

匹配液的折射率对光纤定向耦合器 分光比的影响

宋晏蓉 王养萍 周国生
(山西大学物理系, 太原 030006)

提 要

本文从理论和实验两个方面研究了光纤定向耦合器中使用不同折射率的匹配液对其分光比的影响。做出了分光比在 1/1~1/30 之间变化的光纤定向耦合器。

关键词: 光纤定向耦合器, 匹配液。

一、引 言

光纤定向耦合器在光通讯方面有着重要作用^[1~2], 文献[3]用射线理论讨论了光纤定向耦合器中两光纤直接耦合时的耦合分光比及损耗值。而实际耦合器中, 耦合光纤间有匹配液或粘接剂。我们用射线理论讨论了匹配液的折射率对耦合器分光比的影响, 并做了一系列实验, 达到了分光比可变的要求。通过改变匹配液的折射率, 得到耦合器分光比在 1/1~1/30 之间变化。

二、理论分析

图 1 为耦合器结构简图。其体积为 $2 \times 3 \times 2 \text{ cm}^3$, 耦合区长度为 6 mm, 光纤弯曲的曲

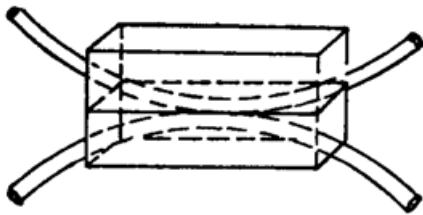


Fig. 1 The structure diagram of a coupler

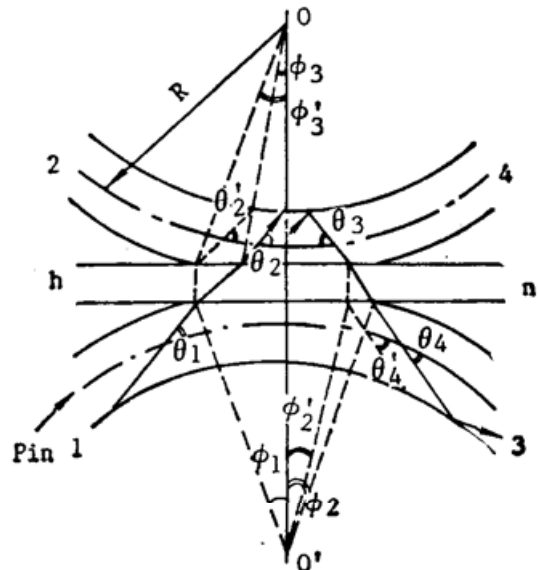
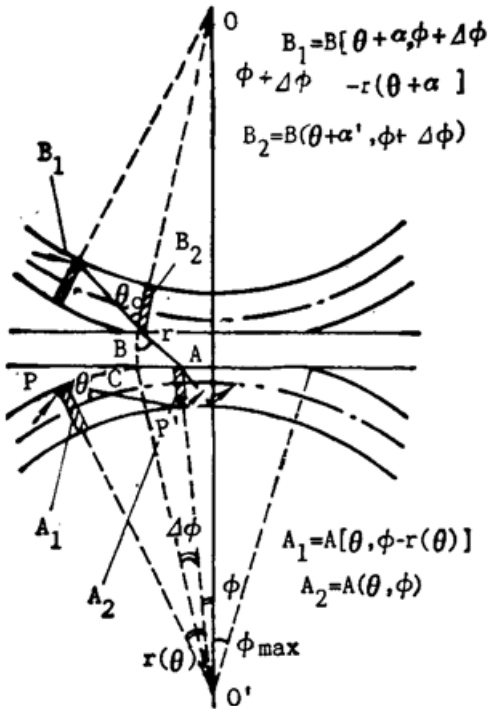


Fig. 2 The sectional drawing of the coupler

率半径 R 为 25.9 cm, 纤芯半径 a 为 $25 \mu\text{m}$, $NA=0.22$. 设上下两耦合光纤的所有结构

参数均相同。两耦合光纤的耦合面间加有折射率为 n 的匹配液, 其厚度为 h , 图 2 是耦合器截面图, 光从下面的光纤 1 端进入, 从 3、4 端输出, 称下面的光纤为主光纤, 上面的为副光纤。传输光线的位置可由 θ 、 ϕ 表示^[3]。传输角 θ 是光线与光纤轴间的夹角, 中心角 ϕ 表示光线与耦合面相交点的张角, 在中心轴 OO' 右边 ϕ 定义为正值, 左边为负值。图 3 是耦合器工作时功率密度转换图。图中传输角为 θ 的子午光线 PP' 的中心张角 $r(\theta)$ 可表示为^[3]:



$$r(\theta) = \begin{cases} \cos^{-1}\left(\frac{R \cdot \cos \theta}{R+a}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{R \cdot \cos \theta}{R-a}\right); \\ \theta \geq \cos^{-1}\left(1 - \frac{a}{R}\right), \\ \cos^{-1}\left(\frac{R \cdot \cos \theta}{R+a}\right); \theta < \cos^{-1}\left(1 - \frac{a}{R}\right). \end{cases} \quad (1)$$

Fig. 3 Power density transform diagram

当 $\theta < \cos^{-1}\left(1 - \frac{a}{R}\right)$ 时, 光线在内表面没有反射, 直接在光纤中传到了输出端。

当光线由一根光纤耦合进另一根光纤时, 要通过匹配液层。图 2 中, θ 、 ϕ 表示有匹配液时的角度, θ' 、 ϕ' 为没有匹配液时角度。因为光纤弯曲的曲率半径 $R \gg a$ (纤芯半径), 因而有 $\theta_2 \approx \theta'_2 = \theta_1 + 2\phi_1$, $\theta_4 \approx \theta'_4 = \theta_3 - 2\phi_2$ ^[3]。 $\Delta\phi$ 表示光线穿过匹配液层, 与上下两平面交点对光纤曲率中心 O 或 O' 的张角, 则: $\Delta\phi = \phi'_3 - \phi_3 = \phi_1 - \phi_3$, 计算得 $\Delta\phi$ 为 (图 3 推导见附录):

$$\Delta\phi = \cos^{-1}\left(\frac{\cos \phi}{2 \cos(\phi + \Delta\phi)} + \frac{\cos(\phi + \Delta\phi)}{2 \cos \phi} - \frac{\cos(\phi + \Delta\phi) \cdot \cos \phi \cdot h^2 \operatorname{tg}^2[\sin^{-1}(n_0/n \cdot \sin \theta_0)]}{2(R+a-D)^2}\right). \quad (2)$$

其中 D 为光纤磨削掉的深度。在没有匹配液层时, 两耦合光纤间耦合系数为^[3]:

$$k(\phi) = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \cos^{-1}\left(\frac{R+a-D}{a \cdot \cos \phi} - \frac{R}{a}\right); & \alpha \leq 0 \\ 0; & \alpha > 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\alpha \approx 2\phi$ ($R \gg a$) 是光线由一根光纤传输进另一根光纤时引起的传输角的变化。

当匹配液的折射率 n 小于纤芯折射率 n_0 时, 由于部分光线全反射, 耦合系数为:

$$k' = k(\phi) \cdot \left(1 - \frac{\sin^{-1} \sqrt{n_0 - n}}{\sin^{-1} \sqrt{n_0}}\right). \quad (4)$$

如图 3 所示, 定义在主光纤中传输角在 $\theta \sim \theta + d\theta$ 之间, 中心角在 $\phi \sim \phi + d\phi$ 间的光线携带的功率密度为 $A(\theta, \phi)$, 副光纤中为 $B(\theta, \phi)$, 可得出:

$$A(\theta, \phi) = [1 - k'(\phi)] \cdot A[\theta, \phi - r(\theta)] + k'(\phi + \Delta\phi) \cdot B[\theta + \alpha', \phi + \Delta\phi - r(\theta + \alpha')]. \quad (5)$$

$$B(\theta, \phi) = [1 - k'(\phi)] \cdot B[\theta, \phi - r(\theta)] + k'(\phi + \Delta\phi) \cdot A[\theta + \alpha', \phi + \Delta\phi - r(\theta + \alpha')] \cdot \beta. \quad (6)$$

其中 $\alpha' = 2(\phi + \Delta\phi)$ 。(5)式中右方第一项的 $A[\theta, \phi - r(\theta)]$ 代表主光纤中的光在其中连续传播, 因子 $[1 - k'(\phi)]$ 表示在传输过程中, 有一部分光能以因子 $k'(\phi)$ 耦合进了副光纤, 在主光纤中传播的是未被耦合的那一部分。第二项是副光纤中的光以因子 k' 耦合进了主光纤中的功率密度。第二项中乘的因子 β 是损耗因子。它是由光线从一根光纤通过匹配液进入另一根光纤时受到的散射、吸收等损耗产生的。同样得出副光纤中的功率密度由公式(6)所示。

在图3中我们只画出了光纤中的子午光线示意图, 但实际上在公式(5)、(6)中已包括了非子午光线携带的功率, 因为耦合因子 $k'(\phi)$ 包含了子午光线和非子午光线两种情况。

由密度公式, 可以求出主、副光纤中的输出功率 P_m, P_a :

$$P_m = \int_0^{\theta_{\max}} \int_{\phi_{\max} - r(\theta)}^{\phi_{\max}} A(\theta, \phi) d\phi d\theta, \quad (7)$$

$$P_a = \int_0^{\theta_{\max}} \int_{\phi_{\max} - r(\theta)}^{\phi_{\max}} B(\theta, \phi) d\phi d\theta. \quad (8)$$

其中 θ_{\max} 由数值孔径来定, ϕ_{\max} 由被磨削的光纤部分的边缘来定, 见图4。

由于公式(5)、(6)无法求出 $A(\theta, \phi)$ 、 $B(\theta, \phi)$ 的解析式, 因而(7)、(8)式没有解析解。要求出 P_m, P_a , 只有用计算机进行数值分析。大致解法是: 先设置 $A(\theta, \phi)$ 、 $B(\theta, \phi)$ 的初值, 即将 θ, ϕ 分成均匀的 n, m 份, 对每一个 $A(\theta_n, \phi_m)$ 、 $B(\theta_n, \phi_m)$ 赋初值。将对应于某一 θ 角的光线, 逐一改变 ϕ 值, 由(5)、(6)式逐步递推, 求出在输出端的每根光线的能量; 再把对应所有 θ 角的光线携带的能量加起来, 即求出 P_m, P_a 的值。其中初值均为 $A=1, B=0$, 这是因为在没有耦合前, A 中能量无损失, 所以处处为1, 而 B 中处处为0。

求出主、副光纤中的功率密度 P_m, P_a , 即可求得耦合器的分光比、损耗:

$$\text{分光比} = P_a/P_m, \quad \text{损耗} = \frac{P_0 - (P_a + P_m)}{P_0}, \quad P_0 \text{ 为输入总功率。理论损耗是由光线在}$$

耦合时溢出光纤引起的。

计算得到的理论曲线如图4、图5中虚线所示。图4为分光比随折射率变化的曲线; 图

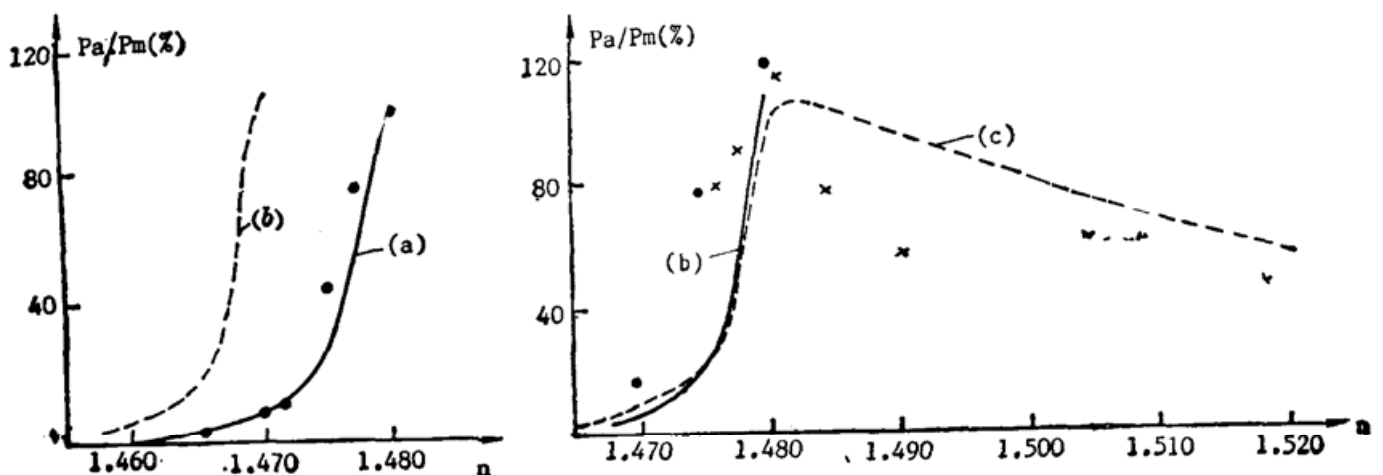


Fig. 4 Branching ratio VS. refractive index.

(a) first liquid; (b) second liquid; (c) third liquid

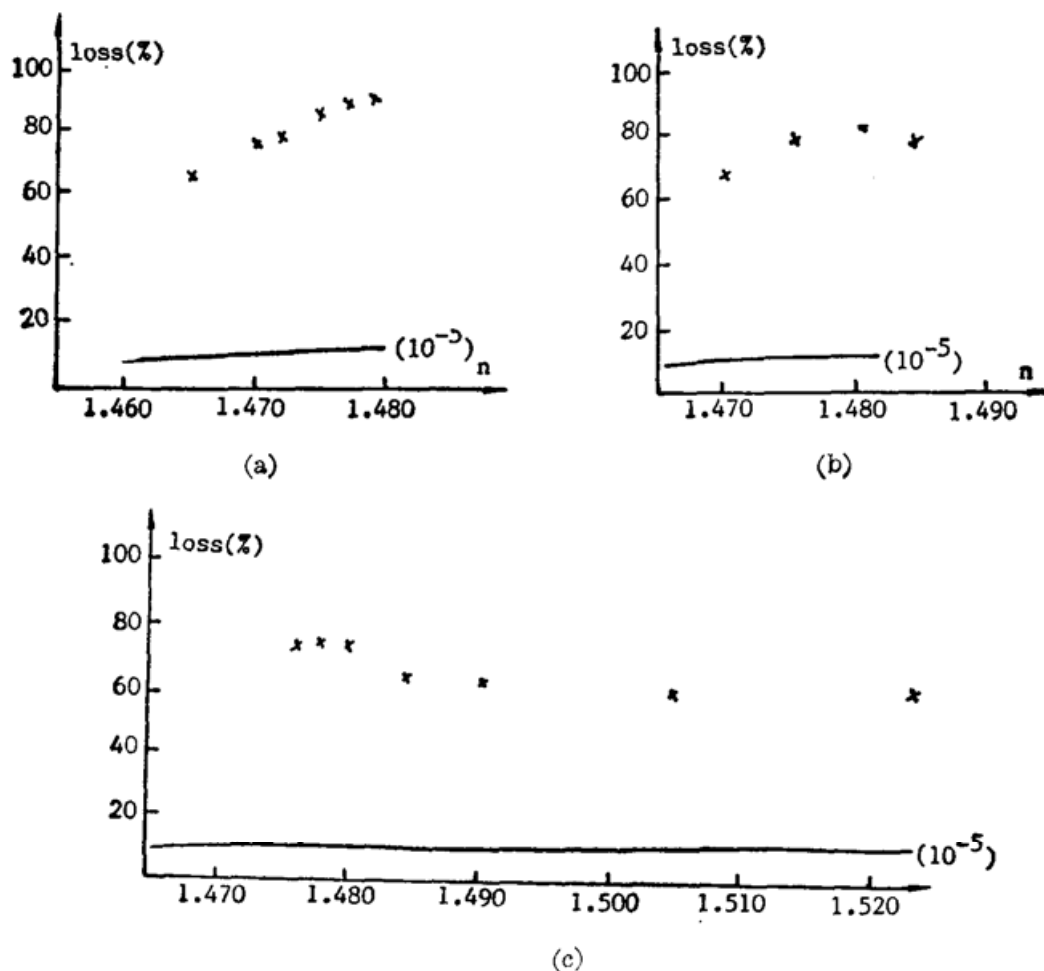


Fig. 5 Loss VS. refractive index.

(a) first liquid; (b) second liquid; (c) third liquid

5 为损耗曲线。(a)、(b)、(c)为三种不同匹配液时的曲线图。由分光比随折射率变化的曲线可知,两耦合光纤间匹配液折射率越接近纤芯折射率,分光比越高。当 $n=1.48$ 时(纤芯折射率),分光比为 1。在 $n \leq 1.48$ 时,匹配液折射率越低,分光比越小,可在 $1/1 \sim 1/30$ 间变化。图中的分离点即为实验值。图 6、图 7 是用计算机模拟的不同折射率下,耦合器工作时的光功率密度在两耦合光纤中的传输分布图。图 6(a)、(b) 分别为主、副光纤输出端,光线携带的功率密度随传输角 θ 的变化曲线。三条曲线分别对应耦合器中匹配液的折射率 $n=1.47$ 、 1.475 、 1.48 。以 $n=1.47$ 为例,在主光纤中当 θ 角小于某一角度 θ_c 时,功率密度不变,均为 1。这是因为在主光纤中以这些角度传输的光线,由于在耦合面发生全反射,没有耦合

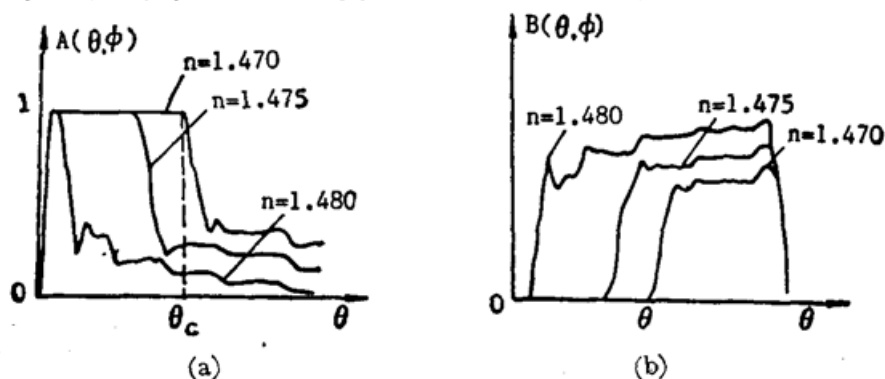


Fig. 6

(a) Power density A VS. θ (transmission angle); (b) Power density B VS. θ (transmission angle)

进副光纤。图 6(b) 中, 在副光纤中对应这部分传输角传输的光线携带的功率密度为 0。随 θ 角增大, 由主光纤耦合进副光纤中的光线增多, 主光纤中功率密度减小, 副光纤中的增大。由图 6(a) 还看出匹配液折射率增大时, 角 θ_0 减小, 对应某一传输角的功率密度也随 n 的增大而变小, 因此由主光纤耦合进副光纤的光线越多, 分光比越大。

图 7(a)、(b) 分别是对应某一传输角 θ , 主、副光纤中光线携带的功率密度随中心角 ϕ 的变化曲线。三条曲线分别对应折射率 $n=1.47$ 、1.475、1.48 的情况。

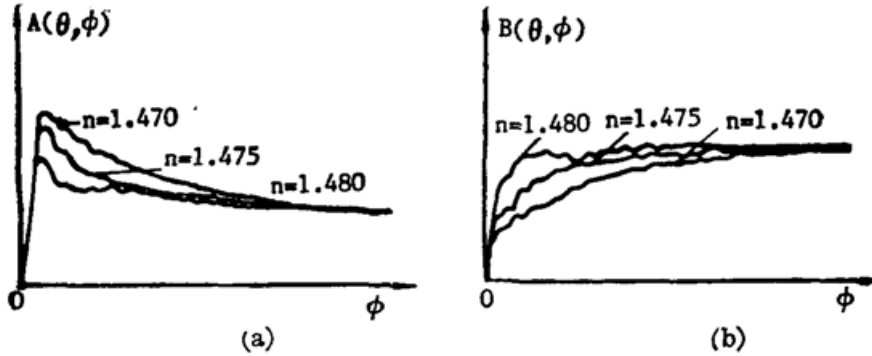


Fig. 7

(a) Power density A VS. ϕ (centre angle); (b) Power density B VS. ϕ (centre angle)

三、结果分析

以上着重讨论了匹配液折射率小于纤芯折射率的情况, 且实现了分光比在 $1/1 \sim 1/30$ 间变化的要求。对匹配液折射率大于纤芯折射率的情况, 也做了理论计算和实验, 如图 5(e), 图 6(e), 就不再详细讨论了。只分析小于纤芯折射率的情况。

由图 5、图 6 看出, 理论曲线和实验曲线基本相附。实验值的分光比大于理论值, 有以下几个原因:

1. 由耦合器本身的不对称造成的。即当主光纤的磨削深度小于副光纤时, 副光纤受光面积增大, 使副光纤接收到的光功率大于理想耦合器中副光纤接收的光功率, 因而耦合效率增加, 分光比增大。

2. 上下两光纤中心线不在一条直线上, 与上情况类似, 也使耦合效率增加, 分光比增大。

实际的耦合器插入损耗比理论值大得多, 主要是两耦合光纤匹配不完全造成的。此外还有些其它损耗也造成了实际值大于理论值。

四、结 论

1. 当改变耦合器中匹配液折射率时, 可改变耦合器分光比。匹配液折射率小于纤芯折射率时, 若折射率减小, 耦合分光比减小, 变化范围在 $1/1 \sim 1/30$ 之间, 甚至更大。

2. 当匹配液折射率大于纤芯折射率时, 匹配液折射率增大, 分光比减小。由此做出了分光比可变的耦合器。

附录:

如图 4, 在 $\triangle ABC$ 中, $CA = h \cdot \tan r$, $r = \sin^{-1}\left(\frac{n_0}{n} \cdot \sin \theta_0\right)$, $AO' = \frac{R+a-D}{\cos \phi}$, $OO' =$

$\frac{R+a-D}{\cos(\phi+\Delta\phi)}$, 在 $\triangle CO'A$ 中, $\cos\Delta\phi = \frac{AO'^2 + CO'^2 - OA^2}{2AO' \cdot CO'}$, 将前面几式代入此式, 整理即可。

参 考 文 献

- [1] K. Ogawa, A. R. McCormick; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 13 (Jul), 2077.
- [2] R. A. Bergh *et al.*; *Electron. Lett.*, 1980, **16**, No. 7 (Mar), 260.
- [3] T. Tanaka, H. Serizawa; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 12 (Jun), 2019

Influence of refractive index of matching liquid on branching ratio of optical fiber directional coupler

SONG YANRONG, WANG YANGPING AND ZHOU GUOSHENG
(Department of Physics, Shanxi University, Taiyuan 030006)

(Received 1 February 1989; revised 6 August 1990)

Abstract

The effect of refractive index of matching liquid on the branching ratio of optical fiber directional coupler is discussed theoretically and experimentally. The fiber directional coupler with branching ratio of 1/1~1/30 has been fabricated.

Key words: optical fiber directional coupler; Matching liquid.