

文章编号:1001-9014(2006)05-0329-04

降低平面结型碲镉汞焦平面阵列光串音的结构优化研究

全知觉, 叶振华, 胡伟达, 李志锋, 陆卫

(中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要: 研究了一种能够降低平面结型碲镉汞(HgCdTe, MCT)焦平面阵列光串音的新型结构. 该结构通过对平面结型 MCT 焦平面阵列的衬底几何形状的优化设计, 来达到增大光响应率、减少光串音的目的, 以期提高器件的性能. 提出了结构优化的快速近似设计方法, 并利用商用器件模拟软件对 $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ 器件进行了二维模拟. 计算结果显示: 当少数子寿命为 10ns 时, 经过优化设计后的器件, 光响应率增加了 9.6%, 光串音从未优化前的 5.23% 减小到 1.05%.

关键词: 碲镉汞(MCT); 焦平面阵列; 光串音; 器件模拟

中图分类号: TB4 **文献标识码:** A

STUDY ON STRUCTURAL OPTIMIZATION OF DECREASING THE CROSSTALK OF PLANNAR HgCdTe FOCAL PLANE ARRAYS

QUAN Zhi-Jue, YE Zheng-Hua, HU Wei-Da, LI Zhi-Feng, LU Wei

(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A new structure that can decrease the crosstalk of planar HgCdTe (MCT) Focal Plane Arrays (FPA) was investigated theoretically. In order to improve the property of FPA, the geometry of the FPA's substrate was designed to increase the spectral response and to decrease the crosstalk. The method of structural optimization was established. The two-dimensional simulation of $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$ devices was performed by using a device simulator. The results of calculation indicate that the spectral response increases 9.6%, and that the crosstalk decreases down to 1.05% from 5.23% when minority carrier lifetime is 10ns.

Key words: HgCdTe (MCT); focal plane arrays (FPA); crosstalk; device simulation

引言

红外技术的发展对红外焦平面(FPA)的性能提出了很高的要求,使得碲镉汞(HgCdTe, MCT)红外焦平面器件的研制成为目前红外器件研究的一个重要方向^[1,2]. 在 MCT 焦平面阵列中,像元的光响应率是器件的重要性能参数之一;然而,像元在提高光响应率的同时,也增强了阵列中相邻像元之间的光串音. 光串音将降低焦平面器件的成像质量,对焦平面器件来说是一个有害的因素. 因此,在设计高分辨率的平面结型焦平面阵列时,光响应率和光串音之间的协调是一个关键的问题:一方面,为提高光响应

率,应尽可能地增大器件占空比,即减小像元之间的中心距;另一方面,随着像元中心距的减小,不可避免地增大了光串音. 为解决这一问题,有人提出了将衬底结构设计为微透镜的想法^[3,4],通过微透镜的聚光作用将入射光汇聚到光敏元区,图 1 给出了其结构示意图. 通过这一设计,可使器件在光响应率不变甚至增大的情况下显著地降低光串音.

本文正是针对这一设计构思,对该设计在平面结型碲镉汞焦平面的应用进行了理论研究,提出了相应的结构参数优化的设计思路;并利用 synopsys 公司的 DESSIS 器件模拟软件对设计的结构进行了二维模拟.

收稿日期:2005-12-21,修回日期:2006-06-18

Received date: 2005-12-21, revised date: 2006-06-18

基金项目:国家重点基础研究专项基金(2004CB619004, 2001CB309302),国家自然科学基金(60476031, 10234040, 60244002)

作者简介:全知觉(1977-),男,江西临川人,中科院上海技术物理研究所博士研究生,专业为微电子与固体电子学,研究方向为碲镉汞器件的模拟与设计.

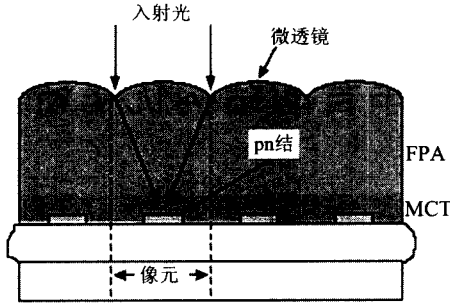


图1 带微透镜的焦平面截面示意图

Fig. 1 Cross-sectional drawing of microlensed hybrid FPAs

1 理论模型

在两种介质界面的反射系数,可以通过菲涅耳公式来表达:

$$R_{\perp} = \frac{\cos i - n_r \cos \gamma}{\cos i + n_r \cos \gamma} \quad (1)$$

$$R_{\parallel} = \frac{n_r \cos i - \cos \gamma}{n_r \cos i + \cos \gamma} \quad (2)$$

式中, R_{\perp} , R_{\parallel} 分别为入射光电矢量的垂直分量与平行分量的反射系数, i 为入射角, γ 为折射角, n_r 为介质二与介质一折射率之比. 根据菲涅耳公式, 在尽量减少光的反射损失的前提下, 可确定器件所能容许的最大入射角.

在半导体中光电作用的分析中, 需要对一组输运方程进行求解; 这组输运方程包括空穴、电子连续性方程和泊松方程^[5], 表达式分别为公式(3)~(5).

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla J_p + G - R \quad (3)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla J_n + G - R \quad (4)$$

$$\nabla^2 \psi = -\frac{q}{\epsilon_0 \epsilon} (\Gamma + p - n) - \frac{1}{\epsilon} \nabla \psi \nabla \epsilon \quad (5)$$

其中, J_p , J_n 分别为空穴和电子电流密度; G 为产生率; R 为复合率; ψ 是静电势, Γ 是有效掺杂浓度, 定义为施主浓度与受主浓度之差. 在模拟计算中, 复合项忽略了与隧穿相关的产生复合, 仅仅考虑与热相关的, 即 SRH 复合、俄歇复合、辐射复合可分别写为^[6]:

$$R^{SRH} = A(np - n_i^2), R^{Auger} = (C_n n + C_p p)(np - n_i^2), R^{Rad} = B(np - n_i^2). \quad (6)$$

2 结果与讨论

本文主要研究入射光经表面为斜面的衬底进入

MCT 器件的问题, 其原理简图如图 2(a) 所示. MCT 器件的组分为 0.22, 在 77K 时, 可以计算得到折射率 $n_3 = 3.53$, 空气的折射率 $n_1 = 1$. 图 2(b) 显示了入射角 $i = 0$ 时, 进入 MCT 内的光强与衬底折射率 n_2 之间的关系曲线; 在计算中忽略了材料折射率随入射光波长变化的影响. 由曲线可知, 在 n_1 和 n_3 确定的情况下, 进入 MCT 的光强与衬底的折射率有很大关系, 并存在峰值. 图 2(c) 显示了, 选择 CdTe ($n_2 = 2.74$) 作为衬底材料时, 进入 MCT 的光强与入射角 i 的关系曲线. 从图中可以看出, 当入射角 $i < 40^\circ$, 进入 MCT 的光强几乎不随 i 变化; 而当入射角 $i > 40^\circ$ 时, 光强急剧减小; 因此, 可以认为该器件所能容许的最大入射角不能超过 40° , 这是微透镜设计的一个原则.

表1 模拟用三元阵列的材料和结构参数

Table 1 The parameter of three-pixels array

组分 x	0.22
温度	77(K)
SRH 寿命	10(ns)
N 区掺杂	$1 \times 10^{17} (\text{cm}^{-3})$
P 区掺杂	$9 \times 10^{15} (\text{cm}^{-3})$
N 区厚度	1(μm)
材料厚度	10(μm)
N 区宽度	30(μm)
元中心距	50(μm)
衬底厚度	30(μm)

图 3(a) 为模拟用三元阵列的结构示意图, 其材料及结构参数列在表 1. 模拟计算了一束宽度为 2 微米, 波长为 9 微米的光束以零入射角照在阵列中间像元不同位置时 3 个像元的光响应率, 图 3(b) 显示了模拟计算结果. 由图可知, 当光束照在中间像元边界处时, 在自身像元产生的响应率仅为当光束照在中间位置时的 50% 左右; 而与之对应的是, 在相邻像元产生了几乎相同大小的光响应, 即光串音接近 1. 因此, 可以认为光束位置越靠中间, 在自身像元产生的光响应越大, 对相邻像元的光串音越小.

根据图 3(b) 可以看出相对响应率大于 95% 的条件为 $x < 10$, x 为与像元中心位置的距离; 因此得到微透镜设计的另一个原则: 将入射光汇聚到距离像元中心位置小于 10 微米的区域内.

根据上面得到的微透镜设计的两个原则, 结合像元中心距、材料厚度以及介电常数 n_1 , n_2 和 n_3 , 可以给出衬底几何结构的设计参数: 厚度 40 微米, 微透镜的表面曲率 40 微米; 其三元阵列的结构示意

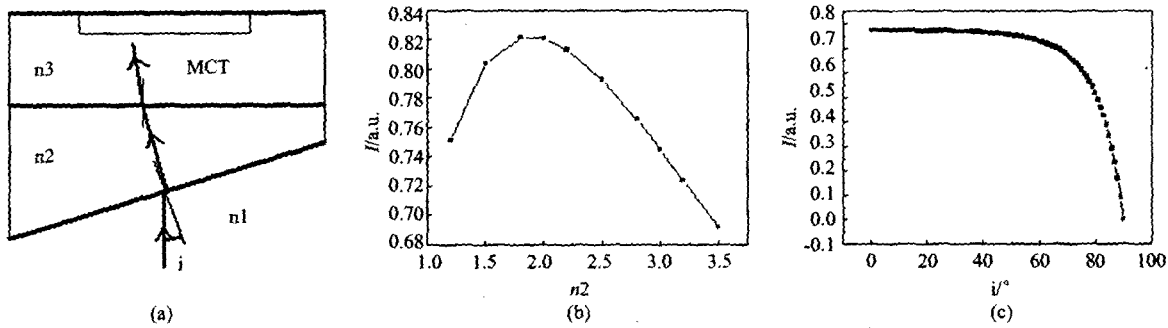


图2 (a)入射光经表面为斜面的衬底进入 MCT 器件的原理简图;(b)入射角 $i=0$ 时,进入 MCT 内的光强 I 与衬底折射率 n_2 之间的关系曲线;(c) CdTe ($n_2=2.74$) 作为衬底材料时,进入 MCT 的光强 I 与入射角 i 的关系曲线
Fig. 2 (a) The sketch of MCT device with a slope; (b) when $i=0$, the intensity of light into MCT vs the refractivity n_2 of the substrate; (c) when the material of substrate is CdTe ($n_2=2.74$), the intensity of light into MCT vs the angle of incidence i

图如图 4(a) 所示. 为对比, 我们也给出了未经任何修改的器件结构(图 4(b)) 以及另外两种稍做修改的器件结构: 10 微米半径的圆弧倒角(图 4(c)) 和直角边长为 10 微米的 45° 直线倒角(图 4(d)).

在设计计算中, 将入射光分为 n 束光束(在本文的计算中取 $n=500$), 根据图 4 给出的器件结构可以得到各束光经衬底折射以后进入 MCT 层的位置; 然后根据图 3(b) 给出的位置与相对响应率关系曲线进行线性插值求得各位置的相对响应率, 以及根据光强随入射角的变化规律(图 2(c)) 求得各光束的相对光强; 使用求得的相对响应率和相对光强对各束光进行加权平均, 最终我们可以获得该种器结构的相对响应率, 见表 2. 表中, R 为自身像元相对响应率, R_n 为相邻像元的相对响应率, $C=R/R_n$ 为光串音. 从表 2 中, 根据性能优劣排序得到: $(d) > (c) > (b)$.

4 种不同结构的设计计算结果

表 2 Results of four kinds of structures from design calculations.

结构	R	R_n	C
(a)	0.75837	0.00888	1.17%
(b)	0.65199	0.05575	8.55%
(c)	0.72455	0.01997	2.76%
(d)	0.74428	0.01324	1.78%

当注意的是, 在计算中使用了下列几个假设:

1) 认为被表面或界面反射后的那部分光不二次反射或折射后进入 MCT 层; (2) 认为相对响应率与进入 MCT 层时的位置有关, 而与进入后的角度无关; (3) 认为 500 束光线同时施加的光响应等于它们分别施加时产生的光响应之和. 对于假设一, 衬底与 MCT 界面的反射

光所占比例几乎可以忽略不计, 因此该假设在计算中的影响主要来自空气与衬底界面的反射: 当界面倾斜到一定角度时, 被反射的那部分光入射到邻近元的空气与衬底界面, 经折射后进入邻近元的 MCT 层. 因此假设一使得计算的光串音偏小. 对于假设 2, 当光斜入射进入 MCT 层并向元中心汇聚时, 由于光在 MCT 中被吸收的路程增加, 因此在自身和邻近元的光响应均增加, 但由于向中心汇聚的原因, 在自身增加的光响应所占比例将大于在邻近元增加的光响应所占比例, 所以假设二最终导致计算的光串音偏大. 对于假设 3, 从后面的模拟结果来看, 此假设也使得计算的光串音偏大.

在软件模拟计算中, 仅仅对中间像元施加光照, 光波长 9 微米, 光强为 $1\text{W}/\text{m}^2$, 器件参数除衬底结构外均来自表 1. 计算结果见表 3. R_0, R_1 和 R_2 依次为图中由左至右各元的光响应率; $C_{01} = R_0/R_1, C_{21} = R_2/R_1$ 分别表示在左边像元和右边像元引起的光串音. 可以注意到, 所有四种结构的模拟计算都得到右像元的光串音大于左像元的光串音. 这是因为在右像元的右边引入了公共电极, 从而改变了少数载流子的分布, 相应地也改变了电子电流的分布^[7]. 在这里, 我们使用左元的结果与设计计算的结果进行对比. 从表 3 给出的计算结果中, 我们可以得到与表 2 一致的性能排序. 尽管从光串音的数值上看来, 设计计算结果与模拟计算结果并不相同, 但其相对误差均小于 65%, 所以不妨碍我们得到半定量的结论. 然而, 该设计方法所需要的计算机计算时间要比采用模拟软件计算所需时间快 2~3 个数量级(计算一次的时间为 3~5 秒), 所以应用本设计方法使得计算机的直接优化成为可能. 而传统的模拟方法由于时间较长,

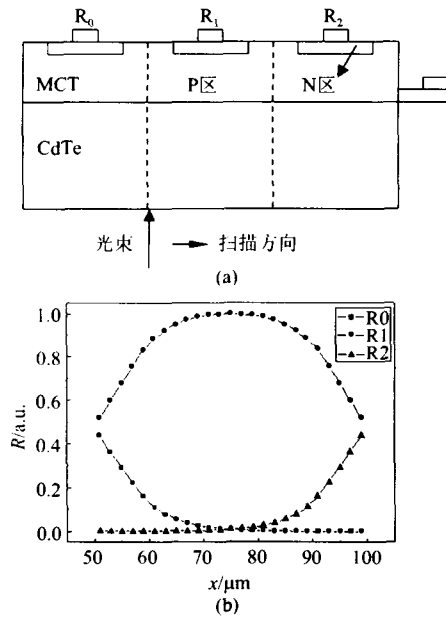


图3 宽度为2微米的光束扫描三元阵列的中间像元时的模拟计算。(a)模拟用三元阵列的结构示意图;(b)计算得到各元的相对响应率与扫描位置的关系曲线
Fig. 3 The scanning simulations of three - pixels array with 2mm-width light beam. (a) the sketch of three-pixels array (b) the relative response of three pixels vs the incident position

因此,该设计方法对结构的优化设计具有良好的指导作用.

表3 4种不同结构的模拟计算结果

Table 3 Results of 4 kinds of structures from simulation calculations

结构	R ₀ (A/W)	R ₁	R ₂	C ₀₁	C ₂₁
(a)	0.0379 7	3.633 4	0.0406 6	1.05%	1.12%
(b)	0.173 5	3.315 9	0.175 9	5.23%	5.3%
(c)	0.0982 8	3.490 2	0.101 2	2.82%	2.9%
(d)	0.083 2	3.525 2	0.0857 4	2.36%	2.43%

我们可以使用上述的3个假设来解释设计计算结果与模拟计算结果在数值上的不同.对于(a)结构,由于空气与衬底间界面斜度较小,被反射的光不可能进入MCT层,假设一对计算的影响忽略不计;因此,在假设二和假设三的作用下,设计计算偏大.对于(b)结构,假设一和假设二均可忽略,假设三使得设计计算偏大.对于(c)和(d)结构,尽管假设二和假设三都不能忽略,但由于空气与衬底间界面斜度较大,假设一的影响成为主导,因此设计计算的光串音偏小.

综上,无论是从设计计算结果还是从模拟计算

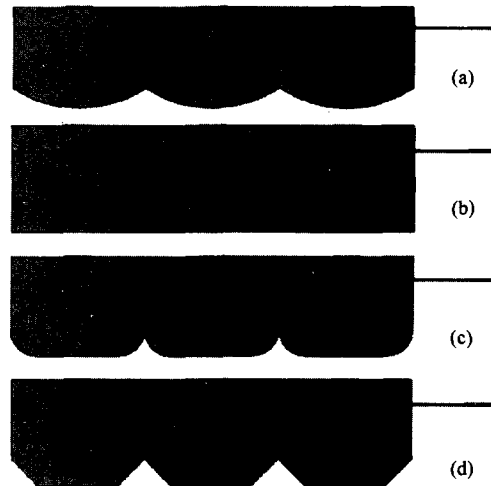


图4 用于计算的4种三元阵列的结构示意图
Fig. 4 The sketches of four kinds of three-pixels array

结果来看,相对与未做任何修改的结构(b),其它3种结构都得到了更大的响应率和更小的光串音;而其它3种结构中,又以经过设计得到的结构(a)的性能更为优越,光响应率提高了9.6%,而光串音则从5.23%减小到1.05%.

光串音的物理原因是少子的扩散,光串音的大小与少子扩散长度密切相关.在模拟中,少子的迁移率可以根据附录给出的公式求得,因此只要知道少子寿命也就得到了少子扩散长度.对于目前的p型MCT材料,少子寿命一般在10~100ns量级.表4对比了少子寿命分别为10ns、50ns和100ns时,结构(a)和结构(b)的光串音.

表4 不同少子寿命下,结构(a)和结构(b)的光串音模拟结果对比

Table 4 Comparison on crosstalk of structures (a) and (b) for various minority carrier lifetimes from simulation calculations

	10ns	50ns	100ns
结构(a)	1.05%	1.52%	1.58%
结构(b)	5.23%	6.05%	6.15%
两者之比	20%	25.1%	25.7%

由表4可看出,随少子寿命的增加,两种结构的光串音均增大;优化结构(a)减小光串音的效果也稍稍有所降低:少子寿命为10ns时,优化后的结构(a)的光串音为未优化结构(b)的20%;而少子寿命为100ns时,则上升到25.7%.另外,光串音的大小还与器件的N区宽度,像元中心距,外延层厚度,

(下转 337 页)

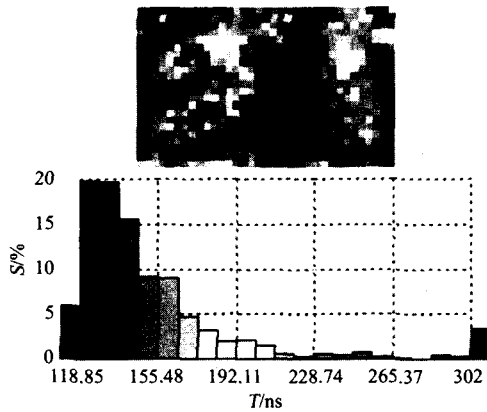


图9 300 K 时 p-InP/n-InGaAs/n-InP 双异质结中寿命 T 分布图

Fig. 9 The lifetime map and distribution in p-InP/n-InGaAs/n-InP DH at 300 K

W^{-1} , 焦平面响应的不均匀性为 18.34%。我们认为外延材料的不均匀性和钝化效果是引起响应不均匀性的主要原因, 所以必须进一步提高材料的均匀性, 并且改进器件的钝化效果, 尤其是台面的侧面钝化。

(上接 332 页)

以及入射光波长和强度等参数相关, 定量地确定它们之间的关系需要进一步的研究。

3 结论

本文在理论上验证了在平面结型 MCT 焦平面阵列上应用微透镜的可行性, 提出了微透镜结构参数的设计思路。根据该设计思路设计了组分为 0.22 的 MCT 三元阵列的微透镜结构, 并利用器件模拟软件对 4 种不同结构的器件进行了光响应模拟计算。设计计算结果与模拟计算结果定性地给出了一致的结论。理论上证明了微透镜的设计能增大器件的光响应率, 同时大大降低了元与元之间的光串音。模拟计算结果表明, 少数寿命为 10ns 时, 经优化设计后的结构获得了更为优越的性能, 相比未经任何修改的结构, 光响应率提高了 9.6%, 而光串音则从 5.23% 减小到 1.05%。随少数寿命的增加, 光串音增大; 优化结构减小光串音的效果稍稍有所降低。少数寿命为 10ns 时, 优化后的结构 (a) 的光串音为未优化结构 (b) 的 20%; 而少数寿命为 100ns 时, 则上升到 25.7%。

致谢 感谢上海新思科技公司袁海江博士和夏仲平

REFERENCES

- [1] ZHANG Yong-Gang, GU Yi, ZHU Cheng, *et al.* Fabrication of short wavelength infrared InGaAs/InP photovoltaic-detector series [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张永刚, 顾溢, 朱诚, 等. 短波红外 InGaAs/InP 光伏探测器系列的研制. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(1): 6—9.
- [2] Kozlowski L J, Tennant W E, Zandian M, *et al.* SWIR staring FPA performance at room temperature [J]. *SPIE*, 1996, **2746**: 93—100.
- [3] Moy J P, Hugon X, Chabbal J, *et al.* 3000 InGaAs photodiode multiplexed linear array for the spot 4 SWIR channel [J]. *SPIE*, 1989, **1107**: 137—151.
- [4] JIA Jia, CHEN Gui-Bin, GONG Hai-Mei, *et al.* Study on the junctions of SWIR HgCdTe photo diodes at room temperature with laser beam induced current [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (贾嘉, 陈贵宾, 龚海梅, 等. 室温短波碲镉汞结区的 LBIC 方法研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(1): 11—14.
- [5] Olsen G H, Joshi A M, Mykiety E, *et al.* Room-temperature InGaAs arrays for 1.0—1.7 μm [J]. *SPIE*, 1989, **1107**: 188—193.
- [6] Zemel A, Gallant M. Carrier lifetime in InP/InGaAs/InP by open-circuit voltage and photoluminescence decay [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**: 1094—1099.

博士在软件应用上给予的帮助和指导。

REFERENCES

- [1] YE Zhen-Hua, HU Xiao-Ning, ZHANG Hai-Yan, *et al.* Study of dark current for mercury cadmium telluride long-wavelength photodiode detector with the different structures [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华, 胡晓宁, 张海燕, 等. 不同结构的碲镉汞长波光伏探测器的暗电流研究. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(2): 96—90.
- [2] YE Zhen-Hua, WU Jun, HU Xiao-Ning *et al.* Study of HgCdTe p^+ -on-n long-wavelength heterojunction detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华, 吴俊, 胡晓宁, 等. 碲镉汞 p^+ -on-n 长波异质结探测器的研究. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(5): 423—426.
- [3] Antoni Rogalski. Infrared detectors; status and trends [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, **27**: 59—210.
- [4] Kozlowski L J, Vural K, Luo J, *et al.* Low-noise infrared and visible focal plane arrays [J]. *Opto-Electronics Review*, 1999, **7**: 259—269.
- [5] Jozwikowska A, Jozwikowski K. Generation-recombination effects on dark currents in CdTe-passivated midwave infrared HgCdTe photodiodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**: 014504.
- [6] Lopes VC. Minority carrier lifetime in mercury cadmium telluride [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 1993, **8**: 824—841.
- [7] Ashok Sood, Jim Egerton, Yash Puri, *et al.* Design and development of multi-color detector arrays [J]. *SPIE*, 2004, **5564**: 27—33.