

纳秒上升时间Q 开关高压脉冲发生器的设计^X

朱 军, 叶志生, 王升平, 高惠敏, 任国权

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要: 设计了一种基于 Marx Bank Generator 脉冲发生原理而设计的 ns 级上升沿调 Q 开关雪崩三极管高压脉冲发生器。它可以在 20 ns 以内的时间在 Nd: YAG 激光器的电光调 Q 晶体 (KD³P) 两端加上 104 波高压, 调 Q 时间由原来使用电子管时的 90 ns 缩短为 15 ns 以内, 从而使输出脉冲的峰值功率由 25 mW 增大至 93 mW, 脉宽由 16 ns 缩短为 8 ns。该调 Q 电路还具有体积小、功耗低、电磁辐射小、重复率高和工作寿命长等优点。

关键词: 调 Q; 高压脉冲; 纳秒上升沿; 雪崩三极管; 104 电压

中图分类号: TN 242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2008(2003)03-0256-05

Design of Q-switching High Voltage Pulse Generators with Nanosecond Rise Time

ZHU Jun, YE Zhi-sheng, WANG Sheng-ping, GAO Hui-min, REN Guo-quan

(College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A generator which can produce high voltage pulse with nanosecond rise time was designed. The generator is based on the use of avalanche transistor in a Marx Bank circuit. As a result, Q-switching speed increases from 90 ns to less than 20 ns, peak power of output pulse increases from 25 mW to 93 mW and pulse width decreases from 16 ns to 8 ns. The generator has many merits such as small bulk, low power consumption, low EMI, high repetition rate, long operating life etc.

Key words: Q-switching; high voltage pulse; nanosecond rise time; avalanche transistor; quarter-wave voltage

1 引言

在激光调 Q 技术的研究中如何提高 Q 开关速度一直受到关注。对于加压式电光调 Q 激光器, 当调 Q 尚未开始时, 谐振腔内的损耗最大即品质因数 Q 最小, 在这段时间内上能级的反转粒子数密度大量积累。当积累到最大值 N_{no} (饱和值) 时, 在电光晶体两端瞬间加载 104 电压, 使腔内损耗迅速降低, Q 值突增至最大, 这时激光振荡迅即建立, 腔内光子就以雪崩方式建立起极强的振荡, 在短时间内反转粒子数被大量消耗掉, 转化为光能量, 从而形成一个脉宽窄、高峰值功率的巨脉冲。

加快调 Q 速度、缩短 104 波电压的加压时间可

最小化调 Q 过程对谐振腔造成的损耗, 加快积累在上能级的初始反转粒子数 N_{no} 消耗速度, 提高腔内光子数密度的增长速度, 缩短调 Q 激光巨脉冲的形成时间。这样就能很有效地增大调 Q 脉冲的峰值功率并压缩脉宽。而使用电子管调 Q 电路调整速度只有约 90 ns, 输出脉冲峰值功率和脉宽仅为 25 mW 和 16 ns。

为了缩短激光脉冲宽度、提高峰值功率, 本文设计制做了一种以雪崩三极管为开关元件的高压脉冲发生电路。这种电路基于 Marx Bank Generator 脉冲发生原理并利用雪崩三极管的雪崩特性^[1]而设计。该电路用做 Nd: YAG 激光器的电光调 Q, 可使调 Q 时间由原来的 90 ns 缩短为 15 ns 以内, 从而使输出脉

X 收稿日期: 2002210210 修订日期: 2002211213

冲的峰值功率由 25 mW 增大至 93 mW, 脉宽由 16 ns 缩短为 8 ns。该调 Q 电路与电子管调 Q 电路相比, 具有体积小、功耗低、电磁辐射小、重复率高和工作寿命长等优点。

2 高压调 Q 电路

2.1 选择雪崩三极管

由于本电路基于 Marx Bank 电路原理, 每一级串路中只有 3~ 4 个雪崩三极管, 相对于将十几个雪崩三极管串联起来产生高压脉冲的电路^[2,3]更为简单, 同时降低了选取三极管击穿电压的难度以及雪崩击穿电压的精度要求。

选用具有较高击穿电压以及稳定工作特性的 2N 5551 型雪崩前三极管。由于每一个三极管的性能彼此有差异, 并不是都适用于雪崩电路, 而且高压调 Q 电路中其工作在击穿状态, 所以不能根据厂商提供的通常状态下的技术参数来选择。

利用图 1 所示电路测试雪崩三极管在击穿状态下的性能。依次检测 200 个 2N 5551 三极管。三极管两端电压保持在击穿区域, 并且使流经三极管的电流维持在 0.2 mA 以内(为使三极管不致于在电流过大的情况下烧毁, 而 0.2 mA 是实验测得的 2N 5551 发生击穿瞬间漏电流突然上升的拐点)。如此持续测试 24~ 36 h, 然后挑选出击穿电压在 275 ± 10 V 范围内, 且依然能正常工作的三极管。

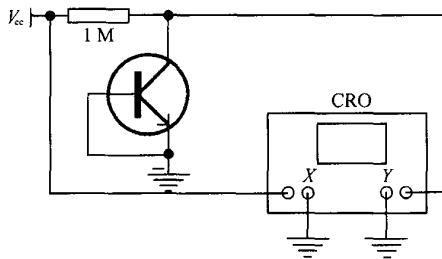


图 1 Burn-in 检测电路
Fig 1 Burn-in test circuit

2.2 雪崩电路

由于雪崩三极管的过压击穿电压在不同联接方式下有所差异。BV_{CES}、BV_{CEO} 和 BV_{CER} 分别为基射极短路、基极开路和基射极之间有电阻的 3 种情况下的击穿电压。一般 BV_{CES} 大于 BV_{CEO}, 而 BV_{CER} 在这 2 个值之间。因此本电路选用基射极短路的连接方式, 这样单级三极管的过压击穿电压是最大值。

图 2 所示为基于 Marx Bank Generator 原理设计的调 Q 高压脉冲发生电路。电路每一级由 3 个雪

崩三极管组成, 总共 6 级。实验发现, 触发信号的上升沿越快, 第 1 级的三极管击穿速度就越快, 所以此处触发脉冲(trigger pulse)通过 BC337、BC327 线性放大以及电容 C₀(10 nF)、R₀(1 k Ω) 微分之后, 上升沿由原来的 220 ns 改善为 30 ns。

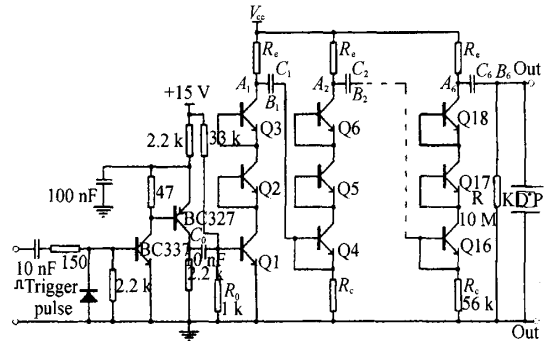


图 2 雪崩三极管高压脉冲发生电路原理图
Fig 2 Schematic diagram of avalanche transistor high voltage pulse generator circuit

电源通过 R_e 和 R_c 给电容 C₁ 充电至 820 V, C₂~C₆ 至 816 V。R_c(56 k Ω) 和 C₁(1 nF) 的大小决定着重复率, 直接影响着工作频率, 此处充电时间常数 $S = R_c C = 56$ ns, 频率 $f = 17.9$ kHz。

由于流经雪崩三极管以及 R_e 和 R_c 的漏电流非常小, 电容两端电压几乎完全加在三极管之上, 所以可以忽略 R_e 上的分压, 即认为 B₁~B₅ 处电位为 0, 并且认为雪崩中没有漏电流经过。由于 Q₁~Q₃ 上所加电压为 820 V 且所选三极管的击穿电压为 280 V, 因此触发信号来临之前 Q₁~Q₃ 不会提前击穿。Q₁ 导通之后, 其上压降被分配到 Q₂ 和 Q₃ 上, 使它们两端的电位差超过击穿电压而被击穿, A₁ 电位在 6 ns 内从 820 V 下降至 0 V。由于电容两端电位差不能突变的特性, B₁ 电位由 0 V 迅速降为 -820 V, 结果使得 A₂ 与 B₁ 之间的电压差迅速上升, 于是第 2 级三极管瞬间发生雪崩击穿。与前 2 级情况一致, 后面 4 级电路发生相同情况的雪崩击穿, 从而当输出端加载 KD³P 晶体时, B₆ 处产生下降沿 15 ns 左右的 -4400 V 左右的高压脉冲(图 3)。输出此高压脉冲发生器的等效电路如图 4 所示, 其中 K₁~K₆ 分别代表 1~6 级中的雪崩三极管。当没有发生雪崩时, K₁~K₆ 是断开的; 当触发信号来临时, 雪崩管发生击穿, 所有电键迅速闭合形成短路, 加载在 K₁~K₆ 两端的电压通过 C₁~C₆ 瞬间相加起来, 在 B₆ 输出高压负脉冲 V_{out} 为

$$BV_{out} = 6(V_{cc} - V_{rc}) - 5V_{re}$$

由于 V_{Rc} 非常小, 可以忽略不计, 所以

$$\beta V_{out} \approx 6(V_{cc} - V_{Rc})$$

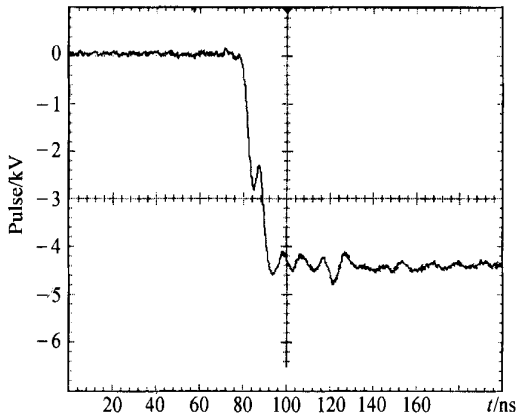


图3 B₆处脉冲波形图

Fig 3 Oscillogram of pulse at B₇(with KD³P)

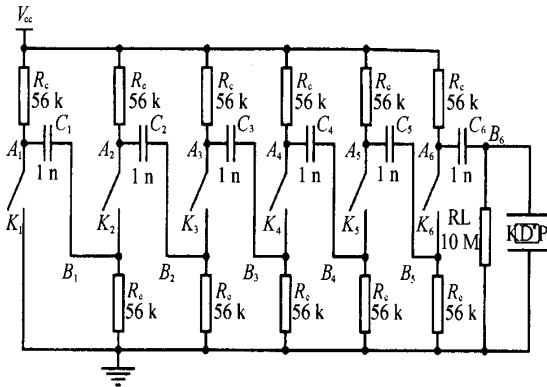


图4 调Q 高压脉冲发生电路等效原理图

Fig 4 Equivalent scheme of high voltage pulse generator circuit

高压脉冲平顶宽度由雪崩三极管的恢复时间即退饱和时间(200 ns)决定, 退饱和时间越长, 平顶宽度就越宽。200 ns 之后雪崩管从雪崩状态进入截止状态, $K_1 \sim K_6$ 的通路关断, 电源电压 V_{cc} 通过 R_c 重新给电容充电至最初电压值, 然后等待下一个触发信号的到来。

我们可以通过调整电源电压 V_{cc} 来满足 EOM 参数分散性对 10⁴ 波电压的要求。如果需要输出脉冲电压更高, 可以通过适当增加级数来满足需求。由于电路元件的寄生参数以及线路分布参数的影响, 高压脉冲的前沿时间由第 1 级 6 ns 延长到第 6 级输出端的 8 ns。

3 理论分析以及脉冲参数比较

3.1 理论分析

根据电光调Q 理论, 在 Q 开关打开后, 激光器的

腔内光子数密度 U 和工作物质反转粒子数密度 $\$n$ 随时间变化的波形如图 5 所示。

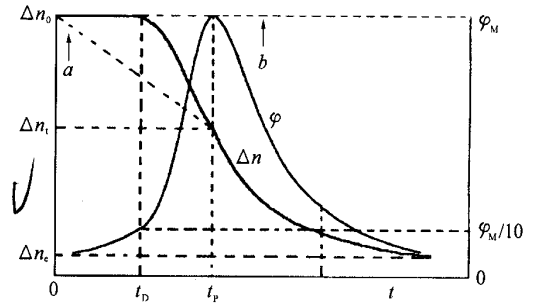


图5 调Q 巨脉冲产生过程

Fig 5 Establishment of Q-switched laser pulse

从图 5 可以看出, 当 $t = 0$ 时, Q 开关打开, U 开始不断增加, 但 U 增加到最大值 U_M 的 10% 仍需要较长的时间, 这段时间称为脉冲建立时间 t_0 。过了 t_0 之后, U 以雪崩方式迅速增长, 与此同时, $\$n$ 开始迅速减小。到时刻 t_p 时, U 达到 $0U_M$ 。此后, 激光输出逐渐减小, U 逐渐下降, 直到腔内光子数耗尽为止, 在此过程中输出一个激光巨脉冲。

在巨脉冲形成期间, 忽略泵浦激励和自发辐射的影响, 腔内损耗考虑输出镜的透射损耗和透射损耗之外的腔损耗, 则激光器的 U 和 $\$n$ 随时间变化的速率方程可表示为^[4]

$$\frac{d\$n}{dt} = - \$n R \nu U \tag{1}$$

$$\frac{dU}{dt} = \left(\$n R \nu \frac{1}{L} - \frac{1}{S_R} \right) U \tag{2}$$

式中, R 表示受激发射截面; l 为工作物质长度; L 为激光腔的光程长度; L 为谐振腔长度; S_R 为腔内光子数寿命; ν 为光子在工作物质中的传播速度。

将

$$S_R = t_r \left[\ln(10R) + L_A \right] \quad t_r = 2L \frac{c}{\nu} \quad c \nu = GL \nu = L + (G - 1)l, \quad \$n_c = \left[\ln(10R) + L_A \right] \frac{2Rl}{c} \tag{3}$$

带入方程(1)、(2)中, 积分可得:

$$\int_{U_0}^{U'} \frac{dU}{U} = \frac{\$n'}{\$n_0} \frac{1}{L} \int_{\$n_0}^{\$n'} \frac{d\$n}{\$n - 1} \tag{4}$$

$$U' - U_0 = \frac{1}{L} \left[\$n_0 - \$n' + \$n' \ln \frac{\$n'}{\$n_0} \right]$$

式中, U_0 和 $\$n_0$ 分别为初始光子数密度和初始反转粒子数密度; G 为激光工作物质折射率, $G = 1.823$; R 为谐振腔的反射损耗, $R = 4\%$; L_A 为除反射损耗外的腔损耗。

由(3)式得出 $\$n_c = 2.765 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。根据已知调Q 脉冲时间特性表^[5]中 t_r / S_R 与 $\$n_0 / \n_c 的关系, 由 t_r / S_R 可以查出对应的 $\$n_0 / \n_c 值。实验测得巨脉

冲半宽 t_f (半峰值功率对应的脉宽) 为 8 ns (如图 6 所示), $S_R = 2L \ddot{o}[(\ln 1 \ddot{o}R + L A)c] = 1.08 \times 10^{-9} \text{ s}$, 则 $t_f \ddot{o} S_R = 7.4$, 对应 $n_0 \ddot{o} n_t = 1.492$ 。由以上已知条件可知, $n_0 = 4.125 \times 10^{17} \ddot{o} \text{ cm}^{-3}$ 。

当(4)式 $n = n_t$ 时, U 达最大值 U_m 。将 n_0 和 n_t 代入(4)式中, 可得出 $U_m = 1.27 \times 10^{16} \ddot{o} \text{ cm}^{-3}$ 。

现计算脉冲建立时间 $t_b^{[15]}$ 。对(1)式积分后可写为

$$n(t) = n_i \exp(-RvU) \quad (5)$$

若把(5)式直接代入(2)式, 则无法求解这种超越函数。如用直线(如图 5 中的虚线 a)

$$n(t) = n_i - [(n_i - n_0) \ddot{o} t] \quad (6)$$

代替(5)式代入(2)式, 其中 t_p 为达到 U_m 的时刻。同时将(3)式改写为 $n_t = L \ddot{o} (S_R R c)$ 。则(2)式可表示为

$$dU \ddot{o} U = (r - 1)(1 - t \ddot{o} t_p) dt \ddot{o} S_R \quad (7)$$

对上式积分至光子数密度达到峰值时刻 t_p , 解出

$$t_p = 2 \ln(U_m \ddot{o} U) S_R \ddot{o} (r - 1) \quad (8)$$

其中 $r = n_0 \ddot{o} n_t = 1.492$ 。由于 $U_m \gg U$, 所以(8)式可简化为

$$t_p = 2 \ln(U_m) S_R \ddot{o} (r - 1) \quad (9)$$

将激光器的相关参数代入(9)式得 $t_p = 162.8 \text{ ns}$ 。

设另一条直线 $n = n_0$ (如图 5 中虚线 b), 则(7)式变为

$$dU \ddot{o} U = (r - 1) dt \ddot{o} S_R \quad (10)$$

其解为

$$t_p = \ln(U_m \ddot{o} U) S_R \ddot{o} (r - 1) \quad (11)$$

将已知激光器参数代入上式, 得 $t_p = 81.4 \text{ ns}$ 。

由于曲线(5)式在直线 a、b 之间, 所以可知 $81.4 \text{ ns} < t_p < 162.8 \text{ ns}$ 。在实验中已测得 $U_m \ddot{o} 10$ 到 U_m 的时间间隔为 8 ns, 所以由 t_p 值可得到 $81.4 \text{ ns} - 8 \text{ ns} < t_b < 162.8 \text{ ns} - 8 \text{ ns}$ 。即 t_b 在 73.4 ns 和 154.8 ns 之间。而根据实验观察到的 t_b 为 80 ns 左右, 可知实际测量值与理论计算值基本吻合。

在实验中发现 U_m 、 t_f 和 t_s (即 Q 值从最小值增大到最大值所用时间) 的特点有: 1) 已知 $t_b = 80 \text{ ns}$, 当 $t_s < t_b$ 时, U_m 、 t_f 不随 t_s 的变化而变化, 这种情况与理想的阶跃式 Q 开关结果相同, 这称为“快开关”。2) 当 $t_s > t_b$ 时, U_m 和 t_f 随着 t_s 的增大而分别变小和增长, 这称为“慢开关”。当用高压电子管调 Q 时, t_s 约为 100 ns, 大于 t_b , 所以导致激光脉冲的峰值功率 P 较低 (25 mW)、 t_f 较长 (16 ns)。而本文所介绍的雪崩电路用于调 Q 的开关时间只有不到 15 ns $> t_b$, 所以 P

可达 93 mW、 t_f 小于 8 ns。

经过以上计算和分析可以看出, t_s 与 t_b 之间的关系直接影响着输出激光巨脉冲 P 和 t_b 。对于本文所用脉冲激光器, 只有当 t_s 小于 t_b 时, P 和 t_f 才会有效的增高和缩短。而本实验所用高压脉冲发生电路的 $t_s < t_b$, 满足以上分析结果, 可以大大提高 P、缩短 t_b 。

3.2 两种调 Q 方式下激光脉冲参数的比较

在同一谐振腔结构内, 当氙灯泵浦电压均为 1400 V 时, 使用高压电子管调 Q 方式, 退压调 Q 速度长达 100 ns 左右, Nd:YAG 激光器调 Q 脉冲能量最大可达 400 mJ, 脉冲宽度 16 ns, 峰值功率约为 25 mW。而采用本文 ns 级上升沿高压脉冲发生电路, 加压调 Q 时间不到 15 ns, 调 Q 脉冲能量上升到 750 mJ, 脉宽缩短为 8 ns, 峰值功率提高到 93 mW。输出脉冲波形如图 6 所示。

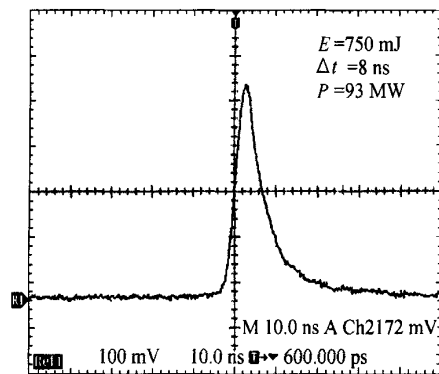


图 6 本文雪崩电路获得的 Nd:YAG 调 Q 脉冲

Fig 6 Q-switched laser pulse of Nd:YAG using high-voltage pulse generator circuit

3 讨论

为了减小调 Q 雪崩三极管高压脉冲发生器的寄生参数和分布参数, 必须在电路布局、线路走向和元件选用等方面严格要求, 所有雪崩管的击穿电压以及导通速度也必须相互匹配, 这就给选择三极管带来了一定的困难。另外, 由于采用加压调 Q 方式, 这就会在光路中增加 1 个 K04 波片, 给调整光路结构和提高消光比带来一定困难。但是, 与高压电子管、充氢闸流管和冷阴极触发管组成的调 Q 电路相比, 其本身具有调 Q 速度快、耐压高、体积小、功耗低、寿命长、电磁辐射小和重复率高等优点, 所以在工业和医用激光器的使用中具有很高的实用价值。

参 考 文 献:

[1] CHEN Zhongming. A mixed circuit of double Q-switch driver with avalanche transistor and tube [J]. *Transaction of Quantum and Electronics (量子电子学报)*, 1999, **16**(3): 2542256 (in Chinese)

[2] Isao Matsushima, et al Single pulse switchout system for a passively mode-locked Q-switched Nd: YAG laser [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1981, **52**(12): 186021864

[3] A K Dhamadhikari, et al Low cost fast switch using a stack of bipolar transistors as a pockel cell driver [J].

Rev. Sci. Instrum., 1996, **67**(12): 439924400

[4] WANG Qingpu. Laser physics [M]. Jinan: Shandong University Press, 1993 (in Chinese)

[5] ZHANG Guowei. Temporal characteristics of the gain-switched tunable solid-state laser theory [J]. *Laser Technology (激光技术)*, 1995, **19**(3): 1292134 (in Chinese)

作者简介:

朱 军 (1978-),男,硕士研究生,主要从事激光医学与应用的研究

(上接第 247 页)

[2] J S Liu, J S Wang, K Y Hsieh, et al Structural and optical properties of 0.98 m InGaAs/AlGaAsP strained-compensated multiple quantum well structures grown by gas-source molecular beam epitaxy [J]. *J. Crystal Growth*, 1999, **206**(122): 15

[3] M Hirotsu, T E Sale, J Woodhead, et al High power, high speed surface emitting LEDs with an InGaAs quantum well [J]. *J. Crystal Growth*, 1997, **170**(124): 3902393

[4] N E J Hunt, E F Schubert, R F Kopf, et al Increased fiber communications bandwidth from a resonant cavity light emitting diode emitting at $\lambda = 940$ nm [J]. *Appl Phys. Lett.*, 1993, **63**(19): 260022602

[5] M H Moloney, J Hegarty, L Buydens, et al Carrier life

times in strained InGaAs/AlGaAs multiple quantum wells [J]. *Appl Phys. Lett.*, 1993, **62**(25): 332723329

[6] C A Wang. New materials for diode laser pumping of solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 9422951

[7] F Bugge, U Zeiner, M Sato, et al MOVPE growth of highly strained InGaAs/AlGaAs quantum wells [J]. *J. Crystal Growth*, 1998, **183**(4): 5112518

Biology:

YU Yong-qin (1976-), Female, Ph.D. candidate. Her work focuses on the epitaxy of InGaAsP semiconductor materials by MOCVD and the relevant optoelectronic devices research, such as LD and LED