

第一章 晶体二极管

知识要点：

常用半导体器件的工作原理、特性、交/直流与极限参数。
晶体二极管的基本使用方法。

1.1 半导体物理基础知识

根据物体导电能力（电阻率）的不同，来划分导体、绝缘体和半导体。

半导体（Semiconductor）的导电能力介于导体和绝缘体之间，电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。

典型的半导体有硅（Si）和锗（Ge）以及砷化镓（GaAs）等。其中硅用的最广泛。

1.1.1 本征半导体

原子是由带正电的原子核和分层围绕原子核运动的电子组成。处于最外层的电子称为价电子（Valence Electron）把内层电子和原子核看作一个整体，成为惯性核。硅和锗是四价元素，在原子最外层轨道上的四个电子称为价电子。它们分别与周围的四个原子的价电子形成共价键。

一、本征半导体

本征半导体(Intrinsic Semiconductor)——化学成分纯净的半导体。共价键(Covalent Bond)就是相邻两个原子中的价电子作为共用电子对而形成的相互作用力。硅和锗中的每一个原子均和相邻的四个原子组成四个共价键。共价键平面示意图见图 1-1-1。

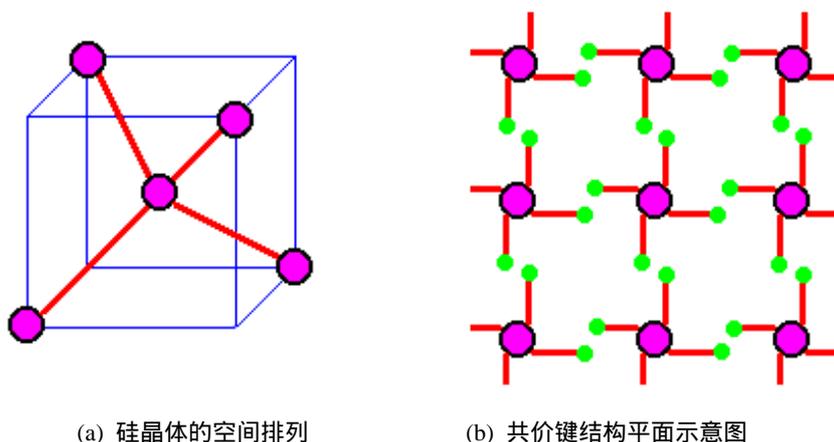


图 1-1-1 硅原子空间排列及共价键结构平面示意图

二、本征激发和复合

当导体处于热力学温度 0K 时，导体中没有自由电子（Free Electron）。当温度升高或受到光的照射时，价电子能量增高，有的价电子可以挣脱原子核的束缚，而参与导电，成为自由电子。这一现象称为本征激发（也称热激发）。

自由电子产生的同时，在其原来的共价键中就出现了一个空位，原子的电中性被破坏，呈现出正电性，其正电量与电子的负电量相等，人们常称呈现正电

性的这个空位为空穴。可见因热激发而出现的自由电子和空穴是同时成对出现的，称为电子空穴对。游离的部分自由电子也可能回到空穴中去，称为复合，如图 1-1-2 所示。本征激发和复合在一定温度下会达到动态平衡。

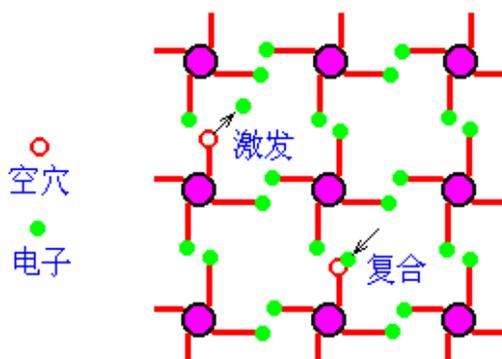


图1-1-2 本征激发和复合的过程

三、热平衡载流子浓度

当温度一定时这激发和复合在某一热平衡载流子浓度值 (Intrinsic Concentration) 上达到平衡。平均载流子浓度 n_i 为

$$n_i = AT^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-E_{go}}{2kT}}$$

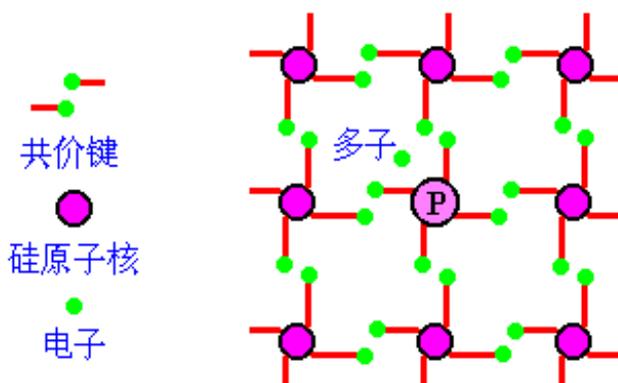
1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入某些微量元素作为杂质，可使半导体的导电性发生显著变化。掺入的杂质主要是三价或五价元素。掺入五价元素的杂质 (磷、锑或砷) 可形成 N 型半导体，掺入三价元素的杂质 (如硼，镓、铟或铝) 可形成 P 型半导体。掺入杂质的本征半导体称为 杂质半导体 (Doped Semiconductor)。

一、N 型半导体

因五价杂质原子中只有四个价电子能与周围四个半导体原子中的价电子形成共价键，而多余的一个价电子因无共价键束缚而很容易形成自由电子。在 N 型半导体中自由电子是多数载流子 (Majority Carriers)，它主要由杂质原子提供；空穴是少数载流子 (Minority Carriers)，由热激发形成。

五价杂质原子称为施主 (Donor) 杂质。它是受晶格束缚的正离子。

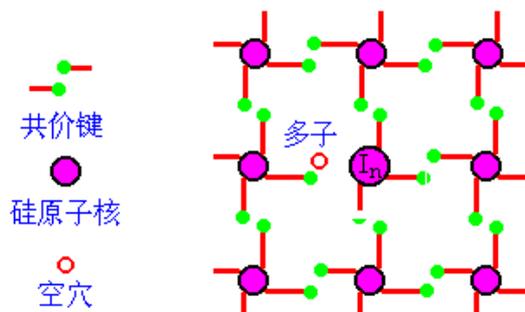


型半导体的结构示意图

二、P 型半导体

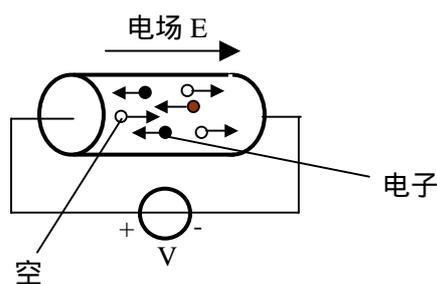
因三价杂质原子在与硅原子形成共价键时，缺少一个价电子而在共价键中留下一空穴。P 型半导体中空穴是多数载流子，主要由掺杂形成；电子是少数载流子，由热激发形成。三价元素成为受主(Acceptor)杂质。

P 型半导体的结构示意图如图所示。



P 型半导体的结构示意图

1.1.3 两种导电机理——漂移和扩散



电场作用下的漂移

一、漂移与漂移电流

在外加电场的的作用下，载流子将在热骚动状态下产生定向运动，其中自由电子产生逆电场方向的运动，空穴产生顺电场方向的运动。载流子在电场的作用下产生定向运动的现象成为漂移运动。所产生的电流叫做漂移电流。

二、扩散与扩散电流

如因为某种原因破坏了热平衡条件，则会出现载流子的分布不均匀。这时从任一断面看，从浓度大的一侧穿过假想面而进入浓度小的一侧的载流子将多于沿相反方向运动的载流子，因而形成载流子沿 X 方向的净流动。这种因浓度差引起的载流子定向运动的现象称为扩散运动。响应产生的电流称为扩散电流。

1.2 PN 结

在一块 P 型（或 N 型）半导体中，掺入施主（或受主）杂质，将其中的一部分转换为 N 型（或 P 型）。这样就形成了 PN 结(PN junction)。

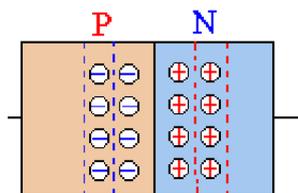
1.2.1 动态平衡下的 PN 结

一、阻挡层形成的物理过程

当 P 型半导体和 N 型半导体接触时，扩散运动使 P 区空穴跨过接触面扩散

到 N 区，并有部分空与 N 区的自由电子复合。N 区电子跨过接触面扩散到 P 区并有部分电子与 P 区的空穴复合。这样在紧靠接触面两侧的区域留下了杂质离子。其中 P 区侧为带负电的受主离子，N 区侧为带正电的施主离子，而且两侧的正、负离子电荷量相等，形成空间电荷区。

最后，多子的扩散和少子的漂移达到动态平衡。对于 P 型半导体和 N 型半导体接触面，离子薄层形成的空间电荷区称为 PN 结。在空间电荷区，由于缺少多子，所以也称耗尽层。



二、内建电位差

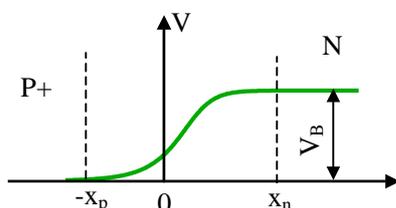
达到动态平衡时，由内建电场产生的电位差成为内建电位差，用 V_B 表示。

$$V_B \approx V_T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

称为热电压 (Thermal Voltage)，单位为伏，室温即 $T=300K$ 时

$$V_T \approx 26mV$$



三、阻挡层宽度

阻挡层宽任一侧度与该侧掺杂浓度成反比。动态平衡下 PN 结的阻挡层宽度为：

$$l_0 = x_n + x_p = \left(\frac{2\epsilon}{q} V_B \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right)^{\frac{1}{2}}$$

1.2.2 PN 结的伏安特性

伏安特性 (Volt-Ampere Characteristics) 是 PN 结的主要特性。

一、正向特性

PN 结具有单向导电性，若外加电压使电流从 P 区流到 N 区，PN 结呈低阻性，所以电流大；反之是高阻性，电流小。

如果外加电压使 PN 结 P 区的电位高于 N 区的电位称为加正向电压，简称

正偏；

外加的正向电压有一部分降落在 PN 结区，方向与 PN 结内电场方向相反，削弱了内电场。于是，内电场对多子扩散运动的阻碍减弱，扩散电流加大。扩散电流远大于漂移电流，可忽略漂移电流的影响，PN 结呈现低阻性。

二、反向特性

PN 结 P 区的电位低于 N 区的电位称为加反向电压，简称反偏。

外加的反向电压有一部分降落在 PN 结区，方向与 PN 结内电场方向相同，加强了内电场。内电场对多子扩散运动的阻碍增强，扩散电流大大减小。此时 PN 结区的少子在内电场作用下形成的漂移电流大于扩散电流，可忽略扩散电流，PN 结呈现高阻性。

在一定的温度条件下，由本征激发决定的少子浓度是一定的，故少子形成的漂移电流是恒定的，基本上与所加反向电压的大小无关，这个电流也称为反向饱和电流。

PN 结加正向电压时，呈现低电阻，具有较大的正向扩散电流；PN 结加反向电压时，呈现高电阻，具有很小的反向漂移电流。由此可以得出结论：PN 结具有单向导电性。

三、伏安特性

理论证明，PN 结的正向特性和反向特性可统一由下列指数函数表示：

$$I = I_s (e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$$

式中 I_s 为反向饱和电流， V 为二极管两端的电压降， $V_T = kT/q$ 称为温度的电压当量， k 为玻耳兹曼常数， q 为电子电荷量， T 为热力学温度。对于室温（相当 $T=300\text{K}$ ），则有 $V_T=26\text{mV}$ 。

当 V 为正值时， I 随着 V 增大而增大。若 $V \gg V_T$ ，上式可简化、为：

$$I = I_s e^{\frac{V}{V_T}}$$

$$V = V_T \frac{I}{I_s} = 2.3V_T \lg \frac{I}{I_s}$$

当 V 为负值，即反偏且 $|V| \gg V_T$ 时， $e^{\frac{V}{V_T}}$ 趋于零， $I \approx -I_s$ ，即为反向饱和电流。工程上定义一电压，称为导通电压（Turnon, Cut-in Voltage），用 $V_{D(\text{on})}$ 表示， $V > V_{D(\text{on})}$ 时， I 有明显数值，而 $V < V_{D(\text{on})}$ 时， I 很小，PN 结截止。

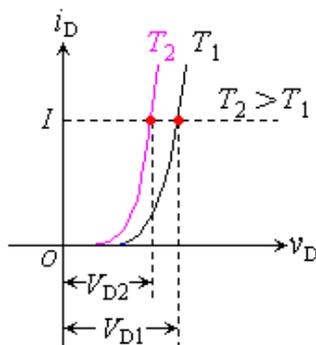
硅 PN 结： $V_{D(\text{on})}=0.7\text{V}$

锗 PN 结： $V_{D(\text{on})}=0.3\text{V}$ 。

上述特性表现出来单向导电性。

四、温度特性

温度升高时，PN 结两边的热平衡载流子浓度增加，从而导致 PN 结的反向饱和电流 I_s 增大。



温度每增加 10°C ， I_s 约增加一倍。

1.2.3 PN 结的击穿特性

当PN结的反向电压增大到一定值 $V = V_{BR}$ 时，反向电流急剧增加，这种现象称为击穿（Breakdown Voltage）， V_{BR} 称为反向击穿电压。PN结的击穿电压有雪崩击穿和齐纳击穿两种。

一、雪崩击穿

载流子获得足够的动能将共价键中的电子碰撞出来产生电子空穴对。新产生的载流子再去碰撞其他的中性原子有产生新的电子空穴对。这种碰撞电离称为雪崩击穿。

雪崩击穿电压较高，其值随掺杂浓度降低而增大。

二、齐纳击穿

阻挡层内的场强非常高时（掺杂浓度高，阻挡层很薄，容易建立很强的场强）足以把阻挡层内的中性原子的价电子直接从共价键中拉出来。产生自由电子空穴对。这个过程称为场致激发。场致激发产生大量的载流子，使PN结的反向电流剧增，呈反向击穿现象，叫齐纳击穿。

在反向区，硅二极管和锗二极管的特性有所不同。硅二极管的反向击穿特性比较硬、比较陡，反向饱和电流也很小；锗二极管的反向击穿特性比较软，过渡比较圆滑，反向饱和电流较大。从击穿的机理上看，硅二极管若 $|V_{BR}| < 7\text{V}$ 时，主要是雪崩击穿；若 $V_{BR} > 4\text{V}$ 则主要是齐纳击穿，当在 $4\text{V} \sim 7\text{V}$ 之间两种击穿都有，有可能获得零温度系数点。

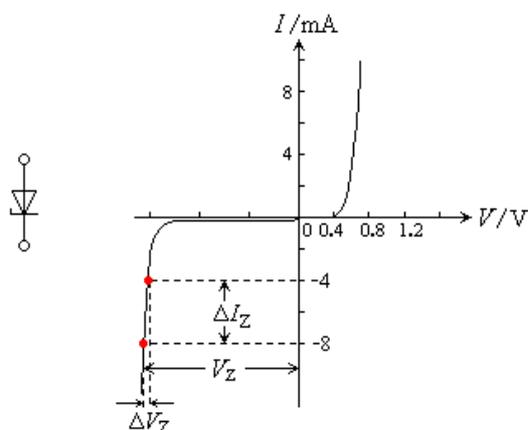
三、击穿电压的温度特性

（略）

四、稳压二极管

稳压二极管是应用在反向击穿区的特殊硅二极管。稳压二极管的伏安特性曲线与硅二极管的伏安特性曲线完全一样，稳压二极管伏安特性曲线的反向区、符号如图示。

最小稳定电流 I_{zmin} : 保证可靠击穿所允许的最小反向电流。
 最大稳定电流 I_{zmax} : 保证稳压管安全工作所允许的最大反向电流。

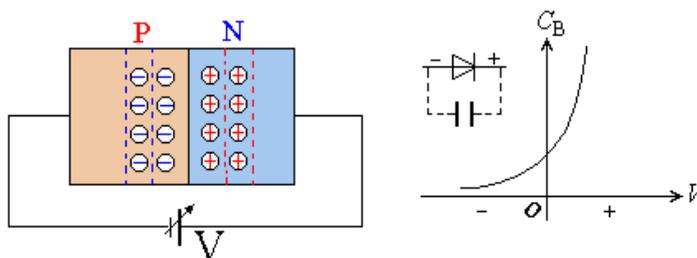


1.2.4 PN 结的电容特性

PN 结具有一定的电容效应，它由两方面的因素决定。一是势垒电容 C_B ，二是扩散电容 C_D 。

一、势垒电容 C_B

势垒电容是由空间电荷区的离子薄层形成的。当外加电压使 PN 结上压降发生变化时，离子薄层的厚度也相应地随之改变，这相当 PN 结中存储的电荷量也随之变化，犹如电容的充放电。势垒电容的示意图。

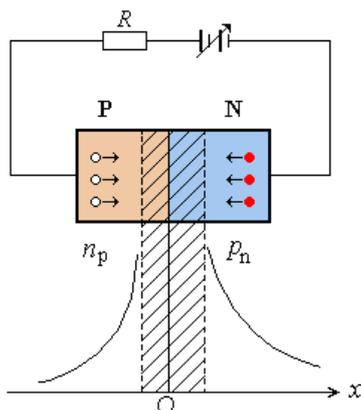


势垒电容示意图

二、扩散电容 C_D

扩散电容是由多子扩散后，在 PN 结的另一侧面积累而形成的。因 PN 结正偏时，由 N 区扩散到 P 区的电子，与外电源提供的空穴相复合，形成正向电流。刚扩散过来的电子就堆积在 P 区内紧靠 PN 结的附近，形成一定的多子浓度梯度分布曲线。反之，由 P 区扩散到 N 区的空穴，在 N 区内也形成类似的浓度梯度分布曲线。扩散电容的示意图如下图所示。

当外加正向电压不同时，扩散电流即外电路电流的大小也就不同。所以 PN 结两侧堆积的多子的浓度梯度分布也不同，这就相当电容的充放电过程。势垒电容和扩散电容均是非线性电容。



1.3 晶体二极管电路的分析方法

1.3.1 晶体二极管模型

一、 晶体二极管的数学模型

为了反映实际器件的伏安特性，通常做法是将 PN 结的伏安特性方程修整为

$$I = I_s(e^{\frac{V-V_{rs}}{nV_T}} - 1)$$

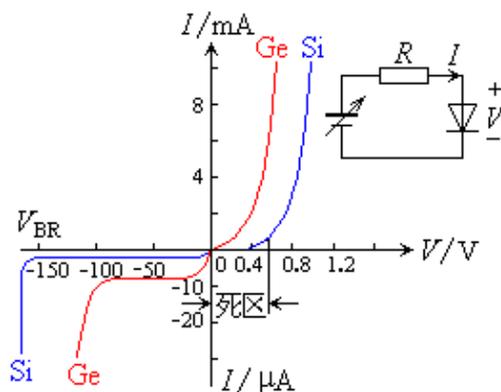
或

$$V = I_{rs} + nV_T \ln(1 + \frac{I}{I_s})$$

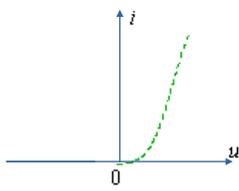
式中， n 为非理想化因子，其值与 I 有关。 I 为正常值时， $n \approx 1$ ， I 过小或过大时， $n \approx 2$ 。 r_s 是与阻挡层相串接的电阻。

二、 伏安特性曲线

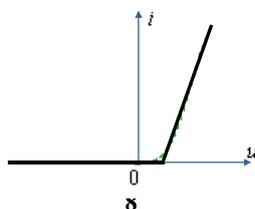
伏安特性曲线是晶体二极管的曲线模型。伏安特性曲线可以根据数学表达式直接绘出。如图示。



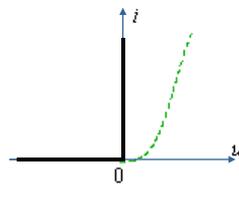
三、 简化电路模型



晶体二极管的伏安特

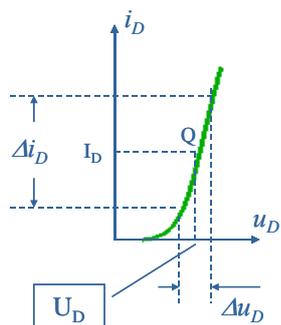


折线化模型



理想二极管模型

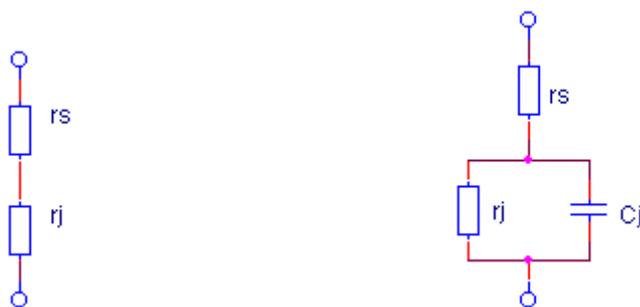
四、小信号电路模型



二极管对迭加在 \$q\$ 点上的微小增量而言，等效为一电阻 \$r_j\$，其值即为该直线的斜率的倒数。当二极管伏安特性用理想指数模型表示时，\$r_j\$ 可按式求得

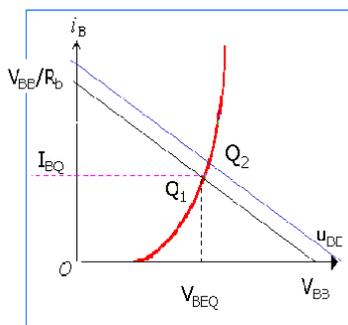
$$\frac{1}{r_j} = \left. \frac{\partial I}{\partial V} \right|_Q = \left. \frac{\partial}{\partial V} [I_S(e^{\frac{V}{V_T}} - 1)] \right|_{V=V_Q} = \frac{I_Q + I_S}{V_T} \approx \frac{I_Q}{V_T}$$

若 \$\Delta V\$ 的工作频率较高，则还需计入 PN 结的电容 \$C_j\$。



1.3.2 晶体二极管的电路分析方法

一、图解分析法



通常将管外电路方程所描述的直线称为晶体二极管的负载线 (Load Line)。

例1. 试求图示电路的静态工作点电压和电流。

解 用戴维南定理将管外电路简化并列电路方程得：

$$V_D = V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \text{,,} R_T = R_1 // R_2$$

$$V = V_T - IR_T$$

将相应的负载线画在伏安特性曲线上，它们的交点便是所求的解 (I_Q, V_Q)

二、简化分析法

采用简化电路分析会变得十分简单。在实际电路中，通常满足 $R \gg R_D$ ，在这种条件下， R_D 可忽略。图示电路如下：

$$I_Q = \frac{V_{DD} - V_{D(on)}}{R + R_D} \approx \frac{V_{DD} - V_{D(on)}}{R}$$

$$V_Q = V_{D(on)} + I_Q R_D \approx V_{D(on)}$$

三、小信号分析法

例2. (P.28) 在图示电路中，已知 $I_Q=0.9\text{mA}$ ，

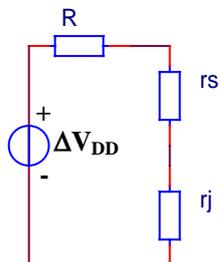
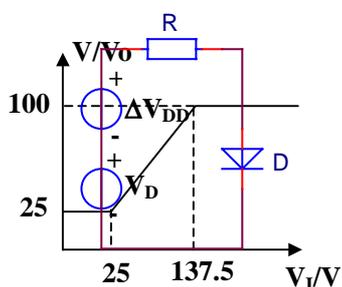
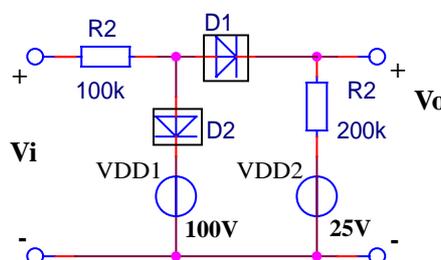
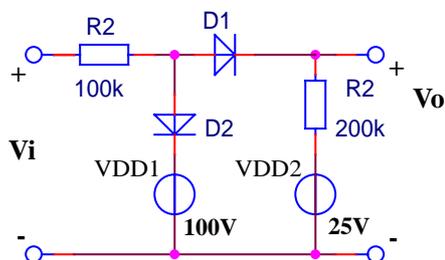
$R=10\text{k}\Omega, \Delta V_{DD}=\sin 2\pi \times 100\text{t}(\text{V})$ ，求 ΔV_o 。

解 令 $V_{DD}=0$ ，并将二极管用小信号模型表示，画出小信号等效电路，如图示，其中

$$r_j = V_T / I_Q = (26 / 0.93)\Omega \approx 30\Omega$$

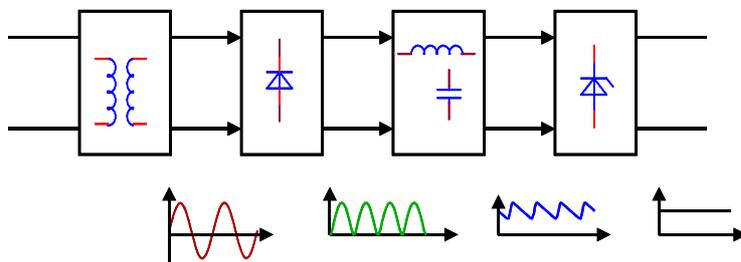
设 $r_s=5\Omega$ ，则可求得 $\Delta I = \Delta V_{DD} / R = 0.1 \sin 2\pi \times 100\text{t}(\text{mA})$

$$\Delta V = \Delta I (r_s + r_j) \approx 3.5 \sin 2\pi \times 100\text{t}(\text{mV})$$



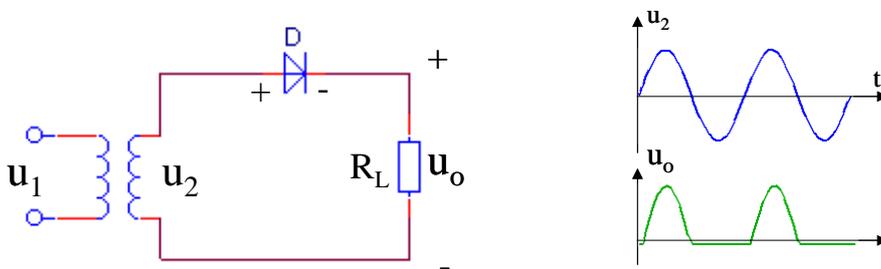
1.4 晶体二极管的应用

1.4.1 整流与稳压电路



电源设备的组成框图

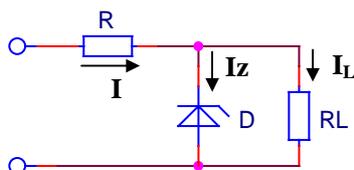
一、 整流电路



半波整流电路，输出电压平均值：

$$V_o = \frac{1}{\pi} \left(\frac{R}{R_D + R} V_{in} \right)$$

二、 稳压电路



稳压管的反向击穿特性是十分陡峭的，通过稳压管的电流有很大的变化时，其两端电压却变化很小，几乎是恒定的。利用这种特性所构成的稳压电路如图所示。

1.4.2 限幅电路

限幅电路 (Limiting Circuit) 又称削波电路，是用来限制输入信号电压范围的电路双向限幅电路及其特性如示。

