

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.04.019

陀螺仪气室中碱金属原子数密度的检测

周尹敏, 曾乐成, 徐正一, 李莲花, 裘栩炀, 徐信业

(华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

摘要:碱金属原子作为原子陀螺仪原子源的组成部分,其数密度是计算原子陀螺仪工作指标的重要参数。基于碱金属原子对不同激光失谐的吸收程度不同,提出了一种通过拟合碱金属原子吸收光谱得到碱金属原子数密度的测量方案。不同于以往的吸收测量法,该方案针对实际实验温度和气体压强等条件,对吸收谱拟合式进行了修正,从而提高了测量结果的准确度。测量结果与理论计算结果相吻合,两者偏差仅1.2倍左右,并可进一步应用于校准气室内碱金属蒸气的实际温度值。

关键词:原子陀螺仪;碱金属;原子数密度;原子吸收光谱

中图分类号:TH744

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号:2095-8110(2020)04-0145-06

Measurement of the Number Density of Alkali Atoms in Gyroscope Cells

ZHOU Yin-min, ZENG Le-cheng, XU Zheng-yi, LI Lian-hua, QIU Xu-yang, XU Xin-ye

(State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: The alkali metal atoms are the components of the atomic source of the atom gyroscope. The number density of alkali atoms is an important parameter to calculate the atomic gyroscope performance. Based on the different absorption of alkali atoms to different laser detuning, a method to measure the atomic number density of alkali atoms by fitting the atomic absorption spectra of alkali is proposed. Different from the previous methods based on absorption spectroscopy, this scheme modifies the absorption spectrum fitting formula according to the actual experimental conditions such as temperature and gas pressure, so as to improve the accuracy of the measurement results. The measurement results are in good agreement with the theoretical calculation results, with a deviation of only 1.2 times. It is further applied to calibrate the actual temperature value of alkali vapor in gyro cells.

Key words: Atomic gyroscope; Alkali; Atoms number density; Atomic absorption spectrometry

收稿日期:2019-04-28;修订日期:2019-07-26

基金项目:国家重点研究发展规划(973计划)(2016YFA0302103,2017YFF0212003,2016YFB0501601);国家高技术研究发展计划(863计划)(2014AA123401);国家自然科学基金重点项目(11134003);上海市优秀带头人计划(12XD1402400)

作者简介:周尹敏(1995-),女,硕士研究生,主要从事高灵敏测量技术方面的研究。

E-mail:51170920061@stu.ecnu.edu.cn

通信作者:徐信业(1964-),男,教授,主要从事原子陀螺和原子钟等方面的研究。E-mail:xyxu@phy.ecnu.edu.cn

0 引言

碱金属气室广泛应用于超高灵敏磁场探测和惯性测量领域,是磁强计和原子自旋陀螺仪等装置中物理传感器的核心部分。根据原子自旋陀螺仪的工作原理,在工作温度下光泵浦极化气室中的碱金属原子,极化后的碱金属原子与惰性气体发生自旋交换碰撞使之超极化,因此碱金属原子数密度影响了惰性气体的极化率,从而影响了陀螺仪的工作性能^[1-2]。另一方面,极化后的碱金属原子也被作为探测磁场信息的媒介,其数密度也是磁强计的磁场测量灵敏度中不可或缺的参数之一^[3]。所以碱金属原子数密度的精确测量在相应指标计算与性能提升中极具重要性。

对陀螺仪气室中碱金属原子数密度的检测方法,主要有压力展宽法、旋光检测法、磁共振线宽法,以及光谱吸收法。压力展宽法往往需要已知陀螺仪气室内除碱金属原子外的其他气体信息,通过压力展宽和碰撞频移等相关参数计算得到碱金属原子数密度,这对于无法实现气室自研制配比的单位实属不便^[4-5]。旋光检测法在实验中需施加一个强磁场,这会使陀螺仪装置中的磁屏蔽桶磁化,桶内产生剩磁,使得磁屏蔽效果减弱,以致于磁强计和陀螺仪无法正常工作^[6-7]。磁共振线宽法探究温度与碱金属原子受弱磁产生的磁共振线宽的变化关系,可以实现原位实时测量,与理论计算值偏差1.5倍至2倍,准确度不够理想^[8]。光谱吸收法直接探究碱金属原子对探测光的吸收率,方案设计简单,无需更改陀螺仪装置的光路即可实现快速实时测量。但根据原子源和温度段等条件的不同,其测量准确度有所不同,甚至相比于理论值会有量级上的差异^[9-10]。

本文通过分析核磁共振陀螺仪的实际实验条件,对原子吸收谱的拟合式进行了近似修正,光谱吸收法的测量准确度和精确度得以提升,与理论计算结果相吻合。也由此进一步提出了气室内真实温度的测量方案,有助于探究陀螺仪碱金属原子系综的实际工作状态。

1 拟合吸收谱测量碱金属原子数密度的理论依据

1.1 碱金属原子吸收谱

不同温度下碱金属原子对一定失谐范围内的

激光光强吸收程度不同^[11]。若利用线偏振光探测,其光强受原子的吸收遵从式(1)

$$I(z) = I(0) \exp[-n\sigma(\nu)z] \quad (1)$$

式中, z 为气室与入射表面的距离, $I(0)$ 为进入气室前光强, n 为碱金属原子数密度, $\sigma(\nu)$ 为光子吸收截面。

气室内尺寸,即激光在气室内通过的光程长为 l 时,光学深度(Optical Depth, OD)表示为

$$OD = n\sigma(\nu)l \quad (2)$$

吸收截面 $\sigma(\nu)$ 可由式(3)获得

$$\int_0^{+\infty} \sigma(\nu) d\nu = \pi r_e c f_{\text{res}} \quad (3)$$

其中, r_e 为经典电子半径, c 为真空中的光速,跃迁振子强度 f_{res} 为对应给定共振在总截面中所占比重。对于碱金属原子,振子强度近似给出 $f_{D1} \approx 1/3$ 以及 $f_{D2} \approx 2/3$;而对于较重原子,实际值因自旋轨道相互作用及芯-价电子相互关联而有所偏移,对于Cs原子 $f_{D1} \approx 0.347$ 以及 $f_{D2} \approx 0.721$ ^[12]。

1.2 双 Lorentz 线型叠加的拟合修正

吸收截面 $\sigma(\nu)$ 的线型有三种:压力展宽及自然线宽呈现的 Lorentz 线型、多普勒效应所致的 Gauss 线型,以及前两者卷积形式的 Voigt 线型。考虑到实际实验所用气室是作为核磁共振陀螺仪的原子源容器,其中除了充有碱金属原子气体,还充有大量淬灭气体和惰性气体,所以气室内压强比大气压强高出不少,压力展宽相对于多普勒展宽更占主导,于是有 Lorentz 线宽远大于 Gauss 线宽,即吸收谱展宽线型可简化为 Lorentz 线型^[13]。则考虑超精细分裂后的吸收截面如式(4)所示

$$\sigma_{\text{total}}(\nu) = r_e c f \sum_{F, F'} A_{F, F'} L(\nu - \nu_{F, F'}) \quad (4)$$

相应地, OD 则可表示为

$$\begin{aligned} OD &= -\ln \frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} = n\sigma_{\text{total}}(\nu)l \\ &= nlr_e c f \sum_{F, F'} A_{F, F'} L(\nu - \nu_{F, F'}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\nu_{F, F'}$ 为¹³³Cs原子 D_2 线基态超精细能级 F 向激发态超精细能级 F' 的跃迁频率, $A_{F, F'}$ 为对应的相对强度,相应值如表1所示^[12, 14]。 I_{in} 为探测光进入气室前光强, I_{out} 为经过气室后的出射光强。

在100℃以内的实验温度条件下,将所得吸收谱(图3)转换为光学深度谱进行初步 Lorentz 线型拟合。拟合所得线宽量级为10GHz,且拟合度不佳,拟合结果与理论值相差3个数量级。考虑到Cs

表 1 ¹³³Cs 原子 D₂ 线超精细能级跃迁频率和对应的相对强度^[12,14]

Tab. 1 Frequency and relative strengths of the individual D₂ hyperfine resonances of ¹³³Cs for photon absorption^[12,14]

跃迁	频率/THz	相对强度
$F = 4 \rightarrow F' = 3$	351.7215082362	7/128
$F = 4 \rightarrow F' = 4$	351.7217095232	21/128
$F = 4 \rightarrow F' = 5$	351.7219606153	22/64
$F = 3 \rightarrow F' = 2$	351.7305496420	10/64
$F = 3 \rightarrow F' = 3$	351.7307008667	21/128
$F = 3 \rightarrow F' = 4$	351.7309021538	15/128

原子 D₂ 线(图 1)激发态各超精细结构能级间距量级约为 10~10² MHz,而基态的 2 个超精细结构能级相差约有 9.19 GHz,该温度范围条件使得吸收谱展宽后激发态各超精细结构能级间距可忽略,展宽拟合式非表 1 中所述 6 条跃迁线的叠加;气室内所充气体的先决条件及有限的最高加热温度,使得基态的 2 个超精细能级结构间距不可忽略,展宽拟合式非单一的 Lorentz 线型。综合上述考量,实际用于拟合的公式为 2 个 Lorentz 线型的叠加

$$OD = nC[a \times L(\nu - \nu_{F=3,F'}) + (1 - a) \times L(\nu - \nu_{F=4,F'})] + y_0 \quad (6)$$

式中, y₀ 偏置代表光路中各元件所产生的光强损耗, C 为各物理常量的积, a 为 Cs 原子由基态 F = 3 向激发态跃迁的总相对强度。

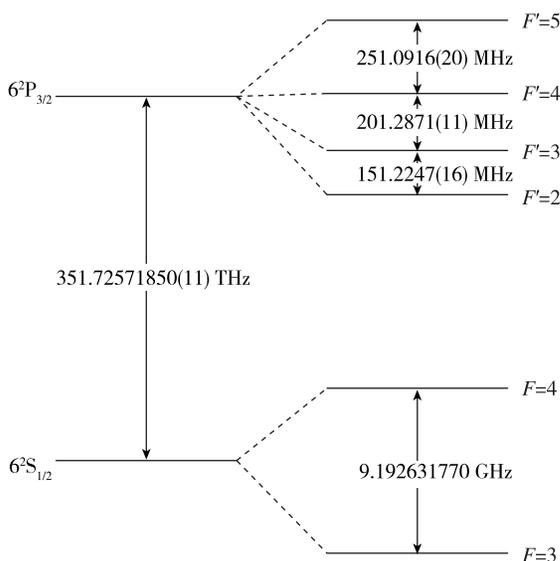


图 1 Cs 原子 D₂ 线超精细结构能级及相应跃迁线
Fig. 1 Cesium D₂ transition hyperfine structure, with frequency splittings between the hyperfine energy levels

修正后的拟合式简单且合理,因为保留了线型线宽和中心频率等参数,所以实际上考虑了压力展宽、碰撞频移、基态布居等对原子吸收谱的影响,所以由此拟合得到的碱金属原子数密度更为有效、准确。

2 拟合吸收谱测量碱金属原子数密度的实验实现

2.1 实验过程

本实验装置基于核磁共振陀螺仪原理样机^[15],光路和电路等都无需修改。内边长 10mm 的立方体气室中除了碱金属原子 Cs,还有 400Torr 的 N₂、5Torr 的 ¹²⁹Xe 和 45Torr 的 ¹³¹Xe。探测光为自制可调谐 DBR 激光器提供的 852nm 线偏振光,采用一对无磁加热片加热气室,产生的温度梯度垂直于探测光传播方向,热敏电阻作为测温探头置于气室外壁附近,包裹保温材料使得气室温度漂移范围在 0.1℃ 以内。

图 2 描述了整个实验数据采集及处理过程:首先改变加热片的加热温度,待温度在长时间内稳定后,通过程控探测光的温控器阻值从而实现扫描其失谐,由光电平衡探测器获得探测光出射气室的光强随其失谐的变化关系,即获取探测光吸收谱。将所得吸收谱根据式计算光学深度,并利用式进行拟合,即可得拟合结果中的碱金属原子数密度 n。

$$\log_{10} \left(\frac{nkT}{101325} \right) = 4.165 - \frac{3830}{T} \quad (7)$$



图 2 实验过程图

Fig. 2 Diagram of experimental process

最后对比经验公式给出的理论值^[16],以校准气室内实际温度。式中各参数均采用国际单位制,碱金属原子数密度单位为 m⁻³。

上述过程均采用 LabVIEW 程序进行自动化测

量及拟合,排除了在多温度切换所经历的较长时间内,人为的误操作可能带来的其他实验条件更改。

2.2 碱金属原子数密度实际测量及分析

单一温度的吸收谱如图3所示,以热敏电阻测得温度为62℃时为例,其光学深度及拟合结果如图4所示,图中灰色实线为吸收谱换算光学深度谱,红色虚线为双峰 Lorentz 拟合结果。由此可见拟合效果明显较好,在95%的置信区间内,拟合度0.99995,残差为 4×10^{-5} 。因此,进一步对51℃~96℃间取8个温度点,每个温度点的吸收谱扫4个周期取平均进行拟合分析,得到对应的Cs原子数密度值,并与经验公式计算所得理论值进行对比,如图5所示,两者间的偏差仅1.2倍左右。

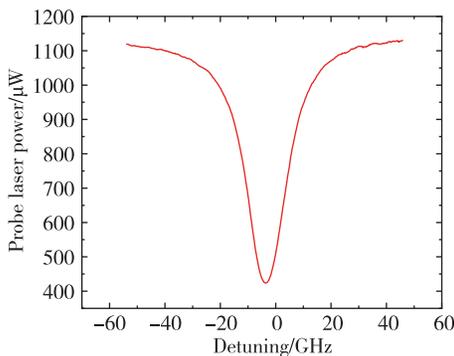


图3 热敏电阻测温62℃时的Cs原子吸收谱
Fig. 3 Cs absorption spectrum at 62℃ measured by thermistor

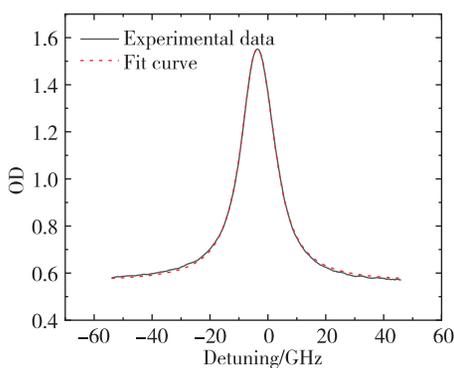


图4 热敏电阻测得温度62℃时的光学深度及拟合结果
Fig. 4 OD and fit curve at 62℃ measured by thermistor

值得注意的是,上述数据中,高温段的90℃和96℃时数据出现共振处吸收饱和,即获得的吸收谱不完整,会大大降低拟合度;另外,本实验中低于50℃的吸收谱信噪比较差,以至于无法给出最佳拟合结果。这两种情况下的吸收谱便不再具有参考

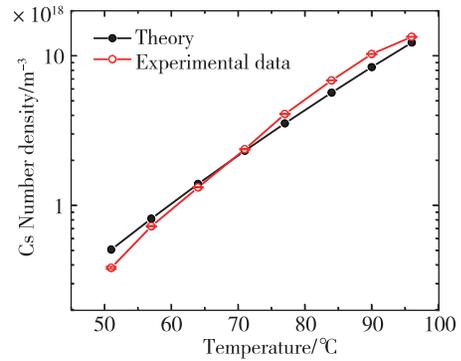


图5 Cs原子数密度随热敏电阻测量所得温度的变化关系
Fig. 5 Cs atomic number density as a function of temperature measured by thermistor

意义。与此同时,图5中可见温度低于70℃时,实验值低于理论值,即气室内温度低于测温位置温度,而70℃以上的温度段则不然,原因可能是激光对气室的加热效应以及保温方式决定了其在不同温度有不同的散热能力。总之,由于热敏电阻的测温位置为气室外壁附近的某一点,所以无法真实反映气室内碱金属蒸气的实际温度,测量结果与理论值之间存在合理偏差。

2.3 气室内碱金属蒸气实际温度校准

将根据拟合所得的碱金属原子数密度代入经验公式,可反推得气室温度理论值。由此提出了校准气室内碱金属蒸气温度的方案。图6所示为反推所得气室温度理论值 t_C 与热敏电阻测量所得温度 t_M 的关系,图中蓝色直线为取前6个有效温度点数据的线性拟合

$$t_C = 1.18592 \times t_M - 12.58672 \quad (8)$$

函数表示为式,拟合度达0.99931。该函数即可作为气室内碱金属蒸气温度的校准式。在保温理想的条件下,该式的适用条件可以仅考虑测温探头的性能。但如果保温方案不可行,变化较大的环境温度会影响测温探头的测量值,即式中的 t_M ,使得该式不适用,甚至可能无法得到这样的线性关系。

图7所示为气室内碱金属蒸气温度线性校准后,数密度测量值与理论值的对比。前6组有效数据的吻合程度进一步说明了此测量方案具有较高的准确度。另外,通过计算校准温度的标准差,可以得到该方案的气室温度分辨率估测值约为0.2℃。

3 结论

基于实验装置核磁共振陀螺仪原理样机的实

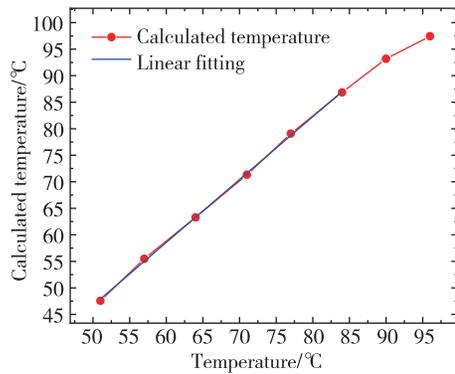


图 6 由碱金属原子数密度计算所得气室内实际蒸气温度与热敏电阻测量所得温度的关系

Fig. 6 The relation between the actual vapor temperature, which is calculated by the number density of alkali atoms, and the temperature measured by thermistor

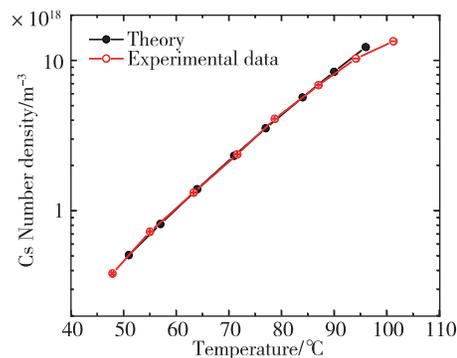


图 7 Cs 原子数密度随校准后温度的变化关系

Fig. 7 Cs atomic number density as a function of temperature after being calculated

际实验条件,本文利用原子吸收光谱,对其拟合式进行了修正,实现了对陀螺仪气室中碱金属原子数密度的准确检测,并提出了气室内碱金属蒸气温度校准方案。对于本文所述检测及校准方案有如下考量:

1) 本文采用的陀螺仪气室中碱金属原子数密度的检测装置,完全基于核磁共振陀螺仪原理样机。光路和电路等无需额外设计搭建,且程控自动化大大加快了获取、拟合、分析吸收谱的过程,使得该检测方案在保证准确的前提下,几近实时测量。

2) 核磁共振陀螺仪气室中,惰性气体通过与碱金属原子的自旋交换碰撞产生极化,该极化率同样是核磁共振陀螺仪指标中的重要参数。在本文修正后的双峰 Lorentz 拟合式中,含有碱金属原子超精细结构中基态两能级上原子分别向激发态跃迁的差异信息,当考虑泵浦极化环节时,可以用该检测方案得到碱金属原子的极化率,从而为计算惰性

气体的极化率作为参考。

3) 实验中,虽然有效温度范围限制在 $50^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ 之间,但保证加热及保温方式不变的情况下,线性校准结果可延长至陀螺仪工作温度范围。而且经过多次重复实验,该方案所得温度校准式斜率和截距几乎不变,具有较高的精确度。即是说,通过热敏电阻测得的温度根据该校准式即可换算得到气室内碱金属蒸气实际温度及其数密度,这便是一种原位实时测量的方案。

4) 基于无自旋交换弛豫 (Spin Exchange Relaxation Free, SERF) 态原子自旋的进动可以实现超高灵敏的惯性测量。本文所提气室内碱金属蒸气温度的校准方案可以为实现 SERF 态的判断提供参考。

参考文献

- [1] Chen L L, Zhou B Q, Lei G Q, et al. Effects of temperature on Rb and ^{129}Xe spin polarization in a nuclear magnetic resonance gyroscope with low pump power [J]. AIP Advances, 2017, 7(11): 115101.
- [2] 万双爱, 孙晓光, 郑辛, 等. 核磁共振陀螺技术发展展望[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(1): 7-13.
Wan Shuang'ai, Sun Xiaoguang, Zheng Xin, et al. Prospective development of nuclear magnetic resonance gyroscope[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(1): 7-13(in Chinese).
- [3] Sheng D, Li S, Dural N, et al. Subfemtotesla scalar atomic magnetometry using multipass cells[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(16): 160802.
- [4] Wang X L, Chen Y, Quan W, et al. Pressure broadening and frequency shift of the D_1 and D_2 lines of K in the presence of Ne and Kr[J]. European Physical Journal D, 2018, 72(2): 32.
- [5] Kluttz K A, Averett T D, Wolin B A. Pressure broadening and frequency shift of the D_1 and D_2 lines of Rb and K in the presence of ^3He and N_2 [J]. Physical Review A, 2013, 87(3): 032516.
- [6] Tehranchi M M, Hamidi S M, Abaie B. Determination of the atomic number density of Rb vapor by using spectral Faraday rotation measurements[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2013, 62(5): 731-733.
- [7] Vliegen E, Kadlecik S, Anderson L W, et al. Faraday rotation density measurements of optically thick alkali metal vapors[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 2001, 460(2-3): 444-450.
- [8] Zhang H, Zou S, Chen X Y, et al. On-site monitoring

- of atomic density number for an all-optical atomic magnetometer based on atomic spin exchange relaxation[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 17234-17241.
- [9] Ito Y, Ohnishi H, Kamada K, et al. Development of an optically pumped atomic magnetometer using a K-Rb hybrid cell and its application to magnetocardiography[J]. *AIP Advances*, 2012, 2(3):032127.
- [10] 邹升, 张红, 陈瑶, 等. 基于光谱吸收法的碱金属原子配比检测方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(8): 2281-2286.
- Zou Sheng, Zhang Hong, Chen Yao, et al. Measurement of mole ratio for alkali metal mixture by using spectral absorption method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(8): 2281-2286 (in Chinese).
- [11] Romalis M V, Miron E, Cates G D. Pressure broadening of Rb D₁ and D₂ lines by ³He, ⁴He, N₂, and Xe: Line cores and near wings[J]. *Physical Review A Atomic Molecular & Optical Physics*, 1997, 56(6): 4569-4578.
- [12] Seltzer S J. *Developments in alkali-metal atomic magnetometry*[D]. Princeton University, 2008.
- [13] 池浩浩, 王许琳, 全伟. 基于原子吸收光谱的碱金属气室内多种混合气体压强测量方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(3): 948-952.
- Chi Haotian, Wang Xulin, Quan Wei. Pressure measurement of each gas in alkali-metal vapor cell with a mixed gas based on saturated absorption spectrum[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(3): 948-952(in Chinese).
- [14] Steck D A. Cesium D Line Data[DB/OL]. <https://steck.us/alkalidata/>.
- [15] 徐正一, 彭欣欣, 李莲花, 等. 核磁共振陀螺仪中三维磁场的初步锁定[J]. *导航定位与授时*, 2019, 6(3): 113-118.
- Xu Zhengyi, Peng Xinxin, Li Lianhua, et al. Preliminary stabilization of three dimensional magnetic fields in a nuclear magnetic resonance gyroscope[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2019, 6(3): 113-118 (in Chinese).
- [16] Alcock C B, Itkin V P, Horrigan M K. Vapour pressure equations for the metallic elements; 298-2500K [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1984, 23(3): 309-313.