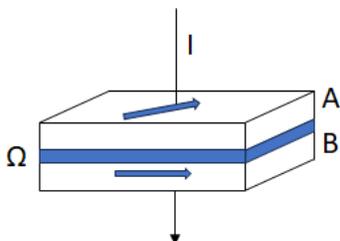


基于穿隧磁阻效应(TMR)的车规级电流传感器

AN-PIHER-002

穿隧磁阻效应 (Tunnel Magnetoresistance, 简称 TMR) , 就是利用了量子隧穿。

TMR 参数是描述电子通过磁性隧道结的电阻变化的效应, 这是一个纯粹的量子效应, 其背后的物理机制就是量子隧穿。在 TMR 效应中, 两个磁性电极之间的绝缘层非常薄 (下图示意图中的中间层, 只有几个纳米), 电子可以通过量子隧穿效应穿过这个绝缘层。当两个磁性电极的磁化方向平行时, 电子的隧穿概率大; 而当两个磁性电极的磁化方向反平行时, 电子的隧穿概率小, 从而造成了电阻的变化。



提及绝缘体, 经典的物理理论中, 如果在磁性电极 A 和 B 之间存在绝缘体, 那么施加在 A 和 B 上的电压差即使在稳态没有击穿的情况下, 通过的电流也将是 0。如果这个绝缘层只有几个纳米时, 讨论就需要转到量子领域了, 而之前的这种 “常识” 将不再成立。解释就要用到如下的薛定谔方程[1] 来说明粒子 (这里为电子) 隧道效应。

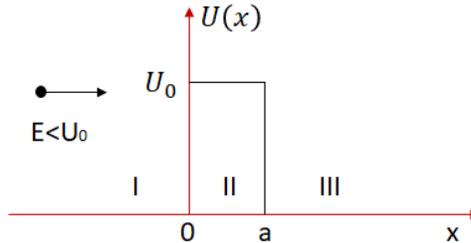
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \times \nabla^2 \Psi + U(\mathbf{r}) \cdot \Psi = E \cdot \Psi$$

其中:

- Ψ 是粒子的波函数;
- \hbar 是约化普朗克常数, $\hbar = h/2\pi$;
- m 是粒子的质量;
- $U(\mathbf{r})$ 是粒子所在位置的势能;
- E 是粒子的总能量;
- ∇^2 是拉普拉斯算符: $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

我们将上面的三维方程特例化到一个一维势场里。设有一维势场[1]:

$$U(x) \begin{cases} U_0 & 0 \leq x \leq a \\ 0 & x < 0, x > a \end{cases}$$



在经典理论中，只有能量 $E > U_0$ 的粒子才可以越过势垒，而且不会被势垒反弹；而 $E < U_0$ 的粒子将全部在 $x=0$ 处被反弹，无法透过势垒。而按量子力学理论， $E > U_0$ 的粒子在 $x=0$ 处也可能被反射； $E < U_0$ 的粒子也可以透过势垒从 I 区到达 III 区。

当粒子总能量 $E < U_0$ 时，粒子在各区的波函数分别为[1]:

$$\begin{cases} \Psi_1 = Ae^{ik_1x} + A'e^{-ik_1x}, & x < 0 \\ \Psi_2 = Be^{-k_3x} + B'e^{k_3x}, & 0 \leq x \leq a \\ \Psi_3 = Ce^{ik_1x}, & x > a \end{cases}$$

A, A', B, B'及 C 为可解系数，其中，

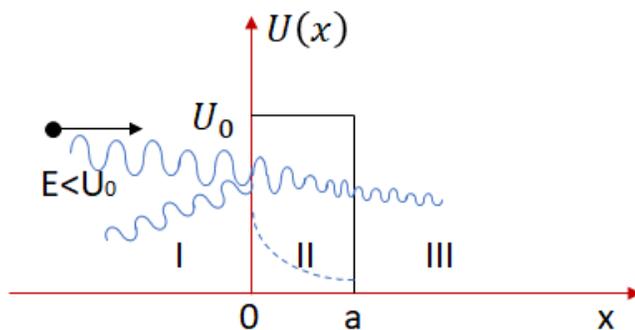
$$k_1^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$$

$$k_2 = ik_3$$

$$k_3 = \sqrt{\frac{2m(U_0 - E)}{\hbar^2}}$$

在一定条件下($E < U_0$)，粒子的透射率 D 随着势垒宽度 a 的加宽而呈指数下降[1]:

$$D = \frac{16E(U_0 - E)}{U_0^2} e^{-\left(\frac{2}{\hbar}\right)\sqrt{2m(U_0 - E)}a}$$



我们从下表的数据看粒子的透射几率来比较一下各个参数的影响如何。以电子透射方势垒为例： $U_0=1.10\text{eV}$ ， $E=0.10\text{eV}$ ，当 a 值变化时，电子的透射率 D [1]：

$a(\text{nm})$	0.10	0.20	0.50	1.0	5.0
D	0.37	0.14	0.007	4.5×10^{-5}	2×10^{-22}

从数据可以看出，只有在这个势垒厚度足够小时，才可以出现明显的隧道效应，而实际生活中面对比这些 nm 级的尺寸大得多的宏观物体而言，完全没必要担心某天会在你的家里发现一个穿墙而过的道士。

TMR，其工作原理深深地根植于量子物理学的核心。而在这背后，静静地默默发挥作用的，便是薛定谔方程。薛定谔方程是量子力学中的基本方程，它是一种描述微观粒子如何在特定外力作用下演化的规律。在 TMR 电流传感器中，薛定谔方程被用来描述和解释电子如何隧穿通过磁性绝缘层。

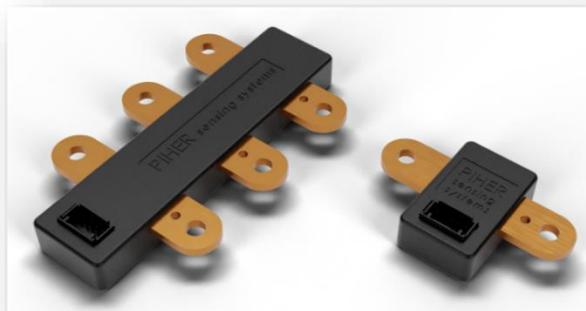
TMR 传感器主要由两个磁性电极和中间的绝缘层构成，其中隧穿发生在这两个电极之间的绝缘层。两个磁性电极分别为固定层和自由层，前者磁场方向固定，后者磁场方向根据外部磁场方向而变。在这个极薄的绝缘层中，电子似乎“不可能”通过。然而，量子力学的薛定谔方程却告诉我们：“不可能”的事情在微观世界里确实可能发生。这就引出了电子的量子隧穿现象。其实质是当电子遇到大于其能量的势垒时，它仍然有一定概率通过，而这一概率可由解薛定谔方程获得 (Ψ^2 ，粒子的几率密度)。

随着磁场的改变，例如在二维平面上磁极的磁化方向从平行变为反平行，量子隧穿通过绝缘层的电子的薛定谔波函数发生变化，那么由此通过隧穿效应产生的电流也会发生变化相应减小，对应的阻值达到最大；反之，两个磁性电极的磁场方向平行一致时，对应的阻值为最小。于是，定义了磁极磁化方向的磁场变化导致了穿隧电流的变化，从而改变了整个器件的电阻，即 TMR 效应。

因此，薛定谔方程在 TMR 电流传感器原理中起着核心作用，它不仅解释了电子的量子隧穿现象，也为计算穿隧电流提供了理论依据。

克服 TMR 技术对于温度和磁场环境变化的稳定性等较高要求的约束，安费诺传感器 Piher 传感系统，提供了一款基于 TMR 技术的车规级电流传感器，参数如下。

参数	单位	Min.	Typ.	Max.
测量电流类型			交流/直流	
测量电流范围	A			4000
工作电压	V	4.75	5	5.5
工作电流	mA	6		9
输出信号	V	0.5		4.5
响应时间	usec		0.3	
频率带宽	MHz	0		1
偏差(25C, Vcc=5V)			<1%	
工作温度范围	°C	-40		125



该系列产品和其他安费诺基于霍尔效应的电流传感器系列，在：

- 电动汽车(EV)的电池管理,
- 电机控制,
- EV 的逆变系统
- 以及 DC/DC 转换系统

方面都可以发挥其独特的功能和作用。

[参考文献]

[1] 《理论物理导论》,第三版,北京理工大学出版社

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

©2023 AMPHENOL CORPORATION PROVIDES TECHNICAL AND DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES “AS IS” AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with AAS products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate AAS products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, or other requirements. These resources are subject to change without notice. AAS grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the AAS products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other AAS intellectual property right or to any third party intellectual property right. AAS disclaims responsibility for, and you will fully indemnify AAS and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources. Other company names and product names used in this document are registered trademarks of their respective owners.



服务热线: 400 620 8986

www.amphenol-sensors.com

www.amphenol-sensors.cn

Amphenol Sensors

©2021 Amphenol Corporation. All Rights Reserved.