

# 高质量高效率参量光的获得

李 港 唐晓军

(北京工业大学, 北京市激光技术实验室, 北京 100022)

**摘 要** 分析了泵浦光为光强在时空上不均匀和高度有限性分布的高斯光波时, 对光学参量发生过程的不利影响。提出了解决这种不利影响, 以获得高质量、高效率参量光的方案。

**关键词** 参量光发生。

## 1 引 言

一般情况下, 光学参量发生器的泵浦光为光强在时域和空域上均呈非均匀分布的高斯光波, 并且光学参量发生器要求泵浦光有较高的光强——等于或大于  $\text{GW}/\text{cm}^2$  量级。为达到这样高的光强, 采用超短激光脉冲作为泵浦光, 同时对泵浦光的光束直径进行压缩, 即泵浦光为时空上光强高度有限分布的高斯光波。这样一种泵浦光入射光学参量发生器后, 将会给参量过程带来不利的影响。本文分析了这种不利的影响, 提出了化这种不利因素为有利因素, 从而获得高光束质量、高转换效率参量光。

## 2 光强在时空上非均匀分布的影响

在时域上, 泵浦光强度呈高斯型分布, 数学表达式为

$$I_3(q, z) = I_3(z) \exp[-\ln 2(q^2/a^2)] \quad (1)$$

式中下脚标 3 表示泵浦光,  $a$  为波形因子, 表征光脉冲的宽度。  $q$  为光脉冲上的约化时间。

在非线性光学晶体中, 光强越强, 非线性相互作用也越强, 能量转换过程就越快。(1) 式描述的泵浦光入射光学参量发生器后, 光脉冲的中心部分光强强, 能量倒空得快, 参量光强度也增长得快; 光脉冲的边缘部分光强弱, 能量倒空得慢, 参量光的成长速度也慢。即泵浦光强度的非均匀分布, 引起了不同时间位置处参量光的成长速度不同。又由于参量过程的逆过程——和频过程的存在, 使得光脉冲的不同时间处的非线性过程不同(或者是参量过程, 或者是和频过程), 从而引起参量光在时域上的光强分布为多峰结构。参考文献[1]给出了时域上多峰结构的详细讨论。

在空域(光束横截面)上, 泵浦光强度也呈高斯型分布, 即

$$I_3(r, z) = I_{30}(z) \exp[-\ln 2(r^2/b^2)] \quad (2)$$

式中  $I_{30}(z)$  为径向  $r = 0$  处光强,  $b$  为分布因子, 表征高斯光波横向尺寸的大小。同样, 泵浦

光强在空域上的非均匀分布,引起了不同径向位置处的参量光的成长速度不同,加上参量与和频互为逆过程的作用,使得参量光在空域上的光强分布为一个个同心圆环,称为多环结构。参量光强度在时域上呈多峰结构,在空域上呈多环结构,其结果是使参量转换效率下降和光束质量变坏。

### 3 有限时空的影响

通常光参量发生器的泵浦光为超短光脉冲,光强分布在非常小的有限时域上,使得群速度失配的影响大大地增强。定义群速度失配因子为群速度倒数之差,即

$$v_j = (v_{gj})^{-1} - (v_{g3})^{-1}, \quad (j = 1, 2) \quad (3)$$

式中  $v_{g3}$  为泵浦光的群速度,  $v_{gj}$  为参量光的群速度,其中  $j = 1$  表示信号光,  $j = 2$  表示闲频光。由于参量晶体的色散特性,各光波的群速度不等,有  $v_1 \neq v_2 \neq 0$ 。 $v_j \neq 0$  的物理意义是表示参量光的光波包络与泵浦光的光波包络之间存在着相对运动,相对速度为  $v_j$ ,暗示着波包络间最终要在时间上分离,分离时的晶体长度称为非线性相互作用长度,定义为<sup>[1]</sup>

$$L_l = \tau_3(0) / |v|_{\max} \quad (4)$$

式中  $\tau_3(0)$  为泵浦光初始脉宽,  $|v|_{\max}$  为  $v_1$  和  $v_2$  中较大者。 $L_l$  越长,  $v_j$  的影响越小;  $L_l$  越短,  $v_j$  的影响越大。如果以 BBO 晶体作为光学参量发生器,计算结果表明:在可见光波段,若泵浦光脉宽大于  $10^{-11}$  s,非线性相互作用长度  $L_l$  大于晶体长度,群速度失配的影响很小,可不予考虑;若泵浦光脉宽小于  $10^{-12}$  s,非线性相互作用长度  $L_l$  小于晶体长度,群速度失配的影响必须考虑;若泵浦光脉宽在  $10^{-11}$  s 和  $10^{-12}$  s 之间,必须具体计算  $L_l$  值,以确定是否有必要考虑群速度失配的影响。

对于光参量发生器,通常要对泵浦光的直径进行压缩,以增大泵浦光的光强,即泵浦光的光强分布在非常小的有限空间上,使得离散角失配的影响大大地增强。定义离散角失配因子为离散角正切之差,即

$$\gamma_j = \text{tg } \alpha_3 - \text{tg } \alpha_j, \quad (j = 1, 2) \quad (5)$$

式中  $\alpha_3$  为泵浦光离散角,  $\alpha_j$  为参量光离散角。由于参量晶体的双折射特性,各光波的离散角不相等,有  $\gamma_1 \neq \gamma_2 \neq 0$ 。 $\gamma_j \neq 0$  的物理意义是表示参量光与泵浦光之间在空间上存在着相对运动,相对速度为  $\gamma_j$ 。非零值的  $\gamma_j$  暗示着参量光和泵浦光最终要在空间上分离,分离时的晶体长度称为相对孔径长度,定义为

$$L_a = d_3 / |\gamma|_{\max} \quad (6)$$

式中  $d_3$  为泵浦光直径,  $|\gamma|_{\max}$  为  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  中较大者。 $L_a$  越长,  $\gamma_j$  的影响越小;  $L_a$  越短,  $\gamma_j$  的影响越大。一般非线性光学晶体的离散角为  $1^\circ \sim 4^\circ$ ,  $\gamma_j$  的数量级为  $10^{-2}$ ,若泵浦光的直径为 0.1 mm,则相对孔径长度  $L_a$  的数量级为 10 mm。

综上所述,泵浦光强在时空上的高度有限性分布,使得群速度失配和离散角失配的影响被增加,参量光与泵浦光在时空上的分离速度被加快,晶体的有效相互作用距离被缩短,其最终结果是使参量转换效率下降和光束质量变坏。

### 4 高质量高效率参量光的获得

显然,如何避免参量光的多峰和多环结构,如何减小群速度失配和离散角失配的影响,

从而提高参量转换效率和光束质量, 是高斯波光学参量发生器中的一个重要问题。

实际上, 若巧妙地将群速度失配与多峰结构、离散角失配与多环结构协调起来, 在适当的条件下, 是能够解决上述二个问题, 获得高转换效率 and 好光束质量的参量光。

时域上, 描述瞬态光学参量发生过程的振幅耦合波方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial z} + v_1 \frac{\partial A_1}{\partial t} &= i\sigma_1 A_2^* A_3 \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} + v_2 \frac{\partial A_2}{\partial t} &= i\sigma_2 A_1^* A_3 \\ \frac{\partial A_3}{\partial z} &= i\sigma_3 A_1 A_2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中  $A_3$  为泵浦光复振幅,  $A_1$  和  $A_2$  分别为信号光和闲频光的复振幅, 耦合系数  $\sigma_j = \omega_j \chi_e / cn_j \cos^2 \alpha_j$ , ( $j = 1, 2, 3$ ),  $\chi_e$  为有效非线性极化系数,  $\omega_j$  为光波频率,  $n_j$  为光波折射率,  $\alpha_j$  为光波离散角。(7) 式中略去了复振幅对时间的二阶导数项, 且设满足相位匹配条件  $\Delta K = 0$ 。

不考虑群速度失配效应时,  $v_1 = v_2 = 0$ , 将(1)式代入(7)式进行数值解, 结果见图 1, 给出了多峰结构形成的过程。

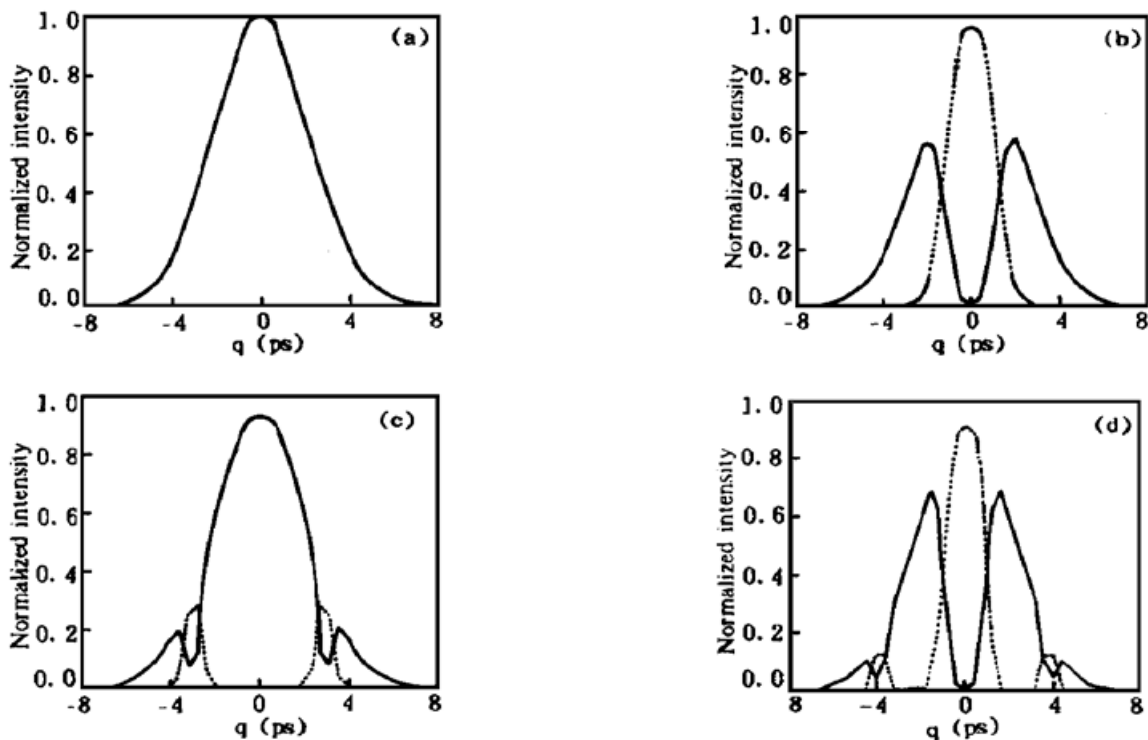


Fig. 1 The forming process of multi-pulse structure in time when the group-velocity mismatching is not considered with the parameters  $\lambda_3 = 354.7 \text{ nm}$ ,  $\lambda_1 = \lambda_2 = 709.4 \text{ nm}$ ,  $I_3(0) = 10 \text{ GW/cm}^2$ ,  $\tau_3(0) = 5 \text{ ps}$ , solid line: pumping light, dotted line: parametric light

考虑群速度失配效应时,  $v_1 \neq v_2 \neq 0$ , (7) 式的数值解见图 2。可见在适当的条件被满足以后, 利用群速度失配效应, 可以避免多峰结构, 获得高效率的单脉冲参量光输出。原因是光参量发生过程开始后, 泵浦光中心部分光强强, 非线性相互作用强, 光子消耗快, 形成了光强分布的中心极小值[见图 1(b)]。此时若不考虑群速度失配作用, 参量光停留在泵浦光的中心光强极小值区域内, 参量作用势必减弱。若考虑群速度失配作用, 参量光群速度与泵浦光群速度不一致, 参量光有可能从泵浦光强的中心极小值低谷中走出, 进入泵浦光边缘光强相对较强区域, 使得参量相互作用趋于高增益区, 泵浦光能量进一步向参量光转移, 参量转换

效率被提高。同时，由于参量光的强度一直在增长，没有逆过程——和频过程的出现，避免了多峰结构，能始终保持单脉冲状态，光束质量也变好了。因此，在适当的条件被满足后，群速度失配效应可以具有积极意义<sup>[2]</sup>。

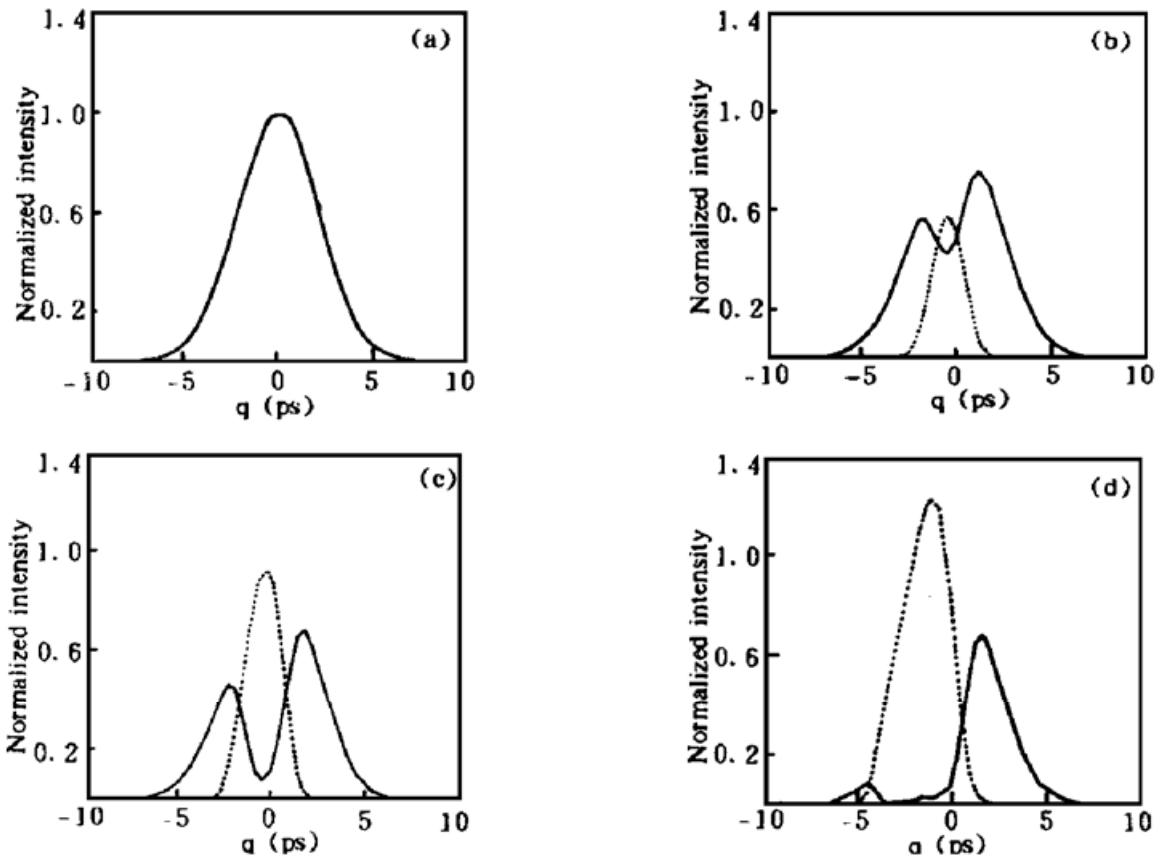


Fig. 2 The avoiding of multi-pulse structure in time when the group-velocity mismatching is considered with the parameters  $\lambda_3 = 354.7 \text{ nm}$ ,  $\lambda_1 = \lambda_2 = 709.4 \text{ nm}$ ,  $I_3(0) = 6.8 \text{ GW/cm}^2$ ,  $\tau_3(0) = 5 \text{ ps}$ , solid line: pumping light, dotted line: parametric light

在空域上，将离散角失配效应与多环结构相结合，就可以得到与时域上相同的效果。即利用参量光与泵浦光离散角的不同，使参量光一边成长，一边从泵浦光中心的光强极小值低谷中走出，与泵浦光强相对较强区域同步转移。由于参量光不断获得较大增益，不断得到加强，既避免了多环结构的出现，也获得了较高的转换效率。就是说，适当的条件被满足后，离散角失配效应也可以具有积极意义。

### 5 高质量、高效率参量光获得的条件

在上述讨论中，要利用群速度失配效应和离散角失配效应获得高质量高效率的参量光，必须使参量光的成长速度与参量光、泵浦光在时间上和空间上的分离速度一致，以保证参量光一直在泵浦光相对高增益区内成长，从而不断获得较大的增益，同时避免逆过程的发生。

参量光的成长速度与参量光、泵浦光在时间上和空间上的分离速度一致，实质上就是使最佳晶体长度、非线性相互作用长度，相对孔径长度三者一致。

最佳晶体长度定义为参量光中心部分第一次成长为极大值[图 1(b)中情况]时的晶体长度，代表了参量光的成长速度：最佳晶体长度长，参量光成长速度慢；最佳晶体长度短，参量光成长速度快。最佳晶体长度  $L_m$  的数学表示式为<sup>[3]</sup>：

$$L_m = \frac{B(\epsilon_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 n_1 n_2 n_3)^{0.5}}{4\pi^{1.5} \chi_e \sqrt{I_3(0)}} \quad (8)$$

式中系数  $B$  与参量晶体和泵浦光波长有关。参量晶体为 BBO 晶体时, 系数  $B$  与泵浦光波长  $\lambda_3$  间的关系曲线见图 3\*。

非线性相互作用长度  $L_l$  和相对孔径长度  $L_a$  分别是泵浦光、参量光在时间上和空间上分离的长度, 代表了分离的速度。 $L_l$  和  $L_a$  长, 泵浦光、参量光在时间上和空间上分离的速度慢; 反之,  $L_l$  和  $L_a$  短, 分离的速度快。

令(8)式分别与(4)式和(6)式相等, 可得到最佳晶体长度分别与非线性相互作用长度和相对孔径长度相等时的泵浦光强:

$$I_3(0) = \frac{B^2 \epsilon_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 n_1 n_2 n_3 |y|_{\max}^2}{16\pi^3 \chi_e^2 \tau_3^2(0)} \quad (9)$$

$$I_3(0) = \frac{B^2 \epsilon_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 n_1 n_2 n_3 |y|_{\max}^2}{16\pi^3 \chi_e^2 d_3^2} \quad (10)$$

令(4)式和(6)式相等, 可得非线性相互作用长度和相对孔径长度相等时的泵浦光束直径

$$d_3 = \tau_3(0) \frac{|y|_{\max}}{|y|_{\max}} \quad (11)$$

在实验上, 当参量晶体、泵浦光波长、参量光波长确定后, 相位匹配角及各光波的群速度和离散角就是定值。但是最佳晶体长度还与泵浦光强度有关, 非线性相互作用长度还与泵浦光脉宽有关, 相对孔径长度还与泵浦光直径有关。一般情况下, 先确定泵浦光脉宽, 再根据(11)式确定泵浦光直径, 使  $L_a$  与  $L_l$  相等。然后根据(9)式或(10)式, 确定泵浦光能量(即光强, 保持脉宽和光束直径不变), 使  $L_m$  与  $L_l$  或  $L_a$  相等, 最后取晶体长度  $L = L_m = L_l = L_a$ , 就可以得到理想的参量效果。

如参量晶体为 BBO 时, 设泵浦波长  $\lambda_3 = 354.7 \text{ nm}$ , 参量光波长  $\lambda_1 = \lambda_2 = 709.4 \text{ nm}$ (为计算简便, 取简并点), 则相位匹配角  $\theta \approx 33^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ , 有效非线性极化系数  $\chi_e = 2d_e = 3.32 \text{ pm/V}$ , 这里  $d_e$  为有效倍频极化系数。泵浦光群速度  $v_{g3} = 1.6886 \times 10^8 \text{ m/s}$ , 参量光群速度  $v_{g1} = v_{g2} = 1.768 \times 10^8 \text{ m/s}$ , 群速度失配因子  $v = 2.665 \times 10^{-10} \text{ s/m}$ , 泵浦光脉宽  $5 \text{ ps}$  时, 非线性相互作用长度  $L_l = 18.76 \text{ mm}$ 。参量光为 o 光, 离散角为 0, 泵浦光为 e 光, 离散角  $\alpha_3 = 4.2$ , 离散角失配因子  $\gamma = 0.07345$ , 由(11)式, 相对孔径长度与非线性相互作用长度相等时, 泵浦光束直径应为  $d_3 = 1.378 \text{ mm}$ 。系数  $B = 1.8 \times 10^9 (\text{V/s})^{0.5}$ , 由(9)式或(10)式得最佳晶体长度与相对孔径长度和非线性相互作用长度相等时的泵浦光强  $I_3(0) = 6.8 \text{ GW/cm}^2$ , 与此光强相对应的泵浦能量为  $E_3 = 0.51 \text{ mJ}$ 。图 2 就是将上述参数代入方程(7)后得到的。由图 2 可以看出参量光在与泵浦光分离的过程中, 不断地获得泵浦光的能量, 迅速成长起来。最后参量光的峰值强度超过初始泵浦光的峰值强度, 这是由于参量光的脉宽较窄, 能量相对集中的缘故。与之相比较, 在图 1 中, 随着光波在晶体中传播距离的增加, 参量光的脉冲个

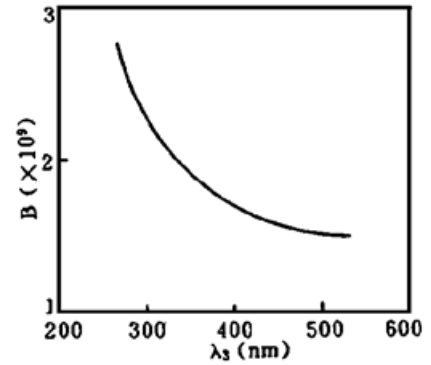


Fig. 3 Variation of  $B$  as a function of  $\lambda_3$

\* 将 BBO 晶体的有关参数代入参考文献[3]中的(26)式, 求出不同  $\lambda_3$  时参量光第一次成长为极大值时所对应的参数  $\xi$ , 令  $B = \xi$ , 可得图 3。

数将会越来越多。并且随着脉冲个数的增加,参量光中心脉冲峰值强度逐渐下降,原因是在能量转换的过程中,中心脉冲的能量逐渐转移到其他脉冲中去了。

**结 论** 对于光学参量发生器,泵浦光通常为光强非常高的高斯光波,即时空上光强分布的非均匀性和高度有限性是泵浦光的两大基本特征。这两大基本特征对参量效果起了不利的影响,引起了转换效率的下降和光束质量的变坏。解决的方法不是改变泵浦光的两大基本特征,而是因势利导,变不利因素为有利因素,从而获得高转换效率和好光束质量的参量光。

需要指出的是,本文提出的最佳晶体长度、非线性相互作用长度、相对孔径长度三者一致的方法,与以前文献中通用的减小晶体长度以避免光场时间和空间上分离的方法有着本质的不同:以前文献中的方法取晶体长度  $L < L_t$ ,  $L < L_a$ , 是以牺牲转换效率为前提条件,来消极避免群速度失配效应和离散角失配效应的影响;本文提出的方法取晶体长度  $L = L_m = L_t = L_a$ , 不是避免而是积极利用群速度失配效应和离散角失配效应,不但没有降低转换效率,反而提高了转换效率。两种方法的差别是显而易见的。

### 参 考 文 献

- [1] M. F. Becker, Y. C. Kim, S. R. Gautam *et al.*, Three-wave nonlinear optical interactions in dispersive media. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(1) : 113~ 123
- [2] V. Kabelka, A. Kutka, A. Piskarskas, Parametric generation of picosecond light pulses with an energy conversion greater than 50%. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1979, **9**(8) : 1022~ 1024
- [3] R. A. Baumgartner, R. L. Byer, Optical parametric Amplification. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1979, **QE-15**(6) : 432~ 444

## Approach to High Quality and High Efficiency Parametric Light

Li Kang      Tang Xiaojun

(Beijing Laboratory of Laser Technology, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

(Received 14 April 1996; revised 12 August 1996)

**Abstract** The unfavorable influences of nonuniformity and very little limits of pumping light intensity distribution in time and space are analysed for optical parametric generator of Gaussian wave. A scheme for solving the unfavorable influences and obtaining parametric light with high quality and high efficiency is proposed.

**Key words** parametric light generator.