

非线性光学晶体

β相偏硼酸钡晶体 ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, BBO)

产品介绍

β 相偏硼酸钡晶体 ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, BBO) 是由中国科学院物质结构研究所首次发现和研究的新型紫外倍频晶体，由福晶科技进行生产和销售。

主要优点

- 相位匹配波段宽 (409.6-3500 nm)
- 可透过波段范围宽 (190-3500 nm)
- 倍频转换效率高 (相当于KDP晶体的6倍)
- 高损伤阈值
- 光学均匀性好 $\delta n \approx 10^{-6}/\text{cm}$
- 温度接收角宽 ($\sim 55^\circ\text{C}$)
- 用于Nd:YAG激光的二倍、三倍、四倍以及五倍频中
- 广泛应用于超快激光的谐波产生

福晶科技可提供

- 严格的质量控制
- 晶体最薄可到0.005 mm，最长可达25 mm，最大尺寸为 $15 \times 15 \times 15 \text{ mm}^3$
- 增透膜 (AR-coating) 或保护膜 (P-coating) 镀制，支架装配和重抛镀服务
- 库存充足
- 快速交付 (抛光片交期15个工作日，镀膜产品交期20个工作日)

基本特性

表1. 化学和结构特性

晶体结构	三方晶系，空间群 R3c
晶胞参数	$a=b=12.532 \text{ \AA}$, $c=12.717 \text{ \AA}$, $Z=6$
熔点	约1095 °C
莫氏硬度	4 Mohs
密度	3.85 g/cm ³
热导率	1.2 W/m/K ($\perp c$) ; 1.6 W/m/K ($\parallel c$)
热膨胀系数	$\alpha_{11}=4 \times 10^{-6}/\text{K}$, $\alpha_{33}=36 \times 10^{-6}/\text{K}$

表2. 光学和非线性光学特性

透光波段	190-3500 nm	
SHG相位匹配范围	409.6-3500 nm(Type I)	525 - 3500 nm(Type II)
热光系数	$d_{n_o}/dT = -16.6 \times 10^{-6} / ^\circ C$	$d_{n_e}/dT = -9.3 \times 10^{-6} / ^\circ C$
吸收系数	<0.1%/cm @ 1064 nm , <1%/cm @ 532 nm	
接收角	0.8 mrad·cm (θ , Type I, 1064 SHG)	1.27 mrad·cm (θ , Type II, 1064 SHG)
温度带宽	55 °C·cm	
接收谱宽	1.1 nm·cm	
走离角	2.7° (Type I, 1064 SHG)	3.2° (Type II, 1064 SHG)
非线性光学系数	$d_{eff} (I) = d_{31}\sin\theta + (d_{11}\cos 3\phi - d_{22}\sin 3\phi) \cos\theta$	$d_{eff} (II) = (d_{11}\sin 3\phi + d_{22}\cos 3\phi) \cos^2\theta$
非零非线性光学系数	$d_{11}=5.8 \times d_{36}$ (KDP) $d_{31}=0.05 \times d_{11}$ $d_{22}<0.05 \times d_{11}$	
Sellmeier 方程 (λ 单位 μm)	$n_o^2 = 2.7359 + 0.01878 / (\lambda^2 - 0.01822) - 0.01354 \lambda^2$	$n_e^2 = 2.3753 + 0.01224 / (\lambda^2 - 0.01667) - 0.01516 \lambda^2$
电光系数	$\gamma_{22} = 2.7 \text{ pm/V}$	
半波电压	7 KV (@1064 nm, 3×3×20 mm ³)	
电阻率	>10 ¹¹ ohm·cm	
相对介电系数	$\epsilon_{s11}^s / \epsilon_0: 6.7$ $\epsilon_{s33}^s / \epsilon_0: 8.1$ $\tan\delta < 0.001$	

BBO是一种负单轴晶体，它的o光折射率 (n_o) 比e光 (n_e) 折射率大；通过角度调谐可获得I、II类相位匹配，其SHG相位匹配如图2所示。

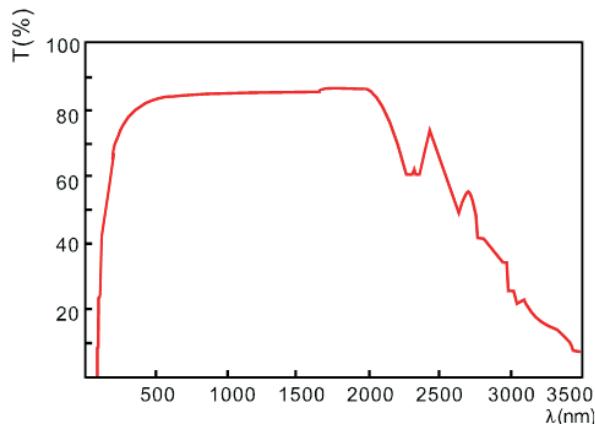


图1. BBO透射曲线

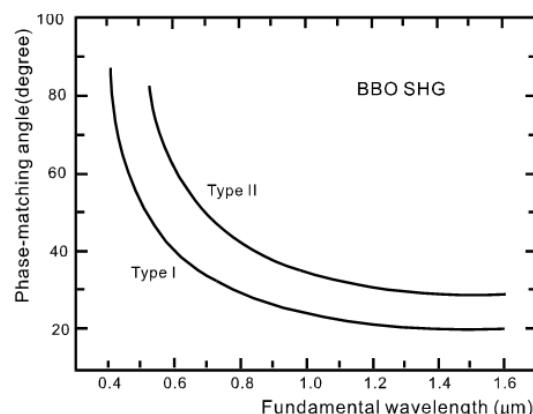


图2. BBO SHG调谐曲线

非线性光学晶体

在Nd: YAG激光器中的应用

BBO晶体在Nd:YAG激光二、三、四倍频上的性能优异，目前仍是五倍频输出213nm光的最佳选择之一。二倍频的转换效率大于70%，三倍频60%，四倍频50%，五倍频输出213 nm的功率可达200 mW。

BBO晶体也是理想的高功率Nd:YAG激光腔内倍频晶体。使用福晶科技生产的镀增透膜BBO晶体，在声光调Q Nd:YAG激光器腔内倍频可获得平均功率超过15 W的532 nm光。以锁模Nd:YLF激光器倍频输出的600 mW光为泵浦源，端面布儒斯特角切割的BBO晶体腔外倍频可获得66 mW的263 nm光。

由于BBO晶体具有较小的接受角和较大的走离角，因此获得理想的转换效率的关键是使用较好质量的基频光（具有小的发散角，较好的模式条件等）。我们不建议对基频光光束进行聚焦。

在可调谐激光器中的应用

1. 染料激光器

用I类BBO晶体可高效输出二次谐波效率>10%，波长 \geqslant 206nm的紫外光（205-310 nm），对XeCl激光泵浦的峰值功率为150 kW的染料激光器倍频，可获得36%的转换率（比ADP高大约4-6倍）。二次谐波获得的最短204.97 nm光的转换率约为1%。

福晶生产的BBO晶体广泛应用于染料激光器中。用BBO将780-950 nm和248.5 nm光（495 nm染料激光的SHG输出）进行I类和频，可获得最短188.9-197 nm的紫外光，其中激光脉冲能量分别为95 mJ @ 193 nm和8 mJ @ 189 nm。

2. 超短脉冲激光器

在超短脉冲激光的二、三倍频应用中，BBO晶体的性能优于KDP和ADP晶体。对于此类应用，目前福晶可提供的BBO晶体最小厚度为0.005 mm。在同时满足相速度和群速度匹配情况下，用一个薄BBO晶体可达到对10 fs激光脉冲的有效倍频。

3. 钛宝石激光器和翠绿宝石激光器

使用BBO晶体，翠绿宝石激光的I类二次谐波可输出波长范围360 nm-390 nm的紫外光，其中378 nm波长激光的脉冲能量为105 mJ（31%的二次谐波转换率），三次谐波可输出波长范围244-259 nm，脉冲能量7.5 mJ（24%的混频转换率）的紫外光。

对钛宝石激光的二次谐波转换效率可高于50%，且其三次和四次谐波转换效率也较高。

4. 氩离子激光器和铜蒸气激光器

在全线输出功率为2 W的氩离子激光器中采用腔内倍频技术，端面布儒斯特角切割的BBO晶体可获得波长范围在228.9-257.2 nm的36条深紫外光，最大功率33 mW @ 250.4 nm。

510.6 nm的铜蒸气激光的二次谐波平均输出功率可达230 mW @ 255.3 nm，最大能量转换率为8.9%。

在OPO和OPA中的应用

BBO晶体在OPO和OPA中起着重要作用，可产生从紫外到近红外的一系列可调谐相干激光。图3和图4分别是I类和II类BBO晶体在OPO、OPA中的调谐角度的计算结果。

1.532 nm泵浦的OPO

采用输入能量40 mJ，脉冲宽度75 ps的532 nm泵浦光，在一个7.2 mm长的I类BBO晶体可获得波长范围680-2400 nm的OPO输出，峰值功率1.6 MW，能量转换率可达30%。BBO晶体越长，能量转换率越高。

2.355 nm泵浦的OPO和OPA

以355nm激光做泵浦源，使用福晶科技BBO晶体的OPO系统输出的可调谐波长范围在400-3100 nm，并且波长430-2000 nm范围的能量转换率在18%-30%之间。

II类BBO可用来减小线宽，用BBO可获得0.05 nm的线宽和12%的可用转换率。在II类相位匹配中，通常会用较长的BBO晶体 (>15 mm) 来降低振荡阈值。

采用355 nm的皮秒Nd:YAG激光进行泵浦，以BBO晶体作OPA获得的脉冲具有窄带 (<0.3 nm)，能量高 (>200 μJ) 和可调谐性宽 (400-2000 nm) 的特点。这种OPA可获得高于50%的最大能量转换率，因此诸多方面的性能相比普通的染料激光更优越，如转换率高，可调谐范围宽，易维护，设计简单，操作简便等。BBO-OPO或BBO-OPA再加上BBO的二次谐波的系统，可实现205 nm-3500 nm范围内的调谐。

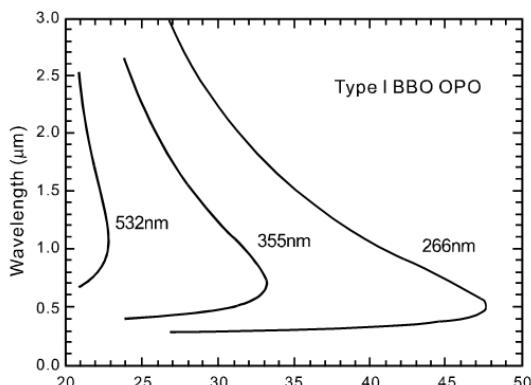


图3. BBO晶体 I 类 OPO 调谐曲线

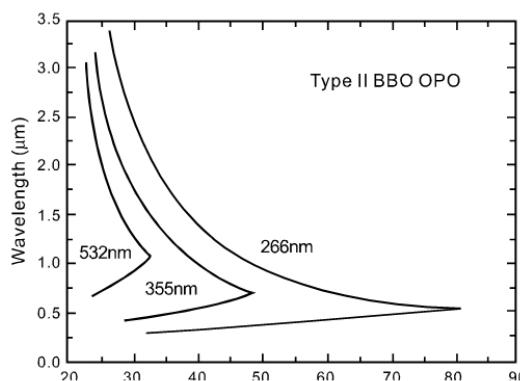


图4. BBO晶体 II 类 OPO 调谐曲线

非线性光学晶体

3. 其他应用

以308 nm XeCl准分子激光为OPO的泵光，对I类BBO晶体进行角度调谐，可获得波长范围在422-477 nm的信号光。将Nd:YAG激光四次谐波产生的266 nm波长作为泵浦光，据报道观察到了BBO-OPO完整的从330 nm 到1370 nm的波长输出。

采用波长615 nm，能量1 mJ，脉冲宽度80 fs的染料激光泵浦，在两块BBO晶体的OPA中可获得波长为800-2000 nm，能量大于50 μJ（最大130 μJ），脉冲宽度小于200 fs的超短波脉冲。

BBO晶体的电光应用

BBO晶体也可用于电光应用中，具有从紫外到3500 nm的宽透射范围。此外，BBO晶体与DKDP和LiNbO₃晶体相比具有更高的损伤阈值。采用福晶科技的电光BBO晶体以及增益介质Nd:YVO₄晶体，可获得超过100 W的输出功率和1000 kHz的重复频率。在5 kHz重复频率下，其脉冲宽度可短至6.4 ns，达到5.7 mJ的能量或900 kW的峰值功率。相比声光Q开关，BBO晶体的电光应用有诸多优势，包括脉冲短、光束质量高、结构紧凑等。尽管其具有相对较小的电光系数以及高的半波电压（例如尺寸为3×3×20 mm³的BBO晶体，半波电压高达7 kV @ 1064 nm），通过增加BBO晶体长度和减少电极方向厚度可降低BBO电光器件的工作电压。

目前，福晶科技可提供25 mm长和电极方向厚度1 mm的高光学质量的Z切BBO晶体，并可根据需求镀制增透膜和侧面镀金/铬。

福晶科技可提供镀制如下膜系

- 根据客户应用需求选择IBS或IAD镀膜技术
- 应用于BBO晶体1064 nm二倍频、三倍频和四倍频的双波长、三波长低反射率增透膜
- 应用于二次倍频调谐激光器的BBO的宽带增透膜（BBAR）
- 宽波段保护膜，用于BBO晶体的OPO
- 高抗激光损伤阈值
- 使用寿命长
- 可提供膜系定制服务

BBO晶体规格指标

表3. 产品指标

尺寸公差	(W±0.1 mm) × (H±0.1 mm) × (L+0.5/-0.1 mm) (L≥2.5 mm) (W±0.1 mm) × (H±0.1 mm) × (L+0.1/-0.1 mm) (L<2.5 mm)
有效通光孔径	90%中心区域
内部质量	50 mW绿光检测无可见散射路径或中心
光洁度	10/5 参考MIL- PRF- 13830B 标准
平面度	≤λ/8 @ 633 nm
透射波前畸变	≤λ/8 @ 633 nm
平行度	20"
垂直度	15'
角度公差	≤0.25°
倒角	≤0.2 mm×45°
崩边	≤0.1 mm
损伤阈值	>1.5 GW/cm ² @ 1064 nm, 10 ns, 10 Hz (抛光片) >1 GW/cm ² @ 1064 nm, 10 ns, 10 Hz (增透膜) >0.3 GW/cm ² @ 532 nm, 10 ns, 10 Hz (增透膜)
品质保证期	一年 (正常使用)

备注：

- BBO晶体具有易潮解性，建议用户在干燥的环境中使用和保存
- BBO晶体硬度低，操作时请注意保护，勿损伤晶体抛光面
- BBO晶体的接收角小，因此调节角度时需要较为细致的操作
- 可按客户需求定制BBO晶体，根据提供的激光器主要性能参数，如脉冲激光器的脉冲能量、脉冲宽度、重复频率，连续激光器的功率，以及光束直径、模式条件、发散角、可调谐波长范围等条件来推荐适合的晶体规格
- 对于薄片晶体，可免费装配支架