

Curie 温度附近稀磁半导体(Ga,Mn)As 的电学噪声谱性质*

杨 威^{1,2)} 姬 扬^{1)†} 罗海辉^{1,2)} 阮学忠^{1,2)} 王玮竹^{1,2)} 赵建华¹⁾

1) 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2009 年 3 月 8 日收到, 2009 年 4 月 28 日收到修改稿)

建立了自发噪声谱测量系统来研究稀磁半导体(Ga,Mn)As 的电学噪声性质. 通过测量(Ga,Mn)As 材料的自发噪声谱, 发现(Ga,Mn)As 的自发涨落会随温度升高而逐渐增大, 同时, 外加磁场会降低(Ga,Mn)As 的自发涨落, 这来源于外加磁场导致的(Ga,Mn)As 磁畴部分有序化. 此外, 不同频率的噪声随温度的变化规律有很大差异: 当频率低于 30 kHz 的时候, 噪声谱和温度的变化关系和热噪声很相似, 但数值上明显大于热噪声的值; 当频率在 30 kHz 左右的时候, 噪声大小和温度成线性关系; 当频率大于 30 kHz 以后, 在相变点附近噪声大小和温度的关系出现了明显的转折, 高频高温噪声的大小和热噪声的理论值非常接近. 这些结果有助于深入理解(Ga,Mn)As 磁性起源的物理机制.

关键词: 自旋电子学, 稀磁半导体, 自发涨落谱

PACC: 7270, 7550P, 0690

1. 引 言

半导体自旋电子学^[1-3]是目前凝聚态物理学的研究热点之一, 主要研究自旋极化载流子的注入、控制和检测. 将磁性引入半导体材料的一个基本方法是在半导体材料中掺杂大量的磁性原子而形成磁性半导体材料. III-V 族稀磁半导体(Ga,Mn)As^[4,5]是典型的磁性半导体材料, 它既保持了常规半导体材料的特性, 又具有空穴诱导出来的铁磁性. 将电荷和自旋两种自由度完美地融合到一起, 而且它还可以很好地和现有半导体材料集成为一体.

Curie 温度 T_C 是稀磁半导体最重要的性质^[5,6], 自旋电子学中重要的研究方向之一就是寻找 T_C 高于室温、具有合适磁性的磁性半导体材料. 人们对稀磁半导体的磁性起源有了一定程度的研究^[7-9], 但是这些理论还不能完全解释稀磁半导体的各种现象. 目前的研究工作除了研究生长条件和后期处理对材料 T_C 的影响之外, 主要集中在对其中磁畴的观察和操作上^[10,11], 对于稀磁半导体材料在临界点

附近的行为研究还很少. 最近出现的一种新颖的实验技术——自旋噪声谱测量技术就是通过测量物体在热平衡状态附近的涨落来获得关于体系的基本物理信息的一种新的实验技术^[12-14], 有可能为研究稀磁半导体材料中的临界现象提供条件.

自从人们开始进行各种实验测量以来, 噪声就会伴随每个测量过程, 它们会给测量结果加上随机的涨落, 严重时会导致测量失败, 所以人们总是想尽办法减少各种噪声的干扰. 然而, 并不是所有的噪声都是无意义的. 一般噪声可分为外界的干扰噪声和系统本身的噪声, 而系统自身的噪声往往蕴含着系统的某些内在属性^[15], 所以人们也会研究本征噪声和系统的内在关系. 通过测量系统的涨落来研究系统的性质是一种很重要的实验方法, 它的最大优点是不需要激发系统或使系统偏离平衡态, 仅仅根据系统在平衡态附近的涨落, 就可以推算出系统的各种性质. 但是根据自发涨落来研究系统的性质, 在实际操作中是非常困难的. 在实验上, 为了准确地测量系统的自发涨落, 必须仔细排除掉各种干扰噪声的存在, 在实验数据处理上, 必须用复杂的谱估计理论

* 国家自然科学基金(批准号: 30674129)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: jiyang@red.semi.ac.cn

来得到自发涨落的噪声谱,在理论分析上,需要根据自发涨落的物理根源,推算出噪声谱的形状.

噪声测量最重要的是设计好的实验方法,否则后续的分析过程根本无法进行.现有的噪声测量方法主要有以下四种:(1)扫描电子显微镜^[16,17],可以直接将样品表面电子的自旋状态和隧穿电流联系起来,从而探测单个电子的自旋涨落;(2)直流超导量子干涉仪,该仪器是测量弱磁信号的强有力工具,可以用来测量各种磁矩的涨落^[18,19];(3)Faraday 旋转,用一束光透射过样品,光与样品里面的磁性粒子随机作用,在输出光里就会包含系统磁性涨落的信息^[20,21];(4)超低噪声放大器,这种方法主要用来测量各种电学噪声^[22-26].

在温度下降的过程中,(Ga,Mn)As 会经历一个从顺磁性到铁磁性的相变过程.这一过程的一个标志就是(Ga,Mn)As 的电阻在临界温度附近会出现一个峰值^[27].统计物理的知识告诉我们,一个达到热平衡的宏观系统总是在其平衡状态附近变化,表征体系的一些物理量也就都在其平衡值附近起伏.系统在相变点,各种物理量的涨落为最大.本文的目的就是通过研究(Ga,Mn)As 的自发涨落随温度和磁场的变化,得到(Ga,Mn)As 的一些内在物理性质.

2. 实验方法

实验样品是 VG80 MARK I 型分子束外延设备生长出来的(Ga,Mn)As 薄膜材料.首先在(001)晶面的 GaAs 半绝缘衬底生长一层厚度为 300 nm 的 GaAs 缓冲层,然后再利用低温分子束外延生长出厚度为 100 nm 的(Ga,Mn)As 薄膜,其中 Mn 含量为 8%.把生长好的(Ga,Mn)As 材料放到退火炉中退火,以提高样品的 T_C .最后,用光刻的办法在样品上刻出宽度为 300 μm 的 Hall 电极.

我们利用电学方法来测量(Ga,Mn)As 样品的自发涨落噪声随温度和磁场的变化关系.图 1 给出了自发涨落噪声的测量原理.把(Ga,Mn)As 样品放到制冷机的样品座上,然后给样品两端施加上 1.5 μA 的恒定电流.测量的信号取自样品的横向或纵向 Hall 电极两端,输入到超低噪声前置放大器(SR560),其输入阻抗是 100 M Ω ,带宽为 1 MHz).噪声信号经超低噪声前置放大器放大后输入到数据采集卡(PCI 6250,其采样精度是 16 bit,最高采样速率是 1.25 Mbit/s)的输入端.数据采集卡将模拟信号数字

化,然后传送给计算机进行储存和处理.

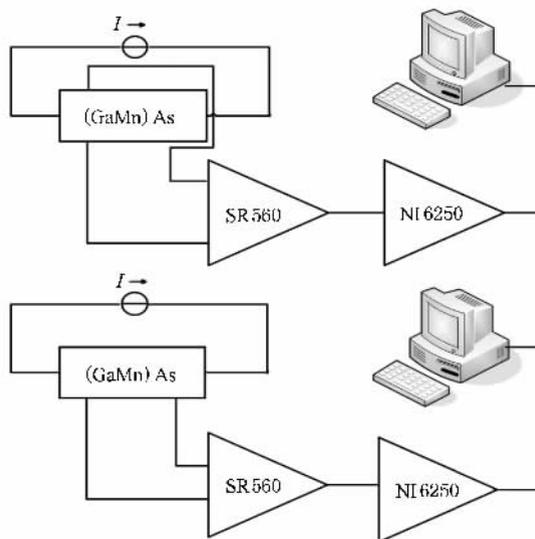


图 1 测量(Ga,Mn)As 横向和纵向电学自发涨落的原理示意图.横向和纵向噪声的测量是分开进行的,这样做的原因是为了减少两个前置放大器之间的串扰.

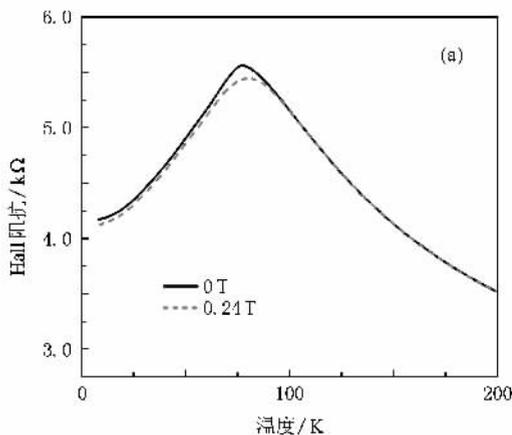
测量时先打开制冷机,把冷头降温到 10 K 以下,维持一段时间后关掉制冷机,这时冷头的温度就会慢慢上升.由于冷头内部已经抽成了真空,所以(Ga,Mn)As 样品温度上升是非常慢的,经实际测试,样品温度从 10 K 上升到 200 K 大约需要 3 h,这就给我们测量频谱提供了充足的时间.样品座底部安装有测温电阻,用来测量样品的温度.选择这种测量方法是为了避免制冷机工作时所产生很大的干扰信号.

为了保证实验成功,我们采取了如下技术手段来消除各种外部噪声干扰:(1)用差分输入方式连接样品和前置放大器以便显著降低共模噪声,这是低频低噪声测量非常有效的手段.(2)仔细地调节测量系统的几何布局,以降低外界干扰信号的进入,特别是要保证信号输入连接中不存在磁通量.(3)各种仪器和计算机的外壳都要很好接地,传输线要屏蔽在铜网之中.(4)尽量减少所用仪器的数量,将周围不用的仪器全部关闭,因为仪器会通过输入输出线产生串扰.(5)尽量在夜深人静的时候进行实验,以避免未知干扰源的影响.

一般而言,反映噪声统计特性的量主要是概率分布函数^[28],反映噪声随机过程特性的量主要是功率密度谱^[29].这两个量都需要根据离散的采样数据估算出来.我们采用标准的直方图来估计概率密度函数,并采用周期图来估计功率密度谱(因为不能确

定功率密度谱属于哪种模型,所以只能采用这种非参数的谱估计方法).为了克服周期图估计方法固有的统计方差大的主要缺陷,我们采用了 Bartlett 方法^[30]把1 s采集到的数据做快速 Fourier 变换以得到噪声谱的估计,同时记下温度.由于温度上升很缓慢,所以把10 s内测得的噪声谱做一次平均,作为10 s内平均温度点的频谱,以降低频谱估计的方差.在测量过程中数据采集卡大约要输出 22 Gbit 的数据,储存很不方便,所以采集到的数据必须实时进行处理.我们设定数据采集卡的采样速率是 500 kHz,计算机刚好可以完成实时的处理.根据 Shannon 采样定律,这样的采样速率最高可以得到 250 kHz 的频谱.在测量之前,还需要将系统短路,然后测量系统的频谱作为背景噪声的功率密度谱.测量得到的功率密度谱减去背景噪声的功率密度谱,就得到了不同温度下(Ga,Mn)As 噪声功率密度谱的数据.

自发噪声谱测量非常容易受到外界环境的影响,因而在测量过程中,我们只改变了(Ga,Mn)As 样品的温度,而保持了其他所有实验条件未变,所以测量结果仅仅是反映了温度变化对(Ga,Mn)As 样品造成的影响,排除了其他的可能.虽然我们也曾打算用 GaAs 样品作为对照样品,但是发现在实验操作中会引起一些问题,所以被迫放弃了对比参照的实验.这主要是为了保证 GaAs 样品和(Ga,Mn)As 的可比性,



作为对比参照物的 GaAs 样品应该和(Ga,Mn)As 样品在除去磁性质之外尽量相似,但(Ga,Mn)As 样品是 p 型掺杂,Mn 的浓度高达 8%,但对于 GaAs 样品进行如此高浓度的 p 型掺杂,目前无法实现,而且,即使能够实现,这样高掺杂的 GaAs 样品也很有可能成为另外一种三元合金,它的性质由掺杂元素和生长过程决定,其噪声谱将不具有对比参照的价值.

另外,我们在样品座后固定了一块永磁铁,用来给样品施加一个垂直样品表面的磁场,磁感应强度大约有 0.24 T.选择这种加磁场的方式是为了防止电磁铁带来很强的干扰信号(反映在频谱上,就会发现在低频段出现很多杂峰,这些杂峰的起伏非常大,测量过程根本无法进行).

3. 实验结果及讨论

在进行噪声谱测量之前,我们先测量了(Ga,Mn)As 样品磁性随温度的变化关系.图 2(a)是在有磁场和无磁场情况下(Ga,Mn)As 样品的电阻随温度的变化关系,可以看到在温度为 77 K 时,纵向电阻出现了峰值^[25].图 2(b)是超导量子干涉仪测量的(Ga,Mn)As 样品磁化强度随温度的变化关系,可以看出磁化强度随着温度的升高而骤降为零,不存在拖尾现象.这就可以说明样品中不存在第二相.

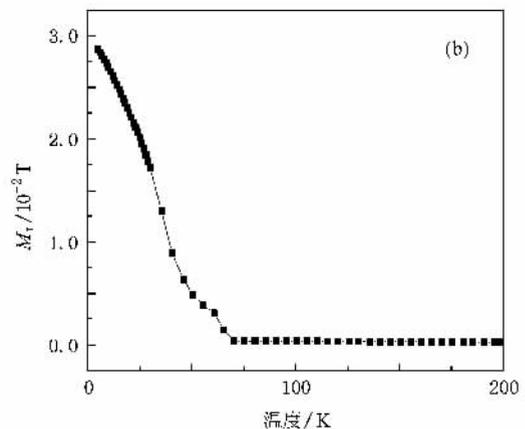


图 2 (Ga,Mn)As 样品磁性随温度的变化 (a)(Ga,Mn)As 样品纵向电阻随温度的变化,实线是无磁场情况,虚线是施加了垂直样品表面的磁场 (b)(Ga,Mn)As 样品磁化强度随温度的变化

在确认了样品的基本性质之后,我们接下来进行噪声电压的测量(固定输入电流为 1.5 μ A).首先分析自发涨落的统计特性.图 3(a)给出了在没有外加磁场的情况下(Ga,Mn)As 样品纵向噪声谱的概率分布函数随温度的变化,可以看出在固定的温度

下,纵向电学自发涨落完全符合标准的 Gauss 分布,Gauss 分布的最大特点就是分布函数完全由均值和方差两个因素决定,温度和外磁场的变化仅仅改变了 Gauss 分布的方差.横向电学自发涨落的情况也与此完全相同.概率分布函数的方差越大,意味着系

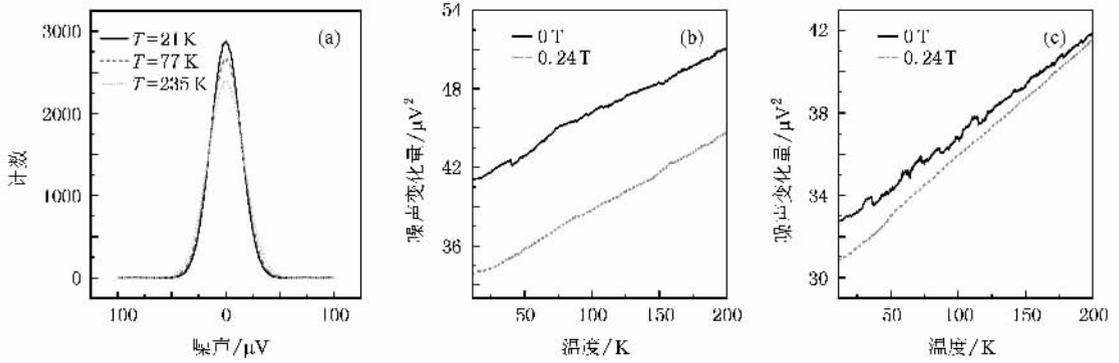


图 3 (Ga,Mn)As 样品自发涨落的统计特性随温度的变化 (a) (Ga,Mn)As 样品电学噪声的统计结果 (b) (Ga,Mn)As 样品纵向涨落的方差随温度的变化关系 (c) (Ga,Mn)As 样品横向涨落的方差随温度的变化关系

统的不确定范围越宽.图 3 (b)是 (Ga,Mn)As 样品纵向电学自发涨落的方差随温度的变化,图 3 (c)是 (Ga,Mn)As 样品横向电学自发涨落的方差随温度的变化.总之,随着温度的升高,自发涨落的方差也呈线性地升高.对于这一点,可以作如下解释:无规则热运动的强度取决于 $k_B T$,随着温度的升高,无规则热运动的影响越来越显著.施加了磁场以后 (Ga,Mn)As 样品自发涨落的方差会显著降低,这是由于外加磁场使 (Ga,Mn)As 磁畴的极化方向出现了非平衡的分布,或者是载流子的自旋极化方向出现了非平衡的分布,然后由于自旋 Hall 效应^[31]或者是自旋相关散射^[32]的作用,最终体现在了电荷的变化上.纵向涨落比横向涨落要大一些,这单纯是由于 Hall 电极的几何结构造成的,对于横向和纵向电阻而言,电极的几何形状是完全一致的,但是纵向两个电极之间的距离比横向的电极距离要长,所以纵向电阻比横向电阻稍大一些.对于纵向涨落,磁场仅仅是使曲线向下平移了约 $8 \mu V^2$,并没有改变温度变化的斜率.对于横向涨落,随着温度的增加,磁场所带来的影响逐渐变小,这说明横向自发涨落和反常 Hall 效应有密切关系.

接下来分析自发涨落的功率密度谱.图 4 是在无外加磁场时的纵向电学自发涨落的功率密度谱,频谱的形状比较复杂,这可能是由于本征噪声存在多个来源所致.低频段的噪声幅度普遍较大,随着频率升高,噪声幅度逐渐减弱.在 40 kHz 左右,频谱出现了转折,频率大于 40 kHz 以上的部分,符合 $1/f$ 噪声的特性.横向电学自发涨落的功率密度谱的形状与之非常相似.由于频谱形状比较复杂,我们把频谱分为三个范围,分别选取一些有代表性的频率进行详细讨论.

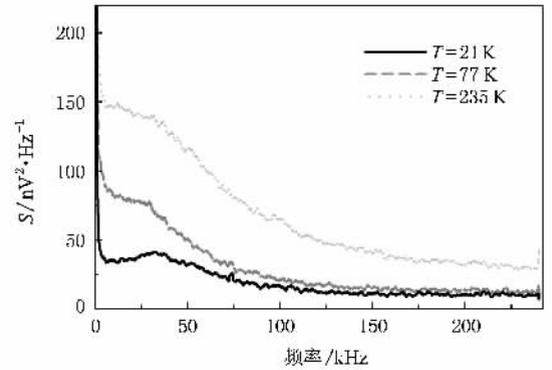


图 4 (Ga,Mn)As 样品纵向电学自发涨落功率密度谱

图 5 (a)显示频率为 8 kHz 的噪声功率密度随温

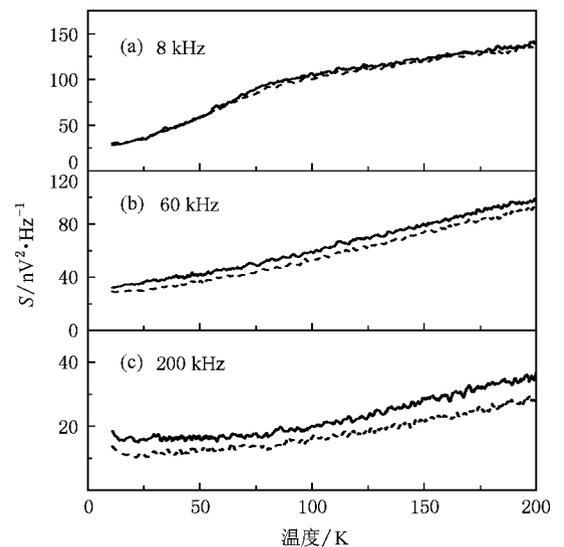


图 5 在不同的频率点 (Ga,Mn)As 样品纵向电学自发涨落功率密度谱随温度的变化.实线是无外加磁场,虚线是施加了垂直样品表面 0.24 T 的磁场.(a) 噪声频率为 8 kHz.(b) 噪声频率为 60 kHz.(c) 噪声频率为 200 kHz

度和磁场的变化关系.随着温度的上升,噪声功率密度也逐渐上升,但是超过 T_c 以后,噪声功率密度增长的幅度明显放缓,曲线在 T_c 点出现了转折.在这个频率点上,噪声功率密度和理想热噪声非常像,只是幅度比热噪声大.

如图 5(b)所示,当频率上升到 60 kHz 以后,噪声功率密度随温度的变化关系逐渐演化成为线性关系.随着温度的上升,噪声功率密度也逐渐上升.如图 5(c)所示,频率上升到 200 kHz 以后,噪声功率密度随温度的变化关系又出现了变化,在 T_c 以下,随着温度的升高,噪声功率密度也逐渐上升,但是温度超过 T_c 以后,噪声功率密度随温度上升的速度明显加快,在 T_c 附近,噪声谱出现明显的突变.

综合以上测量结果可知,高频噪声随温度的变化关系与低频噪声明显不同,这说明低频噪声与高频噪声的产生原因是不同的,低频噪声可能来源于体积加大的磁畴运动,而高频噪声来源于载流子.

对于纵向自发噪声,施加外磁场以后噪声的功率密度出现了一定程度的降低,在低频段,磁场对噪声功率密度的影响很小,而在高频段,磁场会使噪声幅度明显降低.对于横向噪声,噪声谱随温度的变化关系基本上与纵向噪声相同.

从实验上测量自发噪声谱是比较困难的,而从实验数据中推测出自发噪声的具体物理机制则更加困难.从目前状况来看,与此可能有关的物理机制大致有两种简单情况.第一种是磁矩在外磁场作用下出现了 Larmor 进动,这时噪声谱会在进动频率出现一个峰值,但我们所测量到的噪声谱不属于这种情

况.第二种是随机过程形成的 $1/f$ 噪声,形成随机过程的物理机制包括杂质成分对电子的吸附和释放、自旋态的上下翻转、电子在两个能级之间跳跃,对这种过程进行分析的方法就是把实验结果对理论公式进行参数拟合,但这需要做非常多的假定,参数选择的合理性目前也难以用实验证实.从实验结果来看,(Ga,Mn)As 样品的噪声谱明显是多种因素复合而成的,这些因素可能包括磁畴的随机运动、热噪声、载流子的散射等.目前,对这种复杂的随机过程进行谱分析是非常困难的,因为物理模型和噪声谱没有明显的对应关系,所以还不能建立合适的物理模型,这也是下一步工作的努力方向.

4. 结 论

在 (Ga,Mn)As 材料的温度从低温上升到高温的过程中,磁属性会经历从铁磁性向顺磁性的一个相变过程.通过测量自发涨落谱,我们发现 (Ga,Mn)As 材料的统计特性和功率密度谱在相变过程中会出现明显的变化.随着温度的升高, (Ga,Mn)As 的自发涨落会逐渐增大,这可以用涨落-耗散定理加以解释.外加磁场会降低 (Ga,Mn)As 的自发涨落,这可能是由于外加磁场使 (Ga,Mn)As 的磁畴部分有序化.对于不同频率的噪声,它们随温度的变化规律很不一样.这说明自发涨落噪声的来源可能有多个.噪声测量这种实验手段为自旋电子学的研究提供了一条新的途径.

- [1] Zutic I, Fabian J, Das Sarma S 2004 *Rev. Mod. Phys.* **76** 323
 [2] Awschalom D D, Flatté M 2007 *Nat. Phys.* **3** 153
 [3] Xia J B, Ge W K, Chang K 2008 *Spintronics of Semiconductor* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [夏建白、葛惟昆、常凯 2008 半导体自旋电子学(北京:科学出版社)]
 [4] Ohno H, Shen A, Matsukura F 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 363
 [5] Zhao J H, Deng J J, Zheng H Z 2007 *Prog. Phys.* **27** 109 (in Chinese) [赵建华、邓加军、郑厚植 2007 物理学进展 **27** 109]
 [6] Ohno H, Magn J 1999 *Magn. Mater.* **200** 110
 [7] Dietl T, Ohno H, Matsukura F, Cibert J, Ferrand D 2000 *Science* **287** 1019
 [8] Dietl T, Matsukura F, Ohno H 2002 *Phys. Rev. B* **66** 033203
 [9] Jungwirth T, Jairo S 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 809
 [10] Yamanouchi M, Chiba D, Matsukura F, Ohno H 2004 *Nature* **428** 539

- [11] Wang K Y 2008 *New. J. Phys.* **10** 085007
 [12] Crooker S A, Rickel D G, Balatsky A V, Smith D L 2004 *Nature* **431** 49
 [13] Oestreich M, Römer, Haug R J, Hägele D 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 216603
 [14] Zhu M, Li X, Xiang G, Samarth N 2007 *Phys. Rev. B* **76** 201201
 [15] Weber J 1956 *Phys. Rev.* **101** 1620
 [16] Manassen Y, Hamres R J, Demuth J E, Castellano A J 1989 *Phys. Rev. Lett.* **62** 2531
 [17] Balatsky A V, Manassen Y, Salem R 2002 *Phys. Rev. B* **66** 195416
 [18] Sleavey T, Hahn E L, Hilbert C, Clarke 1985 *Phys. Rev. Lett.* **55** 1742
 [19] Awschalom D D, Smyth J F, Grinstein G, Di Vincenzo D P, Loss D 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 3092

- [20] Takahisa M 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5292
- [21] Aleksandrov E B, Zapassky V S 1981 *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **81** 132
- [22] Guerrero R, Aliev F G, Tserkovnyak Y, Santos T S, Moodera J S 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 266602
- [23] Jiang L, Nowak E R, Scott P E, Johnson J, Slaughter J M, Sun J J, Dave R W 2004 *Phys. Rev. B* **69** 054407
- [24] Gokcea A 2006 *Phys. Rev. B* **99** 08A906
- [25] Bao J L, Zhuang Y Q, Du L, Li W H, Wan C X, Zhang P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2118 (in Chinese) [包军林、庄奕琪、杜磊、李伟华、万长兴、张 萍 2005 物理学报 **54** 2118]
- [26] Hu J, Du L, Zhuang Y Q, Bao J L, Zhou J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1384 (in Chinese) [胡 瑾、杜 磊、庄奕琪、包军林、周江 2006 物理学报 **55** 1384]
- [27] Jiang C P, Zhao J H 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 063908
- [28] Feller W 1968 *Introduction to Probability Theory and Its Applications* (Volume 1) (New York : John Wiley & Sons)
- [29] Stoica P, Moses R 1997 *Introduction to Spectral Analysis* (New Jersey : Prentice Hall)
- [30] Bartlett M S 1950 *Biometrika* **37** 1
- [31] Sih V, Lau W H, Myers R C, Horowitz V R, Gossard A C, Awschalom D D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 096605
- [32] Ganichev S D, Bel'kov V V, Tarasenko S A 2006 *Nat. Phys.* **2** 609

Electronic noise of diluted magnetic semiconductor $(\text{Ga}, \text{Mn})\text{As}$ around Curie point *

Yang Wei^{1,2)} Ji Yang^{1)†} Luo Hai-Hui^{1,2)} Ruan Xue-Zhong^{1,2)} Wang Wei-Zhu^{1,2)} Zhao Jian-Hua¹⁾

1 *Xi Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*

2 *Xi Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

(Received 8 March 2009 ; revised manuscript received 28 April 2009)

Abstract

We have studied the spontaneous fluctuation noise spectrum of $(\text{Ga}, \text{Mn})\text{As}$ in frequency domain from 1 kHz to 250 kHz. We found that the electronic noise can be reduced by a magnetic field and its magnitude increases with increasing temperature of the $(\text{Ga}, \text{Mn})\text{As}$ sample. The electrical noise spectra at different frequencies have different temperature dependence and their amplitude changes at the phase transition temperature, suggesting that the phase transition process of $(\text{Ga}, \text{Mn})\text{As}$ is subtly different from normal magnetic materials. Our results may help understanding the origin of magnetism in $(\text{Ga}, \text{Mn})\text{As}$.

Keywords : spintronics, diluted magnetic semiconductor, spontaneous noise

PACC : 7270, 7550P, 0690

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10674129).

† Corresponding author. E-mail : jiyang@red.semi.ac.cn