

超连续光源

(北京大学 朱星 编译自 John M. Dudley, Goëry Genty, *Physics Today*, 2013, (7): 29, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)

由激光器发出的高亮度、空间相干的光学辐射，不论是脉冲的或者连续光束，都具有广泛的研究应用：如光谱学、光化学、通讯、原子捕获、核聚变、材料加工等等。然而，不同的研究需要特定波长的光源，数十年来，工程人员一直努力研发新材料，以产生新波段的激光。幸运的是，过去十年间，经过研究人员的努力，利用非线性光学过程将某种波长的激光转换为另外一种波长，研制出一种非常出色的光学辐射——光纤超连续光源(supercontinuum light)。超连续光源是将激光在电介质材料中聚焦而具有高功率密度，然后通过非线性频率转换过程产生的。这种光纤中产生的光源，光谱覆盖范围从可见光到近红外波段，平均功率可达数瓦。由于这种光源是在光学波导中以导波模式产生的，超连续光源可以保持入射光的光

学相干性，因而可以将激光的高亮度和聚焦性质结合起来，同时拥有如同白炽灯泡的连续光谱。从某种意义上讲，这是一种具有任意波长且具有空间相干性的激光光源。超连续光源能够得到广泛应用的原因是由于其适用性。当与频谱滤波器结合时，它变成可调的窄带光源；当使用其全波段时，可以用于多波长显微镜和高性能多通道信息编码，其中每个通道的光波仅具有确定的波长等。

直接的影响

一束高密度激光脉冲使得一种介电材料强烈极化，因此产生与偏振相关的非线性。当将普通窄频谱激光器发出的光耦合入一个光学波导时，频谱会展宽而成为白光源。使入射窄带光转换为宽带辐射的原因是非线性光与物质的相互作用。按照估算，非线性偏振幅度和超连续带宽随抽运功率

增加而增加，因此一般采用超短皮秒和飞秒脉冲作为抽运源，这是因为其具有很高的峰值功率。但是产生超连续光并非必须采用脉冲光源。早在1960年末期，科学家将绿色激光的皮秒脉冲聚焦到晶体和非晶态的体材料中，首次产生了超连续光谱。1999

年，有人使用新型光子晶体光纤获得成功，对这个领域产生革命性影响。在光纤中，光被限制在很小的截面内，可以在长距离保持光强，另外可以人工调整光学色散，用以优化非线性光孤子过程而产生很宽的光学频谱。Ranka等人充分利用光纤的这些优点，使用低能量的普通台式飞秒激光器产生超连续光源，如图1所示。而在这之前，由于需要体积大、结构复杂的装置来产生超连续光，严重阻碍这项技术的推广。实验方法的简化引发了非线性光学工作者极大兴趣，可以用来探索更为基本的物理问题，也可以使用超连续光谱对光学频率进行精密测量。实际上，超连续光源是稳定频率光梳技术的核心，光梳的发明人曾获得了2005年诺贝尔物理学奖。

非线性与超快过程

超连续光源的重要特点是，当光在介质材料中传播时产生的连续光谱宽化。在众所熟知的光学谐波产生过程中，可以将某一单色频率光转换为另一种频率，如倍频或三倍频。然而，超连续谱的产生则完全不同。它将一个已经具有宽频带的光场，比如一个短脉冲，与介电材料相互作用而产生连续的新频率谱。材料的线性光学性质是由其折射率决定的。然而，一个短的光脉冲对应着不同折射率值。正是由于这个色散关系，光谱中不同的频率分量相位不同，当其在光纤中传播时，含时的脉冲包络会产生光谱展宽。另外，一束超短光脉冲的

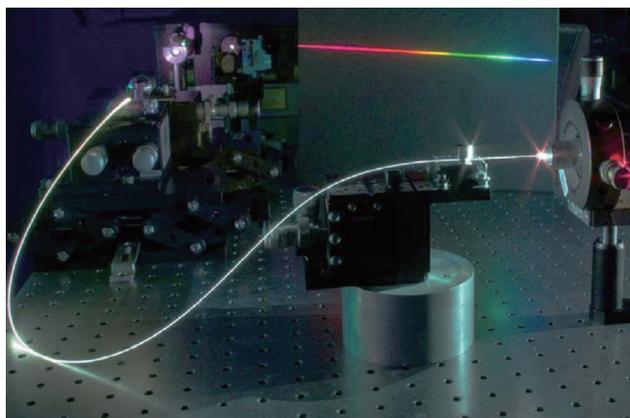


图1 产生超连续白光的演示：将800 nm飞秒激光脉冲与光纤耦合(左侧)产生超连续白光，经光纤导入右侧耦合器后进入衍射光栅。上方屏幕显示经色散分光后的超连续光谱的可见光部分。

功率会如此之高, 使得其自身的折射率发生改变, 幅度的变化正比于与时间相关的人射光强度, 这种效应被称为光学克尔效应(Kerr effect)。材料折射率的非线性变化使得在材料中传播的光脉冲的场振荡发生时间相关的相移。而这种跨越时间脉冲的相位自调制(self-phase modulation)产生出新的频率分量。特别是, 它产生一种随时间变化的瞬时频率, 又称啾啾(chirp), 其特点是低频分量出现在脉冲强度的上升边缘, 而高频分量出现在脉冲下降的边缘, 如图2所示。当光聚焦进入任何介电材料时都会出现相位自调制现象, 但是在体材料中的衍射效应使得光强下降, 因此限制了产生非线性频率的距离。由于光在光纤中以波导形式通过很小的截面积传播, 因此, 即使使用比用于体材料中低得多的光功率也可以观察到相位自调制现象, 而且随着传播距离增加而积累。

光学孤子

仅仅用相位自调制解释光纤中的超连续光谱的产生可能过于简单。超连续光谱的丰富物理内容来自于相位自调制与线性色散的非线性效应相互作用。前面描述了非线性导致动态频率随着脉冲包络的变化, 在脉冲上升沿出现红移分量, 而在下降沿出现蓝移分量。随所使用的光纤性能和入射光脉冲的波长的不同, 色散会使得红移和蓝移分量之间的时间分隔增加或者减少。如果增加, 则脉冲会随时间扩展, 然而, 如果减少, 脉冲会稳定成一种波形, 称为光学孤子(optical soliton)。孤子是局域的非线性结构, 自19世纪人们偶然在运河的水流中发现孤子现象后, 一直吸引着物理学家的兴趣。然而, 尽管多数已知类型的光学孤子属于稳定的基本孤子(即一种随着在光纤中传播距离增加并不改变形状和幅度的脉冲), 但同时也

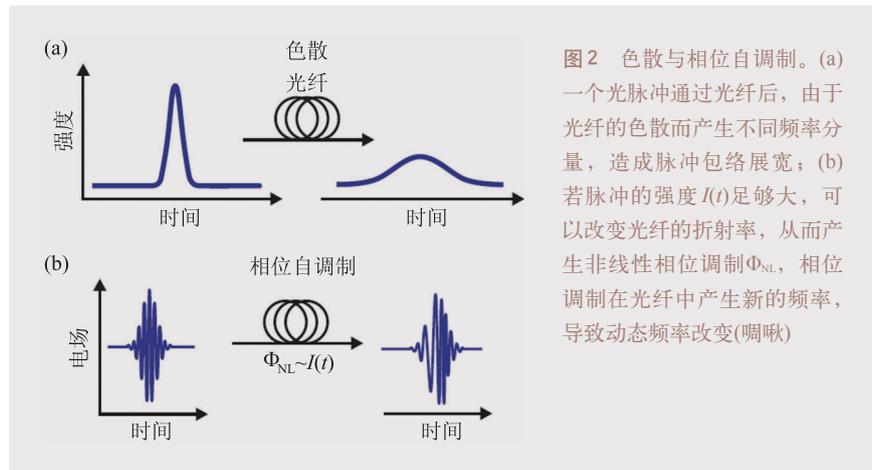


图2 色散与相位自调制。(a) 一个光脉冲通过光纤后, 由于光纤的色散而产生不同频率分量, 造成脉冲包络展宽; (b) 若脉冲的强度 $I(t)$ 足够大, 可以改变光纤的折射率, 从而产生非线性相位调制 Φ_{NL} , 相位调制在光纤中产生新的频率, 导致动态频率改变(啾啾)

存在一类高阶的孤子。在这类孤子中, 相位自调制与色散的相互作用产生的结构具有随着时间和距离变化而周期性改变形状和光谱的特性。在现实中, 理想的周期性孤子是不能实现的, 这是由于任何对光纤色散和非线性响应的微扰都会破坏演变过程的对称性。当这种对称破缺微扰出现时, 高阶的孤子会经历孤子分裂的过程, 使得一个初始的脉冲分裂成为一系列单个基本孤子脉冲, 这些分裂的孤子会进一步受到非线性和色散传播。当然, 这些可能产生高阶孤子分裂的微扰也可能影响新形成的基本孤子, 因而, 超连续谱宽度随着在光纤中传播而增加。对于每个新形成的孤子, 高阶色散造成能量向较短波长的共振转移, 在每个孤子带宽之内的非弹性光散射造成向较长波长的连续频率移动。覆盖波长倍频的光谱的特点是极其稳定, 其每个脉冲相位的相位相关性可以保持到数百 THz。这种倍频覆盖的超连续谱的稳定性对精密频率测量将起到革命性的作用。

应用

现代技术发展能够直接制备色散光纤, 也可以加工光学波导, 用这样波导从不同的抽运光源中产生超连续光源。现有不同类型的激光光源可以用来产生宽波段的相干超连续光

源, 从深紫外到远红外。实际上, 只要激光具有足够的功率, 任何激光光源均可以用来产生超连续光。但是只有由飞秒脉冲产生的光具有频率计量所需要的高稳定性。尽管如此, 稳定稍差的光谱也可以得到应用, 如成像和光谱。超连续光源在各种领域均可得到应用。如在共聚焦显微镜中, 用滤波器可以从宽波段光源获得所需要的波长, 以完美地与组织或细胞中标记的荧光染料的激发波长相匹配。这种光源也可以用于突破衍射极限成像的 STED 显微镜(stimulated-emission-depletion microscopy)。在生物医学诊断中, 它还有其他一些独特的应用。更加独特的是, 应用于天体物理光谱成像的光梳技术, 其波长标准稳定性和精确度已经提高了两个数量级。这种“天体梳”(astro-combs)代表了天体物理多普勒频移研究中革命性的进展。

光明的前景

尽管目前人们已经理解了超连续光谱的基本物理问题, 但是, 非线性动力学的丰富内容对理论和模拟研究提出了更大的挑战。现在人们运用小型台式系统可以产生这种新光源, 非线性频率转换所需功率大大下降。新材料和新的激光抽运光源会不断出现, 可以预期超连续光源将会获得更加广泛的应用。