

文章编号: 1001-3806(2006)06-0653-04

WDM 光网络中 OXC 结构对带内串扰积累的影响

管爱红, 孙军强*

(华中科技大学 光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 串扰是波分复用(WDM)光网络中光交叉连接(OXC)投入实用的最大障碍。理论分析了基于扩展 Benes(DB)结构和改进扩展 Benes(GMDB)结构的 3 种典型 OXC 节点结构中的带内串扰, 并数值模拟了基于两种结构的 OXC 节点中带内串扰的积累特性。结果表明, 基于 DB 结构和 GMDB 结构的 OXC 节点可以完全消除低于二阶的各类串扰。发现基于 GMDB 结构的 OXC 节点能大大减少带内串扰的积累, 与基于 DB 结构的 OXC 节点相比, 基于 GMDB 结构的 OXC 节点对光开关串扰系数的要求放宽了 5dB, 说明 OXC 节点结构的选择对消除串扰尤为重要。

关键词: 光通信; 光交叉连接; 带内串扰; 功率代价

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A

Impact of OXC architecture on the accumulation of intraband crosstalk in WDM optical networks

GUAN Ai-hong, SUN Jun-qiang

(National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract Optical crosstalk imposes a major limit on the practical implementation of optical cross connects (OXCs). Intraband crosstalk characteristics of three typical OXC nodes based on dilated Benes (DB) network and generally modified dilated Benes (GMDB) network are studied. Results show that OXC composed by DB and GMDB network can remove the first order crosstalk successfully. At the same time, the power penalty induced by intraband crosstalk is studied through numerical simulation. Compared with DB network, GMDB network can eliminate crosstalk effectively. The crosstalk level of optical devices required in GMDB network is about 5dB lower than that in DB network to keep the power penalty below 1dB at the bit error rate of 10^{-9} , which indicates that the OXC structure plays an important role in eliminating optical crosstalk.

Key words optical communication; optical cross connects; intraband crosstalk; power penalty

引 言

光交叉连接(optical cross connect, OXC)节点是组建波分复用(wave length division multiplexing, WDM)光网络的基本单元, 目前已成为一个研究的热点。由于组成 OXC 节点器件的非理想性, 使得输入信号的一部分功率泄漏到其它本不应该去的信道中, 从而引起串扰^[1~4]。串扰可分为线性串扰和非线性串扰, 由于 OXC 节点中引起非线性串扰的几率很小, 在此仅考虑线性串扰。线性串扰又分为带间串扰和带内串扰, 带间串扰指串扰信号的频率落在主信号频带外, 这种串扰可以用滤波器滤出, 对信号的影响不大; 带内串扰指串扰信号的频率落在主信号的频带内, 这种串扰用滤波器无法滤出, 会在网络中大量的积累, 严重影响网络的扩展性能, 所以消除带内串扰尤为重要。

在大多数分析 OXC 节点串扰的文献中^[5~7], 都没有具体给定光开关矩阵的结构, 而且仅仅考虑了光开关引起的一阶串扰, 随着 OXC 节点规模的扩大, 光开关引起的串扰增加, 光开关矩阵引起的高阶串扰也不能忽略, 所以这些分析都是不充分的。作者分析了基于扩展 Benes (dilated Benes, DB)结构^[8]和改进扩展 Benes (generally modified dilated Benes, GMDB)结构^[9]的 OXC 节点中的各阶串扰, 在此基础上对由多个节点组成的系统中串扰引起的串扰功率代价进行了数值模拟, 比较了两种结构中带内串扰的积累特性, 同时比较了基于 DB 结构和 GMDB 结构的 OXC 节点对单个器件串扰系数的要求, 得出了一些有益的结论, 对 OXC 节点的实用化有一定的指导意义。

1 典型的 OXC 节点拓扑结构

图 1~图 3 中给出了 3 种典型的 OXC 节点拓扑结构, OXC 节点由解复用器 (demultiplexer, DMUX)、复用器 (multiplexer, MUX)、光开关矩阵 (switches matrix, SW) 组成, 每一根连到 DMUX 的光纤复用 N_λ 个波长,

作者简介: 管爱红 (1973-), 女, 博士研究生, 主要从事全光网中波长转换, OXC 节点内串扰等方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jqsumail@hust.edu.cn

收稿日期: 2005-09-13; 收到修改稿日期: 2006-02-28

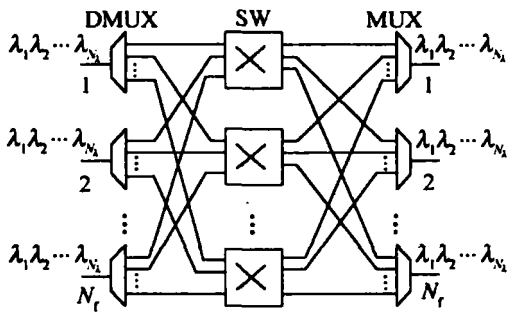


Fig. 1 OXC₁ node topology with N_f input fibers, each carrying N_λ wave-lengths

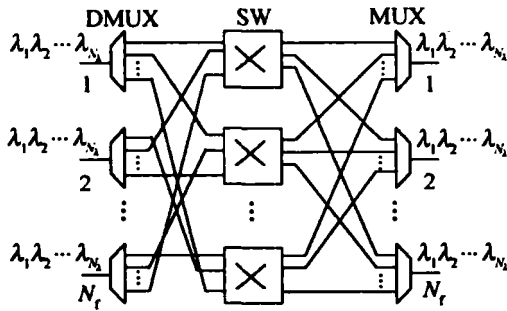


Fig. 2 OXC₂ node topology with N_f input fibers, each carrying N_λ wave-lengths

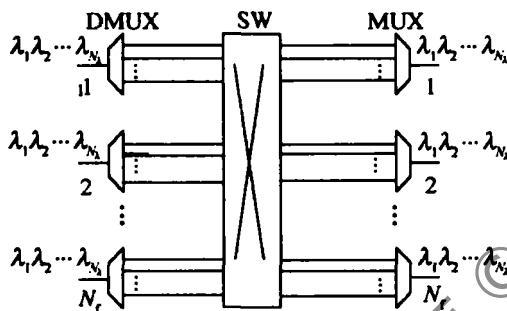


Fig. 3 OXC₃ node topology with N_f input fibers, each carrying N_λ wave-lengths

由 DMUX 解复用至 N_λ 个光纤输出, 经 SW 交换之后由 MUX 和其它 $N_\lambda - 1$ 个波长复合之后输出, N_f 表示连接到节点的光纤链路数, N_λ 表示每根光纤复用的波长数。结构 1 中相同的波长由同一个光开关矩阵实现交换, 由于光开关的非理想耦合, 将引起较大的带内串扰; 结构 2 中当 $N_f \leq N_\lambda$ 时, 每个光开关矩阵交换不同的波长, 这时光开关矩阵不引起带内串扰; 当 $N_f > N_\lambda$ 时至少有一个相同波长的信号在同一个光开关矩阵中进行交换。结构 3 只用一个 $(N_f N_\lambda \times N_f N_\lambda)$ 的光开关矩阵完成信道之间的交换。3 种结构相比, 结构 1 将引起较大的带内串扰, 结构 2 引起的带内串扰最小, 但控制算法相对复杂, 结构 3 不具有模块性。

2 节点的串扰分析

输入信号的一部分功率泄漏到其它本不应该去的信道中引起串扰, 信号经过一次泄漏形成一阶串扰; 经过两次泄漏形成二阶串扰; 经过三次泄漏形成三阶串扰, 在分析中忽略更高阶串扰的影响。一个 OXC 节点

可能有 3 处会引发串扰: (1) DMUX 的非理想性, 输入光纤的 N_λ 个波长经过 DMUX 后, 每个波长都不可避免的携带其它 $N_\lambda - 1$ 个波长的信号; (2) 在光开关矩阵中, 不同的矩阵结构将引发不同程度的串扰; (3) MUX 的非理想性, N_λ 个波长复用, DMUX 引起的带内串扰变成二阶带内串扰。对于给定的解复用器和复用器, 二者引起的串扰是固定的, 而且随着光隔离度的提高, 引起的串扰越来越小。但不同的光开关矩阵结构将引起不同的串扰, 作者考虑由 DB 结构、GMDB 结构实现的光开关矩阵。

2.1 开关矩阵由 DB 结构实现

DB 结构是基于 Benes 结构为降低串扰而提出的, 经过 $N \times N$ (N 为节点数) 的 DB 结构信号受到的串扰为^[8]:

$$P_{\text{noise}} = X_{\text{SW}}^2 \sum_{i=1}^{2k-1} i \cdot P = k(2k-1) X_{\text{SW}}^2 \cdot P \quad (1)$$

X_{SW} 为光开关的功率串扰系数, P 为输入光功率 (假设 N 路信号幅度相同), $k = \lg_2 N$ 。

考虑第 1 条输入光纤中信道 λ_1 受到的串扰。结构 1 中, λ_1 经过 DMUX 泄漏到其它波长的部分只有在 MUX 复用时才与信号相遇, 所以只有两者都有泄漏时才引起带内串扰, 考虑三阶以下的串扰, OXC 节点的串扰系数为:

$$C_{\text{node}} = k(2k-1) X_{\text{SW}}^2 + (N_\lambda - 1) X_{\text{MUX}} X_{\text{MUX}} \quad (2)$$

式中, $k = \lg_2 N_f$, X_{MUX} , X_{DMUX} 分别为 MUX, DMUX 的功率串扰系数。

对于结构 2 当 $N_f \leq N_\lambda$ 时, 每个 DB 结构交换不同的波长, 所以 DB 结构本身不引起带内串扰, 节点串扰系数为:

$$C_{\text{node}} = k(2k-1) X_{\text{MUX}} X_{\text{SW}}^2 + k(2k-1) X_{\text{MUX}} X_{\text{SW}}^2 + (N_\lambda - 1) X_{\text{DMUX}} X_{\text{MUX}} \quad (3)$$

当 $N_f > N_\lambda$ 时, 定义 $m = \text{int}(N_f / N_\lambda)$, 通过合理的安排, 每个 DB 结构中至多有 m 个相同的波长进行交换, 当交换的矩阵足够大时, 任意端口对串扰的贡献可近似为: $l_1 = \frac{k(2k-1)}{N_f - 1}$, 通过分析, 节点的串扰系数为:

$$C_{\text{node}} = (m-1) l_1 X_{\text{SW}}^2 + (N_f - m) l_1 X_{\text{SW}}^2 X_{\text{DMUX}} + (N_f - m) l_1 X_{\text{SW}}^2 X_{\text{MUX}} + (N_\lambda - 1) X_{\text{DMUX}} X_{\text{MUX}} \quad (4)$$

结构 3 中, 光开关矩阵由一个 $(N_f \cdot N_\lambda) \times (N_f \cdot N_\lambda)$ 的 DB 结构组成, 同结构 2 的分析, 节点的串扰系数:

$$C_{\text{node}} = l_1' (N_f - 1) X_{\text{SW}}^2 + (N_\lambda - 1) X_{\text{MUX}} X_{\text{DMUX}} + l_1' N_f (N_\lambda - 1) X_{\text{SW}}^2 X_{\text{MUX}} + l_1' N_f (N_\lambda - 1) X_{\text{SW}}^2 X_{\text{DMUX}} \quad (5)$$

式中, $k' = \lg_2 (N_f \cdot N_\lambda)$, $l_1' = \left[\frac{k'(2k'-1)}{N_f \cdot N_\lambda - 1} \right]$ 。

2.2 光开关矩阵由 GMDB 结构实现

为进一步减少串扰提出了 GMDB 结构^[9], 经过 $N \times N$ 的 GMDB 结构信号受到的串扰为:

$$P_{noise} = X_{SW}^2 (k - 1)P \quad (6)$$

重复以上的分析, 3 种 OXC 节点的串扰系数分别为:

$$C_{node} = X_{SW}^2 (k - 1) + (N_{\lambda} - 1) X_{MUX} X_{DMUX} \quad (7)$$

$$C_{node} = (k - 1) X_{MUX} X_{SW}^2 + (k - 1) X_{DMUX} X_{SW}^2 + (N_{\lambda} - 1) X_{MUX} X_{DMUX} \quad (8)$$

$$C_{node} = l_2 N_{\lambda} X_{MUX} X_{SW}^2 + l_2 N_{\lambda} X_{DMUX} X_{SW}^2 + (N_{\lambda} - 1) X_{MUX} X_{DMUX} + l_2 (N_f - N_{\lambda} - 1) X_{SW}^2 \quad (9)$$

$$C_{node} = l_2' (N_f - 1) X_{SW}^2 + l_2' N_f (N_{\lambda} - 1) X_{SW}^2 X_{MUX} + l_2' N_f (N_{\lambda} - 1) X_{SW}^2 X_{DMUX} + (N_{\lambda} - 1) X_{MUX} X_{DMUX} \quad (10)$$

式中, $k = \log_2 N_{\lambda}$, $k' = \log_2 (N_f \cdot N_{\lambda})$, $l_2 = \frac{k-1}{N_f-1}$, $l_2' = \frac{k'-1}{N_f \cdot N_{\lambda} - 1}$ (7) 式和 (10) 式分别为结构 1 和结构 3 的节点串扰系数, (8) 式和 (9) 式分别为结构 2 在 $N_f \leq N_{\lambda}$ 和 $N_f > N_{\lambda}$ 时的节点串扰系数。

3 串扰的数值模拟

由于大多数系统都采用固定判决电平, 所以这里只讨论这种情况。参照文献 [10] 中 (7) 式, 功率代价 (单价为 dB) 为:

$$X = 10 \log \left\{ \frac{i_p}{i_0} \right\} = 10 \log(Q' / Q) -$$

$$5 \log[1 - 4Q'^2 \sigma_{RN}^2] \approx -5 \log[1 - 4Q^2 \sigma_{RN}^2] \quad (11)$$

式中, i_p 表示有串扰时“1”码对应的光电流, i_0 表示没有串扰时“1”码对应的光电流, Q 和 Q' 是计算功率代价时, 为了表达方便经常使用的两个量, 二者由误码率条件唯一确定, 当误码率为 10^{-9} 时, $Q = 6Q' = 5.9$, σ_{RN}^2 为归一化的串扰功率。一路光信号从发射端到接受端中间要经过多个 OXC 节点, 光信号经过的 OXC 节点的个数称为节点数, 能串联的 OXC 节点数是衡量 DWDM 网络扩展性的主要指标之一, 当多个节点串联时带内串扰发生积累, 经过 N_n 个节点之后, 总串扰系数为:

$$C_{total} = N_n C_{node} \quad (12)$$

图 4 图 5 和图 6 分别为不同 N_f, N_{λ} 情况下 3 种 OXC 节点中串扰引起功率代价和串节点数的关系。由图 4 可见, 对于给定的 OXC 节点规模和串联的节点数, 无论 N_f, N_{λ} 取值如何, 采用 GMDB 结构都将大大降低串扰引起的功率代价。由图 5 可见, 对于 $N_f = 32, N_{\lambda} = 8$ 采用 GMDB 结构将有效降低功率代价, 而对于 $N_f = 16, N_{\lambda} = 16$ 和 $N_f = 8, N_{\lambda} = 32$ 采用 GMDB 结构与 DB 结构相比功率代价没有明显变化, 这主要是因为 $N_f \leq N_{\lambda}$ 时, 结构 2 中光开关矩阵交换不同的波长, 不引起的带内串扰, 采用 GMDB 结构的作用主要是降低光开关矩阵引入的带内串扰, 所以采用两种结构的光开关矩阵功率代价没有明显变化。图 6 所示为结构 3 中串扰引起的功率代价和串节点数的关系, 由图可

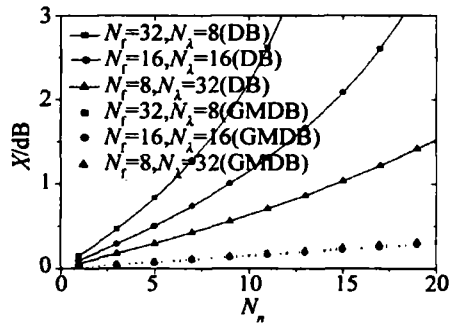


Fig. 4 System penalty versus node number N_n in OXC₁ with $X_{DMUX} = X_{MUX} = -30\text{dB}$, $X_{SW} = -25\text{dB}$

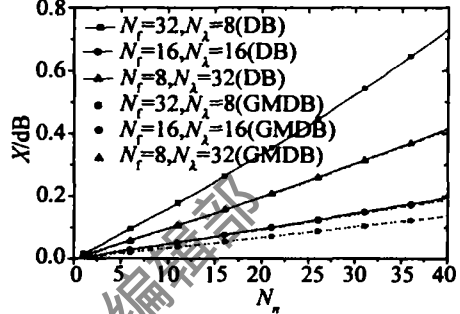


Fig. 5 System penalty versus node number N_n in OXC₂ with $X_{DMUX} = X_{MUX} = -30\text{dB}$, $X_{SW} = -25\text{dB}$

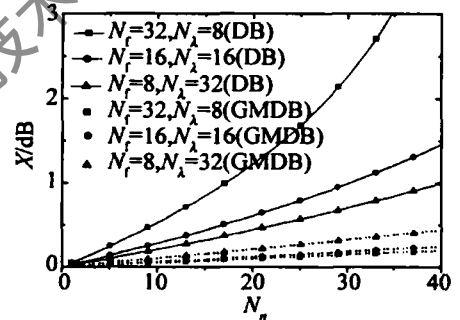


Fig. 6 System penalty versus node number N_n in OXC₃ with $X_{DMUX} = X_{MUX} = -30\text{dB}$, $X_{SW} = -25\text{dB}$

见, 无论 N_f, N_{λ} 取值如何, 采用 GMDB 结构都将大大地降低功率代价, 所以 3 种结构中 (结构 2 中 $N_f > N_{\lambda}$ 时), 采用 GMDB 结构时系统的功率代价远远小于采用 DB 结构时的功率代价, 这证明光开关矩阵采用 GMDB 结构时, 能有效减少串扰的积累, 特别是对于结构 1 和结构 3 采用 GMDB 结构对于串扰的抑制效果更为显著。

图 7 中比较了结构 1 中采用 DB 结构和 GMDB

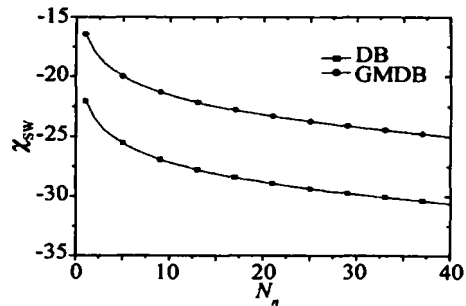


Fig 7 Calculation X_{SW} versus node number N_n in OXC₁ with $X = 1\text{dB}$, $N_f = 64, N_{\lambda} = 16$, $X_{DMUX} = X_{MUX} = -30\text{dB}$

结构。在功率代价不超过 1dB 的情况下,对光开关串扰系数的要求与串节点数的关系,从图中可以看出,GMDB结构对光开关串扰系数的要求相对于 DB 结构放宽大约 5dB。

4 结 论

理论分析了基于扩展 Benes结构和各级改进扩展 Benes结构的 3种典型 OXC 节点中的带内串扰,给出了 3种 OXC 节点串扰系数的理论表达式,结果表明,基于两种结构的 OXC 节点可以完全消除低于二阶的各类串扰。并数值模拟了基于 DB 和 GMDB 结构的 OXC 节点中带内串扰的积累特性,给出了串扰引入的功率代价随串节点的节点数的变化情况,发现采用 GMDB 结构时系统的功率代价远远小于采用 DB 结构时的功率代价,所以基于 GMDB 结构的 OXC 节点能大大降低串扰,用它来组建 DWDM 网络具有很好的扩展性。同时与基于 DB 结构的 OXC 节点相比,基于 GMDB 结构的 OXC 节点对光开关串扰系数的要求放宽了大约 5dB,这大大降低了对光开关隔离度的要求,说明在器件性能有限的基础上,可以通过设计适当的 OXC 结构来减小串扰的影响。

参 考 文 献

- (上接第 642页)
- [1] CHAIT Y, CHENG T H, YE Y B *et al* Inband crosstalk analysis of optical cross connect architectures [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology 2005, 23 (2): 688~ 701
 - [2] GYSELINGS T, MORTIER G, BAETS R. Crosstalk analysis of multi wavelength optical cross connects [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology 1999, 17 (8): 1273~ 1283
 - [3] GILLNER L, LARSEN C P, GUSTAVSSON M. Scalability of optical multiwavelength switching networks crosstalk analysis [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1999, 17 (1): 58~ 67
 - [4] MAO Q Y, HU Zh H, WANG T *et al* Scalable optical switch array based on semiconductor optical amplifier [J]. Laser Technology 2003, 27 (4): 288~ 292 (in Chinese).
 - [5] SHEN Y F, LIU K J, GU W Y. Coherent and incoherent crosstalk in WDM optical networks [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology 1999, 17 (5): 759~ 764.
 - [6] CHENG Zh J, YU Ch X. Intraband crosstalk in WDM network [J]. Acta Photonica Sinica 2001, 30 (1): 21~ 25 (in Chinese).
 - [7] ZHOU J Y, CADEDDU R, EMILLO C *et al* Crosstalk in multiwavelength optical cross connect networks [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology 1996, 14 (6): 1423~ 1435
 - [8] PADMANABHAN K, NETRIVALIA N. Dilated network for photonic switching [J]. IEEE Transactions on Communications 1987, 35 (12): 1357~ 1365
 - [9] WOJCIECH K. Modified dilated benes networks for photonic switching [J]. IEEE Transactions on Communications 1999, 47 (8): 1253~ 1259
 - [10] TAKAHASHI H, ODA K, TOBA H. Impact of crosstalk in arrayed-waveguide multiplexer on $N \times N$ optical interconnection [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1996, 14 (6): 1097~ 1105
 - [13] ZHANG Ch M, WANG J, DU L Zh. Blue light source in phototherapy [J]. Journal of Zhejiang University (Medical Sciences), 2002, 31 (3): 222~ 224 (in Chinese)
 - [14] SCHLAGER K J. Immunophototherapy for the treatment of cancer of the larynx [J]. SPIE, 1993, 1891: 148~ 159.
 - [15] XU Ch Sh, LEUNG W N. Study of hypericin mediated photodynamic therapy on human nasopharyngeal carcinoma cell [J]. Laser Technology, 2005, 29 (4): 395~ 397 (in Chinese).
 - [16] MESFER E, SPIRY T, SZENDE B *et al* Effect of laser rays on wound healing [J]. The American Journal of Surgery, 1971, 22 (8): 532~ 535
 - [17] SCHMIDT M H, BAJIC D M, REICHERT K W *et al* Light emitting diodes as a light source for intraoperative photodynamic therapy [J]. Neurosurgery, 1996, 38 (3): 552~ 556.
 - [18] FRANKA S, STEPHEN H A, KLAUS D *et al* Light emitting diode (LED) polymerisation of dental composites flexural properties and polymerisation potential [J]. Biomaterials 2000, 21 (5): 1379~ 1385
 - [19] PERRICONE N V. Skin treatments using blue and violet light [P]. U S Patent 20030009158A1, 2003-07-22.
 - [20] ELLA S. System and method for facial treatment [P]. U S Patent 20030032900A1, 2003-02-02
 - [21] ROBERT A W, DAVID H M, ROY G G *et al* Clinical trial of novel non-thermal LED array for reversal of photoaging: clinical histologic and surface profilometric results [J]. Lasers in Surgery and Medicine 2005, 36 (7): 85~ 91.
 - [22] STREETER J. Low level light therapy for the treatment of myocardial infarction [P]. U S Patent 20030212442A1, 2003-05-23.
 - [23] STREETER J. Low level light therapy for the treatment of stroke [P]. U S Patent 20030109906A1, 2003-03-11.
 - [24] SCHLAGER K J, LGNATUS R W. An LED- array light source for medical therapy [J]. SPIE, 1994, 2131: 341~ 353
 - [25] LIU J, LIU T C Y. The applications and prospects of light emitting diodes in biology and medicine [J]. Laser Journal 2002, 23 (6): 1~ 4 (in Chinese).
 - [26] LIU J, LIU T C Y, FAN G H. The light emitting diode (LED) instrument of low intensity irradiation of cellor tissue culture [J]. Laser Journal 2003, 24 (4): 78~ 80 (in Chinese).
 - [27] LIU J, FAN G H, LIU T C Y *et al* The light emitting diode (LED) instrument of high intensity irradiation of cellor tissue culture [J]. Acta Laser Biology Sinica 2003, 12 (4): 308~ 314 (in Chinese).