

· 光电工程系统技术 ·

## 一种旋绕型频率选择表面的传输特性分析

强海霞, 蒋立勇, 李相银

(南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:**利用基于矩量法的电磁分析软件 Ansoft Designer 研究了一种新的旋绕型双方环频率选择表面(new convoluted double square loop frequency selective surface, 简称 NCDSL FSS)的传输性能. 结果表明, 该结构对入射电磁波的入射角、极化方式等不灵敏, 比经典 CDSL FSS 受栅瓣影响小; 通过调节其凹槽深度, 两频带间隔可围绕单元尺寸、阵列周期均相同的传统同心双方环频率选择表面(double square loop frequency selective surface, 简称 DSL FSS)的频带间隔双向调节, 这是 CDSL FSS 无法做到的; 而且 NCDSL FSS 高频谐振点处的  $-0.5$  dB 相对反射带宽也总是比 CDSL FSS 和 DSL FSS 的大. 因此该结构是一种简单且性能较优的频率选择器件.

**关键词:**频率选择表面; 矩量法; 旋绕型

**中图分类号:** TP211<sup>+</sup>.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2009)01-0009-04

## Transmission Characteristics of a Convoluted Frequency Selective Surface

QIANG Hai-xia, JIANG Li-yong, LI Xiang-yin

(School of Science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Ansoft Designer software package based on Method of Moment is used to analyze a New Convoluted Double Square Loop Frequency Selective Surface (NCDSL FSS). The results show that such structure is insensitive to the incident angle and the polarization of the incident electromagnetic wave. Compared to the CDSL FSS, the performance of NCDSL FSS is less influenced by the grating lobe. Unlike CDSL FSS, NCDSL FSS has the ability of bidirectional tuning the band spacing based on the Double Square Loop Frequency Selective Surface (DSL FSS) with the same unit cell size and the same array periods. Furthermore, the  $-0.5$  dB relative reflection bandwidth at the higher resonance of NCDSL FSS is always larger than that of CDSL FSS and DSL FSS. Thus NCDSL FSS is a new simple frequency selective structure with higher performance.

**Key words:** frequency selective surface; method of moment; convoluted

近年来, 周期结构, 诸如频率选择表面 (frequency selective surface, 简称 FSS)、光子带隙材料 (photonic bandgap, 简称 PBG) 等由于其具备控制电磁波传输的能力而受到越来越多学者的重视并展开了一系列的研究. 其中 FSS 是由周期性排列的金属贴片单元, 或者金属屏上周期性的开孔单元构成的二维滤波结构, 其在微波、红外甚至光波段都有着广泛的应用, 例如雷达天线罩<sup>[1, 2]</sup>、多频天线的副反射器<sup>[2]</sup>、微波吸收材料<sup>[3]</sup>, 远红外激光输出耦合器<sup>[4]</sup>、

滤波器<sup>[5]</sup>及倍频器<sup>[6]</sup>等等. 随着微波通信与工程技术的发展, 小型集成化、多频工作器件的需求日益增加. 例如, 美国国家宇航局在 Cassini 计划中的科研和数据通信环路需要采用 S、X、Ku 和 Ka 多种微波频率, 于是提出一种带有四频段 FSS 副反射面的高增益天线<sup>[2]</sup>. 多频 FSS 在卫星通信系统中的使用, 促使对多频 FSS 的设计和分析展开更广泛更深入的研究, 力求不同电磁环境下 FSS 的透射性能均较为稳定, 且工作频带间隔 (即各谐振频率之差,

收稿日期: 2009-01-04

作者简介: 强海霞 (1982-), 女, 江苏金坛人, 博士研究生, 主要从事光子晶体、微波光子晶体、频率选择表面等方面的研究.

$f_{resonance2} - f_{resonance1}$ )大小根据需求可以方便调节。

至今多频 FSS 已有多样的设计,主要有多层 FSS<sup>[7, 8]</sup>,分形 FSS<sup>[9-12]</sup>和多环 FSS<sup>[13-16]</sup>及其他类型等<sup>[17, 18]</sup>。多层 FSS 可以拓宽工作带宽,但增加了整个器件的体积和质量。分形 FSS 因其结构上的自相似性而具备多频特性。分形 FSS 的各谐振频率之比与单元分形比例因数近似相等,不足之处是各频段之间间隔无法任意改变。多环 FSS 单元大多为同心圆环或者方环结构,每一个谐振频率对应于一个独立的环,改变各环的周长可以很容易增加或减小频带间隔,然而此间隔相对较大。当要求该间隔减小时,相邻两环之间的间隙就要相应减小,这样会给制备工艺提出挑战。

E. A. Parker 将传统同心双方环 FSS<sup>[14]</sup>(double square loop frequency selective surface,简称 DSL FSS)的内环各边中心往环中心凹陷形成旋绕形状(即凹槽),提出了一种经典的旋绕型双方环 FSS<sup>[15, 16]</sup>(convoluted double square loop frequency selective surface,简称 CDSL FSS)。该凹槽使导体有效电长增加,从而降低了谐振频率,减小了频带间隔,降低了 FSS 对电磁波入射角和极化方式的灵敏度,减小了栅瓣的影响,解决了小尺寸给制备技术带来的困难<sup>[19-22]</sup>。为了满足传输性能要求,多在改进旋绕型 FSS 单元形状,使得结构越来越复杂<sup>[21-22]</sup>,制备越来越困难。对此在不改变结构复杂性前提下,对原结构作改进,提出了一种新的旋绕型双方环 FSS(new convoluted double square loop frequency selective surface,简称 NCDSL FSS),详细研究了其传输性能。

## 1 结构与参数设置

NCDSL FSS 单元结构如图 1a 所示,图 1a 中黑色部分即为金属贴片。将该单元印制在铜箔包敷的 Rogers RT/duroid 5 850 衬底上,形成单层无限周期平面 FSS。介质衬底厚 1.575 mm,相对介电常数  $\epsilon_r = 2.2$ ,损耗因数  $\tan\delta = 0.0009$ 。该单元结构参数设置为:周期  $p_x = p_y = p = 7.15$  mm,四角凹槽深  $L = 1.909$  mm,槽宽  $L_3 = 0.283$  mm,外环外边长  $L_1 = 6.831$  mm,内环外边长  $L_2 = 5$  mm,内环和外环环

宽均为  $W = 0.566$  mm。图 1 中也给出了 CDSL FSS 和 DSL FSS 的单元,其中  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、环宽  $W$ 、周期  $p$  以及所用的介质衬底及其电参数与 NCDSL FSS 的完全相同,CDSL FSS 单元的凹槽深度  $L$  取为  $L = 0.7$  mm,这样图 1a 和图 1b 的谐振频率点位置基本相同,便于比较分析。

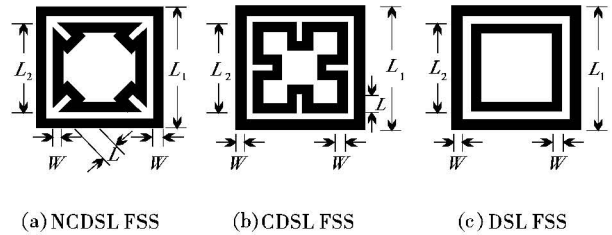


图 1 双频 FSS 单元图

以上结构均在 Ansoft Designer 中进行计算分析,这是一种基于矩量法,并结合周期性边界条件的全波分析软件。相关分析参数为:FSS 单元排列方式为正方形栅格排列;入射波入射角为平面波与轴夹角  $\varphi = 0^\circ$ ,与  $z$  轴夹角  $\theta$  分别为  $0^\circ$ (垂直入射)、 $30^\circ$ 入射、 $45^\circ$ 入射;扫描频率范围为 2~24 GHz。

## 2 数值分析和结果

### 2.1 NCDSL FSS 对入射角和极化方式的稳定性

图 2 给出了不同极化波以不同入射角  $\theta$  入射时 NCDSL FSS 的传输曲线。由图 2 可知,各极化波对入射角均具有较好的稳定性。而且,如图 3 所示,当入射角增至  $45^\circ$ 时,NCDSL FSS 仍具有较好的极化稳定性。综合来说 NCDSL FSS 对入射角和极化方式等不灵敏。

### 2.2 栅瓣对频带的影响

一般来讲,入射角越大,栅瓣对工作频带影响越大。旋绕结构使谐振频率往低频方向移动,能够增大工作频带与栅瓣之间的距离,减小栅瓣破坏影响。从图 3 发现,NCDSL FSS 的栅瓣相对于 CDSL FSS 来说处于更高频率处,TE 波尤为明显,说明其减小栅瓣影响的能力要强于 CDSL FSS。

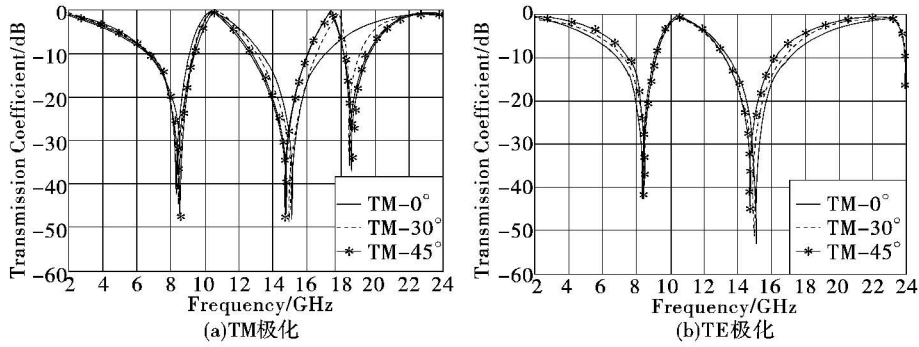


图 2 不同入射角时 NCDSL FSS 的传输曲线

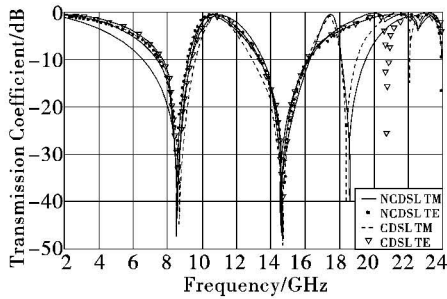


图 3  $\theta = 45^\circ$  入射时各 FSS 的传输曲线

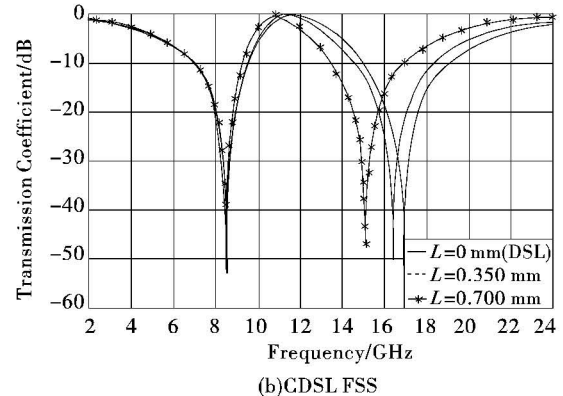
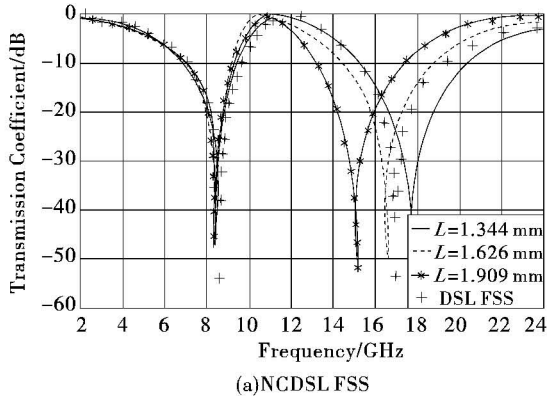


图 4 平面波垂直入射时,不同  $L$  情况下各 FSS 的传输曲线

当  $L$  逐渐递减,如减至 1.344 mm 时,从等效物理长度分析,其等效周长也减小,但仍大于 DSL FSS 单元内环的等效周长.而此时如图 4a 所示 NCDSL FSS 的高频谐振点  $f_{r2}$  却大于 DSL FSS 的  $f_{r2}$ .也就是说,内环凹槽深度减小到一定程度时,内环有效电长与其物理周长也失去了一般的对应关系,以 DSL FSS 的频带间隔为临界值,NCDSL FSS 的频带间隔可大于或者小于该临界值.而逐渐减小

### 2.3 槽深 $L$ 对带宽的影响

NCDSL FSS 单元凹槽的深度  $L$  直接影响着整个结构的频带特性.如图 4 所示, $L$  不断增大,低频谐振点  $f_{r1}$  基本保持不变,而内环由于有效电长增大使得高频谐振点  $f_{r2}$  向低频方向移动,两谐振频点之间的传输频点  $f_T$  也向低频方向微小移动.因此,频带间隔  $(f_{r2} - f_{r1})$  逐渐减小.另外,工作频带与栅瓣之间的距离也增大了.要强调的是  $L$  改变单位长度,NCDSL FSS 的  $f_{r2}$  变化程度比 CDSL FSS 的大得多.

CDSL FSS 的凹槽深度同样能增大频带间隔,但由于结构限制(当凹槽深度逐渐减小至零时,结构形状就演变为 DSL FSS),该频带间隔不会大于上述临界值<sup>[16]</sup>.以上说明,NCDSL FSS 能够围绕临界值双向调节频带间隔.

旋绕结构的引进往往会使得相对带宽减小,这也是 CDSL FSS 的一个缺憾<sup>[15]</sup>.由表 1 得知,虽然

NCDSL FSS 在  $f_{r1}$  处相对反射带宽也减小了,但是  $f_{r2}$  处的相对带宽均比 DSL FSS 和 CDSL FSS 的大. 说明新结构可以展宽高频工作带宽.

最后需要说明的是,频带间隔越大,与栅瓣的距离也相对越近,FSS 的传输性能会有所退化. 故 NCDSL FSS 频带间隔可以向大于上述临界值方向调节,但调节范围也受到一定限制,此时就只能用于电磁波较小角度入射情况.

表 1 不同  $L$  情况下 FSS 最大反射、透射频率值及相应带宽 ( $\theta=0^\circ$ )

	$L/(mm)$	$BW_1/f_{r1}$ /(%)	$BW_2/f_{r2}$ /(%)
NCDSL	1.344	28.32	28.39
	1.626	27.50	27.22
	1.909	26.10	25.41
CDSL	0(DSL)	31.01	24.73
	0.350	30.31	24.21
	0.700	28.70	23.27

### 3 结 论

利用基于矩量法的 Ansoft 软件研究了一种新的旋绕型双方环频率选择表面 NCDSL FSS 的传输性能. 该结构对入射电磁波的入射角、极化方式等不灵敏,工作频带受栅瓣影响更小,具有较优的工作稳定性;与 CDSL FSS 不同的是,NCDSL FSS 两频带间隔可围绕相同结构尺寸的 DSL FSS 的频带间隔双向调节,而 CDSL FSS 由于自身结构演变限制无法越过这个临界值;与 CDSL FSS 另一个不同点是,NCDSL FSS 展宽了高频谐振点处的工作带宽.

#### 参考文献

[1] Munk B A. Frequency selective surfaces: Theory and Design[M]. New York: John wiley, 2000:227-278.  
 [2] Wu T K. Frequency selective surface and grid array[M]. New York: John wiley, 1995:147-194.  
 [3] Liu J C, Liu C Y, Kuei C P, et al. Design and analysis of broadband microwave absorber utilizing FSS screen constructed with circular fractal configurations[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2006, 48(3): 449-453.

[4] Weitz D A, Skocpol W J, Tinkham M. Capacitive-mesh output couplers for optically pumped far-infrared lasers [J]. Optics Letters, 1978, 3(1):13-15.  
 [5] Tomaselli V P, Edewaard D C, Gillan P, et al. Far-infrared bandpass filters from cross-shaped grids[J]. Applied Optics, 1981, 20(8): 1361-1366.  
 [6] Biber S, Günther O, Bozzi M, et al. A Frequency Selective Surface for Harmonic Suppression in THz-Multipliers[J]. Proceedings of the German Microwave Conference (GeMiC), 2005:132-135.  
 [7] Huang J, Wu T K, Lee S W. Tri-band frequency selective surface with circular ring elements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(2): 166-175.  
 [8] Vardaxoglou J C, Hossainzadeh A, Stylianou A. Scattering from two-layer FSS with dissimilar lattice geometries [J]. Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings H, 1993, 140(1): 59-61.  
 [9] Romeu J, Rahmat-Samii Y. Dual band FSS with fractal elements[J]. Electronics Letters, 1999, 35(9):702-703.  
 [10] Romeu J, Rahmat-Samii Y. Fractal FSS: a novel dual-band frequency selective surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(7):1097-1105.  
 [11] Bossard J A, Werner D H, Mayer T S, et al. The design and fabrication of planar multiband metallodielectric frequency selective surfaces for infrared applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(4): 1265-1276.  
 [12] Holakouei R, Nourinia J, Ghobadi C. A design approach for a dual-polarized, dual-band-reject frequency selective surface using a new Fractal element[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2007, 61: 568-579.  
 [13] Parker E A, Hamdy S M A, Langley R J. Arrays of concentric rings as frequency selective surfaces[J]. Electronics Letters, 1981, 17(23): 880-881.  
 [14] Langley R J, Parker E A. Double-square frequency-selective surfaces and their equivalent circuit[J]. Electronics Letters, 1983, 19(17): 675-677.  
 [15] Chuprin A D, Parker E A, Batchelor J C. Convolutional double square: single layer FSS with close band spacings [J]. Electronics Letters, 2000, 36(22):1830-1831.  
 [16] Luo G Q, Hong W, Tang H J, et al. Dualband frequency-selective surfaces using substrate-integrated waveguide technology [J]. Microwaves, Antennas & Propagation, IET, 2007,1(2): 408-413.

为考察此方法对系统视场的扩大能力,设置视场角  $2\omega = 0.21^\circ$ ,再次优化后系统 MTF、点列图和波前 RMS error vs. field 如图 5 所示.

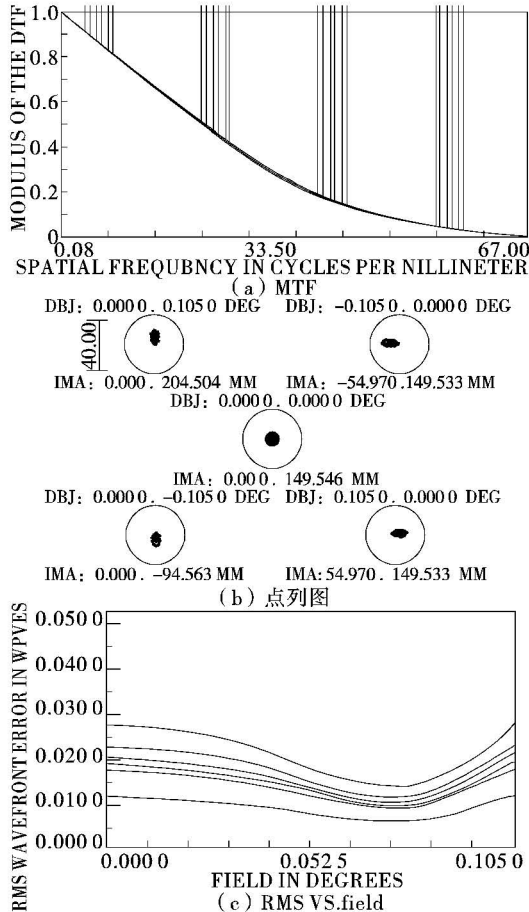


图 5 扩大视场后系统

同共轴偏瞳两镜系统相比,次镜偏心和倾斜后的系统有以下特点:

(1)在相同视场内,次镜偏心和倾斜处理之后,系统像质提高很多.MTF 达到衍射极限,点列图也

变小.在 Y 方向  $0.06^\circ$  视场,原系统 RMS 接近  $0.045\lambda$ ,而偏心与倾斜后系统 RMS 不到  $0.016\lambda$ .

(2)将 Y 方向视场角增大到  $2\omega = 0.21^\circ$ ,各视场 MTF 曲线基本达到衍射极限,点列图虽有所增大,但仍小于艾里斑.RMS 值不到  $0.03\lambda$ ,可以接受.

(3)光学系统像质提高,可留更多误差给加工与装调环节,使加工与装调公差相对放松.

### 3 结 论

上面的例子可以看出,通过对传统的偏瞳两反系统的次镜进行偏心和倾斜处理,可以有效提高系统成像质量,扩大视场.这种方法不引入辅助元件,保持了两反系统结构简单、元件较少的特点且消除了次镜对主镜的中心遮挡.由于次镜偏心、倾斜,使像面沿垂轴方有一定偏离,这些都会对加工和装调提出较高的要求.

对次镜进行偏心与倾斜的方法对于提高成像质量、增大视场的能力有限,要想在更大的视场获得更好的像质,必须引入辅助元件.

### 参考文献

- [1] Kevin Thompson. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry[J]. Opt. Soc., 2005, 22: 1389-1393.
- [2] Kevin Thompson. Practical methods for the optical design of systems without symmetry [J]. Spie, 1996, 2274: 2-12.
- [3] 杨新军,王肇圻,母国光,等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性[J]. 光子学报, 2005, 34 (11): 1658-1662.
- [4] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- [5] 吕保斌, 王肇圻, 母国光, 等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性[J]. 光子学报, 2005, 34 (11): 1658-1662.
- [6] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- [7] 吕保斌, 王肇圻, 母国光, 等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性[J]. 光子学报, 2005, 34 (11): 1658-1662.
- [8] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- [9] 吕保斌, 王肇圻, 母国光, 等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性[J]. 光子学报, 2005, 34 (11): 1658-1662.
- [10] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- [11] 吕保斌, 王肇圻, 母国光, 等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性[J]. 光子学报, 2005, 34 (11): 1658-1662.
- [12] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- [13] 吕保斌, 王肇圻, 母国光, 等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性[J]. 光子学报, 2005, 34 (11): 1658-1662.
- [14] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- [15] 吕保斌, 王肇圻, 母国光, 等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性[J]. 光子学报, 2005, 34 (11): 1658-1662.
- [16] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- [17] Kiermeier W, Biebl E. New dual-band Frequency Selective Surfaces for GSM frequency shielding[C]// European: Microwave Conference, 2007: 222-225.
- [18] Kim D H, Choi J I. Design of a Multiband Frequency Selective Surface[J]. ETRI Journal, 2006, 28(4): 506-508.
- [19] Parker E A, El Sheikh A N A. Convolved array elements and reduced size unit cells for frequency-selective surfaces[J]. Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings H, 1991, 138(1): 19-22.
- [20] Parker E A, El Sheikh A N A. Convolved dipole array elements[J]. Electronics Letters, 1991, 27(4): 322-323.
- [21] Parker E A, El Sheikh A N A, Lima A C de C. Convolved frequency-selective array elements derived from linear and crossed dipoles[J]. Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings H, 1993, 140(5): 378-380.
- [22] Barbagallo S, Monorchio A, Manara G. Small periodicity FSS screens with enhanced bandwidth performance [J]. Electronics Letters, 2006, 42(7): 382-384.

(上接第 12 页)