

doi:10.3788/gzxb20134207.0777

高效垂直耦合的光栅耦合器设计

武华^{1,2}, 郭霞¹, 韩明夫¹

(1 北京工业大学 电子信息与控制工程学院 光子器件研究实验室, 北京 100124)

(2 赣南师范学院 物理与电子信息学院, 江西 赣州 341000)

摘要:利用反射式光栅和分布布喇格反射镜的反射特性, 分别从光栅耦合器的侧面和底部对光进行高反射, 通过合理选取反射光栅和耦合光栅的间距使两组光栅的反射光实现相消干涉来减弱耦合光栅在实现垂直耦合时存在的负二阶反射, 从而设计出高效率垂直耦合的光栅耦合器. 采用本征模展开方法, 模拟计算了垂直耦合光栅耦合器的耦合效率随不同结构参量而变化的相关特性, 在绝缘体硅平面波导和单模光纤之间对波长 1 550 nm 的光获得了最高 89% 的耦合效率. 所得结果对实际垂直耦合光栅耦合器的制备具有一定参考价值.

关键词:光栅耦合器; 绝缘体硅; 本征模展开; 耦合效率

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)07-0777-5

Design of High Efficiency Grating Coupler for Vertical Coupling

WU Hua^{1,2}, GUO Xia¹, HAN Ming-fu¹

(1 Photonic Device Research Laboratory, Institute of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2 School of Physics and Electronic Information, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: A high-efficiency grating coupler is designed for vertical coupling between silicon-on-insulator waveguides and single-mode fibers. The reflection characteristics of reflector grating and distributed bragg reflector are employed to obtain a high reflection from the right side and bottom of the coupler. The reflected light is interfered destructively to reduce the negative second-order reflection by selecting a reasonable spacing between the reflector grating and the coupler grating when the coupler grating is in the vertical coupling. The coupler is optimized using eigenmode expansion-based simulations. The highest coupling efficiency of 89% at a wavelength 1 550 nm is achieved by simulation. The results provide some useful references for the fabrication of the actual vertical coupling grating coupler.

Key words: Grating coupler; Silicon-on-insulator; Eigenmode expansion; Coupling efficiency

0 引言

光栅耦合器是指通过光栅的衍射作用, 使衍射光耦合到光波导中进行传播, 可实现信号的实时上传和下载, 大大增强了系统的灵活性^[1-5]. 由于其是一种面耦合方式, 光栅面与光纤面的尺寸大小可以设计得很相近, 从而减小模斑失配所带来的耦合损耗. 垂直耦合的光栅耦合器通常利用光栅的负一阶

衍射效应实现垂直耦合, 但同时由于存在最强的负二阶反射, 向衬底方向的衍射和穿过光栅透射^[6-9], 导致垂直方向耦合效率的降低. 对于普通结构的光栅耦合器, 为了避免出现负二阶反射引起耦合效率降低, 通常需要将光纤相对光栅平面的垂直方向倾斜 10°左右^[3], 然而这就加大了器件封装、对准等的难度, 因此有必要进行垂直耦合的光栅耦合器的设计, 以减小器件封装的难度. X. Chen 等人^[10]通过

基金项目: 国家优秀青年科学基金(No. 61222501)和高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20111103110019)资助

第一作者: 武华(1979—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为半导体光电子器件及器件物理. Email: wh1125@126.com

导师(通讯作者): 郭霞(1974—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为半导体光电子器件及器件物理. Email: guo@bjut.edu.cn

收稿日期: 2013-03-18; 录用日期: 2013-04-09

在光栅前端引入啾啾光栅作为光栅耦合器的一部分来降低负二阶反射,以提高耦合效率,模拟结果获得最高42%的耦合效率,实验测量为34%;J. B. Yang等人^[11]采用二元闪耀光栅耦合器,通过二元量化的方法来近似获得连续表面浮雕结构光栅的闪耀效果,将衍射的中央主极大转移到某一级的干涉主极大上,使耦合输出的光能量集中到这一级,从而提高耦合效率,模拟结果获得最高65%的耦合效率;Roelkens G等人^[12]采用非对称光栅结构,在光栅结构的前端刻蚀一个额外槽作为反射镜来抑制负二阶反射,利用均匀光栅和非均匀光栅分别获得模拟结果最高65%和80%的耦合效率;B. Wang等人^[13]采用倾斜光栅的方法,解决光纤与平面波导之间在表面垂直入射耦合时存在的对称性问题,能单向耦合光到期望的波导方向上而抑制相反方向的耦合,利用均匀光栅和非均匀光栅分别获得模拟结果最高66.8%和80.1%的耦合效率。

本文在分析影响垂直耦合效率因素的基础上,利用耦合光栅的负一阶衍射效应实现了入射光的垂直耦合.利用反射式光栅对穿过耦合光栅的透射光进行高反射,利用Si/SiO₂组成的分布布拉格反射镜(Distributed Bragg Reflector, DBR)对衍射至衬底方向的光进行高反射,通过合理选取反射光栅和耦合光栅的间距,使两组光栅的反射光经过相消干涉从而消除或减弱负二阶反射,设计了一种用于绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)平面波导与单模光纤之间完全垂直耦合的光栅耦合器,通过优化光栅周期、槽深等参量,理论上在1550 nm波长处得到的最高耦合效率为89%。

1 计算方法和结构模型

本文基于本征模展开(Eigen Mode Expansion, EME)方法进行模拟^[14],在两波导界面处采用模式匹配方法.将光栅的周期性结构看作一系列沿 z 轴传播方向的两种芯层厚度交替的波导拼接而成,每段波导沿 z 方向折射率不变.无源情况下这些波导中存在的场分布具有如下形式

$$\begin{cases} E(x, y, z) = E(x, y) e^{-i\beta z} \\ H(x, y, z) = H(x, y) e^{-i\beta z} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)描述的是波导的本征模式, β 是本征模式的传播常量.在波导中存在有限个离散的导模和无限多个连续的辐射模,导模和辐射模一起构成一组完备正交基,在波导中的任意场分布都可写成前向传播本征模式和后向传播本征模式的线性组合,即

$$\begin{cases} E(x, y, z) = \sum_{k=1}^M (a_k^{(+)} e^{-i\beta_k z} + a_k^{(-)} e^{i\beta_k z}) E_k(x, y) \\ H(x, y, z) = \sum_{k=1}^M (a_k^{(+)} e^{-i\beta_k z} - a_k^{(-)} e^{i\beta_k z}) H_k(x, y) \end{cases} \quad (2)$$

式中, β_k 是第 k 个本征模式(导模或辐射模)的传播常量, $a_k^{(+)}$ 和 $a_k^{(-)}$ 分别表示前向传播本征模式和后向传播本征模式的幅值.对于线性介质,如果采用足够多的模式数目,展开式(2)可以看作是麦克斯韦方程的精确解。

图1是光栅耦合器的结构模型,为避免负二阶反射损耗,在SOI衬底的硅表面刻蚀耦合光栅的同时增加了反射光栅,为了方便器件制备,设计两组光栅的刻蚀深度相同.为降低耦合光栅向衬底方向的衍射损耗,在波导结构的底面增加Si/SiO₂反射镜,由于SiO₂和Si之间约为2.03的折射率差,每层的厚度取 $\lambda/4n$ (λ 为光在真空中的波长, n 为材料的折射率),即268 nm和111 nm,采用本征模展开方法,利用两对Si/SiO₂层建立仿真模型,对1550 nm波长的入射光的反射率达到95%.在结构模型中顶部和底部边界采用完美匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)边界条件,避免寄生的反射效应^[15].为了避免光纤端面的反射,模拟中在光栅上表面设置一个折射率匹配层(Index Matching Layer, IML)^[16].图1中显示的折射率是计算中采用的波长为1550 nm的材料折射率.光源从左边入射,设入射功率 P_{in} 归一化为1.在模拟计算中,首先计算整个结构的反射率 R 和透射率 T ,然后进行功率传输过程中场的计算和与光纤模式重叠的计算.为了计算耦合到光纤的耦合效率,我们使用光束直径是10.4 μm 的高斯光束来模拟光纤模式.与光纤的耦合效率、反射率、透射率分别定义为耦合进入光纤的光功率、经耦合光栅向左边反射回平面波导的光功率、通过光栅到达右边平面波导的光功率与最初输入平面波导的光功率的比值。

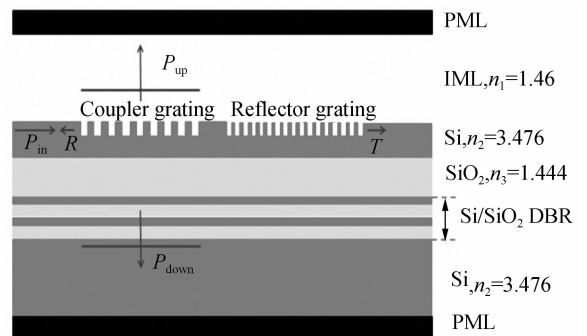


图1 模拟光栅耦合器的结构模型
Fig. 1 The structural model of grating coupler used in simulations

2 模拟结果和讨论

为提高垂直方向的耦合效率,首先对耦合光栅的关键参量,如顶部 Si 波导层的厚度 H 、光栅周期 Δ 、占空比 f 、刻蚀深度 h_1 进行了优化设计;然后模拟计算了 SOI 埋氧化层的厚度 h_2 对耦合特性的影响和反射光栅的参量对耦合特性的影响;最后优化了反射光栅和耦合光栅之间的间距值. 设中心波长 λ 为 1 550 nm,仅考虑 TE 偏振情况下的一维光栅.

为了提高耦合效率,埋氧化层厚度值需要合理选取. 模拟结果显示,耦合效率与埋氧化层厚度之间的关系呈周期性变化,在两个耦合效率最大值之间的间隔是半个波长,这种性质是由于直接向上衍射的光和在埋氧化层/衬底界面的向上反射光之间的干涉引起. 本文选取埋氧化层厚度的设计值为 1 350 nm,此厚度值下耦合效率处于周期性变化的峰值点.

2.1 耦合光栅参量对耦合特性的影响

根据光栅衍射的布喇格条件可以得出,当光栅周期 $\Delta = \lambda/n_{\text{eff}}$ 时,其中 n_{eff} 为波导的有效折射率,能够实现入射光偏转 90° . 根据平面波导的 TE 模式本征方程^[17]为

$$(n_2^2 - n_{\text{eff}}^2)^{1/2} \frac{2\pi H}{\lambda} = m\pi + \arctan\left(\frac{n_{\text{eff}}^2 - n_1^2}{n_2^2 - n_{\text{eff}}^2}\right)^{1/2} + \arctan\left(\frac{n_{\text{eff}}^2 - n_3^2}{n_2^2 - n_{\text{eff}}^2}\right)^{1/2} \quad (3)$$

式中 $n_1 = 1.46$, $n_2 = 3.476$, $n_3 = 1.444$,分别为折射率匹配液、Si 和 SiO_2 的折射率, m 为模阶数. 当 λ 取 1 550 nm 时,计算出一阶 TE 模式的波导层截止厚度是 242 nm,基于实际 SOI 晶片顶硅层的厚度考虑,取波导层厚度 220 nm,计算出光栅周期 $\Delta = 544$ nm. 但由于光栅刻槽的存在会使得耦合区域波导 TE 基模的有效折射率降低,因此,实际适用的耦合光栅的周期应略大于 544 nm. 垂直耦合

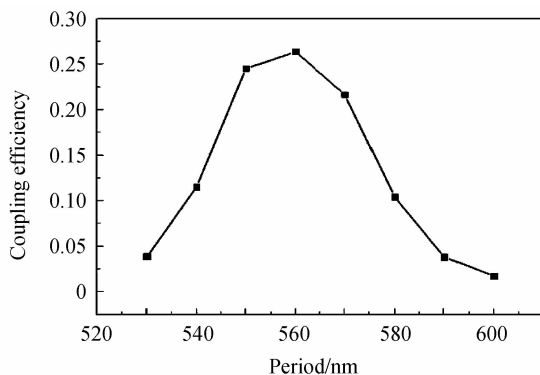
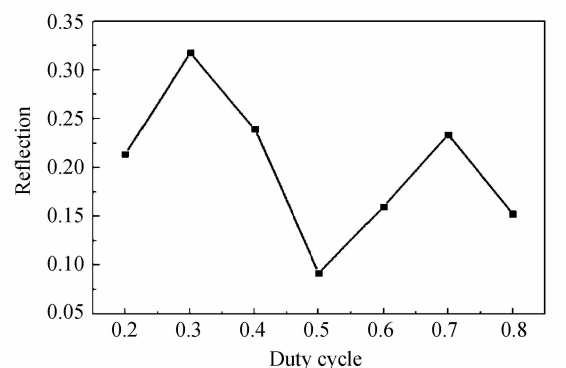


图2 没有反射光栅和底部 DBR 反射镜的 SOI 光栅耦合器在不同周期下的耦合效率

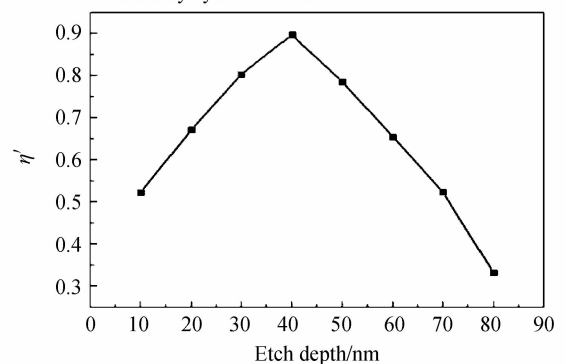
Fig.2 Coupling efficiency versus coupler grating period without the reflector grating and the DBR bottom mirror

时耦合效率与光栅周期的关系的模拟结果如图 2,最优化的 Δ 值为 560 nm,当 Δ 变大或者减小时耦合效率会明显降低.

在最优化的光栅周期下,耦合光栅的耦合效率偏低.这是由于存在负二阶反射光,光栅长度有限使得部分入射光来不及衍射就穿过耦合光栅的透射光、垂直向下的负一阶衍射光,采用本征模展开方法,在仿真中通过监测上述各方向的光功率,可以得出上述各因素依次引起耦合效率降低分别为 9%、49%和 13%. 在后续优化过程中,透射光通过在耦合光栅右侧附加反射光栅对其高反射使之再次被耦合光栅衍射;垂直向下的衍射光可以通过底部 DBR 反射镜对其进行高反射. 负二阶反射光可以利用反射光栅和耦合光栅的反射光经过相消干涉来减弱,但效果有限,应尽量使得耦合光栅的背反射光足够小. 模拟结果显示,光栅占空比对反射率有主要影响,图 3(a)显示了光栅周期和刻蚀深度分别为 560 nm 和 40 nm 时,对没有反射光栅和底部 DBR 反射镜的 SOI 光栅耦合器的耦合效率和反射率与光栅占空比的关系. 从图中可以看出占空比对反射率有主要影响,在占空比为 50% 时,反射率最小. 在通过相消干涉降低反射率后,虽然可以通过使用



(a) Reflection versus duty cycle for etch depth=40nm and duty cycle=0.2-0.8



(b) η' versus etch depth for period=560nm and duty cycle=0.5

图3 占空比和刻蚀深度对没有反射光栅和底部 DBR 反射镜的 SOI 光栅耦合器特性的影响

Fig.3 The influence of duty cycle and etch depth on the characteristics of the SOI grating coupler without the reflector grating and the DBR bottom mirror

侧面的反射光栅和底面的 DBR 反射镜使得向上的衍射光功率都可以超过 95%，但最终的耦合效率还受到向上衍射光模式分布与单模光纤模式匹配程度 η' 的限制， η' 定义为耦合进光纤的光功率与光栅向上衍射光功率的比值。模拟结果显示，光栅刻蚀深度对 η' 有主要影响，图 3(b) 显示了光栅周期和占空比分别为 560 nm 和 50% 时， η' 与光栅刻蚀深度的关系，在刻蚀深度为 40 nm 时， η' 具有最大值。光栅周期 560 nm，占空比 50%，刻蚀深度 40 nm，我们将使用这些值作为耦合光栅的设计值。

2.2 反射光栅参量对耦合特性的影响

反射光栅利用负一阶衍射来实现对耦合光栅透射光的反射。通过合理设计反射光栅的周期和占空比使其对 1550 nm 波长的光反射最强，且没有向上和向下的衍射级次存在，模拟后最优化的周期和占空比分别为 280 nm 和 50%，周期个数为 50，在 1550 nm 波长处反射率为 0.97，从 1532 nm 至 1570 nm 波段反射率均超过 0.9。

耦合效率与耦合光栅和反射光栅之间的间距的关系如图 4，可以看出二者之间的关系呈周期性变化，且二者关系非常敏感，间距值四分之一波长的误差将导致耦合效率从峰值降低接近 0。

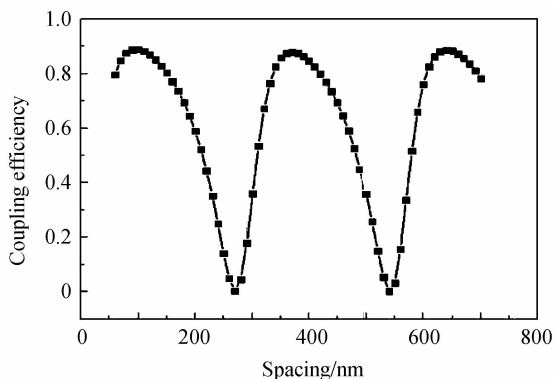


图 4 耦合光栅和反射光栅在不同间距下的耦合效率
Fig. 4 Coupling efficiency versus spacing between the coupler and reflector grating

2.3 光栅耦合器的耦合特性

反射光栅和耦合光栅之间间距值取 100 nm 时，光栅耦合器耦合效率与波长的关系如图 5 所示，在波长 1550 nm 处向左反射回平面波导的光低于 0.1%，经过反射光栅反射之后的透射光低于 0.5%，超过 97% 的光能向上衍射出去，因为向上衍射的光与光纤之间的耦合损耗，整个耦合效率为 89%。图 5 中内插图显示了耦合效率最高时光栅耦合器各层中的电磁场电场分量的分布，可以明显看到实现了向上垂直耦合，且几乎没有光耦合至 Si 衬底。

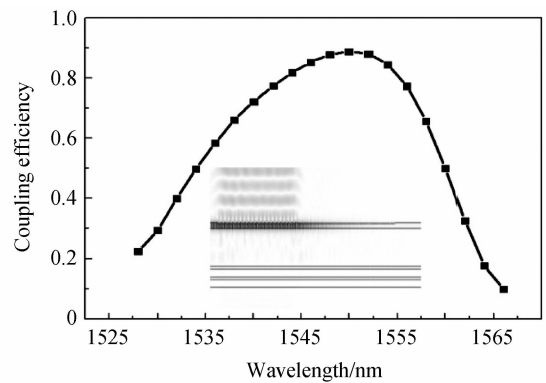


图 5 光栅耦合器耦合效率与波长的关系(内插图是在波长为 1550 nm 时光栅耦合器各层中的电磁波电场分量的分布)

Fig. 5 The coupling efficiency of the grating coupler versus wavelength (the inset shows the electric field component of electromagnetic wave in the layers of the grating coupler at wavelength 1550 nm)

3 结论

本文设计了用于单模光纤与 SOI 平面波导之间完全垂直耦合的光栅耦合器。模拟结果显示当在耦合光栅右侧增加一个反射光栅，在埋氧化层下面再使用一个 2 对 Si/SiO₂ DBR 反射镜时，利用耦合光栅的负一阶衍射效应可以实现入射光的垂直耦合，利用反射光栅可对穿过耦合光栅的透射光进行高反射，DBR 反射镜可对衍射至衬底方向的光进行高反射，合理选取反射光栅和耦合光栅的间距，可使两组光栅的反射光经过相消干涉从而减弱负二阶反射，理论上在 1550 nm 波长处得到的最高耦合效率为 89%。所得结果对实际垂直耦合光栅耦合器的制备具有一定参考价值。模拟结果显示由于向上的衍射光与光纤之间的耦合损耗限制了耦合效率，可以通过非均匀耦合光栅使得向上的衍射光模式分布更接近光纤模式，从而进一步提高耦合效率。

参考文献

- [1] LAERE F V, ROELKENS G, BAETS R, *et al.* Compact and highly efficient grating couplers between optical fiber and nanophotonic waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(1): 151-156.
- [2] ROELKENS G, VERMEULEN D, BAETS R, *et al.* High efficiency diffractive grating couplers for interfacing a single mode optical fiber with a nanophotonic silicon-on-insulator waveguide circuit [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(13): 131101-1-131101-3.
- [3] ZHOU Z P, YU L. Silicon photonic devices based on binary blazed grating [J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(9): 091708-1-091708-10.
- [4] SHI W, WANG X, CHROSTOWSKI L. Silicon photonic grating-assisted, contra-directional couplers [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(3): 3633-3650.

- [5] YANG J B, ZHOU Z P. Double-structure, bidirectional and polarization-independent subwavelength grating beam splitter [J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(6): 1494-1500.
- [6] ROELKENS G, VERMEULEN D, THOURHOUT D V, *et al.* Grating-based optical fiber interfaces for silicon-on-insulator photonic integrated circuits [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, **17**(3): 571-580.
- [7] WANG Wen-min, LIU Wen, MA Wei-dong. Novel compact low refractive index contrast silica-on-silicon AWG [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1137-1142.
王文敏, 刘文, 马卫东. 小尺寸低折射率差硅基二氧化硅阵列波导光栅 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(8): 1137-1142.
- [8] KONG Peng, LI Wen-hao, TANG Yu-guo, *et al.* Effect of recording parameters error on imaging performance of type I holographic concave gratings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 843-846.
孔鹏, 李文昊, 唐玉国, 等. I 型全息凹面光栅制作误差对光谱像的影响分析 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 843-846.
- [9] LI Jun-yi, AN Jun-ming, WU Yuan-da. Wide bandwidth low crosstalk triplexers based on silica AWG [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 205-209.
李俊一, 安俊明, 吴远大, 等. 基于硅基二氧化硅阵列波导光栅宽带低串扰单纤三向器 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(2): 205-209.
- [10] CHEN X, LI C, TSANG H K. Fabrication-tolerant waveguide chirped grating coupler for coupling to a perfectly vertical optical fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(23): 1914-1916.
- [11] YANG J B, ZHOU Z P, JIA H H, *et al.* High-performance and compact binary blazed grating coupler based on an asymmetric subgrating structure and vertical coupling [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(14): 2614-2616.
- [12] ROELKENS G, THOURHOUT D V, BAETS R. High efficiency grating coupler between silicon-on-insulator waveguides and perfectly vertical optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(11): 1495-1497.
- [13] WANG B, JIANG J, NORDING G P. Compact slanted grating couplers [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(15): 3313-3326.
- [14] GALLAGHER D F, FELICI T P. Eigenmode expansion methods for simulation of optical propagation in photonics: pros and cons [C]. *SPIE*, 2003, **4987**: 69-82.
- [15] BIENSTMAN P, DERUDDER H, BAETS R, *et al.* Analysis of cylindrical waveguide discontinuities using vectorial eigenmodes and perfectly matched layers [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, **49**(2): 349-354.
- [16] WANG Z C, TANG Y B, HE S L, *et al.* Experimental demonstration of an ultracompact polarization beam splitter based on a bidirectional grating coupler [C]. *SPIE*, 2009, **7631**: 763103-1-763103-7.
- [17] GAO D S, ZHOU Z P. Nonlinear equation method for band structure calculations of photonic crystal slabs [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(16): 163105-1-163105-3.