

光纤相干光通信

董孝义

(南开大学现代光学研究所)

光纤通信在近十几年来得到了迅速的发展。有人讲,可以说它已经走过了三代,即第一代的短波长($0.85\mu\text{m}$)多模光纤通信,第二代的长波长($1.33\mu\text{m}$)多模光纤通信以及第三代的长波长($1.33\sim 1.55\mu\text{m}$)单模光纤通信^[1]。目前,第一代光纤通信已经实用化,第二代正在走向实用化,而第三代则正处于开发之中。但是到目前为止,除少数几个国家的少数几个研究机构之外,不管是已经实用的还是正处于开发的,也不管是模拟的还是数字的光纤通信系统,可以说均属光强调制(IM)与直接检测(DD)之列。这种IM/DD光纤通信系统是通过将光强的调制将信息加到光载波上去,经光纤传输后,再由光电二极管将已调光波的包络(即信息)解调出来,使信息复现。不难看出,这和无线电通信发展早期的火花式发射机与矿石收音机同出一辙。就是说,这种IM/DD系统只用光强(光波振幅的平方)来携带信息,而光波的频率、相位等参量均未被利用,或者说,光的相干特性被忽视了。因此,其通信容量、通信速率以及无中继通信距离等均受到必然的限制,不可能把光纤通信的重要优越性质充分利用起来。

最近几年来,随着单模光纤的发展,日、英、法以及我国的科学家们已把注意力转向所谓相干调制/光外差检测的光纤通信系统的研究,这种通信系统充分利用了激光的相干特性,因此称之为光纤相干光通信。

从IM/DD方式的通信发展为相干调制/光外差检测方式的通信,这正是无线电通信已经走过的历程,因此光纤的相干光通信思想的提出是一种自然发展的过程,并不一定具有创造性。早在六十年代末期,贝尔实验室的Dela-

物理

nge就曾用气体激光器与光学透镜波导进行过光外差接收的出色实验^[2]。在这以前,也曾有过不少类似的报道^[3,4]。但是在七十年代,损耗为 20dB/km 的光纤问世后,人们最先研制并付以使用的是IM/DD方式的光纤通信。由于这种方式具有简单、经济、易于调整等优点,而且也能满足当前需要,所以在七十年代中人们忽视了对光纤相干光通信方式的研究。

到了七十年代末期,随着光纤通信的发展,为了得到更大容量、更长距离的光通信系统,人们才开始把注意力转到光纤相干光通信方面来。其中,日本T. Kimura领导的小组做了开拓性的工作,率先发表了一批理论性和实验性论文^[5-7]。八十年代初,他们第一个完成了相干光通信的演示实验^[6]。其后,光纤相干光通信的研究日益俱增,发表的有关论文越来越多。已经证明,与IM/DD通信方式比较,光纤相干光通信方式的主要优点是灵敏度高、选择性^[8]好。它在 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 波长范围可提高灵敏度 $10\sim 20\text{dB}$,在 $1.5\sim 1.6\mu\text{m}$ 波长范围可提高 $10\sim 25\text{dB}$,而在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波长范围将有更大的提高。另外,由于选择性的提高,则借助频分复用方法增加通信信道,提高光纤传输信息的容量也就较易实现。已经证明,如果结合光放大装置的运用,这种光纤相干光通信的无中继通信距离则可达数千公里之上,显而易见,这对目前的IM/DD通信方式来说,实在是一个望尘莫及的指标。

一、光纤相干光通信的基本原理

图1是光纤相干光通信的原理图。实际上

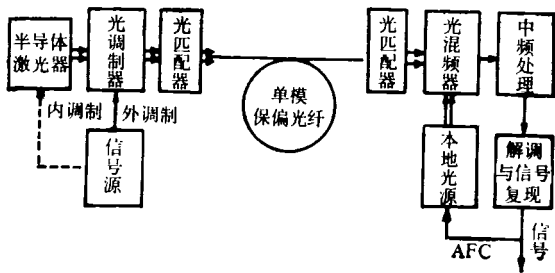


图 1

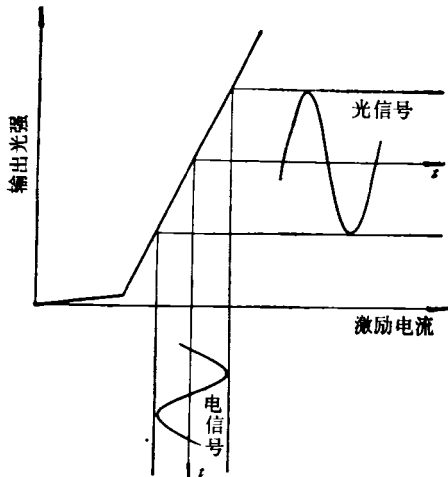


图 2

它是由三部分组成的,即将信息(如字符、声音或图象信号等)加到光载波上去的光发射机部分,将载入信息的光波(即已调光波)传送到接收端的单模光纤传输部分以及将已调光波上的信息解调下来并使之复现的光接收机部分。

1. 光发射机

从物理意义上讲,光发射机的实质是,通过对相干光调制的手段将欲传送的信号加到光载波上去的过程。由于是相干光调制,因此可以对光波进行调幅、调频、调相以及调偏振状态等。其调制形式既可以是模拟的,也可以是数字的。而从实现光调制的物理实质来讲,这种调制可以依赖电光、声光、磁光等诸效应^[9],也可以依赖于泵浦对激光源的作用来实现^[10]。对于后者,因调制作用在激光器内完成,因此称其为内调制,而前者则称为外调制。通过对激光器电源的调制来实现光调制的,称为直接调制,它是内调制的一种主要形式,半导体激光器的

调制形式多属于此类。近年来,对直接调制已作了广泛深入的研究,结果表明,这种直接调制既可调幅、调频、调相,也可以作各种数字调制,而且使用简单可靠,因此它已成为光纤通信,特别是光纤相干光通信中最吸引人并且最有前途的调制方式之一^[11]。图 2 给出了这种调制用于调幅方式的示意图。

如果令未被调制的光波(即光载波)波场为

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = E(x, y) \mathbf{p}_0 e^{i(\omega_c t + k_x z + \phi)} \quad (1)$$

其中 ω_c, k_x 分别为光载波的圆频率与沿 z 轴传播方向的波数。 $E(x, y)$ 为振幅, \mathbf{p}_0 为光场偏振状态的单位矢量。如果对这一光波作单频调幅,则调幅光场的振幅包络为

$$E(x, y, t) = E(x, y) \cdot [1 + M_A \cos \omega_s t] \quad (2)$$

若为多频调制,则可写成

$$E(x, y, t) = E(x, y) \cdot \left[1 + \sum_n M_{An} \cos \omega_{sn} t \right] \quad (3)$$

式中 ω_s 为调制信号的圆频率, M_A 为调幅系数。如果对光场作调频或调相,则类似地可以写出相应的调制光场形式。例如调频光波的波场为

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = E(x, y) \mathbf{p}_0 e^{i([\omega_c + M_f f(t)]t + k_x z + \phi)} \quad (4)$$

$f(t)$ 为调频信号。如果 $f(t) = a \cos \omega_s t$, 则(4)式为

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = E(x, y) \mathbf{p}_0 e^{i(\omega_c t + M_F \sin \omega_s t + k_x z + \phi)} \quad (5)$$

其中 M_F 为调频系数。用类似的方法还可以写出脉码调制的光场形式^[10]。

被调制了的(亦即携带了信息的)光波,离开调制器后便进入光匹配器。光匹配器的作用是:(1)保证从光发射机输出的已调光波的空间复振幅分布 $E(x, y)$ 能和单模光纤的基模(EH)形式相匹配,以便达到最大的输出效率;(2)保证输出的已调光波的偏振状态(\mathbf{p}_0)能与单模光纤的本征偏振状态相匹配,以便达到较高的耦合效率。

从物理意义上讲,目前光发射机研究的主要课题是:对于直接调制来说,研制具有高频

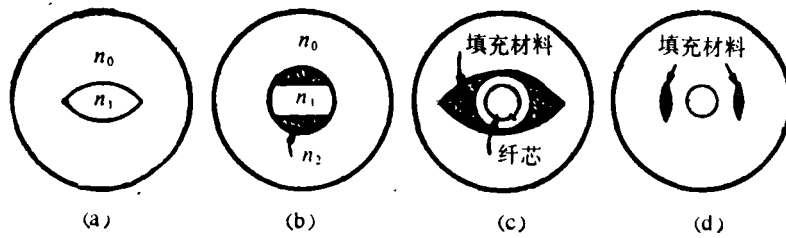


图 3

调制性能的动态单模半导体激光器，并研究最优调制方式的性能和机理；对于外调制来说，则主要研制具有高频调制性能的电光、声光波导型调制器件。目前这两类调制的工作频率均已达到几个到十几个 GHz 的水平。

2. 已调光波的传输

将载入信息的光波传送到接收端，这一任务由单模光纤来承担。由于是相干调制了的光波，因此要求光纤传输不破坏光的相干性，经研究和实验证明，只有单模光纤才具有这一特性^[12]。此外，还要求已调光波在光纤中传输时其偏振态不能发生变化。在一般的单模光纤中，实际上存在着两种在性质上非常相似的偏振模式。在传输时，由于这两种模式的变换效应而使载运的信息遭到损害，因此要求单模光纤应具有保持偏振状态的能力。获得这种性能的光纤称为保偏光纤。目前已经提出几种保偏单模光纤的结构形式^[13]。如图 3 所示，其中 (a) 是具有各向异性纤芯的椭圆光纤；(b) 是折射率为各向异性分布的侧槽型光纤；(c) 是利用光弹效应产生的附加应力来保偏的光纤。这三种均属于保持直线偏振的光纤。还有一种是保持圆偏振的光纤，即图 3 中的 (d) 所示，这种结构称为扭曲光纤。近几年来，这些光纤结构形式都先后被研制出来，并被实验所确认具有保偏性能。目前还在研究这些保偏单模光纤的其它各种物理特性，如色散特性、损耗特性等等。因此可以说，为相干光通信提供传输通道的保偏单模光纤已见雏形，并日益成熟。

3. 光接收机

光纤相干光通信接收机的物理实质是，将

信号光场(即已调光波)与本地光场在非线性光电转换面上进行外差混频，并由此产生一个包含传送信息的中频电调制载波信号。如果对后者解调，即可使信息复现，完成接收的目的。

如图 1 所示，从保偏单模光纤送来的已调光波首先进入光匹配器，光匹配器的任务是使信号光场的空间复振幅与偏振状态能与本地光场的相应参量相匹配，以便在光电转换面上达到最大的混频效率。为简明起见，我们令信号光场与本地光场分别为

$$\mathbf{E}_s(x, y, t) = A \mathbf{p}_{s0} \cdot e^{i(\omega_s t + \phi_{cs})}, \quad (6)$$

$$\mathbf{E}_l(x, y, t) = B \mathbf{p}_{l0} \cdot e^{i(\omega_l t + \phi_l)}. \quad (7)$$

这里我们考虑到空间复振幅的匹配以及认定光电转换面的转换系数是一常数，因此才令 $E_s(x, y) = A = \text{常数}$ ，和 $E_l(x, y) = B = \text{常数}$ 。于是，经混频将得到以下形式的输出：

$$\begin{aligned} i_e(t) &= C \cdot |\mathbf{E}_s + \mathbf{E}_l|^2 \\ &= \frac{e\eta S}{h\nu Z_0} \left\{ \frac{1}{2} B^2 [1 + 2 \cos 2(\omega_l t + \phi_l)] + \frac{1}{2} A^2 [1 + 2 \cos 2(\omega_{cs} t + \phi_{cs})] + AB \cos [(\omega_{cs} - \omega_l)t + (\phi_{cs} - \phi_l)] + AB \cos [(\omega_{cs} + \omega_l)t + (\phi_{cs} + \phi_l)] \right\}, \quad (8) \end{aligned}$$

式中 S 为混频面积， Z_0 是光波的自由空间阻抗， η 为光电转换的量子效率。这里我们已经考虑到光匹配器的作用，即令 $\mathbf{p}_{s0} // \mathbf{p}_{l0}$ 。当滤去高频项后，(8)式还可以写成另一种形式，即

$$i_e(t) = \underline{i} + \tilde{i}(t), \quad (9)$$

$$\underline{i} = \frac{e\eta S}{2h\nu Z_0} (A^2 + B^2), \quad (10)$$

$$\tilde{i}(t) = i_{if}(t) = \frac{e\eta SA \cdot B}{h\nu Z_0} \cos(\omega_{if}t + \Delta\phi), \quad (11)$$

其中 i_{if} 为中频光电流, $\omega_{if} = \omega_{cs} - \omega_1$, $\Delta\phi = \phi_{cs} - \phi_1$, i 为直流项, $i(t)$ 为交流项。经带通滤波后, 只有中频项输出。从(11)式不难看出, 中频电流的幅度、频率、相位诸参数的变化仍分别反映着传送信息的幅度、频率和相位的变化, 因此可以说, 它能给出调幅、调频以及调相的信息。如果将(2)~(5)各式分别代入(8)式, 并经过简单运算即可证明这一结论。

当 $\omega_1 = \omega_{cs}$ 时, $\omega_{if} = 0$, 于是中频光电流为

$$i_{if} = \frac{e\eta SA \cdot B}{h\nu Z_0} \cos(\Delta\phi). \quad (12)$$

这种工作方式称零拍光外差, 已经有人证明^[10], 使用零拍外差还可以使光接收灵敏度进一步提高。

从以上分析中可知, 中频电功率输出为

$$P_{if} = [i_{if}]^2 \cdot R_1 \propto 2A^2 \cdot B^2 \cdot R_1.$$

而在 IM/DD 方式中, 输出电功率为 $P_{DD} \propto A^4 \cdot R_1$ 。因此两种方式的输出之比为 $P_{if}/P_{DD} = 2B^2/A^2$ 。由于 B 是本地光的振幅, 因此可以作到 $B \gg A$, 即有 $P_{if}/P_{DD} \gg 1$ 。就是说, 外差方式提供的转换增益要比直接方式高得多, 这正是外差方式之所以能大幅度提高接收灵敏度的主要原因之一。

在上述讨论中, 我们已认定信号光和本地光的传播方向是严格一致的, 即 $k_{zs} // k_{z1}$, 因此没有顾及传播因子的影响。如 k_{zs} 与 k_{z1} 不严格平行, 例如它们之间存在一个 Δk , 则可以证明, 这时在中频输出表达式(11)中将引入一个 $\text{sinc}(\Delta k d/2)$ 因子, 其中 d 是混频面的线度, 该因子又称准直因子。它告诉我们只有 $\Delta k \rightarrow 0$, 即严格准直的情况下方可得到最大的中频电流输出。从物理意义上不难得知, 这种严格的准直条件正是外差法能大幅度提高信噪比的原因之一。从混频器出来的中频电流经电子解调或解码器后即可使信息复现, 达到了通信的目的。一般说来, 这一部分的线路技术已趋于成熟。

为了比较, 我们在图 4 中给出了几种光纤

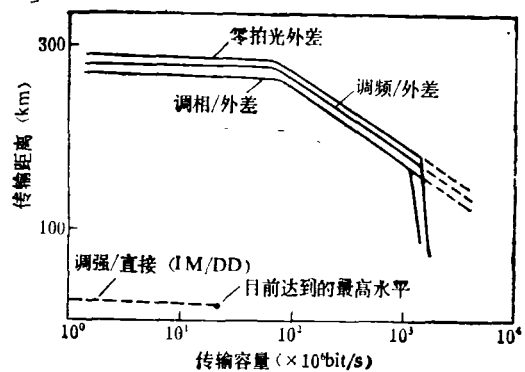


图 4

相干光通信方式的目前实验水平, 并在其中给出 IM/DD 的最高水平^[13]。从中不难看出, 无论是从通信容量, 还是从无中继通信距离上来看, 目前通行的 IM/DD 方式都远远逊色于相干光通信方式。

二、实现光纤相干光通信的

主要难点与现状

真正使光纤相干光通信实用化还存在一系列困难, 这里包括要解决一系列理论上和技术上的难点。因此有人认为^[13], 实现光纤相干光通信还需要相当一段时间。

为实现光纤相干光通信需要解决的主要问题, 一般说有以下几个:

1. 必须研制出具有高度稳定振荡频率的激光器作信号光载波与本振光的光源

例如, 对于光纤通信中广泛使用的半导体激光器来说, 典型的振荡频率为 2×10^{14} Hz ($\sim 1.5 \mu\text{m}$)。在光纤相干光通信中, 典型的中频频率为 $2 \times 10^8 \sim 2 \times 10^9$ Hz, 后者是前者的 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 。可见, 对光源频率稳定性的要求应远高于 10^{-6} 的指标, 应该说这是相当苛刻的。

已知气体激光器(如 He-Ne 激光器)加稳频措施后可达 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ 的稳频度, 用于光纤相干光通信, 显然已经足够了。但是这种激光器, 由于体积大, 设备笨重, 用来作光纤相干光

表 1

半导体激光器	中心波长 (μm)	频率基准	稳定度与稳定时间
AlGaAs	0.824	H ₂ O 分子的光谱线	1.1×10^{-11} (100s)
AlGaAs	0.852	Cs-D ₂ 光谱线	9.0×10^{-12} (1s)
InGaAsP	1.28	HF 光谱线	7.9×10^{-11} (20s)
InGaAsP	1.50	NH ₃ 光谱线	4.5×10^{-11} (200s)

通信光源几乎没有什么实际意义。

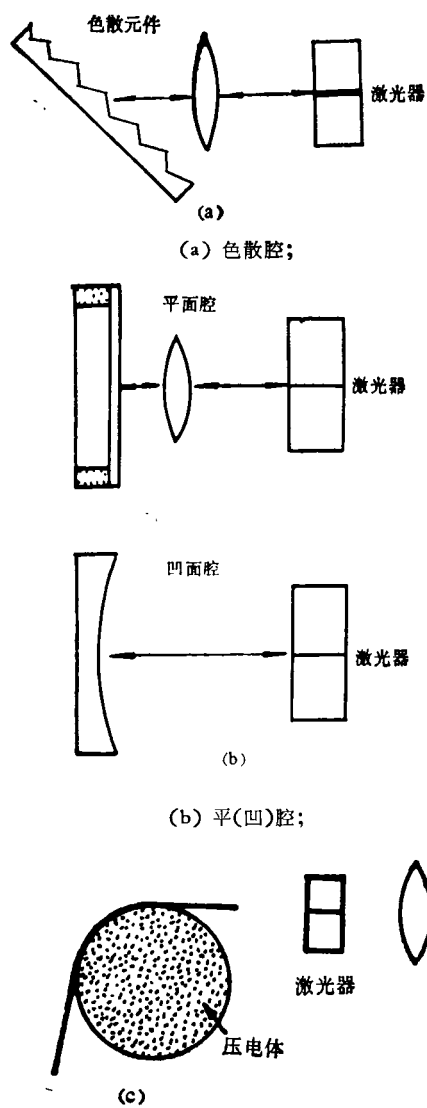
半导体激光器是光纤通信的合适光源。但是将其直接用于相干光通信，其频率稳定性又是不够的。研究发现，引起它的振荡频率漂移的主要因素是温度和结电流的不稳定性。为此，人们已经提出很多稳定振荡频率的方法，其中主要的有^[14,15]：

(1) 用法布里-珀罗标准具作频率基准的自动频率控制(AFC)方法：我们知道，法布里-珀罗标准具在很宽的波长范围内具有频率鉴别能力，因此可用来作稳频的基准。如频率因某种原因有偏移时，比较器便给出误差信号，它驱动 AFC 装置，改变半导体激光器的温度或电流，使其振荡频率回到规定值。这种方法给出的频率稳定性可达 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ ，即已达到气体激光器的水平，但遗憾的是，由于法布里-珀罗标准具的热效应影响，使得这种方法无法保证长期稳定性。不过目前长期达到 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 的稳定性还是有可能的，这一指标用于光纤相干光通信已经够用了。

(2) 用分子标作频率基准的 AFC 方法：它是以原子、分子的吸收线作为基准频率的，与法布里-珀罗标准具比较具有很高的长稳特性。如果用吸收频谱的微分曲线作鉴频使用，则可达到较高而且较长时间的稳定性，达到 1—100 kHz 的稳定度的实验不断有报道。表 1 给出了一些实验数据^[14,15]。

2. 半导体激光器必须提供具有高纯度频谱的激光

信号载波和本地光源均使用半导体激光器。这就要求半导体激光具有很高的频谱纯度，不然的话，由它们混频产生的中频信号，其相位偏差将加大，从而降低解调的可靠性。用通信的术语讲，即增加了光接收机的误码率，以



(c) 光纤腔

图 5

致使传输的信息难以恢复。

一般情况下，半导体激光器工作在多纵模状态，因此频谱较宽，高达几十个 \AA 或更宽。当激励电流超过阈值电流后，能量可能集中到一个纵模上，这时谱宽可压缩到零点几个 \AA 。显

然,即便如此,对于相干光通信来说,这也是远远不够的。为此,提出了研制高纯度单频半导体激光器的课题。最近几年来,先后提出了很多种方法来提高激光的纯度,如分布反馈法、外腔选模法、注入锁定法和所谓 C³ 法^[16]。其中外腔法结构简单,实用意义较高,用于光纤相干光通信较为有利。

通常,半导体激光器的谐振腔是由管芯前后两个自然解理面构成的,称之为内腔或本征腔。如果在管芯之外附加一反馈元件,即构成所谓外腔。反馈元件不同,构成的外腔形式也不同,如图 5 所示。在这种情况下半导体激光输出的光谱特性将受到外腔色散元件选择性反馈等因素的影响。已经证明,这些因素导致谱宽压缩,通常可压缩到 10^{-6} \AA , 并有压缩到 10kHz 的实验报道^[17]。对于 $2 \times 10^8 \sim 2 \times 10^9 \text{ Hz}$ 的中频来说,此值仅为中频的 5 万到 20 万分之一。因此,对于光纤相干光通信,这样的频率纯度已经够用了。但是,这种方法导致的激光输出稳定性方面还存在问题,有待进一步解决。分布反馈方法是一种较为理想的方法,它既可给出高频谱纯度的激光输出,又可使激光输出有较高的稳定性^[18]。这种方法的主要问题是制备较为复杂,有待进一步解决。

3. 必须保证混频器上偏振的稳定性

从(8)式不难看出,混频输出(即中频信号)大小与 $p_{10} \cdot p_{10}$ 成正比,因此偏振态的变化将导致中频信号的强度变化,从而使信噪比降低。如上所述,信号光传输的保偏问题可通过使用保偏单模光纤来解决。但为了保持 $p_{10} \cdot p_{10} = \text{常数}$,仅这一点是不够的,还需解决 $p_{10} \cdot p_{10}$ 不变问题,这就是接收端为什么还要加光匹配器的原因。近年来,在这方面作了不少研究工作。例如,有人仿效 AFC, AGC (自动增益控制) 方法提出偏振自动控制线路以及“本地光”由发送端和信号光同时发出等方法,但这样又导致一些新的问题出现。因此说保偏稳定性问题仍然是今后研究的主要课题之一。

4. 研制有实际意义的半导体激光放大器

象无线电外差通信那样,如在接收端置入

前置放大器,则可大大提高系统的灵敏度。Yamamoto 较早地提出半导体激光放大器的研制^[19],最近已有一系列成功的实验报道,并有人从理论上证明,如果引入光放大器,光纤相干光通信的无中继通信距离在容量为 400Mbit/s 的情况下,可达万公里以上,这比现在的 IM/DD 光纤通信方式高三个量级^[20]。

除上述几个问题外,还有很多实际问题和理论问题有待研究解决,如确定哪一种调制方式最为有效,而且简单可靠,易于使用;或研制更好的新的调制方法。再比如,确定哪一种整机形式最为有效,如何计算它们的接收灵敏度等等。

综上所述不难看出,光纤相干光通信是光纤通信的一个重要发展方向。虽然说,它并不是几年内或十几年内就可以成为现实的东西,但由于许多环节在逐渐解决,因此说它并非是遥远的事情,则更为确切些。

参 考 文 献

- [1] 大田忠一,光コアイバ通信の現状と展望, KEC と天津電子学会,天津,(1984).
- [2] O. E. Delange, *Proc. IEEE*, 58(1970), 1680.
- [3] L. Mandel, *J. Opt. Soc. Am.*, 56(1966), 1200.
- [4] M. C. Teich, *Proc. IEEE*, 56 (1968), 37.
- [5] Y. Yamamoto, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-16 (1980), 1251.
- [6] S. Saito et al., *Elect. Lett.*, 16(1980), 826.
- [7] S. Saito et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-17 (1981), 935.
- [8] T. Okoshi and K. Kikuchi, *J. Opt. Commun.*, 2-3(1981), 92.
- [9] A. Yariv, *Introduction to Optical Electronics*, Second Edition, John Wiley and Sons, New York, (1976).
- [10] T. Okoshi et al., *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-30 (1982), 1138.
- [11] 古瀬孝雄, 光学, 13(1983), 118.
- [12] H. Takahera, *Opt. Act.*, 29(1982), 441.
- [13] 木村達也, 立田光廣, 電子技術, 25(1983), 109.
- [14] Y. Suematsu, *Proc. IEEE*, 71(1983), 692.
- [15] 秋元義明, *O plus E*, No. 43(1983), 66.
- [16] 西澤潤一, 電子科学, 13-4(1983), 4.
- [17] R. Wyatt and W. J. Devlin, *Elect. Lett.*, 19 (1983), 110.
- [18] M. Kitamura et al., *Elect. Lett.*, 20(1984), 295.
- [19] Y. Yamamoto, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-16 (1980), 1047.
- [20] 斎藤茂, *O plus E*, No. 11 (1983), 63.