

# 半导体泵浦固体激光器的调 Q 与光学二倍频

黄 康 靖

北京大学物理学院 2012 级本科生 学号: masked student id<sup>\*</sup>

(日期: March 18, 2015)

当强光作用于物质时, 物质会出现许多在光强较弱的时候不会出现的非线性光学现象, 其背后的非线性光学机制和原理值得研究. 在非线性光学的相关研究中, 半导体二极管泵浦的固体激光器具有很高的能量转化效率, 得到了很普遍的应用. 本实验通过搭建半导体二极管泵浦激光器, 研究了其输出特性与能量转化特性, 并且利用激光器研究了调 Q 生成脉冲激光与非线性二倍频效应的能量转化效率.

**关键词:** 激光, 固体激光器, 非线性效应, 二倍频, 被动调 Q

---

<sup>\*</sup> [huangkangjing@gmail.com](mailto:huangkangjing@gmail.com); masked phone number

## I. 引言

激光产生之后, 在传统的光学基础上又建立起来了一个内容丰富, 发展迅速的崭新分支, 即为非线性光学. 与线性光学不同的是, 当强光作用于物质后, 表征光学特性的许多参数如折射率, 吸收系数, 散射截面等都不再是常数, 而是一个与入射光有关的变量, 相应也出现了在线性光学中观察不到的许多新的光学现象. 非线性光学的产生与研究, 不仅加深了我们对光与物质相互作用本质的认识, 推动了基础光学理论的发展, 同时也具有极重要的实用价值. 因此, 对于其具体机制和原理的实验研究是有意义的.[1]

在激光和非线性光学的发展过程中, 新型激光的出现带来新的光学现象和巨大的应用前景. 以半导体激光二极管 (LD) 代替闪光灯泵浦的固体激光器具有非常高的能量转换效率, 其寿命长, 结构紧凑, 热效应小, 可覆盖波长宽, 已成为固体激光器的主要研究和发展方向. [2]

本实验搭建了半导体泵浦固体激光器获得了 1064nm 的红外激光并调 Q 产生了脉冲激光; 测量了在不同工作模式下的激光器输出激光性质; 同时观测并测量了晶体的光学二倍频效应.

## II. 背景与实验条件

### A. 半导体泵浦激光器

固体激光器 (Solid-state Laser), 指激发介质是固体的激光器. 其介质一般是掺杂有能够泵浦到激发态的原子, 离子或者分子的玻璃或晶体, 通过光泵浦的方式得到激发. 由于其参与受激辐射的粒子密度远远大于气体工作介质, 因此相对更容易获得大能量输出. 目前已经有上百种晶体作为增益介质实现了固体激光器的运转. 以铷离子 ( $\text{Nd}^{3+}$ ) 作为激活粒子的激光器使用非常广泛. 本实验使用的激光晶体为  $\text{Nd:YVO}_4$  (掺铷钒酸钇), 是低功率应用广泛的激光晶体, 工作在 1064 nm.

半导体激光器 (LD) 的增益介质是 pn 结半导体二极管. 当电流正向通过二极管时, 电子和空穴分别被从 n 区传输进 p 区和 p 区传至 n 区, 在 pn 结中电子与空穴可能复合

并产生相应能量的电磁辐射. 当电流大于阈值时,  $\text{pn}$  结中的辐射场变得很强, 经过半导体介质的端面多次反射放大, 在其它弛豫过程消除粒子数反转之前就在  $\text{pn}$  结中发生受激辐射, 发射出强烈的激光. 由于半导体材料中电子密度高, 相应的放大系数大, 很短的增益介质就可达到激光阈值. LD 的发射阈值低, 发射光谱可通过选择半导体材料和温度控制在宽范围内选择和精确调节, 是固体激光器极好的泵浦源.

$\text{Nd:YVO}_4$  中  $\text{Nd}^{+3}$  的吸收光谱内有若干吸收峰, 本实验使用  $\text{AlGaAs/GaAs}$  为材料的 LD, 通过温度调谐使其工作波长与某强吸收峰精确匹配, 就可以实现高效率的泵浦. LD 的光束发散角较大, 须经过端面或侧面耦合进行光束变换后, 再聚焦到固体激光器的增益介质上.[2]

## B. 激光器的调 Q 原理

Q 调制技术是获得窄脉冲高峰值功率激光的一种基本方法. 其基本原理是使激光谐振腔的损耗因子 (或 Q 值) 按照规定的程序变化: 在泵浦激励刚开始时, 使激光腔具有高损耗因子 (低 Q 值); 此时激光器由于阈值高不能产生激光振荡, 于是增益介质中的粒子不断从泵浦光获得能量并在上能级积累高粒子数; 然后在特定时刻, 使腔的损耗因子突然降低 (高 Q 值), 激光阈值也随之突然降低, 受激辐射极为迅速地增加. 于是在极短时间内, 上能级储存的大部分粒子的能量转变为激光能量, 形成一个很强的激光巨脉冲输出, 即调 Q 激光.

本实验使用的调 Q 方法称为被动式可饱和吸收调 Q 法: 在激光谐振腔内设置一饱和吸收体, 其吸收系数随光强的增加而减少, 泵浦开始时, 由于其吸收系数大, 谐振腔损耗很大, 激光不能起振. 随着泵浦造成增益介质的粒子数反转不断积累, 放大的自发辐射不断增加, 吸收系数减少, 当增益开始超过损耗时激光器开始起振. 随着激光强度的增加, 吸收系数继续下降, 促使激光更迅速增加, 产生了不断增长的激光辐射高峰. 当激光光强增至吸收体的饱和光强时, 增益系数显著下降, 腔内光子数密度降低. 降到初始值时, 吸收系数也恢复到初始的高值, 调 Q 脉冲结束. 本实验利用  $\text{Cr}^{+4}:\text{YAG}$  晶体对 1064nm 的固体激光器进行调 Q. [2]

### C. 非线性光学基础

激光与物质的非线性作用, 可以写成极化强度矢量的表达式形式:

$$\vec{P} = \chi^{(1)} \vec{E} + \chi^{(2)} \vec{E} \vec{E} + \chi^{(3)} \vec{E} \vec{E} \vec{E} + \dots \quad (1)$$

理论上可以得到 [1], 当作用于介质的场的形式是波动形式时, 产生的输出场内将会有二倍频成分.

当入射光的电场很小时, 表达式1中的非线性项可以忽略, 产生的偶极子实际上与电场成正比, 这就是线性光学现象. 但当入射光的电场较强时, 非线性项不能再被忽略, 因而可产生二次倍频、混频等现象. 1961 年 Franken 等人用红宝石激光照射石英晶体, 观测到波长为入射激光波长一半的二次谐波, 这是第一个被观测到的非线性光学效应.[2]

本次实验使用的非线性晶体是 KTP(磷酸钛氧钾), 是较为常用的非线性光学晶体.

### III. 实验仪器与内容

实验的装置图如图 1所示.

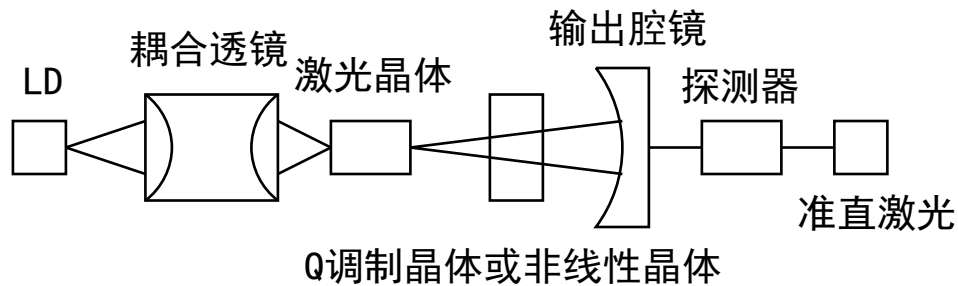


图 1: 实验装置的示意图, 图中探测器可以为功率计, 也可以为连接示波器的光电探测器

本实验首先测量了泵浦激光的输出功率特性, 即测定了泵浦激光的输出功率值和加的电流之间的关系.

随后, 本实验使用 3%@1064 nm的输出腔镜和前述的激光晶体以及耦合透镜搭建了固体激光器, 测量了其输出特性.

接着, 本实验使用了前述的调 Q 晶体和非线性晶体, 分别搭建了调 Q 脉冲激光光路和非线性二倍频光路, 测量了其输出特性与有关参数.

#### IV. 实验结果及分析讨论

对于泵浦用 LD 激光器的输出功率特性, 测量得到的输出功率图线如图 2 中蓝线所示.

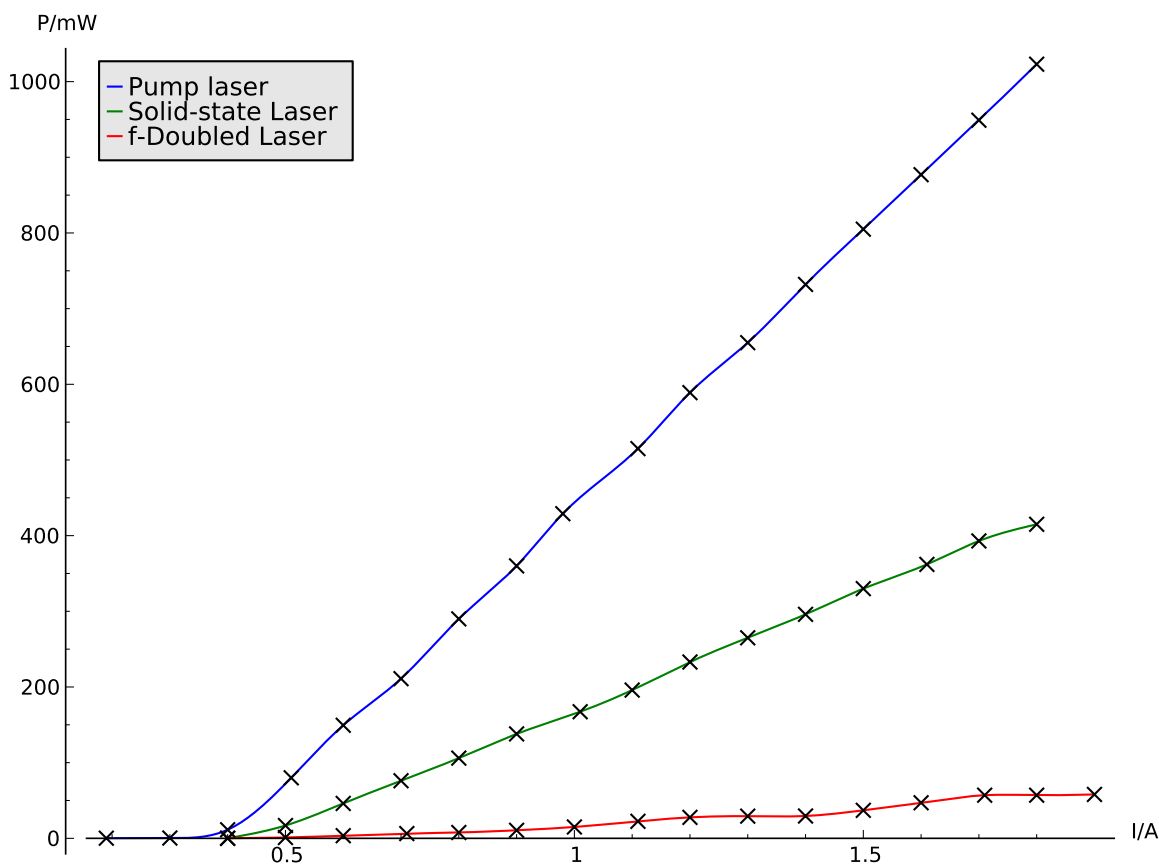
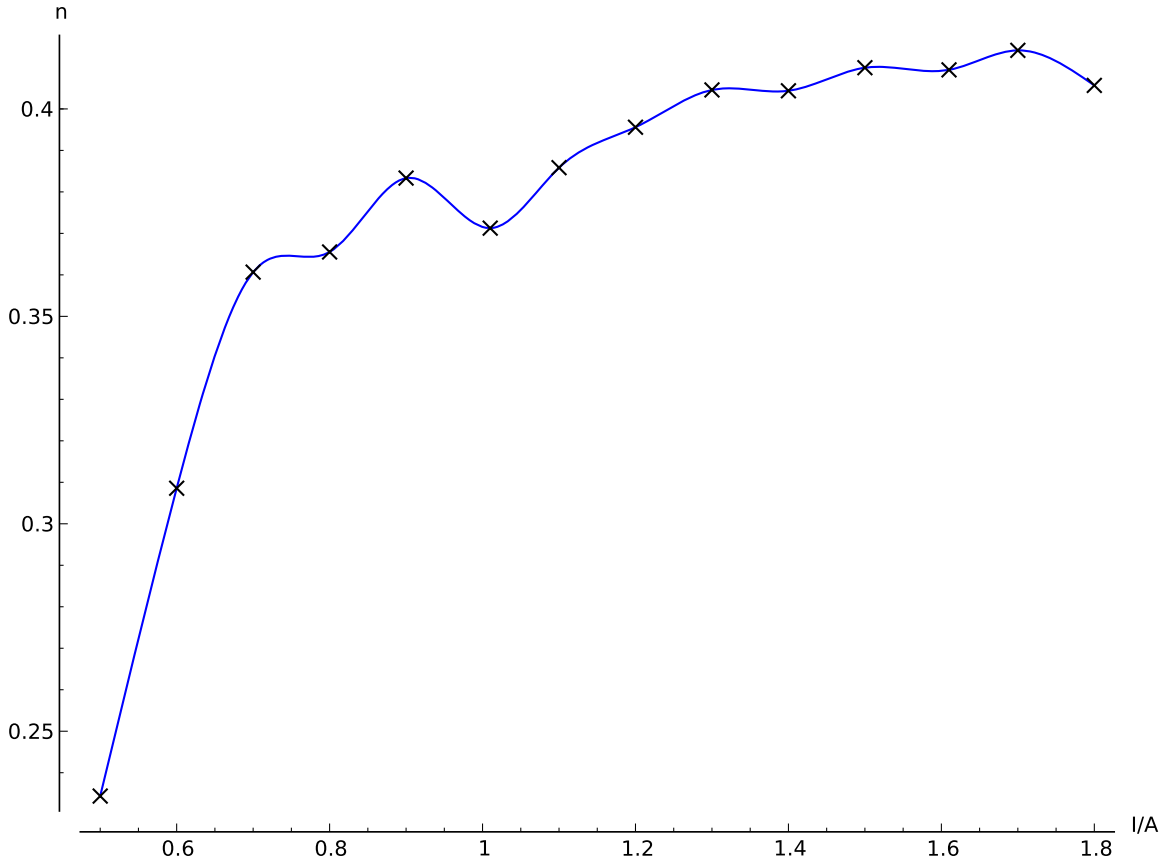


图 2: 各激光的输出功率特性图线, 图中所有的曲线都是通过实验点作三阶分段自然样条插值得到的

接着, 测量了激光系统的功率特性曲线, 如图 2 中绿线所示.

根据 LD 激光器输出功率特性测量点作三节分段自然样条插值的结果, 可以计算固体激光系统的能量转化效率, 并且绘制其能量转化效率的特性曲线, 如图 3 所示.

随后, 往共振腔内位置放入了调 Q 晶体, 使用探测器和示波器测量产生的脉冲激光



**图 3:** 激光系统的能量转化效率曲线, 转化效率是使用 LD 能量特性曲线作三阶分段自然样条差值后计算的.

的脉宽和重复频率, 得到脉宽为:

$$\Delta t = 500.0 \text{ ns} \quad (2)$$

得到重复频率为:

$$f = 125.0 \text{ kHz} \quad (3)$$

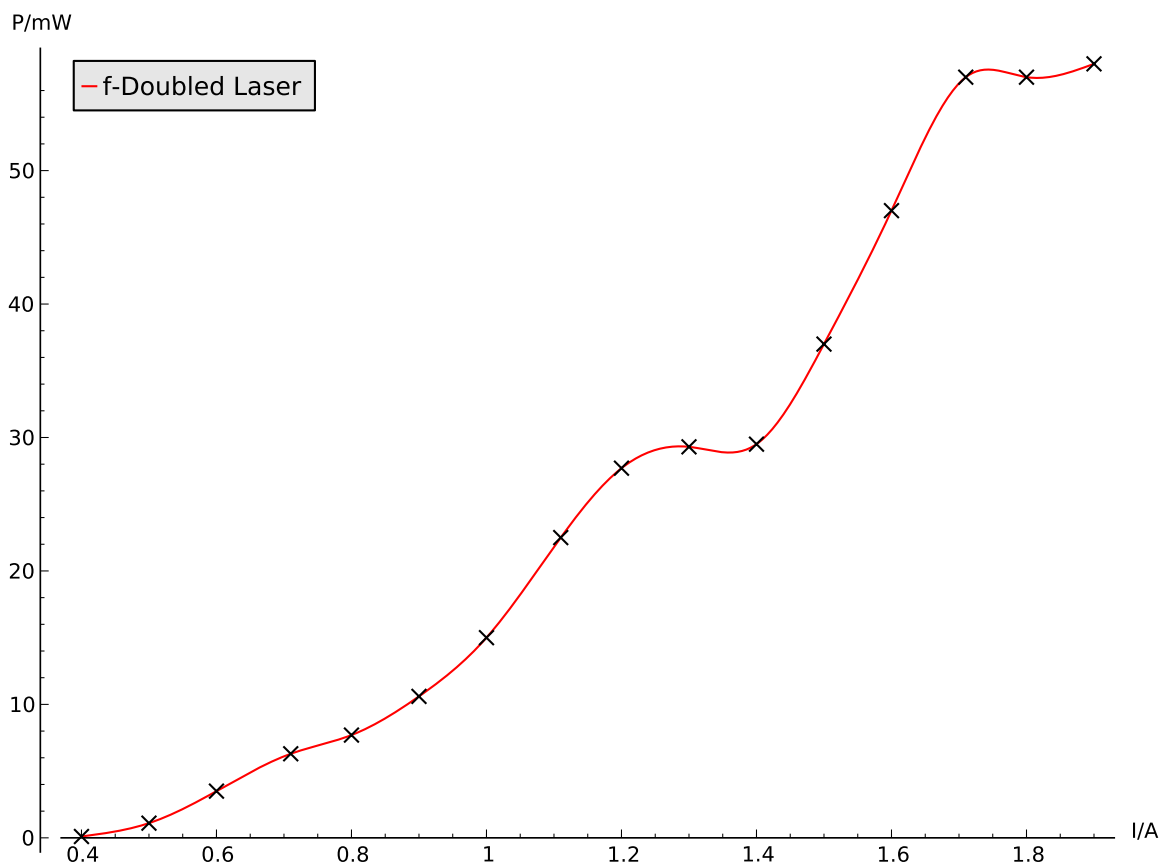
同时, 测量了不同泵浦功率下的脉冲激光功率, 测量结果与相关联的功率转化效率见表 I.

最后, 换用了短波通输出腔镜 ( $R = 99.5\% @ 1064 \text{ nm}, HT @ 532 \text{ nm}$ ) 后, 放上了前述的非线性晶体, 测量了其功率输出曲线, 如图 2 或图 4 中红线所示

同样根据 LD 激光器输出功率特性测量点作三节分段自然样条插值的结果, 可以

**表 I:** 泵浦电流和脉冲激光功率之间的数值关系表, 其中第一项对应到激光的阈值发射

泵浦激光激励电流大小 $I/A$	脉冲激光输出功率 $P/mW$	功率转化效率 $\eta$
0.80	2.00	0.0069
1.50	29.5	0.037
1.71	33.8	0.036
1.90	40.8	(无对应 LD 激光数据)



**图 4:** 二倍频非线性光学系统的功率输出曲线, 为便于观察曲线特性而单独作图.

计算非线性系统的能量转化效率, 并且绘制其能量转化效率的特性曲线, 如图 5 所示.

## V. 结论

实验成功搭建了半导体泵浦固体激光器, 并且测量了它的功率输出特性. 实验在半导体泵浦固体激光器上实现了调 Q 产生脉冲激光与非线性二倍频, 并且测量了它们的功率输出特性与能量转化效率.

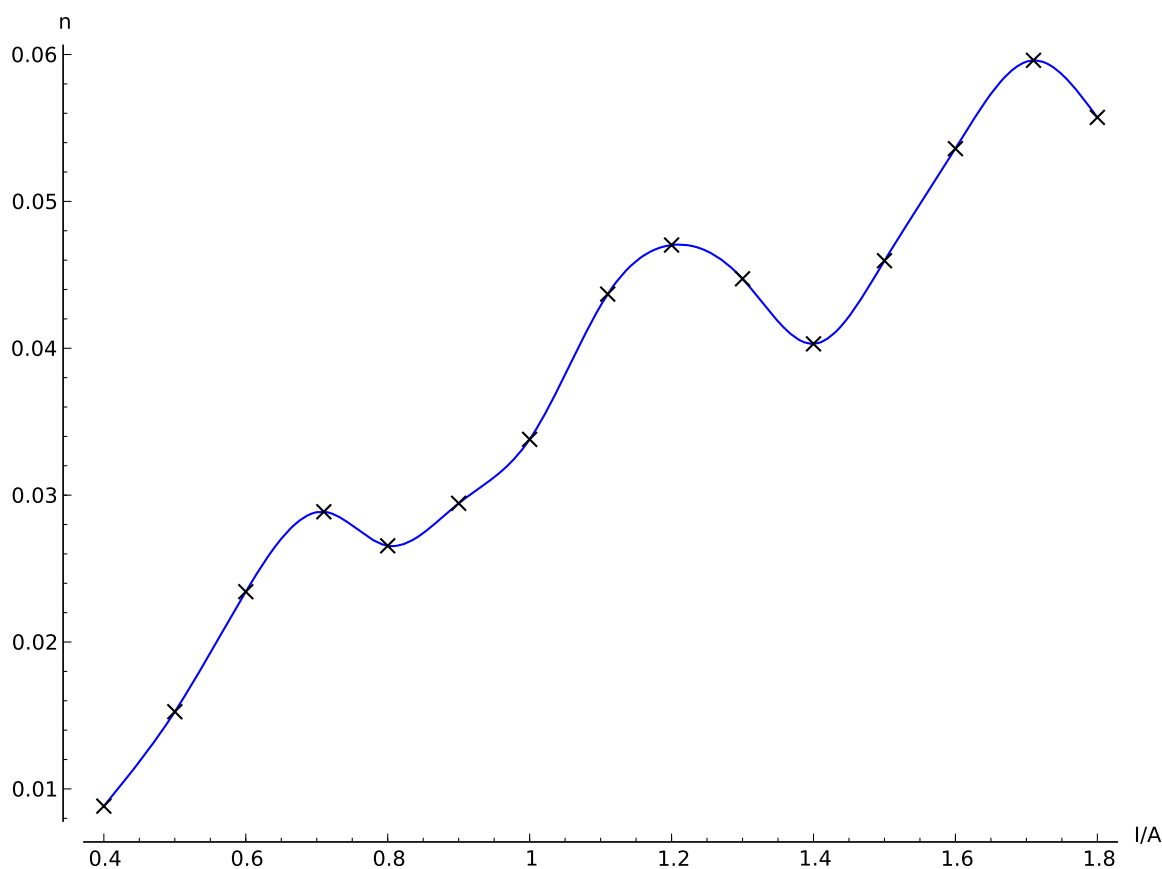


图 5: 二倍频非线性光学系统的能量转化效率曲线, 转化效率是使用 LD 能量特性曲线作三阶分段自然样条差值后计算的.

## VI. 致谢

感谢蒋莹莹老师在实验中认真而专业的指导.

感谢黄浩楠师兄在实验中仔细而周到的协助.

---

[1] 吴思成, 王祖铨 2010 近代物理实验 (第三版) (北京: 高等教育出版社) 第 xxx 页.

[2] 半导体泵浦固体激光器的调 Q 与光学二倍频 - 补充讲义



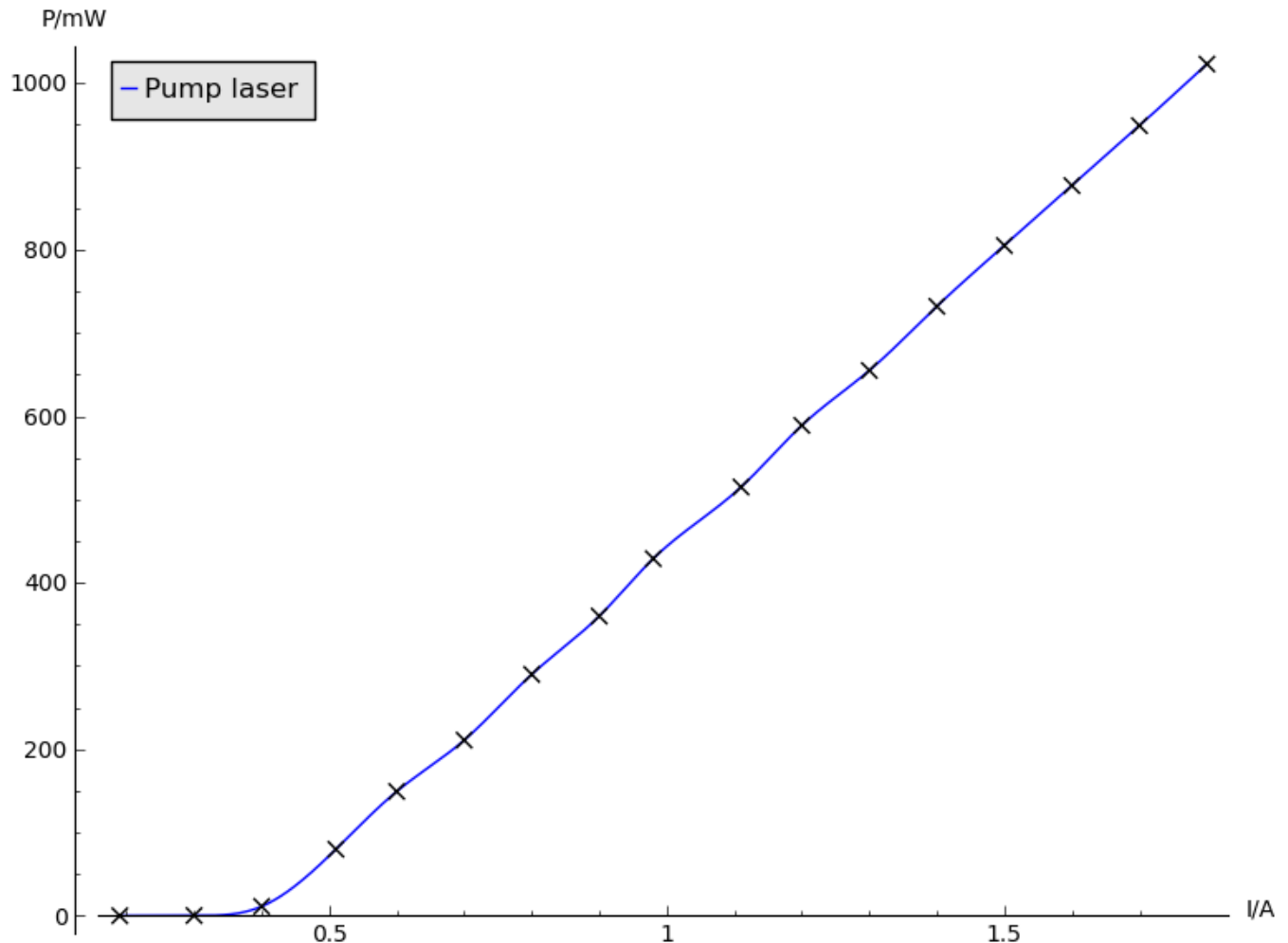
## A. 实验数据的处理代码

实验数据使用 sage 数学套件处理, 处理代码作为附件附在文后.

# Expr

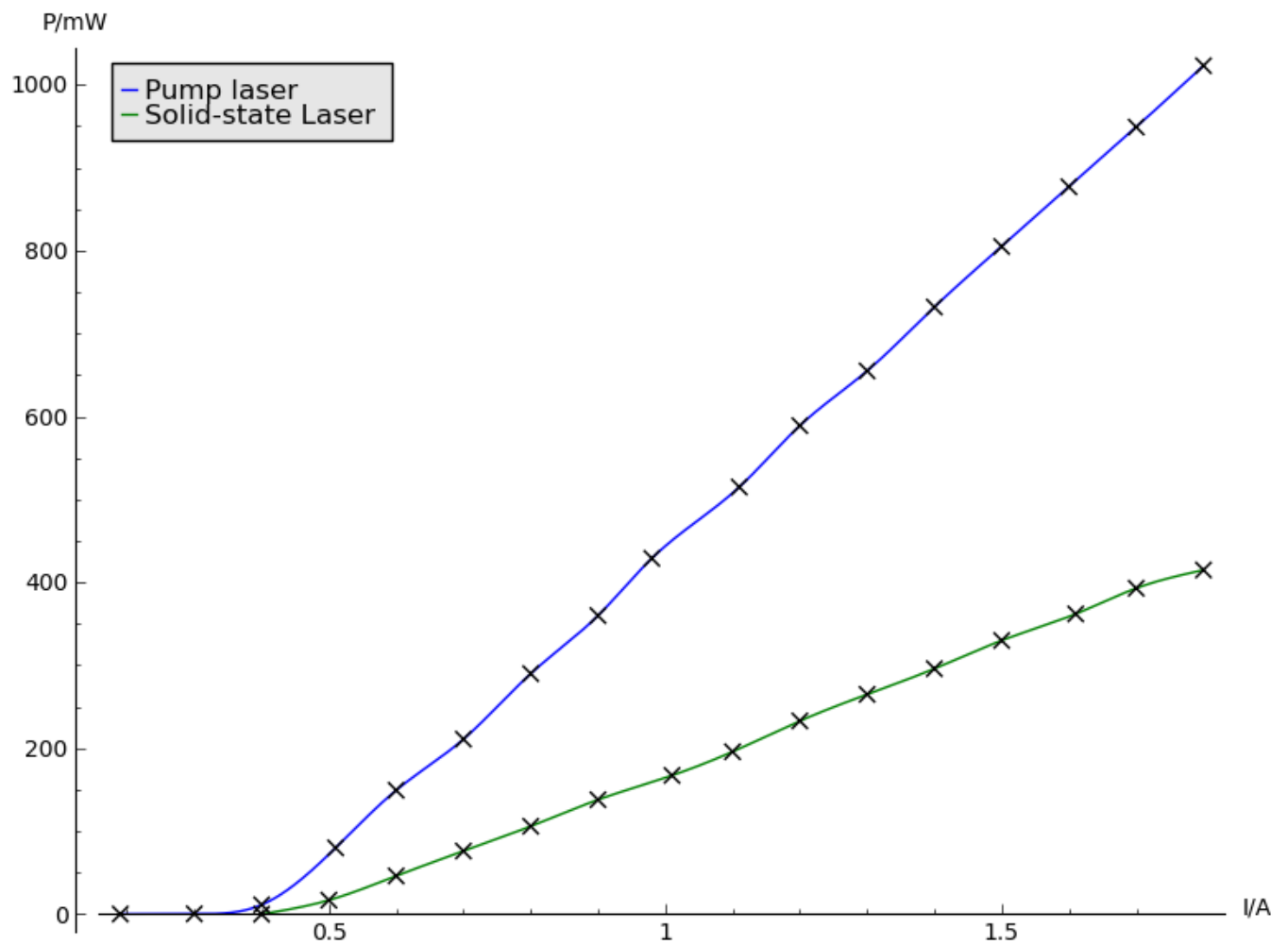
```
I1 =  
[0.19,0.30,0.40,0.51,0.60,0.70,0.80,0.90,0.98,1.11,1.20,1.30,1.40,1.50,1.60,1.70,1.80]  
  
P1 = [0.17,0.39,11.33,80.0,149.4,211,290,360,429,515,589,655,732,805,877,949,1023]  
f1 = spline(zip(I1,P1))
```

```
plot1 = plot(f1,xmin=0.19,xmax=1.80,axes_labels = ["I/A", "P/mW"],  
legend_label="Pump laser") + scatter_plot(zip(I1,P1),marker = "x")  
plot1
```



```
I2 = [0.40,0.50,0.60,0.70,0.80,0.90,1.01,1.10,1.20,1.30,1.40,1.50,1.61,1.70,1.80]  
P2 = [0.0,16.90,46.1,76.1,106.0,138.0,167.3,195.9,233,265,296,330,362,393,415]  
f2 = spline(zip(I2,P2))
```

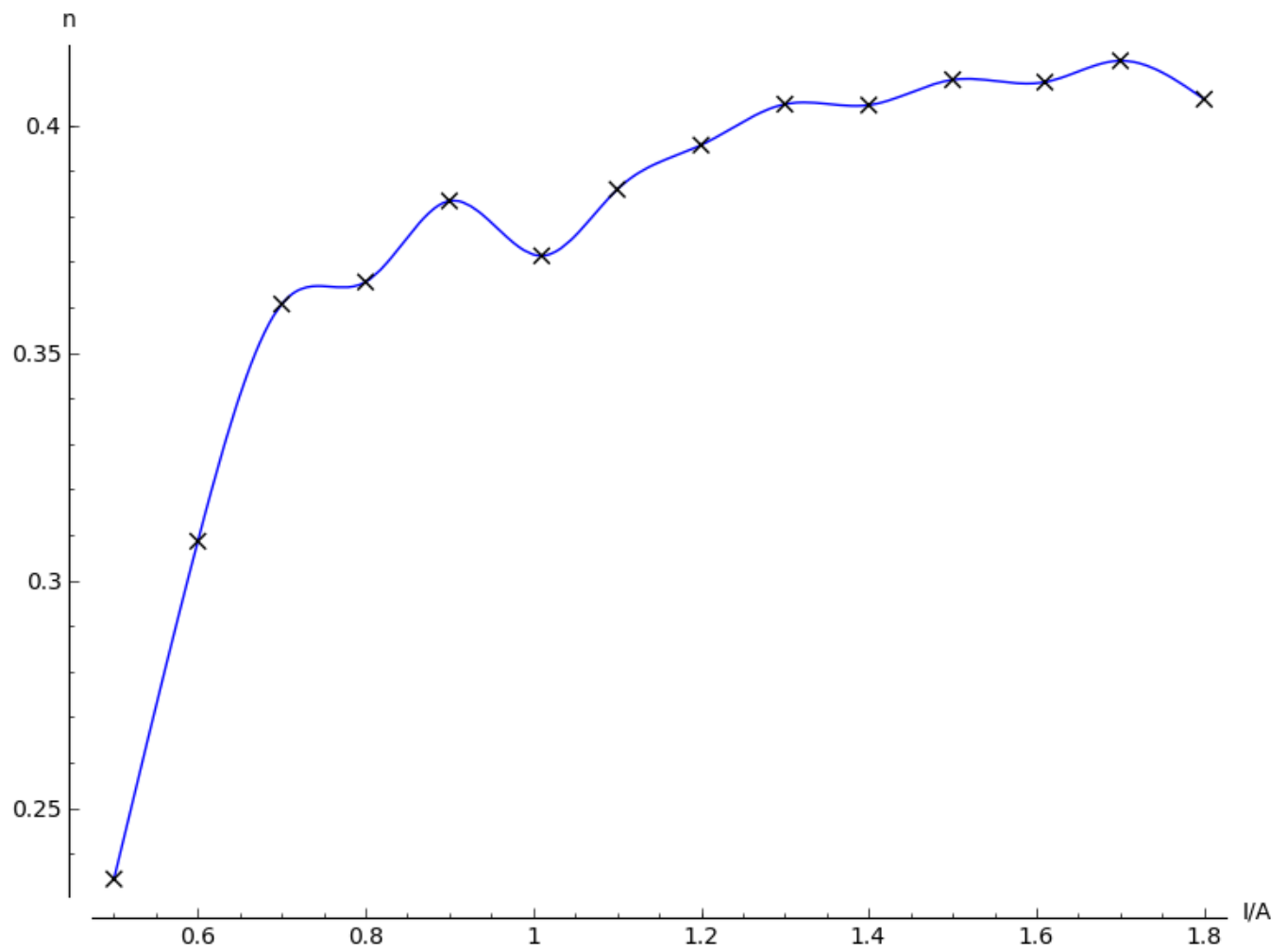
```
plot1 += plot(f2,xmin=0.40,xmax=1.80,axes_labels = ["I/A", "P/mW"],  
color="green",legend_label="Solid-state Laser") + scatter_plot(zip(I2,P2),marker =  
"x")  
plot1
```



```
n2 = map(lambda x: x[1]/f1(x[0]), zip(I2,P2)[1:])
n2
```

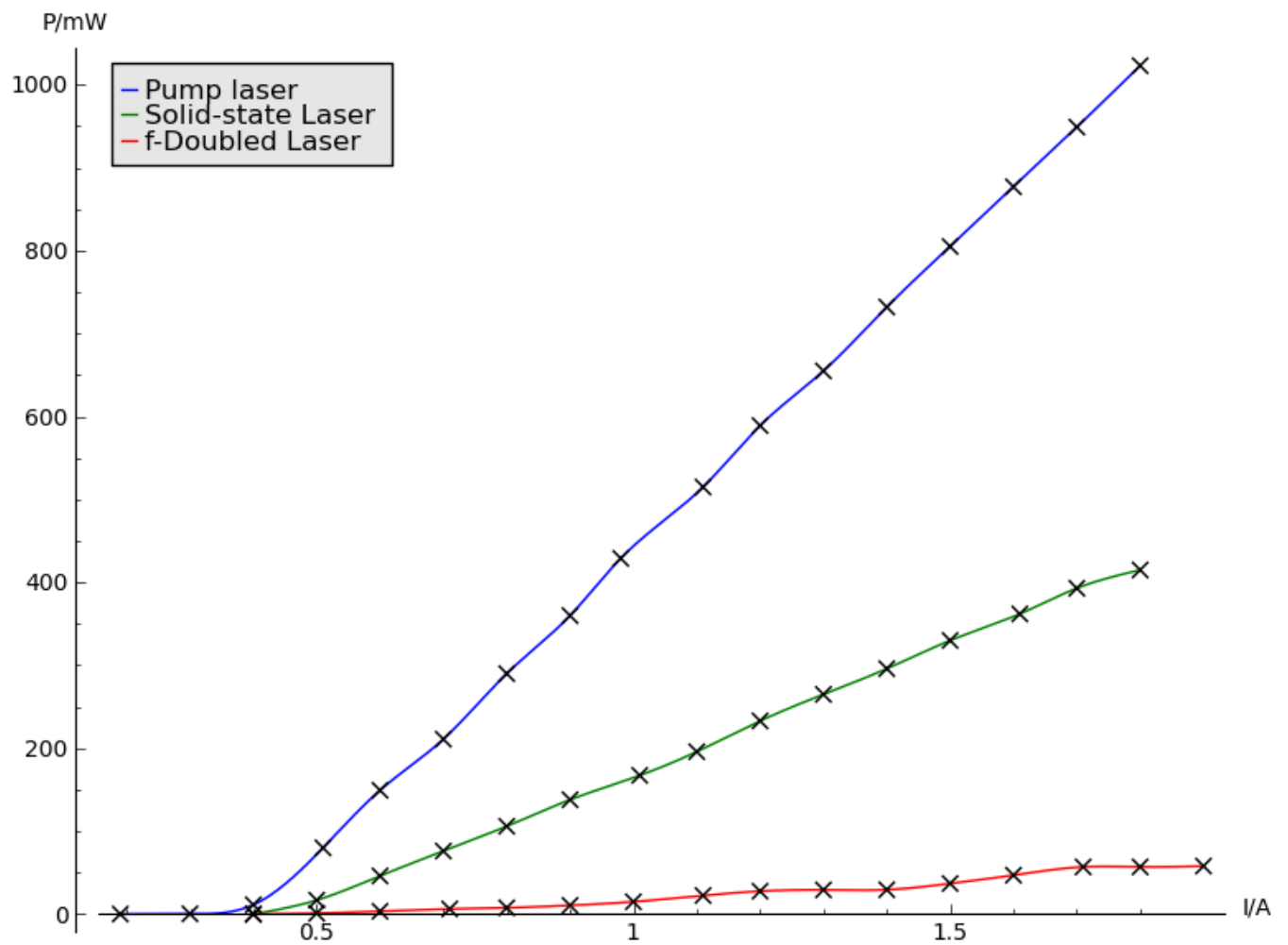
```
[0.234371855303025, 0.308567603748327, 0.360663507109005,
0.365517241379310, 0.383333333333333, 0.371266015832563,
0.385840657713961, 0.39558573853989815, 0.40458015267175573,
0.40437158469945356, 0.40993788819875776, 0.40941606640010586,
0.41412012644889357, 0.4056695992179863]
```

```
fn2 = spline(zip(I2[1:],n2))
plot2 = plot(fn2,xmin=I2[1],xmax=I2[-1],axes_labels = ["I/A", "n"]) +
scatter_plot(zip(I2[1:],n2),marker = "x")
plot2
```

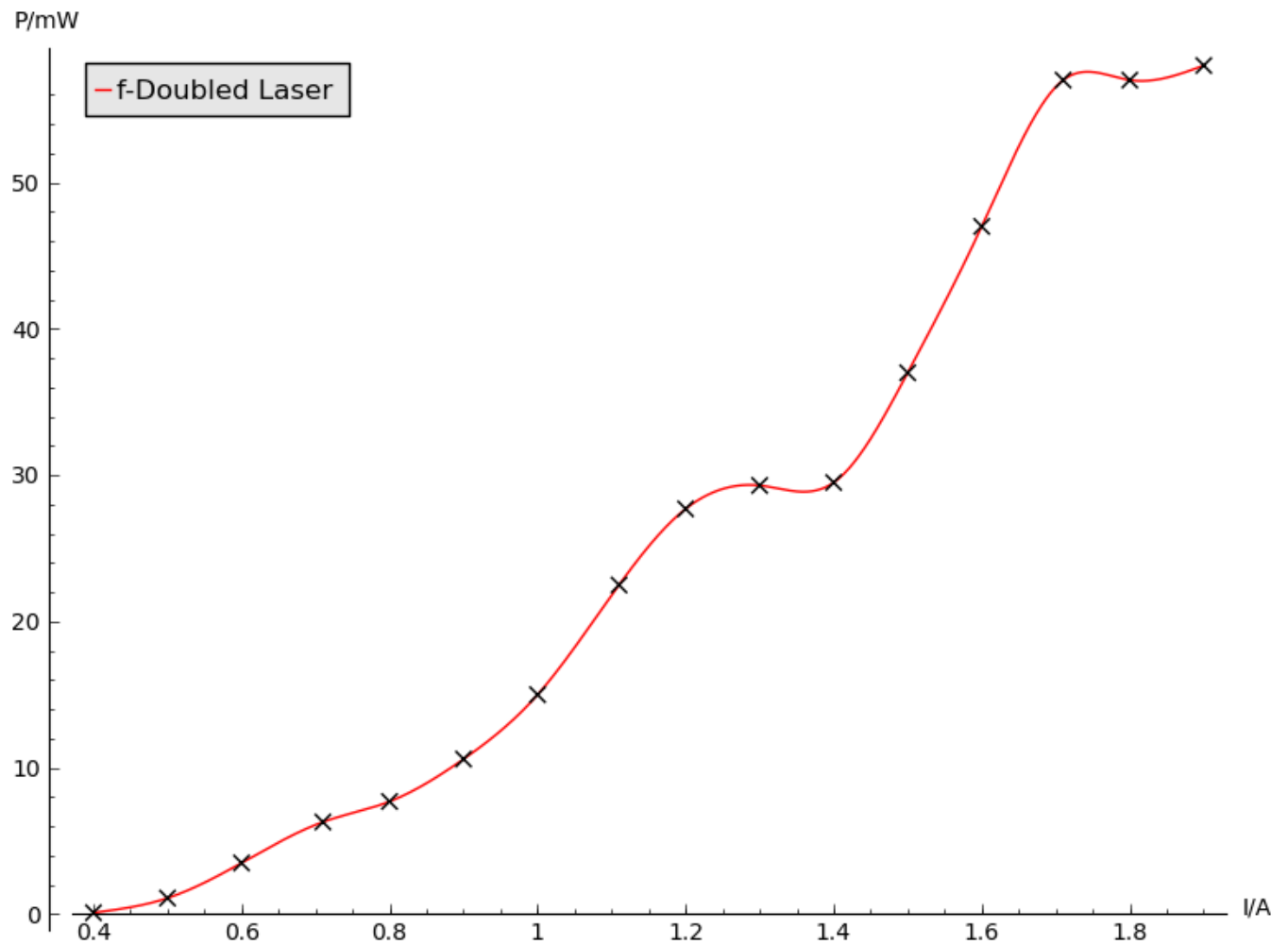


```
I3 = [0.4,0.5,0.6,0.71,0.80,0.90,1.00,1.11,1.20,1.30,1.40,1.50,1.60,1.71,1.80,1.90]
P3=[0.1,1.1,3.5,6.3,7.7,10.6,15.0,22.5,27.7,29.3,29.5,37.0,47.0,57.0,57.0,58.0]
f3 = spline(zip(I3,P3))
```

```
plot1 += plot(f3,xmin=0.40,xmax=1.90,axes_labels = ["I/A", "P/mW"],
color="red",legend_label="f-Doubled Laser") + scatter_plot(zip(I3,P3),marker = "x")
plot1
```



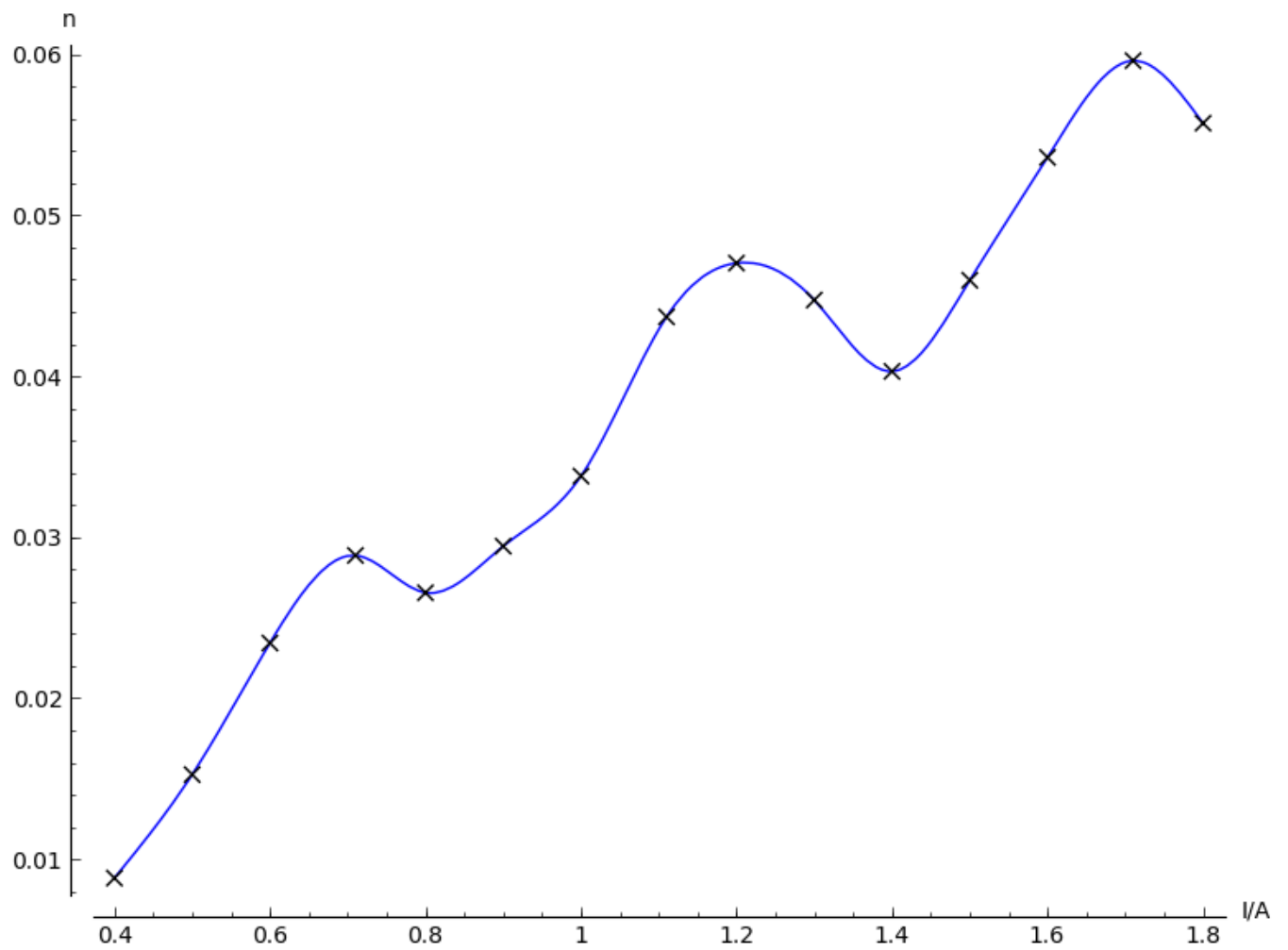
```
plot3 = plot(f3,xmin=0.40,xmax=1.90,axes_labels = ["I/A", "P/mW"],
color="red",legend_label="f-Doubled Laser") + scatter_plot(zip(I3,P3),marker = "x")
plot3
```



```
n3 = map(lambda x: x[1]/f1(x[0]), zip(I3,P3)[: -1])
n3
```

```
[0.00882612533097970, 0.0152549728303744, 0.0234270414993307,
0.0288692569632041, 0.0265517241379310, 0.0294444444444444,
0.0337981534172038, 0.0436893203883495, 0.0470288624787776,
0.0447328244274809, 0.0403005464480874, 0.0459627329192547,
0.0535917901938426, 0.0596044716093937, 0.0557184750733138]
```

```
fn3 = spline(zip(I3[: -1],n3))
plot4 = plot(fn3,xmin=I3[0],xmax=I3[-2],axes_labels = ["I/A", "n"]) +
scatter_plot(zip(I3[: -1],n3),marker = "x")
plot4
```



plot1.save("plot1.pdf")

[plot1.pdf](#)

plot2.save("plot2.pdf")

[plot2.pdf](#)

plot3.save("plot3.pdf")

[plot3.pdf](#)

plot4.save("plot4.pdf")

[plot4.pdf](#)

