

# 石墨烯在全固态激光器中的应用

孙延笑 白杨 白晋涛

(西北大学光子学与光子技术研究所 710069)

## 1. 引言

全固态激光器(all solid state lasers)是指用激光二极管(laser diode, LD)代替闪光灯泵浦固体激光增益介质的激光器,也称为激光二极管泵浦的固体激光器(laser diode pumped solid state lasers, LDPSL或DPL)。它集两种激光器的优势于一体,具有转换效率高、输出能量大、峰值功率高、工作介质覆盖的波段广及运转方式多样等优点,与被动可饱和吸收体相结合,可以实现脉冲激光运转,已成为新的优质脉冲激光光源。

在全固态激光器中实现脉冲激光运转的被动可饱和吸收体主要包括传统的有机染料、半导体可饱和吸收镜(semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)及新型二维材料如石墨烯,碳纳米管、过渡金属硫化物及黑磷。自2004年,英国曼彻斯特大学物理学家盖姆(A. Geim)和诺沃肖罗夫(K. Novoselov)用微机械剥离法成功从石墨中分离出层状石墨烯后,便开启了石墨烯光应用时代的大门。

石墨烯是典型的零带隙二维层状材料,其结构为 $sp^2$ 杂化形成平面六元环结构,如图1(a)和(b)所示。石墨烯单层碳原子的物理结构使其具有独特的非线性光学特性,例如超快载流子动力学和宽波段饱和吸收特性。这样的超快载流子响应是石墨烯不同于传统半导体材料的独特之处,也表明了石墨烯材料在超快光电器件中的应用前景。饱和吸收特性是石墨烯的另外一个重要的光学性质。当激发光源照射在石墨烯表面,价带电子吸收光子能量被激发到导带上,石墨烯的吸收不再是线性吸收,而是非线性吸收。在光强足够大的状态下,电子被源源不断激励到导带,最终导带光子能量达到饱和,带间跃迁被阻断,此时石墨烯达到饱和,这样的效应被称为饱和吸收效应,如图1(c)所示。相比与传统的半导体材料如砷化镓(GaAs),石墨烯的吸收效率能够高近百倍,是研究微型光学器件的理想材料,具有很多不同于传统半导体或晶体材料的特殊性质,可以作为被动可饱和吸收体,用于脉冲激光器调Q和锁模,成为了当前石墨烯材料与脉冲激光器

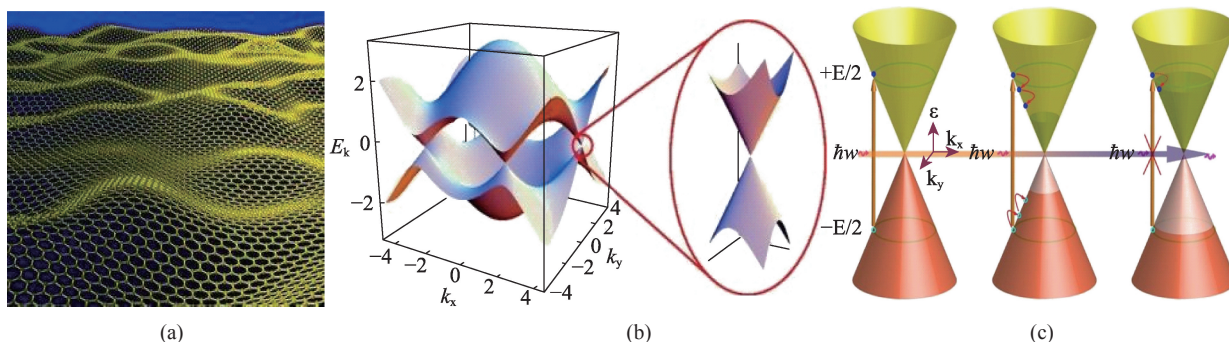


图1 石墨烯的(a)晶格结构、(b)能带结构及(c)可饱和吸收特性

研究的热点。本文对石墨烯作为被动可饱和吸收体用于全固态激光器件的研究进展进行归纳总结。

## 2. 石墨烯可饱和吸收体调Q全固态激光器

由于石墨烯的饱和吸收特性,当价带电子大量吸收泵浦光子能量跃迁到导带并最终达到饱和后,电子将在短时间内不再吸收能量,从而形成Q开关,实现脉冲激光输出。目前已经有大量石墨烯调Q激光器的报道。由于石墨烯材料极薄,一般需要依附在基底材料上才能作为器件。2010年,科研人员实现了将高温加热碳化硅(SiC)制备的石墨烯作为Q开关,应用在连续Nd:YAG激光器中并实现调Q运转,获得最短脉冲宽度161 ns,最高脉冲能量159.2 nJ的脉冲激光输出。石墨烯可饱和吸收体调Q在之后的研究中逐渐被用于多个波段不同种类的固体激光器中。其中,2012年,研究人员使用一块生长在碳化硅基底上的石墨烯饱和吸收体首次在Er:YAG全固态激光器中实现了1.6 μm波段被动调Q。实验中测得所采用的石墨烯层数为1~2层并最终获得7.05 mJ单脉冲能量,35.6 kHz重复频率和251 mW平均功率的调Q脉冲激光输出。同年,同

样使用生长在碳化硅基底材料上的石墨烯作为可饱和吸收体,实现了激光脉冲中心波长为2.01 μm的Tm:YAG激光器调Q运转。其最大的平均输出功率、脉冲重复频率和单脉冲能量分别为38 mW、27.9 kHz和1.74 μJ,如图2所示。

化学气相沉积法(chemical vapor deposition, CVD)是制备质量较高的大尺寸石墨烯的有效方法,随着层状石墨烯材料CVD制备和转移技术逐渐成熟,石墨烯可饱和吸收镜有了新的制备方法。2014年,研究人员将CVD法制备的石墨烯薄膜转移到石英片上制成可饱和吸收镜,如图3。此外,CVD制备的石墨烯薄膜可以直接转移到谐振腔镜上制备被动可饱和吸收镜。

## 3. 石墨烯可饱和吸收体锁模激光器

调Q和锁模是当前获得超快激光脉冲最常用且最成熟的方法。由于调Q技术的机制决定其脉冲建立时间较长,脉冲宽度一般为纳秒量级,如果要进一步压缩脉冲宽度,得到皮秒乃至飞秒的激光脉冲,就需要借助锁模技术。超快激光的发展在很大程度上已经依赖于可饱和吸收材料发展。传统的饱和吸收器件如SESAM具有很多优秀的品质,

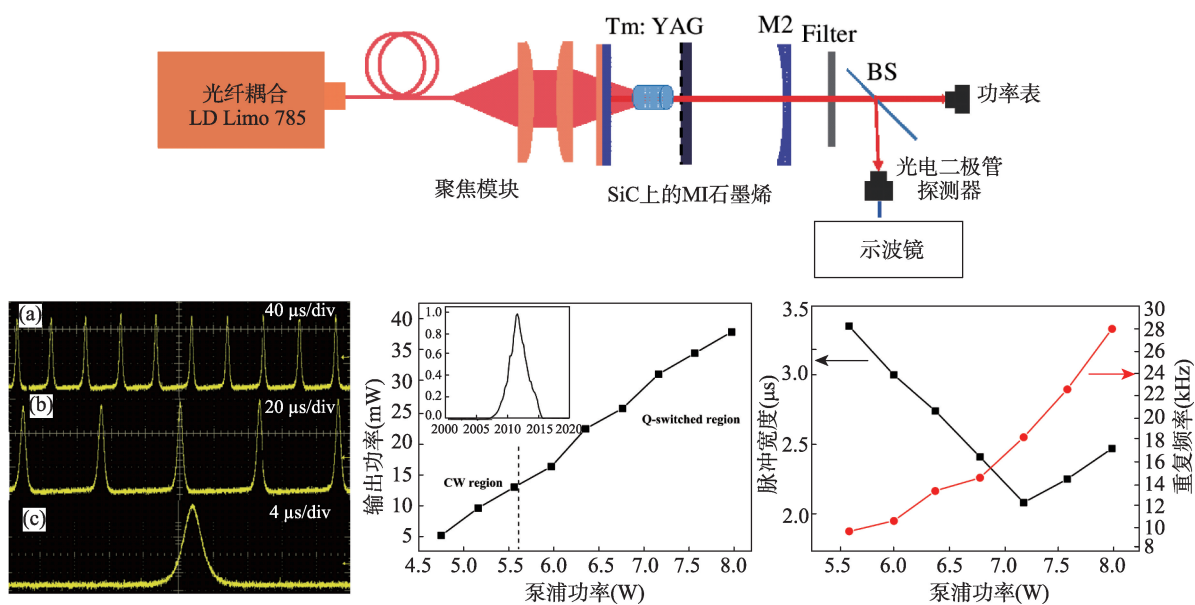


图2 石墨烯被动可饱和吸收体Tm:YAG被动调Q激光器

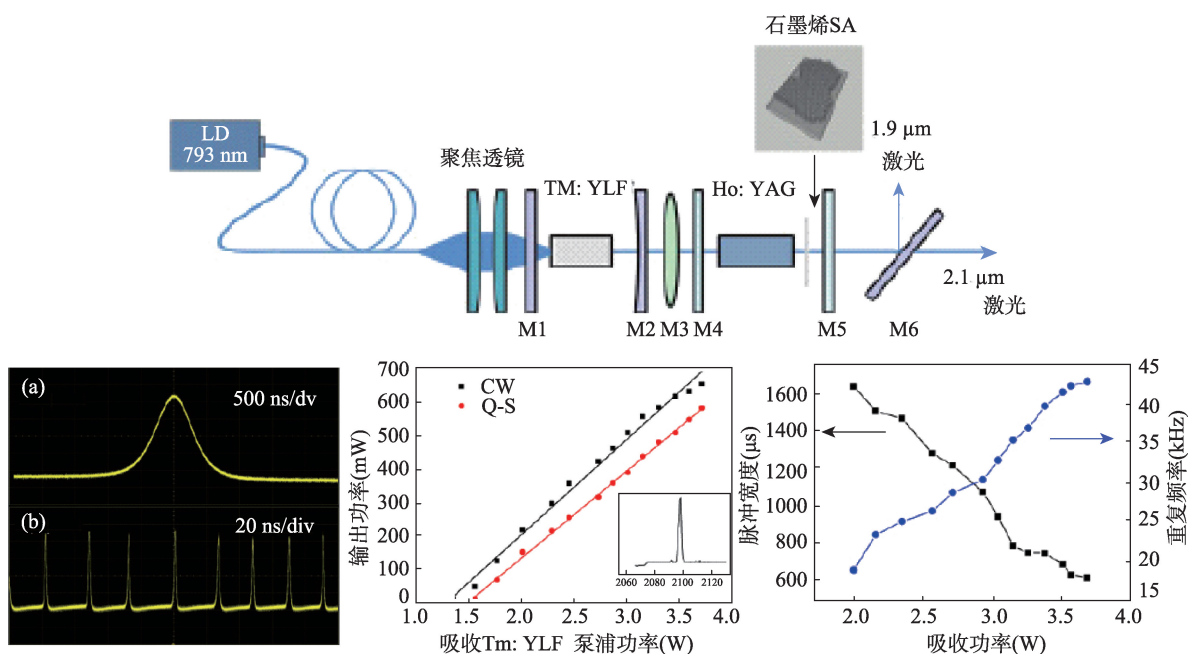


图3 石墨烯锁模激光器

但是缺点也同样明显。石墨烯材料作为新型二维材料用于激光锁模利用石墨烯的饱和和吸收特性实现,很好地克服了传统饱和吸收镜的缺陷并且具有更多的优势。饱和吸收体本身的饱和和恢复时间对锁模脉冲的形成至关重要,并以此将被动锁模分为快饱和吸收体锁模、慢饱和吸收体锁模和光孤子锁模三种类型。由于石墨烯的饱和恢复时间为0.4~1.7 ps,远小于增益介质的激发态寿命及皮秒锁模脉宽,所以可以看作快饱和吸收体锁模。

石墨烯作为被动可饱和吸收体进行激光锁模首先被用于近红外波段激光器。2012年,研究人员利用少层石墨烯材料作为饱和吸收体实现了1.34 μm Nd: GdVO<sub>4</sub> 激光器的调Q和锁模脉冲输出,在锁模输出条件下,获得了平均功率1.29 W,脉冲宽度11 ps,单脉冲能量13 nJ的脉冲激光,如图4所示。同年,也有研究报道将石墨烯可饱和吸收体转移到镀膜镜片上,并置于激光谐振腔光路中。实验采用双凹谐振腔镜设计,利用Tm: CLNGG作为增益介质,晶体以布儒斯特角放置以减少振荡过程中p偏振光的损耗,最终获得60 mW的稳定锁模脉冲激光输出,其重复频率为95 MHz,谐振腔长度为1.58 m。

石墨烯饱和吸收体还被用于其他增益介质的全固态激光器中产生锁模脉冲。将CVD法制备的单层石墨烯饱和吸收体制成被动可饱和吸收镜,放入Cr: LiSAF激光谐振腔中,采用折叠腔型结构,最终获得了平均功率为11.5 mW,脉冲宽度68 fs,重复频率为132 mhz的850 nm飞秒脉冲激光,其谐振腔结构及脉冲输出如图5所示。

国内和国际上其他课题组也积极报道了石墨烯及其在全固态激光器中的研究进展,表1是当前已经报道的石墨烯调Q和锁模全固态激光器的部分研究结果。

## 4. 结束语

石墨烯作为新型二维材料克服了传统的半导体和晶体材料的缺点,由于其独特的结构和光电性质,在力学材料、光电器件及激光器件领域有着广阔的应用空间。近年来将石墨烯材料用于全固态激光器中产生调Q与锁模脉冲输出的研究发展迅速。目前,石墨烯材料的相关领域仍处于研究和发展阶段,无法达到规模化和实用化,石墨烯材料的稳定性和抗损伤性等亟待深入研究。尽管如此,石

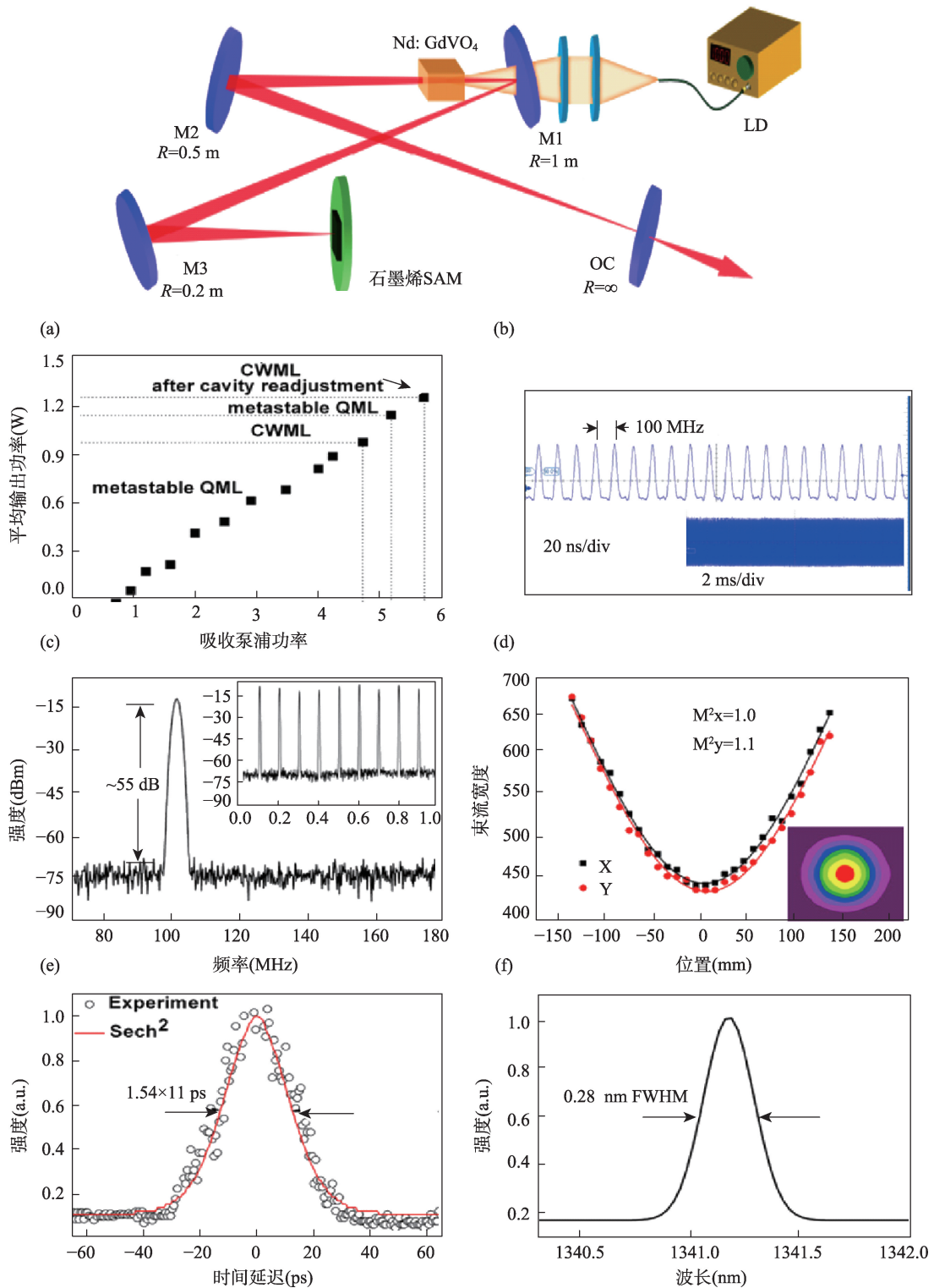


图4 石墨烯可饱和吸收体Tm:CLNGG锁模激光器

墨烯材料的优异性能已经向世人展示了其广阔的应用前景,随着对石墨烯材料的深入研究,势必突破理论与技术壁垒,将石墨烯材料在光电器件中的

应用向着高稳定、小体积、低功耗的方向发展,为将来的光电器件和激光器件领域研究带来更加深远的影响。



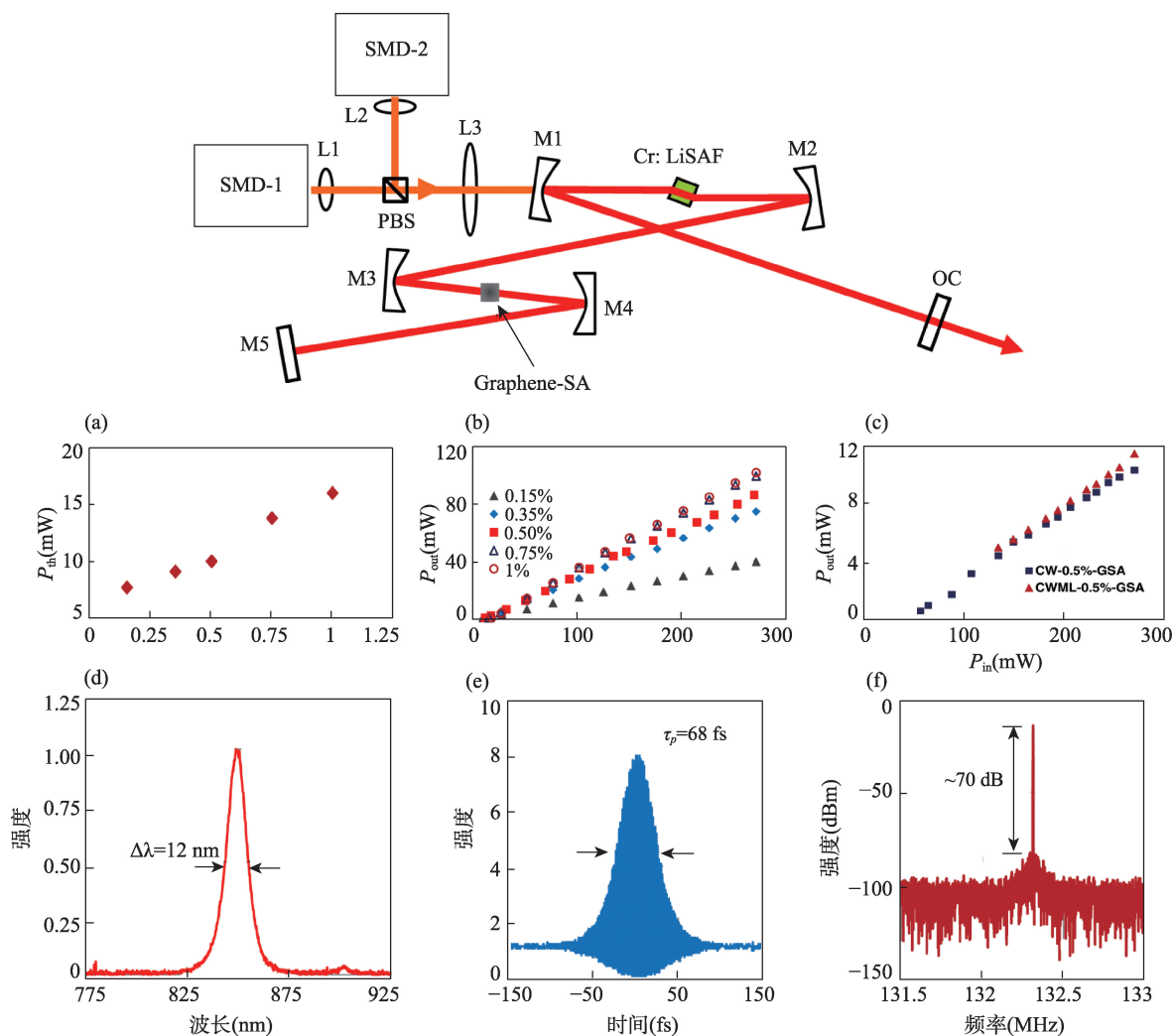


图5 石墨烯被动可饱和吸收体Cr:LiSAF锁模激光器

表1 石墨烯在调Q与锁模激光器中的应用研究进展

激光器	增益介质	波长 (nm)	平均功率 (mW)	最小脉冲间隔	重复频率	最大脉冲能量
锁模	Nd: YVO <sub>4</sub>	1063	1000	-	75 MHz	13.3 nJ
	Nd: GdVO <sub>4</sub>	1341	1290	11 ps	100 MHz	13 nJ
	Nd: YAG	1064	100	4 ps	88 MHz	1.1 nJ
	Cr: forsterite	1240	230	94 fs	75 MHz	3.1 nJ
	Yb: KGW	1031	504	428 fs	86 MHz	5.9 nJ
	Tm: YLF	1908	146.5	473 fs	70.2 MHz	2.09 nJ
	Cr: ZnSe	2500	80	226 fs	77 MHz	1.03 nJ
	Cr: ZnS	2400	250	41 fs	108 MHz	2.3 nJ
	Cr: LiSAF	850	11.5	68 fs	13 MHz	86 pJ
	Tm: MgWO <sub>4</sub>	2017	95.7	96 fs	87 MHz	1.1 nJ
调Q	Nd: YAG	1064	105	161 ns	500 kHz	159.2 nJ
	Nd: GdVO <sub>4</sub>	1063	2300	105 ns	704 kHz	3.2 μJ
		1341	260	450 ns	43 kHz	3.0 μJ
	Tm: YAG	2011	38	2.08 μs	27.9 kHz	1.74 μJ
	Er: YAG	1645	251	4 μs	35.6 kHz	7.05 μJ
	Nd: YAG	1064	266	753 ns	436 kHz	0.61 μJ
	Tm: LGGG	2003	2260	1.29 μs	43.9 kHz	3.19 μJ