

半导体光放大器的光 - 光互作用及其应用*

吴重庆[†]

(北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所 北京 100044)

摘要 半导体光放大器(SOA)中的非线性系数约为普通光纤的 10^9 ,为光子晶体光纤的 10^7 ,而且有4种光-光互作用,即交叉增益调制(XGM)、交叉相位调制(XPM)、交叉偏振调制(XSM)及四波混频(FWM),可以灵活地组成各种光信号处理器件,如波长变换器、全光触发器、全光逻辑、全光时钟恢复、全光缓存器……等,正成为整个光信号处理的基础。文章介绍了它们的原理和简单应用。

关键词 半导体光放大器(SOA),全光信号处理,交叉增益调制(XGM),交叉相位调制(XPM),交叉偏振调制(XSM),四波混频(FWM)

Interaction of two light beams in semiconductor optical amplification and applications in all-optical signal processing

WU Chong-Qing[†]

(Beijing Jiaotong University, Optical Information Institute, Beijing 100044, China)

Abstract In semiconductor optical amplification (SOA) the nonlinearity coefficient is about 10^9 times greater than that in commercial optical fiber and 10^7 times that in photonic crystals. There are four interactions involved with two beams of light: cross gain modulation, cross phase modulation, cross state-of-polarization modulation, and four-wave mixing. Thus, SOA can be flexibly incorporated into many kinds of all-optical processing devices, such as wavelength converters, all-optical flip-flop switches, logic devices, clock recovery, buffers, and so forth. Indeed, it is now becoming the cornerstone of optical signal processing. The principle of SOA and its basic applications are reviewed.

Keywords semiconductor optical amplification, all-optical signal processing, cross gain modulation, cross phase modulation, cross state-of-polarization modulation, four-wave mixing

1 光 - 光互作用的意义

在信息技术中,信息载体起着关键作用,目前的信息载体主要有电、声和光三种。光作为一种信息载体,具有承载信息量大、传输距离远、无损检测、检测速度快等优点,因此在信息领域获得了广泛应用。自从1960年第一台激光器的出现以来,光信息技术迅速地改变人们的生活与生产活动。光学测量、图像信息检测、光断层扫描(OCT)、光纤传感技术等都

是十分成功的光检测技术;光纤通信在通信领域有举足轻重的地位,是目前最快且最有效的信息传输技术;液晶显示器、等离子体显示器(PDP)等平板显示技术异军突起,与传统的表征方法(话音和纸)相比,日益成为最重要的信息表征技术。但是,在信息存储与信息处理方面,光信息技术则显得相对落后。虽然光盘发展很快,但与高速的计算机存储芯片相

* 国家自然科学基金(批准号60577020,60672004)资助项目
2007-02-12收到初稿,2007-07-03收到修改稿

[†] Email: cqwu@bjtu.edu.cn

比,无论是集成度还是计算速度都有很大差距,而光信息的处理则几乎完全依靠电的 CPU(中央处理器)芯片,全光智能芯片还只是一种设想,光计算机更是遥遥无期。其中关键的一环是目前我们不能在光域中对光信号直接进行处理。

电信号的处理主要依靠模拟电子电路和数字电子电路。自从电子管放大器出现以后,基于电子管放大器的间歇振荡器、多谐振荡器就纷纷出现。此后,随着晶体管放大器的出现,各种电子电路应运而生。后来又出现集成电路放大器,数字信号处理成为现代信号处理的基本技术,此后才诞生了 CPU 以及计算机。从电子信息技术的发展历程看,放大器的出现和以及数字集成电路是现代电子技术最关键的一步。

在上个世纪的 80 年代,出现了掺铒光纤放大器(EDFA)本来光信号处理技术应该伴随产生,但却没有出现这种情况,这是为什么呢?其主要原因是因为 EDFA 的增益恢复时间过长(ms 级)和光-光相互作用的非线性不够大,所以对于全光信号处理技术的发展没有起到推动作用。

为什么光信号处理一定要依靠非线性的光-光相互作用呢?下面我们以全光开关这种典型器件(图 1)为例,看看为什么需要这样。全光开关可以看作是一种信号光被另一束光控制的器件。但是我们知道,光是玻色子,不具有空间独占性,当两束光同时到达自由空间的某个位置时,它们之间不会产生相互作用。也就是说,在线性介质中,一个波长的光是否存在或者它的大小,都不会对另一个波长光的传播产生影响。所以要使两束光产生相互作用只能利用非线性介质。

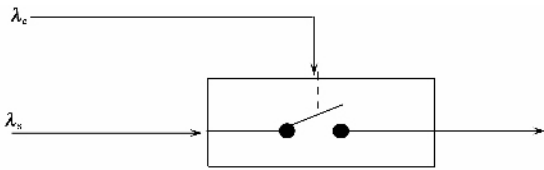


图 1 全光开关,其中 λ_c 为控制光波长, λ_s 为信号光波长

2 各种非线性介质的比较

目前发现的非线性介质很多,大体上可以分为两类:无源(passive)介质和有源(active)介质。无源介质的非线性来自于介质的非线性极化,比如各类光学晶体、高非线性光纤等,近年来,蒸蒸日上的光子晶体基本上也属于无源介质。非线性极化是一

种电极化矢量与电场强度成非线性的现象,可写为

$$P = \epsilon_0 \{ \chi^{(1)} \cdot E + \chi^{(2)} EE + \chi^{(3)} EEE + \dots \}, \quad (1)$$

式中的第一项是线性项,其他后面的高阶项都是非线性项,其中线性项起主要作用,高阶项都非常小。光克尔效应就是一种典型的由非线性极化引起的非线性效应。

有源介质的非线性来自于活性介质中粒子跃迁的非线性,根据爱因斯坦关于光子作用下粒子的跃迁定律,跃迁速率与粒子数的分布有关。大家熟悉的爱因斯坦受激跃迁公式为

$$\frac{dN}{dt} = WN, \quad (2)$$

其中 W 是爱因斯坦系数。解这个跃迁方程,可以得到一个指数函数型式的解,这说明跃迁过程本身就是一种非线性过程,因此活性介质的非线性要比无源介质的非线性大几个数量级。以交叉相位调制为例,为了产生 π 相移,利用 1km 长的高非线性光纤($\gamma = 10/W \cdot \text{km}$),抽运光功率需要 314mW,而采用一个腔长为 1000 μm 的半导体光放大器 SOA,只需 1—2mW(视工作点的不同而不同)。如果按照公式 $\gamma = \pi/P_0L$ 推算,可以得到 SOA 的非线性系数约为 $(1-3)10^9/W \cdot \text{km}$ 。由此看来,利用活性介质的非线性制作全光信号处理器件,是一个比较有效的途径。表 1 是几种非线性材料的比较。

表 1 几种主要的非线性介质比较

介质	非线性无源介质			非线性活性介质	
	高非线性光纤	光子晶体光纤	光子晶体	SOA	EDFA/其他
机理	非线性极化			跃迁的饱和特性	
非线性系数 ($1/W \cdot \text{km}$)	2	<100	?	10^9	?
响应时间	fs	fs	fs	ps	ms
偏振稳定性	不稳定	不稳定	稳定	稳定	---
体积	大	大	中	小	大
可集成性	难	难	可以	可以	难

3 SOA 的光-光相互作用

所谓光-光相互作用可以理解为一束光对于另一束光的幅度(功率)、相位、偏振以及频率进行调制,当然被调制的光也会对于调制光产生反作用。除了调制现象而外,两束光的相互作用,还包括新频率光

的产生,比如倍频、四波混频以及产生新的斯托克斯光等。通过光-光相互作用,一束光所携带的信息,很容易转载到另一束光上。

在 SOA 中一共有 4 种光-光相互作用,它们是:

(1) 两个不同波长光之间的交叉幅度调制(cross gain modulation, XGM);

(2) 两个不同波长光间的交叉相位调制(cross phase modulation, XPM);

(3) 两个不同波长的光或者两个正交偏振态的光之间的交叉偏振调制(cross SOP modulation, XSP);

(4) 四波混频(four wave mixing, FWM)。

3.1 交叉增益调制

SOA 中的交叉增益调制,来自于它的增益饱和效应。我们知道,在一定的注入电流下,SOA 形成一个粒子数反转的分布,上能级的粒子数要比下能级多。当放大一个小信号时,“一次”受激辐射跃迁消耗的上能级载流子较少,要经过多次雪崩放大才可以耗尽上能级的载流子,因此放大倍数大。反过来,如果被放大的信号较大,“一次”受激辐射跃迁要消耗较多的上能级载流子,因此几次雪崩就可能将上能级的载流子消耗殆尽,放大倍数小。这种小信号放大倍数大,大信号放大倍数小的现象,称为增益饱和效应。在忽略 SOA 自发辐射损耗时,SOA 的输出光功率为^[1]

$$G = G_0 \exp \left\{ - \left[(G - 1) \frac{P_{in}}{P_{sat}} \right] \right\}. \quad (1)$$

当有两个波长的光注入时, $P_{in} = P_{in}(\lambda_1) + P_{in}(\lambda_2)$, 其中 $P_{in}(\lambda_1)$ 和 $P_{in}(\lambda_2)$ 分别为两个波长的输入功率。当两个波长的光功率相差很大时,比如 $P_{in}(\lambda_1) \gg P_{in}(\lambda_2)$ 时,可认为 G 主要取决于 $P_{in}(\lambda_1)$, 即

$$G(\lambda_1) = G_0 \exp \left\{ - \left[(G - 1) \frac{P_{in}(\lambda_1)}{P_{sat}} \right] \right\}. \quad (2)$$

这样,对于 λ_2 , 有

$$P_{out}(\lambda_2) = G(\lambda_1) P_{in}(\lambda_2). \quad (3)$$

由此可见,改变一个波长光信号的大小,就可以改变另一个光的放大倍数,这就是交叉增益调制。但是,无论控制光多大都不可能获得 100% 的调制度,这将导致输出光存在残留的“基座”,降低消光比,影响下一级光信号处理器件的性能。

3.2 交叉相位调制

交叉相位调制也是来自于 SOA 中的载流子饱和现象,载流子分布随注入光子数的改变而改变,从而导致折射率改变。当放大器载流子密度 N 变化时,将引起复折射率 $n = n' + jn''$ 变化,其实部代表光场相位的延迟,虚部描述器件的损耗或增益,二者之比就定义为线宽增强因子 α ^[2]:

$$dn'/dN = \alpha dn''/dN. \quad (4)$$

可以证明,SOA 中因增益饱和而引起的相移为^[3]

$$\varphi(\tau) = -\frac{1}{2} \alpha \ln [G(\tau)]. \quad (5)$$

由(2)式可以看出,只要改变 $P_{in}(\lambda_1)$, 就可以改变相移。假定改变 $P_{in}(\lambda_1)$ 前的信号光的增益为 G_1 , 改变后的增益是 G_2 , 这样由于控制光存在而导致的附加相移为

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{1}{2} \alpha \ln \frac{G_1}{G_2}. \quad (7)$$

由此可以看出,控制光相对于原先波长的光(信号光)的相对大小,决定了非线性相移的大小。通常,小信号增益 $G_1 = 10-20\text{dB}$, 我们取较小值 $G_1 = 10\text{dB}$, $P_{sat} = 7\text{mW}$, 线宽增强因子 $\alpha = 5.7$ 左右^[4,5]。如果输入功率为 1mW 的信号光要产生 π 相移,则“半波功率” $P_{\pi}(\lambda_2) = 4.6355\text{mW}$, 也就是说,并不需要很大的控制功率就可以产生 π 相移。

3.3 交叉偏振调制

交叉偏振调制是 SOA 中的一种特有的非线性现象,最初在 1996 年由 Stephens 等人观察到^[6], 此后 Mishra 通过实验进一步得到证实^[7]。图 2 是我们进行的实验。

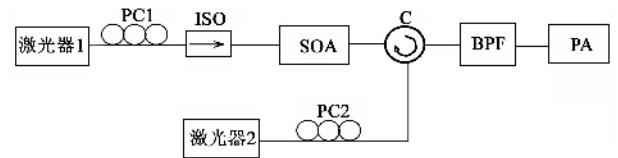


图2 利用光纤连接的交叉偏振调制实验

图2中,SOA为半导体光放大器,PC为偏振控制器,C为环行器,BPF为带通滤波器,PA为偏振分析仪。激光器1发出的信号光(波长为 1552.60nm)通过 SOA 然后经过环行器 C 和窄带滤波器 BPF 到达偏振分析仪 PA。调整偏振控制器 PC1,在 PA 的邦加球上将出现一个偏振态。然后加入由激光器 2 发出的控制光(波长为 1552.92nm),首先观察到信号光的输出光功率会发生变化,这主要是由交叉增益调制所引起的。同时,我们在 PA 的邦加球上观

察如图 3 所示的偏振态的演化。这说明除了交叉增益调制外,还存在一种与控制光有关的偏振旋转,许

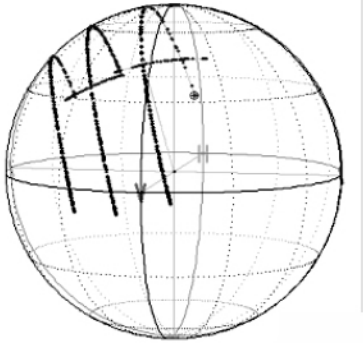


图 3 当改变控制光功率时输出信号光偏振态的变化

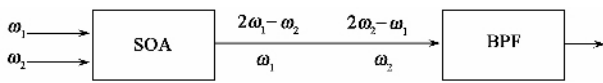


图 4 四波混频

多文献称其为非线性偏振旋转。但从光 - 光互作用的角度看,它是交叉偏振调制。

SOA 中的交叉偏振调制来源于 TE 模、TM 模的限制因子 Γ_{TE} 、 Γ_{TM} 和吸收截面 $\sigma_{g,TE}$ 、 $\sigma_{g,TM}$ 不同,因而导致局部增益的不同,这两种局部增益分别为

$$g_{TE} = \Gamma_{TE} \sigma_{g,TE} (N - N_0) \quad (8)$$

$$g_{TM} = \Gamma_{TM} \sigma_{g,TM} (N - N_0) \quad (9)$$

而局部增益的差异将导致两个模式的增益不同,进而引起两个模式的相位差不断变化,以至于出现偏振态的变化。

3.4 四波混频

当两束光在 SOA 中传输的时候,由于非线性作用,将产生新的波长并形成四波混频 FWM^[8]。对于 SOA 中 FWM 的半经典解释是:两束不同波长的光进入 SOA 时,介质中的载流子形成一个与入射光强的分布有关的载流子光栅。在 SOA 中,至少有三种机制对光栅的形成有贡献,它们分别为:载流子密度调制、动态载流子加热和散射。SOA 中的 FWM 是三者共同作用的结果,其转换效率随抽运光和探测光的失谐下降很快。新的波长由几束光波共同作用产生,如果记抽运光的频率为 ω_1 ,探测光的频率为 ω_2 ,那么两束新波长的频率就分别为 $2\omega_1 - \omega_2$ 和 $2\omega_2 - \omega_1$ (见图 4),而且两个新频率光还会与旧频率光产生新的 FWM,所以被称为“混频”。FWM 的转换效率与波导的色散、偏振和长度紧密相关,等效作用长度越长,色散越小,则变换效率就越高。半导

体波导的损耗约为 2dB/cm,等效长度限制在 1cm 以内,其色散可以忽略不计,这时转换带宽可达 20nm。对 17dBm 的抽运光,典型的转换效率为 -20 dB 左右。

四波混频的转换效率虽然比较低,但是它的转换时间也很低,为亚 ps 级,因此,更适合于高速的信号处理^[9]。

4 在全光信号处理中的应用

利用 SOA 的光 - 光互作用特性的任何一种都可以构成全光信号处理器件,几乎在所有的全光信号处理技术中得到了应用,限于篇幅,本文仅以波长变换器和光开关来说明。

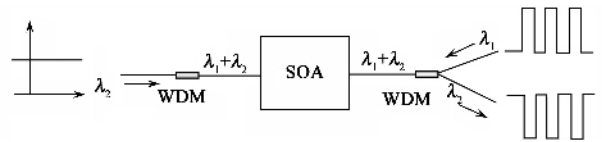


图 5 反向抽运的 SOA - XGM 型波长变换器

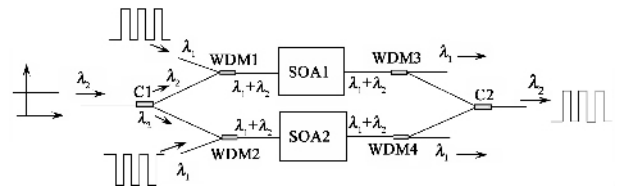


图 6 SOA - MZ 型波长变换器

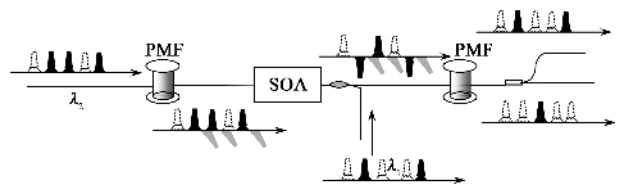


图 7 基于超快全光干涉仪 UNI 的全光开关

4.1 基于 XGM 的波长变换器(wavelength converter, WC)

波长变换器在 DWDM 网络中,可以增加许多波长 - 路由,提高网络的灵活性,因此受到广泛重视。利用 SOA 的 XGM 直接构成 WC 非常简单,图 5 是一个将波长 λ_1 所承载的信息转换到 λ_2 上的典型光路^[10]。

在图 5 中, $P_{in}(\lambda_1) \gg P_{in}(\lambda_2)$, 因此对于 λ_2 的放大倍数主要取决于 λ_1 , 这样不同大小的 λ_1 信号

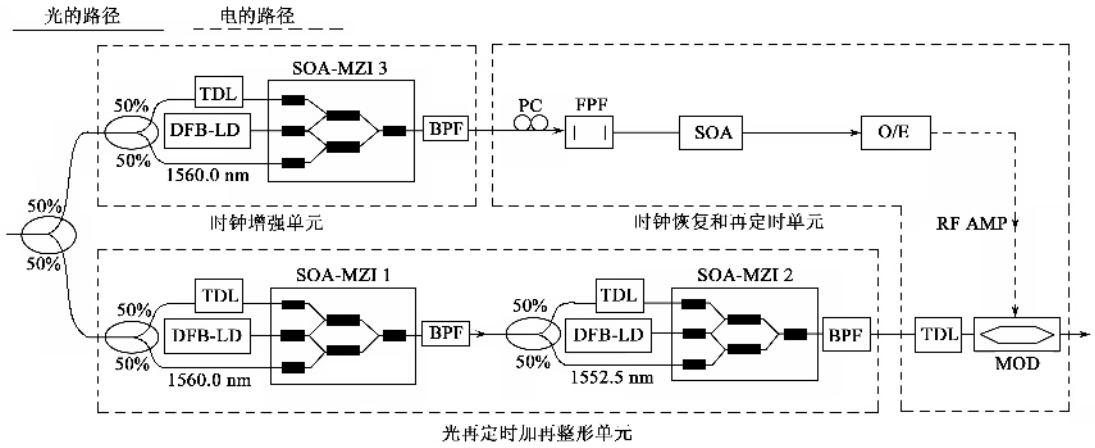


图8 利用多个 SOA - MZI 模块构成的全光中继器

导致对 λ_2 信号的放大倍数不同,于是,尽管输入的是直流光,但输出的却是幅度变化的光。

4.2 基于 XPM 的波长变换器 WC

图5中的WC具有消光比不足的缺点,有严重的直流基座。随后出现了基于XPM的WC,如图6所示^[11]。从被调制光的光源来的连续光(λ_2)被光纤耦合器C1分为两路,然后经过一段光纤和耦合器C2合为一路,构成了一个Mach-Zehnder干涉仪MZI。SOA1和SOA2被对称地放置在MZI的两个臂上,两个载有信息但相位相反的调制光(λ_1)通过波分复用耦合器WDM1与WDM2分别与被调制光同时进入SOA1与SOA2,造成两臂的相位差不相同,经过耦合器C2变成了强度变化的波长为 λ_2 的输出信号光。这种MZI结构的WC,如果采用光纤连接,是非常不稳定的,只有将它们做到一个波导上才能稳定。

4.3 利用交叉偏振调制构成的全光开关

利用SOA中的4种光-光相互作用,都可以构成全光开关。这里介绍一种利用交叉偏振调制构成的所谓“超快全光干涉仪UNI”型的光开关,原理如图7所示^[12]

在图7中,输入一系列波长为 λ_2 的码流(D_1, D_2, D_3, D_4, D_5)=(1 0, 1, 1 0),经过保偏光纤后,水平和垂直两个偏振分量在时间上分开,然后注入一系列波长为 λ_2 的控制光(1 0 0, 1 0)。在SOA中, λ_2 码流中的 D_1 与 D_4 两个比特受到 λ_1 码流的偏振调制,再经过一个保偏光纤将水平和垂直两个偏振分量在时间上重新重合时,由于 D_1 与 D_4 两个比特受到偏振调制,所以合成的偏振态发生变化,而 D_3 比特却

不变。这样再经过一个偏振分束器,两列不同偏振态的码流将从不同的光纤中输出。可以看出,这种光开关的开关速度可达到比特级,但是对于同步要求很高。

除了以上各种应用以外,它们的各种组合还可以派生出很多其他全光信号处理器件,比如全光逻辑器件、全光触发器、全光缓存器、全光比较器、全光移位寄存器、全光帧头提取光路等等。限于篇幅,这里就不一一列举了。

5 结束语

虽然SOA有很强的光-光相互作用,但在使用中受到一定的限制,比如光纤连接的限制,共生的副作用的限制,速率限制以及噪声限制等。采用光纤连接的SOA,由于光纤是一个偏振和相位都不稳定的器件,所以当使用SOA的XPM构成干涉仪时,造成干涉仪不稳定。光纤的相位不稳定性表现为:1m的光纤温度变化1度所造成的相位变化约106弧度,所以相当不稳定。正是由于SOA中存在着多种共生的光-光相互作用,尤其是XGM, XPM, 与XSM之间相互影响很大,使我们在利用一种效应的同时必须克服另一种效应的副作用,从而限制了SOA的应用。比如我们熟悉的马吕斯定律指出,干涉的最强(或最弱)是发生在相位差为 π (或为0)的时候,但由于共生现象将导致干涉的最强点会偏离 π (或为0)。此外,SOA的光-光相互作用,来源于载流子的增益饱和效应,因此受到载流子分布恢复时间的限制。目前只能达到ps量级,进一步提高速率就很困难。

为了解决这些问题,目前正在大力研究SOA的

光子集成。目前已经出现了将激光器、电吸收调制器等功能元件集成到一个波导上的光子集成器件。文献 [13] 给出了一个成功的全光中继器实验方案,在这个方案中,使用了多个集成的 SOA - MZI 模块(见图 8)。同时,我们看到,在这个全光中继器中,不但有 SOA,而且还有 DFB - LD,而 SOA 与 DFB 可以使用同种基底材料。如果能够将他们集成到一个芯片上,将大大提高工作稳定性和速率。当然,由于二者工艺上有一定的差异,控制起来比较困难。这种集成,可以作为一个探索方向进行研究。

总之,SOA 出现以后,它极大的非线性系数和可集成性,以及相对较快的速度,已经成为所有全光信号处理技术都离不开的基础元件。当多个 SOA 集成为一个强大的功能部件实现以后,到那时,光路由以及光交换的时代就会到来,并引起信息领域发生深刻的变化。

参考文献

[1] Tadashi S ,Takaaki M. IEEE J. of Quantum Electronics ,1990 , 26 2086

[2] Osinski M ,Buus J. IEEE OF J. of Quantum Electronics ,1987 , 23 9
[3] Agrawal G P , Anders O N. IEEE J. of Quantum Electronics , 1989 ,25(11) 2297
[4] Naganuma K , Yasaka H. IEEE J. of Quantum Electronics , 1991 ,21(6) :1280
[5] Gao H L ,Wu C Q *et al.* Opto-Electronic Letters ,2006 ,2(12) : 0142
[6] Stephens M F C ,Penty R V *et al.* High-speed wavelength conversion utilizing birefringence in semiconductor optical amplifiers , Lasers and Electro-Optics ,1996. CLEO 96. ,1996 ,348
[7] Mishra A K , Yang X *et al.* Ultrafast all-optical wavelength conversion using nonlinear polarization rotation in a SOA ,Proceedings of 2004 6th International Conference on Transparent Optical Networks 2004 , 2 322
[8] Diez S ,Schmidt C *et al.* IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics ,1997 ,3(5) :1131
[9] Diez S ,Ludwig R *et al.* IEEE Photonics Technology Letters , 1999 ,11(11) :1402
[10] Pak S Cho *et al.* Wavelength conversion using a non-interferometric SOA and FBG device ,CLEO1998 ,477
[11] Cao S C , Cartledge J C. IEEE Photonics Technology Letters , 2002 ,14(7) 962
[12] Bintjas C ,Vlachos K *et al.* J. of Lightwave Technology ,2003 , 21(11) 2629
[13] Zhu Z ,Funabashi M *et al.* IEEE Photonics Technology Letters , 2006 ,18(20) 2159

· 仪器和设备 ·

超高稳定度磁铁电源
——保定天威宝峰医疗器械有限公司



天威集团

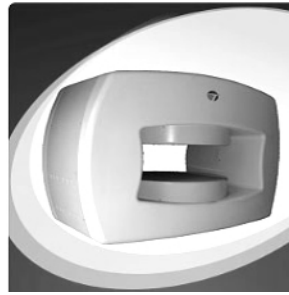
天威宝峰公司是电磁核磁共振(MRI)制造商,具备大型三类医疗器械生产资质.公司同时向国内各大专院校、科研机构、实验室提供超高稳定度磁铁电源、磁体、及脉冲电源.

天威宝峰公司是天威集团控股子公司,天威集团总资产居行业首位,其产品特大型变压器为三峡电站、秦山核电站等单位采用.



一、超高稳定度磁铁电源

功率 2kW—100kW
稳定度 5ppm—50ppm
连续可调 波形修正



三、磁体

独特的抗涡流设计,保证涡流在可控范围内无剩磁、均匀区域大、稳定可靠.



二、脉冲电流源

频率范围 :<10k
功率范围 500W - 50kW
稳定度 :<50ppm
过零调节 任意波形输出

四、医用磁共振

主磁场 0.12T、0.16T、0.2T、0.3T

地址 河北保定高新技术产业区银杏路 198 号
市场部电话 0312 - 3309100 0312 - 3309112 0312 - 3309125
传真 0312 - 3309107
邮编 071051
网址 www.bdtwbf.com
Email bdtwbf@bdtwbf.com