第 49 卷 第 2 期：644-650 高电压技术 Vol.49, No.2: 644-650
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221511

基于里德堡原子的工频电场测量

崔帅威[1]，彭文鑫[2]，李松浓[2]，蒋　源[1]，姬中华[1]，赵延霆[1]
（1. 山西大学激光光谱研究所，太原 030006；2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院，重庆 400015）

摘　要：里德堡原子是主量子数 n 很大的高激发态原子。里德堡原子由于具有大极化率特性，其对外部电场十分敏感，原子能级偏移与电场直接关联，可以用来实现对电场强度和频率的精确测量。该文通过双光子激发的方式实现室温中铯原子 $20S_{1/2}$ 里德堡态的制备，并基于里德堡原子的电磁诱导透明(electromagnetically induced transparency，EIT)光谱实现了工频电场的测量。实验中研究了工频电场的幅值和频率与 EIT 的频移关系，实现对工频电场强度和频率的测量。实验中 EIT 光谱频移是测量电场特性的关键，利用电光调制器对探测光相位进行调制，在EIT光谱两侧产生的边带峰与主峰频率间隔则严格等于电光调制器射频源频率，以此频率作为校准基准实现EIT光谱频移的准确测量。设计了一种微型光纤结构的传感器，可以实现电场的远距离测量。该研究方案对室外高压工频电场的可溯源精确测量及工程应用具有重要参考价值，适用于新型电力系统建设的测量要求。
关键词：里德堡原子；电磁诱导透明；斯塔克效应；工频电场；电场传感器

Power Frequency Electric Field Measurement Based on Rydberg Atoms

CUI Shuaiwei[1], PENG Wenxin[2], LI Songnong[2], JIANG Yuan[1], JI Zhonghua[1], ZHAO Yanting[1]
(1. Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;
2. State Grid Chongqing Electric Power Company Electric Power Research Institute, Chongqing 400015, China)

Abstract: Rydberg atoms are highly excited atoms with a large principal quantum number n. Rydberg atoms are very sensitive to external electric fields due to their large polarizability. As the atomic energy level shift is directly related to the electric field, Rydberg atoms can be used to accurately measure the strength and frequency of external electric field. In this paper, the preparation of $20S_{1/2}$ Rydberg state of cesium atoms at room temperature is realized by two-photon excitation, and the measurement of electric field at industrial frequency is realized based on electromagnetically induced transparency (EIT) spectroscopy of Rydberg atoms. In the experiment, the relationship between the amplitude and frequency of the power frequency electric field and the frequency shift of the EIT is studied, and the measurements of the strength and frequency of the power frequency electric field are realized. Meanwhile, the frequency shift of the EIT spectrum is the key to measuring the characteristics of the electric field. We adopt the electro-optic modulator to modulate the phase of the probe light. The frequency interval between the side band peak generated on both sides of the EIT spectrum and the main peak is strictly equal to the frequency of the radio frequency source of the electro-optic modulator. This frequency acts as a calibration criteria to enable accurate measurement of the EIT spectral frequency shift. We design a micro all-fiber structure sensor, which can realize the remote measurement of electric field. The research scheme in this paper has important reference value for the traceable and accurate measurement and engineering application of outdoor high-voltage power frequency electric field, and it is suitable for the measurement requirements of new power system construction.
Key words: Rydberg atom; electromagnetically induced transparency; Stark effect; power frequency electric field; electric field sensor

0　引言

随着新型电力系统建设的推进，具有高比例新能源接入的电网架构逐渐形成，电网形态将由传统单向逐级输电向包括交直流混联大电网、微电网、局部直流电网和可调节负荷的能源互联网转变。由于电源侧以强不确定性、弱可控出力的新能源发电装机主导，为保障电网的安全运行，传统的控制模式也将向源网荷储协同互动的非完全实时平衡模式转变，在技术层面需要电力系统工频信号感知方法的革新[1-2]。传统上测量工频电场主要采用电学原理测量法和光学式电场测量法。电学原理测量法包括

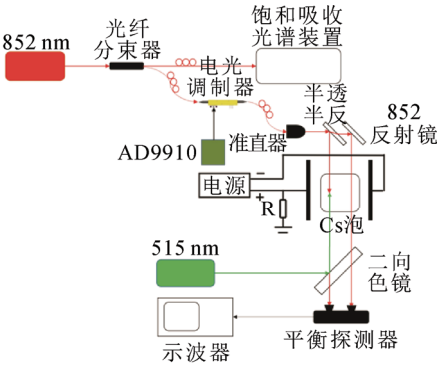
基金资助项目：国家电网公司科技项目(5700-202127198A-0-0-00)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5700-202127198A-0-0-00).

小球法、电容充电法等电位平衡的方法及电荷法等[3-5]，但利用该原理制成的仪器准确性差，且难以应用到现场的带电测量。伴随着光学技术的进步，以 Pockels 效应为原理的光学式电场传感器逐渐兴起[6-8]；随着光纤技术的发展，又出现了以光纤传感器为媒介的电场测量探头[9-10]。由于电光效应具有温度相关性，因此基于电光效应的电场传感器在外界环境下使用存在温度漂移问题[11-12]。此外，在利用电光晶体感应静态或极低频电场时，晶体内将产生电荷漂移和电场分布改变，导致输出传感信号不稳定情况出现[13-14]。随着电网向智能化和数字化转型，传统电力测量设备逐渐显现出测量精度、可靠性和适应性上的技术瓶颈。由于里德堡原子有很大的电极化率[15-16]，对外电场较敏感，相比传统电场测量技术在测量精度和可靠性上具有明显优势。近几年，以里德堡原子电磁诱导透明(electromagnetically induced transparency，EIT)效应为基础[17]，基于里德堡原子的电磁场、微波场甚至太赫兹场的测量成为研究热点[18-26]，为实现全光学、高灵敏度、免校准电场测量提供了一种新技术。

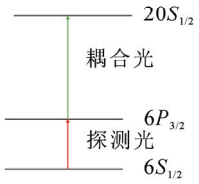
本文以铯原子气室作为传感器，演示了一种基于里德堡原子 EIT 光谱的工频电场测量方法。实验中使用 852 nm 和 515 nm 激光器实现 $6S_{1/2}\rightarrow 6P_{3/2}\rightarrow 20S_{1/2}$ 的双光子共振跃迁，构成阶梯型三能级系统，获得室温下铯原子 $20S_{1/2}$ 态里德堡原子。通过扫描 515 nm 耦合光频率，探测 852 nm 探测光光强，获得电磁诱导透明(EIT)光谱。本文使用的铯泡为蓝宝石材料，以减弱电场屏蔽效应。通过向平行极板施加电压在极板间产生电场，通过测量 EIT 光谱的频移实现对电场强度和频率的测量，频率的测量误差约 0.2%。同时设计制作了一种微型全光纤结构的电场传感器，集成的光学探头可实现电场的远距离测量，便于后续的电场测量设备的集成化设计。

1 实验装置

图 1 为基于铯里德堡原子电磁诱导透明光谱的工频电场测量实验装置及能级示意图。852 nm 和 515 nm 的激光用于 Cs 原子里德堡态制备。852 nm 激光器为分布式反馈(distributed feedback laser, DFB)光纤激光器，经光纤分束器分成两束光：一束进入饱和吸收光谱装置，作用是将 852 nm 激光频率锁定到铯原子 $6S_{1/2}(F=4)\rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$ (F 和 F' 分别代表 $6S_{1/2}$ 和 $6P_{3/2}$ 态上对应的超精细能级)的跃迁线；



(a) 工频电场测量实验装置



(b) 阶梯型里德堡原子能级示意图

图 1 基于里德堡阶梯型 EIT 系统的工频电场测量实验装置和基于阶梯型里德堡原子能级示意图

Fig.1 Schematic diagram of power frequency electric field measurement experimental setup and energy levels based on Rydberg ladder-type EIT system

另一束通过准直器实现 852 nm 激光的扩束和准直。然后通过分束镜分成两束光进入铯泡，使铯原子从基态 $6S_{1/2}$ 跃迁至 $6P_{3/2}$ 激发态，其中一束光作为探测光与 515 nm 激光形成阶梯型 EIT 能级耦合，如图 1(b)所示；另一束作为参考光用于消除 EIT 光谱的背景信号。515 nm 激光器为外腔半导体激光器，首先经过一个中心波长为 515 nm 的隔离器，其作用是为了防止 515 nm 激光反射进入激光器，造成激光器输出不稳定。515 nm 激光经过隔离器后通过二向色镜(852 nm透射，515 nm反射)反射进入铯泡，和 852 nm 探测光反向传播，实现铯原子从 $6P_{3/2}$ 激发态跃迁至 $20S_{1/2}$ 里德堡态。852 nm 探测光和参考光通过二向色镜透射进入平衡探测器，平衡探测器将光信号转换成电信号，并将探测光的电信号减去参考光的电信号，最大程度地减小检测噪声。平衡探测器和示波器连接，通过扫描耦合光可在示波器上观察到无多普勒背景的 EIT 光谱。铯泡为 20 mm×20 mm×20 mm 的立方体结构，进入铯泡的探测光功率为 350 μW，耦合光功率为 29 mW。铯蒸气池两侧加有间距 5 cm 的平行极板模拟工频电场，极板由铜板所制，尺寸为 100 mm×80 mm，厚度为 2 mm，极板间距为 50 mm。高压放大器通过并联一个 220 Ω的电阻与平行极板连接，极板上可加载

0~150 V 的电压，可产生最大场强为 2800 V/m 左右的工频模拟电场。

实验中使用的铯泡为蓝宝石材质。由于铯原子具有吸附性，对于普通玻璃的铯泡，在室温条件下，铯原子吸附在铯泡的内表面，当施加一个缓慢变化的外加电场时，表面自由电荷重新分配，以保持导电表面上的电位相等，并消除来自外部的电场[27]，因此产生于真空环境之外的电场信号只有在电场以高频率(从兆赫兹到太赫兹)振荡时才能被检测到。为实现工频电场的测量，需降低低频电场屏蔽效应。其中蓝宝石材料内表面电阻比玻璃高几个数量级[28-29]，可减弱碱金属原子吸附在蓝宝石表面上，降低工频电场作用下铯泡对电场的屏蔽作用。

实验中 EIT 光谱频移是测量电场特性的关键。利用电光调制器对探测光相位进行调制，以电光调制器射频源作为频率标准实现 EIT 光谱频移的准确测量。光路图中的电光调制器对 852 nm 激光相位进行调制，实验中使用的电光调制器为 852 nm $LiNbO_3$ 相位调制器，使用 AD9910 模块产生射频信号输入到电光调制器的射频输入口。当 852 nm 激光经过相位调制后在探测到的 EIT 两侧出现两个边带峰，其中任一边带峰到 EIT 主峰的频率距离严格等于加入电光调制器射频输入端口的频率。该频率值正比于示波器采集到的时间间隔，因此可将示波器上光谱在横坐标上的偏移转换成频率偏移，实现电场下 EIT 频移的准确测量。

实验中，首先通过高压放大器向极板上加载直流电压，通过改变电压的幅值在极板之间产生不同强度的电场，观察不同电场情况下 EIT 变化情况，确定电场强度和 EIT 频移的量化关系。以此量化关系为基础向极板加载模拟工频电场，实现模拟工频电场的强度和频率测量。

2 实验结果与分析

基于里德堡原子的直流(或工频)电场测量是通过观察里德堡原子在电场作用下的斯塔克效应来实现的。对于类氢原子，在弱电场作用下(电场强度低于 Inglis-Teller 限值，具体定义见式(3))，表现出线性 Stark 效应。用微扰理论在抛物线坐标系中获得类氢里德堡原子 Stark 效应能量[30]的一阶近似为

$$W_n = -\frac{Rhc}{n^2} + \frac{3}{2}E \cdot n\left(n_1 - n_2\right)ea_0 \tag{1}$$

二阶近似为

$$W_n = -\frac{Rhc}{n^2} + \frac{3}{2}E \cdot n(n_1 - n_2)ea_0 - \frac{1}{16}E^2 n^4 (17n^2 - 3(n_1 - n_2)^2 - 9m^2 + 19)\frac{e^2 a_0^2}{E_h} + \cdots \tag{2}$$

式中：n 为等效主量子数；n_1、n_2 为抛物线系量子数；R 为约化里德堡常数；h 为普朗克常数；c 为光速；e 为电子电荷常数；a_0 为玻尔半径；m 为磁量子数，$E_h = 2Rhc$。由式(1)可知，电场下的能级偏移 ΔW 和电场强度呈线性关系。根据式(2)计算铯原子 n=20，$|m|$=1/2, 3/2, 5/2 附近的 Stark 结构，如图 2 所示。从图 2 中可以看到，在弱电场作用下(虚线左侧)能级偏移 ΔW 和电场强度呈线性关系，当电场强度在虚线右侧时，存在能级交叉现象，不再满足线性关系。

对 Inglis-Teller 限值定义为

$$F_{\mathrm{IT}} = \frac{F_0}{3n^5} \tag{3}$$

式中：$F_0 = 2Rhc/ea_0$，对于 n=20 的里德堡态原子，F_{IT}≈400 V/cm，在实验中向铯泡施加的电场 $E << F_{\mathrm{IT}}$。

利用饱和谱将 852 nm 探测光频率锁定到 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$跃迁线上，锁定后的频率抖动小于 1 MHz，扫频 515 nm 激光，扫描频率为 10 Hz，即可观测到电磁感应透明信号光谱，如图 3(a)中的实线所示。通过电光调制器对 852 nm 激光相位进行调制，调制频率为 160 MHz，调制幅度为 800 mV，EIT 两侧出现两个边带峰，如图 3(a)中虚

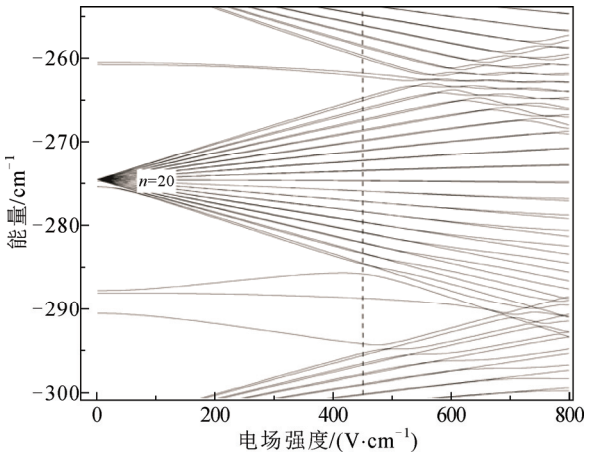


图 2 铯原子 n=20，$|m|$=1/2, 3/2, 5/2 附近计算的 Stark 结构

Fig.2 Computed Stark structures around cesium atoms n=20, $|m|$=1/2, 3/2, 5/2

线所示。这两个边带峰与主峰的频率间隔均严格等于调制信号频率，可将示波器采集到的时间轴数据转换成相对频率间隔数据。实验施加到相位调制器调制频率为 160 MHz，以此为标准将示波器采到的时间轴转换成频率轴，如图 3(a)横坐标所示。当向平行极板加载 60 V 的直流电压时，极板中间产生平行电场，由于 DC-Stark 效应，EIT 信号发生频移，如图 3(b)中虚线所示。

因极板表面是有限尺寸，直接用电压源输出电压 U 和极板间距 d 的比值得到电场强度是不准确的。利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件对平行电极板上加载直流电压后的电场分布进行模拟。图 4(a)为向极板上加载 0~150 V 直流电压时模拟得到极板中间的电场强度值，图中横坐标通过平行极板间电场公式 $E=U/d$ 计算得到的电场值，纵坐标为通过模拟得到的极板中间处的电压值，点是模拟结果，曲线为数据的线性拟合，最佳拟合函数为

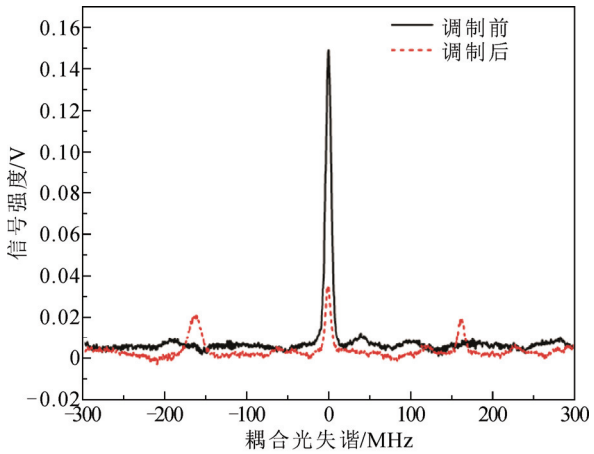
$$E=0.83E'-0.77 \tag{4}$$

式中：E 为模拟值；E'为高压电源电压输出值。改变加载极板上的电压，根据此式可方便地得到极板间实际电场强度。

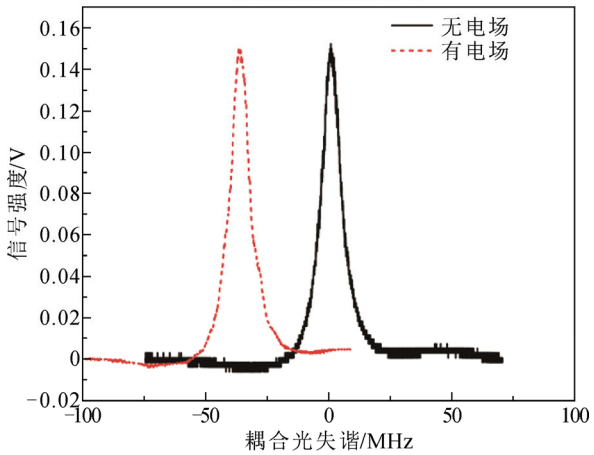
通过改变高压电压源的输出电压改变施加在铯泡上的电场强度，随着电场强度的增加，EIT 信号的频移量逐渐增大。分别在不同的电场强度下测量了一系列 EIT 光谱的频移量，如图 4(b)所示。图中点是测量的结果，曲线为对实验数据的线性拟合，最佳拟合函数为

$$\Delta=0.0352E+0.268 \tag{5}$$

式中 Δ 为 EIT 光谱频移量，电场为零时拟合的背景电场强度为 0.268 V/cm。从拟合式(5)可看出，EIT 信号的频移量和施加铯泡上的电场呈线性关系，和理论计算指出的在弱电场下能级偏移 ΔW 和电场强度呈线性关系相一致。该关系式也是利用里德堡原子测量电场强度的依据，测量未知电场强度时只需将获得的



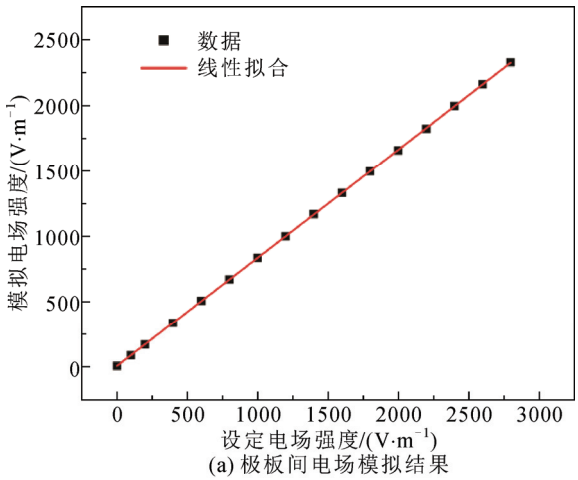
(a) 实线为EIT信号, 虚线为对探测光相位调制后的EIT信号



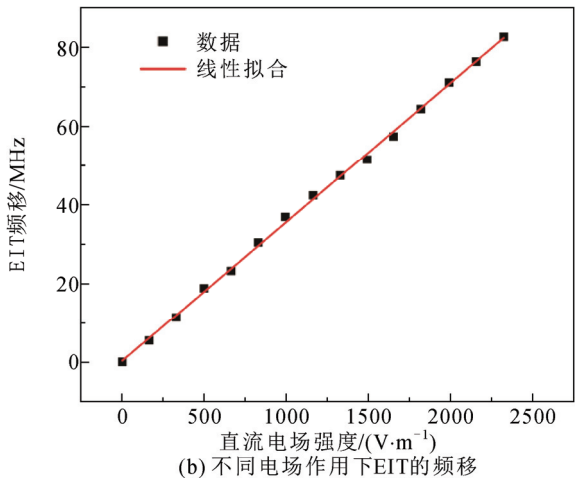
(b) 实线为无电场时的EIT信号, 虚线为有电场时的EIT信号

图 3　对探测光相位调制的 EIT 信号和在有无电场时的 EIT 信号

Fig.3　Phase-modulated EIT signal for probe light and the EIT signal with or without electric field



(a) 极板间电场模拟结果



(b) 不同电场作用下EIT的频移

图 4　极板间电场模拟及电场作用下的 EIT 频移

Fig.4　Simulation of the electric field between the plates and EIT frequency shift under different electric fields

频移量代入该式即可反推出相对应的电场强度 E。

在获得直流电场强度与 EIT 光谱频移的量化关系后，研究模拟工频电场和 EIT 光谱的量化关系。通过高压放大电源输出频率为工频电压，将在极板之间产生一个工频电场，在示波器上观察到 EIT 光谱随工频电场的频率左右移动。为了能够准确地测量 EIT 光谱的频率，将 515 nm 激光频率锁定在 EIT 光谱的共振位置处，通过观察 852 nm 探测光的强度变化，可得到一个正弦信号，正弦信号的频率对应于工频电场的频率。图 5 是在 40、50、60 Hz 模拟工频电场下信号的测量结果，实线是测量数据，虚线是正弦信号的拟合结果。通过正弦函数拟合，可以获得被测工频电场的频率值。

实验中对在 40~60 Hz 内的电场进行测量，测量频率间隔为 1 Hz。图 6(a)为通过正弦函数拟合得到的模拟工频电场频率拟合结果，横坐标为高压放大器输出的电压频率，纵坐标为测量的 852 nm 探测光强度变化的正弦信号频率，通过对输入电场频率和测量结果进行线性拟合，得到的斜率为 0.998，因此工频电场频率测量误差优于 0.2%。图中采样点数为 10^5，扫频速率为 10 Hz，获得该传感器采样率 1 MHz。

当加载工频电场时 EIT 光谱移动非常快，不便于观察。为较准确地测量 EIT 光谱峰值位置的准确偏移，将 515 nm 激光的扫描频率改为 1 kHz，EIT 信号移动变慢，方便记录 EIT 频移量。图 6(b)中的点即为不同工频电场强度下的 EIT 频移量，曲线为直流电场下的 EIT 频移量。从图中可以看出，在工频电场不同强度下 EIT 频移量与相同直流电场强度下 EIT 的频移量是一致的，这证明可以使用直流电场强度与 EIT 频移量的量化关系(即表达式(5))测量工频电场强度。

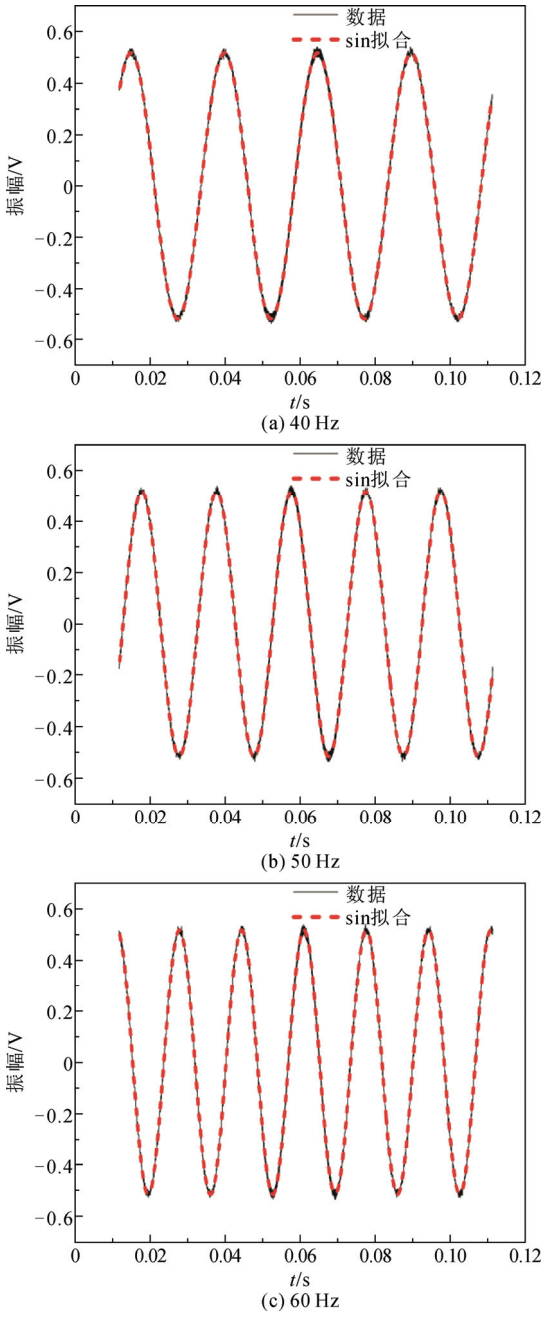


图 5 不同频率的工频电场作用下探测光强度变化

Fig.5 Intensity change of probe light under the power frequency electric field with different frequencies

3 全光纤结构的电场传感器

通过前文的研究在实验室平台上实现了工频电场强度和频率的测量，为了能够实现远距离或者室外工频电场的测量，需要通过光纤实现 852 nm 和 515 nm 激光的远距离传输到铯泡，并将铯泡放置在电场测量处，通过前文中工频电场的测量方法实现工频电场的准确测量。

图 7 为设计的全光纤结构的电场传感器照片。852 nm 激光通过工作波长范围为 780~970 nm 光纤传输，经 GRIN 透镜 1 扩束和准直入射到原子气室的一端。另一端的 515 nm 激光通过工作波长范围为 450~600 nm 的光纤传输，经 GRIN 透镜 2 扩束和准直与 852 nm 激光重合，入射到原子气室的另一端。为探测 EIT 信号，GRIN 透镜 2 同时耦合另一根 780~970 nm 的光纤，将 852 nm 激光通过该光纤传输到光电探测器。

安装时，首先调整 852 nm 光纤耦合端与 GRIN 透镜 1 之间的距离，以最大限度地提高激光通过 GRIN 透镜 1 的效率，其次调整 515 nm 激光光纤和 852 nm 激光光纤耦合端与 GRIN 透镜 2 之间的间距

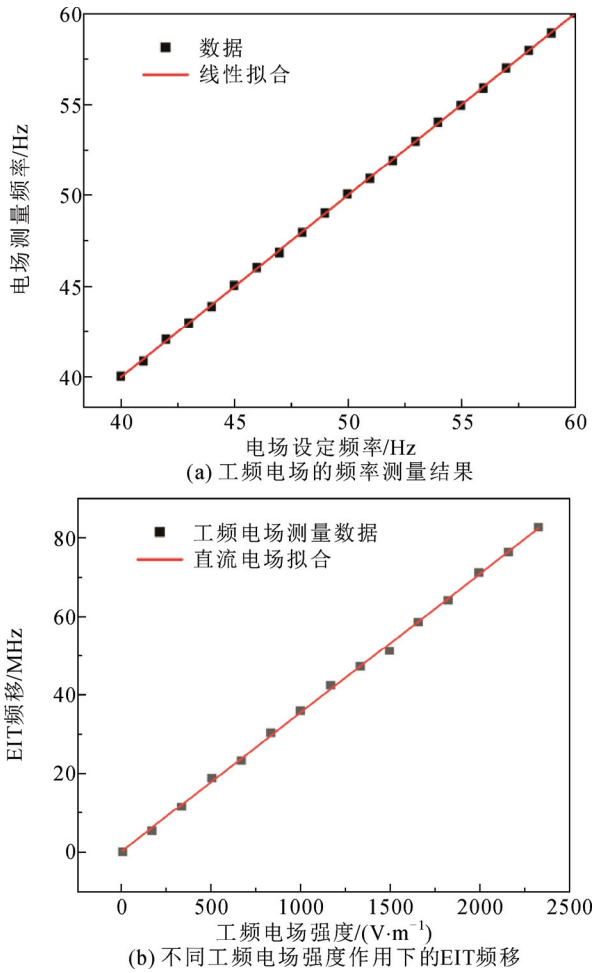


图 6　工频电场的频率和强度的测量结果

Fig.6　Measurement results of frequency and strength of power frequency electric field

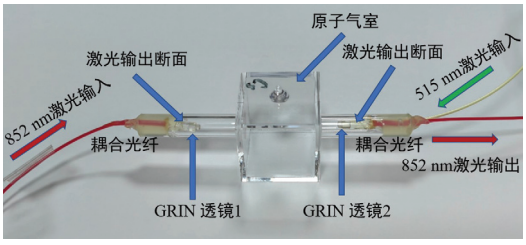


图 7　全光纤结构的电场传感器

Fig.7　Electric field sensor with all-fiber optic structure

以及两个 GRIN 透镜之间的距离，使 852 nm 激光信号最大限度的透过 GRIN 透镜 2。表 1 为该光纤传感器 852 nm 激光的耦合效率测量数据，P_0 为 852 nm 的入射 GRIN 透镜 1 的光功率，P 为 852 nm 的出射 GRIN 透镜 2 的光功率，η_{852} 为光纤传感器 852 nm 激光的耦合效率，通过测试发现光纤传感器 852 nm 激光的平均耦合效率为 55.4%。当两个 GRIN 透镜的位置确定后使用特殊的紫外胶水将 GRIN 透镜固定在原子气室的两端。

表 1　光纤耦合器 852 nm 耦合效率测量数据

Table 1　Fiber coupler 852 nm coupling efficiency measurement data

P_0/mW	10	9	8	7	6
P/mW	5.8	4.9	4.3	3.9	3.3
η_{852}/%	58	54	54	56	55

需要强调的是，该全光纤电场传感器具有温度变化免疫特性。温度变化时，EIT 光谱强度(即 EIT 信号的纵轴数据)虽然会受到影响(这是因为温度变化时原子气室内铯原子的密度将发生变化，光纤耦合效率也受到影响)，但能级偏移(EIT 信号的横轴数据)不会受到影响。因为实现原子从基态到激发态跃迁的激光器采用饱和吸收光谱技术实现频率锁定，饱和光谱装置采用对射的两束光，这样的光路可以保障激光频率锁定的吸收峰不受温度影响，从而保障从激发态到里德堡态的跃迁频率也不随温度改变发生变化，因此温度的改变不会影响里德堡原子能级偏移，即该类型传感器具有温度变化免疫特性。这种无金属介入、温度变化免疫的微型光纤式电场传感器，极大地简便了基于铯原子里德堡态电磁诱导透明的工频电场测量实现及相关产品开发的研究。

4　结论

1）实验中首先使用电光调制器对 852 nm 激光相位调制，在 EIT 两测出现两个边带峰，这两个边带峰与 EIT 主峰的频率间隔严格等于调制信号频率，可将示波器采集到的时间轴数据转换成相对频率间隔数据。

2）通过向极板加载直流电场观察 EIT 的频移情况，量化了电场强度和 EIT 频移的线性依赖关系。模拟工频电场的测量证明了直流电场强度与 EIT 频移的依赖关系也适用了工频电场。还通过 EIT 光谱测量了不同模拟工频电场的频率，频率的测量误差大约 0.2%。该方案为工频电场的测量提供了一种新型测量手段。

3）设计制作了一种微型光纤式电场传感器，该光纤传感器 852 nm 激光的平均耦合效率为 55.4%。而且该传感器具有无金属介入、温度变化免疫的特点，对室外高压工频电场的可溯源精确测量及工程应用具有重要参考价值，适用于新型电力系统建设的测量要求，并有望实现远离输电线路的空间工频场强度和频率测量。

参考文献 References

[1] 舒印彪，陈国平，贺静波，等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学，2021，23(6)：61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.

[2] 肖先勇，郑子萱. “双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统：贡献、关键技术与挑战[J]. 工程科学与技术，2022，54(1)：47-59.
XIAO Xianyong, ZHENG Zixuan. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: contribution, key techniques, and challenges[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 47-59.

[3] MISAKIAN M, FULCOMER P M. Measurement of nonuniform power frequency electric fields[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1983, 18(6): 657-661.

[4] 汪金刚，林 伟，李 健，等. 电容式交变电场传感器与工频电场检测试验研究[J]. 传感器与微系统，2010，29(9)：21-23，26.
WANG Jingang, LIN Wei, LI Jian, et al. Study on capacitive alternating electric field sensor and detecting test on power frequency electric field[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2010, 29(9): 21-23, 26.

[5] 白 强，夏善红，陈绍凤，等. 新型旋片式空中电场传感器及应用[J]. 电子与信息学报，2004，26(4)：651-654.
BAI Qiang, XIA Shanhong, CHEN Shaofeng, et al. A novel fieldmill used as space electric field sensor and its application[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2004, 26(4): 651-654.

[6] ALFERNESS R C. Waveguide electrooptic modulators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1982, 30(8): 1121-1137.

[7] BULMER C H, BURNS W K, HISER S C. Pyroelectric effects in $LiNbO_3$ channel-waveguide devices[J]. Applied Physics Letters, 1986, 48(16): 1036-1038.

[8] HIDAKA K, KOUNO T, HAYASHI I. Simultaneous measurement of two orthogonal components of electric field using a Pockels device[J]. Review of Scientific Instruments, 1989, 60(7): 1252-1257.

[9] 司荣仁，石立华，陈 锐，等. 球形光纤传输三维电场传感器[J]. 强激光与粒子束，2012，24(12)：2930-2934.
SI Rongren, SHI Lihua, CHEN Rui, et al. Three-dimensional electric-field sensor for spherical fiber transmission[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(12): 2930-2934.

[10] 张旭辉，王陆唐，方 捻. 基于光纤光栅传感技术的工频电场测量研究[J]. 激光与光电子学进展，2016，53(2)：020603.
ZHANG Xuhui, WANG Lutang, FANG Nian. Study on power frequency electric-field measurements based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 020603.

[11] ALFERNESS R C. Waveguide electrooptic modulators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1982, 30(8): 1121-1137.

[12] HIDAKA K, KOUNO T, HAYASHI I. Simultaneous measurement of two orthogonal components of electric field using a Pockels device[J]. Review of Scientific Instruments, 1989, 60(7): 1252-1257.

[13] BULMER C H, BURNS W K, HISER S C. Pyroelectric effects in LINBO3 channel-waveguide devices[J]. Applied Physics Letters, 1986, 48(16): 1036-1038.

[14] MAENO T, NONAKA Y, TAKADA T. Determination of electric field distribution in oil using the Kerr-effect technique after application of DC voltage[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(3): 475-480.

[15] GALLAGHER T F. Rydberg atoms[J]. Physics Today, 1995, 48(9): 92.

[16] 何兴虹，李白文，张承修. 碱原子高里德堡态的极化率[J]. 物理学报，1989，38(10)：1717-1722.
HE Xinghong, LI Baiwen, ZHANG Chengxiu. Polarizabilities of high Rydberg alkali atoms[J]. Acta Physica Sinica, 1989, 38(10): 1717-1722.

[17] MARANGOS J P. Electromagnetically induced transparency[J]. Journal of Modern Optics, 1998, 45(3): 471-503.

[18] HOLLOWAY C L, GORDON J A, JEFFERTS S, et al. Broadband Rydberg atom-based electric-field probe for SI-traceable, self-calibrated measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(12): 6169-6182.

[19] SEDLACEK J A, SCHWETTMANN A, KÜBLER H, et al. Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapour cell using bright atomic resonances[J]. Nature Physics, 2012, 8(11): 819-824.

[20] FAN H Q, KUMAR S, SEDLACEK J, et al. Atom based RF electric field sensing[J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular, and Optical Physics, 2015, 48(20): 202001.

[21] SEDLACEK J A, SCHWETTMANN A, KÜBLER H, et al. Atom-based vector microwave electrometry using rubidium Rydberg atoms in a vapor cell[J]. Physical Review Letters, 2013, 111(6): 063001.

[22] GORDON J A, HOLLOWAY C L, SCHWARZKOPF A, et al. Millimeter wave detection via Autler-Townes splitting in rubidium Rydberg atoms[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(2): 024104.

[23] BARREDO D, KÜBLER H, DASCHNER R, et al. Electrical readout for coherent phenomena involving Rydberg atoms in thermal vapor cells[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(12): 123002.

[24] JING M Y, HU Y, ZHANG L J, et al. Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed Rydberg spectroscopy[J]. Nature Physics, 2020, 16(9): 911-915.

[25] 张淳刚，李 伟，张 好，等. 基于调制射频场电磁诱导透明光谱的工频电场测量[J]. 光子学报，2021，50(6)：0602001.
ZHANG Chungang, LI Wei, ZHANG Hao, et al. Power frequency electric field measurement based on electromagnetic induced transparent spectrum under radio frequency field[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6): 0602001.

[26] 李 伟，张淳刚，张临杰，等. 基于里德伯原子 AC-Stark 效应的工频电场测量[J]. 激光与光电子学进展，2021，58(17)：1702002.
LI Wei, ZHANG Chungang, ZHANG Linjie, et al. Power-frequency electric field measurement based on AC-Stark effect of Rydberg atoms[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1702002.

[27] VITEAU M, RADOGOSTOWICZ J, BASON M G, et al. Rydberg spectroscopy of a Rb MOT in the presence of applied or ion created electric fields[J]. Optics Express, 2011, 19(7): 6007-6019.

[28] SAKAI T. Surface electrical resistivity of aluminum oxide ceramics in cesium vapor[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1977, 16(5): 859-860.

[29] BOUCHIAT M A, GUÉNA J, JACQUIER, et al. Electrical conductivity of glass and sapphire cells exposed to dry cesium vapor[J]. Applied Physics B, 1999, 68(6): 1109-1116.

[30] BETHE H A, SALPETER E E. Quantum mechanics of one- and two-electron atoms[M]. New York, USA: Plenum Publishing Corporation, 1977.



崔帅威
1997—，男，硕士
从事原子分子光谱、精密测量方面的研究工作
E-mail: cuishuaiwei09@163.com

CUI Shuaiwei



姬中华(通信作者)
1983—，男，博士，教授，博导
主要从事超冷原子分子的精密测量、相干制备和量子计算相关方面的理论和实验研究
E-mail: jzh@sxu.edu.cn

JI Zhonghua
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2022-09-08 修回日期 2022-11-04 编辑 卫李静