

LD 侧面泵浦全固态激光器的热效应分析

徐金龙, 郭 军

(贵州大学 电子科学系, 贵阳 550025)

摘要:对不同情况下 LD 侧面泵浦全固态激光器的热效应进行了分析,建立了抽运光功率和温度分布的计算模型,用 C 语言和 MATLAB 编程的方法对所建立的模型进行计算机数值模拟,并对模拟的结果进行了讨论分析.

关键词:LD;侧面泵浦;全固态激光器;热效应;分析

中图分类号:TN211

文献标识码:A

文章编号:1671-0924(2007)07-0092-06

Thermal Effect Analysis on LD Side Pump Entire Solid State Laser

XU Jin-long, GUO Jun

(Department of Electronic Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: This paper carries out analysis on the thermal effect of LD side pump entire solid state laser with the computer simulation method under various conditions, establishes the pumping luminous power and the temperature distribution computation model, conducts computer value simulation for the established model with C language and the MATLAB programming, and discusses and analyzes the simulation results.

Key words: LD; side pump; entire solid state laser; thermal reaction; analysis

0 引言

激光二极管(LD)抽运的全固态激光器(DPSSL),因其具有高效率、长寿命、结构紧凑等优点,已经在激光器领域得到了广泛的应用.在端面抽运和侧面抽运2种方式中,端面抽运能够获得更高的效率和更好的模式^[1],但由于晶体尺寸所限,往往功率较低.要获得高能量激光输出,通常采用侧面抽运方式.当采用侧面抽运时,LD抽运

光和激光振荡模通常不能良好匹配,往往为多模输出.同时,抽运光分布的不均匀引起大的温度梯度和热畸变,将影响激光功率的进一步提升并导致输出光束质量的破坏.为了改善并提高激光器的性能,对热效应进行分析和研究是必要的.

1 抽运光功率分布的计算模型

泵浦头的结构示意图如图1所示,激光棒外面为冷却套,其间通水冷却,LD阵列均匀分布在

• 收稿日期:2007-04-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60666001).

作者简介:徐金龙(1981-),男,重庆大足人,硕士研究生,主要从事信息工程、光电子信息研究.

冷却套周围,LD 抽运光直接入射或用透镜系统聚焦。

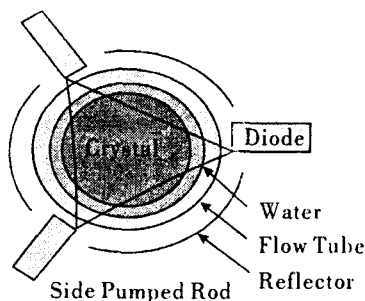


图1 侧面泵浦结构示意图

首先,对上述抽运模型进行简化.通常单条LD的发光区域大小为 $1\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ mm}$,发散角为 $10^\circ \times 40^\circ$.在平行于 $p-n$ 结方向,发光面较长,因此可把入射到激光棒上的抽运光看成是均匀分布的;在垂直于 $p-n$ 结方向,光束发散角较大,光强近似成角度高斯分布^[2].

设单条LD单位长度上发射的光功率为 P_0 ,将光束离散成多条光线.角度为 θ 的光线携带的功率为:

$$P(\theta) = A \exp(-\theta^2/\theta_{1/2}^2) \quad (1)$$

其中: A 为功率归一化系数, $\theta_{1/2}$ 是LD光束发散角半宽。

将激光棒表面抛光,镀808 nm增透膜,计算中不计冷却套和水对抽运光的反射和吸收损耗.考虑到吸收路径较长,只计激光棒对抽运光的单程吸收。

在棒横截面上建立直角坐标系,将截面离散化,分成长度为 $\delta = r_{\text{rod}}/N$ 的正方形小格,构造维数为 $2N \times 2N$ 的功率矩阵 P . r_{rod} 为激光棒的尺寸, $2N$ 为剖分的网格数,计算时可任意设定.网格剖分及局部示意图如图2所示。

利用光线追迹法追迹式(1)中每一条携带功率 $P(\theta)$ 的光线在冷却套、水和激光棒横截面中的轨迹.光线与棒截面边界交点为:起点 (x_s, y_s) 和终点 (x_e, y_e) .与 x 轴正方向夹角为 α ,以 x 轴为始边,光线为终边,逆时针旋转 α 为正,顺时针为负.于是光线方程为:

$$y - y_s = \tan \alpha (x - x_s) \quad (2)$$

根据式(2)和网格坐标范围可以求出该光线

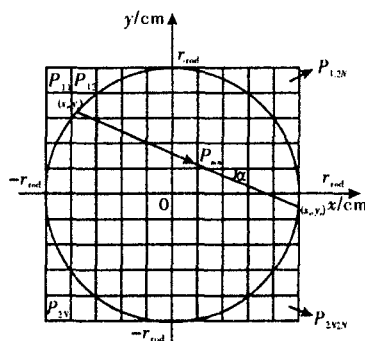
与正方形小格的交点: $(x_{mn1}, y_{mn1}), (x_{mn2}, y_{mn2})$.则光线在该正方形小格中的长度 d_{mn} 为:

$$d_{mn} = \sqrt{(x_{mn2} - x_{mn1})^2 + (y_{mn2} - y_{mn1})^2} \quad (3)$$

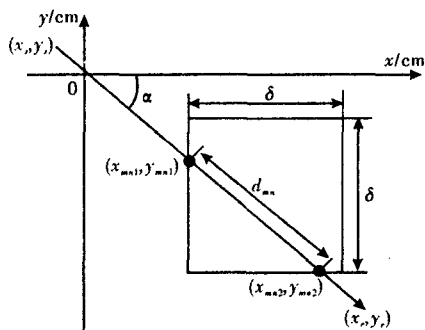
根据指数吸收方程,该正方形小格吸收的抽运光功率为:

$$P_{mn} = P_{mn_in} [1 - \exp(-a_0 d_{mn})] \quad (4)$$

其中: P_{mn_in} 是输入该单元格的抽运光功率; a_0 为激光介质的吸收系数,单位为 cm^{-1} .当LD阵列从多个方向抽运时,对入射的每一条光线,追迹计算每一格晶体对抽运光功率的吸收,所有叠加的结果就是激光棒对抽运光功率的吸收分布 P_{ij} ,将其归一化为 f_{ij} ,且 $f_{ij} = P_{ij} / \sum_{ij} P_{ij}$.



a) 横截面网格剖分示意图



b) 局部放大图

图2 激光棒分析图

2 温度分布计算模型

在连续抽运或高重复频率抽运时,脉冲间隔与热驰豫时间相比,短的可以忽略不计,激光工作介质很快建立起稳态工作条件,流出工作物质的总热量等于进入其内部的总热量.考虑到圆棒中工作物质的长度比其直径大许多,因此棒轴向温度变化较小,热流主要沿径向分布.稳态情况下的

热传导方程为^[3]:

$$\frac{\partial T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial T(x, y)}{\partial y^2} + \frac{Q(x, y)}{K(T)} = 0 \quad (5)$$

式中: $T(x, y)$ 是棒截面上点 (x, y) 处的温度; $K(T)$ 为工作物质的热传导率, 在 $300 \sim 400 \text{ K}$, 其变化量较小, 假设其不随温度变化, 为常量 $K^{[4]}$; $Q(x, y)$ 为激光介质单位体积发热耗散的功率。

根据强制冷却和自然对流冷却 2 种情况, 式(5)的边界条件可分为:

第一类边界条件: 强制冷却情况. 激光棒表面 ∂G 温度等于冷却水温度 T_c :

$$T(x, y) |_{(x, y) \in \partial G} = T_c \quad (6)$$

第三类边界条件: 自然对流冷却情况. 激光棒通水冷却, 根据牛顿传导定律, 在激光棒表面 ∂G 有:

$$-K \nabla T(x, y) \cdot \vec{n} = \lambda_w [T(x, y) - T_n(x, y)] \quad (7)$$

即

$$K \frac{\partial T_n(x, y)}{\partial n} + \lambda_w Q(x, y) = Q \lambda_w T_c \quad (8)$$

其中: $T_n(x, y)$ 为激光棒表面温度, λ_w 为棒与冷却液间的热传导系数, T_c 为冷却液温度, $\vec{n}$ 是表面 ∂G 的法线. 2 类边界条件可统一为:

$$\sigma K \frac{\partial T_n(x, y)}{\partial n} + \lambda_w T_n(x, y) = \begin{cases} \sigma = 0 & \text{第一类边界条件} \\ \sigma = 1 & \text{第三类边界条件} \end{cases} \quad (9)$$

在均匀抽运 ($Q(x, y) = Q$ 为常数) 时, 式(9)有解析解, 棒内的温度为:

$$T(r) = T(r_0) + \left(\frac{Q}{4K}\right)(r^2 - r_0^2) \quad (10)$$

其中 $T(r_0)$ 是棒表面的温度, 可以看出此时温度沿棒横截面成抛物线分布。

着重考虑抽运不均匀时激光棒横截面内的温度分布. 热源 Q 分布与激光棒吸收的归一化抽运光功率分布 f_{ij} 相同, 由式(11)和(12)可求得热源分布 Q :

$$P_{\text{heat}} = \iiint_V Q(x, y) dV \quad (11)$$

$$Q_{ij} = \frac{P_{\text{heat}}}{L \delta^2} f_{ij} \quad (12)$$

其中: L 为二极管抽运的激光棒有效长度; $P_{\text{heat}} = \eta P_{\text{pump}}$, P_{pump} 是激光二极管阵列堆的抽运总功率; η 是热产生效率, 大小约为 $0.32^{[5]}$.

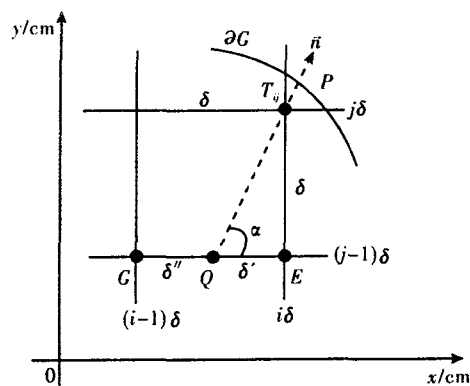


图3 有限差分法边界条件示意图

根据有限差分法, 对正则内点, 式(5)的差分方程为:

$$4T_{ij} - (T_{i-1,j} + T_{i+1,j} + T_{j+1,i}) = -\delta Q_{ij}/K \quad (13)$$

对非正则内点, 可借助边界条件建立差分方程. 比如当 $0 < i < j$ 时, 如图3所示: 过点 T_{ij} 作边界的法线 QP 交 GE 于 Q 点. 取 $\frac{\partial T_n}{\partial n} \Big|_G \approx \frac{1}{\sqrt{\delta^2 + \delta'^2}} (T_{ij} - T_Q)$. 利用线性插值得 $T_Q = (\delta' T_c + \delta' T_E)/\delta$, 又 $j/i = \delta/\delta'$, 带入式(9)得:

$$(jK\sigma + \lambda_w \delta \sqrt{i^2 + j^2}) T_{ij} - iK\sigma T_E = \lambda_w \delta T_c \sqrt{i^2 + j^2} \quad (14)$$

同理可以建立其它边界条件方程, 根据式(13)和边界条件式(14)就可求出激光棒横截面内的温度分布。

3 热传导系数 λ_w 的计算

热传导系数与冷却液特性、冷却套内外径、冷却液流量和系统结构等许多因素有关, 但相关论文很少提及计算. 环隙经验公式为^[6]:

对于 $Pr > 5$ 有:

$$Nu + 0.020 Re^{0.8} Pr^{1/3} (D_2/D_1)^{0.53} \quad (15)$$

对于 $0.7 < Pr < 5$ 有:

$$Nu + 0.014 2 Re^{0.8} Pr^{0.53} (D_2/D_1)^{0.53} \quad (16)$$

其中: D_1 , D_2 分别为激光介质的直径和冷却

套的内径. 当量直径 $D_e = D_2 - D_1$, 其中的 Nusselt 数和 Reynolds 数以及 Prandtl 数分别为:

$$Nu = \frac{\lambda_w D_e}{\lambda}, Re = \frac{10^3 D_e w \gamma}{z}, Pr = \frac{3.6 c_p z}{\lambda} \quad (17)$$

其中: c_p 为流体比热, z 为立体黏度, λ 为流体导热系数, γ 为流体密度, w 为流体速度, λ_w 为热传导系数. 根据式 (15) ~ (17) 可求得热传导系数 λ_w .

4 数值模拟及结果分析

用 C 语言和 MATLAB 混合编程对所建立的模型进行数值模拟. 当单个二极管抽运时, 考察不同吸收系数对抽运光功率和温度分布的影响 (激光晶体以 Nd:YAG 为例). 棒直径 6.35 mm, 冷却套内径 9 mm, 外径 11 mm, 光束发散角半宽 20 度, 棒有效抽运长度为 124 mm, Nd:YAG 导热系数为 $0.13 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$, 热传导系数为 $1 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$, 吸收系

数 a_0 分别取 2.78 cm^{-1} 和 9.1 cm^{-1} . 所得的计算结果如图 4 所示, 图中不同的颜色代表不同的吸收功率和温度值.

由图 4 可知, 单侧抽运时, 吸收系数越大, 棒所吸收的抽运光功率越集中在棒边缘, 而在形成激光振荡的棒中心, 分布的却很少, 这意味着大的吸收系数将导致抽运光功率分布更大的不均匀, 激光振荡模和增益分布严重失配. 从温度分布场可以看出, 高温区集中在抽运光抽运表面附近, 热流由高温区向外辐射, 吸收系数越高, 高温区越靠近棒表面, 热梯度、热畸变及由此产生的热效应越严重.

采用 5 个二极管阵列组件从 5 个方向抽运, Nd:YAG 0.6% 掺杂, 吸收系数 2.78 cm^{-1} , 热传导系数 $1 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$, 冷却水温 293 K, 发散角半宽 $\theta_{1/2}$ 取 20° . 抽运光功率分布、温度分布如图 5 所示. 把 $\theta_{1/2}$ 压缩到 5° , 二极管模块由 4 个相距 1 mm 的二极管条组成, 相应的分布图如图 6 所示.

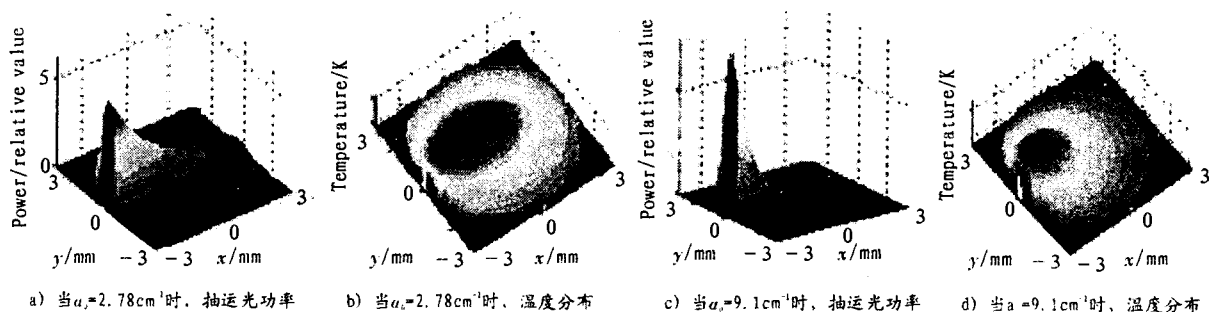


图 4 吸收系数不同时的抽运光功率、温度分布图

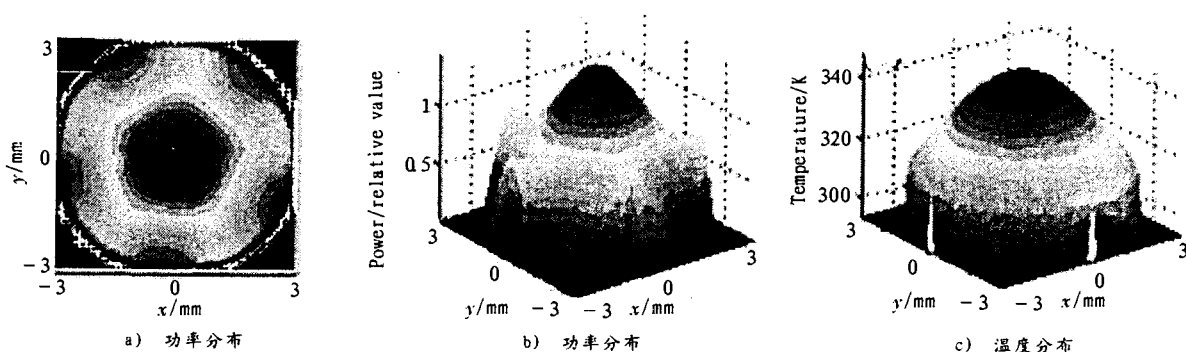


图 5 抽运光功率分布、温度分布图

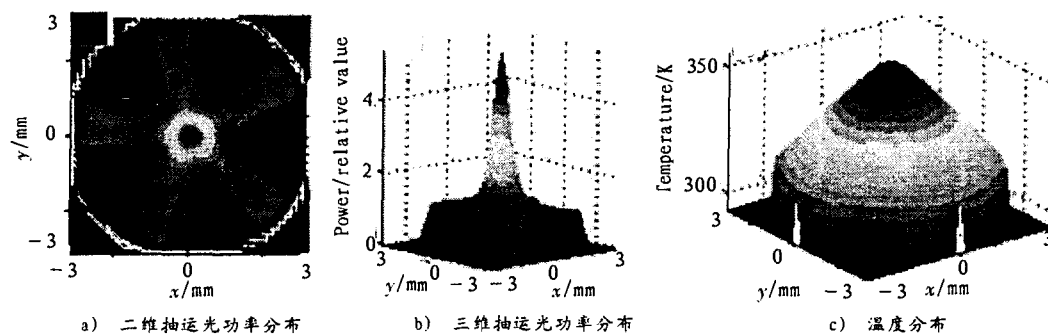


图6 抽运光功率温度分布图

可以看出,抽运光功率分布越来越轴对称,但激光棒所吸收的抽运功率仍分布不均,中间高,周围低,描述激光棒温度分布的式(10)已经不再适用.由于不同的横模占据着不同横截面区域,不均匀的抽运使每个横模的增益均不相同,激光振荡通常为多模,光束质量较差.在激光器设计中,应尽量减少振荡模数,增大基模体积,以增大泵浦模和激光振荡模的交叠,增大对抽运光的提取效率.把抽运光发散角压缩后,棒截面中心获得了更高更强的功率密度,有利于获得高的光束质量和基模输出功率.同时也应注意到,当抽运光被压缩后,横截面内的温度梯度变得更大,产生的热应力也更大.

另外,由图6可知,如果能够消除棒边缘的抽运光而保留棒中心一定面积的抽运光,可以极大地提高抽运光和激光振荡基模之间的交叠效率,提高光束质量和低阶模的光功率.即采用复合棒,只在激光基质材料的中心掺杂激活离子,周围不掺杂,从而消除了棒周围的抽运光.同时,在棒的两端也可不掺杂激活离子,一方面减小棒表面的热畸变和应力,另一方面解决好热控制问题.因为激光棒的两端用O型密封圈密封,覆盖了一定的体积,循环水不能充分冷却棒末端,如果不掺杂,则棒末端不吸收能量,不会发热.这2种方法不仅提高了棒的热导率,而且改善了光束质量,提高了输出功率.

图7是激光棒在强制冷却(热传导系数 λ_w 趋于无穷)时的温度分布,对比相同抽运结构下的计算结果,2种边界条件下的结果大不相同.当采用强制冷却时,棒表面温度等于冷却水温.自然冷却时,激光棒表面的温度比冷却水温要高,棒内的温

度也比强制冷却的高.因此有些文献中将激光棒表面的温度直接考虑成冷却水或者热沉温度是不妥的,实际上热传导系数 λ_w 不可能趋于无穷,因此棒表面温度比冷却水温要高.

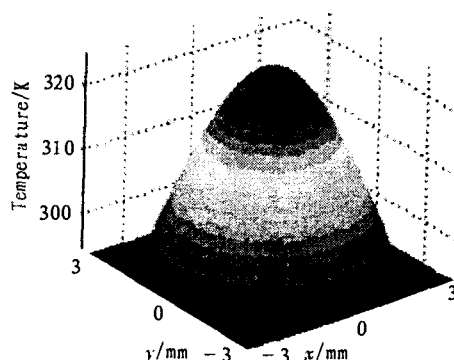


图7 强制冷却条件下的温度分布

一般而言,热传导系数越大,冷却效果越好.但是对于特定的冷却液来说,大的热传导系数意味着大的液体流速.大的液体流速,将产生一系列问题.比如增大制冷机负载,在冷却套中形成强烈的湍流,系统机械振动变强,抽运光在冷却液中损耗变大等不利因素.图8展示了在不同抽运功率下,棒横截面内的最大温度值随热传导系数 λ_w 的变化情况.结果表明温度随热传导系数的增大非线性地减小,当热传导系数增大到一定值时,温度变化很小,最终趋于恒定.因此没有必要一味的追求强的制冷,对一定的抽运功率,应通过实验选定一个最佳的冷却液流速和冷却水温.

5 结束语

本文中用计算机模拟的方法对不同情况下LD侧面泵浦全固体激光器的热效应进行分析,可

以看出;多组 LD 等间距环绕激光晶体周围侧面泵浦,激光晶体吸收的抽运光功率集中在激光晶体的中心,发散角越小抽运光功率越集中;抽运光功率分布和温度分布是有密切关系的,抽运光功率集中的地方温度高;抽运功率与吸收系数也有关,吸收系数越高相应的抽运光功率就越高;热传导系数不能太大,大了将会产生一系列的不利因素。

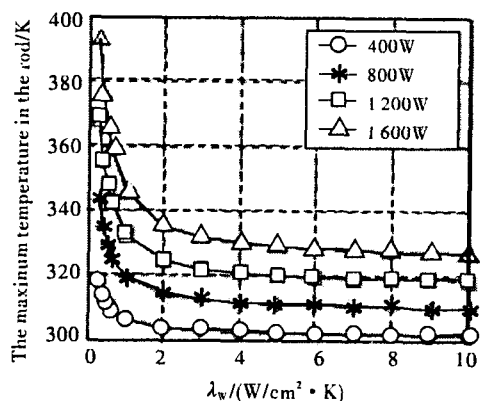


图8 棒横截面内最高温度在不同抽运功率下随热传导系数的变化曲线

参考文献:

- [1] ZHENG Yi, GAO Ming-yi, YAO Jian-quan. Study on thermal effect of anisotropic laser medium by LD end-pumped [J]. Journal of Optoelectronics' Laser, 2003, 14 (10): 1094 - 1098.
- [2] Mao Shaoqing, Huang Tao, Wen Zhongyi, et al. Calculation and analyze homogeneity of diode side pumped solid laser [J]. Laser Technology, 1997, 21 (3): 185 - 188.
- [3] Koechner W. Solid laser engineering [M]. New York: [s. n.], 1999.
- [4] Wenjie Xie, Siu-Chung Tam, Hongru Yang, et al. Heat transfer for diode side-pumped YAG slabs [J]. Optics & Laser Technology, 1999, 31: 521 - 528.
- [5] Fan T Y. Heat Generation in Nd:YAG and Yb:YAG [J]. IEEE of Quantum Electronics, 1993, 29 (6): 1457 - 1459.
- [6] 化学工程手册编委会. 化学工程手册 [K]. 北京: 化学工业出版社, 1986.

(责任编辑 陈松)

(上接第 78 页)

- [5] Tsen H Y, Lin C K, Chi W R. Development and use of 16SrRNA gene targeted PCR primers for the identification of Escherichia coli cells in water [J]. Appl. Microbiol, 1998, 85: 554 - 560.
- [6] Sanguineth C J, Dias N E, Simpson A J. Rapid silver staining and recovery of PCR products separated on polyacrylamide gels [J]. Biotechniques, 1994, 17(5): 914 - 921.
- [7] 姜静. 分子生物实验原理与技术 [M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2003: 109 - 118.
- [8] Vallaey T, Topp E, Muyzer G, et al. Evaluation of denaturing gradient gel electrophoresis in the detection of

16SrDNA sequence variation in rhizobia and methanotrophs [J]. FEMS Microbiology Ecology, 1997, 24: 279 - 285.

- [9] Muyzer G, Waal E C, Uitterlinden A G. Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction amplified genes encoding for 16SrRNA [J]. Appl. Environ. Microbiol, 1993, 59: 695 - 701.
- [10] Tsen H Y, Lin C K, Chi W R. Development and use of 16SrRNA gene targeted PCR primers for the identification of Escherichia coli cells in water [J]. Appl. Microbiol, 1998, 85: 554 - 560.

(责任编辑 刘舸)