

非线性导波光栅的研究*

徐 迈 李 燕

(中国科学院长春物理研究所)

提 要

本文描述了非线性导波周期结构的基本概念和制备方法,并在 InSb 和掺半导体玻璃波导上制备出了光栅耦合器,观测到了非线性耦合效应,讨论了它们的实用化前景。

关键词: 非线性导波, 光栅耦合器。

一、引 言

薄膜光波导是实现非线性光学效应的理想结构形式。它提供了一维或多维无衍射光传播,把光束截面限制在光波长尺寸范围内,造成波导内激光功率密度成数量级增长,使非线性相互作用在低激光功耗下产生。70年代,波导中的二次非线性相互作用已是一个发展较好的领域。到80年代,由于受全光信息处理,光通讯和光计算等技术发展的强力推动,人们对三次非线性导波的研究具有更大的兴趣。迄今,发生在光波导中的简并四波混频(DFWM)^[1]、相干反斯托克斯拉曼光谱(CAR)^[2]、非线性导波物理和应用^[3]的研究都作了相应报道。

周期结构(光栅)在非线性导波中有着特别重要的意义,由于非线性导波有效折射率与耦合进波导的光功率密度有关,所以在导波矢量与光栅矢量匹配耦合情况下,可在波导中传输最大光强,当改变入射的激光功率时,由于非线性媒质的光强感应折射率变化效应,破坏了原来的最佳匹配耦合条件,使耦合效率降低^[4],甚至完全失配而阻断波导中光波传输。基于这类效应的潜在波导周期结构器件包括:光栅开关,光限制器,可变光栅耦合器,光栅调谐滤波器,光控空间扫描器和分布反馈(DFB)双稳态器件等。

本文对非线性导波,非线性光栅耦合的基本概念作了描述,提出制备各类非线性导波光栅器件的方法,并在 InSb 波导及掺半导体玻璃波导上实现了非线性光栅耦合。

二、非线性导波光栅耦合

众所周知,光在与光强有关的折射率媒质波导中传播时,光功率密度变化引起媒质折射率改变由下式表示

$$n = n_1 + n_2 I, \quad (1)$$

收稿日期: 1989年8月25日; 收到修改稿日期: 1990年5月11日

* 国家自然科学基金资助的项目。

式中 $i=s.f.c.$ 分别代表衬底、波导和包敷层。 n_i 和 n_{2i} 分别代表三层媒质的线性折射率和非线性折射率系数。 S 代表媒质中的局部光功率密度。

在非线性周期波导中,光栅可定义为媒质折射率正弦变化的区域,即

$$n(x) = n_i + \Delta n \sin(Kx) + n_{2i} S. \tag{2}$$

Δn 为光栅调制深度, K 为光栅矢量, $K = \frac{2\pi}{\Lambda}$, Λ 是光栅周期。令非线性波导中传输的光以 θ_i 角入射到光栅上,受光栅的调制作用,一部分光以 θ_r 角反射,另一部分光透过光栅传输,其光栅反射率与透过率分别为 R 和 T ,如图 1 所示。图中 β_1 和 β_2 分别表示入射到光栅上和从光栅以 θ_r 角反射的导波传播常数。在某一特定的导波功率密度作用时,波导中平行和垂直光栅矢量方向上导波矢与光栅矢间的耦合失配量分别以 $\Delta\beta_{\parallel}$ 和 $\Delta\beta_{\perp}$ 来表示。在相位匹配条件下, $\Delta\beta_{\parallel} = \Delta\beta_{\perp} = 0$ 。在一般情况下,耦合方程可由下式表示^[5],即

$$\left. \begin{aligned} \frac{i da_2(x)}{dx} &= T \exp(i\Delta\beta_x) a_1(x), \\ \frac{-i da_1(x)}{dx} &= T \exp(-i\Delta\beta_x) a_2(x). \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式中 a_1, a_2 为相互耦合的导波振幅, T 为光栅耦合系数, $\Delta\beta_x$ 表示为

$$\Delta\beta_x = \Delta\beta_{\parallel} = \beta_1 \cos \theta_i + \beta_2 \cos \theta_r - \frac{2\pi}{\Lambda}, \tag{4}$$

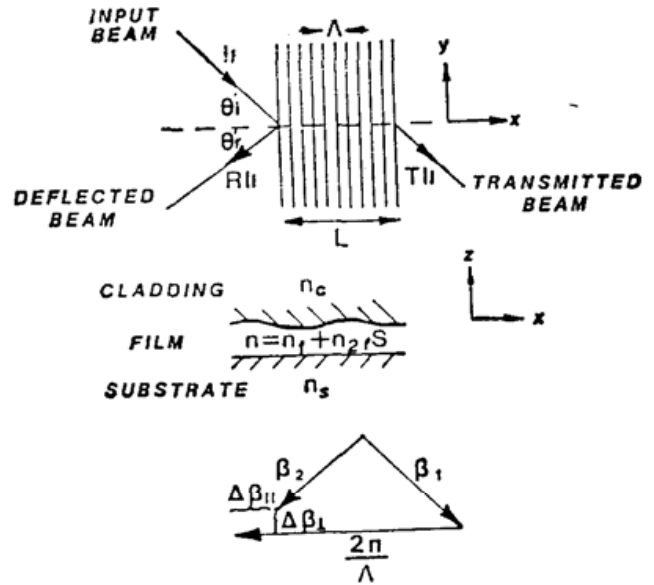
非线性导波光栅的反射系数为^[6]

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{(\Gamma L)^2}{(\Delta\beta_{\parallel} L)^2 + (DL)^2 \coth^2(DL)} \\ D &= (\Gamma^2 - \Delta\beta_{\perp}^2)^{1/2}. \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中 L 为光栅长度。显然有

$$\begin{aligned} \Delta\beta_{\parallel} L = 0 & \quad R = \tanh^2(\Gamma L), \\ \Delta\beta_{\parallel} L = \pi & \quad R \approx 0, \end{aligned}$$

$\Delta\beta_{\parallel}$ 的大小与耦合进波导的光功率密度有关。



NONLINEAR WAVEGUIDE-GRATING GEOMETRY
Fig. 1 Nonlinear guided-wave gratings geometry

三、非线性导波光栅的制备

非线性媒质多为半导体材料,以非线性媒质形成的波导器件都运转在红外波段。因此,非线性光栅耦合器的光栅周期通常比较大。以具有最大三阶非线性系数的半导体 InSb 材料为例,运转在 $10.6 \mu\text{m}$ 波长下,其双光束光栅耦合器的周期在 $2 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 范围内,这就限定

了制备抗蚀剂光栅掩膜的曝光干涉仪两相干光束的夹角在 $13^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 范围内(以 4416 \AA He-Cd 激光为光源), 而使用两个分立反射镜的常规干涉仪实现小夹角曝光必然造成较长的干涉光路, 致使曝光场远离光学台面。为在各种非线性波导材料上制备各种类型(周期, 变周期, 弧形)光栅, 并使光栅周期能在较大范围内进行选择, 以适应不同波导材料和不同激光波长的需要, 我们采用文献[7]的简易多用干涉仪作为制备常规非线性导波光栅的装置, 如图 2, 图 3, 图 4 所示。它们分别对应制备周期、变周期和弧形光栅的装置。图 3 只是在图 2 装置基础上, 在空间滤光器与反射镜之间嵌入一柱面透镜, 柱面透镜的放置取向如图 3 所示。图 4 是把图 3 中的柱面透镜旋转 90° 角, 即形成制备弧光栅的干涉仪。这些干涉仪的光路可以很短, 即使是在相干光束间夹角很小情况下。此外, 装置具有光学元件少, 光学效率高, 抗干扰性强和多用途等优点。

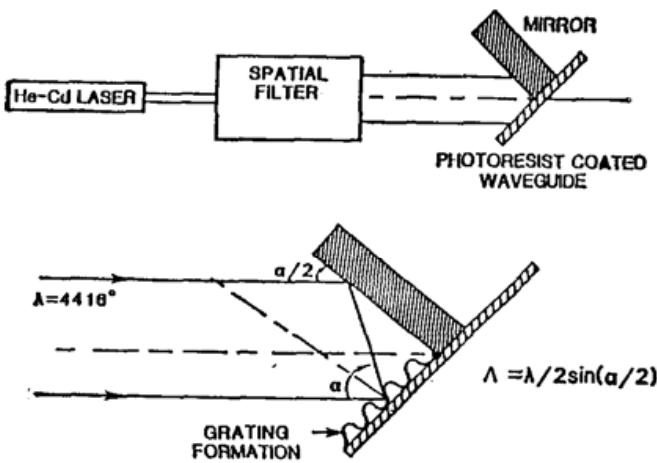


Fig. 2 Interferometer used for fabricating gratings

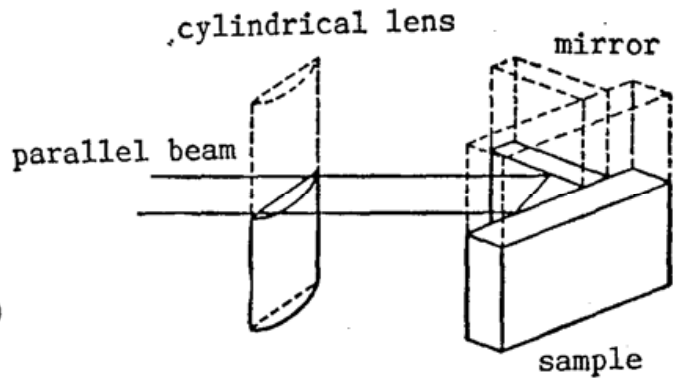


Fig. 3 Interferometer used for fabricating chirped gratings

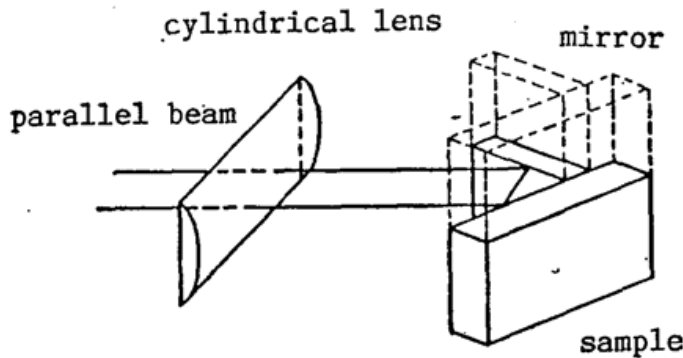


Fig. 4 Interferometer used for fabricating curved gratings

四、实验结果与讨论

利用图 3 的干涉仪, 在以 CaF_2 为衬底的 InSb 波导材料上制备了离子蚀刻光栅耦合器。用低功率连续 CO_2 激光器($\lambda = 9.567 \mu\text{m}$)激励样品, 从样品的透过率曲线最低值得到各阶模入射耦合角, 如图 5 所示, 波导与光栅参数也在图中标出, 此外 d 为光栅沟槽深度, t 为 InSb 膜厚。

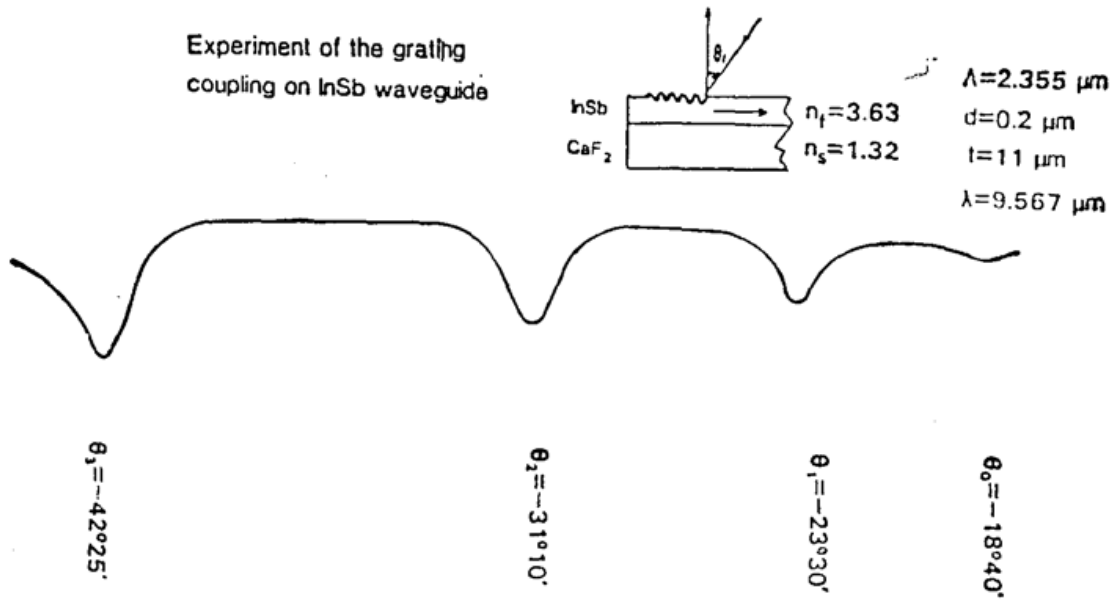


Fig. 5 The incident coupling angles of different order mode on InSb waveguide grating coupler

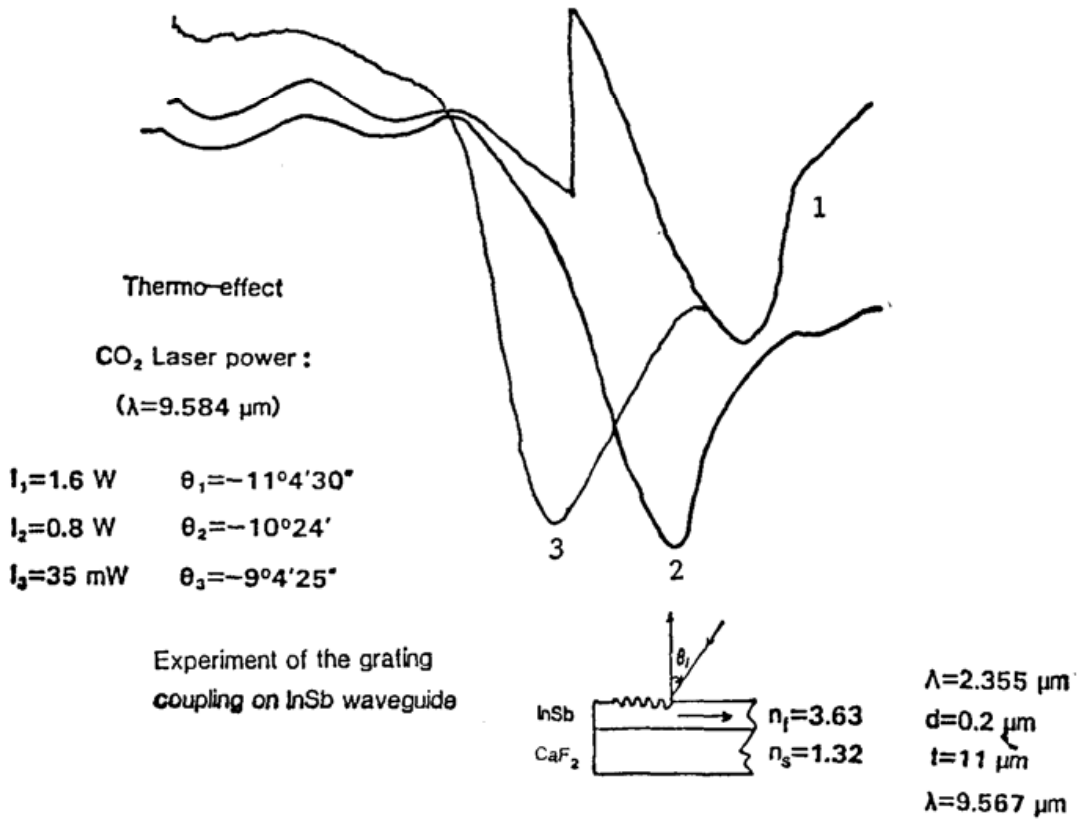


Fig. 6 Thermo-effect phase shift on InSb waveguide

观测热效应引起的相移是在 InSb 单模波导中实现的。改变入射激光功率，光栅的入射耦合角发生变化，如图 6 所示。观测电子跃迁过程引起的三阶非线性极化需克服热效应，要使用超高速脉冲 CO₂ 激光，这将是进一步的工作。

在单模掺半导体玻璃波导上制备周期为 0.34 μm 的光致抗蚀剂光栅耦合器，并利用图 3 干涉仪在同一块波导上制备变周期光栅输出耦合器，见图 7。脉宽 100 ps，每秒 5 次的 YAG 激光倍频 0.532 μm 光被光栅 1 耦合进波导中，再通过变周期光栅 2，耦合输出并聚焦到电检测器 3 上。其光栅耦合效率与输入脉冲能量的变化示于图 8。图中 P_{in} 和 P_{out} 分别

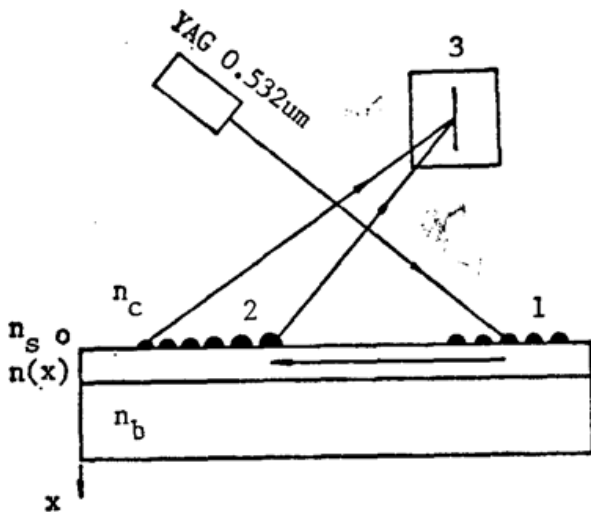


Fig. 7 Grating coupling of semiconductor doped glass waveguide

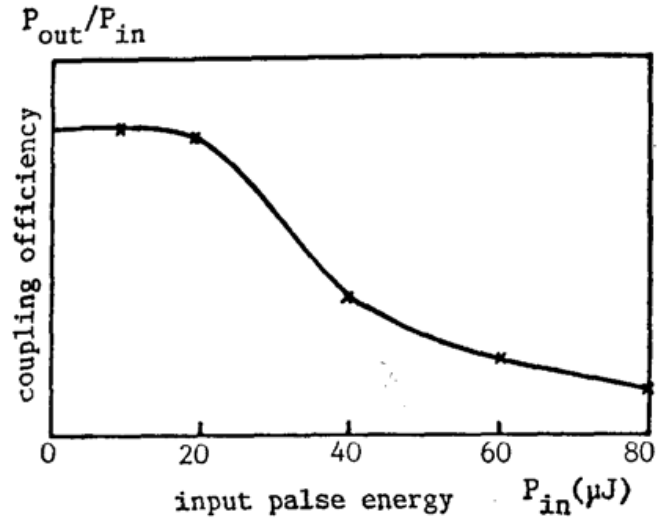


Fig. 8 Grating coupling efficiency on semiconductor doped glass waveguide as a function of input pulse energy

代表输入到光栅上和从变周期光栅输出的脉冲激光能量，纵坐标给出相对测量结果。在非线性波导媒质中，低功率下光栅耦合的相位匹配关系，由于耦合进波导的激光功率密度增长，引起波导模折射率改变，造成耦合失配，使耦合效率降低。令光在波导中传输方向为 x ，在传输距离 l 内引起的相移变化可写成：

$$\Delta\phi = \int_0^l n_2(S) S dx_0 \tag{6}$$

假如在光的传输距离内所积累的相移变化为 π ，则利用这种效应可设计各种类型的非线性导波功能器件。器件实用化的关键是在较短的光传输距离内 ($l < 2 \text{ mm}$) 实现这一效应。它取决于波导材料有大的三阶非线性系数，低的吸收损耗，并采用条型波导结构，在保持波导内的高功率密度前提下进一步降低激光器功耗，以使器件与半导体激光器兼容成的可能，这将是我们的目标。

参 考 文 献

[1] A. Gabel, K. W. DeLong *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**, No. 21 (Nov), 1682~1684.
 [2] G. I. Stegeman, R. Fortenberry *et al.*; 1983, **8**, No. 6 (Jun), 295~297.
 [3] C. T. Seaton, Xu Mai *et al.*; *Opt. Eng.*, 1985, **24**, No. 4 (Jul/Aug), 593~599.
 [4] R. M. Fortenberry, R. Moshrefzadeh *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**, No. 12 (Sep), 687~689.
 [5] G. I. Stegeman, D. Sarid *et al.*; *J. O. S. A.*, 1981, **71**, No. 12 (Dec), 1497~1509.
 [6] H. Kogelalik; *Bell System Tech. J.*, 1969, **48**, 2909~2949.
 [7] Xu Mai, R. Moshrefzadeh *et al.*; *Appl. Opt.*, 1985, **24**, No. 19 (Oct), 3155~3161.

Research of nonlinear guided-wave gratings

XU MAI AND LI YAN

(Changchun Institute of Physics, Academia Sinica)

(Received 25 August 1989; revised 11 May 1990)

Abstract

Fundamental concept and fabricating method of nonlinear guided-wave periodic structure are described in this paper. Grating couplers are made on InSb and semiconductor doped glass waveguide. Nonlinear coupling effects are observed experimentally. Their practicabilities are discussed.

Key words: nonlinear guided-wave; grating coupler.