

文章编号: 1001-3806(2011)06-0820-04

自组装方法制作微角反射器的有限元分析

周燕¹, 王海龙^{1*}, 马传贺¹, 邵凤兰²

(1. 曲阜师范大学 物理工程学院, 曲阜 273165; 2. 济宁学院 物理系, 曲阜 273155)

摘要: 为了研究微光机电系统的元器件——微角反射器的制作理论和过程, 采用自组装方法设计制作角反射器, 通过光刻和选择性蚀刻确定角反射器图案, 当把牺牲层腐蚀掉后, 由晶格失配双层结构形成的铰链在应力驱动下带动镜面发生旋转并最终达到平衡位置, 从而完成自组装制作过程。采用适于求解弹性应力几何非线性问题的有限元方法进行了计算分析, 并仿真得到不同角度的微反射镜和微立方箱。通过分别调整镜面和铰链尺寸、应变双层厚度和上盖层厚度, 仿真分析了镜面的线度、角度和平整度对旋转角度的影响。结果表明, 自组装方法是制作微光机电系统中3维微/纳米元器件的一种非常有效的方法, 具有很好的发展前景。

关键词: 光学器件; 自组装方法; 微光机电系统; 角反射器; 有限元法

中图分类号: TN409 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.06.026

Finite element analysis of self-assembled MOEMS corner-cube reflectors

ZHOU Yan¹, WANG Hai-long¹, MA Chuan-he¹, SHAO Feng-lan²

(1. College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China; 2. Department of Physics, Jining University, Qufu 273155, China)

Abstract: In order to study the fabricating process and the theory of the micro opto-electronic mechanical system (MOEMS) corner-cube reflector (CCR), the self-assembly method was used. The principle of self-assembly method fabricating MOEMS CCR was introduced. First, the shape of hinge can be patterned by lithography and the region of CCR plane was selectively etched. Secondly, using selective etching solutions, the sacrificial layer was exposed. Thirdly, after the sacrificial layer was etched, the CCR was self-assembled through the hinge drive the mirror bending up under the driven stress until reach an equilibrium position, which the driven stress was created by the lattice mismatch between the bilayer. Because finite element method was suitable to solve the nonlinear problems of elastic stress, it was applied to analysis and models the CCR, mirrors with different angles and a micro-cube box were also successfully simulated. Furthermore, by adjusting the size of mirror and hinge, the thickness of the strain bilayer and the top layer, which affect the rotation angle of the mirror, simulation analysis was carried out. It was shown that the self-assembly method was one of very feasible method for fabricating 3-D micro/nano structures and had a good prospect of application.

Key words: optical devices; self-assembly; micro opto-electronic mechanical system; corner-cube reflector; finite element method

引言

微光机电系统 (micro opto-electronic mechanical system, MOEMS) 是由机械、电子、光学及其它一些功能元件采用微小型加工技术^[1]集成的微型智能系统, 是近年来跨学科科学研究的前沿技术, 在许多领域具有巨大的应用潜力^[2,4]。利用精细加工手段加工微/纳米结构和系统的微细加工技术是微光机电系统的基础, 但一直以来制作3维微光机电系统元器件是一项十分复杂的工作。

最近, PRINZ 等人提出自组装3维微/纳米结构的制作方法: 利用晶格失配的外延双层间产生的应力驱动进行自组装制作3维微结构^[5-7]。此方法制作的3维结构是在生成2维薄膜结构的基础上采用自组装方法, 通过晶格失配的外延双层制成的铰链带动镜面旋转最终达到平衡位置的自定位过程得到的。

目前也存在着其它制作微光机电系统元器件的工艺^[8-10], 例如应用静电力的多用户微光机电系统工艺制作方法^[9], 在静电力的作用下将镜面从起始位置准确吸引到预先设定的目标位置, 但是这种方法一旦静电力消除, 来自多晶硅弯曲梁或横梁的返回力就会将镜面带回起始位置的位置; 对于采用绝缘衬底上的硅工艺手工辅助组装器件的方法^[10], 镜面的角度准确性及稳定性较好, 但需要采用人工组装操作; 另外还有在

作者简介: 周燕 (1985-), 女, 硕士研究生, 现主要从事光通信技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: hlwang@mail.qfnu.edu.cn

收稿日期: 2011-01-24; 收到修改稿日期: 2011-03-16

绝缘衬底上的硅材料上利用光刻胶衬垫的表面张力来驱动自组装制成微角反射器 (corner-cube reflector, CCR) 的方法^[11], 这种方法与这里采用的利用晶格失配双层间的内部应力的自组装方法类似。但是, 这些制作还需要利用翻转锁或者支撑结构来固定已经旋转到位的镜面。本文中采用的利用晶格失配产生驱动应力的自组装方法来制作微角反射器的方法, 整个过程不需要人为辅助组装, 并且只要调整镜面晶格失配外延双层材料的厚度以及铰链的长度即可改变铰链旋转角度, 在应力释放完全后已经发生的旋转变形不会被改变, 不需要支撑和锁定结构即可固定在确定的位置。

当前在弹性力学问题中使用比较普遍的数值计算方法有: 有限差分法、有限元法和边界单元法。有限差分法是将求解域划分为差分网格, 用有限个网格节点代替连续的求解域。其理论成熟, 简便易行, 比较适用于求解2维几何问题或平面问题。但对于曲线边界或斜边界等产生的不等间距网格的处理比较麻烦, 并且易于出错。边界单元法只需要对边界离散, 可以使问题的维数降低1维, 但边界单元法形成的线性方程组的系数矩阵是满阵, 一般不能保证正定对称性, 所以在处理大规模问题时解题的规模受到限制; 与以上两种方法相比, 有限元法适应复杂的几何形状和边界条件, 适于求解非线性、非均匀问题, 有界区域无奇异性问题, 对于狭长区域, 有限元的精度高于其它两种方法, 所以, 本文中选用了有限元法对弹性应力几何非线性问题。

本文中研究了利用自组装方法制作微光机电系统元器件——微角反射器的过程和原理, 并采用有限元法对其进行仿真分析。最后在选用材料一定的情况下, 通过调整影响镜面旋转角度的参量, 成功仿真了不同角度的微反射镜和微立方箱, 表明了利用晶格失配应力自组装方法制作微光机电系统元器件是非常有效的制作方法之一。

1 微角反射器的自组装原理和制作方法

计算模拟中使用的微角反射器材料结构如图1所示。对于材料结构的生长可以采用分子束外延在GaAs基底上生长, 依次分别为GaAs缓冲层, Al_{0.58}Ga_{0.42}As/AlAs合金牺牲层, In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs应变双层结构, Al_{0.58}Ga_{0.42}As腐蚀阻挡层, GaAs/In_{0.22}/Ga_{0.78}As应变补偿层, 最后是GaAs上盖层。其中GaAs/In_{0.22}Ga_{0.78}As应变补偿层被用来平衡应变双层结构晶格失配产生的内部应力, 从而使镜面部分从基底上脱离以后能够保持平坦, 而不与铰链区同时发生弯曲^[12]。

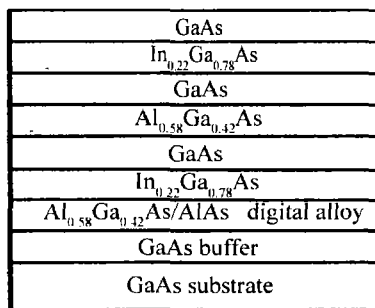


Fig. 1 Material structure of MOEMS corner-cube reflector (CCR)

图2a为材料结构的横截面。材料结构生长完成后, 首先根据预先设计好的铰链尺寸, 确定铰链区的形状和位置, 并利用光刻技术和湿法腐蚀将材料腐蚀到In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs应变双层(见图2b); 接下来是确定镜面图案和位置, 如图2c所示, 镜面形状通过另一次的光刻和湿法腐蚀定义, 这个过程中沿镜面区域边缘的材料将被一直腐蚀到基底, 直至把牺牲层的边缘暴露出来; 最后, 使用腐蚀溶液对铰链和镜面部分的牺牲层进行选择性的蚀刻。在腐蚀牺牲层的同时, 铰链区由于存在晶格失配的内应力效应, 将带动镜面发生自动旋转并最终定位于曲率半径为ρ的平衡位置(见图2d)。

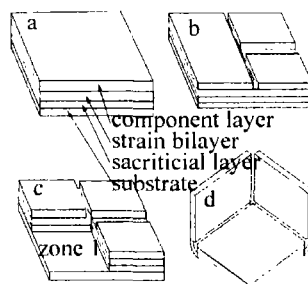


Fig. 2 Schematic diagram of the CCR production process
a—the cross section of structure b—define the hinge region c—define the mirror region (to facilitate the observation, zone 1 has not been drawn) d—self-assembled CCR

假设GaAs层和In_{0.22}Ga_{0.78}As层的厚度、晶格常数和杨氏模量分别为d₁, a₁, E₁; d₂, a₂, E₂。为估计曲率半径ρ的大小, 采用的计算公式如下^[13-16]:

$$\rho = \frac{d[3(1+s)^2 + (1+st)\{s^2 + (st)^{-1}\}]}{6\varepsilon(1+s)^2} \quad (1)$$

镜面的旋转角度α^[17]为: α = l/ρ (2)

式中, d = d₁ + d₂ 为应力双层的总厚度, ε = (a₂ - a₁)/a₁ 为晶格失配产生的初始应力 (a₂ > a₁), t = E₁/E₂ 为两层之间的杨氏模量比, s = d₁/d₂ 为厚度比值, l 为铰链长度。由上面两个公式可以得知, 铰链的旋转角度取决于选用的制作材料、晶格失配外延双层材料的厚度以及铰链的长度。

需要指出的是, (1)式是从1维几何公式中推导而来的^[18]: 要求垂直于横截面的尺寸, 即铰链和镜面宽度必须非常小, 甚至是无穷小, 因此在(1)式中不

包含任何曲率半径对所讨论的结构宽度的依赖。虽然人们可以假设结构宽度是存在的,但这样的推导计算结果必然会产生与真实结果之间的差异。

2 有限元分析

有限元法作为一种实用的数值分析方法近年来得到了工程界的广泛重视,成为分析连续体的强有力工具。有限元法的思路在1960年被推广应用到求解弹性力学问题,并开始采用“有限单元法”术语。在本文中的有限元分析,假设应力是弹性的,NIKISHKOV等人指出,晶格失配的外延双层引起的变形具有大旋转、大位移的特点^[12,18],这样就产生了几何非线性问题。由于其普遍性、高效性和可靠性,有限元分析方法成为解决这类几何非线性问题最合适的方法。有限元法的具体分析步骤如下。

(1)离散化——确定有限元计算简图。由于变形具有大旋转和大位移的特点,采用了使用参量非线性解决方案的2维平面应力模型来解决这个问题,此类

$$\begin{cases} k_{ii, mn} = \int_V \left[(\lambda + 2\mu) \frac{\partial N_m}{\partial x_i} \frac{\partial N_n}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{\partial N_m}{\partial x_{i+1}} \frac{\partial N_n}{\partial x_{i+1}} + \frac{\partial N_m}{\partial x_{i+2}} \frac{\partial N_n}{\partial x_{i+2}} \right) \right] dV \\ k_{ij, mn} = \int_V \left(\lambda \frac{\partial N_m}{\partial x_i} \frac{\partial N_n}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial N_m}{\partial x_j} \frac{\partial N_n}{\partial x_i} \right) dV \end{cases} \quad (5)$$

式中, m 和 n 为局部节点序号, i, j 是和坐标轴 (x_1, x_2, x_3) 相关的下标, V 为体积。拉莫弹性常数 λ 和 μ 分别由杨氏模量 E 和泊松比 ν 表示为:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (6)$$

具有初始应力 ε 的荷载向量 F 的分量可以表示为:

$$f_{i, m} = \int_V \left[\frac{\partial N_m}{\partial x_i} (3\lambda + 2\mu) \varepsilon \right] dV \quad (7)$$

3 仿真结果及分析

对自组装微角反射器的仿真结果如图3所示。仿真过程中所用到的各种材料参量如表1所示。各个镜面的尺寸设置为 $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$, 铰链尺寸为 $10\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$, $d_1 = 63\text{nm}$, $d_2 = 14\text{nm}$ 。

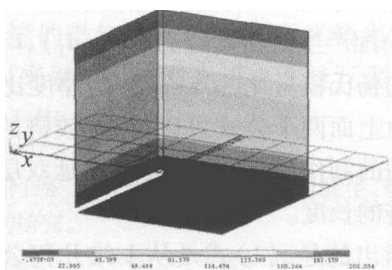


Fig. 3 Model result for MOEMS CCR

由于晶格失配产生的内部初始应力为:

2维平面应力模型允许对具有较大残余应力的晶格失配双层结构进行仿真分析^[13]。在选择单元类型时选择了8节点的非线性分层结构壳单元 SHELL91。网格划分时铰链区域的网格密度较高一些。

(2)单元分析——建立单元刚度矩阵。为用节点位移表示单元内的应变和应力,将单元内任一点的位移 f (矩阵向量) 表示成单元节点位移 δ (矩阵向量) 的形函数 N (矩阵向量): $f = N\delta$ (3) 式中,形函数 N 在本身节点上其值为1,在其它节点上其值为0,即对于节点 m, n, q 来说, $N_m(x_m, y_m) = 1$, $N_m(x_n, y_n) = N_m(x_q, y_q) = 0 (m, n, q)$; 且有 $N_m + N_n + N_q = 1$ 。

(3)整体分析——形成和求解整体平衡方程组。具有初始应力的弹性小应力有限元整体方程为:

$$K\Delta = F \quad (4)$$

式中, K 为整体刚度矩阵, Δ 是整体位移列向量, F 是整体荷载列向量,用来表征初始应力转化的节点力。整体刚度矩阵 K 的系数表述如下^[11]:

Table 1 Material parameters

	a/nm	E/GPa	μ	$\text{dens}/(\text{kg} \cdot \mu\text{m}^{-3})$
GaAs	0.56536	123.9	0.31	5.307
$\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$	0.57347	115.2	0.32	5.389

$$\varepsilon = (a_2 - a_1)/a_1 = 0.014345 \quad (8)$$

微角反射器是由3个相互垂直的镜面组成^[9]。由于CCR的各面成正交特性,它可以使任何方向的入射光线沿平行路径反射回光源方向,如图4所示。由于微角反射器具有体积小、功耗低、操作方便的特点,使其成为无源光链路系统设计中有吸引力的选择^[9]。在目前引起广泛关注的微型传感器技术——智能尘埃中微角反射器作为自由空间光通信发射机成为其主

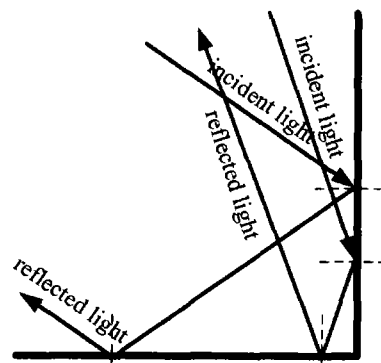


Fig. 4 The light transmission path of CCR

要构成部件^[10]。智能尘埃是集传感、计算和通信于一体的微粒,并且具有独立的供电系统。如果将这种智能尘埃在一定范围内大量的撒播,便可以形成一个智能无线传感网络。这种微粒可应用于国防军事、环境监测、观测天气、医疗卫生以及动物习性跟踪等领域。在基于微光机电系统的光学识别和通信系统以及在Tanner光学微机电系统的通信系统中微角反射器也是它们的关键组成部分。任何的入射辐射信号经过由微角反射器调制后都将被直接反射回辐射源,从而完成信息的传递。

在前面已经提到,由(1)式和(2)式可以得知,铰链的旋转角度取决于选用的制作材料、晶格失配外延双层材料的厚度以及铰链的长度。在这里,调整了以上几个部分参量:镜面尺寸为 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$,铰链尺寸为 $10\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$, $d_1 = 67\text{nm}$; $d_2 = 13\text{nm}$,得到了不同角度的微角反射镜,如图5所示。

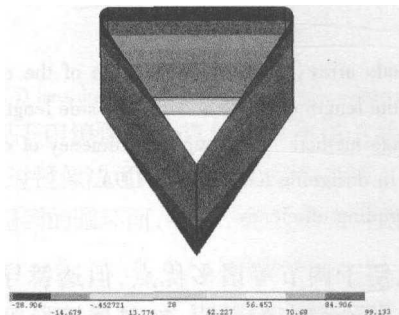


Fig. 5 MOEMS mirror with different angles

最后,建模仿真了微/纳米量级的立方箱结构(见图6): 镜面尺寸为 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$,铰链尺寸为 $10\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$, $d_1 = 49\text{nm}$; $d_2 = 14\text{nm}$ 。这表明利用自组装方法制作更为复杂的3维微/纳米器件也是可行的。

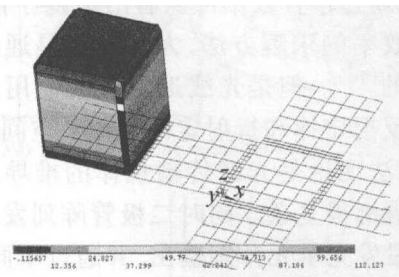


Fig. 6 Micro-cube box

在制作元件的过程中,镜面和铰链的实际尺寸以及应力双层厚度可能与设计的尺寸之间有一定误差,从而影响镜面的旋转角度发生变化,为此通过调整这些变量的值,进行了仿真分析。

以铰链长度 $10\mu\text{m}$,镜面尺寸 $150\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$,应变双层厚度分别为: $d_{\text{GaAs}} = 90\text{nm}$, $d_{\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}} = 14\text{nm}$ 的镜面仿真结果为基准进行对比。在铰链长度不变的情况下,改变镜面的长宽尺寸,在改变10%的情况下,镜面旋转角度的变化小于1%;固定铰链的宽度,将铰链长

度分别减少5%和10%,镜面旋转角度降低约为4.6%和9.8%;将铰链应变双层GaAs层和 $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ 层的厚度分别减少5%,仅改变GaAs层厚度,镜面旋转角度增加约9.8%,若仅改变 $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ 的厚度,镜面旋转角度减小约3.3%。为了了解镜面的不平整度对旋转角度所产生的影响,调整镜面的上盖层厚度,经过仿真分析发现,镜面的不平整度对镜面旋转角度所产生的影响非常小,几乎可以忽略。

由此可以看出,铰链的长度和厚度对镜面的旋转角度影响比较大,这就要求实验上用分子束外延生长制作铰链的应变双层时厚度要控制好,在器件制作工艺中对铰链的长度也要精确控制,对镜面的尺寸要求不是很严格。

4 结论

介绍了通过晶格失配的外延双层制成的铰链带动镜面旋转并最终达到平衡位置的自组装方法的制作过程和原理。使用这种制作方法整个过程中都不需要人为辅助组装,并且只要调整晶格失配外延双层材料的厚度以及铰链的长度和宽度即可改变镜面旋转角度。利用有限元法分析微角反射器形成过程中产生的几何非线性问题进行分析并对它进行了建模仿真。通过调整材料参量得到了不同角度的微角反射镜和微立方箱,这些器件的建模成功证明了自组装方法是制作3维微/纳米结构的一种十分有效的方法。对于更为复杂3维微/纳米元器件制作及应用也正在探索和研究中。但是,利用有限元法分析模拟微光机电系统元器件过程中还存在一切缺陷,例如不能精确控制角度等。在今后的工作中,将致力于对自组装方法制作的元器件的这些方向的有限元分析研究。

参考文献

- [1] LIANG J Q. The progress in research micro-opto-electro-mechanical-system[J]. OME Information, 2000, 17(8): 1-5 (in Chinese).
- [2] ZHANG J, HUANG L, WANG D Sh, *et al.* Study on characteristics of output beam of combined optical diode lasers[J]. Laser Technology, 2007, 31(3): 228-231 (in Chinese).
- [3] ZHAO Y, WANG H L. Properties of 2-D hybrid photonic crystal[J]. Laser Technology, 2010, 34(3): 294-296 (in Chinese).
- [4] ZHOU P, YAN M B, WANG H L. Research of the transmission spectra of photonic crystal waveguide with layered composite medium cylinder[J]. Laser Technology, 2009, 33(2): 195-197 (in Chinese).
- [5] PRINZ V Y, CHEKHOVSKIY A V, PREOBRAZHENSKII V V, *et al.* A technique for fabricating InGaAs/GaAs nanotubes of precisely controlled lengths[J]. Nanotechnology, 2002, 13(2): 231-233.
- [6] PRINZ V Y, SELEZNEV V A, GUTAKOVSKY A K, *et al.* Free-standing and overgrown InGaAs/GaAs nanotubes, nanohelices and their arrays[J]. Physica, 2000, E6(1/4): 828-831.

(下转第827页)

1.5代入上式,就可以求出透镜导管的最优曲率半径 $R = 10\text{mm}$,这个值与图3中得到的最优曲率半径结果是一样的,说明通过耦合效率得到的最优曲率半径与通过公式得到的结果十分吻合。同时,也证明了通过耦合效率与透镜导管参量的关系来进行透镜导管设计是一个很好的方法。LDA尺寸是 $11\text{mm} \times 11\text{mm}$ 时, $l_d = 30.36\text{mm}$,其它参量的取值同上,得到图4所示的结果,透镜导管的最优曲率半径均是 11mm ,当输出面的边长 $s_d = 1.4\text{mm}$ 时,通过最优参量得到最大耦合效率为可以达到 69% , s_d 分别为 1.2mm 和 1.0mm 时的最大耦合效率为 62% 和 54% 。分析图3和图4可以发现,当输出面的边长一样时,LDA的尺寸越大,耦合效率越小; LDA尺寸一定时,耦合效率随输出面的边长的不同差别很大,输出面的边长越大,耦合效率越高。即表明耦合效率与LDA的尺寸及与输出面的边长是相互关联的量,在实际应用中应综合考虑以上因素。

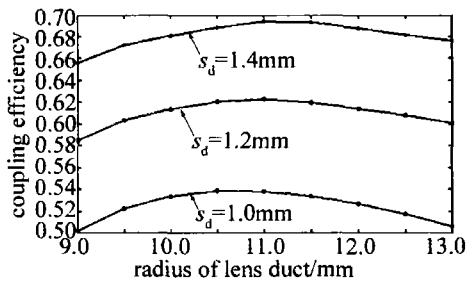


Fig. 4 Size of LDA: $11\text{mm} \times 11\text{mm}$

3 结论

透镜导管用于大功率激光二极管阵列整形具有很

大的发展潜力。将其选为整形系统,根据镜像法得到了耦合效率表达式,模拟了耦合效率与不同LDA尺寸及输出面边长之间的关系。实际应用中,对于一定发光面的激光二极管阵列,当耦合效率达到某个需要值时,利用本文中耦合效率与输出面边长之间关系,即可得到输出面边长的大小,从而实现透镜导管的整形应用。

参考文献

- [1] FEUGNET G, BUSSAC C, LARAT C, *et al.* High-efficiency TEM₀₀ Nd:YVO₄ laser longitudinally pumped by a high-power array[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(2): 157-159.
- [2] BEACH R J. Theory and optimization of lens ducts[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(12): 2002-2015.
- [3] FU R L, WANG G J, WANG Z Q, *et al.* Design of efficient lens ducts[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(18): 4000-4003.
- [4] FU R L, WANG G J, ZHANG L Q, *et al.* Simplify design of lens duct as coupling system for all-solid-state lasers[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* 1998, 9(2): 96-99 (in Chinese).
- [5] GAO H Y, FU R L, QIN H, *et al.* Optimization of lens duct[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(4): 398-400 (in Chinese).
- [6] JIA W, HU Y M, LI M Z, *et al.* Simulation and design of hollow lens duct as a new kind of coupling system for high power laser diode arrays[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2004, 31(8): 939-942 (in Chinese).
- [7] ZHANG B, CHEN M, LI G. The coupling-theory-design of the high-power semiconductor lasers[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(4): 433-436 (in Chinese).
- [8] GAO H Y, FU R L, CHEN D S, *et al.* Design of hollow duct as coupling system in solid-state laser end-pumped by LDA[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16(5): 541-544 (in Chinese).
- [9] PRINZ V Y. A new concept in fabricating building blocks for nano-electronic and nanomechanic devices[J]. *Microelectronic Engineering*, 2003, 69(2/4): 466-475.
- [10] LÜ P, GUO X Q, WANG J X, *et al.* Preparation of nano-Si/SiN_x film and its application in passive Q-switch of Nd:YAG laser[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 163-165 (in Chinese).
- [11] HSU V S, KAHN J M, PISTER K S J. MEMS corner cube retroreflectors for free-space optical communications[D]. Berkeley, USA: University of California, 1999: 11-13.
- [12] ZHOU L X, PISTER K S J, KAHN J M. Assembled corner-cube retroreflector quadruplet[C]//The 15th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Las Vegas, USA: IEEE, 2002: 556-559.
- [13] HONG Y K, SYMS R R A, PISTER K S J, *et al.* Corner cube reflectors by surface tension self-assembly[C]//9th IEEE/LEOS Conference on Optical MEMS. Kagawa, Japan: IEEE, 2004: 2-56.
- [14] NIKISHKOV G P, NISHIDATE Y, OHNISHI T, *et al.* Effect of material anisotropy on the self-positioning of nanostructures[J]. *Nanotechnology*, 2004, 17(4): 1128-1133.
- [15] LUO J K, HE J H, FU Y Q, *et al.* Fabrication and characterization of diamond-like carbon/Ni bimorph normally closed microcages[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15(8): 1406-1413.
- [16] LUO J K, HUANG R, HE J H, *et al.* Modelling and fabrication of low operation temperature microcages with a polymer/metal/DLC trilayer structure[J]. *Sensors and Actuators*, 2006, A132(1): 346-353.
- [17] VOROB'EV A, VACCARO P O, KUBOTA K, *et al.* SiGe/Si microtubes fabricated on a silicon-on-insulator substrate[J]. *Journal of Physics*, 2003, D36(17): 67-69.
- [18] VACCARO P O, KUBOTA K, AIDA T. Strain-driven self-positioning of micromachined structures[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(19): 2852-2854.
- [19] ARORA W J, NICHOL A J, SMITH H L, *et al.* Membrane folding to achieve three-dimensional nanostructures: Nanopatterned silicon nitride with stressed chromium hinges[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(5): 053108/1-053108/3.
- [20] NIKISHKOV G P, KHMYROVA I, RYZHII V. Finite element analysis of self-positioning microstructures and nanostructures[J]. *Nanotechnology*, 2003, 14(7): 820-823.