

# 光纤光栅、全光纤光子线路及其集成

董孝义

王玉堂

(南开大学, 天津 300071)

(国家自然科学基金委员会, 北京 100083)

**[摘要]** 光纤光栅技术的发展有可能在光纤通信、光纤传感等诸多高技术领域引起一场新的技术革命。为此, 本文对光纤光栅的机制、制作工艺以及基于光纤光栅的全光纤器件等作了简要介绍, 进一步提出了全光纤光子集成的构思, 并给出了一个典型的应用模型。

**[关键词]** 光纤, 光栅, 光子学, 全光纤器件, 光集成

## 1 引言

1978年 Hill 等人首次观察到掺锗光纤中的光感应光栅效应<sup>[1]</sup>, 其后十余年, Meltz 等人又发展了紫外光侧面写入光折变光纤光栅技术<sup>[2]</sup>。显然, 这是继掺杂(铒、钕等)光纤放大技术之后, 光纤主动性的又一次出色的显示。所谓光纤中的光折变效应是指激光通过掺锗光纤时, 光纤的折射率将随激光光强的空间分布发生相应变化, 变化的大小与光强成非线性关系。如用一定强度的激光干涉条纹(全息照相)从侧面辐照掺锗光纤, 光纤内部的折射率则产生相应变化, 呈现出周期性的分布, 并在激光撤离后仍被保存下来, 成为一种光纤型的光栅。在大约小于 500℃ 的温度下这种光栅稳定不变。或者说, 它可用 500℃ 以上高温加热擦抹。这种光栅制作简单, 在光纤与光纤通信、光纤传感等高技术领域将有特别重要的应用。普遍认为, 掺锗光纤布喇格光栅(GDBG)的开拓是继掺铒放大器(EDFA)之后光纤领域的又一重大突破, 也将成为光纤通信发展的又一个重要里程碑。光纤光栅的一个重要应用是使各种全光纤器件(如全光纤激光器、全光纤滤波器等)的研制成为可能, 因而所谓的全光纤光子集成<sup>[3-6]</sup>, 即将各种全光纤器件与线路集成在一条光纤里, 形成诸多集成型光纤信息系统也即将成为现实。不言而喻, 这将导致光纤技术及其相关领域又一次新的革命性的飞跃。

另外, 从光子学的发展来看, 光纤光栅、全光纤光子线路及其集成的提出很可能成为一次有里程碑意义的重大历史事件。我们知道, 导致电子学一次重大飞跃的是电子回路的出现, 由于它的出现, 才使得诸多电子技术、电子系统及其集成, 乃至“电子到千家万户”得以实现。从比较中, 人们很早就意识到, 作为一门研究, 以光子为信息载体的新兴学科——光子学, 若要像电子学那样获得质的发展, 以致使诸多光子技术、光子系统及其集成, 乃至“光子到千家万户”等等这些跨世纪的战略目标能够尽快得以实现, 则必须找到一种或多种可构

国家自然科学基金资助课题。

本文于 1995 年 6 月 20 日收到。

成光子回路的切实可行方案。为此，人们已做过不懈的努力。例如，人们已研究和研制出一些光纤耦合器及其简单的光纤回路器件等，尽管诸多研制者当初并未意识到它对发展光子学的重大意义。今天，新型光纤光栅的研制成功又为我们找到一种更为简单、有效和可行的制作光子回路的新方案和新途径，面对这些以及其他诸多新进展，自然促使我们产生更高层次的深思：光子学已面临大好的机遇，其发展已经到了十分关键的时刻，即将产生历史性的巨大飞跃，且恰好与当前信息社会的迅猛发展相适应。因此也可以说，光纤光栅、全光纤光子线路及其光子集成正是为满足今天信息高速公路的要求、为适应信息社会的发展应运而生的。

## 2 光纤光栅

### 2.1 光纤光栅的光致机制

如上所述，用紫光侧面辐照光纤即可使之形成光栅。目前，对这种光纤光栅形成的动力学机制尚不完全清楚。一般认为，由于诱导光的作用，掺锗光纤中的某些键被破坏，释放出自由电子。这些自由电子进入色心陷阱，改变了掺锗光纤的光学特性，使之出现光折变效应。这类效应主要发生在光谱区的近紫外波段。由已知 Kramers-Kronig 关系式可知，这将产生一折射率增量<sup>[7]</sup>。如紫光写入为周期型分布，光纤内部折射率也将产生相应分布，因而形成光纤布喇格光栅 (GDBG)。另外，在光照射过程中，光纤纤芯材料结构释放诱导应力以及构形的畸变等也将对光致折射率的形成产生重要作用<sup>[6]</sup>。除此以外，还有一些见解与诠释。随着对光纤布喇格光栅的深入研究和实验，光致机制将更加清楚。

### 2.2 光纤光栅的制作技术

经近几年的广泛研究，已获得多种产生光纤布喇格光栅的方法，主要有以下几种：

(1) 驻波法<sup>[9]</sup> 最初的制作工艺是将波长 488 nm 的基模氩离子激光从一个端面耦合输入到掺锗光纤中，经过光纤另一端反射镜反射，使光纤内入射的激光与反射回的激光相干涉形成驻波。由于纤芯材料具有光敏性，因此其折射率就会发生相应的周期性变化，即干涉图中光强强的一部分比弱的一部分折射率变化大，于是形成了具有与干涉图周期一样的立体折射率光栅。这种方式写入的光栅，已测得其反射率达 90% 以上，反射带宽小于 200 MHz。此方法是早期使用的，由于此类实验是用特制掺锗光纤且在特定光纤长度下完成，要求掺锗量很高，光纤芯径很小，因此，其实用性受到限制。

(2) 全息成栅法 1988 年，Meltz 等提出一种新方法<sup>[10]</sup>，即用在紫外光谱区的干涉图在外部从侧面对光纤曝光产生光纤光栅。其具体操作是，用两束相干紫外光束在掺锗光纤的侧面相干，形成干涉图，利用光纤材料的光敏性形成折射率光栅。由于两束相干紫外光是从光纤侧面辐照的，因此相对于驻波写入法而称其为外侧写入法。显然，用这种方法写入的折射率光栅条纹间距与干涉条纹间距一致，所以通过改变入射光的波长及两相干光束之间的夹角，可以改变光栅条纹的间距，以获得适宜的光纤光栅。但要得到较高反射率的光栅，则对所用光源及周围环境有较高要求。例如，若在掺锗光纤上形成反射率达 50%—55% 的较坚固光栅，则需用连续功率为 18.5 mW 的激光曝光 5 分钟。另外，为得到稳定清晰的干涉条纹，对光源的相干长度也提出严格的要求，同时也要求周围环境十分稳定。可见，要求条件是很苛刻的。为此，近来又发展了一种脉冲激光侧面写入法，即将上述连续光源改为脉冲光源，只要脉冲激光的峰值功率足够高，以致在几个或一个光脉冲时间里即可写入光栅，则对光源的要求可

大大降低。不过,这将使设备的造价大幅度提高。

(3) 相位掩模法 这种新的写入技术是利用相位掩模<sup>[11]</sup>。将做好的相位掩模放在待成栅的光纤侧面位置上,然后将紫外光照到掩模上,光线经掩模相位调制衍射到光纤上形成干涉条纹,由干涉图即可在光敏性光纤中写入光栅。因此,所用掩模对紫外光为透明的,其零级衍射光被削弱,利用一级衍射光进行光栅写入。这种写入方法对所用激光光源的要求大大降低,仅对照射光的空间相干性有较高要求,而对其时间相干性要求不高。利用相位掩模技术大大简化了光纤光栅的制作系统,使光纤光栅写入技术提高到一个新的水平。

(4) 在线成栅法 最近,又有人提出一种光纤光栅制作的新技术<sup>[12]</sup>,它是在光纤拉制过程中,对没有包层的光纤裸芯上以一定的速度直接写入光栅。这样就可以免去许多较麻烦的工艺,使连续大批量进行光纤光栅的制作成为可能。关键技术是要对使用的准分子激光器输出激光光束截面进行改进,这种技术一旦实用化,必将使光纤光栅技术得到进一步发展。

在上述几种成栅方法中,选择合适的光源是极为重要的。适合成栅的紫外激光源有:倍频氩离子激光器(波长 244 nm),四倍频 YAG 激光器(265 nm),KrF 准分子激光器(248 nm)和 ArF 准分子激光器(193 nm)。为使成栅具有很高的精确度,要求激光输出相当稳定,且有足够的强度。因此,在一般情况下,需要加设必要的附属设施,如附加高性能的稳强与稳频装置等。最近“载氢”技术(即将掺杂光纤在高压氢室中预置若干时间)的开发,使成栅工艺要求降低。使用上述前三种连续激光辐照,均能在 1 分钟内形成满意的光纤光栅;使用最后一种脉冲激光,则经过大约 10 脉冲的辐照,也能得到满意的光纤光栅。

### 3 全光纤光子器件与线路

由于光栅具有有效的选频作用,从而使之在频域中呈现出丰富多采的传输特性,并由此可研制出各种性能优异的光纤带通或带阻滤波器、高质量多功能全光纤激光器与放大器,以及各种全光纤集成器件等。下面介绍几种基于光纤布喇格光栅的有源器件(如光纤光栅激光器、分布反馈激光器等)和无源器件(光纤光栅滤波器、模式转换器、波分复用器等)。

(1) 光纤激光器 早期我们做过这方面的工作<sup>[13]</sup>,并从理论上对掺铒光纤激光器的谐振腔进行过分析设计,实验上采用半外腔式 F-P 谐振腔,得到了功率为几百微瓦、波长为 1 536 nm 的激光输出。光纤两端面抛光、镀膜在工艺上非常困难,只能是原理性的研究,最终难于进入实用化。如采用光纤光栅,利用其波长反射率特性作激光器腔镜,则能很容易实现光纤激光器制作。显然,它具有光纤-光栅相互兼容的优点,不但易于做成实用化器件,而且易于与光纤耦合,为光纤集成创造有利条件。同时,这样制成的光纤激光器还具有输出稳定、光谱纯、线宽窄以及效率高等一系列优异特性。这些方面都显示出了光纤激光器比通常的半导体激光器要好,所以在很多场合有可能取代半导体二极管激光器信号源。与半导体激光器相比,光纤激光器还具有较高的光输出功率、较低的相对强度噪声(RIN)以及较宽的调谐范围等。光纤激光器的单模输出通常可达 10 mW 以上,RIN 为发射噪声极限,线宽可做到小于 2.5 kHz,显然,光纤激光器优于线宽 10 MHz 的分布反馈(DFB)激光器。在波分复用(WDM)传输系统中,一个很重要的参量就是可调谐性,光纤激光器不但很容易实现可调谐,而且调谐范围(>50 nm)也远大于半导体激光器(1—2 nm)。利用光纤成栅技术把多掺杂光纤(如掺铒或掺镱)相隔一定长度的两处写入光折变光栅,两光栅之间相当于谐振腔,用

波长 980 nm 或 1 480 nm 的泵浦激光激励, 纤中的铒离子就会产生增益放大。而且, 由于光栅的选频作用, 谐振腔只能反馈某一特定波长的光, 因此只能形成特定波长的激光振荡, 输出为很纯的单频激光, 再经过光隔离器 (ISO), 即能输出窄线宽、高功率、低噪声的信号激光。

(2) 分布反馈式 (DFB) 光纤激光器 除了光纤激光器以外, 我们还可以把光纤布喇格光栅作为半导体二极管激光器的外腔反射镜, 这样就可以制出性能优异的 DFB 激光器, 不仅输出激光的线宽窄易于与光纤系统耦合, 而且通过对光纤光栅施加纵向拉伸力, 还能够人为控制其输出激光的频率和模式。近期已有实验证明, 通过对光纤光栅的控制可获得线宽小于 50 kHz、啁啾小于 50 Hz、并用于 1.2 Gb/s 直接调制的激光输出<sup>[14]</sup>。它为我们提供了一种很有发展潜力、简单、低损耗而且紧凑可调谐的激光器。此外, 在激光二极管的一端面上镀上增透膜, 就可实现振荡频率在 8 nm 范围内连续可调<sup>[15]</sup>。还有一个重要的应用, 就是在主动锁模半导体激光器上使用布喇格光栅作为带宽控制光学反馈器件。用这种方法, 在实验室已实现在  $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$  处, 得到宽度为 18.5 ps 的稳定的光孤子输出<sup>[16]</sup>, 并可望在将来的光孤子通信中得到广泛应用。

(3) 光纤滤光器、分接头、模式转换器和波分复用 (WDM) 器件 利用光纤布喇格光栅反射布喇格共振波长附近的光, 很容易做成波长选择分布反射镜或带阻滤光器。如果在一光纤耦合器的两根光纤上同时写入一样的布喇格光栅, 就可得到带通滤光器。图 1 所示是 Michelson 型带通滤光器, 只能通过布喇格共振波长附近的光<sup>[17]</sup>。也可以制作成 F-P 标准具型的带通滤光器 (图 2 所示)。反射率为 99.5% 的光栅组成的 F-P 标准具, 其自由光谱区范围为 1.06 GHz, 条纹间隔与宽度比为 660。实验表明, 单个光纤布喇格光栅反射损耗为  $\leq 0.27$ 。据最近报道, 国外已做成了条纹间隔与宽度比达 5 000 的光纤光栅标准具。

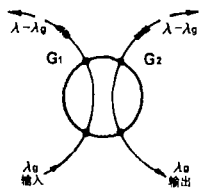


图 1 Michelson 型滤光器



图 2 F-P 型滤光器

如果信号光没有被反射, 分接头就成了吸收型滤光器。例如, 有人将这种闪耀光栅分接头作为增益补偿滤光器使用在掺铒光纤放大器上<sup>[19]</sup>。同时, 由于耦合出的光对导波的偏振态敏感, 所以可以作成芯内偏振片等器件。使光栅平面与光纤轴成一小角度 ( $\approx 1^\circ$ ), 就能作成反射型空间模耦合器<sup>[20]</sup>。

在 WDM 光纤通信系统中, 可以使用窄带滤光器抑制频带外的信号从而减少散粒噪声。这在全光纤 WDM 通信模式中有其出色应用价值。

(4) 光纤传感器 光纤传感器可对应力、应变、温度等进行测量。与传统的电子传感器相比, 光纤传感器的优点在于能适应高温、高压、腐蚀性或危险性大的环境, 具有很高的灵敏度和很宽的动态范围, 以及不受电磁干扰、结构紧凑小巧、可靠性高、低成本等一系列优

异特性。使用光纤光栅制作光纤传感器的传感机理是：光纤布喇格光栅的后向反射光波长为 $\lambda=2N\Lambda$ ，这里 $\Lambda$ 为光栅的栅距， $N$ 为正整数。当外部（测量对象）施加于光纤光栅的应力、应变、温度等有关参数发生变化时， $\Lambda$ 也随之改变，这样也就改变了光纤内部的后向反射光的波长。测量其改变量，就能够确知待测部位的相应参数及其变化。显然，在光纤若干个部位写入具有不同栅距常数 $\Lambda$ 的光纤光栅，自然可以同时测定若干个部位的相应参数及其变化。所以这是一种逐点写入方式的分布式光纤传感器，它代表着当今光纤传感技术的一个重要发展方向<sup>[1,9]</sup>，有着非常广泛的应用前景。

#### 4 全光纤光子集成

80年代后期，我们曾提出全光纤光子集成的新构思<sup>[3]</sup>，但因缺乏这种先进的光纤光栅耦合技术而无所作为。几年来，我们只分别研制了铒光纤激光器<sup>[13]</sup>、掺铒光纤放大器<sup>[21]</sup>、LN光纤调制器<sup>[22]</sup>、BSO光纤传感器<sup>[23]</sup>等。现在光纤光栅新技术的研制成功，为开展全光纤光子集成的研究创造了极好的契机，提供了有力的技术条件。最近国外已出现这类研究的迹象<sup>[24,25]</sup>。

前面已指出，利用光纤光栅这一新成果，可以制成具有各种功能的全光纤器件，如光纤激光器、光纤放大器、光纤滤光器、光纤调制器等，如将它们集成在一条光纤里则构成具有相关性能的光子组件或光子系统<sup>[3-6]</sup>，这就是全光纤光子集成。显然，这是一种全光纤（All-fibers）集成，具有响应速度快、信息容量大、功能全、效率高以及可超微型化、能与通信光纤兼容、无插入损耗等一系列优异特性，因此它在光计算、光通信等高新技术领域以及在开始实施的高速信息公路计划中将有重要的应用前景。作为实例，这里我们提出一种WDM系统的全光纤光子集成模型（如图3所示）。该系统由光波复用（信源）与解复用（信宿）两部分

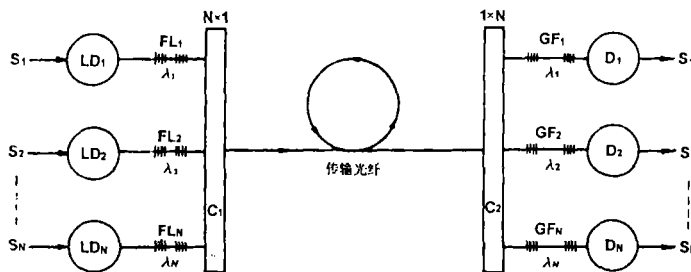


图3 全光纤光子集成 WDM 通信系统模型

组成。在信源端， $FL_1, \dots, FL_N$ 是分别泵浦的、波长分别为 $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ 的光栅光纤激光器，由“ $N \times 1$ ”的宽带光纤耦合器 $C_1$ 将它们耦合进入一条公用传输光纤。信息可由泵光载入，载入方式可采用两种方案：一是采用脉冲泵浦（即所谓增益开关脉冲LD）；一是采用小调制度的CW波泵浦。在信宿端，经“ $1 \times N$ ”的宽带光纤耦合器 $C_2$ 分出 $N$ 个光波，再由光纤光栅滤光器 $GF_1, \dots, GF_N$ 分别滤出波长为 $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ 的信息载波，最后经相应的光纤检波器 $D_1, \dots, D_N$ 将信息解出。这种波分复用通信系统不仅可用于光通信，在光计算、神经网络、光信息处理等诸多领域都有重要用途，因此，具有一定的代表性。

## 5 小结

目前, 一些发达国家已有相当的人力和物力用于研究光纤布喇格光栅和全光纤器件与集成系统, 其中, 光纤布喇格光栅和全光纤器件有望在不远的将来进入实用化。随着信息技术及其需求的迅猛发展, 基于光纤光栅的全光纤光子集成信息系统将在信息高速公路和多媒体通信以及光纤入户等发展领域占据重要地位。同时将表明, 光子集成系统的研制成功也必将对光通信、光计算以至生命科学等领域的发展产生深远的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Hill K O et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**: 647—649.
- [2] Meltz G et al. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Opt. Lett.*, 1989, **14** (15): 823—825.
- [3] 董孝义. 全光纤通信. *光通信技术*, 1990, **14** (1): 18—24.
- [4] 董孝义, 王廷尧. 新一代光纤通信与同步网 (原理与发展), 天津: 科技出版社, 1994, 68.
- [5] Xu M G et al. *Electr. Lett.*, 1994, **30**: 1085.
- [6] Martin J. *Electr. Lett.*, 1994, **30**: 811.
- [7] Atkins R M et al. 248 nm induced vacuum UV spectral changes in optical fiber perform cores; Support for color center model of photosensitivity. *Electr. Lett.*, 1993, **29**: 385—387.
- [8] Sceats M G et al. Photoviscous annealing: The dynamics and stability of photorefractivity in optical fibers. *SPIE Conf. on Photosensitivity and Self-Organization in Optical Fibers and Waveguides, Quebec City, Canada, 1993, 2044, paper 11.*
- [9] Hill K O et al. Sensitivity in optical fibers. *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 1993, **23**: 125—157.
- [10] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. *Opt. Lett.*, 1989; **14** (15).
- [11] Hill K O, Malo B, Bilodeau F et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1993 (10): 1035—1037.
- [12] Dong L, Archambault J L, Reekie L, P. St J Russell, *Electron L3*, **29** (17) 1577—1578.
- [13] 董孝义等, 国家科学技术成果公报, 1994, 12, 40.
- [14] Bird D M et al. Narrow line semiconductor laser using fiber grating. *Electr. Lett.*, 1991, **27**: 1115—1116.
- [15] D' Amato F X, Dunphy J R. Tunable semiconductor laser source using fiber Bragg grating. *IEEE LEOS Conf.*, Boston, Mass. 1992, paper DLT A7. 3.
- [16] Morton P A et al. Hybrid soliton pulse source with fiber external cavity and Bragg reflector. *Electr. Lett.*, 1992, **28**: 561—562.
- [17] Morey W W. Tunable narrow-line bandpass filter using fiber grating, *OFC '91, San Diego, Calif. 1991, PDP 20, 96.*
- [18] Morey W W et al. Fiber Fabry-Perot interferometer using side exposed fiber Bragg gratings, *OFC '92, San Jose, Calif.*, 1991, Paper WA2.
- [19] Kashyap R et al. Wavelength flattened saturated erbium amplifier using multiple side tap Bragg gratings. *Electr. Lett.*, 1993, **27**: 1025—1026.
- [20] Morey W W et al., Mode-coupling characteristics of UV-written Bragg gratings in depressed-cladding fiber. Submitted to *Electr. Lett.*.
- [21] 董孝义等. 国家科学技术成果公报, 1994, N1, p42.
- [22] 董孝义等. 国家科学技术成果公报, 1993, N11, p79.
- [23] 董孝义等. 国家科学技术成果公报, 1990, N5, p34.
- [24] Hill K. *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 1993, **23**: 123—125.
- [25] OSA (美国光学学会), 硅波导光敏性与非线性 (基础与应用) 专题研讨会 (文集), 1995年, NY, USA.

## FIBER BRAGG GRATING, ALL-FIBERS PHOTONIC CIRCUIT AND ITS INTEGRATION

Dong Xiaoyi

Wang Yutang

(Nankai University, Tianjin 300071)

(NSFC, Beijing 100083)

**Abstract** The development of Fiber Bragg Grating (FBG) will cause a new technological revolution in the fields of high technology such as optical communication and fiber sensing. For this reson physical mechanism, manufacturing engineering of FBG and all-fiber photonic devices which are made of FBG are briefly introduced, and then a kind of new conception of all-fiber Photonic integration is presented. A typical application example is given in this paper.

**Key words** optical fiber, optical grating, photonics, all-fiber devices, optical integration

· 信 息 ·

### 第七届中日政府间科技合作联委会在京召开

根据中日政府科学技术合作议定书的规定, 第七届中日政府间科技合作联合委员会会议 1995 年 8 月 10—11 日在北京召开。自 1972 年中日两国实现邦交正常化继而签定科技合作协议以来, 中日政府间科技合作联合委员会会议每两年一次, 由两国政府主管部门轮流主持召开。中方代表团由国家科委牵头组织。国家自然科学基金委员会自 1990 年的第五届起派代表参加了会议。1995 年, 国际合作局局长顾明达和项目官员王逸做为中方正式代表出席会议。

为了充分利用中日政府间的科技合作议定书的渠道, 为承担基金课题研究任务的科研人员创造一个与日本同行合作的良好环境, 我基金委员会不断努力扩大由我基金委员会资助的与日合作项目在历届会议纪要中所占的比重。项目数由最初的 4 项增至 1995 年的 19 项。

顾明达局长在正式会议上发言, 详细介绍了我基金委员会的创立、发展过程, 国际交流与合作以及同日本发展双边关系的现状。他的发言引起中日双方代表极大的兴趣与关注。

据了解, 能够纳入中日政府间科技合作联合委员会纪要的中日合作研究项目应具备以下条件: (1) 双方课题组必须分别隶属本国的某一官办研究机构, 并已获上级主管的认可;

(2) 双方有着良好的合作基础及相应的科研实力; (3) 双方各自的经费已基本落实。

由我委员会向会议建议合作项目的中方课题负责人必须是在研科学基金项目的承担者。对于由我委员会提议、并得到会议认定的中日合作研究项目, 我委员会将在与日方合作所需经费的资助方面给予一定程度的倾斜。

(国际合作局 王逸 供稿)