

## 多参数可调高速自旋噪声谱仪

李晨<sup>1,2</sup>, 丁畅<sup>3</sup>, 张桐耀<sup>1,2</sup>, 曹丹华<sup>3</sup>, 吴裕斌<sup>3</sup>, 陈院森<sup>1,2†</sup>

(1. 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006;

2. 极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006;

3. 华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 基于现场可编程门阵列技术(Field-Programmable Gate Array, FPGA), 我们开发了采样速率、数据处理长度等多参数可调的快速傅立叶变换功能模块, 用于灵活匹配实验测量中所要求的带宽和谱分辨率等参数要求。通过磁光法拉第自旋噪声谱在半导体的对比测量, 我们验证了FPGA技术的数据处理速率是商业谱分析仪的600倍左右。

**关键词:** 自旋噪声谱; 快速傅里叶变换; 现场可编程门阵列

**中图分类号:** O431

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-6654(2017)03-0228-04

### 0 引言

自旋噪声谱是近年发展起来的自旋态精密测量技术<sup>[1]</sup>, 其优点在于能够利用极弱的探测光对自旋系统实现近乎本征测量<sup>[2]</sup>; 特别是对于长寿命的自旋系统, 该技术可以用于量子物理的高精度探测<sup>[3-4]</sup>。对于一个自旋态, 其自旋寿命在时域上表现为该时间长度的自相关性, 在频谱上则反映为频谱宽度, 因此自旋噪声谱可以灵敏测量自旋寿命、Landé g 因子、局域自旋作用等自旋物理内容<sup>[5-6]</sup>。目前自旋噪声谱主要应用在原子气以及半导体自旋体系<sup>[7]</sup>。前者自旋寿命往往在一毫秒数量级, 半导体材料中电子自旋寿命则在十纳秒数量级, 因此测量的谱分辨率必须优于相对应的1 kHz 和 100 MHz 数量级的谱宽。在实际测量中, 噪声谱测量主要是由数据采集和快速傅立

叶变换(Fast Fourier Transformation, FFT)两部分来完成。采样速率决定了测量带宽, 其与采样数据长度的商则是谱分辨率。对于长寿命自旋系统, 为了满足高谱分辨率要求, 测量带宽往往在10 kHz ~ 1 MHz 级别; 而对于短寿命自旋系统, 所要求带宽往往在数百 MHz 级别。

为了同时能满足不同自旋体系的测量要求, 基于现场可编程门阵列技术(Field-Programmable Gate Array, FPGA), 我们开发了采样速率、数据处理长度等多参数可调的自旋噪声谱技术。针对不同的带宽和频谱分辨率等要求, 我们可以同时改变采样频率、FFT 数据长度、电压放大器增益和频谱平均次数等参数, 满足不同时间尺度自旋寿命系统的精密测量。

<sup>②)</sup> 收稿日期: 2017-06-14; 修回日期: 2017-06-22

**基金项目:** 国家自然科学基金(61574087); 山西省基础研究优秀青年基金(2015021002); 山西省回国留学人员科研资助项目(2015-009)

**作者简介:** 李晨(1993-), 男, 山西临汾人, 硕士生, 主要从事固态量子自旋物理方面的研究, E-mail: lichenePICANGEL@gmail.com。

**†通信作者:** 陈院森(CHEN Yuansen), E-mail: yuansen.chen@sxu.edu.cn; yuansen.chen@googlemail.com

## 1 设计思路及要点说明

为了提高自旋噪声谱的信噪比,我们主要在以下两个方面有明显改进。

### 1.1 高速高精度采集与处理

我们采用 Keysight 公司的 U5309A 高速数字化仪进行数据采集和实时 FFT 处理。为了高精度高速采集噪声信号,通过前置电压放大,我们充分利用模数转换器的 8 位精度以及满额量程。一方面我们运用合适带宽的前置运放模块,根据噪声信号的起伏幅值在 30 dB 至 70 dB 选择合适的增益,另外一方面,我们选择合适的模数变换量程和偏置匹配模拟信号的采样。采集的数据进入数据缓冲模块。基于 FPGA 模块,我们对缓冲数据进行四路并行高速频率抽取快速傅里叶变换。为了得到高信噪比的自旋噪声谱,我们进行无压缩 25 位定点的 FFT 运算,其中旋转因子精度固定在 18 位。

### 1.2 多参数可调的 FFT 运算

我们使用 FPGA 编写了采样稀疏算法,采样率可在 1 MS/s 至 2 GS/s 内以 2 的幂级数规律变化;同时 FFT 数据长度大范围可调,从 1 k-point 以 2 的幂级数递增至 64 k-point 共 7 档可变;在 U5309A 内部的 FFT 频谱累加次数也可以在 1 至 64 k 个点连续可变。这些灵活性可以让我们根据不同的测量要求控制测量时间、带宽和谱分辨率等实验参数。

我们采用公式  $\eta = t_{\text{FFT}}/t_{\text{total}}$  粗略度量开发系统

的数据利用率,其中  $t_{\text{FFT}}$  是数据采集所需时间, $t_{\text{total}}$  是从数据采集到计算机得出 FFT 噪声功率谱的总时间,包括数据采集、数据缓存、数据处理、FPGA-电脑之间数据传输、数据在电脑上平均计算和存储等各过程。我们采用 LabVIEW 里面的计时功能得到  $t_{\text{FFT}}$  和  $t_{\text{total}}$ 。表 1 中给出了数据利用率以及相对应的谱分辨率。由于 U5309A 的计算带宽为 500 MHz,在低采样速率条件下,数据利用率皆接近 100%,远远高于商业频谱分析仪的数据使用效率;在高采样率情况下,系统数据利用率接近计算带宽和数据采样速率的比值。

表 1 不同采用速率下的数据利用率和谱分辨率。FFT 处理的数据长度为 64 k-point。

Table 1 Data efficiency and spectral resolution versus sample rate for the FPGA-FFT module The spectral resolution is calculated using a data length of 64 k-point.

Sample rate (MS/s)	Data efficiency (%)	Spectral resolution (kHz)
2 000	24	30.5
1 000	48	15.3
500	90	7.6
250	93	3.8
125	93	1.9
62.5	93	0.95
31.3	93	0.48
15.6	93	0.24
7.8	93	0.12
3.9	93	0.06
1.9	93	0.03
1.0	93	0.015

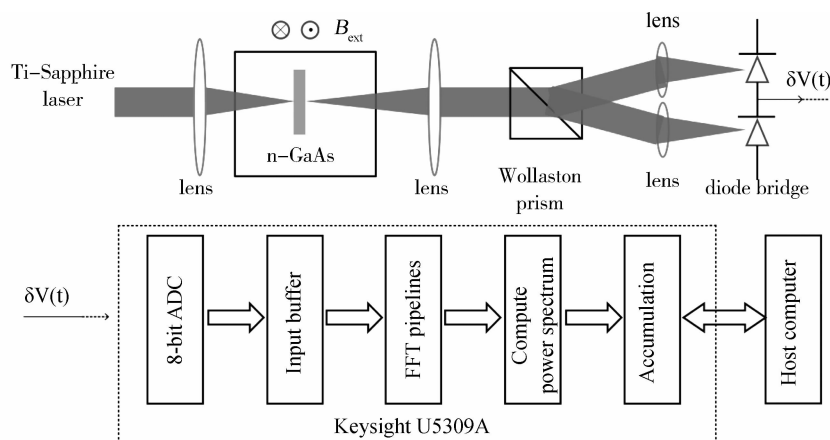


Fig. 1 Schematic description of spin noise spectroscopy of Faraday rotation

图 1 法拉第自旋噪声谱仪的结构框图

## 2 实验结果

图 1 是自旋噪声谱的实验框图。我们采用窄线宽钛宝石激光产生窄线宽相干光。经过偏振光学和透镜后,聚焦在低温腔的 n-GaAs 样品上面,光斑直径大小大概为  $40\ \mu\text{m}$ ;恒温腔区域可以施加横向磁场。准直的透射光由一个沃拉斯顿棱镜分出 s-态和 p-态的偏振光,被光桥探测器进行平衡探测。由于电子自旋在半导体内部的随机涨落,基于法拉第效应,透射偏振光的偏振态也会相应随机涨落,从而造成 s-态和 p-态分量的幅值会有涨落,因此平衡探测可以灵敏测量自旋噪声信号。

光电信号  $\delta V(t)$  经由电压放大器后,进入 U5309A 的模数转换接口。数据采集至缓冲器,由四路 FFT 进行实时运算。基于 LabVIEW 和

FPGA 的接口程序,其多次平均后的自旋噪声功率谱经由 PCI-e 传输线被送至电脑,再进行多次平均和计算。为了验证基于 FPGA 噪声谱的高数据利用率,我们做了自旋噪声谱测量的对比实验。

测试样品为 n-GaAs,掺杂浓度约为  $1.6 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ ,样品温度为 4 K,激光波长为 831.6 nm,入射功率为 1 mW,外加横向磁场为  $B_{\text{ext}} = 5.418\ \text{mT}$ 。在图 2(a)中,黑粗线是基于 FPGA 测量的自旋噪声谱,数据采集率 250 MS/s,测量时间 20 s,FFT 数据长度为 4 096,因此对应频谱分辨率为 61 kHz。细实线为基于洛仑兹分布的拟合结果,对应自旋寿命为 26 ns。图 2(b)为使用 Agilent-N9020A 频谱仪的自旋噪声谱结果。频谱扫描范围为 0 至 80 MHz,频谱分辨率为 80 kHz,测量时间为 20 min。

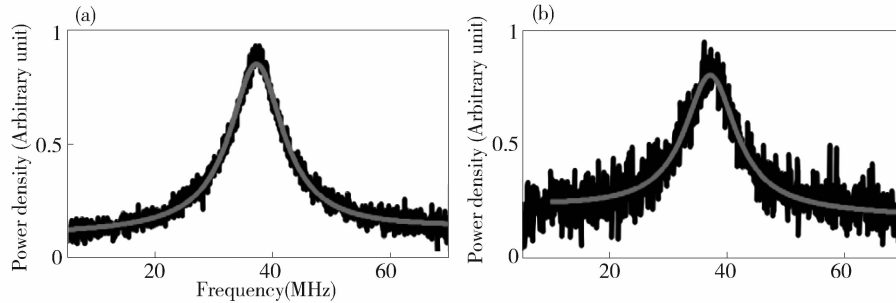


Fig. 2 Spin noise spectrum obtained in n-GaAs for an external field of  $B_{\text{ext}} = 5.418\ \text{mT}$  by

(a) FPGA-FFT with measurement time of 20 seconds and (b) a spectrum analyzer with measurement time of 20 minutes

图 2 在 n-GaAs 中采用两种方式得到的自旋噪声谱结果:(a) FPGA-FFT,测量时间为 20 s;

(b)谱分析仪,测量时间为 20 min。样品温度为 4 K,外加磁场为  $B_{\text{ext}} = 5.418\ \text{mT}$

对比图 2(a)和(b),我们可以发现图 2(a)的信噪比约为 10,而图 2(b)的信噪比约为 3。对于功率谱,信噪比与平均次数的平方成正比,因此我们可以估算采用频谱仪需要约 200 min 的测量才可以达到图 2(a)的同等信噪比。这说明对于 FFT 功能,基于 FPGA 的计算 FFT 的数据处理速率是频谱仪的约 600 倍左右。这种数据处理速率的差别来源于两者工作原理的不相同。对于基于 FPGA 的 FFT 功能模块,几乎所有实时采集的数据都用于了 FFT 运算;而对于频谱仪,其基本原理是利用参考频率信号和测量信号作积分测量,从而解析出测量信号里面的频谱强度分布;在解析每一个频率成分过程中,其

它频率信号均属于无用,因此其数据利用效率往往在 0.1%数量级<sup>[8]</sup>。

## 3 总结

基于 FPGA 实现的 FFT 功能模块和磁光法拉第光学平台,我们建立了多参数可调的自旋噪声谱测量技术,其中数据采集速率可以在 2 MS/s 和 2 GS/s 之间调节,以及 FFT 处理数据长度可以在 1 k-point 至 64 k-point 之间选择,以满足不同自旋系统测量的带宽和谱分辨率要求。通过对 n-GaAs 体系自旋噪声谱测量,我们验证了基于 FPGA-FFT 功能模块的数据利用率是商业频谱仪的约 600 倍。

**致谢:**我们特别致谢彭堃堃院士和太原山大学开发的经费支持。我们感谢中科院半导体研究所姬光有限公司租借的钛宝石激光器以及进行 FPGA 扬和马健所提供的 n-GaAs 测试样品。

### 参考文献:

- [1] Crooker S A, Rickel D G, Balatsky A V, *et al.* Spectroscopy of Spontaneous Spin Noise as a Probe of Spin Dynamics and Magnetic Resonance[J]. *Nature*, 2004, **431**(7004):49. DOI:10. 1038/nature02804.
- [2] Dahbashi R, Hübner J, Berski F, *et al.* Optical Spin Noise of a Single Hole Spin Localized in an (InGa) As Quantum Dot [J]. *Phys Rev Lett*, 2014, **112**(15):156601. DOI:10. 1103/PhysRevLett. 112. 156601.
- [3] Lucivero V G, Jiménez-Martínez R, Kong J, *et al.* Squeezed-light Spin Noise Spectroscopy[J]. *Phys Rev A*, 2016, **93**(5): 053802. DOI:10. 1103/PhysRevA. 93. 053802.
- [4] Glasenapp P, Sinitsyn N A, Yang L, *et al.* Spin Noise Spectroscopy Beyond Thermal Equilibrium and Linear Response[J]. *Phys Rev Lett*, 2014, **113**(15):156601. DOI:10. 1103/PhysRevLett. 113. 156601.
- [5] Zapasskii V S. Spin-noise Spectroscopy; From Proof of Principle to Applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, **5**(2):131-168. DOI:10. 1364/AOP. 5. 000131.
- [6] Sinitsyn N A, Pershin Y V. The Theory of Spin Noise Spectroscopy: A Review[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, **79**(10):106501.
- [7] Müller G M, Oestreich M, Römer M, *et al.* Semiconductor Spin Noise Spectroscopy: Fundamentals, Accomplishments, and Challenges[J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2010, **43**(2):569-587. DOI:10. 1016/j. physce. 2010. 08. 010.
- [8] Crooker S A, Brandt J, Sandfort C, *et al.* Spin Noise of Electrons and Holes in Self-assembled Quantum Dots[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, **104**(3):036601. DOI:10. 1103/PhysRevLett. 104. 036601.

## Tunable High-speed Spin Noise Spectroscopy

LI Chen<sup>1,2</sup>, DING Chang<sup>3</sup>, ZHANG Tong-yao<sup>1,2</sup>,  
CAO Dan-hua<sup>3</sup>, WU Yu-bin<sup>3</sup>, CHEN Yuan-sen<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,  
Institute of Opto-electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

3. School of Optical and Electronics Information, Huazhong University of  
Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** We have developed real-time fast Fourier transformation (FFT) of a tunable sampling rate and data length using a field-programmable gate array (FPGA), respectively, for a best match of the spectral bandwidth and spectral resolution required in a specific measurement. By performing spin noise measurements of Faraday rotation in n-GaAs, we have demonstrated that the rate of processing data by the developed FPGA-based FFT is higher by a factor of  $\sim 600$  than that by a commercial spectrum analyzer.

**Key words:** spin noise spectroscopy; fast Fourier Transform; field-programmable gate array