

FAIMS 的高场非对称波电源研究现状与进展*

刘宏伟, 姚远程, 张岩
(西南科技大学, 四川 绵阳 621010)

摘要:介绍了目前国内外 FAIMS 电源的研究现状及主要研究成果,分析了其面临的主要问题及可能的解决途径,最后对 FAIMS 电源的发展方向提出了一些新的看法。

关键词:FAIMS; 检测; 非对称波; 高频; 高压

中图分类号:TN911

文献标识码:A

Research and progress of high-field asymmetric wave power of FAIMS

LIU Hong Wei, YAO Yuan Cheng, ZHANG Yan
(Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: This article describes the current power supply of FAIMS research and major research findings at home and abroad, and it also analyzes the major problems and possible solutions. At last, it suggests some new views on the development direction of FAIMS power.

Key words: FAIMS; detect; asymmetric waveform; high frequency; high voltage

1 FAIMS 技术

高场非对称波形离子迁移谱 (FAIMS) 技术^[1]是建立在 Mason 和 McDaniel 实验观察的基础上, 他们发现离子的迁移率系数 K 受所施加的电场强度影响。在低电场条件下, 离子的迁移率系数 K 与电场强度无关; 当电场强度高到一定值 (约 11 000 V/cm) 以后, 离子的迁移率系数 K 就会以一种非线性的方式随电场强度而变化, 这种变化对于每一离子种类是特定的, 如图 1 所示。

图 1 中, A、B、C 三种离子的迁移率在高电场强度下的变化是各不相同的。一般情况下, 质荷比 m/z 比较小的离子属于 A 类型的离子, 质荷比 m/z 比较大的离子属于 C 类型的离子, 介于它们之间的为 B 类离子。在电场强度升高到 11 000 V/cm 以上时, 离子的迁移率呈现出各自不同的非线性变化趋势, 这就使得低电场强度条件下离子迁移率相同或相近的离子能够在高电场强度条件下被分离开来。高场非对称波形离子迁移谱技术具有微型化、灵敏度高、检测时间短、检测物质广和功耗低等特点, 可用于大气、有毒气体、水有机污染物、爆炸物、化学战剂等快速检测, 在环境监测、公共安全和战场生化威胁等领域都有着广泛的应用^[2]。

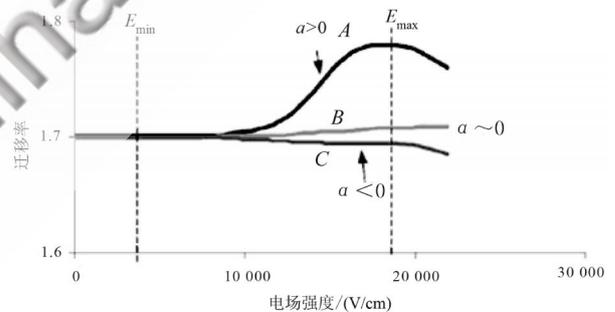


图 1 不同类型离子迁移率与电场强度的关系

FAIMS 器件的核心是迁移区, 其上加有非对称波形的、方向与载气流动方向垂直的射频高电压和一个直流电压。在射频电场和直流电场的共同作用下, 特定的离子将通过迁移区, 到达探测电极而被检测到, 从而实现离子种类和浓度的检测。

在 FAIMS 迁移区工作过程中, 高场非对称波形电源非常重要, 是保证离子在迁移区内按要求运动的必要条件^[3]。高场非对称波形电源的输出分为两部分: 高频高压的非对称波形输出以及直流低压的补偿电压输出。采用高频高压非对称方波对于迁移区的离子分离是最优选择, 理想的波

* 基金项目: 国家自然科学基金(10876035)

综述与评论 Review and Comment

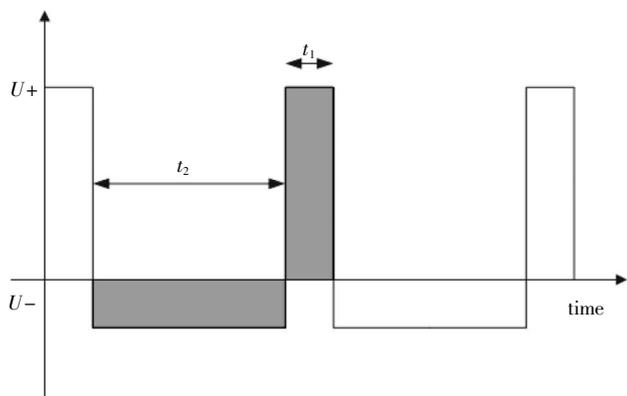


图2 非对称方波

形如图2所示,其中上下、阴影部分面积相等。

2 高场非对称波形电源的研究现状及主要成果

目前,国外研究 FAIMS 技术的国家和机构比较少。美国新墨西哥州立大学的 Eiceman 等人利用 MEMS 技术开发了一种基于 FAIMS 原理的微型离子过滤器,使用的电源是 KRYLOV E V 提出的后过冲发生器(Back-Overshoot Generator),采用软开关半谐振式的方波来产生射频非对称波形,其特点是频率高、功率消耗小、所能产生的非对称波形电压峰峰值可达 1 700 V,频率最高为 2 MHz,占空比为 30%,补偿电压范围为-30 V~+30 V。图3为基于后过冲效应(Back-Overshoot Effect)的准谐振脉冲电路原理,图4为其得到的脉冲波形。

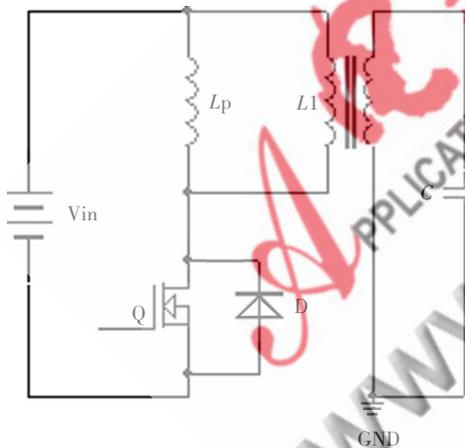


图3 基于后过冲效应的脉冲电路

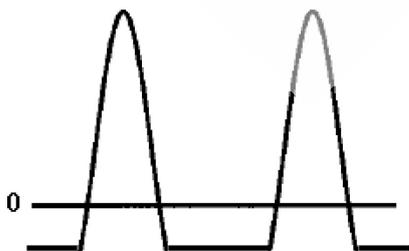


图4 基于后过冲效应的脉冲波形

高压脉冲也可以通过 2 个或更多的谐振波形叠加得到,加上适当的直流偏置就能满足非对称要求。如果将容性

负载连接到有 2 个有不同谐振频率的 LC 电路中,并且其中一个的频率为另一个的倍数,则在容性负载上得到的脉冲为:

$$U(t)=U_1\cos(\omega t)+U_2\cos(n\omega t+\varphi)$$

其中 U_1 和 U_2 为幅值, φ 为相位差, n 为频率倍数。

最简单的两频率合成谐振电路可以通过电感或电容耦合 2 个普通的 LC 电路得到,图5为一种两频率合成谐振电路原理,图6为其脉冲波形,其中 C 为离子检测器等效电容。因为脉冲由 2 个或更多的谐振波形叠加得到,所以每个波形能否准确地要求的某个相位点上叠加就显得非常重要,如果不能满足这一点,叠加出来的波形将不能满足要求。也正因为这样,采用这种方法得到的输出脉冲波形受温度和器件参数漂移的影响很大,一旦器件漂移过大,每个单独的谐振波形的频率、相位等参数就发生变化,前面的叠加条件得不到保证,脉冲波形就变得不可接受。当采用电感耦合时这个缺点就更为明显,采用电容耦合时要好一些。此外,这种方法获得的脉冲波形需要调节幅值和频率时也不是很方便。不过该方法比较容易实现脉冲高电压和高频率,同时该电源还可用于等离子检测领域,应用的范围比较宽。同样负载条件下,该方法比前面一种方法能量消耗多一些。

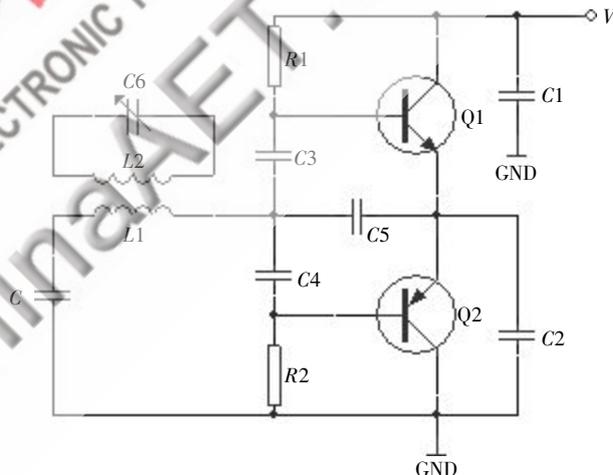


图5 一种两频率合成谐振电路原理

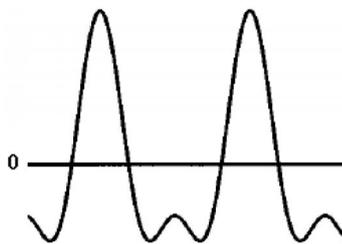


图6 两谐振波形叠加脉冲

图7为一种方波脉冲电路,A和B为控制信号输入,C为离子检测器等效电容。其缺点是对变压器的要求太高,难于制作。图8为加拿大国家研究委员会国家测量标准研究所实际采用的一种非对称方波脉冲。在离子检测领域限制方波使用的一个重要原因是功率消耗大,而前2种脉冲对功耗要求较低。方波脉冲频率为 f 时,需要的能量可通过下

《微型机与应用》2009年第22期

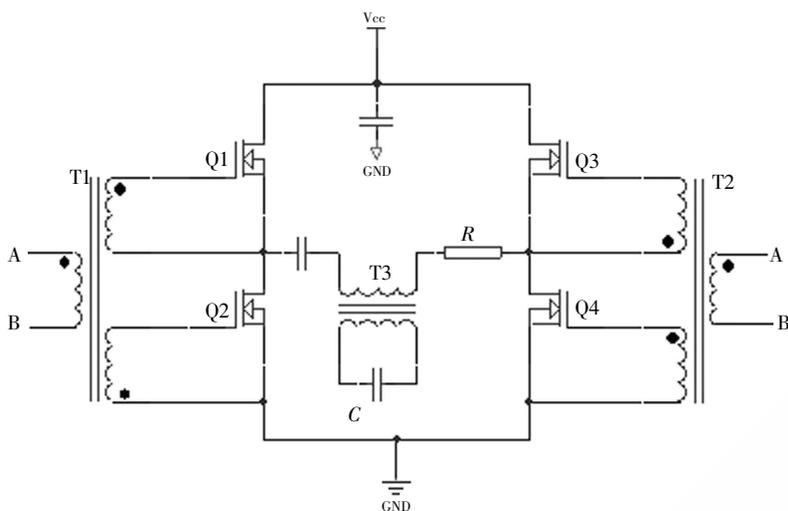


图7 一种方波脉冲电路

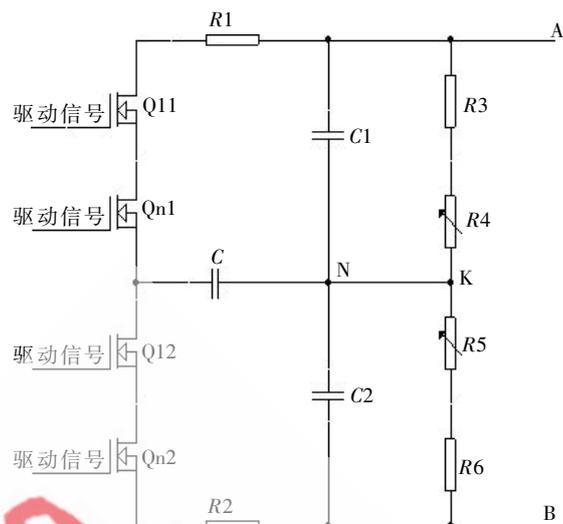


图9 非对称脉冲电路结构

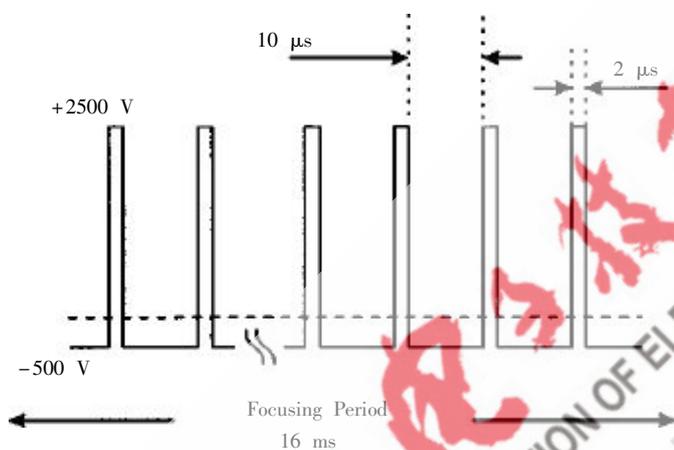


图8 用于FAIMS技术的非对称方波脉冲

式估算：

$$W = U^2 C f / 2$$

其中， U 为脉冲电压， C 为离子检测器等效电容。

3 主要问题及其可能的解决途径

对于FAIMS离子检测器来说，采用非对称方波脉冲时离子的分离效果是最好的。理论上方波脉冲对于FAIMS离子检测器来说是最理想的，定义Form factor为衡量各种脉冲波形对离子分离的效率，那么理想的方波则为100%，基于后过冲效应的脉冲为50%，而采用谐振波形叠加的脉冲则为40%，这是方波脉冲优于前2种脉冲的地方。

在脉冲功率技术领域常用的方法是由高压电源提供高压直流，并将能量储存在储能元件中，然后通过开关器件快速开通放电来得到脉冲，整个过程可以简单地理解为：先充电-积累能量-迅速释放-获得脉冲。这种方法广泛应用于各种需要获得高压功率脉冲的地方，其波形质量较好，可以获得高重复频率高功率的脉冲，所以在等离子体物理与受控核聚变、核爆炸模拟、闪光X光照相等领域得到广泛应用。另外，由于FAIMS对脉冲要求的特殊性，采用该方法可以

在一定程度上减小设计风险，采用类似该原理的一些脉冲电路设计可以减小设计难度。

高场非对称脉冲成型电路可以采用半桥结构，如图9所示。电路工作原理是利用半桥逆变电路产生方波^[4-5]。

FAIMS迁移区在工作时，需要在高场非对称方波上叠加一个直流电压，称为补偿电压。为了保证在不同幅值的非对称方波下补偿电压可调节的范围一致，应使非对称方波电源和补偿电压电源的电压大小分别独立可调、互不影响，因此采用了一个单独控制的低压直流电源来输出补偿电压，并通过相应的隔离和叠加电路，使补偿电压与非对称方波叠加在一起，共同作用在FAIMS迁移区上。

本文介绍了目前国内外FAIMS电源的研究现状及主要研究成果，分析了其面临的主要问题及可能的解决途径，最后对FAIMS电源提出了一些新的实现方法。

参考文献

- [1] MCDANIEL E W, MASON E A. The mobility and diffusion of ions in gases[J]. John Wiley & sons, 1973(5):53-55.
- [2] LEVIN D S, VOUROU P, MILLER R A, et al. using a nanoelectrospray-differential mobility spectrometer-mass spectrometer system for analysis of oligosaccharides with solvent selected control over ESI aggregate ion formation[J]. J. Am. Soc. Mass Spectrom, 2007(18): 502-511.
- [3] PAPANASTASIOU D, WOLLNIK H, RICO G, et al. Differential mobility separation of ions using a rectangular asymmetric waveform[J]. J. Phys. Chem. A, 2008(112):3638-3645.
- [4] 陈天志, 唐飞, 熊继军, 等. FAIMS离子检测用高场非对称波电源设计[J]. 科学技术与工程, 2008(13): 3470-3474.
- [5] CHEN Tian Zhi, TAN Fei, XIONG Ji Jun, et al, Design for high field asymmetric waveform power supply with FAIMS[J]. Science Technology and Engineering, 2008(13):3470-3473.

(收稿日期:2009-08-18)