

The Sixth Overseas Chinese Physics Association

ACCELERATOR SCHOOL

Beijing, China, July 29 – August 7, 2010

Pulsed power supplies and modulators

脉冲电源和调制器

谷 鸣

中国科学院上海应用物理研究所

Shanghai Institute of Applied Physics, CAS

2010.8.1

Introduction

脉冲电源是一个应用很广的技术领域。在粒子加速器装置中的应用也已经有40多年的历史。脉冲电源在加速器装置中的功用主要有二个：

1. 束流偏转：激励脉冲磁铁，快速的偏转运动的带电粒子。实现束流的注入(injection)、引出(extraction)和剔除(dumping)等操作。应用于储存环、同步加速器（增强器）等。
2. 束流升能：驱动速调管（Klystron），产生高功率微波(RF)调制脉冲，激励加速管加速电子束流（升能）。主要应用于电子直线加速器。

脉冲电源和速调管整合也称速调管调制器（klystron-modulator）。

各种低功率的脉冲电源技术还用于加速器的束流测试、粒子源等。

脉冲电源类型

在加速器装置中，脉冲功率电源可以分为三种类型：

- **慢脉冲电源：**

脉冲切割磁铁（septa）电源和凸轨（bump）磁铁电源是微秒（ μs ）到毫秒(ms)量级的慢速设备。

数百到数千伏电压，数十到数千安培电流。

脉冲波形为半正弦波形或三角波。

- **快脉冲电源：**

冲击磁铁是快速的脉冲系统。脉冲波形通常为梯形波形，快速冲击磁铁通常需要数十到数百纳秒(ns)的上升时间和数十纳秒到微秒的脉冲宽度。也有更长脉宽的冲击磁铁。

- **脉冲调制器：**

脉冲调制器的主要特点更高的脉冲电压，几百千伏(kv)到兆伏(MV)，几百到几千安培电流。脉冲波形为梯形；脉冲前沿要求亚微秒，脉冲宽度（平顶）在几百纳秒到几微秒。重复频率从几赫兹到数百赫兹。

脉冲电源技术

- ◆ 功率转换：在一个较长的时间期间内将交流供电电源的能量累积在电容或电感中，然后在很短的时间内用开关以脉冲的形式释放出来，输出高功率的脉冲。加速器脉冲电源和调制器通常使用电容储能。
- ◆ 脉冲成形：脉冲电源的脉冲成形电路通常采用电容放电、电感电容谐振、脉冲形成网络（PFN: Pulse Forming Network）和脉冲形成线（PFL: Pulse Forming Line）。还有采用饱和磁芯电感来压缩成形脉冲，输出高功率脉冲。
- ◆ 脉冲开关：闸流管（Thyratron）、火花隙放电开关、晶闸管（Thyristor）和可关断晶闸管（GTO: Gate Turn-Off Thyristor），金属氧化物半导体场效应管（MOSFET: Metal Oxide Field Effect Transistor）和绝缘栅双极型功率管（IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor）等。

脉冲电源研发

- ◆ 加速器和物理实验希望又快又强的脉冲功率源系统。随着加速器装置性能要求的提高，对脉冲功率电源的要求也在逐步提高，运行寿命、可靠性、紧凑性、高精度波形、高重复频率以及高效率。
- ◆ 高功率脉冲电源发展的制约器件通常是开关器件，开关的性能限制了脉冲峰值功率和重复频率的提高。固态开关的性能提高，推动着新型的脉冲电源技术不断的发展进步。近10多年来，固态调制的脉冲电源技术发展迅速，固态开关大规模的并联和串联应用在高功率脉冲电源中，有效的提升了脉冲电源的性能。
- ◆ 伴随固态开关的应用，研究和开发了多种新型脉冲电源电路。在固态脉冲电源的研究中需要重点克服的技术问题有：电压电流均分、高压瞬态同步开关、寄生电感电容干扰等问题。

大功率脉冲开关

- ◆ 气体开关：以往的大功率脉冲电源的设计都是采用气体放电开关---闸流管（thyatron）、火花隙放电开关（spark）等。（60kV，10kA）

气体开关的缺点是：不能主动关断、有限的使用寿命、重复频率低和高损耗。

- ◆ 固态半导体开关 Solid-State Switches：

大功率半导体器件在开关速度、耐压和导通电流性能上的提高，使固态开关成了脉冲电源开关的主要选择。半导体开关的优点是可关断，使用寿命长，重复频率高。

固态开关与闸流管等气体开关相比的不足是耐压低，因此必须开发新型的电路拓扑，固态开关的选择与脉冲电路的电路拓扑结构有很大的关联，两者的合理组合才能达到高性能的目的。

半导体固态开关 Solid-State Switches

◆ 晶闸管（Thyristor）、可关断晶闸管（GTO）

耐压数千伏和脉冲电流可达1万安培以上；较低的开关速度成了其应用于快速脉冲电源的障碍。应用于脉冲切割磁铁电源和凸轨磁铁电源中作为开关部件。

◆ 金属氧化物半导体场效应管（MOSFET）

绝缘栅双极型功率管（IGBT）

MOSFET开关速度比IGBT快。IGBT-200ns，MOSFET-20ns。

IGBT的高压损耗较小、价格低，最高耐压可达6500V。

MOSFET的耐压低于2000V，脉冲电流小。

通常MOSFET用在必须要高速开关的场合。由于MOSFET比IGBT更容易串并联叠加集成，有时也在低速电路中使用。

脉冲电路---RC放电成形

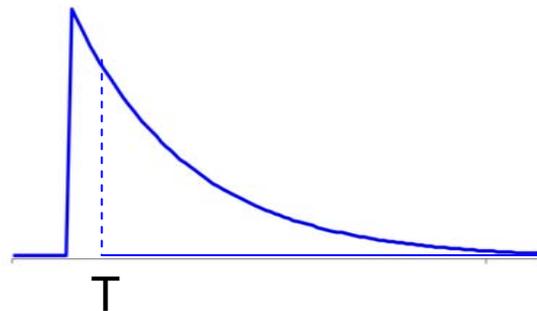
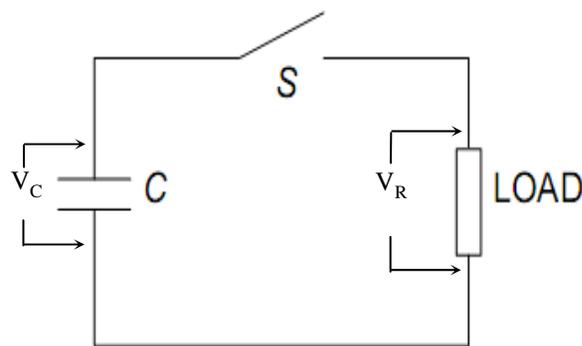
当充有电压 V_C 的电容器被开关接通到电阻 R 上时，电阻上的电压波形为：

$$V_R = V_C \cdot e^{-t/\tau}$$

其中， $\tau=RC$ 脉冲指数后沿的时间常数。

阻容放电电路的特点是与开关门控信号同步的将电容能量直接加载到负载上，电阻上的电压（电流）脉冲有很快的前沿，但是脉冲幅度随之降落，没有平顶。

为了获得（准）方波脉冲波形，必须适时的关断开关，而且电容中的储能必须比输出脉冲能量大1到2个量级，这样使的开关关断时形成脉冲的顶降才能较小。也就是说，时间参数 $\tau=RC$ 要远大于脉冲宽度 T 。



$$V_R = V_C \cdot e^{-t/\tau}$$

RC放电电路拓扑 (topologies)

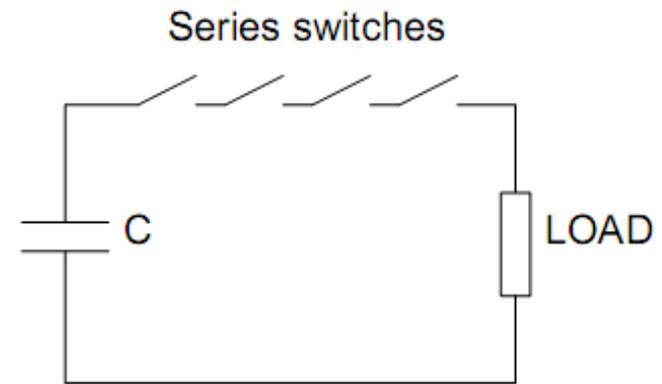
基本的RC电路很难有单个固态开关满足实际高压的需求。需要应用多个固态开关的来实现高压开关的目的。

开关直接串联: 提高耐压

MOSFEL和IGBT由于它们正的的温度系数，使它们相对容易的并联集成。但是串联就比较难了，需要有综合的监测和同步电路来保证电压在开关上均匀的动态分配，防止损坏。

另外，还必须有保护电路防止开关的连锁损坏，应对过流时的紧急关断。

串联开关电路看似简单，但是复杂的动态电压平衡电路常导致开关的响应时间增大。另外，电容充电到需要的高压，还要昂贵的高压直流充电电源。



直接串联开关电路
拓扑

RC放电电路拓扑

回避直接使用高压开关的一个解决方案是变压器耦合升压，多初级驱动。

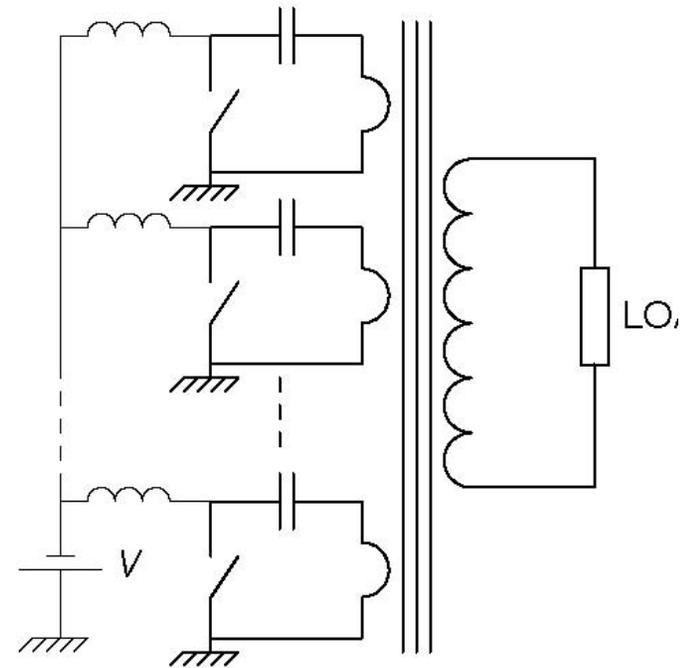
- 输出电压取决于变压器的变比；
- 输出功率（电流）是各初级驱动功率的迭加，均分开关电流。
- 初级线圈的分别驱动和控制，保证了更好的电流均衡。

优点：

- ✓ 合理的低压直流电源；
- ✓ 开关激励驱动与输出绝缘；
- ✓ 脉冲极性可正可负；
- ✓ 开关驱动简单，因为都相对地电位。

缺点：

- 磁芯需要退磁，占空比不能大于10%。
- 脉冲宽度受磁芯的伏秒性能限制，
（磁芯体积的限制。）
- 脉冲上升时间受变压器漏磁限制。
- 需要良好的同步驱动从而避免开关过载。
- 变压器损耗 约5%。



脉冲变压器升压电路
拓扑

RC放电电路拓扑

为了减少变压器体积可以将多个变压器级联串接。

输出电压是各单元电压的迭加；电流取决于单元的驱动电流。

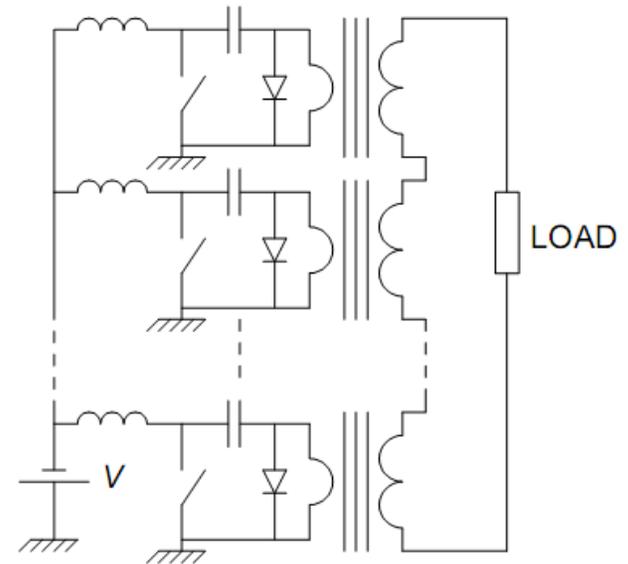
特点是添加了二极管并联在初级、所以开关管的同步开关就不很关键了、每个开关管可以独立的开通或关断，因此输出电压可以由开关管开通数量调整。与前面的多初级电路相比，变压器变比小，漏感小。

优点：

- ✓ 合理的低压直流电源；激励驱动与输出绝缘；
- ✓ 脉冲极性可正可负；开关驱动简单。
- ✓ 很好的电流分配；
- ✓ 不必要求严格同步所有开关。
- ✓ 靠增减开关管开通数量选择不同的输出电压；

缺点：

- 变压器需要退磁，最大占空比不能大于10%。
- 脉冲宽度受磁芯的伏秒性能限制，
(磁芯体积的限制。)
- 脉冲上升时间受变压器漏磁限制。
- 变压器损耗 约5%。
- 与单个变压器比较，集成要复杂。



串联变压器串接级联 12
电路拓扑

RC放电电路拓扑

加法器电路：没有变压器隔离在电容和负载之间，具有很快的前沿时间，脉冲宽度不受变压器限制。难度是开关电路的浮动特征，每个基本单元相对地电位有很高的 dV/dt ，电容和开关电路必须承受浮动冲击。触发电路通常使用变压器隔离、光缆隔离或无线感应触发。

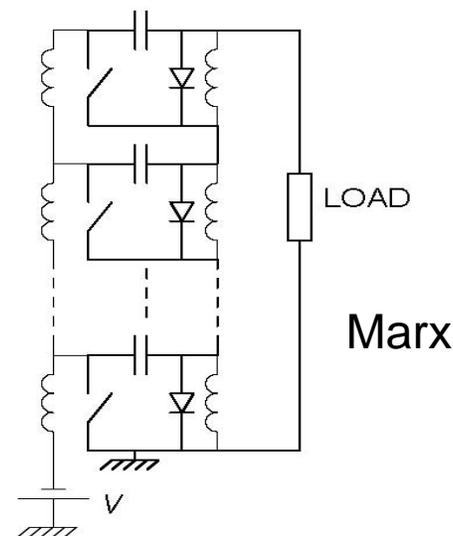
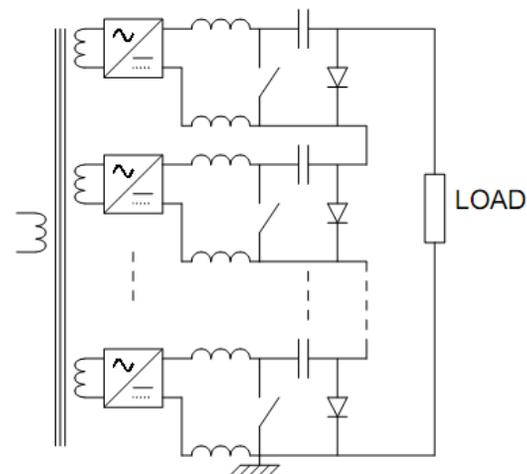
输出功率：输出电压迭加，电流由单元驱动电流决定。

优点：

- ✓ 合理的低压直流电源；优良的电流分配
- ✓ 不需要良好的开关同步；
- ✓ 可改变输出电压，有调整开关管开通数量调整。
- ✓ 没有变压器退磁电路；高占空比
- ✓ 不限制脉冲宽度，非常快的上升时间，低损耗；

缺点：

- 输出不隔离，只能是负脉冲；
- 相对复杂的浮动开关驱动电路。
- 杂散电容的影响大



加法器电路拓扑 13

脉冲电路---RLC谐振放电电路

RLC电路可以用下面的微分方程描写:

$$V_R'' + \frac{R}{L} V_R' + \frac{1}{LC} V_R = 0$$

RLC电路在不同的负载电阻值条件下有不同的响应。

1. 当 $R=0$ 时, 电路将产生自由振荡, 振荡频率和振荡电流为:

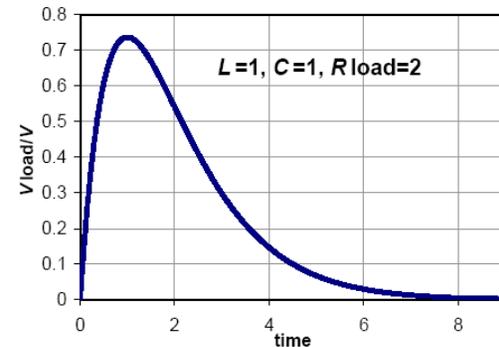
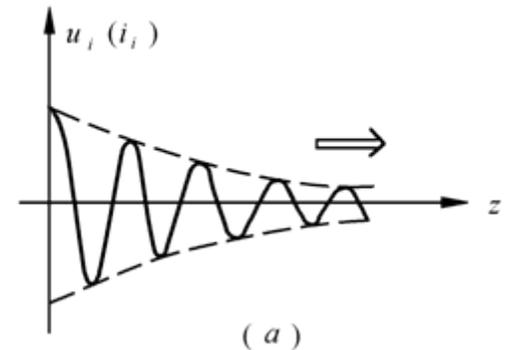
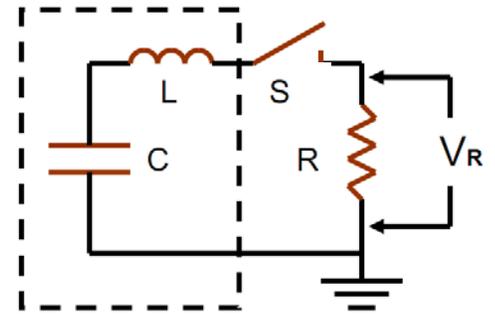
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad I_L = \frac{V_C * C}{\sqrt{LC}} \sin \frac{t}{\sqrt{LC}}$$

2. $0 < R < 2(L/C)^{1/2}$; 阻尼振荡; (图a)

3. $R = 2(L/C)^{1/2}$; 临界阻尼振荡; (图b)

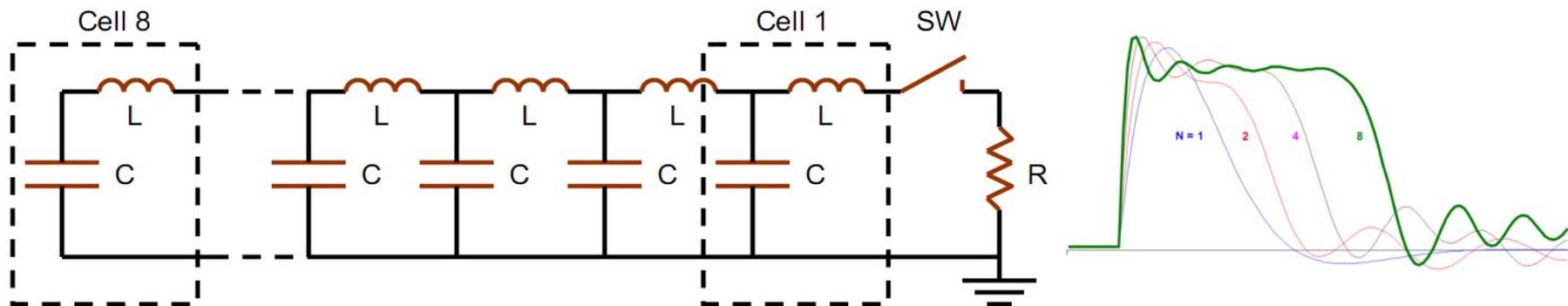
$$V_R = \frac{2V_C}{\sqrt{LC}} t \cdot e^{-tR/2L}$$

4. $R > 2(L/C)^{1/2}$, 电路过阻尼, 脉冲后沿很长。



脉冲电路—— PFN脉冲形成电路

将多个LC电路单元串接就构成了脉冲形成网络（PFN: pulse formatting network）



PFN的成形波形如图所示，串接的LC单元数越多，脉冲波形越宽，前沿越快，越接近于矩形波形。在调制器的PFN电路应用中总是要使PFN阻抗设计为近似等于负载阻抗。

这种PFN形成波形的过冲和振荡总是存在的，实际应用中可以通过调整部分单元的L或C的值可以对波形做一些补偿抵消。

设PFN单元级数为n，总电容 C_0 ，总电感 L_0 ，输出脉冲宽度T（半高宽），PFN的特征阻抗为 Z_0 ，电容上的初始充电电压 V_C 。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad T = 2\sqrt{L_0 C_0} \quad C_0 = nC \quad L_0 = nL \quad V_R = V_C \frac{R}{Z_0 + R}$$

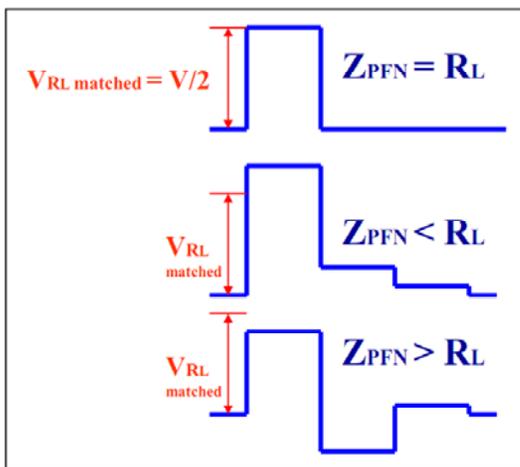
脉冲电路--- PFL脉冲形成 (Pulse Forming Line)

传输线电缆也是一个分布电容，它也能代替电容器储能。电缆充电储能后，被开关释放到匹配的负载上时产生一个恒定电压的脉冲（方波）。

为了使电缆的储存能量完全转移到负载，负载阻抗 Z_L 必须与电缆的特征阻抗 Z_C 一样。这样，在负载上产生充电电压一半的方波脉冲，脉冲宽度是传输线时间的2倍。

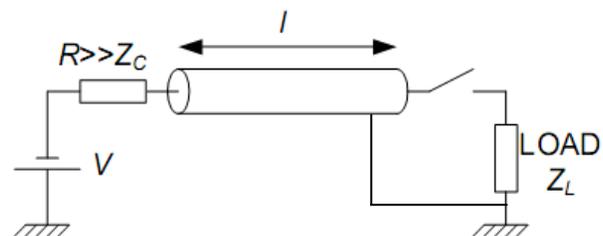
当阻抗匹配有差别时，脉冲幅度和波形会出现不同的变化：

电阻匹配：

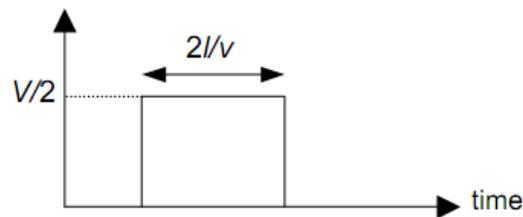


正失配：

负失配：



Output voltage



传输线脉冲形成电路1

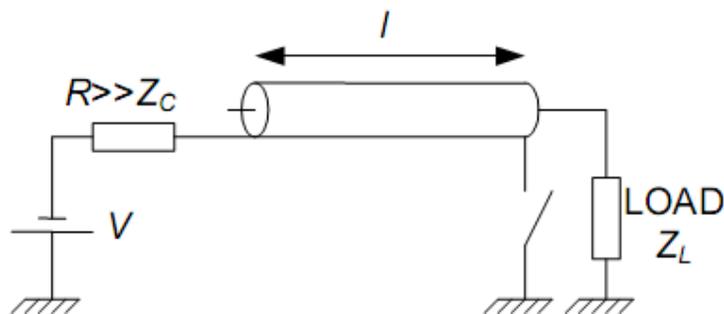
传输线时间： $t_1 = L \epsilon^{1/2} / c = 1.5L/c$

ϵ : 电缆介质的介电常数(通常取2.28)

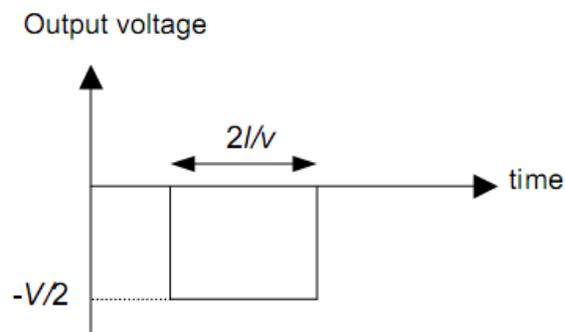
L : 电缆长度。 C :光速

脉冲电路--- PFL脉冲电路

上面电路结构的一个缺点就是放电开关必须接在电缆芯线和负载之间，浮在高压上。下面的电路结构将开关对地连接，但是输出的是负脉冲。



传输线脉冲形成电路2

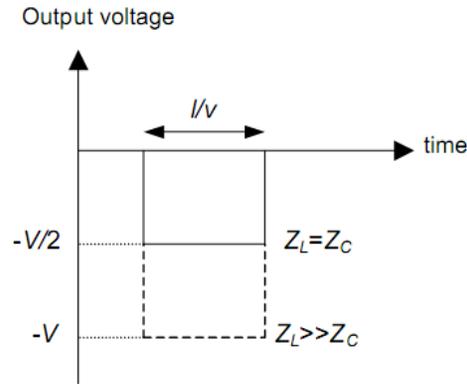
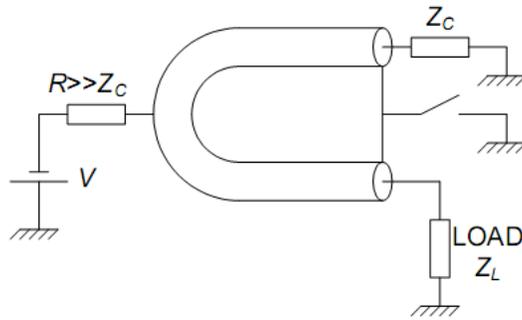


这种结构虽然简单，开关接地，但是也有缺点，就是同轴电缆的外导体是浮动电压的。

脉冲电路--- PFL脉冲电路

自匹配电缆放电电路

传输线放电的不便（缺点）是负载必须与电缆的特征阻抗一致。这个条件在某些应用场合和负载上并不是总能满足的。自匹配电缆结构克服了这个不便（缺点）。用一个附加的电缆匹配阻抗 Z_c 吸收所有的不匹配负载反射回来的能量。缺点是损耗大，至少50%的电缆储能被附加的匹配电阻消耗了。



该电路拓扑的也有同轴电缆外导体电压浮动的缺点。而且电缆两端和终端电阻的电感要非常小才能获得快的上升时间。开关不仅要释放电缆电容的储能而且还要释放电缆外导体对地电容的储能。如果搭建的好的话，这种电路能够产生非常好的波形。

脉冲电路--- Blumlein 传输线放电

传输线脉冲发生器的不便之处是高压运行。匹配输出脉冲电压只有充电电压的一半。

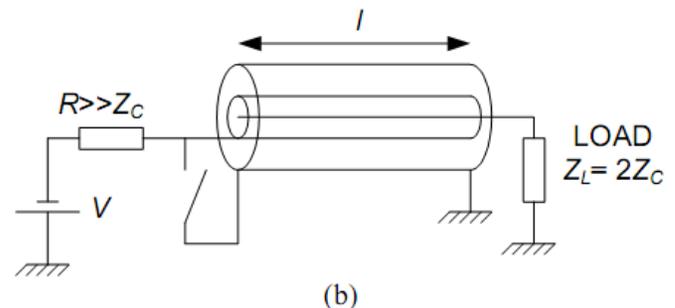
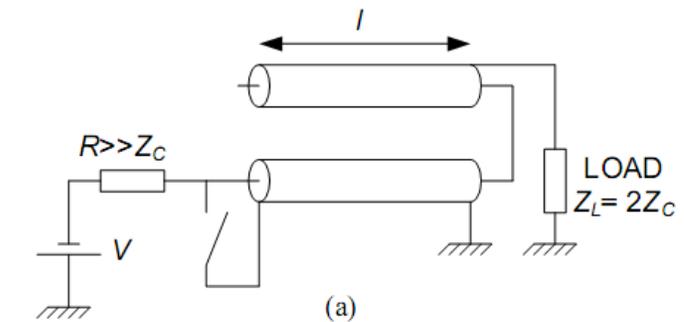
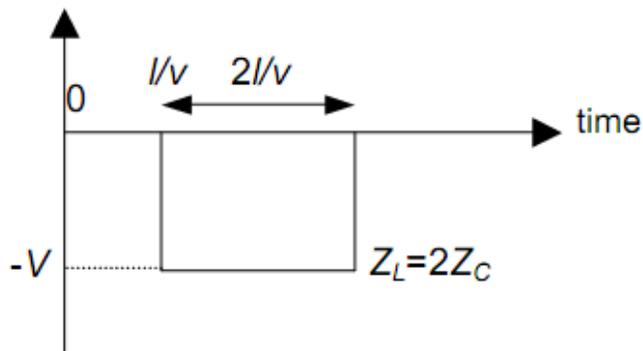
Blumlein传输线电缆结构解决了这些问题。电路由两对（或多对）传输线电缆组成。快速短路开关引起电压在一半电缆内反转。输出脉冲电压与直流充电电压相同。脉冲宽度是传输线时间的2倍。输出脉冲的前沿延迟了一根传输线的时间。

两种基本的Blumlein电路结构：

一种是两根独立的传输线电缆

一种是双屏蔽层同轴传输线电缆

Output voltage



脉冲电路——磁脉冲压缩

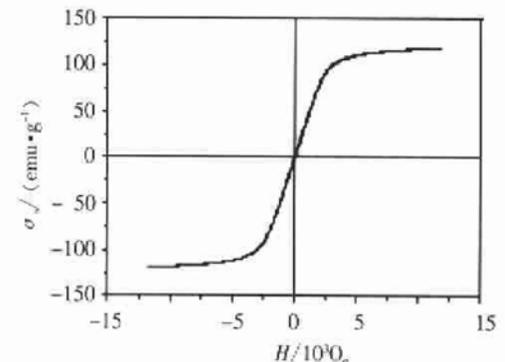
饱和磁芯电感 —— 脉冲压缩成形的器件。

电感器的电感量与磁芯的相对磁导率成正比。通常磁芯的相对磁导率可以在10000以上。当磁芯饱和时，磁芯的相对磁导率降为1，电感量急剧下降，对脉冲电流的阻抗急剧降低。

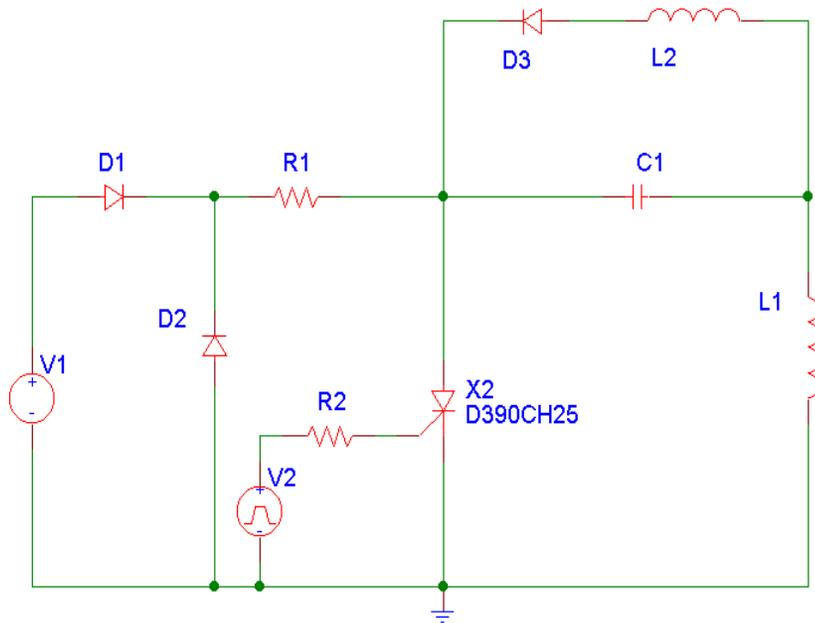
- 磁芯饱和的速度在纳秒量级，其导通功率几乎没有限制。这是由于它自身极强的自然特性。
- 在饱和状态，磁芯电感的阻抗是空心电感的阻抗；在非饱和状态，它的阻抗大于导通阻抗10000倍以上。

饱和磁芯电感不是一个门开关，它需要与开关搭配使用才能达到高速开关的目的。饱和磁芯电感和固态开关串联使用从而锐化压缩脉冲波形；在磁压缩设计中获得数百GW(gigawatt)量级的脉冲功率。

饱和磁芯开关只能制作固定宽度脉冲发生器。通常也用于锐化脉冲前沿和后沿。

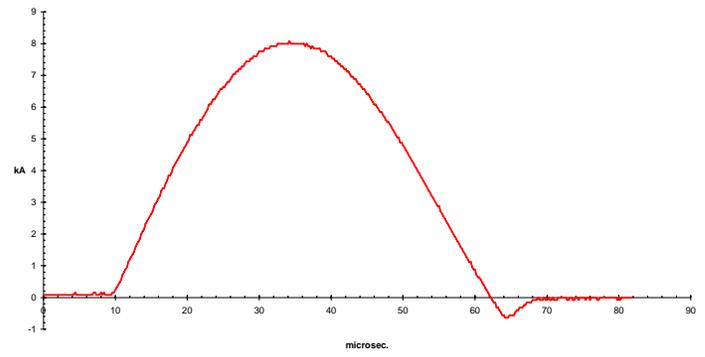


半正弦脉冲电源 (septum切割磁铁脉冲电源)



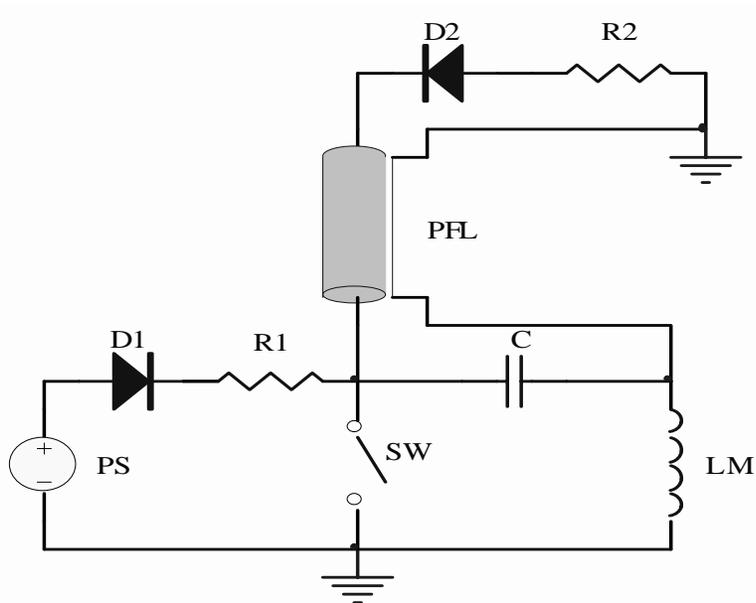
60us 半正弦

峰值: 2kV 10kA

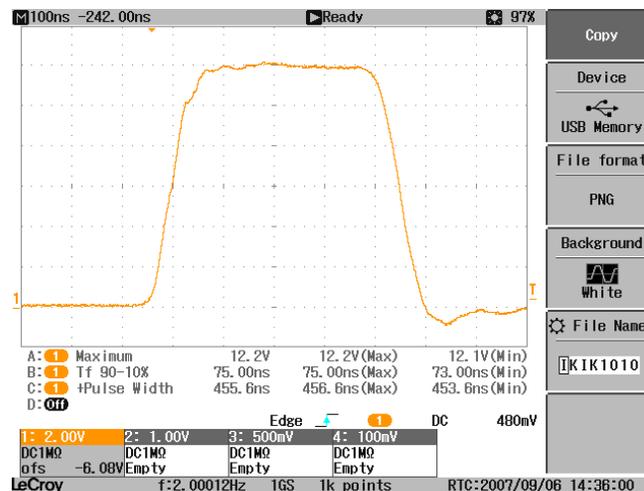


晶闸管开关

kicker冲击磁铁脉冲电源 (PFL脉冲形成)



开关SW	闸流管CX1154
PFL电缆	2并60米高压同轴电缆
磁铁电感 L_M	2.2 μ H
脉冲平顶	250ns
匹配电阻R2	25 Ω
PFL充电电压	13KV
脉冲电流	600A



110MW脉冲调制器(Thyrastron、PFN)

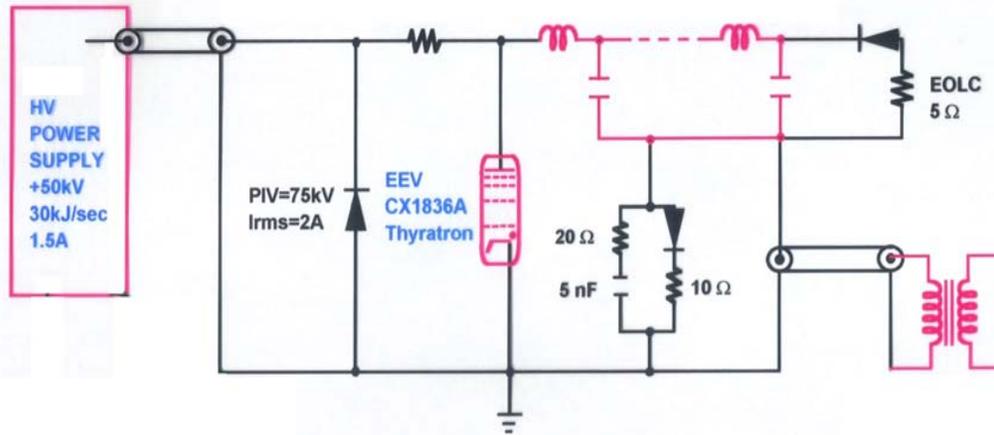


Figure 2. The PFN and switch cabinet

Peak output power	110 MW
Output pulse current	350A
Output pulse voltage	314 kV
Voltage flat top duration	$> 1.5 \mu s (< \pm 0.25\%)$
Pulse repetition rate	1 Hz - 50 Hz
Pulse voltage repeatability	$< \pm 0.1\%$
Klystron (2856MHz)	TH2128C (45MW)

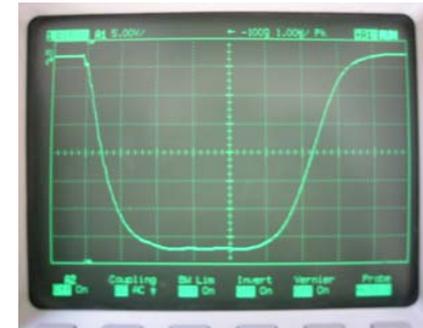
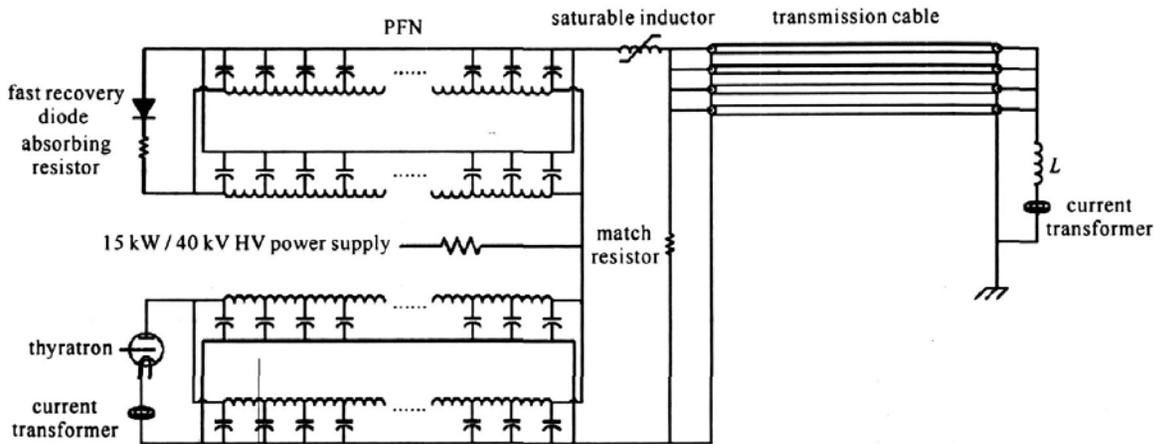


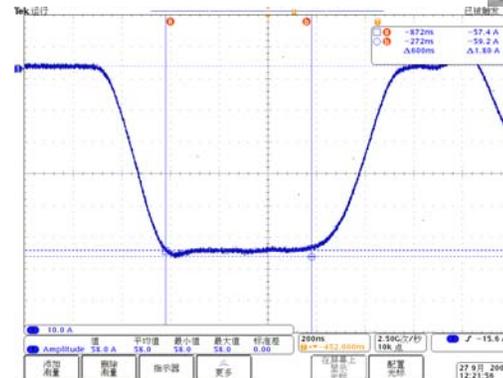
Fig 5 Waveform of the output pulse

采用PFN网络的Blumlein型冲击磁铁脉冲电源

(CSNS RCS引出kicker)

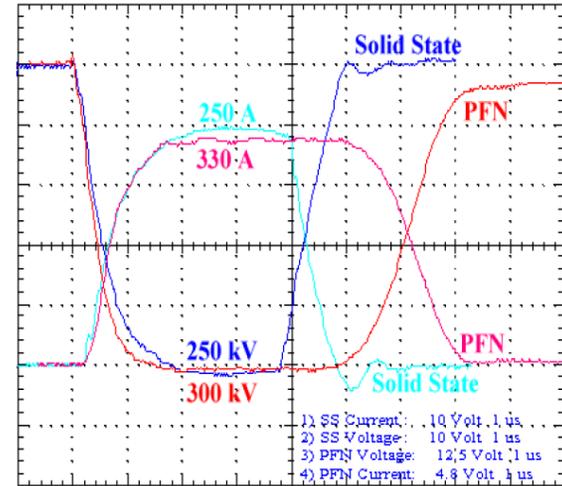
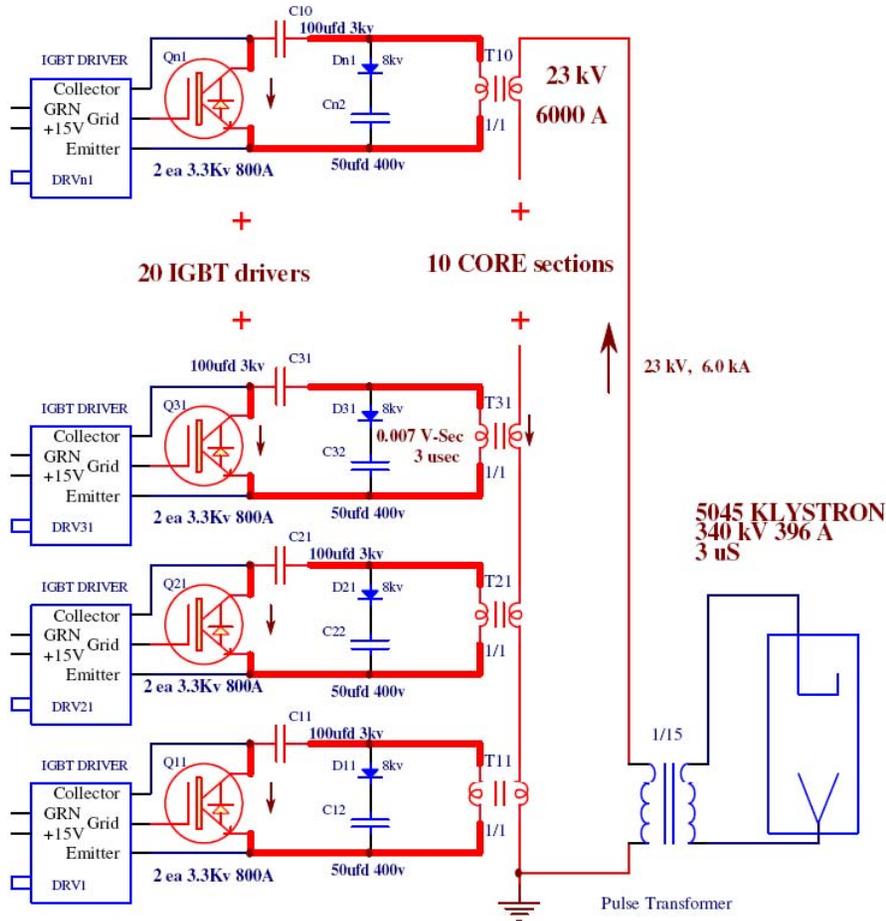


充电电压 (kV)	40
励磁电流幅值 (kA)	5.84
上升时间 (ns) (2%-97%)	< 250
平顶宽度 (ns)	> 600
电流脉冲平顶度 (%)	< ± 2
引出频率 (Hz)	25



感应叠加固态调制器电路 (SLAC)

Inductive Adder modulator



the Pulse Step Modulator (PSM)

A Prototype Modulator for The European XFEL

This technology allows the regulation of the pulse voltage during the pulses and by this achieving a good flatness.

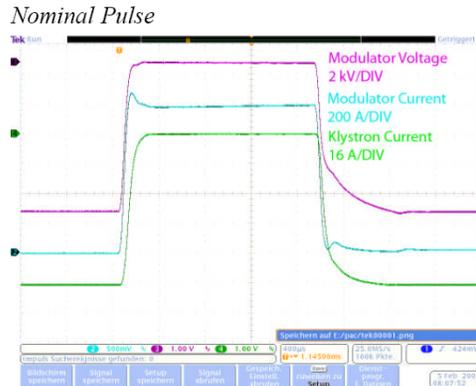
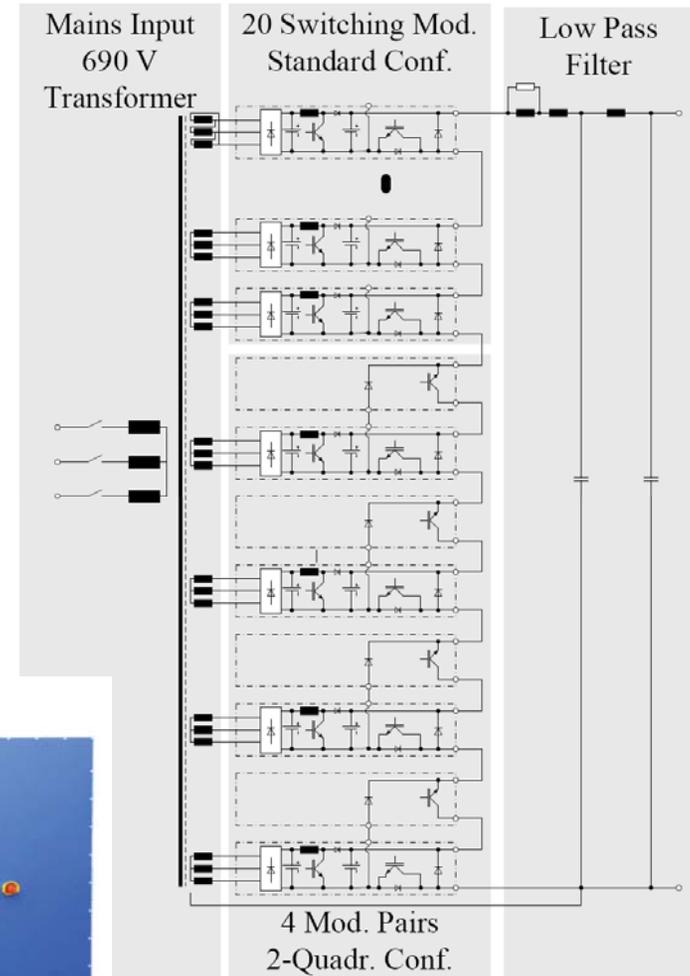
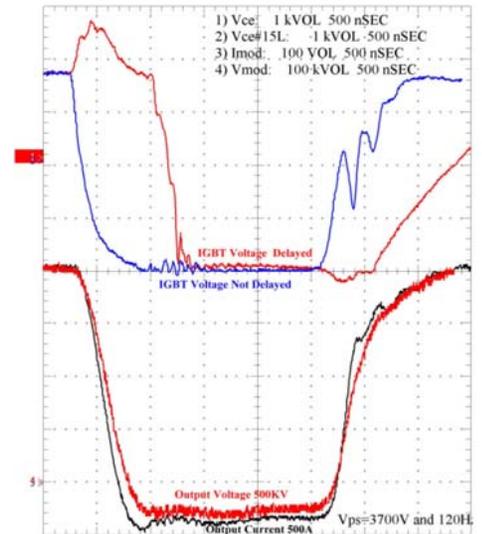
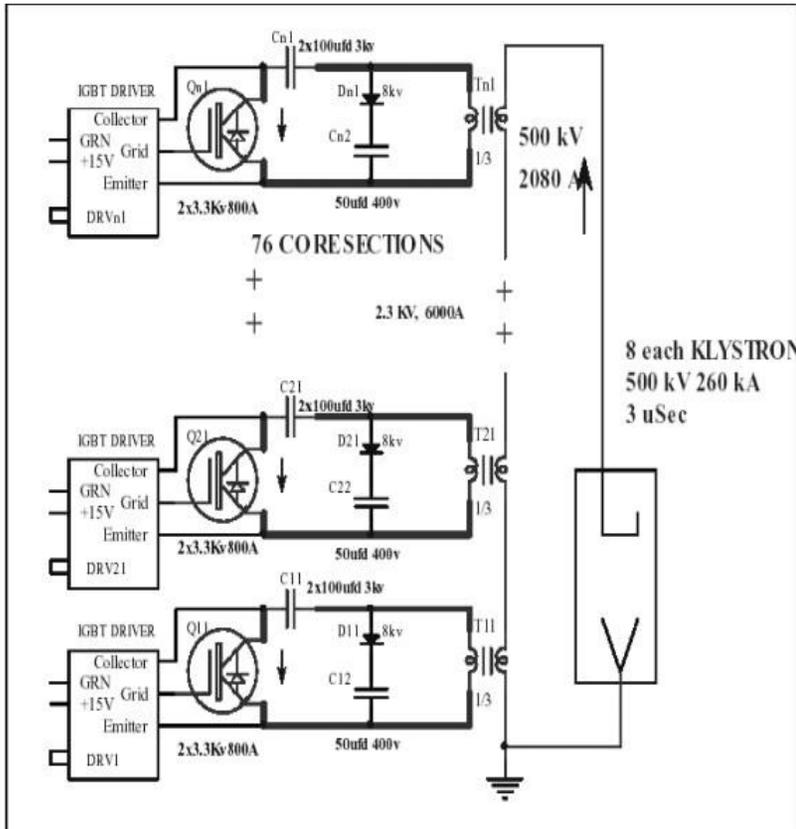


Figure 6: Pulse 10.5 kV / 1000 A

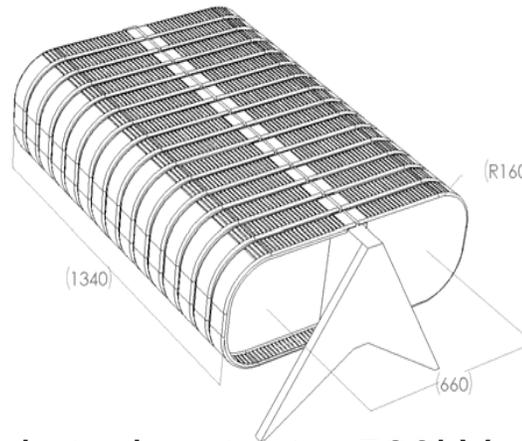
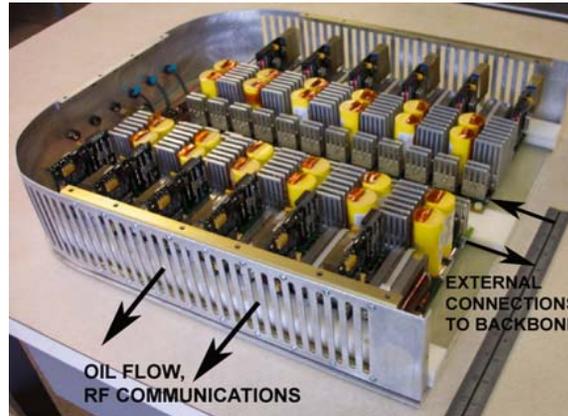
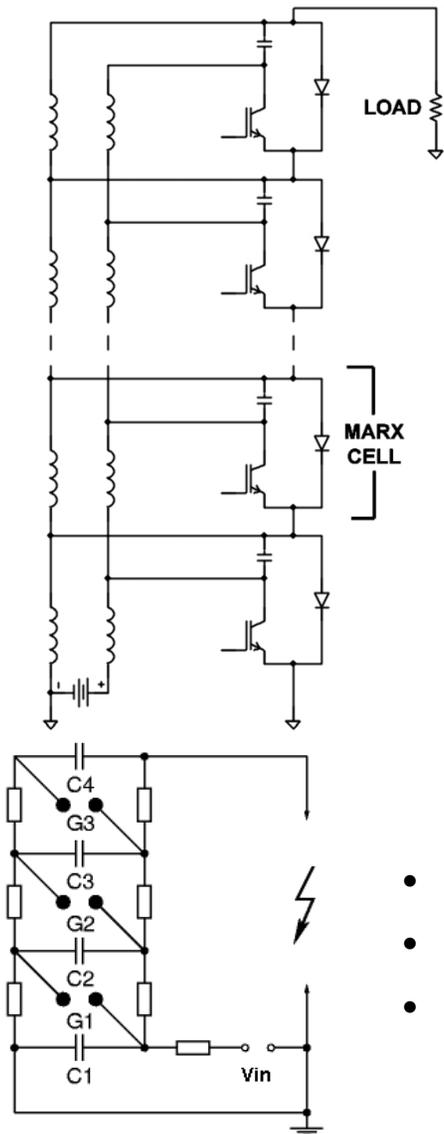


NLC DFM1 Hybrid Modulator (SLAC)

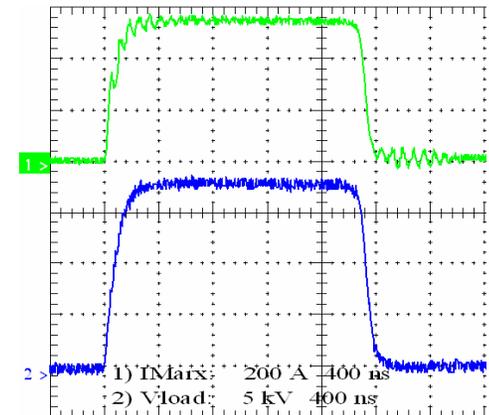
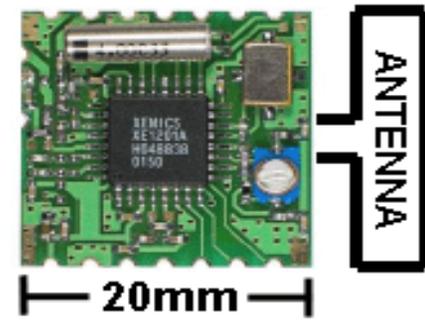


Water Load
500kV 500A

SLAC 500kV NLC Marx Concept



- Total stack output = 500kV, 550A
- 30 Marx blocks total, 18kV per block
- Commercial 2.4Ghz RF chipsets
 - no wires or fiber-optic cables



结束语

基于固态开关技术的高压脉冲电源还在快速发展，除了功率和电压的提升以外，更多的研究工作还要开展。

- 效率、可靠性、寿命；
- 固态半导体开关的优化应用；
- 高精度、高稳定度脉冲波形；
- 新型电路拓扑；
- 数字控制技术。



The Sixth Overseas Chinese Physics Association
ACCELERATOR SCHOOL
Beijing, China, July 29 - August 7, 2010

Thanks !