opt. Lett.* **24** 793; Pellegrini V, Colombelli R *et al* 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1945
- [21] Palik E D 1985 *Handbook of Optical Constants of Solids* (Academic Press Inc., Orlando, Florida, USA)

The designing of novel targets and their effects on X-ray lasers^{*}

Jia Tian-Qing¹⁾ Chen Hong²⁾ Li Hong-Qiang²⁾ Li Ru-Xin¹⁾ Xu Zhi-Zhan¹⁾

¹⁾(Laboratory for High Intensity Optics , Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China)

²⁾(Phol Institute of Solid State Physics , Tongji University , Shanghai 200092 , China)

(Received 9 July 2001 ; revised manuscript received 13 August 2001)

Abstract

The novel target used in X-ray lasers is designed as a one-dimensional photonic crystals (1D PCs) with 12 bilayers of SiO₂ and TiO₂ , at the center of which a defect layer made of target material is embedded. The optical thickness of the target layer and each layer of the rest are a half and a quarter of the pumping laser wavelength , respectively. The pumping laser is , therefore , the localized mode of the 1D PCs. Compared with the common slab target , the pumping laser intensity in the target layer will be enhanced by about 2 orders. This is very important to the progress of X-ray lasers towards compactness , shorter wavelength and higher conversion efficiency. Gain coefficient will increase by a factor of 5 , hence the target length in saturated XRL is reduced to one fifth. X-ray laser intensity will increase by about 4 orders , and so does the conversion efficiency. The average ionization state increases with pumping laser intensity , therefore , the wavelength of the X-ray laser will be shorter.

Keywords : X-ray lasers , photonic band gap materials , localization of pumping laser

PACC : 9870Q , 4270Q

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60108002 , 19974058) , the Funds for Outstanding Young Researchers from the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69925513) , the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. G1999075200) .