材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022041002

多量子阱有效折射率偏振相关性研究

姜德隆，缪庆元*

（武汉大学 电子信息学院，武汉 430072）

摘　要： 分析了多量子阱材料各参数对其 TE 模和 TM 模有效折射率的影响。结果表明：阱数增多，多量子阱有效折射率降低，当量子阱数目大于 3 时，其有效折射率的变化不明显。垒厚增加，有效折射率略有降低。存在合适的张应变量使 TE 模和 TM 模有效折射率峰值波长接近的同时，折射率差值整体最小，偏振相关性最小。据此提出多量子阱材料有效折射率低偏振相关设计方法，并设计出 C 波段内（1 530～1 565 nm）折射率低偏振相关的 InGaAs/InGaAsP 多量子阱材料。研究结果有助于设计实用化的有效折射率低偏振相关量子阱材料。

关键词： 多量子阱；折射率偏振相关；量子阱数；垒厚；应变

中图分类号： TN304.01　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0781－05

Study on Polarization Dependence of Effective Refractive Index of Multiple Quantum Well

JIANG Delong，MIAO Qingyuan

（School of Electronic Information，Wuhan University，Wuhan 430072，CHN）

Abstract： The effects of various parameters on the effective refractive index of TE mode and TM mode of multiple quantum well materials were analyzed. The results show that when the number of wells increases，the effective refractive index of multiple quantum wells decreases. When the number of quantum wells is more than 3，the change of the effective refractive index is not obvious. As the barrier thickness increases，the effective refractive index decreases slightly. There is a suitable amount of tensile strain to make the peak wavelengths of effective refractive index of TE mode and TM mode close，meanwhile the difference between the refractive indices is the smallest as a whole，and the polarization dependence is the smallest. Based on the above analysis，a design method is proposed to realize low polarization dependence of effective refractive index of multiple quantum well and a multiple-quantum well InGaAs/InGaAsP with low polarization dependence of refractive index within C-band（1 530～1 565 nm）is designed. The research result is helpful for designing practical quantum well materials with low polarization dependence of effective refractive index.

Key words： multiple quantum well；polarization dependence of refractive index；number of quantum wells；barrier thickness；strain

0　引言

量子阱材料在光调制器[1-2]、半导体激光器[3-4]，以及光探测器[5-6]等关键器件中的应用日益广泛。在实际使用中，量子阱器件的偏振相关性越低，器件的性能越好。已有文献对于单量子阱材料折射率偏振相关性进行了理论分析[7]。光通信器件一般采用多量子阱材料，然而目前缺乏对多量子阱材料折射率偏振相关性的理论研究。

本文基于 InGaAs/InGaAsP 多量子阱，分析阱

收稿日期：2022－04－10.

基金项目：国家自然科学基金项目(60877039).

* **通信作者：**缪庆元　**E-mail：** miaoqy@whu.edu.cn

数、阱宽、垒厚、垒高和应变对 TE 模和 TM 模有效折射率偏振相关性的影响，提出多量子阱材料有效折射率低偏振相关设计方法并据此设计在 C 波段(1 530～1 565 nm)内折射率低偏振相关的多量子阱材料。

1 理论模型

量子阱材料的导带采用抛物带近似；价带考虑重空穴带(HH)、轻空穴带(LH)和自旋轨道分裂带(SO)之间的相互耦合，采用 Luttinger-Kohn 模型。利用有限差分法，计算得到导带和价带的能带结构[8-9]。

复数介电率 $\varepsilon(E)$[10] 用来描述介质的光学性质，$\varepsilon(E)=\varepsilon_1(E)+\mathrm{i}\varepsilon_2(E)$，其中 $\varepsilon_1(E)$ 为复数介电率实部，$\varepsilon_2(E)$ 为复数介电率虚部。

复数介电率虚部可以表示为[11]

$$\varepsilon_2(E)=\frac{4e^2\hbar^2}{\pi\mu^2E^2}\mid P_{\mathrm{cv}}(k)\mid^2 J_{\mathrm{cv}}(E) \tag{1}$$

其中，e 为电子电量，$\hbar$ 为约化普朗克常数，$P_{\mathrm{cv}}(k)$ 为导带和价带之间的动量矩阵元，$J_{\mathrm{cv}}(E)$ 为联合态密度函数，μ 为联合态密度质量。

复数介电率实部与复数介电率虚部间满足 Kramers-Kronig 变换关系[12]，即

$$\varepsilon_1(E)=1+\frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}\frac{E'\varepsilon_2(E')}{E'^2-E^2}\mathrm{d}E' \tag{2}$$

复折射率通过下式求出：

$$n^*(E)=n(E)+\mathrm{i}k(E)=[\varepsilon_1(E)+\mathrm{i}\varepsilon_2(E)]^{1/2} \tag{3}$$

式中，$n(E)$ 为折射率，$k(E)$ 为消光系数。

本文采用多量子阱平板波导近似和传输矩阵法求解 TE 模与 TM 模的有效折射率[13-14]。

2 结果与分析

图 1 为阱数不同时多量子阱材料 TE 模与 TM 模有效折射率谱，图中同时给出了阱区材料折射率谱和单量子阱有效折射率谱。量子阱阱区材料为 $In_{0.532}Ga_{0.468}As$，垒区材料为 $In_{0.77}Ga_{0.23}As_{0.5}P_{0.5}$，与 InP 衬底晶格匹配，阱宽为 10 nm，垒厚为 20 nm。沿箭头方向阱数顺次为 1～5，温度为 298 K。

由图 1 可知，量子阱有效折射率低于量子阱阱区材料折射率；随着阱数增多，有效折射率降低，且降低的速率越来越小。当阱数超过 3 时，有效折射率无明显变化。这是因为量子阱材料有效折射率的计算同时考虑了阱区和垒区材料，量子阱垒区材料折射率低于阱区材料折射率。随着量子阱数目的增加，垒区材料对有效折射率的贡献增大，故有效折射率降低。当阱数增加到一定数量时，垒区材料和阱区材料的贡献比例趋于平衡，导致有效折射率的变化不明显。

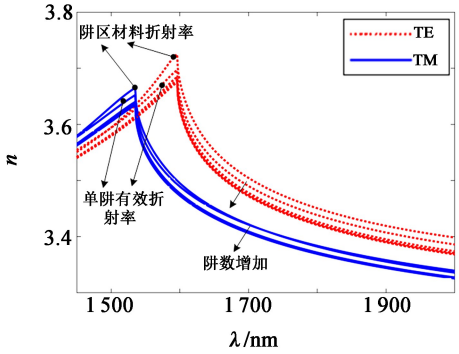


图 1 阱数不同时多量子阱 TE 和 TM 模有效折射率谱

图 2 是阱宽不同时多量子阱 TE 模与 TM 模有效折射率谱，图中同时给出了体材料实验值和计算得到的体材料折射率谱[15-16]。多量子阱数目为 6，图中沿箭头方向阱宽顺次为 18，12，6 nm，其他参数与图 1 同。从图 2 可见，体材料折射率不具有偏振相关性，因为没有受到量子限制效应的影响。阱宽减小，多量子阱 TE 模与 TM 模有效折射率峰值波长均向短波长方向移动，且峰值波长间隔增大，TE 模与 TM 模折射率峰值差值增大。

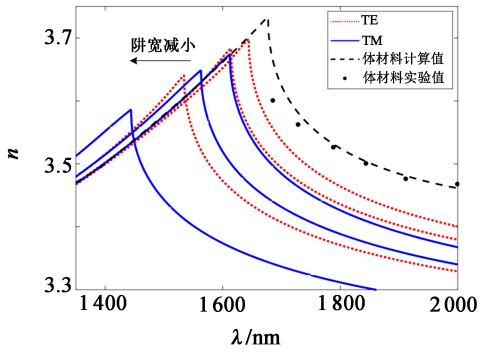


图 2 阱宽不同时多量子阱 TE 模和 TM 模有效折射率谱

图 3 是垒厚不同时多量子阱 TE 模和 TM 有效折射率谱。其中阱数为 6，垒厚沿箭头方向依次取 20，25，30 nm，其他参数与图 1 相同。由图 3 可知，随着垒厚的增加，多量子阱 TE 模和 TM 模的有效折射率略有下降。这是因为虽然随着垒厚的增加，垒区材料对有效折射率的贡献增大，但由于垒厚比阱宽大许多，导致有效折射率峰值仅略有降低。同

时，垒厚的变化对阱区的能带结构影响小，有效折射率峰值波长基本无变化。可见，垒厚变化对有效折射率影响小。

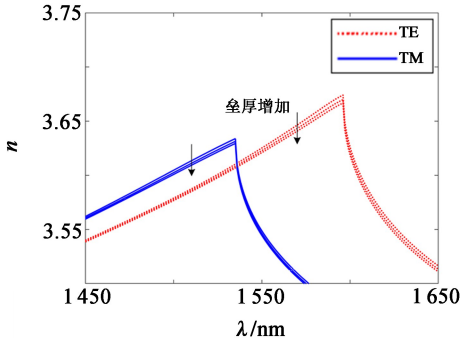


图 3　垒厚不同时多量子阱 TE 模和 TM 模有效折射率谱

图 4 是垒高不同时多量子阱 TE 模和 TM 模有效折射率谱。其中阱数为 6，垒高沿箭头方向顺次取 0.95，1.1，1.25 eV，相应垒区材料 $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ 中 Ga 组分 x 为 0.27，0.15，0.06。垒区组分中 x 和 y 符合 $y=0.4184x/(0.1894+0.013x)$，垒区与 InP 衬底晶格匹配，其他参数与图 1 同。由图 4 可知，随着垒高增加，TE 模与 TM 模的有效折射率峰值波长皆向短波长方向移动且峰值波长的间隔增加，TE 模与 TM 模折射率峰值的差值增大，折射率偏振相关性增加。由此可见，垒高增加对多量子阱材料有效折射率偏振相关的影响与阱宽减小类似。

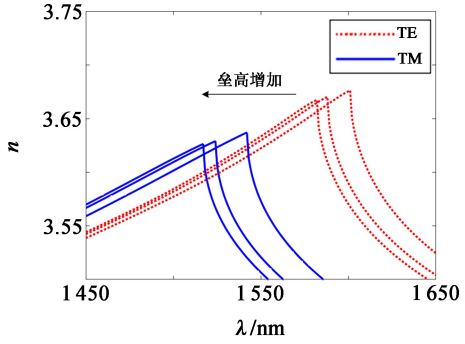


图 4　垒高不同时多量子阱 TE 模和 TM 模有效折射率谱

图 5 是应变不同时多量子阱 TE 模与 TM 模有效折射率谱。其中阱数为 6，图中应变量顺次为 −0.6%，−0.3%，0，0.3%，0.6%（正值表示张应变，负值表示压应变），其他参数与图 1 同。由图 5 可见，随着压应变的逐渐增加，TE 模与 TM 模的有效折射率峰值波长均向长波长方向移动且相互间间隔增大，TE 模与 TM 模折射率峰值的差值增大，折射率偏振相关性增大。由图 5 同时可见，随着张应变增加，TE 模与 TM 模的有效折射率峰值波长均向短波长方向移动，相互间间隔先减小后增大；TE 模与 TM 模折射率峰值的差值先减小后增大。这可由图 6 得到解释。

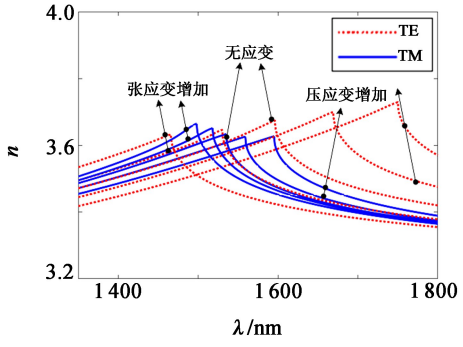
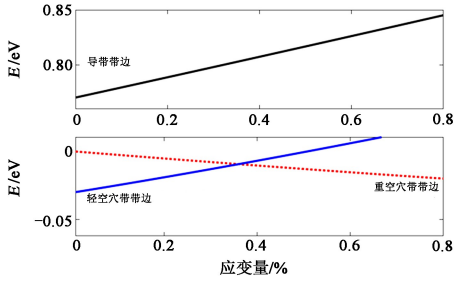
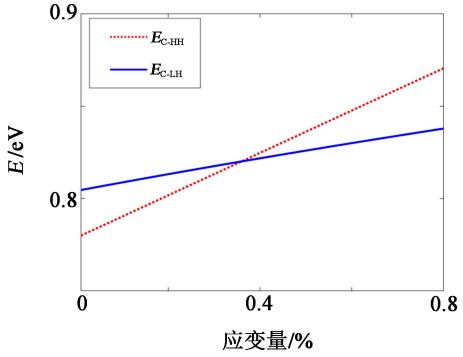


图 5　应变不同时多量子阱 TE 模和 TM 模有效折射率谱

图 6(a)为带边能量随张应变的变化图，设置价带顶为能量零点。由图可见，随着张应变增加，价带重空穴带位置下降，轻空穴带位置上升，导带到轻空穴带的跃迁比例增加，因此 TM 模折射率峰值增大，TE 模折射率峰值减小。当张应变量在 0.36% 左右时，重空穴带与轻空穴带带边能量相等；当张应变量大于 0.36%时，轻空穴带越过重空穴带成为价带基带。故 TE 模与 TM 模有效折射率峰值的差值先减小后增大。



(a)　带边能量随张应变的变化



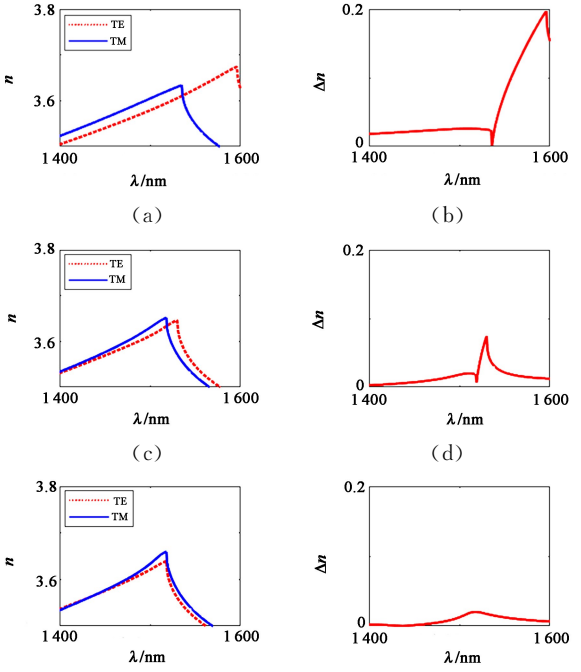
(b)　带边跃迁能量随张应变的变化

图 6　带边能量及带边跃迁能量随张应变的变化

图 6(b)为从图 6(a)得到的带边跃迁能量随张应变的变化图，其中 $E_{C\text{-}LH}$ 为导带到轻空穴带的带

边跃迁能量，$E_{C\text{-}HH}$ 为导带到重空穴带的带边跃迁能量。由图 6(b)可知，随着张应变增加，带边跃迁能量均增大。当张应变量小于 0.36%时，导带到重空穴带的带边跃迁能量小于导带到轻空穴带的带边跃迁能量；当张应变量在 0.36%左右时，导带到重空穴带的带边跃迁能量等于导带到轻空穴带的带边跃迁能量，故 TE 模和 TM 模的折射率峰值波长接近；当张应变大于 0.36%时，导带到重空穴带的带边跃迁能量大于导带到轻空穴带的带边跃迁能量。因此在张应变情况下 TE 模和 TM 模的有效折射率峰值波长均向短波长方向移动，峰值波长间隔先减小后增大。

由图 6 分析可见，存在合适的张应变使价带重空穴带和轻空穴带带边能量相等，此时 TE 模和 TM 模有效折射率峰值波长接近且两者峰值的差值小。以 TE 模折射率 n_{TE} 和 TM 模折射率 n_{TM} 的差值 $\Delta n = | n_{TE} - n_{TM} |$ 表示有效折射率的偏振相关性。图 7(a)、图 7(c)、图 7(e)和图 7(g)分别为不同张应变时 TE 模和 TM 模有效折射率谱，张应变量顺次为 0，0.3%，0.36%和 0.6%。图 7(b)、图 7(d)、图 7(f)和图 7(h)为相应张应变下 TE 模和 TM 模折射率差值 Δn。由图可知，Δn 谱线先下降后上升。当张应变量在 0.36%左右时，随着 TE 模和 TM 模有效折射率峰值波长的接近，对应的折射率差值整体最小，折射率偏振相关性最小。



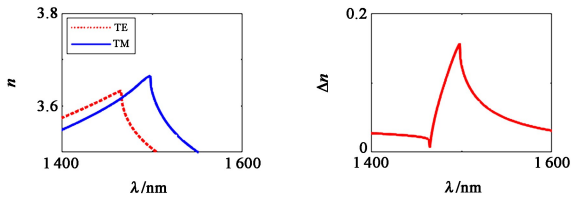


图 7 张应变不同时多量子阱 TE 模和 TM 模有效折射率及对应的折射率差值变化图

由上述分析可知，存在合适的张应变量使 TE 模和 TM 模有效折射率峰值波长接近，有效折射率偏振相关性最小，从而克服量子限制效应带来的折射率偏振相关性。图 8 是 C 波段内 TE 模和 TM 模有效折射率峰值波长间隔在 2 nm 范围内时，不同垒高情况下阱区张应变随阱宽的变化图。沿箭头方向垒高增加，顺次为 0.85，0.875，0.90，0.925，0.95 eV，对应垒区材料中 As 组分 y 分别为 0.776，0.702，0.65，0.611 和 0.585。由图 8 可以看出，同垒高情形下，随着阱宽的减小，使 TE 模和 TM 模有效折射率峰值波长接近所需要的张应变增加；同阱宽情形下，随着垒高的增加，使 TE 模和 TM 模有效折射率峰值波长接近所需要的张应变也增加。

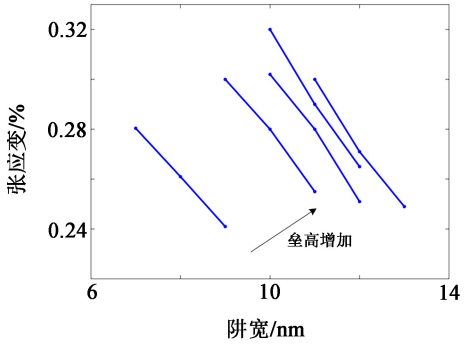
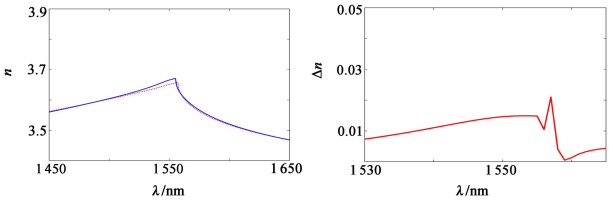


图 8 有效折射率峰值波长间隔在 2 nm 范围内时，不同垒高情况下阱区张应变随阱宽的变化

由前述分析可以看出，垒厚变化对有效折射率影响小；当阱数足够多时，阱数的增加对有效折射率影响小。因此，在多量子阱有效折射率低偏振相关设计时主要考虑阱宽、垒高和应变因素。由此得出多量子阱 TE 模和 TM 模有效折射率低偏振相关设计方法：1)作出所选波段内，不同垒高情况下，TE 模和 TM 模有效折射率峰值波长接近时，阱区张应变随阱宽的变化图 F_{mqw}。2)根据器件性能要求从图 F_{mqw} 中选取一组垒高和阱宽，从垒高得到对应的垒区材料组分。从图 F_{mqw} 中得到对应的阱区张应变量，进一步求出阱区材料组分。以 InGaAs/

InGaAsP 材料系为例，作出图 8，然后选取一组垒高 0.95 eV 和阱宽 12 nm，从垒高得到垒区材料为 $In_{0.73}Ga_{0.27}As_{0.585}P_{0.415}$，从图 8 得阱区张应变为 0.27%，进一步根据张应变得到阱区材料 $In_{0.496}Ga_{0.504}As$。图 9(a)所示为张应变多量子阱材料 $In_{0.496}Ga_{0.504}As/In_{0.73}Ga_{0.27}As_{0.585}P_{0.415}$ 的 TE 模和 TM 模有效折射率谱。其中，垒厚为 20 nm，阱数为 6。对应 C 波段内 Δn 谱线如图 9(b)所示。可见，在 C 波段内 TE 模与 TM 模有效折射率差值小于 0.025，说明所设计的张应变多量子阱材料具有低的有效折射率偏振相关性。



(a)　有效折射率谱　　(b)　C 波段内 Δn 谱线图

图 9　低偏振相关多量子阱的有效折射率谱及 C 波段内 Δn 谱线图

3　结论

本文对多量子阱材料有效折射率偏振相关性进行了研究。分析了阱数、阱宽、垒厚、垒高和应变对有效折射率偏振相关性的影响。结果表明：阱数增多，多量子阱有效折射率降低，阱数足够多时，阱数的变化对折射率影响小。垒厚增加，有效折射率略有下降。阱宽减小、垒高增加时，有效折射率偏振相关性增大。存在合适的张应变量使 TE 模和 TM 模有效折射率峰值波长接近，且对应的折射率差整体最小，偏振相关性最小，从而克服量子限制效应带来的折射率偏振相关性的影响。提出多量子阱材料有效折射率低偏振相关设计方法，并设计出 C 波段内折射率低偏振相关的 InGaAs/InGaAsP 多量子阱。

参考文献：

[1] Robert N, Mircea G, Jukka V, et al. Data transmission at 1 300 nm using optical interposer comprising hybrid integrated silicon waveguide and dilute nitride electroabsorption modulator[J]. Opt. Express, 2018, 26(26): 34336-34345.

[2] Zhou P, Nakano Y, Tanemura T. Design of InGaAsP phase modulator with asymmetrically coupled quantum wells for efficient polarization modulation[J]. Jap. J. of Appl. Phys., 2020, 59(8): 082004.

[3] Li Z W, Zeng Y G, Song Y, et al. Effect of substrate misorientation on the structural and optical characteristics of In-rich InGaAs/GaAsP quantum wells[J]. Appl. Sci., 2021, 11: 8639.

[4] Sweeney S J, Eales T D, Adams A R. The impact of strained layers on current and emerging semiconductor laser systems [J]. J. of Appl. Phys., 2019, 125(8): 082538.

[5] Omar A, Kang C H, Kong M W, et al. 7.4-Gbit/s visible-light communication utilizing wavelength-selective semipolar micro-photodetector [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2020, 32(13): 767-770.

[6] Kang C H, Liu G Y, Lee C, et al. Semipolar (2021) InGaN/GaN micro-photodetector for gigabit-per-second visible light communication[J]. Appl. Phys. Express, 2020, 13, 014001.

[7] 罗世豪，缪庆元. 量子阱材料折射率低偏振相关性研究[J]. 半导体光电，2021，42(2)：225-230.
Luo Shihao, Miao Qingyuan. Study on polarization dependence of quantum well materials with low refractive index [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(2): 225-230.

[8] Ahn D, Yoon S J, Chuang S L, et al. Theory of optical gain in strained-layer quantum wells within the 6×6 Luttinger-Kohn model[J]. J. of Appl. Phys., 1995, 78(4): 2489-2497.

[9] Chuang S L. Efficient band-structure calculations of strained quantum wells[J]. Phys. Rev. B, 1991, 43(12): 9649-9661.

[10] Ehrenreich H, Philipp H R, Segall B. Optical properties of aluminum[J]. Physical Review, 1963, 132(5): 1918-1928.

[11] Adachi S. Model dielectric constants of GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb[J]. Physical Review B, 1987, 35(14): 7454-7463.

[12] Grosse P, Offermann V. Analysis of reflectance data using the Kramers-Kronig relations[J]. Appl. Phys. A, 1991, 52(2): 138-144.

[13] Kumar M, Boyd J T, Jackson H E, et al. Birefringent properties of GaAlAs multiple quantum well planar optical waveguides[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 1992, 28(7): 1678-1688.

[14] 曹庄琪. 导波光学中的转移矩阵方法[M]. 上海：上海交通大学出版社，2000.
Cao Zhuangqi. Transfer Matrix Method in Guided Wave Optics [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000.

[15] Lin E Y, Lay T S. A band-to-band Coulomb interaction model for refractive index spectra of ternary semiconductors [J]. J. of Appl. Phys., 2009, 105(1): 013509.

[16] Chandra P, Coldren L A, Strege K E. Refractive index data from $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ films[J]. Electron. Lett., 1981, 17(1): 6-7.

作者简介：

姜德隆(1996—)，男，硕士生，主要研究方向为光通信中光子集成器件；

缪庆元(1968—)，男，博士，教授，主要研究方向为光子集成有源材料和光波导等光通信关键技术。