

激光公式与定义

R. G. Seed

这是一篇适合研究人员及设计师的简明激光基础辞典，包括了从基本量子关系式到巨脉冲和喇曼激光器方面的内容。

布儒斯特角 (Brewster Angle): 使平面偏振单色光波(其 E 矢量完全处于入射平面内)不被透明电介质反射的入射角, 即经历全部折射传输的入射角。取这个入射角时, 相应的反射路线沿着电介质中波感生电子振荡的零再辐射方向。普通玻璃的布儒斯特角约 57° 。

激光腔 (Cavity, Laser): 具有模式选择的低损耗光学共振结构, 其中电磁场强度经多次反射后增强而产生激光作用。

内腔(或完整腔) (Cavity, Internal or Integral): 端面反射镜直接涂在激活激光物质上的激光腔。例如带有电介质反射镜涂层的红宝石激光棒。

外腔 (Cavity, External): 反射镜和激活激光介质同轴, 但又分开安置的激光腔。

非谐振腔(或行波腔) (Cavity, Nonresonant or Traveling-Wave): 不带反射镜, 因而不具有模式选择共振的激光器结构。这种结构使激光放大器和振荡器有宽的带宽。

开裂 (Crazing): 很强的光源在光学材料内部或表面造成的微观裂缝的逐渐发展。连续的裂纹产生较大的裂缝, 最终使材料破裂。红宝石和钽玻璃之类的高能光抽运激光器就受到裂纹的限制。

双抽运或双脉冲 (Double Pumping or Pulsing): 一种抽运激光器的技术。这种技术先是在较长的时间内把能量储存在次阈值能级的受激态内, 紧接着进行第二次很短的、超过阈值条件一些范围的抽运。这就在整个激活区域触发起激光振荡, 产生比通常见到的大几倍的峰值功率输出。

电光效应 (Electro-Optic Effect): 外加电场 E 在透明材料中引起双折射。平面偏振波的总旋转在所有材料中正比于 E^2 (克尔效应), 在缺乏对称中心的材料(如 KDP)中正比于 E。

激子 (Exciton): 一种可动的、束缚或结合在一起的中性空穴电子对, 具有特有的、精确的结合能。激子是“氢原子”类型的概念, 按照这种概念, 激子中的空穴和电子犹如氢原子中的质子和电子一样为库仑吸引力所联结。

法布里-珀罗干涉仪 (Fabry-Perot Interferometer): 一种由两个端面反射镜构成的共振

腔。两反射鏡间有一定距离，使某些允许的光频产生干涉。由于内部反射而产生光波的增强与抵消事实上是光驻波。这种结构能用作激光腔、模式滤波器或频率选择器。

法布里-珀罗反射鏡或法布里-珀罗标准具(Fabry-Perot Mirror or Etalon)：见电介质反射鏡。

法拉第效应或磁光效应(Faraday or Magneto-Optic Effect)：在介质中，电磁波在平行于其传播方向的磁场 H 的影响下偏振平面的旋转。总旋转正比于 H 沿其路程长度上的线积分。

丝状输出(Filamentary Output)：一种不规则的斑点状输出花样，据推测可能是由于内部选定的(优先的)狭窄区域内的激光作用产生的。絲状输出仅在激光器的近场输出花样上可观察到。

干涉滤光片(Filter, Interference)：一种带有两个多层电介质端面反射鏡的单个平行板共振器(法布里-珀罗干涉仪)。两反射鏡的中心间隔 $Z = \lambda_{\text{介质}}/2 = \lambda_{\text{真空}}/2n$ (n 为折射率)。这就是通过特定腔共振频率的长度，其它频率则不能通过滤光片。由于电介质是透明的，滤光片只吸收少量功率，透射率是高的。电介质层越多，共振就越窄，边带抑制就越强。

四能级激光器(Four-Level Laser)：见二能级系统。

巨脉冲激光器(Giant-Pulse Laser)：见儲能激光器。

干涉反射鏡(Interference Mirror)：见电介质反射鏡。

反转(Inversion)：高能级比低能级有更多粒子集居数的状态，即 $n_2 - n_1 > 0$ ，这里 $\epsilon_2 > \epsilon_1$ 。由于集居数的反转并不处于热平衡状态，所以为了建立和维持这种产生激光作用的必要但不是充分的条件，須进行抽运。

克尔效应(Kerr Effect)：见电光效应。

磁光效应(Magneto-Optic Effect)：见法拉第效应。

电介质反射鏡(Mirror, Dielectric)：一种具有高度频率选择性的多层电介质反射器。它是靠在不同折射率物质界面上光的部分反射来实现的。波长 λ 发生反射的一个条件是介质层厚度均不等于 $\lambda/4$ 。若有一个介质层为这一厚度，则等于此厚度四倍的波长的大部分透过。因而，如欲仅反射 λ_j ，就采用很多介质层，每层厚度为 $\lambda_i/4$ (这里 $i = 1, 2, \dots, m$ ，但 $i \neq j$)。要改进反射鏡的纯度，可使 m 层中的每层不止一层。由于涂层是透明的电介质，所以反射鏡吸收的功率很少，所有的光或者被反射或者被透射。

简并模式(Mode, Degenerate)：可由一个以上的频率在腔内产生的单一电磁场分布。

模式耦合(Mode Coupling)：相似模式之间能量的相互作用或交换。注意，在理想情形下不存在这样的耦合机理，但很多实用的激光器却呈现这种效应。

模式跳跃(Mode Hopping)：激光器的输出能量在短持续期(通常在微秒范围)内从一种模式到另一种模式的无规移动。模式的间隔通常很近。

多模工作(Multi-Mode Operation)：激光器在比閾值高得多的情况下工作，以便激起一个以上的模式。如果模式是非简并的，则输出花样将不止在一个频率上包含可测量的功率。

多层电介质反射鏡(Multi-Layer Dielectric Mirror)：见电介质反射鏡。

多层滤光片 (Multi-Layer Filter): 见电介质滤光片。

负吸收 (Negative Absorption): 见受激发射。

量子噪声 (Noise Quantum): 一种无规变化或由于入射到探测器上的量子平均速率涨落而引起的噪声信号。噪声功率的基本电磁量子正好是每个电磁模式一个光子。

热噪声 (也叫约翰逊噪声, 尼奎斯特噪声) (Noise, Thermal also Johnson Noise, Nyquist Noise): 在电阻性的介质中由于电流载流子的无规运动而产生的噪声。

光抽运 (Optical Pumping): 用可见光提高激光工作物质中电子的能级。典型的光抽运使用短持续期、高强度的闪光灯输出。这种能量大部分被透明基质固体(如红宝石)中的杂质原子所吸收。

近场输出花样 (Output Pattern, Near Field): 激光器输出端辐射能量的空间分布(实质上是在会聚透镜焦平面上拍摄的无限远处激光器的输出照片)。

声子 (Phonon): 基本量子或完整单晶点阵振动场的能包。声子的样子象连结点列阵的粒子, 象波一样振动。声子可认为是声光子或热能的单元。

光羽 (Plume): 被强激光脉冲轰击后, 强吸收物质在很短时间内喷出的热的气体状物质。在大多数辐照实验中, 光羽的显著特点是发射宽带的白光。光羽被认为是由处在第一和第二电离态的蒸发了的(在 $20,000 \sim 30,000^\circ\text{K}$ 时)物质(失去一个或两个外层价电子)组成的。

泵浦 (Pump): 用以增加受激态电子集居数的一种外加能源。激光器需用泵浦来产生反转, 也就是 $n_2 > n_1$, ($\epsilon_1 < \epsilon_2$)。

Q 开关式激光器 (Q-Switched Laser): 见储能激光器。

喇曼效应 (Raman Effect): 在物质的各种高低特征频率上光学辐射的虚吸收和瞬时 ($< 10^{-8}$ 秒)再发射。低频发射称为斯托克斯辐射。有点令人奇怪的高频发射(使物质的电子留在比最初更低的能级上)称为反斯托克斯辐射。喇曼效应只有在强光场的情况下才能观察到。在中等辐照下, 在入射光频为 ν_0 时, 喇曼激活物质实际上是透明的, 即使当 ν_0 接近特征吸收线, 此种效应变强时也是如此。

喇曼激光器 (Raman Laser): 把喇曼激活物质放在“原来激光器”的谐振腔中, 或用其它强的相干“驱动能源”强烈照明而感生喇曼频率辐射来产生激光的装置。

饱和吸收 (Saturation Absorption): 在非常高的辐射强度下, 在电子对能级之间不存在可产生跃迁的空能级, 因而使其吸收系数逐渐减小到零, 这种状态称为饱和吸收。

尖峰 (结构) (Spiking): 激光输出辐射中的短而多的不规则脉冲。尖峰结构是脉冲激光器, 尤其是闪光抽运的固体电介质型(如红宝石、钕玻璃)激光器的特性。典型的尖峰结构持续时间为 $0.2 \sim 2$ 微秒。

自发发射 (Spontaneous Emission): 受激的束缚电子以辐射的随机发射方式造成的能量损耗(萤光)。

受激发射 (Stimulated Emission): 在辐射场的影响下, 体系由受激电子能级跃迁到较低能级的辐射的发射。发射的辐射和激励辐射同相, 并产生负吸收状态。

斯托克斯线 (Stokes Lines): 见喇曼效应。

贮能激光器 (Storage Laser): 在放电之前就贮存了大量能量的任何一种激光器。“贮能二极管激光器”就是一例。这种激光器是在比激光发射周期长的时间内用电能激发某些载流子的。这样就能获得功率增益, 即在其工作的某段时间内, 辐射的光功率大于施加的电功率。贮能固体激光器称为巨脉冲激光器, 因为可以从它获得巨大的峰值功率(牺牲一些效率)。大多数贮能方法基于 Q 开关(控制激光腔的 Q 值, 以延迟激光巨脉冲的时间发展)。但也还有其它的技术, 诸如双抽运和线加宽也可采用。(注意: 贮能激光器的条件本质上与好的低阈值激光器相反。)

超辐射 (Superradiance): 荧光线的发射强度随激励(抽运)功率的增加而迅速增强。强度增加和伴线变狭被认为是由于自发发射光子在单次通过激活区域时相干加强的结果。

三能级激光器 (Three-Level Laser): 见二能级系统。

阈值 (阈值运转) (Threshold): 所有激光器的一个运转特征, 表明当抽运功率为某一特定值时, 相干激光输出就突然发生。低于此值就无相干发射。在阈值时, 相干输出从零上升, 通常随抽运功率线性地增加。

行波腔 (Traveling-Wave Cavity): 见非谐振腔。

二能级系统 (Two-Level System): 仅利用两个电子能级的激光器。电子由基态(能级 1)抽运到受激发态(能级 2), 然后经受激发射释放能量而回到基态。

三能级系统 (Three-Level System): 包含三个电子能级的激光器。电子由基态(能级 1)抽运到能级 3, 接着跃迁到较高的激光能级 2, 然后再以受激发射回到基态。

四能级系统 (Four-Level System): 包含四个电子能级的激光器。电子由基态(能级 1)抽运到能级 4, 受激电子又从这个能级向下跃迁到较高的能级 3(或亚稳态 3), 然后受激跃迁到较低的能级 2, 接着很快衰减回基态。四能级系统有一个优点, 就是抽运能级和基态同激光作用无关, 因此, 能级 2 和 3 之间反转所需的受激电子集居数就相对地少。这里, 反转的要求是 $\tau_{32} \geq \tau_{21}$, 其中 τ 表示跃迁衰减时间。

激 光 公 式

折射率、量子化能量、波矢、动量:

$$n = C_{\text{真空}} / C_{\text{介质}} = \lambda_{\text{真空}} / \lambda_{\text{介质}}$$

$$\epsilon = h\nu = \hbar\omega$$

$$\tilde{\nu} = 1/\lambda; \quad \Delta\tilde{\nu} = (1/\lambda_1) - (1/\lambda_2)$$

$$\epsilon_1 - \epsilon_2 = \Delta\epsilon = h(\nu_1 - \nu_2) = h\Delta\nu = hc\Delta\tilde{\nu}$$

$$p = h/\lambda = \hbar k = \epsilon/c = h\nu/c$$

平方发射线模式密度:

$$D = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \Delta\nu$$

麦克斯韦能量分布函数:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-(\epsilon_2 - \epsilon_1)/KT}$$

普朗克黑体辐射定律:

$$U(\nu)d\nu = \bar{\epsilon} D(\nu) d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/KT} - 1} d\nu$$

用电磁场表示的能量密度:

$$U = U_E + U_H = \frac{\epsilon E^2}{2} + \frac{\mu H^2}{2} = \frac{S}{c}$$

对于在无耗介质中传播的平面波:

$$U_E = U_H = \frac{\epsilon E^2}{2} = \frac{\mu H^2}{2}$$

$$E = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} H = 376.6 H; \quad c = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}$$

辐射压强:

$$P = \frac{S}{c} = U$$

单位体积自发跃迁速率:

$$\left(\frac{dn_2}{dt}\right)_{\text{自发}} = n_2 A_{21} = n_2 \frac{1}{t_{21}^{\text{自发}}}; \quad A_{21} = \frac{1}{t_{21}^{\text{自发}}}$$

单位体积受激跃迁速率:

$$\left(\frac{dn_2}{dt}\right)_{\text{受激}} = n_2 B_{21} U(\nu_{21}) = n_2 \frac{1}{t_{21}^{\text{有效受激}}}$$

净受激发射:

$$\left(\frac{dn}{dt}\right)_{21} = \left(\frac{dn_2}{dt}\right)_{21} - \left(\frac{dn_1}{dt}\right)_{12} = n \frac{1}{t_{21}^{\text{净有效受激}}}$$

自发与受激发射的爱因斯坦关系式:

$$n_2 A_{21} + n_2 B_{21} U(\nu_{21}) = n_1 B_{12} U(\nu_{12})$$

自发发射与受激发射之比, 即爱因斯坦

系数 **A** 与 **B** 之比:

$$\frac{A}{B} = D(\nu) h\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} h\nu$$

腔衰减时间:

$$t_{\text{腔}} = \frac{l_{\text{腔}}}{(1-R)c} = \frac{1}{\alpha_{\text{腔}} c}; \quad 1-R=T$$

$$\alpha_{\text{腔}} = \alpha_{\text{反射镜}} = \frac{T}{l_{\text{腔}}}$$

共振器的 **Q**:

$$Q = \frac{\epsilon}{\frac{d\epsilon}{dt}} 2\pi\nu_0 = 2\pi \frac{\epsilon}{\left(\frac{d\epsilon}{dt}\right) \nu_0}$$

$$= 2\pi \frac{\text{每周期储存的能量}}{\text{每周期耗散的能量}}$$

受反射镜透射限制的**光学共振器的Q**:

$$Q = 2\pi\nu_0 \frac{l_{\text{腔}}}{cT} = 2\pi\nu_0 \frac{l_{\text{腔}}}{c(1-R)} = 2\pi \frac{l_{\text{腔}}}{\lambda(1-R)}$$

$$= 2\pi\nu_0 \frac{1}{t_{\text{腔}}}$$

纵向(轴向)模式的**法布里-珀罗平行板条件**:

$$m \frac{\lambda_{\text{介质}}}{2} = l_{\text{腔}} \cos \theta$$

纵向模式间隔:

$$d\nu = dk \frac{c}{n} \frac{1}{2l_{\text{腔}}}$$

从吸收观点看的基本的**激光器条件**:

$$G_{\text{受激}}(\nu) \geq L_{\text{总数}}(\nu)$$

综合有效损耗系数:

$$\alpha_{\text{损耗}} = \alpha_{\text{反射镜}} + \alpha_{\text{散射}} + \alpha_{\text{衍射}} + \alpha_{\text{吸收}} + \alpha_{\text{摇摆}} + \dots$$

从模式观点看的基本的**激光器起振条件**:

$$n \geq D \frac{t_{32}^{\text{自发}}}{t_{\text{腔}}}, \quad n \geq D \frac{t_{\text{自发}}}{t_{\text{损耗}}}$$

从二极管电流观点看的基本的**激光器方程**(拉谢尔-Lasher-电流方程):

$$J = D(\nu) \Delta\nu c l w \frac{1}{\eta} [\alpha_{\text{损耗}}(\nu)]$$

光束强度与辐射密度的关系:

$$I(\nu) = U(\nu) c$$

相干时间 Δt_c , **带宽** $\Delta\nu$, **相干长度** Δl_c :

$$\Delta t_c = \frac{1}{\Delta\nu}$$

$$\Delta l_c = \frac{c}{\Delta\nu} = c \Delta t_c$$

衍射极限, 整个角度的**束散度**:

$$\phi = a \frac{\lambda}{d} \cong \frac{\lambda}{d}, \quad a \cong 1.22$$

在距离 x 内的**吸收关系**:

$$I = I_0 e^{-\alpha x} = I_0 e^{-x/l_\alpha}, \quad \alpha = \frac{1}{l_\alpha}$$

电子能级吸收:

$$\alpha = (n_1 - n_2) \sigma \quad (\text{对于 } \Delta n = n_2 - n_1 > 0, \quad \alpha = -(\Delta n) \sigma)$$

以速度 c 传播的**脉冲束**的距离**吸收常数**与**束衰减时间常数**的关系:

$$t = \frac{1}{\alpha c}; \quad \alpha = \frac{1}{ct}$$

总辐射损耗:

$$\frac{dU(\nu)}{dt} = -\frac{1}{t_{\text{损耗}}} U(\nu); \quad \frac{dU}{dt} = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{dU(\nu)}{dt} d\nu$$

在窄频率扩展区域内光子的损耗速率:

$$\frac{dn_{\text{光子}}}{dt} = \frac{U(\nu_{21})}{h\nu_{21}} \cdot \frac{1}{t_{21}} \Delta\nu_{21}$$

损耗

每个模式的噪声能量:

$$\epsilon_N(\nu) = \bar{\epsilon}$$

热噪声功率:

$$P_N = kT\Delta\nu = \frac{\bar{V}^2}{R}; \quad V = \sqrt{bkTR\Delta\nu}$$

量子噪声功率:

$$P_Q = h\nu \Delta\nu$$

光雷达方程:

$$\frac{s}{N} = \frac{P_R}{P_N} = [h\nu \Delta\nu + P'_N]^{-1} \left\{ \left[P_T \frac{A_T}{A_B} e^{-\alpha T r_1} \right] \cdot \left[\frac{4\pi}{\Omega} \sigma_{\text{靶}} \frac{A_R}{A_B} \left(\alpha_{\text{光学传输}} \left(\alpha_{\text{光学接收}} \right) \eta' e^{-\alpha T r_2} \right) \right] \right\}$$

- 注: 1. P'_N 包括所有的噪声源——即光探测器的暗电流, 太阳、云, 背景、散射, 探测器, 饱和等等(所有在系统带宽范围内的)。
2. $(A_T/A_B)_{\text{最大}} = 1$, 即使 $A_T > A_R$
3. 假定 α_T 对透射和反射都有相同的值。

符号的定义

<p>a 根据束的定义等而定的常数。数字。</p> <p>A_{21} 爱因斯坦自发跃迁系数或激发态在单位时间内的跃迁几率。</p> <p>A_B 激光束在靶上的面积。单位: 米²。</p> <p>A_B' 返回接收器的光束的面积。单位: 米²。</p> <p>A_R 接收器光学系统的面积。单位: 米²。</p> <p>A_T 靶的面积, 单位: 米²。</p> <p>b 带宽等的特征数字。通常 $\cong 4$。</p> <p>B 受激跃迁几率。</p> <p>$B_{12}(\nu_{12})$ 爱因斯坦受激跃迁系数。单位: 米³/焦耳·秒²。 $= B_{21}(\nu_{12})$</p> <p>c 光速。单位: 厘米/秒或米/秒。</p> <p>d 透镜直径。单位: 米。</p> <p>D 发射线内的波型密度。单位: 数目/厘米³。</p> <p>$D(\nu)$ 单位频率间隔的波型密度。单位: 秒/厘米³。</p> <p>E 电场强度。单位: 伏/米。</p> <p>ϵ 能量。单位: 焦耳。</p> <p>$\bar{\epsilon}$ 每个模式的平均能量。单位: 焦耳/周/秒。</p> <p>$\epsilon_{\text{腔}}$ 共振器内的储能。单位: 焦耳。</p> <p>$\epsilon_N(\nu)$ 每个模的噪声能量。</p>	<p>g_1, g_2 简并能级 1.2 的权重因子。数字。</p> <p>G 增益。数字或以数字/米为单位。</p> <p>$G(\nu)$ 光谱增益。单位: 数字/周/秒或数字/周/秒/米。</p> <p>h 普朗克常数。单位: 焦耳·秒。</p> <p>h 1/2π。</p> <p>H 磁场强度。单位: 安匝/米或牛顿/韦伯。</p> <p>I 光束强度。单位: 光子数/米²·秒或瓦/米²。</p> <p>I_0 起始束强度。单位同上。</p> <p>$I(\nu)$ 光谱辐射光束强度。单位: 瓦/米²/周/秒。</p> <p>J 阈值电流密度。单位: 安培/平方厘米。</p> <p>k 波矢(=2π/λ)。单位: 1/米。</p> <p>l 长度。单位: 厘米。</p> <p>l_a 衰减常数或衰减长度。单位: 厘米。</p> <p>$l_{\text{腔}}$ 腔的长度。单位: 米。</p> <p>L 损耗。数字或以数字/米为单位。</p> <p>$L(\nu)$ 光谱损耗。单位: 数值/周/秒或数值/周/秒/米。</p> <p>m 轴向模数。</p> <p>n 电子数。</p>
---	--

$\Delta n = n_2 - n_1$ 净反转密度。以每立方米能态占有的电子数为单位。

n_i 在第 i 个能级内的电子数。 $i=1, 2, 3, \dots$

$n_{\text{光子}}$ 光子数。

n 介质的折射率。数字。

P 光子或声子的动量。单位：牛顿·秒或焦耳/秒。

p 辐射压强。单位：牛顿/米²。

P_N 噪声功率。 P_N' 包括和探测器的 $P_Q(h\nu \Delta\nu)$ 。单位：瓦。

P_Q 量子噪声功率。

P_R 接收信号功率。单位：瓦。

P_T 发射功率。单位：瓦。

r_1 激光输出地到靶的距离。单位：米。

r_2 从靶到接收器的距离。单位：米。

R 电阻。单位：欧姆。

R 腔端壁的反射常数（反射率）。数字（0至1）。

s 被接收的信号功率。单位：瓦。

S 能流或坡因亭向量。单位：瓦/米²。

t 时间常数。单位：秒（也是以秒表示的时间）。

t_{ij} 自发 从能级 i 至 j 的自发衰减时间常数。单位：秒。

t_{ij} 受激/有效 有效受激时间常数。单位：秒。（这是随场强变化的准时间常数。）

$t_{\text{腔}}$ 腔衰减时间。单位：秒。

$t_{\text{损耗}}$ 包括辐射光束所有能量损耗过程的特征衰减时间。单位：秒。

T 绝对温度。单位：°K。

T 腔反射镜的部分透射常数（透射率 0—1）。

U 辐射能量密度。单位：焦耳/米³。

$U(\nu)$ 光谱辐射能量密度。单位：焦耳/米³/

周/秒。

V 有效值噪声电压。单位：伏。

W 激活激光区域的宽度（沿电流流动方向）。单位：厘米。

α 吸收常数。单位：1/米。

$\alpha_{\text{腔}}$ 有效腔吸收常数。单位：1/米。

$\alpha_{\text{反射镜}}$ 近似分布的反射镜损耗。单位：1/厘米。

$\alpha_{\text{总数}}(\nu)$ 总吸收损耗常数。单位：1/厘米。

α_T 激光器外部的传输衰减常数。单位：1/米。

$\alpha_{\text{光学传输}}$ 光学系统的传输衰减。

$\alpha_{\text{光学接收}}$ 光学系统的接收衰减。

ϵ 介电常数。单位：法拉/米。

η 电子对光子的量子效率。分数（0—1）。

η' 考虑了探测器饱和和修正后的探测器效率（以及不良的滤光片和起偏振器的透射比）。分数（0—1）。

θ 偏离纵轴的角度。单位：弧度。

κ 玻尔兹曼常数。单位：焦耳/°K。

λ 波长。单位：米。

μ 导磁率。单位：亨/米。

ν 频率。单位：周/秒。

ν 以波数表示的频率。单位：1/厘米。

ν_0 共振频率。单位：周/秒。

$\Delta\nu$ 带宽。单位：周/秒。

ρ 去极化因子。数字。（ $\rho_{\text{空气}}=0.042$ ）。

σ 吸收截面。单位：厘米²。

$\sigma_{\text{靶}}$ 靶的反射系数。

ϕ 由透镜出发的光束发散度。整个角以弧度表示。

Ω 反射光束的立体角。以球面度表示。（等于任何准直感生反射增益倒数的 4π 倍）