

# NiS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub> 在 $x = 1.00$ 附近的反铁磁量子相变\*

杨金虎 王杭栋 杜建华 张曠君 方明虎

(浙江大学物理系 杭州 310027)

(2007 年 8 月 1 日收到, 2007 年 9 月 6 日收到修改稿)

针对 NiS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub> 系统在  $x = 1.00$  附近发生的反铁磁量子相变, 制备了一系列 NiS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub> ( $x = 0.96, 0.98, 1.00, 1.05, 1.10$  和  $1.20$ ) 多晶样品, 对其结构、磁性质和电阻率进行了系统的观测. 结果发现, 样品磁化率-温度关系呈现典型的强关联电子系统特征, 与铜氧化物超导体相类似, 它们的电阻率-温度关系在很宽的温区内 ( $50\text{--}300\text{ K}$ ) 呈现线性行为. 对于  $x = 0.98, 1.00$  样品, 低温下 ( $3\text{--}30\text{ K}$ ) 电阻率满足  $\rho(T) \propto T^{3/2}$ , 呈现非费米液体行为. 而在  $x = 1.10, 1.20$  样品中的  $\rho(T)$  又呈现费米液体预言的  $T^2$  关系. 根据与量子相变行为相关的反铁磁量子涨落对结果进行了讨论.

关键词: 量子相变, 反铁磁自旋涨落, NiS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub> 体系

PACC: 7127, 7130, 7590

## 1. 引言

在强关联电子系统(如铜氧化物超导体<sup>[1]</sup>、重费米子系统<sup>[2-5]</sup>和一些低维材料<sup>[6-8]</sup>)的相图中, 当压强、掺杂浓度和磁场等外界参量达到某一个临界值 ( $p_c, x_c$  和  $H_c$ ) 时, 系统基态由磁有序态转变为无序态. 在此量子临界点附近, 临界量子自旋涨落导致系统物性的一系列反常, 如磁化率、比热容与温度之比  $C/T$  对温度发散, 电阻率-温度关系呈现反常的幂指数行为等. 有的系统在量子临界点附近甚至呈现超导电性<sup>[5,9]</sup>, 出现新的量子基态; 而高温超导电性也可能起源于铜氧化物超导体中 CuO<sub>2</sub> 平面内的反铁磁量子涨落<sup>[10]</sup>. 因此, 有关量子相变的理论和实验研究, 已成为当前凝聚态物理学的重要研究方向之一.

大量的实验结果表明<sup>[11,12]</sup>, NiS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub> 系统呈现丰富的磁相图. NiS<sub>2</sub> 为黄铁矿结构, Ni<sup>2+</sup> 的两个价电子占据双重简并的  $e_g$  轨道, 这两个电子之间存在着强烈的库仑排斥, 因此 NiS<sub>2</sub> 为  $s = 1$  的 Mott 绝缘体<sup>[11]</sup>. 随着 Se 对 S 的部分替代, 其 Ni-(S, Se) 之间的 p-d 轨道杂化增强, 电子能带的有效带宽增大, NiS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub> 系统在  $x = 0.4$  附近发生了一级的反铁磁绝缘体-反铁磁金属相变, 而在  $x = 1.0$  附近发生了反铁磁金属-顺磁金属的二级相变. 对于反铁磁金属

NiS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub> ( $x = 0.5$ ) 样品, 其 Néel 温度  $T_N$  为  $90\text{ K}$ , 随着 Se 含量的增加,  $T_N$  在  $x = 1.00$  附近趋于零, 即在  $x = 1.00$  附近可能存在反铁磁量子临界点. NiS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub> 系统作为一个带宽可调、存在 Mott 绝缘体-金属相变的二硫化物, 曾引起广泛重视<sup>[13,14]</sup>. 针对  $x = 0.40$  附近发生的绝缘体-金属相变, 已就其电子能谱、输运性质、磁性质和比热容等物性开展了大量的研究<sup>[12,15,16]</sup>, Honig 等<sup>[12]</sup> 对其研究现状给予了详细的评论. 而对  $x = 1.00$  附近发生的反铁磁金属-顺磁金属量子相变的研究还很少, 尽管有文献报道<sup>[16]</sup> 在  $x = 1.0$  附近系统的物性同样呈现一系列的反常, 但并没有意识到这些反常起源于与量子临界相变相关的自旋量子涨落.

本文针对 NiS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub> 系统在  $x = 1.00$  附近发生的反铁磁量子相变, 制备了一系列 NiS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub> ( $x = 0.96, 0.98, 1.00, 1.05, 1.10$  和  $1.20$ ) 多晶样品. 对其结构、电阻率和磁性质进行了系统的观测, 发现其磁化率-温度关系呈现典型的强关联电子系统特征. 与铜氧化物超导体相类似, 它们的电阻率-温度关系在很宽的温区内 ( $50\text{--}300\text{ K}$ ) 呈现线性行为. 对于  $x = 0.98$  和  $x = 1.00$  样品, 低温下 ( $3\text{--}30\text{ K}$ ) 电阻率满足  $\rho(T) \propto T^{3/2}$  关系, 呈现非费米液体行为, 而  $x = 1.10$  和  $1.20$  样品的  $\rho-T$  又呈现费米液体预言的  $T^2$  关系.

\* 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2006CB601003)资助的课题.

## 2. 实验方法

采用传统的固相反应法制备  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $0.96 \leq x \leq 1.20$ ) 系列多晶样品. 首先将纯度为 99.99% 的 Ni S 和 Se 粉按化学计量比充分混合, 考虑到高温下 S 和 Se 容易挥发, 在化学计量比中 S 和 Se 均过量 5%. 经充分研磨后, 压片封装在真空度高于  $10^{-2}$  Pa 的石英管中. 将其置于烧结炉中, 以  $15^\circ\text{C}/\text{h}$  的升温速率升至  $730^\circ\text{C}$ , 烧结 7 d. 再随炉冷却至室温, 取出预烧样品, 再次充分研磨. 按上述过程在  $730^\circ\text{C}$  下再烧结 7 d, 最后随炉冷却至室温, 取出样品. 样品在空气中保持稳定.

采用粉末 X 射线衍射 (XRD) 方法检测样品的结构和组分. 采用标准的四引线测量技术, 在制冷机和 Quantum Design 公司生产的商用综合性测量系统 (PPMS) 中对样品的电阻率-温度 ( $3\text{—}300\text{ K}$ ) 关系进行测量. 采用商用超导量子干涉仪 (SQUID) 测量样品的磁化强度.

## 3. 实验结果及讨论

图 1 给出了  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  系统的 XRD 谱以及晶格参数  $a$  与 Se 含量  $x$  的关系曲线. 从图 1(a) 给出的  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 0.96, 0.98, 1.00, 1.05, 1.10, 1.15$  和  $1.20$ ) 系列样品的粉末 XRD 谱可以看出, 样品的所有衍射峰均可用黄铁矿 (pyrite) 结构、对称群为  $P\bar{6}3$  进行拟合, 在实验精度内没有观测到其他杂相. 由此 XRD 结果拟合得到的样品的晶格参数  $a$  与 Se 含量  $x$  的关系曲线如图 1(b) 所示. 从图 1(b) 可以看出, 样品的晶格参数  $a$  随着 Se 含量  $x$  的增加单调增大, 由于  $\text{Se}^{2-}$  半径 ( $191\text{ pm}$ ) 比  $\text{S}^{2-}$  半径 ( $184\text{ pm}$ ) 大, 说明 Se 对 S 的部分替代在样品中是均匀的.

图 2 给出了  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 0.96, 1.00, 1.05, 1.10$  和  $1.20$ ) 样品有场冷却和  $8 \times 10^4\text{ A/m}$  磁场下测得的磁化率  $\chi$  与温度  $T$  的关系. 从图 2(a) 中可以看出, 随着 Se 含量  $x$  的增加, 样品的磁化率减小. 如在  $2\text{ K}$  时,  $x = 0.96$  样品的磁化率为  $9.137 \times 10^{-4}\text{ Am}^2/\text{mol}$ , 而  $x = 1.20$  样品的磁化率只有  $2.706 \times 10^{-4}\text{ Am}^2/\text{mol}$ , 这与 Ogawa 报道<sup>[17]</sup>的结果一致. 另外, 对于  $x = 0.96$  样品, 低温下 ( $T < 50\text{ K}$ ) 磁化率随着温度的上升急剧减小, 在  $130\text{ K}$  附近达到极小值后再缓慢增大. 综上所述,  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  系统在  $x = 1.00$  附近为反

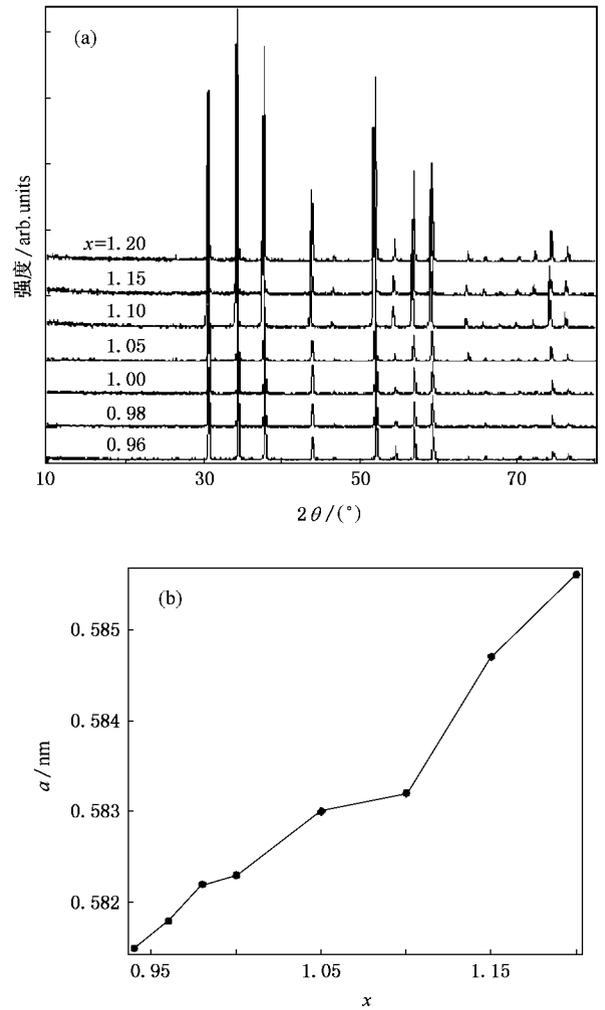


图 1  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  系统的 XRD 谱和样品晶格参数  $a$  与 Se 含量  $x$  的关系 (a) XRD 谱 (b) 晶格参数  $a$  与  $x$  的关系

铁磁量子临界点,  $x = 0.96$  样品更接近反铁磁金属相, 但在  $\chi-T$  中没有观测到这种反铁磁相变.  $x = 1.00$  和  $1.05$  样品的  $\chi-T$  行为与  $x = 0.96$  样品相类似, 其磁化率在  $115\text{ K}$  附近达到最小, 而  $x = 1.10$  和  $1.20$  样品的磁化率尽管在  $110\text{ K}$  附近也存在极小值, 但在整个温区内几乎与温度无关, 呈现顺磁性, 其  $\chi-T$  关系呈现典型的强关联电子系统特征<sup>[12]</sup>.

上述样品的磁化率在  $100\text{—}130\text{ K}$  温区内均呈现极小值, 在低 Se 含量 (如  $x = 0.50\text{—}0.70$ ) 的反铁磁金属样品<sup>[17,18]</sup>中也已观测到, 并发现与反铁磁相变温度无关. Honig 等<sup>[12]</sup>认为, 随着温度的升高, 能带宽度减小, 载流子更容易被局域化, 导致磁矩的增大. 本文作者对上述样品的磁化率-温度关系采用如下的双极化子模型<sup>[19]</sup>进行了分析:

$$\chi(T) = \chi_0 + \frac{C_1}{T - \theta} + \frac{C_2}{T} \frac{e^{-\Delta/kT}}{1 + e^{-\Delta/kT}}, \quad (1)$$

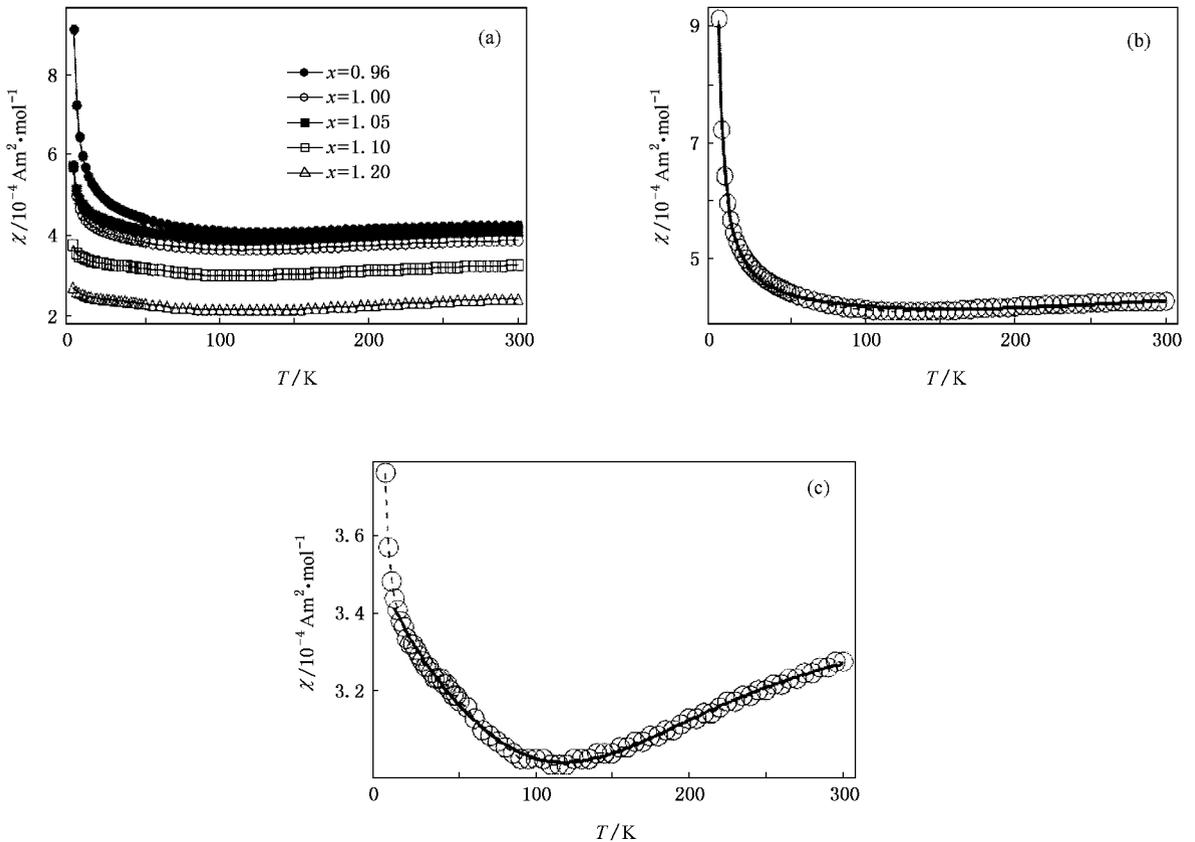


图2  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 0.96, 1.00, 1.05, 1.10$  和  $1.20$ ) 系列样品磁化率  $\chi$  与温度  $T$  的关系及  $x = 0.96, 1.10$  两样品的实验值和拟合值 (a) 系列样品的  $\chi$ - $T$  关系 (b)  $x = 0.96$  (c)  $x = 1.10$ . 圆圈为实验数据, 实线为拟合曲线

式中  $\chi_0$  为与温度无关的磁化率, 第二项为居里-外斯项, 而第三项对应的是双极化子磁化率. 图 2(b), (c) 分别给出利用 (1) 式对  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 0.96, 1.10$ ) 样品  $\chi$ - $T$  关系的拟合结果, 拟合得到的  $\Delta$  值分别为  $960$  和  $640 \text{ K}$ , 与 Ogawa<sup>[17]</sup> 对不同 Se 含量样品的高温磁化率数据一致. 其他样品的  $\chi$ - $T$  关系同样可以用 (1) 式拟合得到. 双极化子模型中的磁化率-温度关系是 Chakraverty 等<sup>[20]</sup> 为了解释非金属的  $\text{Na}_{0.33}\text{V}_2\text{O}_5$  磁化率结果而提出的, 局域化电子在  $T = 0 \text{ K}$  形成自旋单态双极化子, 随着温度的升高, 它们逐渐被拆对, 每个双极化子变成两个独立的局域自旋需要能量  $2\Delta$ . 作者认为, 与其他强关联电子系统 (如锰氧化物<sup>[21-23]</sup>、铜氧化物超导体<sup>[24, 25]</sup>) 相类似,  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x > 1.00$ ) 化合物尽管是顺磁金属, 其中仍存在两类载流子, 一类是巡游的, 另一类是局域的, 甚至可能存在动态的电子相分离, 导致其磁化率-温度关系的反常. 其电子态性质与其磁化率-温度关系之间的关联还有待进一步研究.

图 3 给出了  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 0.96, 0.98, 1.00,$

$1.05$  和  $1.10$ ) 样品的电阻率  $\rho$  与温度  $T$  的关系. 从图 3 可以看出, 对于  $x = 0.98$  样品, 在  $300-50 \text{ K}$  范围内其电阻率随着温度的降低呈线性减小. 样品的  $\rho$ - $T$  关系在如此宽的温区内呈现线性行为, 与铜氧化物超导体中最佳掺杂样品的正常态性质相类似. 从图 3 还可以看出, 在  $50 \text{ K}$  以下, 样品的电阻率随着温度的下降而减小的速率  $d\rho/dT$  值变小, 在更低的温度下趋于一个常数, 即剩余电阻率  $\rho_0$  值. 样品的电阻率-温度关系在整个测量温区 ( $3-300 \text{ K}$ ) 内呈现金属行为. 其他 4 个样品 ( $x = 0.96, 1.00, 1.05$  和  $1.10$ ) 以及在图 3 中未给出的 ( $x = 1.20$ ) 样品的电阻率-温度关系, 与  $x = 0.98$  样品相类似, 在整个测量温区 ( $3-300 \text{ K}$ ) 内均呈现金属行为, 但样品的室温电阻率和剩余电阻率不同. 对于  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 0.96, 0.98, 1.00, 1.05, 1.10$  和  $1.20$ ) 样品, 室温电阻率  $\rho_{\text{R}}$  分别为  $4.415 \times 10^{-6}, 7.543 \times 10^{-6}, 5.041 \times 10^{-6}, 4.168 \times 10^{-6}, 3.390 \times 10^{-6}, 3.516 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ . 由此可见, 样品的室温电阻率与 Se 含量  $x$  之间并不呈现规律性. 我们知道, 在多晶样品中, 影响其室温电

阻率和剩余电阻率的因素除了  $\text{Se}$  对  $\text{S}$  的部分替代效应外,还与样品的致密性有关.我们利用

$$\rho = \rho_0 + A'T^n$$

对上述样品在 3—30 K 范围内的电阻率-温度关系进行拟合,得到样品的剩余电阻率  $\rho_0$  值分别为  $7.8427 \times 10^{-7}$ ,  $13.809 \times 10^{-7}$ ,  $9.3587 \times 10^{-7}$ ,  $8.1541 \times 10^{-7}$ ,  $7.2688 \times 10^{-7}$ ,  $7.7241 \times 10^{-7}$   $\Omega\text{m}$ . 同样,由于样品的致密性不同,样品的剩余电阻率与  $\text{Se}$  含量  $x$  并不呈现规律性.由此求得的各样品的  $\rho_R/\rho_0$  值分别为 5.6294, 5.4624, 5.3869, 5.115, 4.5936 和 4.5520,可见  $\rho_R/\rho_0$  值随着  $\text{Se}$  含量  $x$  的增加而减小,该结果与 Miyasaka 等<sup>[16]</sup>在单晶样品中观测的结果一致.

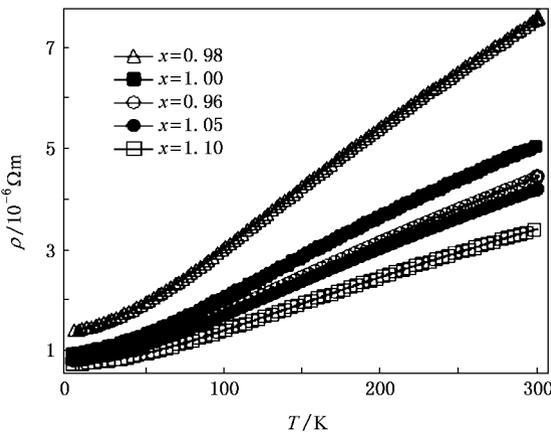


图 3  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  系列样品的电阻率-温度关系

为了揭示  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  体系在  $x = 1.00$  反铁磁量子临界点附近样品输运性质的反常,图 4 给出了  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 0.96, 0.98, 1.00, 1.05$  和  $1.20$ ) 样品的电阻率  $\Delta\rho = \rho - \rho_0$  与温度的关系.从图 4 (a) 可以看出,在 3—30 K 温区内,  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 1.20$ ) 样品的电阻率与  $T^2$  呈现较好的线性关系,与费米液体模型给出的关系一致;但  $x = 0.96, 0.98, 1.00$  和  $1.05$  样品的  $\Delta\rho-T^2$  关系并不呈现很好的线性关系.从图 4 (b) 可以看出,  $x = 0.96, 0.98$  和  $1.00$  样品的电阻率  $\rho$  与温度  $T$  的关系更符合  $\rho(T) \propto T^{3/2}$  行为,说明  $x = 0.96, 0.98$  和  $1.00$  样品的  $\rho-T$  关系呈现非费米液体行为.

根据以上所述,采用  $\rho = \rho_0 + A'T^n$  关系式对  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 0.96, 0.98, 1.00, 1.05$  和  $1.20$ ) 样品在 3—30 K 温区内的电阻率数据进行拟合,得到的温度幂指数  $n$  值与  $\text{Se}$  含量  $x$  的关系如图 5 (a) 所

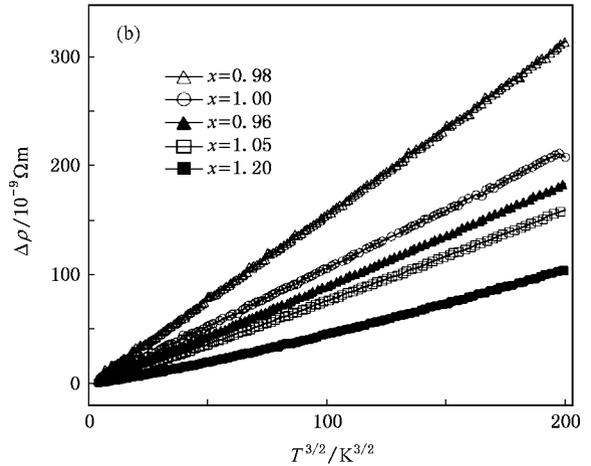
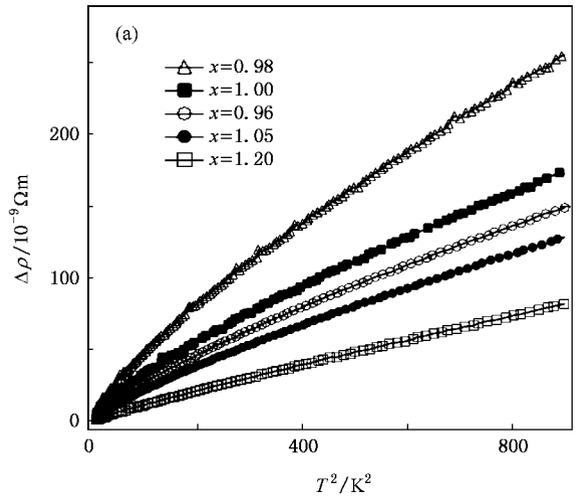


图 4  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  系列样品  $\Delta\rho = \rho - \rho_0$  与温度的关系 (a)  $\Delta\rho-T^2$  (b)  $\Delta\rho-T^{3/2}$

示.从图 5 (a) 可以看出,对于  $x = 0.98$  和  $1.00$  两样品其  $n$  值约为  $3/2$ ,而对于  $x = 1.10$  和  $1.20$  两样品,其  $n$  值约为  $1.8$ ,接近费米液体理论值  $2$ .

同时我们采用费米液体理论给出的  $\rho = \rho_0 + AT^2$  关系对上述样品在 3—10 K 温区内的电阻率-温度关系进行了拟合.由此得出的温度系数  $A$  与  $\text{Se}$  含量  $x$  的关系曲线如图 5 (b) 所示.与  $x = 1.10$  和  $1.20$  样品相比较,  $x = 0.98$  样品的  $A$  值增大了 3 倍,与 Miyasaka 等<sup>[16]</sup>报道的结果一致.

综上所述,在反铁磁量子临界点附近,  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 0.98$  和  $1.00$ ) 样品的  $\rho-T$  关系显然偏离费米液体的  $T^2$  行为,而呈现  $T^{3/2}$  关系.自洽重正化的自旋涨落理论<sup>[26]</sup>认为,对于巡游反铁磁金属,其  $\rho-T$  关系与动态反铁磁磁化率  $\chi(Q)$  有关,

$$\rho(T) \propto T^2 \sqrt{\chi(Q)},$$

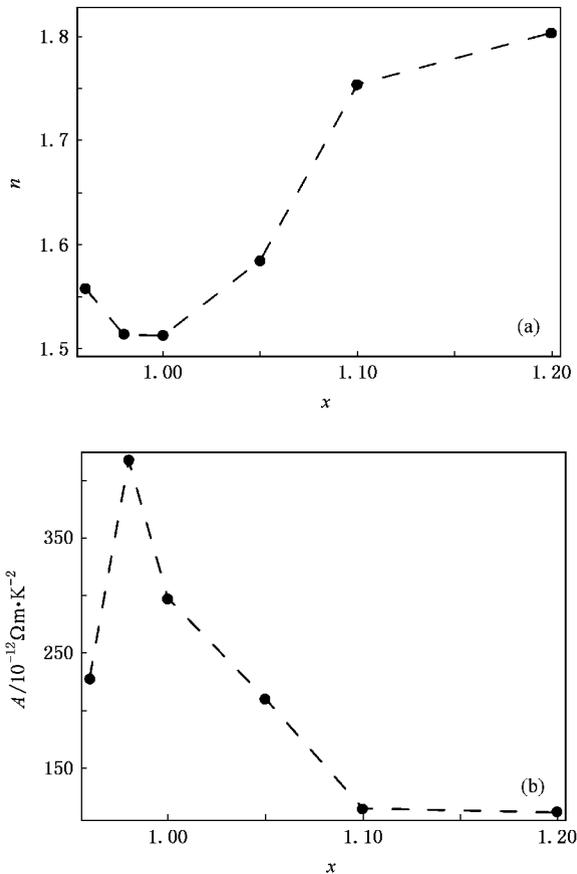


图5 拟合公式中的  $n$  和  $A$  与  $\text{Se}$  含量  $x$  的关系 (a)  $n$  与  $x$  的关系 (b)  $A$  与  $x$  的关系

因此

$$\rho(T) \propto T^{3/2}.$$

该结果说明:处于反铁磁量子临界点附近的  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 0.98$  和  $1.00$ ) 样品中,自旋量子涨落效

应非常显著,导致其物性的一系列反常.与  $x = 1.10$  和  $1.20$  样品相比, $x = 0.98$  样品的  $A$  值增大了 3 倍. Miyasaka 等<sup>[16]</sup>发现,相对于反铁磁金属( $x = 0.80$ )和顺磁金属( $x = 2.00$ )样品, $x = 1.00$  附近的样品的电子比热系数  $\gamma$  值也增加了 3 倍.值得注意的是,与在重费米子系统  $\text{CeCu}_{6-x}\text{Au}_x$  和  $\text{CePd}_2\text{Si}_2$  中<sup>[27,28]</sup>反铁磁量子临界点附近样品  $\rho-T$  关系所呈现  $T$  的线性行为完全不同,在  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 1.00$ ) 反铁磁量子临界点附近样品的  $\rho-T$  呈现  $T^{3/2}$  关系.导致这种不同  $\rho-T$  关系的物理起源目前还不清楚,有待进一步研究.

## 4. 结 论

本文针对  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  系统在  $x = 1.0$  附近发生的反铁磁量子相变,制备了一系列  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 0.96, 0.98, 1.00, 1.05, 1.10$  和  $1.20$ ) 多晶样品,对其结构、磁性质和电阻率进行了系统的观测.结果发现,样品磁化率-温度关系呈现典型的强关联电子系统特征, $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x > 1.00$ ) 中存在两类载流子,一类是巡游的,另一类是局域的,甚至可能存在动态的电子相分离.与铜氧化物超导体的正常态相类似,样品的电阻率-温度关系呈现线性行为.在反铁磁量子临界点附近的  $x = 0.98$  和  $1.00$  样品,由于存在强烈的量子自旋涨落效应,低温下 ( $3\text{--}30\text{ K}$ ) 电阻率满足  $\rho(T) \propto T^{3/2}$ , 呈现非费米液体行为,而在偏离临界点的样品(如  $x = 1.10$  和  $1.20$ ) 的  $\rho-T$  又呈现费米液体预言的  $T^2$  关系.

- [1] Orenstein J, Millis A J 2000 *Science* **288** 468
- [2] Gegenwart P, Langhammer C, Geibel C, Helfrich R, Lang M, Spam G, Steglich F 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 1501
- [3] Aoki Y, Matsuda T D, Sugawara H, Sato H, Ohkuni H, Settai R, Onuki Y, Yamamoto E, Haga Y, Andreev A V, Sechovsky V, Havela L, Ikeda H, Miyake K 1998 *J. Magn. Magn. Mater.* **177-181** 271
- [4] Kim J S, Hall D, Heuser K, Stewart G R 2000 *Solid State Commun.* **114** 413
- [5] Mathur N D, Grosche F M, Julian S R, Walker I R, Freye D M, Haslwwimmer R K W, Lonzarich G G 1998 *Nature* **394** 39
- [6] Mazin I I, Sigh D J 1997 *Phys. Rev. B* **56** 2556
- [7] Grigera S A, Pery R S, Senthil A J, Chiao M, Julian S R, Lonzarich G G, Ikeda S I, Maeno Y, Millis A J, Mackenzie A P 2001 *Science* **294** 329
- [8] Mao Z Q, Zhou M, Hooper J, Golub V, O'Connor C J 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 077205
- [9] Pfleiderer C, Uhlarz M, Hayden S M, Vollmer R, Löhneysen V, Bernhard N R, Lonzarich G G 2001 *Nature* **412** 58
- [10] Yanase Y, Jujo T, Nomura T, Ikeda H, Hotta T, Yamada K 2003 *Phys. Rep.* **387** 1
- [11] Jarrett H S, Bouchard R J, Gillson J L, Jones G A, Marcus S M, Weiher J F 1973 *Mater. Res. Bull.* **8** 887
- [12] Honig J M, Spaek J 1998 *Chem. Mater.* **10** 2910
- [13] Iwaya K, Kohsaka Y Y, Sato S, Hanaguri T, Miyasaka S, Takagi H 2004 *Phys. Rev. B* **70** 161103
- [14] Inagaki S 1978 *J. Phys. Soc. Jpn.* **45** 1253
- [15] Sudo S Ū, Miyda T 1985 *J. Phys. Soc. Jpn.* **54** 3934

- [ 16 ] Miyasaka S , Takagi H , Sekine Y , Takahashi H , Mori N , Cava R J 2000 *J. Phys. Soc. Jpn.* **69** 3166
- [ 17 ] Ogawa S 1979 *J. Appl. Phys.* **50** 2308
- [ 18 ] Sudo S 1992 *J. Magn. Magn. Mater.* **114** 57
- [ 19 ] Tsuda N , Nasu K , Yanase A , Siratori K 1991 *Electronic Conduction in Oxides* ( Berlin : Springer ) p155
- [ 20 ] Chakraverty B K , Sienko M J 1978 *Phys. Rev. B* **17** 3781
- [ 21 ] Chen Q , Lu C , de Lozanne A 1997 *Science* **276** 2006
- [ 22 ] Uehara M , Mori S , Chen C H , Cheong S W 1999 *Nature* **399** 560
- [ 23 ] Renner C , Aeppli G , Kim B G , Soh Y A , Cheong S W 2002 *Nature* **416** 518
- [ 24 ] Emery V J , Kivelson S A , Lin H Q 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 475
- [ 25 ] Kivelson S A , Emery V J , Lin H Q 1990 *Phys. Rev. B* **42** 6523
- [ 26 ] Moriya T 1985 *Spin Fluctuation in Itinerant Electron Magnetism* ( Berlin : Springer ) pp82—107
- [ 27 ] Löhneysen H V , Pietrus T , Portisch G , Schlager H G , Schröder A , Soeck M , Trappmann T 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 3262
- [ 28 ] Grosche F M , Julian S R , Mathur N D , Lonzarich G G 1996 *Physica B* **50** 223

## Antiferromagnetic quantum phase transition near $x = 1.00$ in $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$ system \*

Yang Jin-Hu Wang Hang-Dong Du Jian-Hua Zhang Zhu-Jun Fang Ming-Hu

( Department of Physics , Zhejiang University , Hangzhou 310027 , China )

( Received 1 August 2007 ; revised manuscript received 6 September 2007 )

### Abstract

There may be an antiferromagnetic quantum phase transition near  $x = 1.00$  in  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  system. The polycrystalline samples of  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 0.96, 0.98, 1.00, 1.05, 1.10$  and  $1.20$ ) were prepared by the solid state reaction method, and the measurements of their structure, magnetization and resistivity were carried out. It is found that the temperature dependence of susceptibility is typical characteristic of a strongly correlated electron system. Similar to high  $T_c$  superconductors, the relationship between resistivity and temperature displays a linear behavior in a wide temperature range from 50 to 300 K. For  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 0.98$  and  $1.00$ ) samples, its  $\rho(T)$  is proportional to  $T^{3/2}$  at lower temperatures (3—30 K), which shows a non-Fermi-liquid behavior. But for  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 1.10$  and  $1.20$ ) samples, its  $\rho(T)$  is proportional to  $T^2$  at lower temperatures (3—30 K), which shown the Fermi-liquid behavior. The antiferromagnetic quantum spin fluctuation related to quantum phase transition is discussed in detail.

**Keywords** : quantum phase transition , antiferromagnetic spin fluctuation ,  $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$  system

**PACC** : 7127 , 7130 , 7590