

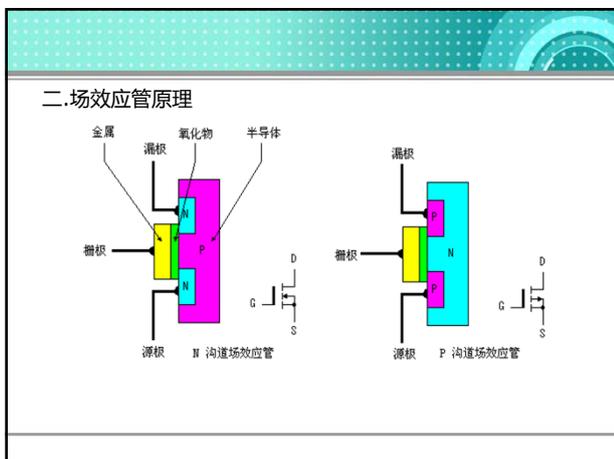
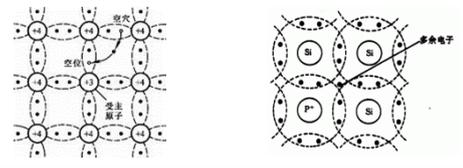
**特斯拉线圈原理——谐振**

特斯拉线圈工作时，电源向工作电容提供能量，当打火器电压升高到空气的击穿电压时，打火器处空气击穿导通，初级谐振电容C1与初级线圈L1形成的LC回路发生振荡，其振荡频率与次级LC回路的固有频率相同，初级回路与次级回路发生谐振，从而将能量传给次级回路，次级回路线圈匝数远大于初级线圈匝数，使得球形放电端电压高于空气击穿电压，从而向空气放电。

**供电系统——ZVS模块**

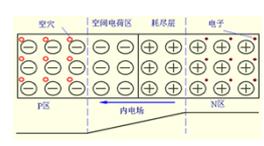
**一. 半导体材料**

1. 本征半导体、p型半导体和n型半导体  
不含杂质且无晶格缺陷的半导体称为本征半导体。
2. P型半导体：在纯净的硅晶体中掺入三价元素（如硼），使之取代晶格中硅原子的位置，就形成了P型半导体。P型半导体中，空穴的浓度大于自由电子的浓度，称为多数载流子，因此P型半导体中主要以空穴导电。
3. N型半导体：在纯净的硅晶体中掺入五价元素（如磷），使之取代晶格中硅原子的位置形成N型半导体。N型半导体中，多数载流子为自由电子。

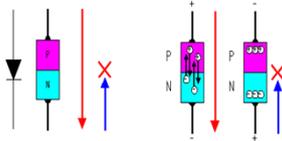


为介绍场效应管原理，先来介绍一个只包含一个PN结的二极管的工作原理。

如图，内电场由N区指向P区，两区的载流子扩散到空间电荷区中和，内电场由此形成，阻止载流子进一步扩散。当外电场为N指向P时，外电场与内电场同向时，加强了阻止载流子扩散的电场，空间电荷区加宽，阻止电流通过；当外电场为P指向N时，外电场与内电场反向，空间电荷区变窄，使载流子可以通过。



因此，二极管导通，首先需要有一个导通电压来打开二极管，之后才允许电流通过。具体来说，当外电压从P指向N时，二极管导通。



如图，由之前对PN结的分析，当栅极G上没有电压时，D与S是不能导通的。当栅极G上施加一个高电压时，在图中绿色金属氧化层处会形成一个电场，将两侧N区中的电子吸到P区，这样在漏极和源极之间形成了一个含有电子的导电沟道，从而使源极和漏极导通。

**总结：场效应管的作用为，通过一个外加电压来使半导体导通。**

### 三.Zero Voltage Switch——零电压开关

当电源电压作用于V+，电流开始同时通过两侧的初级并施加到MOS的漏极（D）上。电压会同时出现在MOS的门极（G）上并开始将MOS开启。因为没有任何两个元件是完全一样的，一个MOS比另一个开的快一些，更多的电流将流过这个MOS。通过导通侧初级绕组的电流将另一侧MOS的门极电压拉低并开始关闭它。图中电容和初级的电感发生LC谐振并使电压按正弦规律变化。

- ❖ 简言之，zvs电路中的两个场效应管就是两个开关，这两个开关在LC回路振荡时，不断地开关，使得电源能够不断地向LC回路补充能量，维持LC回路处在一个稳定的振荡状态。
- ❖ 注意到zvs的输入是直流的，因此这其实也是一个振荡发生电路。在我们的特斯拉线圈供电系统中，zvs模块负责将学生电源输入的直流转换为高频的正弦交流电，然后我们使用电视机中的高压包对其进行升压处理，使其能够对电容组充入足够高的能量。

高压包  
内含半导体堆（全桥电路等）滤波整流，输出为高压直流。

10000V  
0.015A

高压包铁磁芯  
芯：对高频灵敏

供电系统结构示意图



### 谐振电路的开关——打火机

- ❖ 打火机是一个开关，由两个电极组成，当电容阵列充电到电压达上万伏特时，打火机两电极之间电场电离空气使空气导通，这时打火机两电极之间的空气为等离子体，电阻很小，可以视为导线。这样初级振荡线圈被接入电路，从而与初级谐振电容形成LC振荡。
- ❖ 打火机导通时，短时间内通过了来自电容器的大量电荷，形成一股强大的电流。这里空气温度非常高，其效果类似雷电，发出强光和声音。
- ❖ 打火机产生的电火花中含有各种频率的光，甚至含有紫外线和X射线。我们在实验室中调试线圈时发现，打火器火花产生的高频电磁波使得PVC材料中的某种化学物质发出了绿色荧光。



### 初级谐振电路——暴力的LC

- ❖ 使用电容器串联形成耐压为12000V的电容组，使用2mm×3mm的粗铜导线来承受强大的振荡电流。

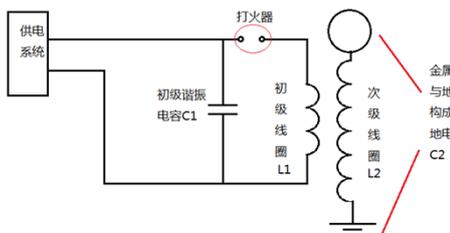
$$C_1 = 0.06 \mu F, L_1 = 2.6 \mu H$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 400000 Hz$$

$$Q = Q_0 \sin(\omega t) = Q_0 \sin(2\pi f t)$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = 2\pi f Q_0 \cos(2\pi f t)$$

$$I_{max} = 2\pi f Q_0 = 2\pi f U_0 C_1 = 1500 A$$





### 次级谐振电路——放电

❖ 初级谐振线圈与次级谐振线圈互感，由于两个谐振电路的频率是一样的，因此能够发生谐振。不过，次级线圈虽然能够产生很高的电压，由于它与初级线圈耦合很低，所能收集的能量很小以下计算尚未考虑漏磁，可见次级线圈上电流很小。

$$C_2 = 12 \text{ pF}, L_2 = 13000 \text{ } \mu\text{H}$$

$$f = 400000 \text{ Hz}$$

$$L_1 \frac{dI_1}{dt} / S_1 = L_2 \frac{dI_2}{dt} / S_2,$$

$$I_2 = \frac{S_2}{S_1} \frac{L_1}{L_2} I_1 = 0.06 \text{ A}$$



注意，引弧的锤子做了接地处理，胶木的锤柄耐压和绝缘都良好。

- ❖ 高频电流具有趋肤效应，因而很多人认为特斯拉线圈的电弧是安全的。
- ❖ 特斯拉线圈电流振荡频率为40kHz，如果是对铜管将具有明显的趋肤效应。
- ❖ 人体组织的电导较小，且具体大小随组织不同而不同。人体的等效电导与人的身体健康程度、身体含水量等因素相关。考虑人的体液与海水类似，人的电导率在数量级上与海水相同。由下面的计算可以看出，人体实际上没有显著的趋肤效应。

$$\sigma = 5(\Omega\text{m})^{-1},$$

$$d_s = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\mu_0\sigma}} \approx 1\text{m}$$

- ❖ 在我们的实验中，因为电源功率很小（<150W），且谐振线圈耦合很低，线圈效率不高，电流很小，因此来说是比较安全的。对于大型特斯拉线圈，必须有良好的接地及屏蔽措施，操作时人员必须远离线圈才能保证安全。
- ❖ 人体允许通过的安全电流非常小，小于30mA（漏电保护电压）。在我们的线圈设计中，给电容阵列中每个电容器都并联了一个10兆欧姆的电阻用于对工作后的电容器放电。如果不放电的话，电容阵列的能量是非常大的，其能量足以致命。
- ❖ 安全电量为30mA·s=0.03C，且电流过大时（例如1A），不需要达到这个电量就会引起心室颤动。
- ❖ 电容阵列两端电压U=10000V，人体电阻2000~20000Ω，如果被电容器点击，电流是足以致命的。故需要放电处理。



- ❖ 特斯拉线圈演示了空气在高电压下发生电离进而导通的现象。自然界中最为常见的大气放电现象有闪电、极光和区别于对流层闪电现象的中高层大气放电现象。
- ❖ 我们初步探究了雷电的形成机理及分析了几种防雷措施。



- ❖ 雷电能量巨大，破坏力惊人。但是通常人们对雷电的认识还不够充分。一种常见的误区是，被雷电击中才会有危险。许多人不能理解为什么在雷击事故中往往在几十平方米的房间内的人们都受到了雷击。
- ❖ 事实上，雷电的破坏范围和破坏方式非常多。观念中的金属尖端+地线=防雷的简单组合，实际上完全不能够预防雷击事故。

### 雷电的破坏方式

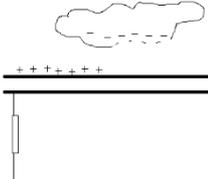
- ❖ 雷电的热效应
- ❖ 雷电引起的空气冲击波
- ❖ 雷电流电动力破坏作用
- ❖ 静电感应雷
- ❖ 电磁感应的破坏作用
- ❖ 其他

### ❖ 直击雷

- 顾名思义，直接击中物体。我国工程计算取平均电流大小60KA。雷电流通过时间平均为 $20\mu s \sim 50\mu s$ ，其破坏力惊人。同时由于空气来不及散热，雷电经过区域将发生空气的突然膨胀，形成冲击波。被雷电击中的建筑，一方面会在巨大电流下发热烧毁，另一方面会受到空气冲击波的冲击。
- 在空旷地带的高耸物体容易被直接击中。
- 如果小明站在方尖碑旁边，他应当不大可能被雷电直接命中，但是他真的就安全了吗？
- 事实上，直击雷造成的事故相对而言是很少的。雷电破坏力强大的一个重要原因是，一次雷击会在相当大的区域里产生足够的破坏力。

### 感应雷

- 与直击雷相对，不是直接命中目标的雷电称为感应雷。那么这个“雷”既然不是直接从云端放电电流过来的，是哪里来的？
- 静电感应雷
  - 雷云携带大量电荷，与地面电势差很大。由于实际生活中没有完美的绝缘体，电荷会从大地流向架空的导线和建筑物并积累下来。
  - 去一个简单的近似，将雷云和地面看成平行板电容器，板间距即为雷云高度  $h=1000\text{m}$ ，雷云带电量  $Q=I \Delta t=60000 \times 20\mu\text{s}=1.2\text{C}$ ，雷云面积  $S=1\text{km}^2$ ，等效电容为  $C = \frac{\epsilon_0 S}{h} = 8.85 \times 10^{-9} \text{F}$



- $U=Q/C=10^8\text{V}$ 
  - $U/h=10^5\text{V/m}$
  - 低压架空线电线为高度5m，则上面的电压有  $u=500\text{kV}$
  - 这个估算当然非常粗糙，没有考虑雷云内部低层和高层电荷电性的不同。考虑到雷雨云厚度可达几千米，而云层高度一般只有  $1\sim 5\text{km}$ ，以上估算还是具有一定合理性的。
  - 根据网络上的电工资料，低压架空线上的感应电压大概在  $100\text{kV}$ 。
- 可见，静电感应产生的电压很高。设想一个储存化学药品的仓库，其金属房顶接地不良，则房顶与地面之间将会有上百千伏的高压。如果在某个间隙发生火花放电，后果不堪设想。
- 这种静电感应效应对各种电力系统的潜在危害是非常大的。

### 电磁感应雷

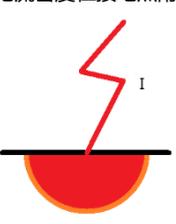
- 闪电发生时，极短时间内天空向大地流过巨大电流。根据电磁感应定律，这将在周围产生巨大的感应电动势。这个电动势作用于导体将形成感应电流，破坏电子设备。对于距离闪电中心很近的地方，电动势可能大到足以击穿空气引起火花放电。
- 取一次中等强度的雷击的电流峰值为  $I=100\text{kA}$ ， $10\mu\text{s}$  达到峰值，在半径为  $200\text{m}$  处，产生的磁场的磁感应强度为  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} = 10^{-4} \text{T}$

- 考虑一间房间的金属框架构成的回路，设其尺寸为  $5\text{m} \times 5\text{m}$ ，则上面的电动势为  $E=S(B/\Delta t)=250\text{V}$
- 这相当于把交流市电直接通到导体回路上。这当然很危险。

### 地电位的变化

- 案例：5月23日16时多，重庆市开县义和多兴业村小学7名小学生因雷击死亡，雷击同时还造成30多名小学生受伤，其中重伤5人。
- 雷击时，电流随建筑物流入大地。电流密度在接地点附近向四周流去，形成电压梯度。

$$dU = I \frac{\rho}{2\pi^2} dr$$

$$U_{ab} = \int_a^b dU = \int_a^b I \frac{\rho}{2\pi^2} dr = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)$$


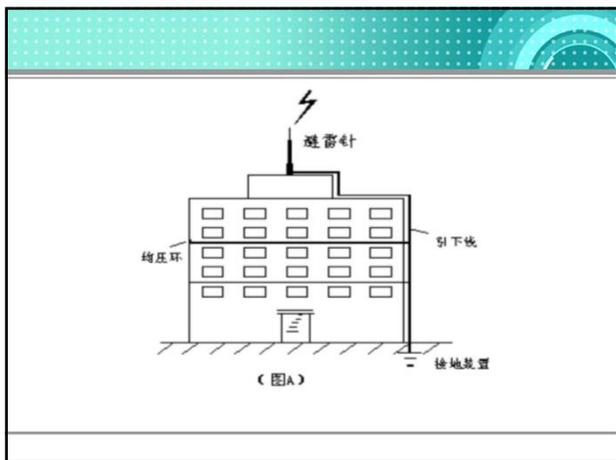
- 一间中小学教室长度不超过  $10\text{m}$ ，学生坐在桌子旁听课，两只脚之间的距离大约  $0.2\text{m}$ 。教室地面和地基为混凝土，电阻率约为  $\rho=10000\Omega \cdot \text{m}$
- $U=300000\text{V}$ 
  - 这个估算值非常大。考虑到实际地面的电阻率可能会因为地下的金属框架、土壤含水等因素变小。但是人体能够承受的安全电压为  $36\text{V}$ 。可见雷击造成的地表电位的变化也是非常危险的。

### 雷电反击和引入高电位

- ❖ 雷电的反击现象通常指遭受直击雷的金属体（包括接闪器、接地引下线 and 接地体），在引导强大的雷电流流入大地时，在它的引下线、接地体以及与它们相连接的金属导体上会产生非常高的电压，对周围与它们连接的金属物体、设备、线路、人体之间产生巨大的电位差，这个电位差会引起闪络。在接闪瞬间与大地间存在着很高的电压，这电压对与大地连接的其他金属物品发生放电（又叫闪络）的现象叫反击。
- ❖ 雷电引入高电位是指雷电流沿输电线、天线等流入室内引发事故。

### 雷击事故的预防

- ❖ 预防直击雷，可以使用避雷针、避雷网等，通过良好接地，使雷电流按照人们设计的路径流入大地。
- ❖ 高层建筑物的设计中，必须有均压环来使建筑物。原因是，虽然避雷器是直接接地的，但是避雷器和大地之间仍然会有杂散电容，这种效应在通过巨大电流时才能体现出来。此时，避雷器在建筑物的各个部分电压不一定相等。在高电压出现的地方就容易发生击穿。均压环将同一高度上的各处电势均衡，防止局部击穿和跨步电压的出现。



- ❖ 对于感应雷，传统的简单的避雷系统反而会加大雷击的风险。当大电流通过避雷器时，会产生很强的感应电动势，损毁电子设备。预防感应雷需要非常复杂的防雷系统，除了外部避雷工程外，建筑内部还需要设置内部防雷系统。



- ❖ 附：资料来源
- ❖ <http://wenku.baidu.com/view/ae77df125f0e7cd18425366e.html>
- ❖ <http://wenku.baidu.com/view/60102ea7f524ccbff121840c.html>
- ❖ <http://wenku.baidu.com/view/d2f423e4524de518964b7d31.html>
- ❖ <http://baike.baidu.com/view/106715.htm>
- ❖ <http://baike.baidu.cn/view/467332.htm>