

## 薄膜光探测器绑定点的几何设计与仿真分析

刘小龙,肖靖,何敏,肖剑波

(湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410012)

**摘要:**目前,光器件在硅基衬底上的集成是光电领域的研究热点。将基于表面张力的流体自组装技术应用于薄膜金属-半导体-金属(MSM)光探测器的集成上,其集成效果的优劣与器件绑定点的几何形状有关。为了有效预测薄膜 MSM 光探测器绑定点的间距和形状对集成效果的影响,利用 MATLAB 对其集成过程中表面自由能的分布状况进行了仿真分析。首先,在介绍薄膜 MSM 光探测器的基础上,对其集成过程建立了平移和旋转仿真模型。然后,根据表面自由能与匹配度的线性关系,分别仿真出了不同间距和形状的绑定点在集成过程中匹配度的分布状况图。通过分析匹配度的斜率以及正确装配状态和误装配状态之间的关系,预测两端绑定点间距较长、绑定点形状为梯形时集成效果较好。最后,考虑到薄膜光电器件有可能需要区分正负极的情况,将其两端绑定点设计成不对称形状并进行仿真分析,尽量避免集成过程中出现正负极反接的状态。

**关键词:**薄膜金属-半导体-金属光探测器; 流体自组装技术; 表面自由能; 绑定点

**中图分类号:** TN36; TP391.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0820003

## Geometric design and simulation analysis of the binding site of thin-film photodetector

Liu Xiaolong, Xiao Jing, He Min, Xiao Jianbo

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410012, China)

**Abstract:** Integration of optical devices onto silicon substrate is attracting increasing attention in the field of optoelectronics. The fluidic self-assembly technology was applied to the integration of thin-film metal-semiconductor-metal (MSM) photodetector, the integration results was related to the geometry of the binding site. The spacing and shape of the binding sites on the thin-film MSM photodetector will affect the integration process of device onto the host substrate. In order to effectively predict the effect, MATLAB was used to simulate the distribution of interfacial free energy for the integration process. Firstly, based on the introduction of thin-film MSM photodetector and its integration, a model of translation and rotation during the integration was established for the simulation. Then, according to the linear relationship between the interfacial free energy and the matching degree, the distribution of the matching degree was investigated for the different binding sites with the different spacing and shape. By analyzing the relationship between the slope of the matching degree and the correct-assembly/false-

收稿日期:2015-12-05; 修订日期:2016-01-03

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(61404047);湖南省自然科学基金(2015JJ3034);湖南大学-中央高校基本科研业务费

作者简介:刘小龙(1991-),男,硕士生,主要从事集成光电子系统方面的研究。Email:123195668@qq.com

导师简介:肖靖(1985-),男,硕士生导师,博士,主要从事集成光电子系统、微纳器件制作及工艺方面的研究。Email:jxiao1985@163.com

assembly state, it predicted that the integration results would be better when the spacing between the binding sites is longer and the shape of the binding sites is trapezoid. Finally, considering that the thin-film optical devices may have specific requirement of positive and negative contacts, the binding sites with asymmetric shape was designed to avoid the reverse binding connection during the integration process.

**Key words:** thin-film metal-semiconductor-metal photodetector; fluidic self-assembly; interfacial free energy; binding site

## 0 引言

随着信息时代的到来,人们对信息的存储容量、传输速率以及处理速度的要求不断提高,这也促进了集成光路<sup>[1-2]</sup>的飞速发展。虽然集成光路与集成电路有很多相似之处,但是对于集成光路来说,不同的光器件要达到最佳的性能需要基于不同的材料和结构。因此,基于硅或 III-V 族化合物的单片集成技术难以实现集成光系统的最佳性能。而异构集成的方法<sup>[3]</sup>使得各种不同功能的光器件能够在各自首选的生长衬底上独立地生长和制备,优化各器件的性能,并且将这些光功能器件和传统的电功能元器件集成到同一个衬底上,实现一个功能复杂和性能优异的先进集成光电系统。实现异构集成的途径主要包括晶片键合技术<sup>[4]</sup>,倒装芯片键合技术<sup>[5]</sup>,薄膜剥离转移技术<sup>[6]</sup>等。在这些技术中,因为薄膜剥离转移技术具有好的兼容性、有效的材料利用率以及三维集成能力而成为现在研究的热点<sup>[7-9]</sup>。但是薄膜器件作为一种微元件,易受范德华力,表面张力等作用力影响,传统的拾放操作<sup>[10]</sup>方法对集成过程不易控制,集成效率不高。研究表明,在液态环境中,操作微对象以及控制微元器件之间的相互作用较为容易<sup>[11]</sup>,肖靖<sup>[12]</sup>等人利用该机理将基于表面张力的流体自组装技术(Fluidic Self-Assembly, FSA)成功应用于薄膜 MSM 光探测器的集成上,克服了传统方法的弊端,提高了集成效率。在基于表面张力的流体自组装过程中,器件绑定点的尺寸和形状对集成效果起到很重要的作用<sup>[13-15]</sup>。对于绑定点的尺寸,要求其面积和粘结剂的剂量合适,使表面张力相比其他力(重力和剪切力等)占主导地位。对于绑定点的形状,要求尽量避免可能导致误装配

的局部能量陷阱(对应于系统能量相对较高些的亚稳态),最理想的情况是只有唯一对应于期望装配结构状态的全局能量陷阱(对应于系统能量最低的状态)。目前,绑定尺寸的设计已经有了比较成熟的经验,满足了表面张力相比其他力占主导地位的要求。研究发现,在近距离内,粘结材料对微元件的作用力几乎完全受几何模型的影响,因此目前对其性能的优化主要集中在对绑定点形状的设计上。通过对微元器件的集成过程建立仿真模型,并通过一定的运算法则对不同形状的绑定点的集成效果进行仿真分析,从而有效预测不同形状的绑定点对集成效果的影响。文中针对薄膜 MSM 光探测器的结构特点,对其集成过程建立了平移、旋转两种仿真模型,并对其两端绑定点的间距和几何形状进行了设计,通过仿真分析它们在集成过程中表面自由能的分布状况,简单有效的预测了不同间距和形状的绑定点对集成效果的影响。

## 1 薄膜 MSM 光探测器的集成过程

### 1.1 集成器件

薄膜光探测器在集成光路中的作用非常重要,其是将传输速率高,传输信息量大的光信号转化为电信号必不可少的器件。文中介绍的薄膜 MSM 光探测器属于其中的一种,其结构如图 1(a)所示。其通过光刻<sup>[16]</sup>等工艺在半导体材料上形成金属接触层与梳状手指。图 1(b)是主基板,其在半导体材料上制备出金属接触层和电极,其金属接触层的形状与光探测器上金属接触层的形状相对应。图 1(c)为集成器件,光探测器与主基板上的金属接触层完全重叠。当光探测器集成到主基板上后,在主基板上制作光波导<sup>[17]</sup>,然后在电极间加偏压即可实现光电信号的转换。

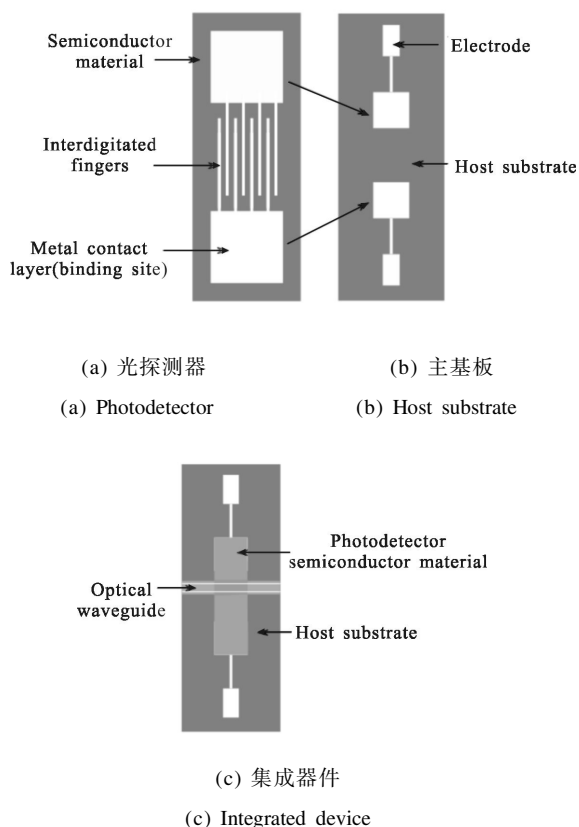


图 1 集成器件示意图

Fig.1 Schematic of integrated device

## 1.2 集成过程

薄膜 MSM 光探测器的集成过程采用基于表面张力的流体自组装技术。在集成之前,分别对光探测器和主基板上的金属接触层涂上自组装单层(Self-Assembled Monolayer, SAM), 形成相互匹配的疏水性绑定点, 并在主基板的绑定点上涂上疏水性粘合剂。然后将它们置于流体环境中, 使光探测器与主基板的疏水性绑定点相接触并在粘合剂表面张力的牵引下对位组装。最后, 将环境液体抽离, 并加热蒸发掉粘合剂, 使光探测器绑定点与主基板绑定点之间形成稳定的金属-金属接触。

## 2 仿真

### 2.1 仿真模型的建立

当绑定点间距和形状不同时, 为了对薄膜 MSM 光探测器的集成效果进行有效预测, 首先对集成过程建立仿真模型。由于集成过程中器件移动的不确定性很大, 将其简化为两种模型。第一种为面内平移(图 2(a)): 主基板固定不动, 光探测器和主基板的绑

定点摆放方位相同。以主基板的中心为原点, 平行和垂直于梳状手指的方向作  $x$  轴和  $y$  轴。光探测器在主基板平面内沿  $x$  和  $y$  方向移动; 第二种为面内旋转(图 2(b)): 主基板固定不动, 以主基板的中心为原点。光探测器的中心与主基板的中心重合, 并绕其中心旋转。

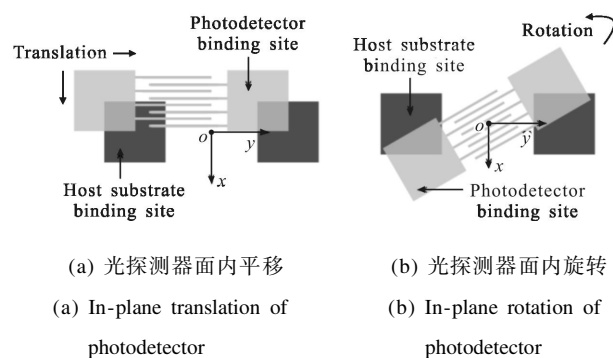


图 2 光探测器面内平移与旋转示意图

Fig.2 Schematic of in-plane translation and rotation of photodetector

在平移或者旋转的过程中, 光探测器的绑定点与主基板的绑定点重叠面积发生变化, 系统对应着不同的表面自由能<sup>[18]</sup>, 即系统处于不同的装配状态。通过仿真出表面自由能的分布状况图便可对集成过程进行直观的分析。又根据表面自由能与匹配度的关系式<sup>[18]</sup>:

$$W = -2C_{\pm} \times A_0 \times V \quad (1)$$

式中:  $W$  为表面自由能变量;  $C_{\pm}$  为与表面材料有关的常数;  $A_0$  为绑定点的面积, 也为常数;  $V$  为光探测器绑定点与主基板绑定点的匹配度;  $V$  的取值范围为  $[0, 1]$ 。由上式可知表面自由能  $W$  与匹配度  $V$  成线性关系。因此通过仿真出匹配度的分布状况图便可对集成过程进行直观的分析。其中对匹配度  $V$  的计算运用了数字图像处理中模板匹配的方法<sup>[18]</sup>, 然后通过 MATLAB 将其数据可视化, 生成匹配度分布状况图。

### 2.2 仿真分析

#### 2.2.1 两端绑定点间距仿真分析

由于薄膜 MSM 光探测器两端都有绑定点, 通过设计不同的间距, 仿真出它们的匹配度分布状况图, 从而分析出哪一种间距的绑定点集成效果较好。因为只是对绑定点间距的比较, 所以绑定点形状可以任意选择。这里选择正方形(图 3)作为绑定点形

状,以它的边长  $a$  作为参考长度,分别设计了  $0.5a$ ,  $a$ ,  $1.5a$ ,  $2a$  四种间距。

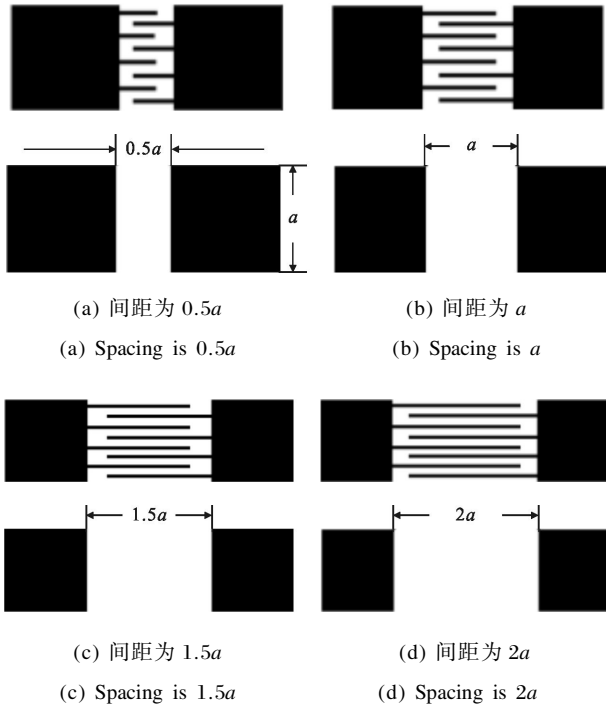


图 3 四种不同间距的绑定点(上面是光探测器绑定点,下面是主基板绑定点)

Fig.3 Binding sites with four different spacing (Above: photodetector binding site, Below:host substrate binding site)

图 4 为绑定点间距不同时光探测器绕主基板面内旋转所得的匹配度分布状况图。可以看出当绑定点间距不同时,匹配度斜率的大小不同。根据表面自由能与匹配度的线性关系可知,斜率的绝对值越大表示旋转过程中表面自由能变化的越快,即粘结剂对光探测器的回复力越大<sup>[10]</sup>,因此系统越容易完成自动集成。图中绑定点间距增大时斜率的绝对值对应增大,但是间距从  $1.5a$  增大到  $2a$  时,斜率变化已

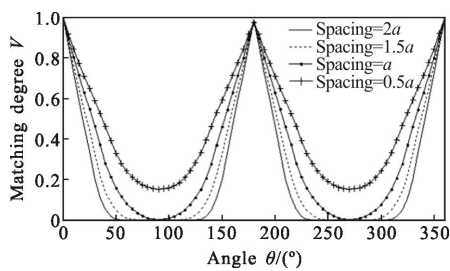


图 4 不同间距的绑定点旋转匹配度分布状况图

Fig.4 Distribution of the rotation matching degree of the binding sites with different spacing

经不明显。因此绑定点间距设计为  $1.5a$  时就可以达到较好的集成效果。通过上文分析,在制作薄膜 MSM 光探测器时可以考虑将两端绑定点的间距设计的较长。

### 2.2.2 绑定点形状仿真分析

在基于表面张力的流体自组装过程中,器件绑定点的形状对集成效果起非常重要的作用。图 5 设计了四种不同形状的绑定点。绑定点之间的间距均采用上文设计的  $1.5a$ 。

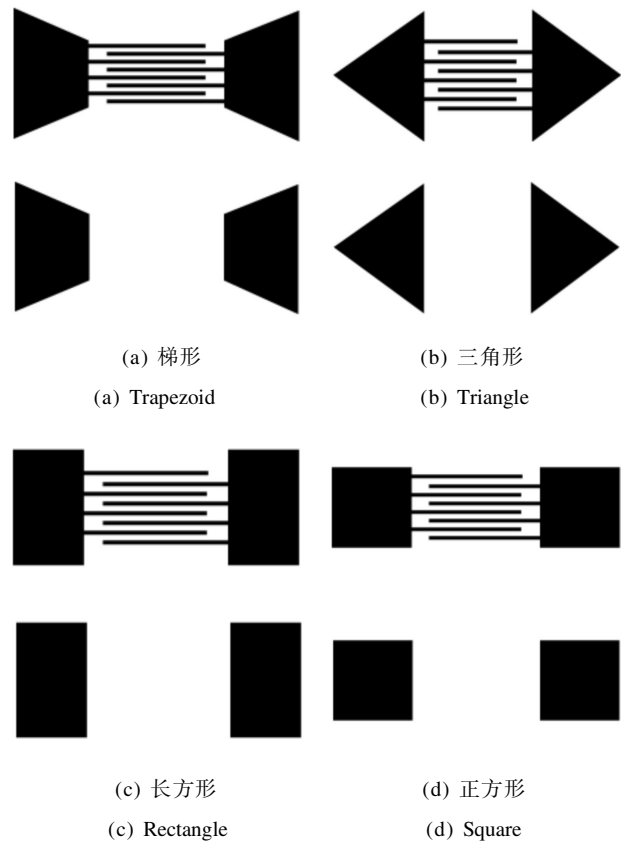


图 5 四种不同形状的绑定点(上面是光探测器绑定点,下面是主基板绑定点)

Fig.5 Binding sites with four different shapes(Above: photodetector binding site, Below:host substrate binding site)

图 6 为绑定点形状不同时,光探测器绕主基板面内旋转所得的匹配度分布状况图,由于两端绑定点为对称形状,只需讨论  $0^\circ \sim 180^\circ$  范围的匹配度。可以看出当绑定点形状不同时,对应的斜率也不同。根据表面自由能与匹配度的线性关系可知,斜率的绝对值越大表示系统越容易完成自动集成。图中梯形与正方形斜率的绝对值较大,三角形斜率的绝对值在  $\theta=30^\circ \sim 90^\circ$  这一段较小,长方形斜率的绝对值整

体较小。因此预测梯形和正方形的集成效果较好。

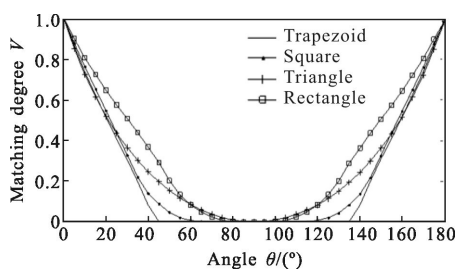
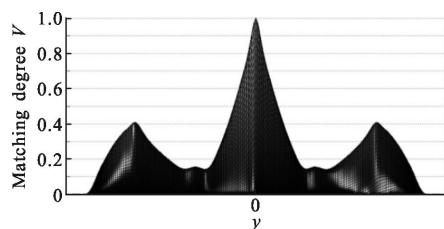


图 6 不同形状的绑定点旋转匹配度分布状况图

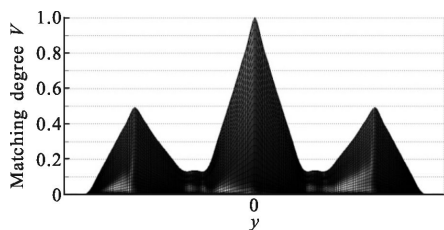
Fig.6 Distribution of the rotation matching degree of the binding sites with different shapes

由于梯形,正方形旋转集成效果较好,进一步对这两种形状进行平移仿真分析。图 7 为绑定点形状为正方形和梯形时,光探测器沿主基板 y 方向面内平移所得的匹配度分布状况图。可以看出系统均存在一个正确装配状态(梯形和正方形的匹配度均为 1)和两个误装配状态(梯形的匹配度约为 0.4,正方形的匹配度为 0.5)。根据匹配度与表面自由能的线性关系可知,两种状态对应的匹配度的差值越大时,表面自由能的势差越大,即粘结剂对光探测器的驱



(a) 梯形绑定点 y 方向平移匹配度分布状况图

(a) Distribution of the y direction translation matching degree of the binding site with trapezoid



(b) 正方形绑定点 y 方向平移匹配度分布状况图

(b) Distribution of the y direction translation matching degree of the binding site with square

图 7 不同形状的绑定点 y 方向平移匹配度分布状况图

Fig.7 Distribution of the y direction translation matching degree of the binding sites with different shapes

动力越大,因此在外界辅助力作用下系统越容易完成正确装配。图中梯形的匹配度差值  $\Delta V \approx 1 - 0.4 = 0.6$  稍大于正方形的差值  $\Delta V = 1 - 0.5 = 0.5$ 。通过综合分析平移、旋转匹配度分布状况图后,预测梯形在这四种形状中的集成效果较好。

### 2.2.3 区分极性的薄膜光电器件仿真分析

考虑到薄膜光电器件有可能需要区分正负极的情况(两端绑定点一端为正极另一端为负极),以薄膜 MSM 光探测器为例,将其两端绑定点设计成不同的形状,尽量避免集成过程中出现正负极反接的情况。图 8 设计了三种不对称形状的绑定点,并且使两端绑定点形状的差别有所不同,以此对比出不同差别时对集成效果的影响。图中正方形-长方形的差别最大,长方形-三角形的次之、梯形-正方形的最小。这里的差别指两端绑定点形状发生最大重叠时,重叠面积的大小;重叠面积越小,差别越大。其正负极的选择可以根据需要设定(如图 8(a)设定正方形为正极,长方形为负极)。

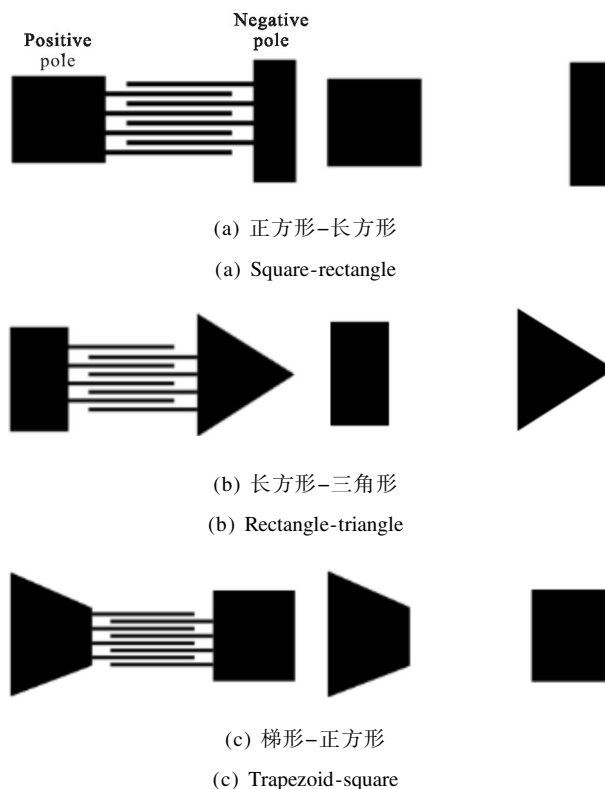


图 8 三种不对称形状的绑定点

Fig.8 Binding sites with three asymmetric shapes

图 9 为绑定点形状不对称时,光探测器绕主基板面内旋转所得的匹配度分布状况图。图中  $\theta = 0^\circ$  和

180°时光探测器与主基板分别处于正确装配状态和正负极反接状态。根据匹配度与表面自由能的线性关系可知,两种状态对应的匹配度的差值越大时,表面自由能的势差越大,即粘结剂对光探测器的回复力越大,因此在外界辅助力作用下系统越容易完成正确装配。图中正方形-长方形绑定点的匹配度  $\Delta V \approx 0.6$ , 长方形-三角形的  $\Delta V \approx 0.2$ , 梯形-正方形的  $\Delta V \approx 0.1$ 。因此预测两端绑定点形状为正方形-长方形时集成效果较好。在设计区分极性的薄膜光电器件时,可以考虑将其两端绑定点形状的差别设计的较大。

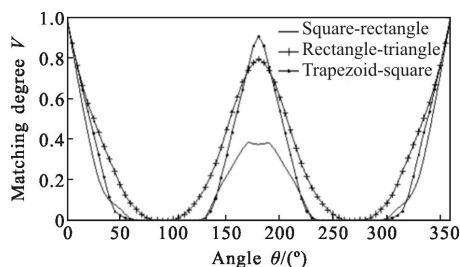


图 9 不对称形状的绑定点旋转匹配度分布状况图

Fig.9 Distribution of the rotation matching degree of the binding site with asymmetric shape

### 3 结论

在基于表面张力的流体自组装过程中,绑定点的优化设计是提高组装成功率的关键之一。为了有效预测绑定点形状对薄膜 MSM 光探测器装配效率的影响,文中首先建立了集成过程的仿真模型,然后利用表面自由能与匹配度的线性关系,仿真出了集成过程中匹配度的分布状况图,对不同形状的绑定点的集成效率进行了有效预测。由于薄膜 MSM 光探测器具有两个绑定点,首先对其绑定点的间距进行了设计和仿真分析,预测间距较长时集成效果较好。在对比不同形状的绑定点时,先进行了旋转模型仿真分析,将集成效果较好的形状再进行了平移模型仿真分析,对比出四种形状中梯形的集成效果较好。最后对区分极性的薄膜光电器件绑定点形状进行了不对称设计和仿真分析,预测两端绑定点形状差别较大时集成效果较好。文中通过仿真分析有效预测了绑定点形状对薄膜 MSM 光探测器的集成效率。目前工程应用中主要通过微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS )实验来测试微设

备的装配效率。而 MEMS 实验的费用相当昂贵。因此运用此预测方法可大幅度缩短开发时间和降低开发成本。同时,随着流体自组装技术在微元件组装领域的深入研究,此预测方法可望在工程中得到更多的实际应用。

### 参考文献:

- [1] Heck M J R, Bauters J, Davenport M, et al. Hybrid silicon photonic integrated circuit technology[J]. *IEEE J Sel Topics Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 6100117.
- [2] Paolo Bettotti. Hybrid materials for integrated photonics[J]. *Advances in Optics*, 2014,2014 (11): 1-24.
- [3] Xing Dai, Binh-Minh Nguyen, Yoontae Hwang, et al. Novel heterogeneous integration technology of III-V layers and InGaAs finFETs to silicon [J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(28): 4420-4426.
- [4] Luo Xu, Zou Yan, Jiang Menghua, et al. Fabrication and characteristics of quasi-phase-matched GaAs crystal for mid-infrared laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 490-492. (in Chinese)
- 罗旭, 邹岩, 姜梦华, 等. 中红外激光准相位匹配 GaAs 晶体的制备工艺[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 490-492.
- [5] Ye Lezhi, Tang Liang, Liu Ziyang. Summary of flip chip bonding technology and equipment [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2014(11): 1-5. (in Chinese)
- 叶乐志, 唐亮, 刘子阳. 倒装芯片键合技术发展现状与展望[J]. *电子工业专用设备*, 2014 (11): 1-5.
- [6] Sabarni Palitl, Jeremy Kirch, Luke Mawst, et al. Thermal characteristics of III/V thin film edge emitting lasers on silicon [J]. *International Journal of Microwave and Optical Technology*, 2010, 5(6): 483-487.
- [7] Xiao Jing, Ritesh Ray Chaudhuri, Sang-Woo Seo. Fluidic assisted thin-film device heterogeneous integration: Surface tension as driving force and magnetic as guiding force [J]. *Optics Communications*, 2015, 353(15): 171-177.
- [8] Song F C, Xiao J, Xie A J, et al. A polymer waveguide grating sensor integrated with a thin-film photodetector[J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(111): 15503.
- [9] Shen Po-Kuan, Chen Chin-Ta, Chen Rwei-Hung, et al. Chip-level optical interconnects using polymer waveguide integrated with laser/PD on silicon[J]. *Photonics Technology Letters*, 2015, 27(13): 1359-1362.
- [10] Mastrangeli M, Ruythooren W, Celis J P, et al. Challenges

- for capillary self-assembly of microsystems [J]. *IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol*, 2011, 1(1): 133–149.
- [11] Sariola Veikko, Jääskeläinen M, Quan Zhou. Hybrid microassembly combining robotics and water droplet self-alignment[J]. *Robotics*, 2010, 26(6): 965–977.
- [12] Xiao Jing, Song Fuchuan, Sang-Woo Seo. Surface-tension driven heterogeneous integration of thin film photonic devices using micro-contact printing for multi-material photonic integrated circuits [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(10): 1578–1582.
- [13] Wu Yiping, Wang Jifan, Zhang Jinsong, et al. A novel micro-component assembly technology-fluidic self-assembly [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2005, 34(9): 12–17. (in Chinese)  
吴懿平, 汪继凡, 张金松, 等. 新型微元件组装技术-流体自组装[J]. 电子工业专用设备, 2005, 34(9): 12–17.
- [14] Karl F Böhringer, Uthara Srinivasan, Roger T H. Modeling of fluidic forces and binding sites for fluidic self-assembly [C]//IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2001: 369–374.
- [15] Shiga S, Wang D F, Ishida T, et al. Crescent shaped alignment marks applicable to self-alignment of micro-parts with and without positive and negative poles[C]//Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 2011: 180–183.
- [16] Geng Yongyou, Deng Changmeng, Wu Yiqun. Recent progress of extreme ultraviolet resists[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1850–1856. (in Chinese)  
耿永友, 邓常猛, 吴谊群. 极紫外光刻材料研究进展[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1850–1856.
- [17] Liu Tao, Li Zhishan, Jiang Zhi, et al. Fabrication process of organic polymer optical waveguide [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(6): 599–604. (in Chinese)  
刘涛, 李志山, 蒋志, 等. 有机聚合物光波导制作工艺综述[J]. 激光与红外, 2015, 45(6): 599–604.
- [18] Xu Min, Yin Zhouping, Ding Han, et al. Modeling and simulation of fluidic self-assembly system based on capillary force [J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, 15(2): 139–143. (in Chinese)  
徐敏, 尹周平, 丁汉, 等. 基于毛细管力流体自装配系统的建模与仿真[J]. 中国机械工程, 2004, 15(2): 139–143.