

半导体量子器件物理讲座

第四讲 共振隧穿器件及其电路应用*

李 国 华

(中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室 北京 100083)

摘 要 当一个电子的能量低于势垒高度时,它仍可以隧穿通过势垒.在一定条件下,双势垒结构中电子的隧穿几率甚至可以接近1.利用这种共振隧穿现象可以做成共振隧穿二极管,它的电流-电压特性曲线中会出现负微分电阻.利用这种负阻效应可以做成高频振荡器和倍频器等电子器件.双势垒结构与通常的双极晶体管结合可以做成共振隧穿双极晶体管,它们可以用来做成多态记忆器和模数转换器等器件.

关键词 共振隧穿,共振隧穿二极管,共振隧穿双极晶体管

RESONANT TUNNELING DEVICES AND THEIR CIRCUIT APPLICATIONS

LI Guo Hua

(National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract Electrons with energy lower than the barrier height can still go through the barrier by tunneling. In the case of double barrier structure the tunneling probability may still approach 1 under certain conditions. This resonant tunneling effect is the basis of the resonant tunneling diode. A negative differential resistance will appear in the I - V characteristic of the diode which can be used to design high frequency oscillator and frequency multipliers. The resonant tunneling bipolar transistor is made by combining a normal bipolar transistor with the double barrier structure. This can be used to design multiple state memories and analog-to-digital converters.

Key words resonant tunneling, resonant tunneling diode, resonant tunneling bipolar transistor

1 引言

半导体电子器件如二极管、三极管等的发明和应用已经有几十年的历史.在这些器件中,电子的运动基本上可以用经典物理的概念来描述.但是,随着近年来半导体材料的生长和制备技术的不断发展,出现了一些新型的电子器件.在这些器件中,电子的波动特性已经不可忽略,电子的运动也必须在量子力学的框架内处理.我们称这类器件为半导体量子电子器件.本讲介绍一种重要的量子电子器件:共振隧穿器件.

众所周知,在经典力学的观点中,一个能量低于势垒的粒子是不能穿过这个势垒的,在势垒后方发现此粒子的几率为零.而在量子力学的观点中,在势垒后方仍有一定几率发现粒子.也就是说,即使粒子的能量低于势垒高度,它仍有一定的几率穿过这个势垒.这种现象就称为量子隧穿现象,它是共振隧穿

器件的主要工作基础.

最早的应用量子隧穿效应的半导体器件是齐纳(Zener)二极管^[1],它是由重掺杂的PN结组成的.由于重掺杂,N区和P区的费米能级已分别进入导带和价带.在PN结两端加上正向偏压时,N区的一部分电子与P区的一部分空穴将具有相同的能量.如果结区很薄,电子可以从N区的导带通过量子隧穿直接到达P区的价带,从而形成隧穿电流.下面可以看到,这种利用量子隧穿效应的二极管的电流-电压特性与一般二极管有很大的不同.

近年来,随着分子束外延(MBE)及金属氧化物气相淀积(MOCVD)等生长方法的出现^[2],薄层异质结构的生长成为现实.例如,人们已经可以在GaAs衬底上生长出只有几个分子层厚的AlAs,从而形成GaAs/AlAs异质结构.因为AlAs的禁带宽度比GaAs大,它成为GaAs导带中电子运动的势垒.由于在这

* 2000-08-01 收到

种结构中势垒可以做得很薄,电子穿过势垒的几率比较大,量子隧穿效应相当显著.从而在这种薄势垒异质结构的基础上发展起来了各种以隧穿效应为工作基础的量子电子器件.本讲首先介绍量子隧穿现象的物理基础和共振隧穿二极管的基本工作原理.然后介绍一些比较成熟的共振隧穿器件以及它们在电路中的应用.

2 双势垒共振隧穿二极管的基本工作原理

首先简单回顾一下量子力学中关于隧穿几率的计算.分子束外延生长的薄层结构中只是在沿生长方向(通常取作 z 方向)形成势垒,载流子在垂直于生长方向的平面内仍可以自由运动.因此在这种结构中的量子隧穿几率仍可以用沿 z 方向的一维模型来计算.设势垒的高度为 V_0 ,宽度为 a ,一个能量为 E 的电子在势垒左、右侧中可以用如下的薛定谔方程描述:

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2\phi}{dz^2} = E\phi, \quad (1)$$

在势垒区中,由于电子势能为 V_0 ,相应的薛定谔方程成为

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2\phi}{dz^2} + V_0\phi = E\phi. \quad (2)$$

解上述的薛定谔方程可以得到 3 个区中的电子波函数.它们分别为

$$\phi_1 = A_1 \exp(ikz) + B_1 \exp(-ikz) \quad (\text{势垒左侧}) \quad (3)$$

$$\phi_2 = A_2 \exp(\gamma z) + B_2 \exp(-\gamma z) \quad (\text{势垒区中}), \quad (4)$$

$$\phi_3 = A_3 \exp(ikz) + B_3 \exp(-ikz) \quad (\text{势垒右侧}) \quad (5)$$

其中 $k = \sqrt{2m^*E/\hbar^2}$ 为波函数的波矢, $\gamma = \sqrt{2m^*(V_0 - E)/\hbar^2}$.利用在各区交接处电子波函数需满足的边界条件,可以得到(3),(4),(5)式中各系数之间的关系.当有一个电子从势垒的左侧入射时,入射波函数为 $A_1 \exp(ikz)$.它到达势垒时,一部分被势垒反射回来,反射波函数为 $B_1 \exp(-ikz)$,另一部分隧穿过势垒继续向右传播,波函数为 $A_3 \exp(ikz)$.在势垒右侧并没有向左传播的波,所以 $B_3 = 0$.电子通过势垒的隧穿几率可以算得为

$$T = \frac{|A_3|^2}{|A_1|^2} = \left| 1 + \frac{1}{4} \left(\alpha + \frac{1}{\alpha} \right)^2 \text{sh}^2(\gamma a) \right|^{-1}, \quad (6)$$

其中 $\alpha = \gamma/k$.在势垒很薄时,单势垒的隧穿几率可以进一步简化成

$$T \approx \frac{16}{(\alpha + 1/\alpha)^2} e^{-2\gamma a}, \quad (7)$$

它表明隧穿几率随势垒的宽度指数下降.

如果两个势垒结合形成双势垒,它们之间的距离为 b .利用单势垒的隧穿几率的计算公式,我们可以很容易得到双势垒的隧穿几率.为了讨论的方便,通常用单势垒的透射(隧穿)几率 T 和反射几率 R ($R = 1 - T$) 来表示双势垒的隧穿几率:

$$T_D = \left| 1 + \frac{4R}{T^2} \cos^2(\theta - kb) \right|^{-1}, \quad (8)$$

其中 θ 由

$$\text{tg } \theta = 1/2 (\alpha - 1/\alpha) \text{th}(\gamma a) \quad (9)$$

确定.由于通常单势垒的透射几率 T 很小,当 $\cos(\theta - kb) \neq 0$ 时,双势垒的隧穿几率 T_D 近似为两个单势垒隧穿几率的乘积,相当于电子连续穿过两个相同的单势垒.但是当 $\cos(\theta - kb) = 0$ 时,双势垒的隧穿几率 $T_D = 1$,即电子可以无阻碍地穿过双势垒.这种现象称为双势垒的共振隧穿.它可以用一个很形象的物理图像来描述.因为两个势垒之间的部分实际上是一个阱宽为 b 、垒高为 V_0 的量子阱,而在量子阱中由于局域效应存在着一系列量子能级.当 $\cos(\theta - kb) = 0$ 时,入射电子的能量正好与两个势垒之间的量子阱中的某一个量子能级的能量相同,通常称为入射电子与阱中的电子能级共振.这时由于量子干涉效应,电子就可以共振隧穿过双势垒.图 1 给

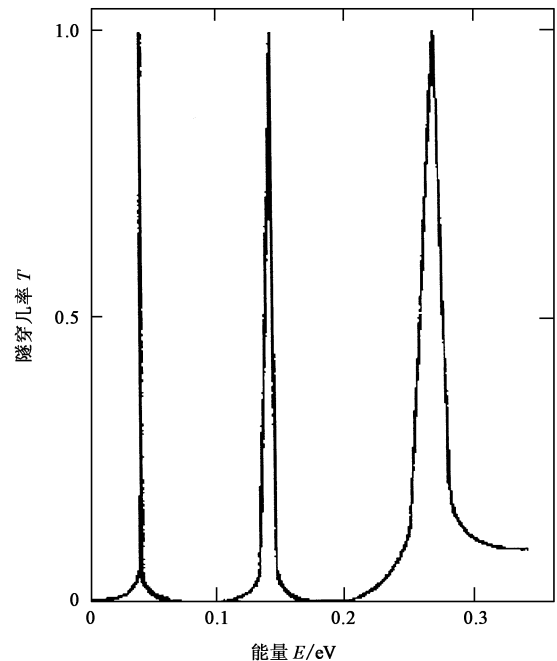


图 1 一个实际的双势垒结构的隧穿几率

出了计算得到的一个实际的双势垒结构的隧穿几率^[3].势垒高度为 300meV,宽度为 4nm,两个势垒之间的阱宽为 10nm.从图 1 可以看到,隧穿几率有 3 个锐的高峰,分别对应于入射电子与阱中的 3 个电子能级的共振隧穿,而在其他能量处则隧穿几率很小.这就是共振隧穿的基本特征.

共振隧穿现象可以用来制作双势垒共振隧穿二极管.它的主要部分是双势垒结构,势垒两侧均为 n^+ 重掺杂区,其中电子费米能级已进入导带.阱的宽度设计得在不加偏压时,阱中的第一个量子化能级 E_0 高于势垒两侧 n^+ 区中的电子费米能级 E_F ,这时发射极中所有电子的能量都小于 E_0 ,无共振隧穿发生.二极管的电流很小.如果我们在二极管的两端加上电压,发射极的电子费米能级将提高.当外加电压使发射极的 E_F 与 E_0 持平时,开始发生共振隧穿.随着外加电压的继续增加,发射极中可以参加隧穿的电子越来越多,电流迅速增加.当外加电压使发射极导带底能级 E_c 与 E_0 相等时,发射极导带中所有电子均可参加隧穿,电流达到最大,通常称为峰电流.电压进一步增加,发射极导带底能级 E_c 高于 E_0 ,这时所有的电子都不再满足隧穿条件,电流迅速降为零.在电流下降的过程中,二极管的微分电阻 $dI/dV < 0$,通常称为负阻,是双势垒共振隧穿二极管的基本特征.在实际器件中,由于热激发和其他隧穿渠道的影响,电流并不完全降为零,而是降到某一个值,称为谷电流.通常用峰谷比(峰电流/谷电流)来作为描述共振隧穿二极管的特性的的重要参数之一.如果量子阱中存在第二个子能级,那么当电压进

一步升高时, $I - V$ 特性曲线中会出现第二个共振峰.

图 2 给出了一个由 GaAs/AlGaAs 双势垒结构组成的双势垒共振隧穿二极管的电流电压特性曲线^[4].在 25K 时,可以看到明显的负微分电阻效应,正向峰谷比为 6:1.在 230K 时, $I - V$ 特性曲线中只有一个小的隆起,300K 时已看不见任何结构.这是因为温度升高后,电子可以通过热激发而越过势垒,共振隧穿电流被热激发产生的电流所掩盖.这也表明,共振隧穿二极管通常需要在低温下才能工作.近年来随着材料质量的提高和选用势垒更高的材料,已经出现了可在室温下工作的器件.

3 共振隧穿二极管的电路应用

利用共振隧穿二极管的负阻效应可以做成高频振荡器.它的最高工作频率主要由双势垒结构中电子的响应时间决定.它由两部分组成:第一部分是阱中电子的寿命,对于 2.5nm 厚的 AlAs 垒,阱中电子的寿命约为 4ps,对应的工作频率为 40GHz;第二部分为电子越过耗尽层的时间,约 0.16—0.69ps.因此用共振隧穿二极管做成的振荡器可以工作在微波和毫米波波段.

图 3 是一个振荡器的器件结构^[5],其势垒为 1.5nm 的 AlAs 层,势阱为 4.5nm 的 GaAs 层,垒外区域为 n 型 GaAs 层.器件做成台面结构,台面直径约 4 μ m.在 300K 下,它的电流电压特性曲线中的峰谷比为 3.5:1.它的等效电路如图 3 中的小图所示,其中 $G(V)$ 表示双势垒结构的动态电导, R_s 为串联电阻, C 为并联电容,整个器件的阻抗可写成

$$Z = R_s + (G + i2\pi fC)^{-1} \quad (10)$$

它的实部为

$$\text{Re}\{Z\} = R + \frac{G}{G^2 + (2\pi fC)^2} \quad (11)$$

很容易算得实部为负阻的条件是

$$f < f_{\max} = \frac{1}{2\pi C} \left| \frac{G_{\max}}{R_s} - G_{\max}^2 \right|^{1/2} \quad (12)$$

其中 G_{\max} 是负阻区域最大的负动态电导,当振荡频率高于 f_{\max} 时,振荡停止.实际测得这个振荡器的振荡频率为 200GHz,输出功率为 $P_{\max} = 225\mu$ W.

共振隧穿二极管也可以用在直流电路中.这里介绍一种由两个共振隧穿二极管组合在一起做成的水平集成器件^[6].它的 $I - V$ 特性曲线中可以有多个共振峰,而且各峰对应的电流基本相同.图 4 中的

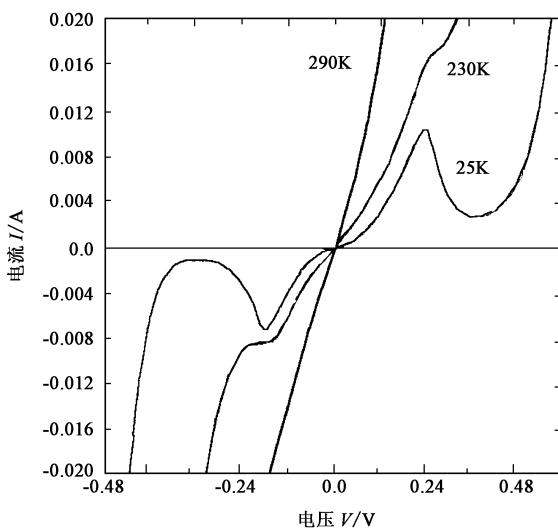


图 2 GaAs/AlGaAs 双势垒结构的 $I - V$ 特性曲线

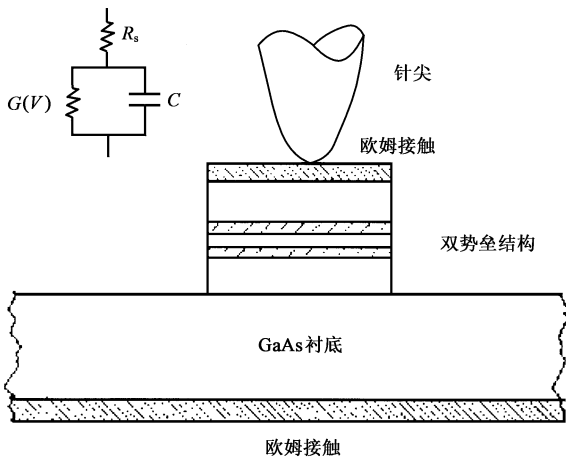


图3 共振隧穿振荡器的器件结构

插图是这种集成二极管的等效电路.两个共振隧穿二极管 AS 和 BS 并联,AB 之间有一个电阻相连.此电阻来自器件中两个隧穿二极管之间的未掺杂 GaAs 层.在工作时,A 极接地,SA 之间加上正向电压 V_{SA} ,测量流过 S 的电流 I_S 随 V_{SA} 的变化.而 BA 之间的电压 V_{BA} 用来作为可调参数, V_{BA} 可正可负.因为 I_S 包括了两个隧穿二极管的电流,所以当 $V_{BA} \neq 0$ 时,二极管 SA 和 SB 在不同的电压下淬灭. $I_S - V_{SA}$ 特性曲线中出现二个峰,但峰值电流基本相同.

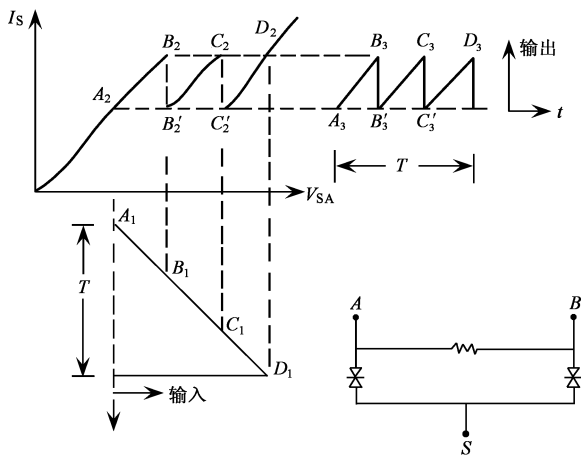


图4 用水平集成隧穿二极管做成的倍频器的工作原理
(插图是二极管的等效电路)

图4是用集成二极管做成的倍频器的工作原理.集成二极管的 $I_S - V_{SA}$ 特性曲线为双峰结构,选择器件的静态工作点在特性曲线中的 A_2 点.当输入电压从 A_1 点增加到 B_1 点时,输出电流从 A_3 点增加到 B_3 点,对应于 $I_S - V_{SA}$ 特性曲线中的 A_2 点

到 B_2 点.输入电压从 B_1 点再增加一点点,由于负阻效应,相应的工作点从特性曲线中的 B_2 点落到 B'_2 点,输出电流也从 B_3 减小到 B'_3 .输入电压继续增加到 C_1 点,输出电流也增加到 C_3 点.然后对应于 $I_S - V_{SA}$ 特性曲线中的第二个峰值,输出电流又一次下降到 C'_3 点.输入电压增加到最大值 D_1 点时,输出电流再一次增加到 D_3 点.然后输入电压突然下降到初始值,器件工作点也回到 A_2 点.相应的输出电流也下降到最低值.这样循环往复,在器件的输入端输入一个锯齿波就可以在器件的输出端得到三个锯齿波.即输出频率是输入频率的3倍(3倍频).这种倍频器最主要的特点是不管输入信号的频率多高,都可以保持严格的3倍频.

4 共振隧穿双极晶体管

双势垒结构也可以与通常的双极晶体管结合起来做成共振隧穿双极晶体管.通常的单异质结双极晶体管如图5(a)所示.它的发射极为 n 型 AlGaAs,基极为 p 型 GaAs 层,集电极为 n 型 GaAs 层.在工作时,发射结正向偏置,电子从发射极注入.由于基极很薄,大部分注入的电子可以扩散到集电极.集电极反向偏置,扩散过来的电子很快扫入集电极形成集电极电流.共振隧穿双极晶体管是在通常的单异质结晶体管的基极上做上双势垒,如图5(b)所示.此时隧穿条件的满足不是通过在双势垒两端加偏压,而是利用从发射极注入的电子本身携带的能量.当

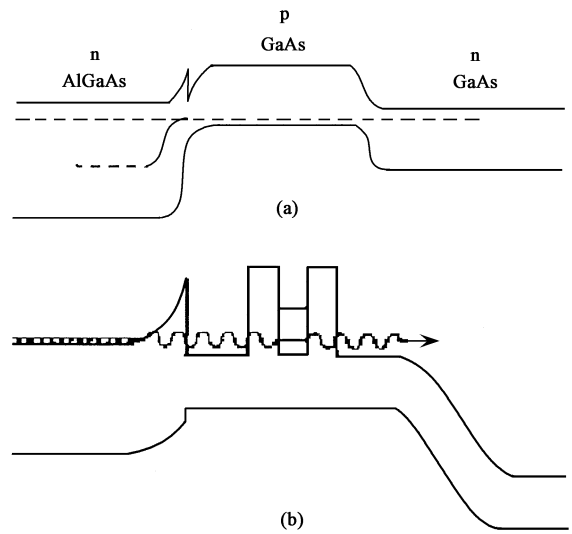


图5

(a) 单异质结 n-p-n 双极晶体管;(b) 共振隧穿双极晶体管

共振条件满足时,发射极注入的电子可以越过基极到达集电极,晶体管导通,集电极电流很大.当共振条件不满足时,发射极注入的电子不能越过基极,晶体管截止,集电极电流很小.

共振隧穿双极晶体管也有很多电路应用.图 6(a) 为利用共振隧穿双极晶体管做成的多态记忆器^[7].基极和集电极之间的电压 V_{BC} 为固定值,而发射极和集电极之间的电压 V_{CE} 可以改变.当注入电子的能量满足共振条件时,晶体管导通,集电极电流 I_C 很大;反之,晶体管截止, I_C 很小.如果在双势垒结构的势阱中有几个等间距的量子能级,则 I_C 出现多次峰值,如图 6(a) 中所示.接上外电路 V_{CC} 和 R_L 以后,负载线与 $I_C - V_{CE}$ 特性曲线交于 1, 2, 3 三个稳定工作点,成为三态记忆器.通过瞬时加一电压 V_{in} ,可以使工作点在这三个点之间转换.

图 6(b) 给出了用几个共振隧穿双极晶体管组成的模数转换器^[7]的电路图和工作原理.一个模拟电压通过不同的分压网络加到各个晶体管上.每个晶体管均采用共发射极电路,其输入输出曲线都具

有多值特性.设晶体管 Q_1 上的基极电压沿图 6(b) 中的 V_{B1} 线变化,晶体管 Q_2 上的基极电压沿 V_{B2} 线变化.根据图中所示的 $V_i - V_B$ 关系,当 $V_i = V_1$ 时, $V_{B1} = V_{B2} = 0$. Q_1 和 Q_2 管均截止,输出均是高电平(记作 1).而当 $V_i = V_2$ 时, Q_2 管未达共振,输出仍是高电平 1, Q_1 管已达共振,输出为低电平(记作 0). $V_i = V_3$ 时正好相反, Q_2 管共振,输出为 0, Q_1 管截止,输出为 1.当 $V_i = V_4$ 时, Q_1 和 Q_2 管均共振,输出均为 0.这样,随着模拟电压 V_i 的变化,可以在 Q_1 或 Q_2 管的输出端得到数字输出,如图 6(b) 中的真值表所示.

5 结束语

在量子力学的观点下,能量低于势垒高度的电子可以隧穿通过势垒.当电子能量与双势垒之间的量子阱中局域能级的能量相同时,电子可以无阻碍地穿过双势垒,隧穿几率近似为 1.利用共振隧穿效应可以做成双势垒共振隧穿晶体管.它的电流-电压特性曲线会出现负微分电阻.这是共振隧穿二极管的主要特点.利用共振隧穿二极管的负阻效应可以做成高频振荡器.它的工作频率在微波和毫米波段.共振隧穿二极管也可以用在直流电路中.用两个双势垒结构组成的集成二极管可以用来做成倍频器.在它的输入端输入一个锯齿波可以在输出端得到三个锯齿波,实现严格的三倍频.双势垒结构也可以与通常的双极晶体管结合起来做成共振隧穿双极晶体管.利用这种晶体管可以做成多态记忆器和模数转换器.

参 考 文 献

- [1] Esaki L. Phys. Rev., 1958, 109: 603
- [2] Cho A Y, Arthur J R. Progr. Solid State Chem., 1975, 10: 157
- [3] 夏建白,朱邦芬.半导体超晶格物理.上海:上海科学技术出版社,1995.344[Xia J B, Zhu B F. Semiconductor Superlattices Physics. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publication, 1995. 344(in Chinese)]
- [4] Sollner T C L G, Goodhue W D, Tannenwald P E *et al.* Appl. Phys. Lett., 1983, 43: 588
- [5] Sollner T C L G, Brown E R, Goodhue W D *et al.* Physics of Quantum Electron Devices (Edited by F. Capasso). Berlin: Springer Verlag, 1990. 147
- [6] Sen S, Capasso F, Cho A Y *et al.* IEEE Trans. Electron Dev., 1987, ED-34: 2185
- [7] Sollner T C L G, Brown E R, Goodhue W D *et al.* Physics of Quantum Electron Devices (Edited by F. Capasso). Berlin: Springer Verlag, 1990. 218

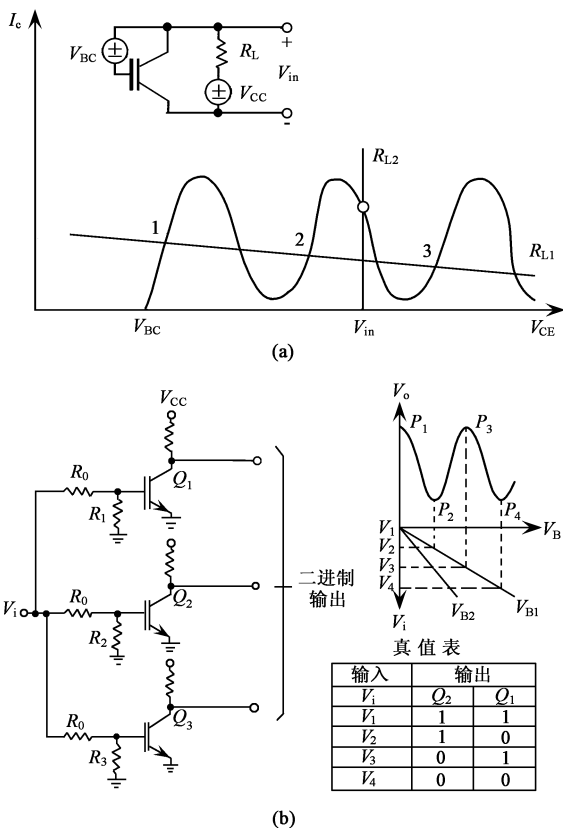


图 6

- (a) 用共振隧穿双极晶体管做成的多态记忆器;
 (b) 用共振隧穿双极晶体管做成的模数转换器