

# 磁性隧道结中的量子相干输运研究<sup>\*</sup>

杨 军<sup>†</sup> 武文远 龚艳春

(解放军理工大学理学院, 南京 211101)

(2007 年 3 月 4 日收到, 2007 年 5 月 24 日收到修改稿)

采用散射矩阵的方法研究了铁磁/绝缘层/半导体/绝缘层/铁磁(FM/I/SM/I/FM)磁性双隧道结的量子相干输运特性. 研究发现当隧穿电子平均自由程( $l_p$ )和中间层半导体厚度( $L$ )可比拟时双结隧道磁阻(TMR)将随  $L$  的变化产生量子振荡, 当  $l_p$  远大于  $L$  时振荡拐点处出现 cut-off 波矢, 分析表明 cut-off 波矢主要是来自于隧道结两边的铁磁和半导体层隧穿电子动量波矢的高度不匹配性. 随着  $L$  的增加, 隧穿电子相位损失导致的振荡振幅衰减将压制 cut-off 波矢的出现. 当  $L$  远大于  $l_p$  时, TMR 将直接为单结自旋注入效率(SIE)大小  $\eta_1$  或双结(平行结构)SIE 大小  $\eta_2$  的平方. 因此可以通过测量双结的 TMR 数值来推出单结或双结 SIE 的大小, 数值计算表明当  $L$  与  $l_p$  可比拟时, TMR 与双结 SIE 的平方  $\eta_2^2$  的比值  $TMR/\eta_2^2$  也将会随  $L$  的变化呈现出量子振荡效应.

关键词: cut-off 波矢, 量子相干, 振荡, 隧道磁阻

PACC: 7200, 7210, 7340G

## 1. 引 言

近年来, 自旋电子学由于其巨大的应用前景引起了人们的广泛关注, 基于自旋输运的磁性隧道结的研究也因此成为热点. 在磁性隧道结中, FM/I/FM 结构越来越受到人们的重视<sup>[1]</sup>, 这里 FM 表示铁磁金属电极, I 表示绝缘层. 如果在 FM/I/FM 结构的磁性隧道结中间再加上一个非磁金属(NM)<sup>[2,3]</sup>或半导体(SM)<sup>[4,5]</sup>或超导体(SC)<sup>[6]</sup>构成一个 FM/I/A/I/FM 双势垒结构则其物理内容将会更加丰富. 这里的 A 代表非磁金属(NM)或半导体(SM)或超导体(SC). 对于这样的一个双势垒的双结结构, 如果双结是在几个纳米的尺寸范围, 则此结构就是一个典型的介观系统, 此时相干隧穿在这个系统中将起主要作用, 可以预见的是如果将自旋自由度引入到此介观系统中将会呈现出更多的物理效应.

对于 FM/I/A/I/FM 磁性双结结构, 理论上已经预言了该系统的 TMR 将会随中间层厚度的改变而产生振荡, 这主要是因为隧穿电子的极化随电子隧穿的相干性而产生振荡<sup>[7-9]</sup>.

## 2. 结构模型

由于半导体中电子具有理想的相干长度, 且半导体具有良好的性价比, 所以半导体磁性隧道结引起了人们的更大关注. 本文对 FM/I/SM/I/FM 磁性双隧道结进行了研究. 考虑到电子在 FM/I/SM/I/FM 双结中的隧穿过程包括弹道输运(ballistic)和扩散输运(diffusive)两部分组成. 在 SM 区里, 考虑有一部分隧穿电子是弹道输运, 剩下的则是扩散输运. 自旋极化电子的弹道输运导致了 TMR 的振荡而扩散输运部分则导致了 TMR 的衰减.

对于弹道输运和扩散输运同时存在的情况, 如图 1 所示, 用  $T^C$  和  $T^S$  分别表示通过双结的弹道输运和扩散输运透射系数, 用  $R^C$  和  $R^S$  分别表示通过双结的弹道输运和扩散输运反射系数. 这时扩散输运电子在半导体层中将会由于受到非弹性散射而导致动量发生改变, 在此引入一个  $l_p$  表示隧穿电子平均自由程, 也就是隧穿电子相位弛豫长度,  $L$  表示中间层半导体厚度, 用  $\exp(-L/l_p)$  来表示因相位的损失而导致的相干输运部分的衰减, 于是有<sup>[10]</sup>

$$T^C = \frac{T_1 T_2 e^{-2L/l_p}}{1 + R_1 R_2 e^{-4L/l_p} - 2\sqrt{R_1 R_2} e^{-2L/l_p} \cos\theta} \quad (1)$$

<sup>\*</sup> 解放军理工大学预研基金(批准号 D605002)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: hfaiu@163.com

$$R^C = \frac{R_1 + R_2 e^{-4L/l_p} - 2\sqrt{R_1 R_2} e^{-2L/l_p} \cos\theta}{1 + R_1 R_2 e^{-4L/l_p} - 2\sqrt{R_1 R_2} e^{-2L/l_p} \cos\theta} \quad (2)$$

这里的  $\theta = kL$ ,  $k$  为半导体层的运输电子沿(001)方向的波矢,  $T_1, T_2, R_1, R_2$  分别为两个单结的透射和反射系数. 在此情况下,  $T^C + R^C < 1$  所以  $T^S = 1 - T^C - R^C$  是半导体层中扩散运输部分的透射系数. 根据 Yang 等人的工作<sup>[9]</sup>, 电子包括弹道运输和扩散运输的总的双结透射系数为

$$T = T^C + \frac{(1 - T^C - R^C)\bar{T}_2}{1 - \bar{R}_1 \bar{R}_2}. \quad (3)$$

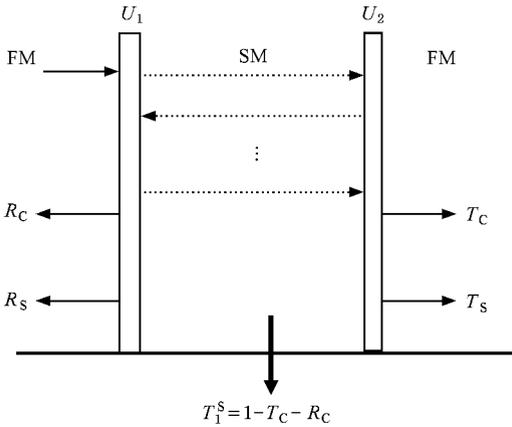


图1 电子在 FM/SM/FM 双结中的弹道运输和扩散运输示意图

需要指出的是, 弹道散射区相干输运透射系数的平均值  $T^C(\theta)$  (这里的  $\theta$  表示入射角度) 近似等于扩散散射区的透射系数  $T^S$ , 由于扩散散射区的  $k$  波矢在平行方向的分量  $k_{\parallel}$  将不再守恒, 我们用透射系数的平均值  $\bar{T}_1$  ( $\bar{T}_2$ ) 来表示左右势垒不同  $k$  波矢方向电子的总透射系数, 两个势垒上的平均反射系数分别为  $\bar{R}_1 = 1 - \bar{T}_1$  和  $\bar{R}_2 = 1 - \bar{T}_2$ .

### 3. 数值结果及讨论

实际上方程(3)和方程(1)(2)共同确定了这个双结的总的透射系数. 这里的透射系数在磁性隧道结中是自旋相关的, 在方程(3)中还看不出这种相关性, 下面将就此展开讨论.

对于形如 FM/I/SM 的隧道单结, 有研究表明采用矩形势垒和  $\delta$  势垒其差别是不大的<sup>[11]</sup>, 在数值计算中将绝缘层近似看作  $\delta$  势垒, 则单结自旋多数载流子 ( $\sigma = \uparrow$ ) 或自旋少数载流子 ( $\sigma = \downarrow$ ) 的自旋相关隧穿透射系数为

$$T_{\sigma} = \frac{4\beta_{\sigma}}{(1 + \beta_{\sigma})^2 + Z_{\sigma}^2}, \quad (4)$$

这里的  $\beta_{\sigma} = v_{sm}^x/v_{FM}^x$ ,  $Z_{\sigma} = 2U/\hbar v_{FM}^x$ ,  $v_{FM}^x$  和  $v_{sm}^x$  分别表示 FM 和 SM 电极中的费米速度沿  $x$  轴(垂直隧道结界面方向)的分量.  $U$  表示  $\delta$  势垒的强度. 相干隧穿过程中平行界面方向上的动量要求守恒, 而 FM 中自旋向上电子的动量大于自旋向下电子动量, 所以自旋向上电子能够通过隧道结的角度必然小于自旋向下电子, 即隧穿临界角  $\phi_{\uparrow}^C < \phi_{\downarrow}^C$ . 又因为在 FM 电极中自旋向上和自旋向下电子的动量都远大于半导体中电子动量, 所以只有那些平行于  $x$  轴方向的隧穿电子对电导起主导作用, 考虑到这些因素, 单结的隧穿电导可以简化为线性关系<sup>[12]</sup>, 即

$$G_{\sigma} \approx \frac{e^2 k^{sm}}{h\pi} T^{\sigma}(0), \quad (5)$$

这里的  $k^{sm}$  表示半导体层的动量波矢, 此式也表明, 电子在由 FM 和 SM 组成的异质结输运过程中, SM 的模式数将起关键作用. 将隧道磁阻定义为  $TMR = G_P - G_{AP}/G_P$ , 其中  $G_P$  和  $G_{AP}$  分别表示平行结构和反平行结构时的电导. 单结的自旋注入效率  $\eta_1 = \frac{G_{\uparrow} - G_{\downarrow}}{G_{\uparrow} + G_{\downarrow}}$ , 其中  $G_{\uparrow}$  和  $G_{\downarrow}$  为通过单结自旋向上和向下电子的电导, 双结的自旋注入效率  $\eta_2 = \frac{G_{P\uparrow} - G_{P\downarrow}}{G_{P\uparrow} + G_{P\downarrow}}$ , 其中  $G_{P\uparrow}$  和  $G_{P\downarrow}$  为平行结构排列时通过隧道结自旋向上和向下电子的电导. 将 FM 和 SM 层的分别为取为金属 Fe 和半导体 InAs<sup>[13]</sup>, 相应地, FM 的费米波矢  $k_{\uparrow} = 1.08 \times 10^8/\text{cm}$ ,  $k_{\downarrow} = 0.44 \times 10^8/\text{cm}$ , SM 中电子态密度为  $n_{sm} = 1.0 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ , 用自由电子有效质量  $m_e$  作为 FM 中电子的有效质量, 而 SM 中电子有效质量  $m_{sm} = 0.036m_e$ , 半导体层电子相干长度  $l_p = 100 \text{ nm}$ , 无量纲参数  $Z_0$  取为  $Z_0 = 5.0$ , 文中各图所取参数无特殊说明则都为前所述.

#### 3.1. TMR 及单、双结 SIE 与 $L$ 间的变化关系

TMR 随  $L$  的变化关系见图 2, 从图中可以看出双结 TMR 随  $L$  变化产生周期性振荡, 这种周期性振荡源主要源自于电子相干隧穿时的量子干涉效应, 图 2 中的小图为其他参数不变,  $l_p$  取为 1000 nm 时在半导体厚度  $L = 12.5 \text{ nm}$  附近振荡拐点处的局部放大图, 小图中显示当  $L$  远小于  $l_p$  时振荡拐点处出现明显的 cut-off 波矢, 这主要是源自于隧道结两边 FM 层和 SM 层隧穿电子动量波矢的高度不匹配

性<sup>[14]</sup> 数值计算显示随着  $L$  的增加 cut-off 波矢逐渐消失,这主要是因为由于运输电子的相位损失导致的振荡振幅衰减压制了 cut-off 波矢.  $TMR/\eta_1^2$  随  $L$  的变化关系如图 3 所示,这里的  $\eta_1$  为单结的 SIE 的大小.从图 3 中可以看出当  $L$  与  $l_p$  可比拟时,由于量子干涉效应比率  $TMR/\eta_1^2$  随  $L$  的变化产生振荡,当  $L$  增大时,振荡将会逐渐消失,此时顺序隧穿就会取代相干隧穿占据主导地位,随着  $L$  逐渐大于  $l_p$ ,  $TMR/\eta_1^2$  将以  $e$  指数衰减到 1<sup>[8]</sup>,这也证实了在顺序隧穿和两边势垒相同的情况下有  $TMR = \eta_1^2$  关系<sup>[15]</sup>,也就是说可以通过测量双结的 TMR 来间接得到单结的 SIE 的大小.

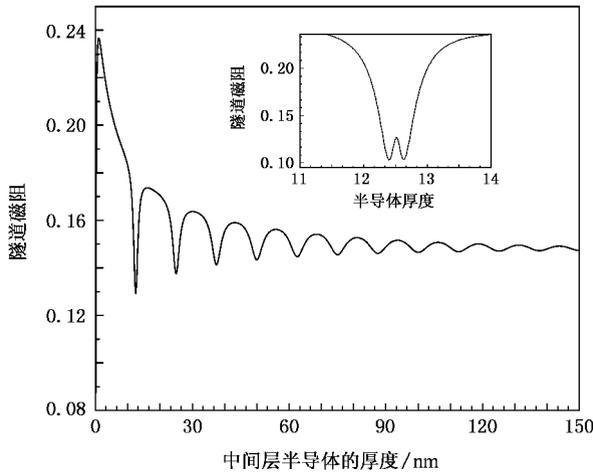


图 2 隧道磁阻随中间半导体层厚度变化情况关系图

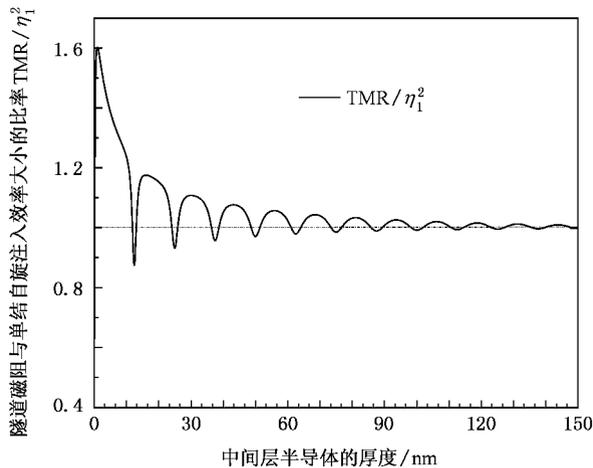


图 3 隧道磁阻和单结自旋注入效率的比率随中间层半导体厚度变化关系图

图 4 为单、双结 SIE 的大小  $\eta_{1,2}$  与  $L$  变化关系,从图中可以看出双结的  $\eta_2$  (平行结构) 也随  $L$  的变

化呈周期性振荡,且当  $L$  远大于运输电子的  $l_p$  时双结的  $\eta_2$  就等于单结的  $\eta_1$ ,这也给测量双结 SIE 的大小提供了一种选择.

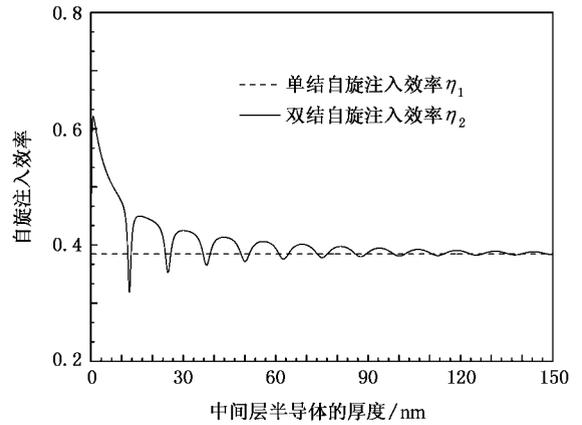


图 4 自旋注入效率随中间层半导体厚度变化情况关系图

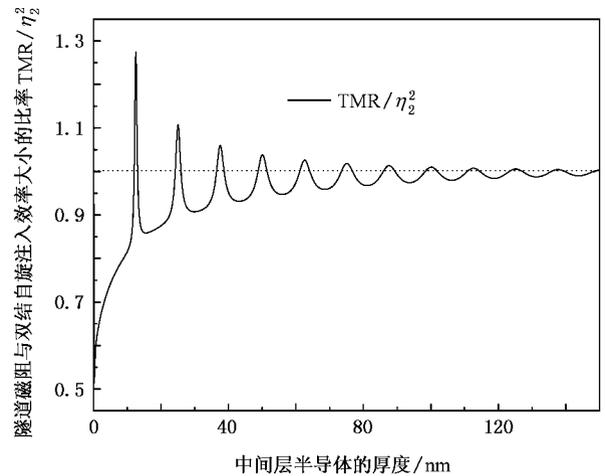


图 5 隧道磁阻和双结自旋注入效率的比率随中间层半导体厚度变化关系图

图 5 为 TMR 与双结  $\eta_2^2$  的比率随  $L$  的变化关系图,从图中可以看出 TMR 与双结  $\eta_2^2$  的比率随  $L$  的变化同样产生量子振荡,不过其振荡平均值不再等于 1,但在顺序隧穿区 TMR 和双结的  $\eta_2$  同样满足关系  $TMR = \eta_2^2$ .图 5 中还可以看出在顺序隧穿区双结  $\eta_2^2$  与 TMR 基本上成线性变化的,且可以近似认为  $\eta_2 \propto P$  根据 M. Julliere 模型  $TMR/\eta_2^2 = \frac{2P^2}{(1+P^2)}$   $P^2 = \frac{2}{1+P^2} \approx \frac{1}{\eta_2}$ ,所以  $TMR/\eta_2^2$  与  $\eta_2$  近似成反比关系,从振荡图像上看应有  $\pi$  相位差,图 5 中证实了这种关系.通过数值计算还表明,随着两边铁磁层交换

能的增大,  $TMR/\eta_{1,2}^2$  将趋于 1, 当  $\Delta = E_F$  时(如半金属)则无论  $L$  如何变化,  $TMR/\eta_{1,2}^2$  将都等于 1.

### 3.2. TMR 及单、双结 SIE 与铁磁层交换能间的变化关系

图 6 给出了 TMR 及单、双结 SIE 的大小随铁磁层交换能的大小变化关系图, 可以看出 TMR 和单、双结 SIE 的大小  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  随铁磁层交换能的增大而递增,  $\eta_2$  的增幅要大于  $\eta_1$ , 增大的幅度开始比较平缓而当  $\Delta$  接近于  $E_F$  时则快速递增到接近 100%, 这说

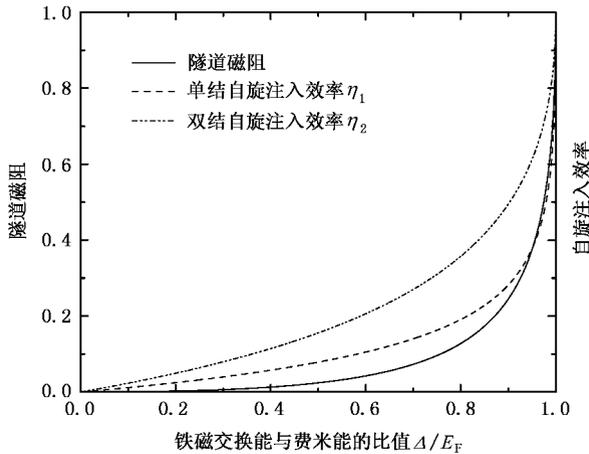


图 6 隧道磁阻和自旋注入效率随铁磁层交换能的大小变化关系图

明采用双结和高铁磁层交换能磁性材料对此类电子器件走向实用是有益的.

## 4. 结 论

总之, 本文研究了由两个 FM/I/SM 单结组成的 FM/I/SM/I/FM 磁性双结的 TMR 及 SIE 的相关特性, 发现当  $l_p$  与  $L$  可比拟时, TMR 将随  $L$  的变化产生量子振荡, 当  $l_p$  远大于  $L$  时振荡拐点处出现 cut-off 波矢, 分析表明这主要是来自于隧道结两边隧穿电子动量波矢的高度不匹配性, 而随着  $L$  的增加, 相位损失将导致振荡振幅的衰减从而压制了 cut-off 波矢. 当两个单结间距离增大到隧穿电子没有相位关联时, TMR 将直接为单结或双结(平行结构)SIE 大小的平方, 因此可以通过测量双结的 TMR 大小来推出单结或双结 SIE 的大小, 数值计算证明了当  $l_p$  与  $L$  可比拟时, TMR 与双结  $\eta_2^2$  的比值  $TMR/\eta_2^2$  也将随  $L$  的变化呈现出量子振荡效应. 文章最后给出了单、双结 SIE 及 TMR 随铁磁层交换能的大小变化关系, 希望这些研究能给此类电子器件的研发有所启示.

感谢南京大学物理系固体微结构国家重点实验室主任邢定钰教授的悉心指导和郑之明副教授的有益讨论.

- [ 1 ] Moodera J S, Kinder L R, Wong T M, Meservey R 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3273
- [ 2 ] Mathon J, Umerski A 1999 *Phys. Rev. B* **60** 1117
- [ 3 ] Zhu L, Chen W D, Xie Z W, Li B Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5499 (in Chinese) [ 朱 林、陈卫东、谢征微、李伯臧 2006 物理学报 **55** 5499 ]
- [ 4 ] Mattana R, George J M, Jaffres H, Nguyen Van Dau F, Fert A, Lépine B, Guivarc'h A, Jézéquel G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 166601
- [ 5 ] Li Y X, Li B Z 2005 *Chin. Phys.* **14** 1021
- [ 6 ] Yamashita T, Imamura H, Takahashi S, Maekawa S 2003 *Phys. Rev. B* **67** 094515
- [ 7 ] Zheng Z M, Qi Y N, Xing D Y, Dong J M 1999 *Phys. Rev. B* **59** 14505
- [ 8 ] Yang J, Wang J 2005 *Journal of PLA University of Science and Technology (Nation Science Edition)* **6** 609 (in Chinese) [ 杨 军、汪 军 2005 解放军理工大学学报(自然科学版) **6** 609 ]
- [ 9 ] Yang J, Wang J, Zheng Z M, Xing D Y, Chang C R 2005 *Phys. Rev. B* **71** 214434
- [ 10 ] Datta S 1995 *Electronic transport in mesoscopic systems* (Cambridge: Cambridge University Press) p117
- [ 11 ] Gao P, Zheng Z M, Xing D Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2128 (in Chinese) [ 高 鹏、郑之明、邢定钰 2002 物理学报 **51** 2128 ]
- [ 12 ] Wang J, Xing D Y, Sun H B 2003 *J Phys. Conds* **15** 4841
- [ 13 ] Grundler D 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 1058
- [ 14 ] Itoh H, Inoue J, Umerski A, Mathou J 2003 *Phys. Rev. B* **68** 174421
- [ 15 ] MA J, Sun J, Wang J 2004 *Modern Physics Letters B* **18** 411

# Investigation on the quantum coherent transport in magnetic tunnel junctions<sup>\*</sup>

Yang Jun<sup>†</sup> Wu Wen-Yuan Gong Yan-Chun

( *Institute of Sciences , PLA University of Science and Technology , Nanjing 211101 , China* )

( Received 4 March 2007 ; revised manuscript received 24 May 2007 )

## Abstract

Using the method of scattering matrix , we investigated the quantum coherent transport in ferromagnet/insulating barrier/semiconductor/insulating barrier/ferromagnet( FM/I/SM/I/FM )magnetic double tunnel junctions . When the mean free path of the tunneling electrons(  $l_p$  ) is comparable to the thickness of the middle semiconductor(  $L$  ) , the tunneling magneto-resistance( TMR ) shows quantum oscillations with the variation of the  $L$  . At the inflection point of the oscillations the cut-off vector will appear if  $l_p$  is much longer than  $L$  . The analysis reveals that it is the mismatch of the electron momentum in ferromagnet and semiconductor layer that leads to the appearance of the cut-off vector . The decay of oscillation amplitude caused by phase loss restrains the occurrence of the cut-off vector . We arrive at the conclusion that the value of TMR is the square of the value of spin injection efficiency( SIE )  $\eta_1$  in a single junction ; and the value of TMR is also the square of the value of SIE  $\eta_2$  in double junctions( parallel configuration )if  $L$  is much longer than  $l_p$  . For this reason , the value of SIE in a single junction or double junctions can be obtained by measuring the value of TMR of double junctions . Numerical calculations indicate that the ratio  $TMR/\eta_2^2$  will also show quantum oscillations with the variation of the  $L$  if the  $L$  is comparable to the  $l_p$  .

**Keywords** : cut-off vector , quantum coherent , oscillation , tunneling magnetore resistance

**PACC** : 7200 , 7210 , 7340G

<sup>\*</sup> Project supported by the Pre-Research Foundation of PLA University of Science and Technology( Grant No.0605002 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: hfeiau@163.com