

## 一维反激光器完美相干吸收理论分析\*

沈云<sup>1)†</sup> 于国萍<sup>2)</sup> 傅继武<sup>1)</sup>

1) (南昌大学物理学系, 南昌 330031)

2) (武汉大学物理科学与技术学院, 武汉 430072)

(2011年12月7日收到; 2012年1月10日收到修改稿)

利用传输矩阵和散射矩阵方法, 具体计算了单通道和双通道结构完美相干吸收效应的产生条件, 并分析了其之间的相关性. 结果表明, 单、双通道结构各自都有大量可选条件能促使完美相干吸收效应的发生, 且在入射波长及其相应介质折射率等参数不变的情况下, 双通道完美相干吸收效应产生所对应的介质长度与单通道完美相干吸收效应产生所对应的介质长度具有二倍关系. 如波长为 756 nm 的光入射 Si 介质, 完美相干吸收可以在介质长度分别为 3.701 和 7.402  $\mu\text{m}$  的单通道结构和双通道结构中发生. 该研究对促进完美相干吸收效应在光调制、光开关、光学探测等方面应用以及光学通信和计算领域的硅基集成光子器件设计都具有积极意义.

**关键词:** 完美相干吸收, 单通道, 双通道, 介质长度

**PACS:** 42.25.Bs, 42.25.Hz, 42.55.Ah

## 1 引言

完美相干吸收 (coherent perfect absorption, CPA)<sup>[1,2]</sup> 产生于光学吸收和光学干涉的相互作用, 是一种操控光波及其吸收的新方法. CPA 系统具有光学过程上与一般光放大激光器存在时间反演关系、能够完全吸收相干入射光等反激光器特性, 在光调制、光开关以及光学探测等诸多方面<sup>[3,4]</sup> 具有巨大的潜在应用. 特别地, CPA 效应可以在单一硅晶片等极为简单的结构装置中实现<sup>[2]</sup>, 在促进硅基集成光子器件的设计并用于光学通信和计算等领域具有重要研究价值. 在 CPA 研究中, 尽管较早即有文献<sup>[5,6]</sup> 指出时间反演反激光过程存在的可能性, 且与单通道 CPA 具有相同工作原理的半导体调制<sup>[7-10]</sup>、探测<sup>[11,12]</sup> 等器件的研究也有展开, 但同光放大激光器系统相对比的时间反演激光器, 即 CPA 系统的概念及理论直到 2010 年才被 Chong 等<sup>[1]</sup> 提出, 并立即引起广泛的关注. Chong 等在其研究中提出单通道 CPA 的产生原理, 即当光波入射一端为入射面、一端为镜面的非对称腔, 某些特定

吸收条件下镜面反射光波与入射端面反射光波相互干涉可使入射光全部被吸收而形成单通道 CPA; 并着重对双通道 CPA 产生的条件及相关光学特性做了理论计算和数值分析. 在 Chong 等的研究基础上, Wan 等<sup>[2]</sup> 在实验上实现了 CPA 反激光器系统的组建. 本文利用传输矩阵和散射矩阵方法, 详细计算了单通道 (图 1(a))、双通道 (图 1(b)) 结构产生 CPA 的条件并对其相关性做了分析. 研究表明, 在入射波长、介质折射率等参数不变的情况下, 双通道 CPA 发生所对应的介质长度和单通道 CPA 发生所对应的介质长度具有二倍关系. 如 756 nm 波长的光照射 Si 介质, 单通道结构和双通道结构产生 CPA 效应的介质长度分别为 3.701 和 7.402  $\mu\text{m}$ .

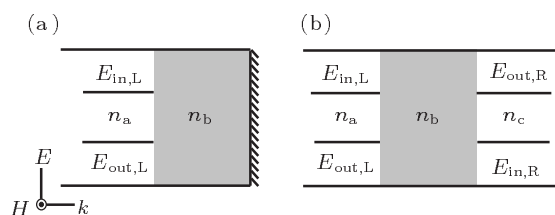


图 1 (a) 单通道结构; (b) 双通道/单介质层结构

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60967003) 和江西省自然科学基金 (批准号: 2010GQW0044) 资助的课题.

† E-mail: shenyunoptics@gmail.com

## 2 散射矩阵及传输矩阵理论

电磁波在一维介质层中的传输特性可以用传输矩阵<sup>[13]</sup>表示. 将其光波在介质层中的行进看作是正向行进电磁波和反向行进电磁波的叠加, 介质界面处的电磁场满足边界条件, 每一介质层与光波的相互作用可由其传输矩阵完全决定, 介质层两边的场矢量的模可用传输矩阵联系起来. 单介质层 $n_b$ 如图1(b)所示,  $E_{in,L}$ ,  $E_{out,L}$ 分别为介质 $n_b$ 左界面 $n_a$ 一侧的正向和反向光波,  $E_{out,R}$ ,  $E_{in,R}$ 分别为介质 $n_b$ 右界面 $n_c$ 一侧的正向和反向波, 其中,  $n_a$ ,  $n_b$ ,  $n_c$ 分别为折射率. 考虑TM模式正入射, 其传输矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} E_{in,L} - E_{out,L} \\ \eta_a(E_{in,L} + E_{out,L}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_b & -i/\eta_b \cdot \sin \delta_b \\ -i\eta_b \sin \delta_b & \cos \delta_b \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_{out,R} - E_{in,R} \\ \eta_c(E_{out,R} + E_{in,R}) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $\eta_a = \sqrt{\varepsilon_0/\mu_0}n_a$ ,  $\eta_b = \sqrt{\varepsilon_0/\mu_0}n_b$ ,  $\eta_c = \sqrt{\varepsilon_0/\mu_0}n_c$ , 其中  $\varepsilon_0$ ,  $\mu_0$  分别为真空中的介电常数和磁导率.  $\delta_b = k_0 n_b b$  表示光波在介质 $n_b$ 层中横跨左右两个界面时的相位差, 其中  $k_0$  为真空波矢,  $b$  为介质长度.

根据方程(1), 联系入射波和出射波的散射矩阵形式可写为

$$\begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -i\eta_b \sin \delta_b + \eta_a \cos \delta_b + \eta_c \cos \delta_b \\ -i\eta_a \eta_c / \eta_b \sin \delta_b \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \mathcal{A} & 2\eta_c \\ 2\eta_a & \mathcal{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{A} &= (\eta_c \cos \delta_b - i\eta_b \sin \delta_b - \eta_a \cos \delta_b \\ &\quad + i\eta_a \eta_c / \eta_b \sin \delta_b) \\ \mathcal{B} &= -(\eta_c \cos \delta_b - i\eta_a \eta_c / \eta_b \sin \delta_b \\ &\quad + i\eta_b \sin \delta_b - \eta_a \cos \delta_b) \end{aligned}$$

## 3 单通道 CPA

单通道结构如图1(a)所示, 其右端面为镜

面. 该结构与图1(b)相比, 相当于图1(b)结构处于  $E_{out,R} = E_{in,R}$  条件时的特殊形式. 则根据方程(1), 可得到图1(a)单通道结构的反射系数表达式为

$$r = \frac{E_{out,L}}{E_{in,L}} = \frac{\cos \delta_b + i\eta_a/\eta_b \cdot \sin \delta_b}{\cos \delta_b - i\eta_a/\eta_b \sin \delta_b}. \quad (3)$$

CPA 的产生要求反射光为 0, 也即  $r = 0$ . 结合方程(3)可得到

$$e^{i2\delta_b} = \frac{n_a - n_b}{n_a + n_b}. \quad (4)$$

考虑  $n_b > n_a$  的情况, 设  $n_b = n_{Re} - in_{Im}$ , ( $n_{Im} > 0$ ,  $n_{Re} > 1$ ), 则方程(4)的近似解为

$$n_{Re} \approx \frac{m\pi}{2k_0b} \quad (m = 1, 2, 3, \dots), \quad (5)$$

$$n_{Im} \approx \frac{1}{2k_0b} \ln \frac{n_{Re} + n_a}{n_{Re} - n_a}. \quad (6)$$

由方程(5)和(6)可以看出, 满足 CPA 产生条件的介质折射率实部  $n_{Re}$ , 虚部  $n_{Im}$  是与入射波矢  $k_0$  和介质长度  $b$  密切相关的, 且都存在多个解. 这说明单通道结构中 CPA 可以在多种情况下产生.

为了详细描述单通道结构 CPA 产生的条件及其表现出的特性, 下面将进行数值上的具体分析. 为了分析的简便, 本文考虑  $n_a = 1$  情况. 由方程(5)计算所得的不同  $m$  值下  $n_{Re}$  在  $[1, 4.5]$  范围内与  $k_0b$  之间的关系如图2(a)所示. 其中  $m = 3, 23, 43, 63, 83, 103, 123$  所对应的  $n_{Re}-k_0b$  关系由黑色曲线突出显示, 以更清楚地呈现变化的规律.

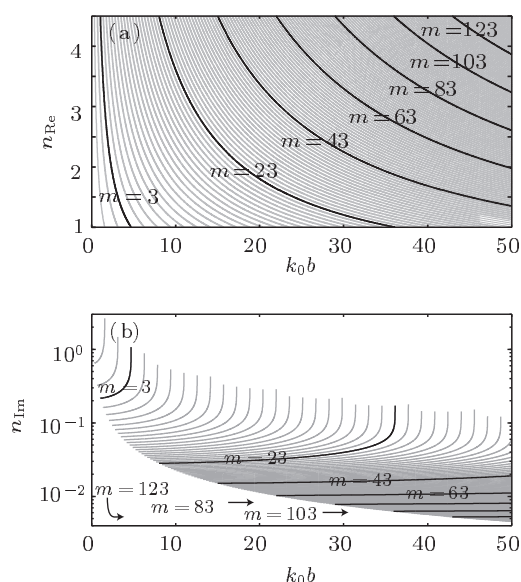


图2 不同  $m$  值情况下满足单通道介质 CPA 产生条件的介质折射率与  $k_0b$  的关系 (a)  $n_{Re}-k_0b$ ; (b)  $n_{Im}-k_0b$

图 2(a) 表明, 每一不同  $m$  值都对应一条不同的  $n_{\text{Re}}-k_0b$  关系曲线. 由方程 (6) 计算得到的与图 2(a) 各曲线相应的  $n_{\text{Im}}-k_0b$  关系曲线如图 2(b) 所示. 由图 2 可以看出, 对于远离 0 点的每一个  $k_0b$ , 都可以找出多个  $n_{\text{Re}}$  及对应的  $n_{\text{Im}}$  使图 1(a) 单通道结构中的反射为 0, 即产生 CPA. 特别地, 对于某一选定的  $k_0b$ , 由于介质长度  $b$  的可调节性, 使得  $k_0$  也即入射波长可以在保持  $k_0b$  不变的同时自由调节. 因此, 对每一个  $k_0b$ , 都可以遍历各个波长来寻找与  $n_{\text{Re}}$  和  $n_{\text{Im}}$  相适宜的介质来满足 CPA 产生条件. 而且同时,  $k_0b$  也是可以在正实数范围内连续变化的. 这表明有大量的可能条件可使 CPA 效应发生. 例如, 在  $k_0b = 30.76$  时,  $m = 73$  所对应的  $n_{\text{Re}}$  和  $n_{\text{Im}}$  分别为 3.728 和 0.00894, 与介质 Si 在 756 nm ( $k_0 = 0.0083 \text{ nm}^{-1}$ ) 处的折射率实部 3.728 和虚部 0.009 相近<sup>[14]</sup>. 由此, 当 756 nm 入射光入射到单通道 Si 介质结构上时, 在  $b = 3.701 \mu\text{m}$  ( $k_0b = 30.76$ ) 情况下, 会有 CPA 效应发生.

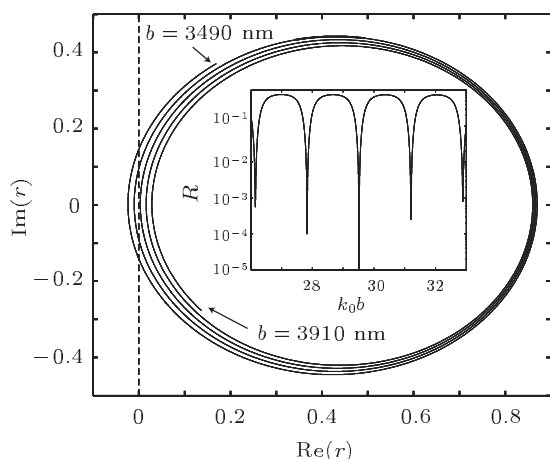


图 3 单通道 Si 介质结构在 756 nm 入射时反射系数  $r$  的实部和虚部随介质长度  $b$  的变化关系, 插图为与反射系数  $r$  的变化相对应的反射率  $R$  的变化

为了进一步确认该 CPA 效应的发生, 756 nm ( $k_0 = 0.0083 \text{ nm}^{-1}$ ) 的光入射到单通道 Si 介质结构的反射率  $R = rr^*$  随长度  $b$  的变化关系可根据方程 (3) 进行计算, 其从  $b = 3490 \text{ nm}$  ( $k_0b = 29.01$ ) 变化到  $3910 \text{ nm}$  ( $k_0b = 32.50$ ) 的结果如图 3 插图所示. 在计算中,  $r$  的实部和虚部随  $b$  的变化由图 3 表征. 从图 3 可以看出, 在厚度  $b$  增加的过程中,  $r$  的实部和虚部形成环形循环变化的轨迹, 且环形中心不断右移. 即在循环变化中, 虚部在正 - 负 - 正值之间往返, 实部的最小值从负值到 0 到正值向右不断跳变, 在变化到  $r$  的虚部和

实部都为 0 处发生 CPA 效应, 对应于图 3 插图所示的最小反射率  $R$ . 对于 756 nm 波长的光入射, 即  $n_b = 3.728 + 0.009i$  时, 图 3 插图表明 CPA 发生在  $k_0b = 30.76$  ( $b = 3.701 \mu\text{m}$ ) 位置处, 与由图 2 所得到的结果符合. 很显然,  $k_0b = 30.76$  处 CPA 发生时, 所入射的 756 nm 相干光将几乎完全被吸收掉, 这与一般光放大激光器具有完全相反的光学过程, 表现出反激光器特性. 另外, 计算中还发现, 图 3 循环变化中实部最小值跳变的步长与介质在相应入射波长下的  $n_{\text{Im}}$  有关,  $n_{\text{Im}}$  越大, 步长越大.

#### 4 双通道 CPA

双通道结构如图 1(b) 所示. 由散射矩阵方程 (2) 可知, 当满足条件

$$\left(\sqrt{\eta_c/\eta_a} - \sqrt{\eta_a/\eta_c}\right)^2 \cos^2 \delta_b + \left(\sqrt{\eta_b^2/\eta_a\eta_c} - \sqrt{\eta_a\eta_c/\eta_b^2}\right) \sin^2 \delta_b = -4, \quad (7)$$

$$\frac{E_{\text{in,L}}}{E_{\text{in,R}}} = \frac{1}{4} \left( \frac{\eta_c + \eta_b}{\eta_a} - \frac{\eta_c + \eta_b}{\eta_b} \right) e^{i\delta_b} + \frac{1}{4} \left( \frac{\eta_c - \eta_b}{\eta_a} + \frac{\eta_c - \eta_b}{\eta_b} \right) e^{-i\delta_b} \quad (8)$$

时,  $E_{\text{out,L}}$  和  $E_{\text{out,R}}$  将同时为 0, 即 CPA 产生. 考虑  $\eta_c = \eta_a$  情况, 方程 (7) 变为

$$(\eta_b^2 - \eta_a^2)(e^{i\delta_b} - e^{-i\delta_b})/\eta_a\eta_b = \pm 4,$$

进一步可以得到

$$e^{i\delta_b} = \pm \frac{\eta_a - \eta_b}{\eta_a + \eta_b}. \quad (9)$$

其  $E_{\text{out,L}}$  和  $E_{\text{out,R}}$  之间的关系则由方程 (8) 变为

$$\frac{E_{\text{in,L}}}{E_{\text{in,R}}} = \pm 1. \quad (10)$$

在  $n_b > n_a$  的情况下, 方程 (9) 和 (10) 中均取正号, 即当波长、振幅完全相同的两束光分别从左右两个方向同步入射 (波矢、振动方向相反) 到双通道结构 (图 2(b)), 其相应参数满足方程 (9) 时, 双通道 CPA 将会发生. 设  $n_b = n_{\text{Re}} + in_{\text{Im}}$ , ( $n_{\text{Im}} > 0$ ,  $n_{\text{Re}} > 1$ ), 其方程 (9) 的近似解为

$$n_{\text{Re}} \approx \frac{m\pi}{k_0b} \quad (m = 1, 2, 3, \dots), \quad (11)$$

$$n_{\text{Im}} \approx \frac{1}{k_0b} \ln \frac{n_{\text{Re}} + n_a}{n_{\text{Re}} - n_a}. \quad (12)$$

对比双通道 CPA 产生条件方程 (11) 和 (12) 与单通道 CPA 产生条件方程 (5) 和 (6) 可以看出, 若某一

波长入射单通道结构时 CPA 可发生, 则该波长左右同步入射到介质长度为单通道 CPA 对应的介质长度两倍的双通道结构, 则双通道 CPA 也将发生. 即在入射波长及其所对应的介质折射率等参数不变的情况下, 双通道 CPA 产生所对应的介质长度和单通道 CPA 产生所对应的介质长度具有两倍关系.

考虑  $n_a = 1$ , 类似于单通道 CPA 情况, 根据方程 (11) 求解的  $n_{Re}$  在  $[1, 4.5]$  范围与  $k_0b$  之间的关系如图 4(a) 所示. 在不同的  $m$  情况下, 有不同的关系曲线. 其中  $m = 3, 23, 43, 63, 83, 103, 123$  所对应的  $n_{Re}-k_0b$  关系由黑色曲线突出显示, 以更清楚地呈现其变化规律. 由方程 (12) 计算得到的与图 4(a) 各曲线相应的  $n_{Im}$  与  $k_0b$  关系曲线如图 4(b) 所示. 图 4 清楚地表明, 与单通道结构类似, 双通道结构也有大量的可能条件使得 CPA 发生. 与图 2 单通道相比, 图 4 中同一纵坐标的值所对应的  $k_0b$  是图 2 中的两倍. 如  $m = 73$  时, 图 2 中  $k_0b = 30.76$  所对应的  $n_{Re}$  和  $n_{Im}$  分别为 3.728 和 0.00894, 同样的  $n_{Re}$  和  $n_{Im}$  值在图 4 中由  $k_0b = 61.52$  所对应. 特别地,  $n_{Re} = 3.728$  和  $n_{Im} = 0.00894$  与 Si 在 756 nm ( $k_0 = 0.0083 \text{ nm}^{-1}$ ) 处的折射率实部 3.728 和虚部 0.009 相近, 由此, 当 756 nm 入射光入射到双通道 Si 介质结构上时,  $k_0b = 61.52$ , 即  $b = 7.402 \mu\text{m}$  时, 双通道 CPA 效应将得以发生.

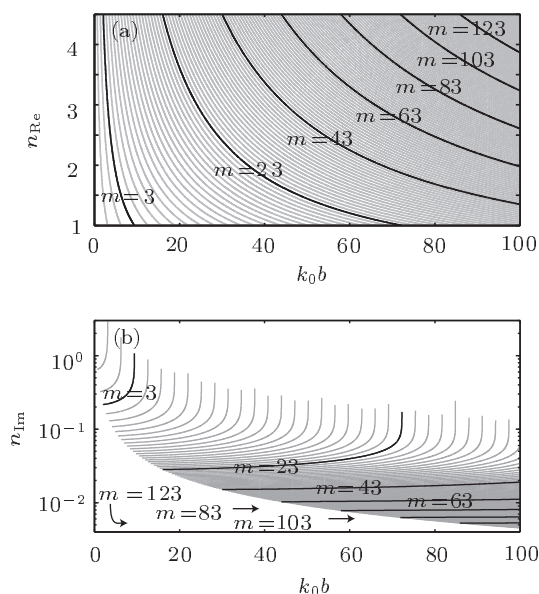


图 4 不同  $m$  值情况下满足双通道介质 CPA 产生条件的介质折射率与  $k_0b$  的关系 (a)  $n_{Re}-k_0b$ ; (b)  $n_{Im}-k_0b$

为了验证此 CPA 效应的发生, 756 nm ( $k_0 = 0.0083 \text{ nm}^{-1}$ ) 入射双通道 Si 介质层时的反射率  $R_L = r_L r_L^*$  随厚度  $b$  的关系可根据其散射矩阵的

公式方程 (2) 计算得出,  $b = 6980 \text{ nm}$  ( $k_0b = 58.02$ ) 变化到  $7820 \text{ nm}$  ( $k_0b = 65.0$ ) 的结果如图 5 的插图所示. 其中反射系数  $r_L = E_{out,L}/E_{in,L}$  的实部和虚部随厚度  $b$  的变关系由图 5 表征. 另外, 计算也表明反射率  $R_R = r_R r_R^*$  和反射系数  $r_R = E_{out,R}/E_{in,R}$  的变化曲线分别与  $R_L$  和  $r_L$  变化曲线相同. 从图 5 可以看出, 在 756 nm 入射即  $n_b = 3.728 + 0.009i$  下, 其 CPA 发生在  $k_0b = 61.52$  ( $b = 7.402 \mu\text{m}$ ) 位置处, 与图 4 所得到的结果符合.

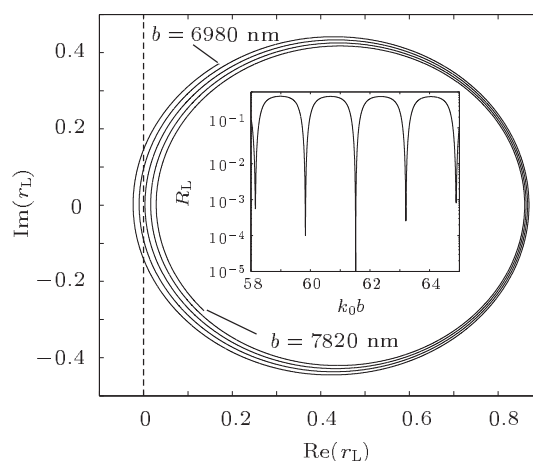


图 5 双通道 Si 介质结构在 756 nm 入射时反射系数  $r_L$  的实部和虚部随介质长度  $b$  的变化关系, 插图为与反射系数  $r_L$  的变化相对应的反射率  $R_L$  的变化

上述结果清楚地表明, 在入射波长及其对应的介质折射率等参数不变的情况下, 双通道 CPA 发生所对应的介质长度和单通道 CPA 发生所对应的介质长度具有两倍关系. 其中, 光波入射单通道结构 (图 1(a)) 时, 一定条件下镜面端反射光波与入射端面反射光波相互干涉, 使入射光全部被吸收即产生单通道 CPA; 而对于双通道结构 (图 1(b)), 其一端的零出射由该端面和另一端面的反射光波, 加上另一端入射而来的透射光波互相干涉而成, 并由于两端入射光束的同步性, 致使结构两端的出射同时为零, 即产生 CPA 效应. 相比较而言, 双通道结构的光路过程相当于对单通道结构以其镜面为中线对称展开. 也由此, 展开后的介质长度即为其单通道介质长度的两倍.

## 5 结论

利用传输矩阵和散射矩阵方法, 详细计算了单通道 (图 1(a)) 和双通道 (图 1(b)) 结构产生 CPA 的条件并对其相关性做了比较. 研究表明, 有大量的可能情况促使单、双通道 CPA 发生, 且在入



射波长及其相应的介质折射率等参数不变的情况下, 双通道 CPA 产生所对应的介质长度和单通道 CPA 产生所对应的介质长度具有二倍关系. 如, 当 756 nm 入射光入射到单通道 Si 介质结构上时, 在  $b = 3.701 \mu\text{m}$  ( $k_0b = 30.76$ ) 情况下, 会有 CPA 效应发生; 当 756 nm 入射光入射到双通道 Si 介质结构上时,  $k_0b = 61.52$ , 即  $b = 7.402 \mu\text{m}$  时, 双通道 CPA 将发生. 其 CPA 产生于光学吸收和光学干

涉的相互作用, 具有光学过程上与一般光放大激光器存在时间反演关系、能够完全吸收相干入射光等反激光器特性. 作为一种操控光波及其吸收的新方法, CPA 在光调制、光开关以及光学探测等诸多方面具有巨大的潜在应用; 在促进硅基集成光子器件的设计并用于光学通信和计算等领域具有重要研究价值.

- 
- [1] Chong Y D, Ge L, Cao H, Stone A D 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 053901
- [2] Wan W, Chong Y, Ge L, Noh H, Stone A D, Cao H 2011 *Science* **331** 889
- [3] Shen Y, Fan D H, Fu J W, Yu G P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 117302 (in Chinese) [沈云, 范定寰, 傅继武, 于国萍 2011 物理学报 **60** 117302]
- [4] Shen Y, Yu G P, Wang G P 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 221926
- [5] Siegman A E 1989 *Phys. Rev. A* **39** 1253
- [6] Hamel W A, Woerdman J P 1989 *Phys. Rev. A* **40** 2785
- [7] Yan R H, Simes R J, Coldren L A 1989 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **1** 273
- [8] Law K K, Yan R H, Merz J L, Coldren L A 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 1886
- [9] Law K K, Yan R H, Coldren L A, Merz J L 1990 *Appl. Phys. Lett.* **57** 1345
- [10] Heffernan J F, Moloney M H, Hegarty J, Roberts J S, Whitehead M 1991 *Appl. Phys. Lett.* **58** 2877
- [11] Kishino K, Ünlü M S, Chyi J I, Reed J, Arsenault L, Morkoc H 1991 *IEEE J. Quantum Electron.* **27** 2025
- [12] Ünlü M S, Kishino K, Liaw H J, Morkoç H 1992 *J. Appl. Phys.* **71** 4049
- [13] Wang H, Li Y P 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2172 (in Chinese) [王辉, 李永平 2001 物理学报 **50** 2172]
- [14] Palik E D 1985 *Handbook of Optical Constants of Solids* (London: Academic Press)

# Theoretical analysis of coherent perfect absorption in one-dimensional anti-laser\*

Shen Yun<sup>1)†</sup> Yu Guo-Ping<sup>2)</sup> Fu Ji-Wu<sup>1)</sup>

1) (*Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

2) (*Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

(Received 7 December 2011; revised manuscript received 10 January 2012)

## Abstract

Detailed analyses and the correlations of coherent perfect absorption (CPA) in single-channel and two-channel structures are performed by the transfer matrix and scattering matrix method. The results show that there are many possibilities for single-channel and two-channel structures to satisfy the occurring of CPA. Moreover, with the same incident wavelength and refractive index of dielectric, the length of dielectric for two-channel CPA is twice that for single-channel. For instance, it is 3.701  $\mu\text{m}$ /7.402  $\mu\text{m}$  for single-/two-channel CPA as 756 nm wavelength is incident on Si material. Our results facilitate the application of CPA in optical modulator, switches, detector, etc., and they are also of significance for Si-based integration of optical circuits in optical communication and computer.

**Keywords:** coherent perfect absorption, single-channel, two-channel, length of dielectric

**PACS:** 42.25.Bs, 42.25.Hz, 42.55.Ah

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60967003) and the Natural Science Foundation of Jiangxi, China (Grant No. 2010GQW0044).

† E-mail: shenyunoptics@gmail.com