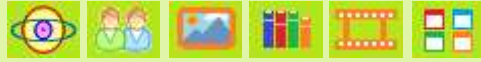
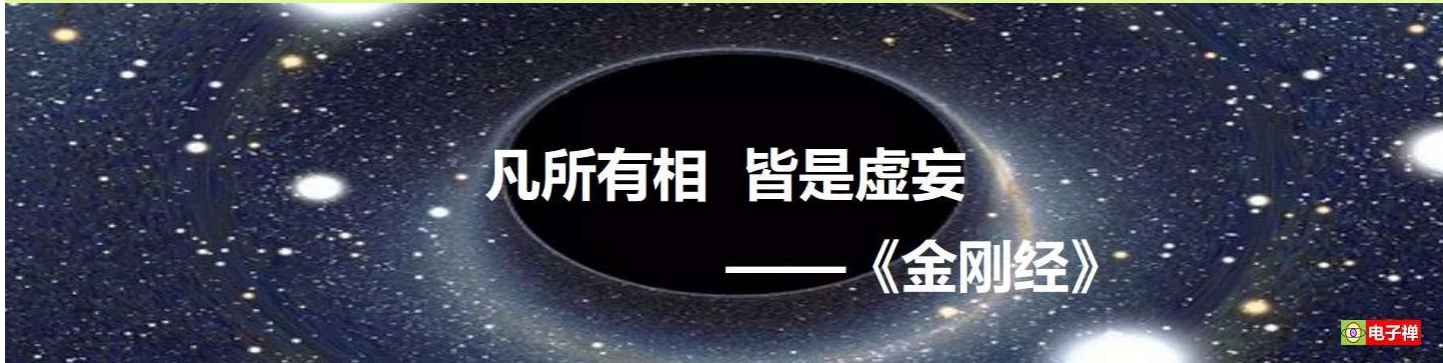




智慧慈悲 | 科技人文 | 禅思原创



从电子角度禅悟世界 用电子技术传播禅学



大象 退出

【电子禅国际_论坛首页】 » 大象讲堂 Hans's Lecture Room » 【35】比造原子弹还难？没那么玄乎，27图让您扫盲集成电路

<< 上一主题 | 下一主题 >>

回复

新帖

本主题由 大象 于 2020-11-26 09:04 加入精华

▶ 【大象】 发表于 2020-11-26 09:02 只看该作者

小中大 1#

【35】比造原子弹还难？没那么玄乎，27图让您扫盲集成电路

有人说搞集成电路比搞原子弹还难，我觉得没那么玄乎，主要问题是人们对它不了解。如今国家急需发展集成电路，我却很难找到通俗易懂的科普文章，倒是搞笑梗和鸡汤文挺多。

我已从事集成电路工作30年，现尝试用最简单的文字，给大家介绍一下集成电路。为了便于理解，我会用大家熟悉的宏观现象来做类比。只要您有中学文化程度，看完基本都能明白集成电路是怎么回事。

一、集成电路的尺寸概念

我们常见带电的东西有两大类：一类是高压危险的强电，典型代表是电灯泡，电压为220伏。另外一类是低压好玩的弱电，典型代表是手机，电池供电电压只有几伏。

大多数电器内部都有电路板，上面会有一些带很多管脚的黑色小块，它们就是集成电路，通常也叫微电路。越智能的电器，越离不开集成电路。

这里先通过熟悉的例子，让大家对集成电路的尺寸有个直观的了解。



图1 眼睛：厘米级

图2 细胞：微米级

图3 原子：纳米级

图1是眼睛，一般人眼为几厘米，这个尺寸是多数集成电路封装起来的外观大小。虽然成品集成电路的尺寸大小不一，但不需要用显微镜，眼睛可以直接看见的。

图2是人体最大的细胞，直径大约1微米，这就是一般集成电路的内部特征线条尺寸，集成电路的基本连线和器件都是微米级别的，如果不借助显微镜，肉眼是看不见的。

图3是原子，在纳米级别，现在集成电路最细线条也进入了几纳米范围。原子直径一般在零点几个纳米，最先进的几纳米工艺，大约就是几十个原子那么大。

可以这么说，集成电路最细线条可以达到几纳米级别；一般集成电路内部的特征线条宽度在微米级别；而把芯片封装起来做成成品集成电路，一般就是几毫米到几厘米大小。

二、集成电路的内部是什么样子的？

集成电路是利用半导体技术把许多电路集成在一块芯片上封装而成的，外观一般黑乎乎的，它内部到底是什么样子的呢？



图4 手机

图5 电路板：黑块为集成电路

图6 集成块内部的芯

图4是常见的手机，早期的手机像砖块一样笨重而且功能单一，现在的智能手机轻薄且功能强大，这都归功于大规模集成电路的发展。

图5是手机内部的电路板，电路板上的黑色方块就是集成电路，一部手机中会有多块不同功能的集成电路。

图6下半部分显示的是图5的红色方块（1）的内部芯片与连线，很多细细的金属丝把芯片周围的一圈白色焊盘引出来，输出到集成电路的管脚上。

图6上半部分是下面红色方块（2）部分芯片的示意图，芯片上粉色的长方块就是焊盘，金属丝的一端会焊接在焊盘上。

一般情况下，芯片封装起来了，内部这些引线和芯片都看不见，外部只能看见一个有很多管脚的黑色方块。

三、从晶圆到芯片

我们知道了集成电路的核心其实是封装在内部的芯片。这些芯片从哪里来的呢？它们是由晶圆切割而来的。

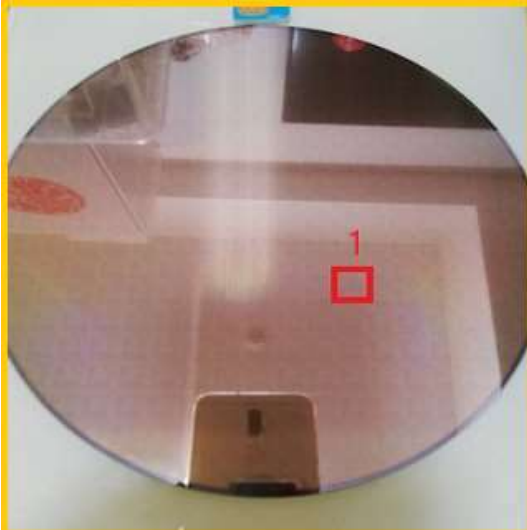


图7 硅片晶圆

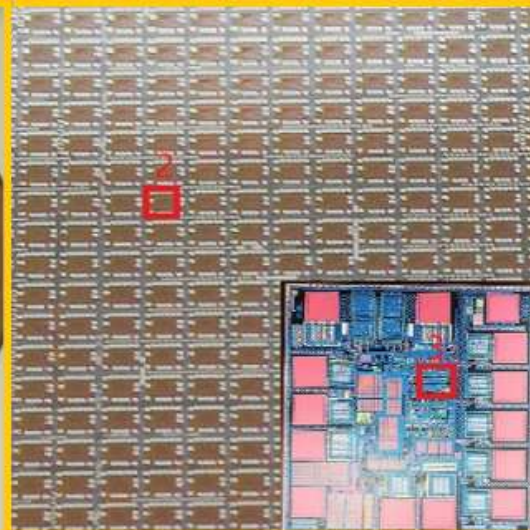


图8 芯片



图9 芯片内部连线

图7是个八英寸的晶圆，这片晶圆上有几万颗集成电路。图7中的红色方块（1）放大后就看到图8的一小块芯片。每块芯片都一样，切割下来就可封装几万个集成电路成品。

将图8的红色方块（2）放大，就看到右下角一颗芯片完整的版图，粉红色的是连接外封装用的焊盘，版图中间红色方块（3）放大，就能看到图9的内部连线。

图9是芯片内部的金属连线示意图，这些连线和接触孔都是微米级别的。头发丝一般几十微米，它们比头发丝细百倍，也即是头发丝上就可以做出千百个小器件。

四、硅棒和晶圆

晶圆可以切割成芯片，那么晶圆是怎么来的呢？



图10 硅材料



图11 硅棒



图12 硅片（晶圆）

晶圆是把图10的硅矿石（我们常见的沙子主要成分就是二氧化硅）在一千多度的高温融化提炼，慢慢凝固拉成棒状的单晶棒。图11显示不同尺寸的单晶硅棒。

图12是将硅棒切割成一个个圆片，也就晶圆。通过一系列复杂的扩散光刻等半导体工艺，就可以在晶圆上做出集成电路的芯片，最后进行测试、划片、封装，变成集成电路成品。

至于集成电路的工艺，这又是专门的一门学问，目前工艺界最细线条可以做到5纳米，也就是到了操纵百十个原子的级别了。至于将来会不会用几个原子组成一个器件？这很难说，人类这样孜孜不倦的探索，科学发展不可限量。

五、神奇的半导体

前面几个图都容易理解，因为它们都是眼睛能看见的东西。下面介绍的图片，就进入了微观世界，跟我们平时看到的不太一样，不过稍微有点耐心，会发现微观的东西也是很有趣的。

我们常见的物质都是原子构成的，如果从导电性能分类，可以分为导体，半导体，绝缘体三种。

常见的金属都是导体，塑料布料木料等大部分是绝缘体。

而半导体不常见，它们是藏在电器内部的集成电路内。可以说，现代电子信息文明为什么能如此精彩，主要是因为这些神奇的半导体。

那么，从微观角度，半导体、导体、绝缘体到底有什么不同呢？

这从能带角度非常容易理解：我们中学课本都学过，原子是由带正电的原子核，和绕核高速旋转带负电的电子构成的。电子在核外有固定的运行轨道，能量低的电子靠近核运动，能量高的电子远离核运动。

这些运动看似杂乱无章，其实它们是分层活动的，而且有自己的轨道，这些轨道叫做能级或能带。电子并不是所有地方都可以活动，不能去的地方叫做禁带。

一般来说，只有外层的电子才与外界反应，外层能带也叫价带，提供价电子与其他原子构成分子。

电子如果从价带出来，就会变成自由电子，可以在外界电场的作用下传输电流。所以把价带外的能级叫做导带，也就是能参与导电的能带。

为了简化，我们用二维的图形来说明原子的状态。



图13中红色的圆点代表原子核，外围蓝色的圆圈代表内层电子，它们一般不与外界反应，始终围绕自己的核旋转。

绿色圆圈代表价带，是外层电子，它们有时会跑到其他原子核周围去串门，从而将几个原子结合成分子。

轨道之间白色部分是电子不能停留的地方，叫做禁带。

导带是基本是准自由的电子，可以随外界电场运动。也就是只要电子能到达导带，就可以在原子间隙乱跑，由于它的速度很快，并不能像图中那样看清轨迹，我们用绿色的深浅代表自由电子的数量多寡。这些自由电子可以受外界电场驱动而导电。

图14示意了导体、半导体和绝缘体间隙中自由电子多寡的区别：

导体内部原子间隙的自由电子很多，用深绿色表示。所以导体很容易随着外界电场而驱动形成电流。

绝缘体内部几乎没有自由电子，用灰色表示。所以绝缘体不导电。

半导体导电能力介于导体和绝缘体之间，用浅绿色表示。半导体可以导电也可以不导电，它的导电能力取决于掺杂，下节会详细解释。

图15是图14对应红色方块处的局部放大，从禁带宽度放大图更容易理解三者的区别：

导体的禁带很窄，它的价带电子很容易越过禁带跑去导带参与导电，所以叫导体。

绝缘体禁带很宽，它的价带电子就很难跑去导带参与导电，所以叫绝缘体。

半导体的禁带宽度介于导体与绝缘体之间，所以叫半导体。

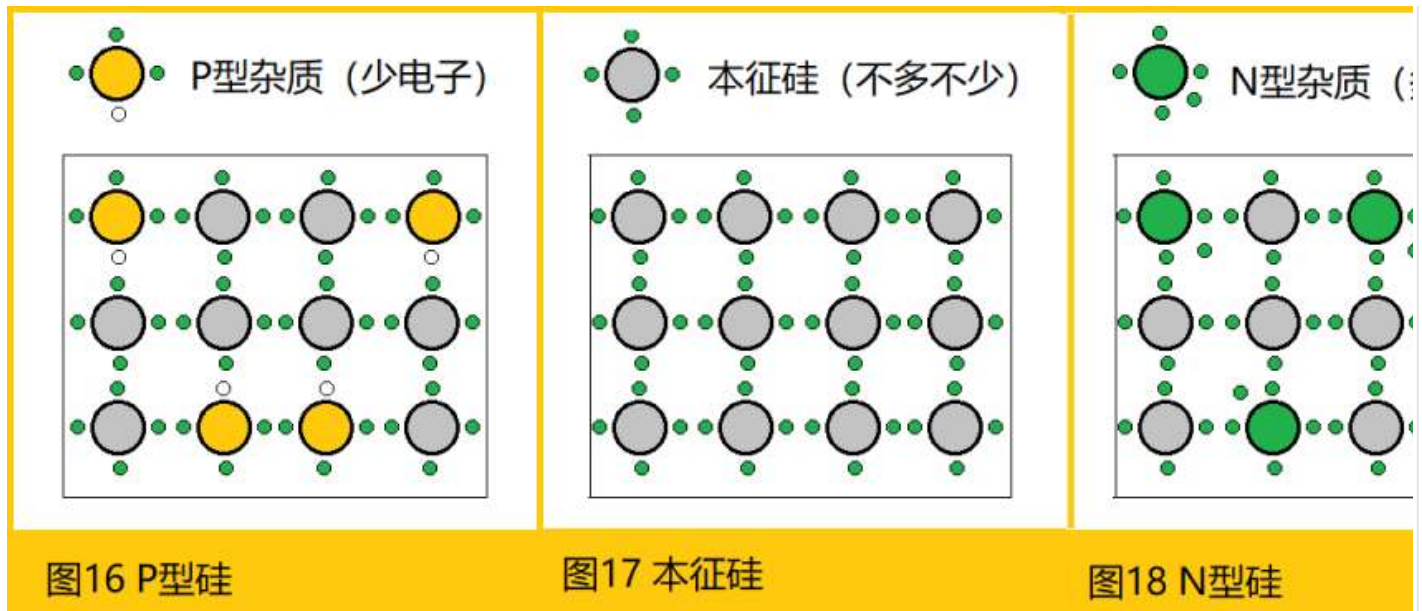
导体可以传输电流，绝缘体可以保护人体不被电击，半导体可以制成各种器件，每种材料都有自己的用途。

当然，导体半导体绝缘体都是在一定条件下才有意义。如果电子的能量很大，禁带宽也不是不可逾越的。绝缘体在高温高压下变成导体也是有可能的。比如空气平时不导电，但高压可以让空气导电形成闪电。

一切都有限度，恰如其分才好。

六、单晶与掺杂

单晶硅是典型的半导体，有时候它会导电，有时候又不导电，这是什么原因呢？



我们了解一下半导体的掺杂情况，来解释它的导电特性。

由于硅原子核外最外层有四个电子，而它外层能带轨道其实需要8个电子才能达到稳定状态。这里的图中用静态的绿色小球表示其外层电子的个数，忽略其内层的电子。

图17示意了本征硅，每个硅原子周围有四个电子，刚好与四周相邻的硅原子的核外电子共用起来，大家都形成了最外层轨道都是8个电子的稳定状态。

图16示意P型硅，它掺杂有几个比正常的硅原子缺少一个电子的P型原子。这些杂质原子倾向于吸收一个电子，也可以说它多余一个空穴，相邻原子的电子如果填充了这个空穴，就会在原位置多出一个空穴。

好像教室内第一排有个空位，同学们依次前移一格补上，相对来说，就好像空位自己跑到后排去了。也可以理解为它通过空穴来导电。与带负电的电子相反，空穴可以看作一种带正电的载流子。

图18示意了N型硅，它掺杂有几个比正常的硅原子多一个电子的N型原子，这些杂质原子倾向于放弃一个电子，所以N型半导体的电子比较充裕。

可以说，有了不同的杂质，才使半导体很容易改变性状，成为很多电子的N型半导体和很多空穴的P型半导体。

没有这些特殊的杂质，光靠硅单晶本身，根本做不出来集成电路。这些杂质浓度并不高，原子数量只占少数，却决定了半导体的特性。

杂质原子在硅晶体中，就像一个团队的少数灵魂人物，决定了团队的特色。有时不能太纯净，“水至清则无鱼”。

七、PN结的形成

二极管的单向导电特性用途很广，可以让电子该通过的通过，不该通过的截至。到底是什么原因让电子如此听话呢？它的微观机理是什么呢？这里简介如下：

假设有一块P型半导体（用黄色代表空穴多）和一块N型半导体（用绿色代表电子多），它们自然状态下分别都是电中性的，即不带电。如图19所示上半部分所示。

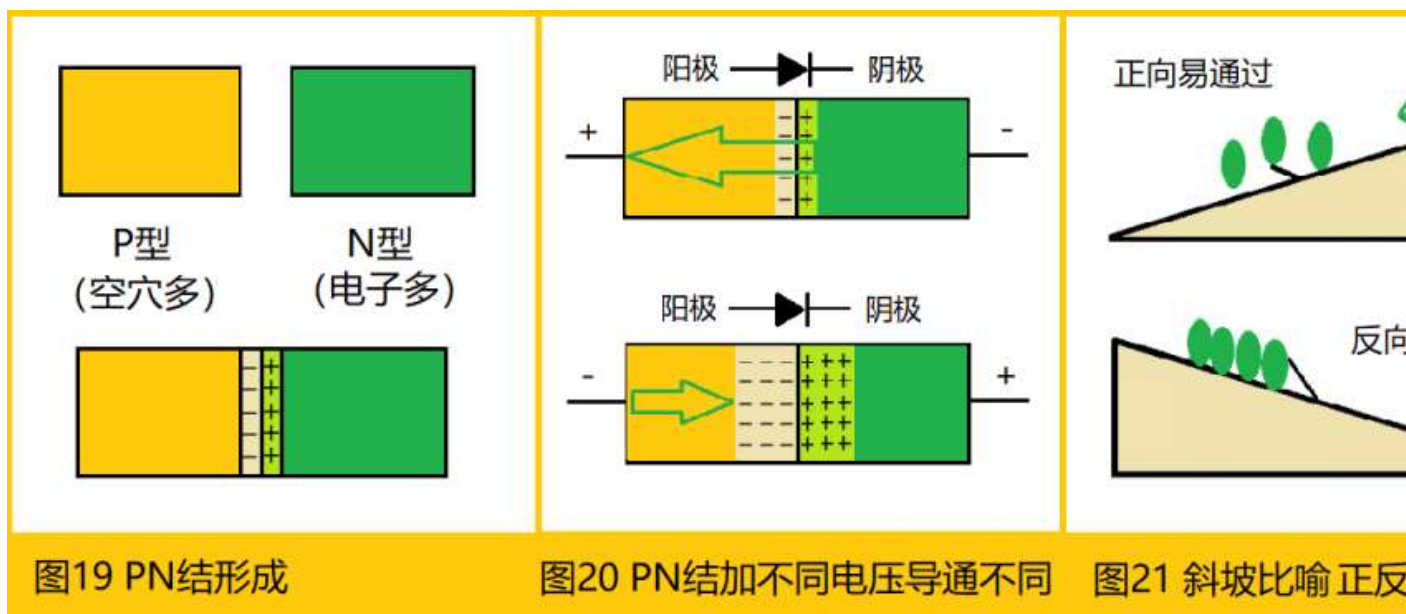


图19示意了把两个不同性质的半导体结合在一起，在它的界面会形成一个PN结。边界处N型半导体的电子自然就会跑去P型区填补空穴，留下失去电子而显正电的原子。

相应P型区边界的原子由于得到电子而显负电，在边界形成一个空间电荷区。为什么叫“空间电荷区”？是因为这些电荷是由无法移动的原子构成的。

空间电荷区形成一个内建电场，电场方向由N到P，这个电场阻止了后面的电子继续过来填补空穴。

因为P型区的负空间电荷是排斥电子的，电子和空穴的结合会越来越慢，最后达到平衡，相当于载流子耗尽了，所以空间电荷区也叫耗尽层。

PN结的形成很有趣, 先来的先占位, 占位后会排斥后来的。排斥新移民的, 往往是老移民。

图20 示意了PN结加不同方向的电压, 其导通效果是不一样的。

外加正向电压, 电场方向由正到负, 与内建电场相反, 削弱了内建电场, 所以二极管可以导通。绿色箭头表示电子流动方向。

外加反向电压, 电场方向与内建电场相同, 增强了内建电场, 所以二极管不导通。绿色箭头表示电子流不过去。

就像图21带刺的斜坡, 不同方向的导通效果不同。顺向的刺突不容易阻碍圆球通过, 而逆向的刺突就会阻碍圆球通过。

当然, 导通和阻碍都是有限度的, 超过了限度, PN结就可能损坏了, 没有单向导通的效果了。

八、MOS管的形成

有了PN结, 就可以形成三极管、MOS管等各种半导体器件。这里简单介绍一下应用最广的MOS管吧。

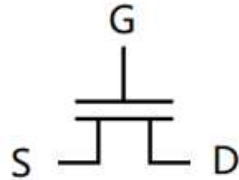
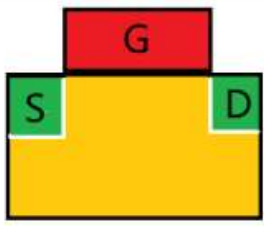
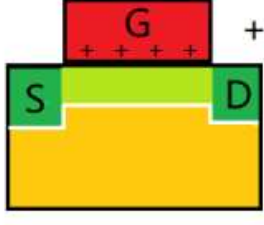

<p>MOS管 (电压控制型器件)</p> <p>NMOS 符号</p> 	<p>G不加电压 D和S不导通</p>  <p>G加电压 D和S导通</p> 	<p>磁力控制的</p>  <p>没有加压不</p> <p>红色磁块推开黄</p>
<p>图22 MOS管</p>	<p>图23 MOS管开关</p>	<p>图24 MOS管水管比</p>

图22是MOS管的符号。MOS管就像开关, 由栅极 (G) 决定源极 (S) 到漏极 (D) 是通还是不通。以NMOS为例, 图中绿色代表 (N型) 富电子区域, 黄色代表 (P型) 富空穴区域。P型和N型交界处就是PN结分隔。

图23显示MOS管开关的效果，超过阈值就开，低于阈值就开不了。栅电压越大，下面感应出来的电子越多，形成的导电沟道越宽。栅与沟道之间有氧化层隔离，栅上的电流不会流入源漏。

图24用水管比喻，MOS管开通和关闭的效果：水管被黄色阀门堵住，水就流不过去，就是不导通状态。如果黄色阀门被外界红色磁块推开，水就可以流过去了，就是导通状态。

MOS管就是一个受控的开关，它能忠实执行上级指令，让开就开，让关就关，所以用途非常广泛。

由于PMOS是由空穴导电，工作模式与电子导电的NMOS刚好相反：栅上加高电平NMOS导通，而PMOS关闭。栅上加低电平NMOS关闭，而PMOS导通，这里不再赘述。

九、基本门电路

下面是CMOS集成电路的基本门电路——倒相器的示意图。倒相器是由一个NMOS管和一个PMOS管构成，它的功能很简单：就是来高电平就把它变成低电平，来了低电平信号就把它变成高电平。

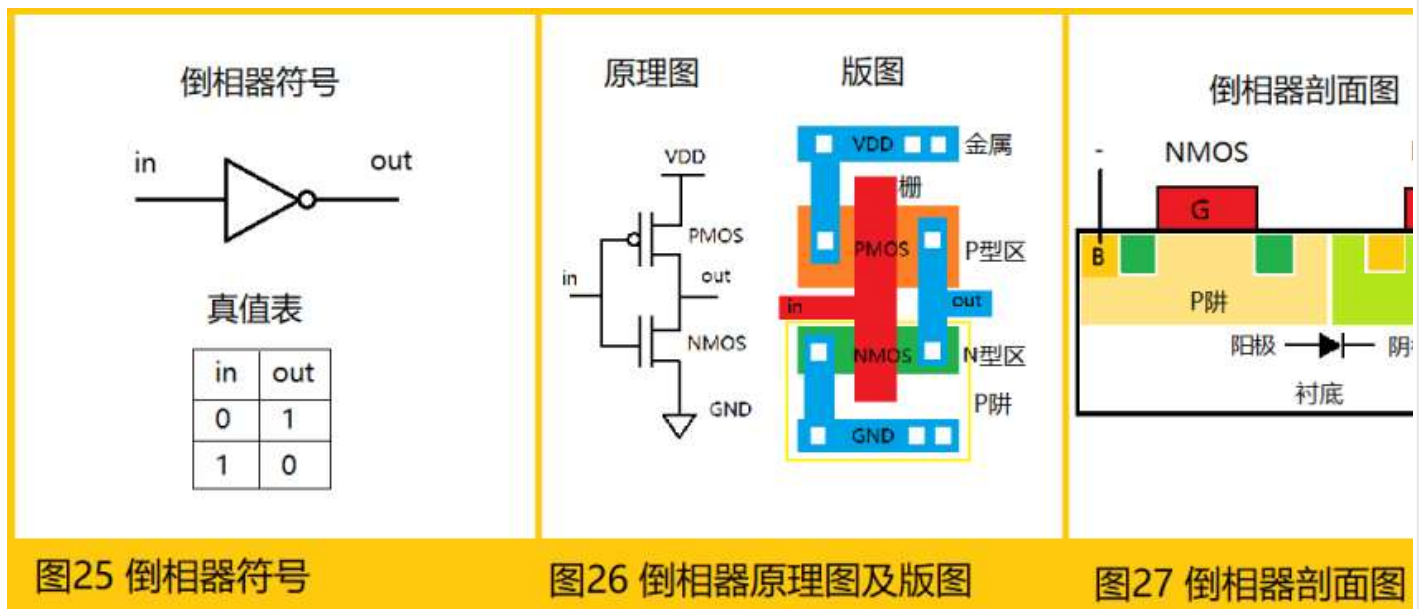


图25 倒相器符号

图26 倒相器原理图及版图

图27 倒相器剖面图

图25是倒相器的符号和真值表。“0”代表低电平GND，“1”代表高电平VDD。

图26是倒相器的原理图和版图，如果in端接低电平“0”，由于PMOS是栅接“0”导通，而NMOS关闭，out端便会通过源漏连接到高电平VDD，即输出“1”。

相反，如果in端接高电平“1”，由于NMOS是栅接“1”导通，而PMOS关闭，out端便会通过源漏连接到低电平GND，即输出“0”。

要说明的是，要让阱内的PMOS管和NMOS管不相互影响，P阱和N阱构成的PN结就得采用反偏接法。所以P阱会接低电平，N阱接高电平。

要把很多电路集成在一起，这种二极管反向隔离技术非常有用。集成电路的目标是让更多的电路一起协调工作，但却不能彼此影响，协作与隔离同样重要。

而倒相器就是能实现将信号倒向的基础门电路。配合其他复杂的门电路，电器就会越来越智能。

其他的电路实际也并不神秘，很多电路协作，其原理就像多米诺骨牌，通过某种触发完成一些特定的功能。比如手触摸一下手机屏幕，手机内的各种门电路就开始依次有序的导通关闭，从而完成某项功能。

图27是倒相器的剖面图，有兴趣的同学可以对照起来看。可以考考自己，尝试把图27按照倒相器的接法连接起来，成功了就算对微电子入门了。这比研究原子弹容易多了吧？

小结

本文虽短，但内容已经涉及到了三门大学本科课程：《固态物理学》《半导体器件物理》《集成电路设计》。当然，集成电路更深入的知识还很多，这里介绍的只是简单的皮毛。

很多人喜欢玩手机，看完本文应该对手机内部的电路多一点了解，少一点神秘感。如果此文能引起某些同学的兴趣，多化点时间琢磨一下微电子技术，或者报考微电子专业，说不定国家级集成电路大师之苗从此发芽了呢。（大象韩 20201126）

附件

 D_IC_all.png (586.27 KB)
2020-11-26 09:17





图4 手机 图5 电路板：黑块为集成电路 图6 集成块内部的芯片和连线



图7 硅片晶圆 图8 芯片 图9 芯片内部连线



图10 硅材料 图11 硅棒 图12 硅片（晶圆）



图13 原子核与电子 图14 导体 半导体 绝缘体 图15 能带图

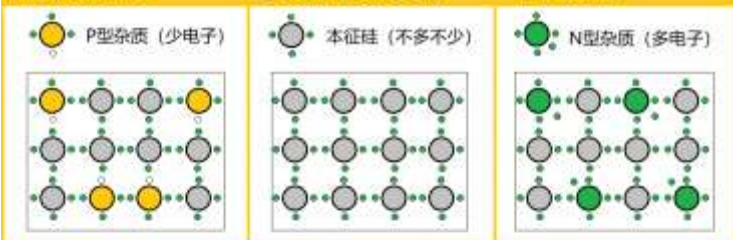


图16 P型硅 图17 本征硅 图18 N型硅

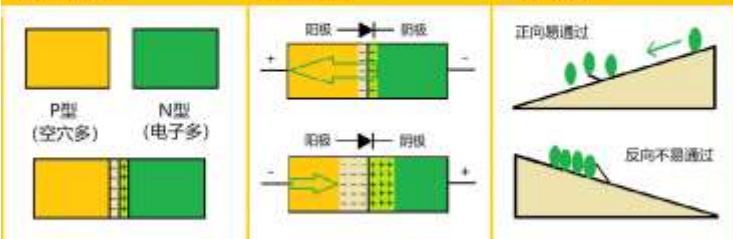


图19 PN结形成 图20 PN结加不同电压导通不同 图21 斜坡比喻正反导通

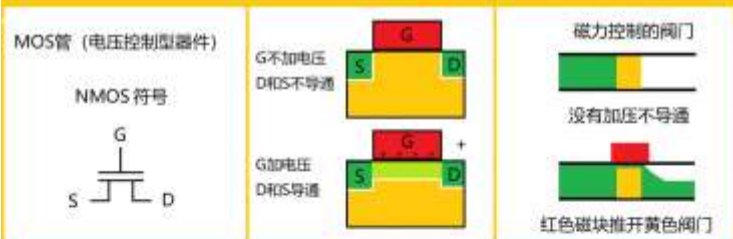


图22 MOS管 图23 MOS管开关 图24 MOS管水管比喻

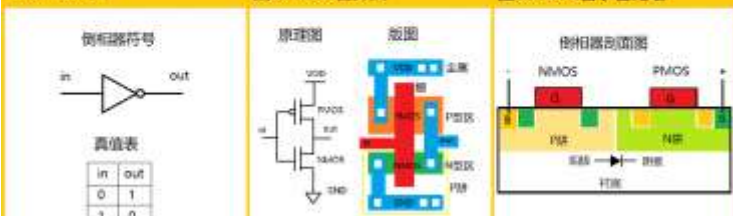


图25 倒相器符号 图26 倒相器原理图及版图 图27 倒相器前面图


SIGNATURE :


【赞佛偈】 (大象, 2004.5.3)
智慧福德最尊胜, 事理无碍超时空。
因果缘起不二法, 慈悲恒演菩提行。
我今礼赞诸佛圣, 愿脱轮回断死生。
同证如来光明性, 广度迷途化有情。

AD 主页  论坛  最新  赞赏 







编辑 引用 评分 回复 删除 屏蔽帖子 TOP

<< 上一主题 | 下一主题 >>

 回复

 新帖

最新文章

-  [白开水米汤养育她结婚生子 谜女子27年不吃饭](#)
-  [【电子禅辑94】 太阳驱动水循环](#)
-  [【电子禅辑93】 光速最快吗? 黑洞不语](#)
-  [【电子禅辑92】 宇宙还有其他高级文明吗?](#)
-  [【电子禅辑91】 色是什么意思?](#)
-  [【电子禅辑90】 睡眠有个开关](#)

电子禅 Google

全球搜索 本站搜索

主页  论坛  最新  赞赏 

Since: 2001 站长: 韩孝勇 (大象) 共享版权: CC BY 4.0 法律顾问: 薛永谦律师
中华人文学会有限公司 **【电子禅工作室】** 地址: 华藏世界海-娑婆世界-中国香港
[关于我们](#) | [免责条款](#) | [本站地图](#) | [联系我们](#)
电子禅国际 DIANZICHAN.COM