

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0081-05

高功率钕玻璃固体激光放大器物理性能优化设计*

於海武 郑万国 贺少勃 唐 军 王成程 刘 勇 魏晓峰 张小民

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心高温高密度等离子体物理国家级重点实验室, 绵阳 621900)

摘要 给出了高功率钕玻璃固体激光放大器小信号增益特性的时间和光谱分辨的物理模型, 该模型包括了激光放大器能量转换的 4 个主要环节: 抽运源、腔传输、增益介质、增益特性与储能效率。该模型详细地考虑了氙灯辐射的光谱和时间特性, 以及增益介质中钕离子的光谱吸收特性。利用该物理模型, 对目前正在研制的口径为 300 mm × 300 mm 高功率钕玻璃固体激光放大器的各单元参数进行了细致的优化, 并给出了放大器的增益特性及储能效率, 模拟计算结果表明, 在 23 kV 常规工作电压下, 放大器小信号增益系数为 $5.0\% \text{ cm}^{-1}$, 储能效率为 3.0%, 满足设计要求。

关键词 钕玻璃固体激光放大器, 小信号增益, 储能效率, 氙灯辐射, 腔传输

中图分类号 TN242:TN242.1⁺1 文献标识码 A

Physical Performance Optimization for High Power Nd:Glass Solid State Laser Amplifiers

YU Hai-wu ZHENG Wan-guo HE Shao-bo TANG Jun WANG Cheng-cheng

LIU Yong WEI Xiao-feng ZHANG Xiao-min

(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, National Key Laboratory for Laser Fusion, Mianyang, 621900)

Abstract A physical model that describes the gain performance of high power solid state laser amplifier has been presented. The model is time- and spectrum-related and consists in four key factors that describes the energy conversion of amplifier, i. e., (1) pump source, (2) cavity transfer, (3) gain medium, and (4) gain performance and energy storage efficiency. With this model, the parameters of pumping sources and gain medium for $4 \times 2 \times 3$ amplifier have investigated in detail. The calculation results indicate that the small signal gain coefficient and energy storage efficiency are about $5.0\% \text{ cm}^{-1}$ and 3.0%, respectively, which meet design performance requirement.

Key words Nd:glass laser amplifiers, small signal gain, energy storage efficiency, flashlamp irradiance, cavity transfer

1 引言

目前我们正在研制的 4×2 口径片状放大器单元将用于我国下一代惯性约束聚变(ICF)用的高功率固体激光驱动器。放大器单元必需提供足够的增益和储能, 以满足激光装置能量和功率的需求, 同时对光束波前畸变的贡献要很小。目前的放大器单元与以往 ICF 激光装置的放大器不同, 主要区别在于总的规模和封装方式。 4×2 放大器结构中的 4×2 (高 × 宽) 表示被组合在一起的平行的放大通道数目、或者光束口径数目。 4×2 放大器使用了 30 cm

的方口径。由于采用了大的光束口径, 对于靶上需要相同的能量时可以减少激光束的数目, 从而降低系统的造价。将放大器光束口径组合在一起最早是由 LLNL 于 1978 年提出的, 目的是降低 MJ 级聚变激光系统的造价^[1]。目前, 国际上最主要的 ICF 驱动器, 比如美国的国家点火装置(NIF)以及法国的兆焦耳激光装置(LMJ)都采用了 4×2 组合口径的放大器结构^[2-4]。将口径组合在一起降低造价主要表现在: 1) 放大器更紧凑, 从而降低建筑物的规模和造价; 2) 提高抽运效率, 从而降低脉冲功率系统的规模和造价; 3) 减少了放大器内部部件的使用数目。本文给出了 4×2 放大器的总体物理设计及其性能。主要研究了氙灯抽运源、增益介质的吸收特

* 国家 863-416 主题(416-7.1)资助课题。

性、以及它们对放大器总体增益性能的影响。

2 氙灯抽运源

J. P. Markiewicz 等对氙灯的非线性负载特性做了比较详细的研究^[5]。单节网络氙灯放电回路为:

$$L \frac{di}{dt} \pm K_0 |i|^{1/2} + \frac{1}{C} \int_0^t i d\bar{t} = V_0 \quad (1)$$

式中, $K_0 = \frac{knL}{d}$, $k = 1.27 \left(\frac{P}{450} \right)^{0.2}$,

令 $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$, $i = \frac{IV_0}{Z_0}$, $\tau = \frac{t}{T}$,

$$T = \sqrt{LC}, \quad \alpha = \frac{K_0}{(V_0 Z_0)^{1/2}}$$

考虑回路损耗电阻为 r 之后, (1) 式变为:

$$\frac{dI_s}{d\tau} \pm \left[\alpha + |I_s|^{1/2} \frac{r}{Z_0} \right] |I_s|^{1/2} + \int_0^\tau I_s d\bar{\tau} = 1 \quad (2)$$

利用(1)式, 图 1 给出了 $4 \times 2 \times 3$ 片状放大器在典型的抽运参数以及工作条件下所对应的氙灯电流密度波形; 图 2 给出了根据放电网络回路方程严格求解的进灯电功率密度。从图 1 我们可以看出, 由于主回路参数是按照临界阻尼来设计的, 因此电压小幅调整时, 放电波形仍基本上处于临界阻尼状态, 电传输效率大致相等, 只是由于工作电压的提高(从 20 kV 到 23 kV), 氙灯负载提高了 23.3% (能库储能提高了 24.4%)。H. T. Powell 等对氙灯进行了详细研究之后得到一个经验模型, 即氙灯的进灯电功率密度(kW/cm^2)由氙灯的电流密度(j - kA/cm^2)、氙灯内径(d -cm)、氙灯充气压(p -Torr)决定^[6]:

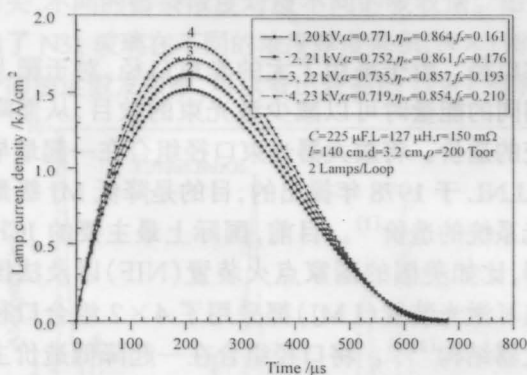


图 1 不同工作电压条件下氙灯的电流密度波形
Fig. 1 Waveform of the flashlamp current density at different voltages

$$P_{in} = 2.81 \exp[1.48 \ln(j) + 0.90 \ln(d) + 0.20 \ln(p) + 0.50 \ln(j) \ln(d)] \quad (3)$$

根据经验模型[3(式)]与理论模型[(2)式]的比较我们发现(见图 2), 这两者吻合得相当好, 峰值误差为 2.4%, 对各种不同的氙灯参数以及抽运回路参数计算表明, 这一误差大致在 1%~3%。

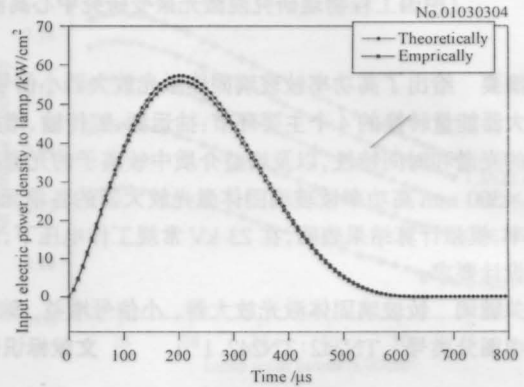


图 2 氙灯进灯电功率密度的理论和经验模型比较
Fig. 2 Comparison between theoretical and empirical electric energy into flashlamp

氙灯辐射输出由三部分组成, 抽运带、紫外区、红外区, 总辐射功率为三者之和, 其中我们所关心的抽运带内的光谱辐射输出随进灯功率的变化如图 3 所示。可以看出, 随着进灯功率的增加, 氙灯光谱输出明显蓝移。氙灯的电光转换效率(辐射效率)为总的辐射输出光功率与进灯功率之比, $\eta_{EO} = P_{out}/P_{in}$ 。图 4 给出了氙灯辐射功率输出中红外、紫外以及抽运带所占的比例, 由图 3 和图 4 可以看出随着进灯电功率的提高或氙灯负载的提高, 有效输出的抽运带份额逐渐下降, 氙灯有效光谱效率降低。

由于氙灯光谱辐射特性以及效率与氙灯的内径、气压等因素有关, 我们仔细地研究并比较了几个典型的放大器(2×1 口径的多程放大器、单口径片状放大器, $4 \times 2 \times 3$ 放大器, NIF 放大器)运行在 $f_x = 0.2$ 时氙灯辐射效率与内径和充气气压的关系, 如图 5 所示, 可看出粗的氙灯在充气压力较低时能够得到比较高的电光转换效率。而且, 低的气压使得等离子体更加透明, 腔传输效率也会增加。图 6 给出了 $4 \times 2 \times 3$ 放大器的氙灯在其它条件相同时, 不同的充气压力对电光效率的影响。可以看出, 气压不同时, 电光转换效率大致相等, 气压较高时效率略高一些。对应于 133×10^2 , 266×10^2 , 466×10^2 Pa, 的平均值分别为 80.6%, 81.0%, 81.1%, 81.3%, 显然 266×10^2 Pa 是一个比较合适的充气压力。

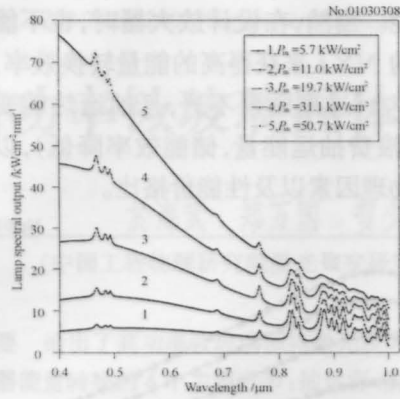


图3 抽运带内光谱辐射功率随波长的分布

Fig.3 Flashlamp spectrum with respect to wavelength within pump band

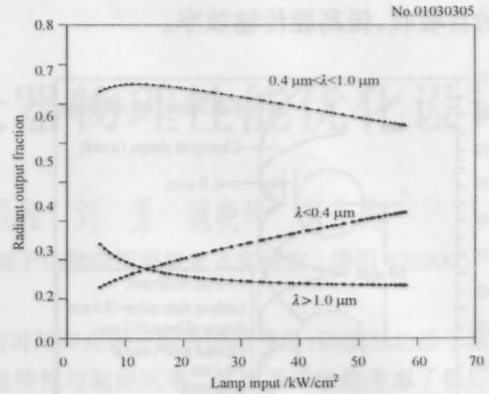


图4 氙灯辐射功率输出中红外、紫外以及抽运带的比例

Fig.4 Fraction of lamp output within infra-red, ultra-violet, and pump bands

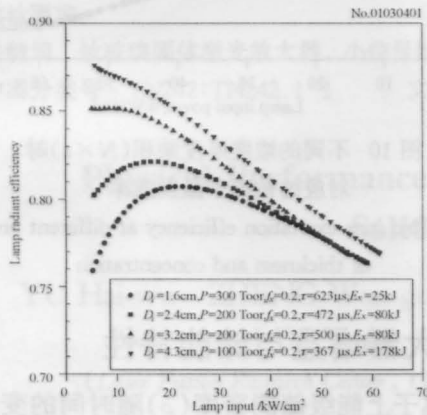


图5 氙灯辐射效率与内径和充气气压的关系

Fig.5 Dependence of flashlamp electric-to-optical efficiency on lamp in-diameter and xenon pressure

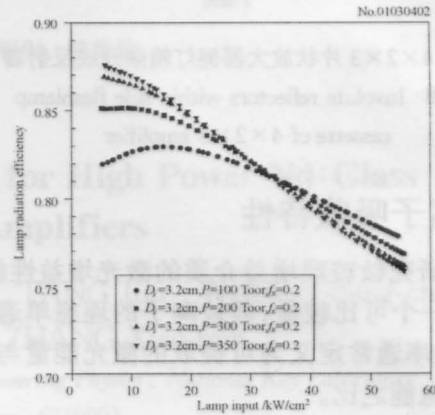


图6 氙灯辐射效率与充气气压的关系(其它条件相同)

Fig.6 Dependence of flashlamp electric-to-optical efficiency on xenon pressure (the others are same)

3 抽运腔设计

4×2×3 片状放大器提供 1.053 μm 的激光增益,采用掺钷磷酸盐玻璃材料、矩形激光片、与光束方向成布儒斯特角放置,从而消除反射损耗。激光片有吸收玻璃做成的边缘包边,以防止片内部的激光寄生振荡。每个片箱装有 4 张片,垂直叠放。中灯箱从两个方向抽运钷玻璃片,侧灯箱通过银反射器从一个方向抽运激光片。放置于氙灯和激光片之间的隔板玻璃起三个作用:1) 防止氙灯产生的声波传输到光路上造成光束波前畸变;2) 在片腔和灯箱之间提供一个防污屏蔽层;3) 为气体冷却氙灯提供一个通道。图 7 给出了 4×2 放大器模块的俯视图,该图给出了激光片、氙灯、隔板玻璃、以及反射器的排布。

4×2×3 片状放大器利用几个特点来提高效率。侧灯箱使用渐开线形银反射器,这一设计可以将氙灯光更好地反射到钷玻璃片,减少灯之间的自

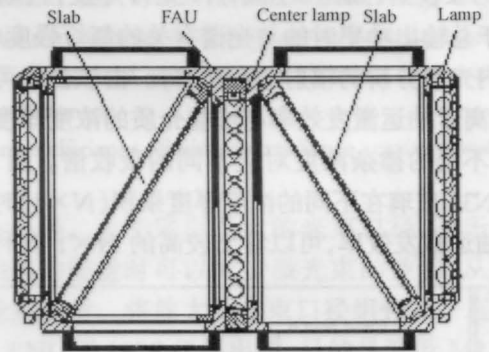


图7 4×2 片状放大器抽运腔俯视图

Fig.7 Top view of 4×2 slab amplifiers pumping cavity 吸收,如图 8 所示。与平板反射器相比,渐开线形反射器具有更高的腔传输效率。第二个是采用一个弱的电脉冲在主脉冲到来之前的几百微秒时刻使得氙灯预电离,预电离可以使氙灯起弧更均匀,并在主放电到来之前维持氙灯等离子体通道,从而提高氙灯等离子体的电光转换效率。4×2×3 放大器抽运腔的设计还在中灯箱使用了菱形反射器,以便降低氙

灯之间的自吸收,提高腔传输效率。

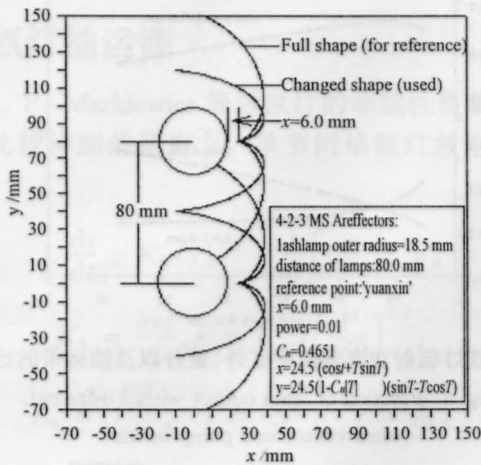


图 8 4×2×3 片状放大器侧灯箱渐开线反射器
Fig.8 Involute reflectors within side flashlamp cassette of 4×2×3 amplifier

4 钕离子吸收特性

为了研究钕玻璃增益介质的激光增益性能,我们定义了一个可比较量,即钕离子的理想单通抽运效率,该效率通常定义为可提取的激光能量与输入到氙灯的电能之比。

$$\eta_{Nd}(P_{out}) = \int_{0.4}^{1.0} \frac{\lambda}{\lambda_L} [1 - e^{-\beta(\lambda)t}] \frac{I(\lambda, P_{out})}{P_{out}} d\lambda \quad (4)$$

式中,输出光子的波长假设为 1.053 μm, β(λ) 是 Nd³⁺ 的吸收谱(如图 9 所示), t 是片厚度, I(λ, P_{out}) 是处于总输出功率时的与光谱有关的氙灯强度(即抽运带内光谱分辨的辐射输出功率)。由该公式可以看出,钕离子抽运激发效率与增益介质的浓度厚度乘积有关,不同的掺杂浓度对应不同的吸收谱。图 10 给出了 N31 玻璃在不同的浓度厚度乘积(N×t)时钕离子的抽运激发效率,可以看出较高的 N×t 有利于激

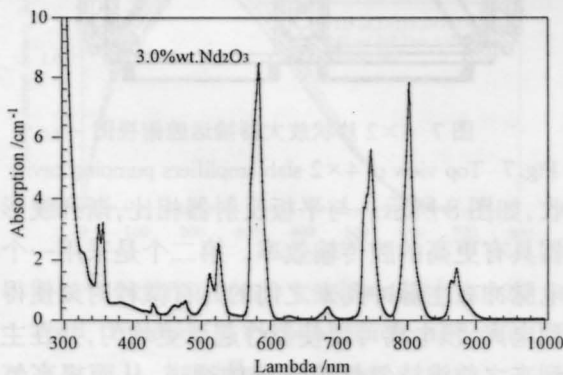


图 9 N3130 钕玻璃材料吸收谱
Fig.9 Absorption spectrum of N31 Nd:glass material

光片的储能。当然,在设计放大器时,也不能简单地使用较高的 N×t 来获得高的能量转换效率,要选择合适的 N×t(过高则泵不透,且抽运热畸变效应增加;太低则浪费抽运能量,储能效率降低),以便综合考虑其它物理因素以及性能价格比。

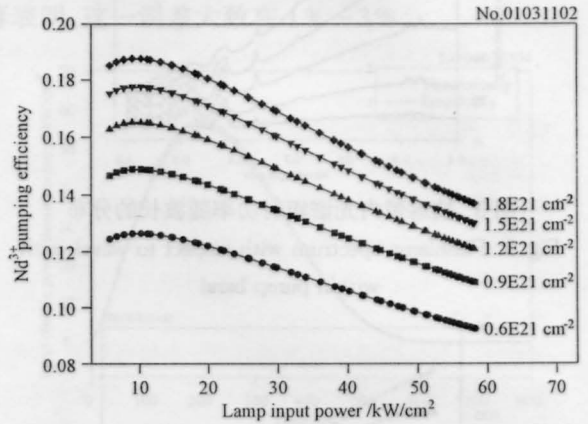


图 10 不同的浓度厚度乘积(N×t)时对应的钕离子激发效率

Fig.10 Nd ions excitation efficiency at different products of thickness and concentration

5 放大器增益与储能特性

钕离子上能级储能密度(ρ)随时间的变化关系为:

$$\frac{d\rho}{dt} = \eta_{Nd}(P_{out})T_{cav}(P_{out})P_{out} \left(\frac{A_{lamp}}{V_{slab}} \right) - \tau^{-1}(\rho)\rho \quad (5)$$

η_{Nd} 由(4)式计算得到。式中 η_{Nd}(P_{out}) 和 P_{out} 是一一对应的, T_{cav} 是氙灯抽运光至钕玻璃片的总的平均腔传输效率、或者是时间分辨(功率分辨)的瞬态腔传输效率,由光线追迹计算。A_{lamp} 是氙灯的内表面积, V_{slab} 是片体积, τ⁻¹(ρ) 是考虑到放大自发辐射(ASE)退抽运特性后的激发态寿命。储能效率通常定义为激光上能级峰值储能与进灯能量之比^[3];小信号增益系数与储能密度的关系为:

$$g(t, \lambda) = \rho(t)\sigma(\lambda)/h\nu,$$

通常我们关心的是对应于增益介质峰值荧光波长(峰值受激发射截面)处、并且在储能密度达到峰值时刻的小信号增益系数,即 g = ρσ/hν, 其中 ρ、σ 均为峰值。因此,就增益系数而言,要求有高的储能密度和受激发射截面;但是当片的尺寸较大时,较高的受激发射截面会增加 ASE 退抽运行为。

利用 4×2×3 片状放大器优化的设计参数,我们计算了放大器的增益和储能特性。如图 11~图

13 所示,计算结果表明,23 kV 时(氙灯负载 $f_x \approx 0.21$)放大器单片小信号增益能力约为 1.27,对应的小信号增益系数为 $5.0\% \text{ cm}^{-1}$,储能效率约为 2.9%,满足设计要求。另外,从图 12 我们可以清楚地看出,在相同的抽运条件下(总抽运能量一致),片越厚,则单片小信号增益能力越大,放大器储能效率越高,而小信号增益系数越小。当然,片厚度增加时,放大器总的增益长度要随之增加,非线性效应明显,且片的成本也随之增加,因此需要对片的厚度优化考虑。从图 13 可看出,由于 N3130 钕玻璃材料的荧光寿命约为 $320 \mu\text{s}$,因此较短的抽运脉宽能更好地与荧光寿命匹配,具有较高的增益能力。

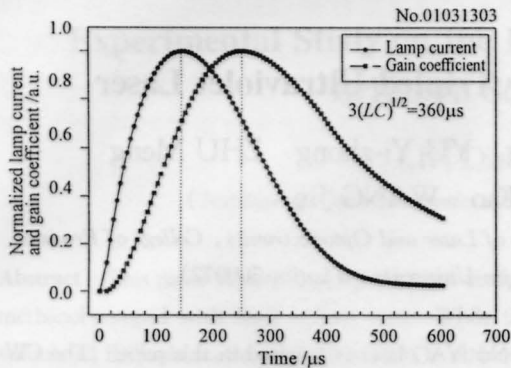


图 11 氙灯抽运脉冲与片内储能随时间的变化关系
Fig. 11 Time relation of flashlamp pumping pulse and energy stored within laser slab

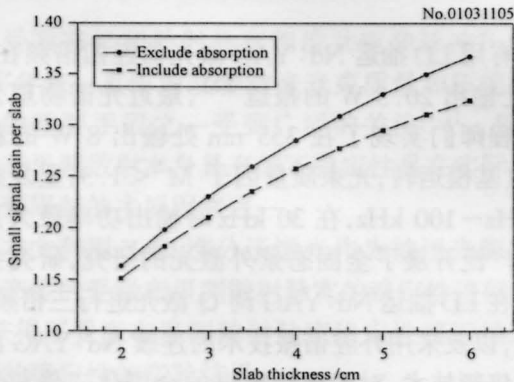


图 12 相同抽运条件时,不同的片厚对应的单片小信号增益

Fig. 12 Dependence of small signal gain per slab on slab thickness at the same pumping conditions

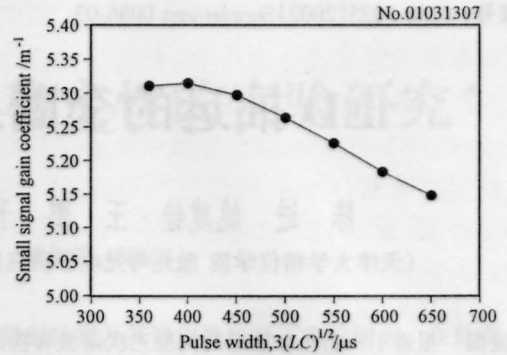


图 13 相同抽运能量时不同的抽运脉宽对应的小信号增益系数

Fig. 13 Relationship between gain coefficient and pulse width at the same pumping conditions

6 结 论

通过对放大器系统各单元以及各能量转换环节的优化设计,包括氙灯抽运电路参数、氙灯、抽运腔、增益介质等,我们对 $4 \times 2 \times 3$ 片状放大器系统的增益和储能特性作了详细的模拟设计,计算结果表明,在 23 kV 常规工作电压下(氙灯负载 $f_x \approx 0.21$),放大器单片小信号增益为 1.27,小信号增益系数可以达到 $5.0\% \text{ cm}^{-1}$,储能效率接近 3.0%,满足系统的总体物理设计。

参 考 文 献

- 1 W. F. Hagen. Laser Program Annual Report-1977, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, UCRL-50021-77, 2~228 to 2~231. 1978
- 2 W. H. Lowdermilk. Status of the National Ignition Facility Project. *Proc. SPIE*, 1996, **3047**:16~37
- 3 A. Erlandson, T. Alger, J. Horvath *et al.*. Flashlamp-pumped Nd: glass Amplifiers for the National Ignition Facility. *Fusion Technology*, 1998, **34**:1105~1112
- 4 W. H. Lowdermilk. Status of the LMJ Project. *Proc. SPIE*, 1998, **3047**:38~42
- 5 J. P. Markiewicz, J. L. Emmett. Design of Flashlamp Driving Circuits. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1966, **QE-2**(11):707~711
- 6 H. T. Powell, A. C. Erlandson, K. S. Jancaitis *et al.*. UCRL-101431, DE90013482. 1990