

Study of the Relationship between Townsend Coefficient and the Gas Amplification in Boron-Lined Proportional Counters (BLPCs)

Guoyun Chen, Yong Xin*, Shuyi Zhao, Fucheng Huang

Department of Physics, Nanchang University, Nanchang
Email: chenguoyn@ncu.edu.cn, xinhly@ncu.edu.cn

Received: Sep. 5th, 2014; revised: Oct. 6th, 2014; accepted: Oct. 14th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on the gas amplification in proportional counters, four reduced quantities: reduced Townsend coefficient α_{re} , reduced multiplication factor M_{re} , reduced critical electric field ε_0 , and reduced critical Townsend coefficient Σ are proposed. Expressions of M_{re} , which are corresponding to linear, exponential and natural exponential relationship of α_{re} vs. ε , are deduced. By taking example for a special boron-lined proportional counter (BLPC) filled with P10 gas, $M_{re}-\varepsilon_a$ curves based on three kinds of mentioned relationships are plotted. Analysis shows that reduced Townsend coefficient α_{re} , reduced multiplication factor M_{re} , and reduced electric field ε have good uniformities. Critical reduced electric field and critical reduced Townsend efficiency exist in the operation of PCs, but their values varies with the relationship of $\alpha_{re}-\varepsilon$. Reduced multiplication factors of PCs increase with the electric field on the surface of the anode wire, and the increase rate would be affected by the relationship of $\alpha_{re}-\varepsilon$ while the value of M_{re} changes little.

Keywords

Proportional Counters, Reduced Townsend Coefficient, Reduced Multiplication Factor, Reduced Electrical Field

汤森系数与涂硼正比计数管中气体放大的关系研究

陈国云, 辛 勇*, 赵书毅, 黄福成

*通讯作者。

南昌大学物理系, 南昌

Email: chenguoyun@ncu.edu.cn, xinhly@ncu.edu.cn

收稿日期: 2014年9月5日; 修回日期: 2014年10月6日; 录用日期: 2014年10月14日

摘要

基于正比计数管的气体放大, 提出四个约化量: 约化汤森系数 α_{re} 、约化倍增因子 M_{re} 、临界约化电场 ε_0 、临界约化汤森系数 Σ , 并得出对应于线性、幂指数和自然指数 α_{re} - ε 关系的约化倍增因子表达式。以P10气体充入特定涂硼正比管为例, 做出了三类关系的约化倍增因子 M_{re} - ε_a 曲线。分析表明描述约化汤森系数、约化倍增因子和约化电场之间的三类关系具有良好的统一性。正比管中存在临界约化电场和临界约化汤森系数, 其取值因 α_{re} - ε 关系而异。正比管中约化倍增因子随阳极丝表面电场递增, 其增速受 α_{re} - ε 关系的影响, 但倍增因子取值变化很小。

关键词

正比计数管, 约化汤森系数, 约化倍增因子, 约化电场

1. 引言

正比计数管气体放大(俗称倍增)是带电粒子与管内气体分子发生非弹性电离碰撞产生雪崩的过程, 雪崩产生的二次电子数与原初自由电子数成正比。对一个原初自由电子而言, 它在其单位长度路径上产生的二次电子个数就称为第一汤森系数, 在正比管倍增过程中起决定作用。正比管倍增与汤森系数及其管内电场的关系密切相关, 但很难找到一个确定的解析函数来描述这种关系。为此人们基于特定气体和电场范围提出了三类不同的假设: 线性关系[1]、幂指数关系[2]和自然指数关系[3]-[5]。实验测量方面, 自1997年 Sernicki 等[6]测得有机蒸汽的第一汤森系数以来, 二甲醚混合气体[7]、Ar+异丁烷[8]、C₂H₂F₄-异丁烷[9]、Ar + CO₂[10]、C₂H₂F₄ + C₄H₁₀ + SF₆[11]、纯异丁烷[12] [13]、氦[14]、的汤森系数先后被测得。

理论与实验的结合始于 Aoyama 等人[15]拟合 Ar + 10% CH₄ 和 Xe + 5% CO₂ 两种混合气体, 并得出 $m = 12$ 。而 Kishimoto 等人[16]运用纯 3He 第一汤森电离系数得出充 3He 的正比计数管倍增因子是阳极丝直径的函数, 且计算得出的倍增因子比温度为 5 K 时的实验值大很多。Sakurai 等人[17]研究了充以 1 atm 纯 Xe 气体和 Xe + 5% CH₄ 混合气体后的圆柱形正比计数管, 得出了阳极丝直径与约化电场之间的关系。后来 Uozumi 等人[18]与 Mazed 等人[19] [20]提出了各自的关于第一汤森系数的半微观关系, 并以 Ar + CH₄ 和 Ar + CO₂ 等混合气体为例, 实验验证了该关系得出的气体倍增因子计算结果与实验数据符合较好。2004年 Andronic 等[21]给出了基于 Penning 机制定量确定汤森系数的方法。

本文在综述前人成果的基础上, 首先提出了约化汤森系数、约化倍增因子、临界约化场强、临界约化汤森系数的概念, 并得出了相应约化汤森系数与约化电场关系的倍增因子表达式。以 P10 气体充入特定尺寸涂硼正比计数管为例, 给出了三类关系及其对应约化倍增因子变化曲线图。通过对所得曲线图的分析, 较深入地剖析了各种约化汤森系数及约化倍增因子随约化电场的变化关系的内在联系, 论证了他们之间的一致性, 最后得出了约化倍增因子随约化汤森系数假设变化的规律。

2. 约化汤森系数与约化倍增因子

中子入射涂硼正比管与其内壁 ¹⁰B 薄膜发生 ¹⁰B(n, α)⁷Li 核反应, 生成的 α 粒子和 ⁷Li 离子使管内 P10

(Ar + 10% CH₄)气体分子电离形成原初电子 - 离子对。正比管加上高压后, 阳极丝附近的强电场可使得原初电子 - 离子对再次与工作气体作用产生二次电子。就单个原初电子而言, 它沿途产生的二次电子数 N 按下式增加

$$dN = \alpha N dr \quad (1)$$

上式中 α 称为第一汤森系数, 是距阳极丝 r 的函数。根据正比管倍增因子的定义, 倍增因子 M 应满足

$$\ln M = \int_{r_0}^a \alpha(r) dr \quad (2)$$

该积分应遍及倍增可能发生的区域, r_0 称为临界半径或倍增始点, a 为正比管阳极丝半径。理论和实践表明: 与 α 联系更为密切的是约化电场 ε , 它定义为场强 E 与气压 p 的比 E/p 。约化电场国际单位为 $V/(m \cdot Pa)$ 或 $V/(\mu m \cdot atm)$, 易知 $1.0 V/(\mu m \cdot atm) = 9.87 V/(m \cdot Pa)$ 。从热力学知在确定的状态下气体的分子数密度 n 与压强 p 呈正比关系, 因此 ε 通常还写为 $\varepsilon = E/n$, 其国际单位是 $V \cdot m^2$, 常用的有汤森(Td), 且 $1.0 Td = 1.0 \times 10^{-21} V \cdot m^2$ 。据此可知常温下两个常用单位之间关系为 $1.0 Td = 0.0248 V/(\mu m \cdot atm)$ 。上式(2)也可写为

$$\ln M = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_a} \alpha(\varepsilon) dr \quad (3)$$

其中 ε_0 、 ε_a 分别为倍增始点处临界约化电场和阳极丝表面约化电场。由电磁学可知圆柱形正比管内离开阳极丝距离 r 处的约化电场满足

$$\varepsilon(r) = \frac{V}{pr \ln(b/a)} \quad (4)$$

其中 V 是极间电压, b 为阴极管内半径。将(4)代入(3)可得圆柱形涂硼正比管倍增因子

$$M_{re} = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_a} \alpha_{re} \cdot \frac{d\varepsilon}{\varepsilon^2} \quad (5)$$

上式右边 $\alpha_{re} = \alpha/p$ (或 $\alpha_{re} = \alpha/n$) 称为约化汤森系数, 国际单位分别为 $m^{-1} \cdot Pa^{-1}$ 或 m^2 , 常用单位 Td/V; 左边 $M_{re} = \ln M \cdot \ln(b/a)/V$ 称为约化倍增因子, 它是一个由所加电压和正比管尺寸决定的量, 国际单位为 V^{-1} 。

3. 约化汤森系数、约化倍增因子和约化电场关系的统一

3.1. 三类 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 和 $M_{re}-\varepsilon_a$ 关系

由式(5)可知对给定的 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 假设, 约化倍增因子仅与正比管阳极丝表面约化电场 ε_a 有关。前人提出的三类 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 关系, 及对应 $M_{re}-\varepsilon_a$ 表达式经统一改写后列于表 1。

3.2. 统一性分析

3.2.1. 正比计数管倍增条件

正比计数管要实现倍增, 必须满足 $M > 1$ 或者 $M_{re} > 0$, 从表 1 可知正比计数管的倍增条件就是阳极丝表面处约化电场应大于临界约化电场, 即 $\varepsilon_a > \varepsilon_0$ 。一般临界约化电场 ε_0 的值与填充气体种类及组分有关, 对 P10 气体而言 $\varepsilon_0 = 4.84 V/(\mu m \cdot atm) = 195.16 Td$, 且随着 CH₄ 含量的增高 ε_0 逐渐增大[19]。

Table 1. Three kinds of common relationship of $\alpha_{re}-\varepsilon$ and $M_{re}-\varepsilon_a$
表 1. 三类常见的 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 、 $M_{re}-\varepsilon_a$ 关系式

关系类别	$\alpha_{re}-\varepsilon$ 关系式	$M_{re}-\varepsilon_a$ 关系式
线性关系	L1: $\alpha_{re} = A_1 \varepsilon$	$M_{re} = A_1 \ln \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0} \right)$
	L2: $\alpha_{re} = A_2 (\varepsilon - \varepsilon_0)$	$M_{re} = A_2 \left(\ln \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0} + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_a} - 1 \right)$
幂指数关系	P1: $\alpha_{re} = A_3 \varepsilon^{1/2}$	$M_{re} = 2A_3 \left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0}} - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_a}} \right)$
	P2: $\alpha_{re} = A_4 \varepsilon^d$	$M_{re} = \frac{A_4}{d-1} (\varepsilon_a^{d-1} - \varepsilon_0^{d-1})$
自然指数关系	E1: $\alpha_{re} = A_5 \exp(-B_5/\varepsilon)$	$M_{re} = \left(\frac{A_5}{B_5} \right) \left[\exp \left(-\frac{B_5}{\varepsilon_a} \right) - \exp \left(-\frac{B_5}{\varepsilon_0} \right) \right]$
	E2: $\alpha_{re} = A_6 \exp(-\varepsilon_0/\varepsilon)$	$M_{re} = \frac{A_6}{\varepsilon_0} \exp \left(-\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_a} \right) - \frac{A_6}{e\varepsilon_0}$
	E3: $\alpha_{re} = A_7 \exp \left[-(\varepsilon_0/\varepsilon)^{1/2} \right]$	$M_{re} = \frac{2A_7}{\varepsilon_0} \left(1 + \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_a}} \right) \exp \left(-\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_a}} \right) - \frac{4A_7}{e\varepsilon_0}$

3.2.2. 三种关系内部的统一性

两种线性关系区别就在于倍增始点 α_{re} 的值, L2 对应 5.73 Td/V 而 L1 为 0。下文将看到其实他们来源于同一种 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 关系式, 只是近似级数不同而已。幂指数关系 P1、P2 的统一性就更明显了: P1 就是 P2 中 $d = 1/2$ 时的特殊情况, 因此 $A_3 = A_4$ 。自然指数关系 E2 是 E1 中 $B_5 = \varepsilon_0$ 的特殊情况; 适当的近似后 E2 和 E3 也可以统一起来, 其系数之间的关系取决于近似条件。

3.2.3. 线性关系与幂指数关系的统一性

幂指数关系与线性关系之间的过度可借助图线说明。文献[22]中 Diethorn 公式对 P10 的实验结果为 $A_1 = \ln 2/23.6 = 0.02937 \text{ V}^{-1}$, 据此可以做出线性关系关系假设 L1 下, 对应于不同 d 值的 $M_{re}-\varepsilon_a$ 关系曲线如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 随着 d 的取值逐步接近 1.0, $M_{re}-\varepsilon_a$ 关系曲线也越来越接近 Diethorn 公式。换句话说, 线性关系 L1 是 P2 中 d 取值趋近于 1 时的特殊情况, 线性关系 L 和幂指数关系 P 是统一的。

3.3. 三种 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 关系之间的统一性

1) 1985 年 Aoyama 等[15]提出的三参数 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 关系式:

$$\alpha_{re} = A\varepsilon^m \exp \left(-\frac{B}{\varepsilon^{1-m}} \right) \quad (0 \leq m \leq 1) \quad (6a)$$

上式中 A 、 B 、 m 是与气体性质有关的常数, 这样约化倍增因子就可写为

$$M_{re} = \frac{1}{1-m} \frac{A}{B} \left[\exp \left(-\frac{B}{\varepsilon_a^{1-m}} \right) - \exp \left(-\frac{B}{\varepsilon_0^{1-m}} \right) \right] \quad (6b)$$

当 $m = 1$ 时 $\alpha_{re} = A_1 \varepsilon$ 此即线性关系 L1; 而当 $m = 0$ 时得到 $\alpha_{re} = A_5 \exp(-B_5/\varepsilon)$ 就对应自然指数关系 E1; $m = 1/2$ 时做 1 级近似便得幂指数关系 P1。对 P10 和 Xe + 5% CO₂ 气体, $m = 12$ 。

2) 1995 年 Segur 等[23]针对非均匀电场改进了三参数 $M_{re}-\varepsilon_a$ 关系, 提出场梯度模型

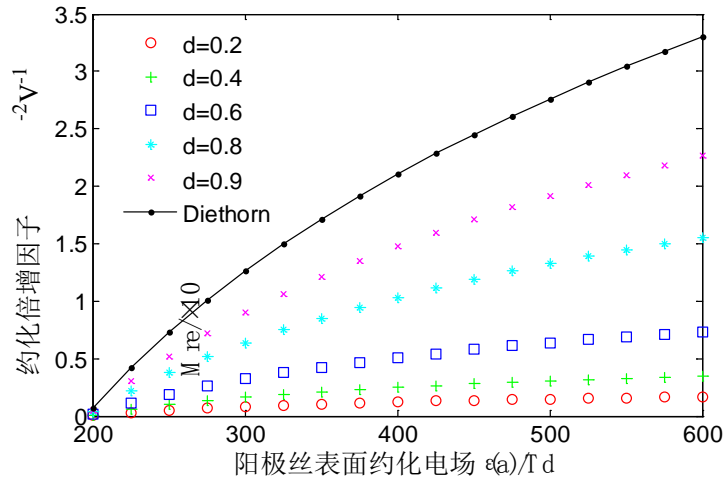


Figure 1. Curves of “ $M_{re}-\varepsilon_a$ ” due to various “ d ” under exponential relationship
 图 1. 幂指数关系下不同 d 值对应的 $M_{re}-\varepsilon_a$ 关系曲线

$$\alpha_{re} = A^* \varepsilon^m \exp\left(-\frac{B^*}{\varepsilon^{1-m}}\right) \quad (7a)$$

对应的约化倍增因子为

$$M_{re} = \frac{1}{1-m} \frac{A^*}{B^*} \left[\exp\left(-\frac{B^*}{\varepsilon_a^{1-m}}\right) - \exp\left(-\frac{B^*}{\varepsilon_0^{1-m}}\right) \right] \quad (7b)$$

与(7)式不同的是, (8)式中的系数 A^* 、 B^* 不再是常数, 他们依赖于气体的压强 p 。

3) 1999 年 Mazed 等[19]提出的半微观的 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 关系式:

$$\alpha_{re} = A\varepsilon \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon}\right)^{1+m}\right] \quad (8a)$$

由此得出相应地的 $M_{re}-\varepsilon_a$ 关系可写为

$$M_{re} = K \left\{ (1+m) \ln t + \frac{1}{1 \times 1!} t^{(1+m)} - \frac{1}{2 \times 2!} t^{2(1+m)} + \frac{1}{3 \times 3!} t^{3(1+m)} - \dots \right\} - L \quad (8b)$$

式中 $t = \varepsilon_a/\varepsilon_0$, $0 \leq m \leq 1$ 且最佳取值为 $2/3$; K 和 L 的值仅与气体种类、组分有关, 对 P10 有 $K = 0.02004 \text{ V}^{-1}$, $L = 7.87 \times 10^{-3} \text{ V}^{-1}$ 。当 $m = 0$ 时展开式(9a)得

$$\alpha_{re} = A\varepsilon \left[1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} + \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon}\right)^2 - \frac{1}{3!} \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon}\right)^3 + \dots \right] \quad (9)$$

不难看出零级近似对应着线性关系 L1, 一级近似对应着线性关系 L2。可见上述三种关系均为以上三个通用关系在特定条件下的近似, 这表明上述线性、幂指数和自然指数三种关系之间有着良好的一致性。

4. 约化汤森系数、约化倍增因子和约化电场关系图

4.1. 临界约化汤森系数

根据正比管中气体放大(倍增)的概念, 正比计数管倍增也对该处的约化汤森系数 α_{re} 有了对应的限制, 限制条件取决于具体的 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 关系。从表 1 可知 α_{re} 随 ε 增大而增大, 从而正比管倍增中类似地也存在临界

约化汤森系数 Σ , 且 $\Sigma = \alpha_{re}(\varepsilon_0)$ 。不难看出, 表 1 中那些关系对应的 Σ 表达式依次为 $A_1\varepsilon_0, 0, A_3\varepsilon_0^{1/2}, A_4\varepsilon_0^d, A_5 \exp(-B_5/\varepsilon_0), A_6/e, A_7/e$ 。可见自然指数关系下 Σ 有固定的值, 而线性关系是自然指数的一种特例, 幂指数关系下 Σ 与具体所取的指数 d ($0 < d < 1$) 有关。

4.2. 常用 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 和 $M_{re}-\varepsilon_a$ 关系图解

4.2.1. 常用 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 关系的系数确定

以 P10 气体充入正比计数管为例, $\varepsilon_0 = 195.16 \text{ Td}$, $A_1 = 0.02937 \text{ V}^{-1}$, 可得 $\Sigma = 5.732 \text{ Td/V}$ 。据此可得出对于这种气体在上述部分关系下对应的系数 A 列于表 2:

4.2.2. 常用 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 、 $M_{re}-\varepsilon_a$ 关系曲线图

对于表 2 中的关系 L1、P1 和 E1-E3, 取特定参数的正比计数管 ($V = 1 \text{ KV}$ 、 $b = 2 \text{ cm}$ 、 $a = 10 \mu\text{m}$ 、 $p = 1 \text{ atm}$) 后有 $\varepsilon_a = 13.16 \text{ V}/(\mu\text{m}\cdot\text{atm}) = 530.6 \text{ Td}$ 。以 P10 气体填充时, 可作 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 关系曲线如图 2。

从式(1)可知, 第一汤森系数是一个原初电子在其单位长度路径上产生的二次电子个数, 而约化汤森系数 $\alpha_{re} = \alpha/p$, 它可认为是特定气压下一个原初电子产生的二次电子个数。若将自然指数关系统一为 $\alpha_{re} = A_7 \exp[-(\varepsilon_0/\varepsilon)^n]$ ($0 < n < 1$), 则在相同约化电场处, 参数 n 在减小的过程中 α_{re} 随之减小, 也就是说对一个原初电子其单位长度路径上产生的二次电子个数估计越来越保守。在这种估计中幂指数关系 P1 和线性关系 L1 均介于三个自然指数关系之间, 可能因线性关系 L1 形式简单且更容易被人们接受, 因而对应的 Diethorn 公式在计算平均倍增因子时得到了广泛的应用。

在表 2 中几种假设下, 约化倍增因子随阳极丝表面约化电场的变化曲线如图 3 所示。

从图 3 可知: 1) M_{re} 随 ε_a 增大而增大; 2) M_{re} 随 ε_a 增加的速度因 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 关系而异; 3) 不同 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 关系下得到某一 ε_a 下的 M_{re} 值相差不大。换句话说, 只要正比管的尺寸和工作参数确定, 倍增因子取值与具体选用何种假设关系不大, Diethorn 提出的简单线性关系 L1 正是因此得到广泛应用。

5. 结论

本文首先提出了约化汤森系数、约化倍增因子、临界约化场强与临界约化汤森系数的概念, 通过对三类约化汤森系数与约化电场的关系: 线性关系、幂指数关系和自然指数关系的分析, 得出如下结论:

- 1) 描述约化汤森系数、约化倍增因子和约化电场之间的三类关系具有良好的统一性;
- 2) 正比管中存在临界约化电场和临界汤森系数, 其取值因 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 关系而异;
- 3) 正比管中约化倍增因子随阳极丝表面电场递增, 其增速受 $\alpha_{re}-\varepsilon$ 关系影响, 但倍增因子取值变化很小。

Table 2. Common relationship of $\alpha_{re}-\varepsilon$ and value of their coefficient
表 2. 常见 α_{re} 与 ε 关系式及其对应系数值

关系类别	$\alpha_{re}-\varepsilon$ 关系式	系数的值(V^{-1})
线性关系	L1: $\alpha_{re} = A_1\varepsilon$	$A_1 = 0.02937$
	L2: $\alpha_{re} = A_2(\varepsilon - \varepsilon_0)$	$A_2 = 0.07984$
幂指数关系	P1: $\alpha_{re} = A_3\varepsilon^{1/2}$	$A_3 = 0.41$
	P2: $\alpha_{re} = A_4\varepsilon^d$	$A_4 = A_3 = 0.41$
自然指数关系	E1: $\alpha_{re} = A_5 \exp(-B_5/\varepsilon)$	$A_5 = 27.88, B_5 = 308.74$
	E2: $\alpha_{re} = A_6 \exp(-\varepsilon_0/\varepsilon)$	$A_6 = 15.5812$
	E3: $\alpha_{re} = A_7 \exp[-(\varepsilon_0/\varepsilon)^{1/2}]$	$A_7 = 15.5812$

注: 表中 A_5 、 B_5 的值用到了 $\alpha_{re}(\varepsilon_0) = 5.732 \text{ Td/V}$ 、 $\alpha_{re}(\varepsilon_a) = 15.581 \text{ Td/V}$ 和 $\varepsilon_a = 530.6 \text{ Td}$ 。

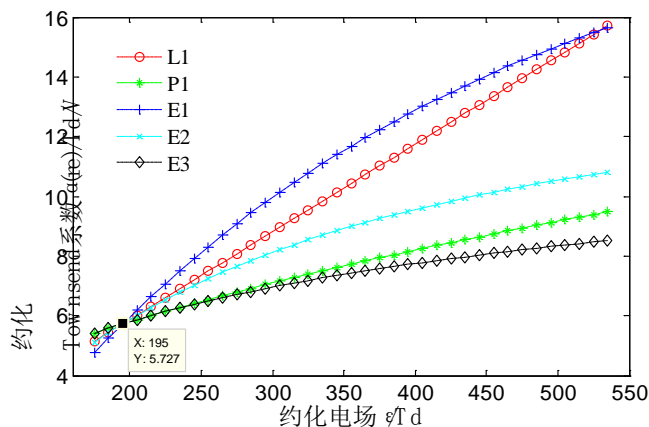


Figure 2. Curves of some relationships between reduced Townsend coefficient α_{re} and reduced electric field ϵ
图 2. 几种约化汤森系数与管内约化电场关系曲线

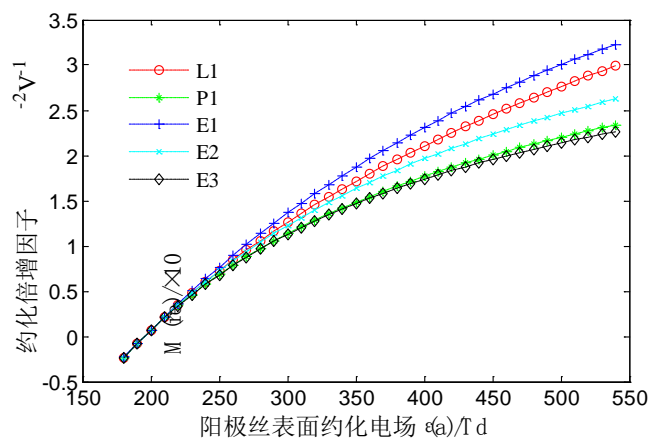


Figure 3. Curves of some relationships between reduced multiplication factor M_{re} and the reduced electric field on the anode surface ϵ_a
图 3. 几种约化倍增因子与阳极丝表面约化电场关系曲线

正比管的倍增因子值与采用何种假设关系不大，因而 Diethorn 提出的线性关系得到广泛应用。

致谢

本文获国家自然科学基金(41064002)资助，在此表示感谢！

基金项目

国家自然科学基金资助项目(41064002)。

参考文献 (References)

- [1] Kowalski, T Z. (1985) Measurement and parametrisation of the gas gain in proportional counters. *Nuclear Instruments and Methods A*, **234**, 521-526.
- [2] Miyahara, H., Watanabe, M. and Watanabe, T. (1985) Gas amplification in coaxial proportional counters. *Nuclear Instruments and Methods A*, **241**, 186-190.
- [3] Charles, M.W. (1972) Gas gain measurements in proportional counters. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, **5**,

- 95-100.
- [4] Kowalski, T.Z. (1986) Generalized parametrisation of the gas gain in proportional counters. *Nuclear Instruments and Methods A*, **243**, 501-504.
 - [5] Zastawny, A. (1997) Standardization of gas amplification description in proportional Counters. *Nuclear Instruments and Methods A*, **385**, 239-242.
 - [6] Sernicki, J. (1997) Some practical data on the first Townsend coefficient of organic vapour in avalanche counters. *Nuclear Instruments and Methods A*, **399**, 347-353.
 - [7] Oettinger, E., Hildebrandt, M. and Schmidt, B. (1998) Electron drift velocity and Townsend coefficient in DME-based gas mixtures. *Nuclear Instruments and Methods A*, **412**, 355-360.
 - [8] Bronic, I.K. and Grosswendt, B. (1998) Gas amplification and ionization coefficients in isobutane and argon-isobutane mixtures at low gas pressure. *Nuclear Instruments and Methods B*, **142**, 219-244.
 - [9] Colucci, A., Gorini, E., Grancagnolo, F., et al. (1999) Measurement of drift velocity and amplification coefficient in C₂H₂F₄-isobutane mixtures for avalanche-operated resistive-plate counters. *Nuclear Instruments and Methods A*, **425**, 84-91.
 - [10] Auriemma, G., Fidanza, D., Pirozzi, G., et al. (2003) Experimental determination of the Townsend coefficient for Argon-CO₂ gas mixtures at high fields. *Nuclear Instruments and Methods A*, **513**, 484-489.
 - [11] Ahn, S.H., Bahk, S.Y., Hong, B., Hong, S.J., Kang, D.H., Kang, T.I., et al. (2004) Characteristics of a double gap resistive plate chamber for the end cap region of CMS/LHC: Data vs simulation in avalanche mode. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **533**, 32-36.
 - [12] Davydov, Y.I., Openshaw, R., Selivanov, V. and Sheffer, G. (2005) Gas gain on single-wire chambers filled with pure isobutane at low pressure. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **545**, 194-198.
 - [13] Nakhostin, M., Baba, M., Ohtsuki, T., Oishi, T. and Itoga, T. (2007) Precise measurement of first Townsend coefficient, using parallel plate avalanche chamber. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **572**, 999-1003.
 - [14] Nikitovic, D.Z., Strinic, A.I., Stojanovic, V.D., Malović, G.N. and Petrović, Z.L. (2007) A Monte Carlo simulation of collisional processes in a Townsend discharge in neon. *Radiation Physics and Chemistry*, **76**, 556-560.
 - [15] Aoyama, T. (1985) Generalized gas gain formula for proportional counters. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **234**, 125-131.
 - [16] Kishimoto, S. and Isozumi, Y. (1990) Gas gain of helium-filled proportional counter at low temperatures (≈ 4.2 K). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **286**, 262-264.
 - [17] Sakurai, H. and Ramsey, B.D. (1992) Dependence of energy resolution on anode diameter in xenon proportional counters. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **313**, 155-160.
 - [18] Uozumi, Y., Sakae, T., Matoba, M., Ijiri, H. and Koori, N. (1993) Semi-microscopic formula for gas gain of proportional counters. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **324**, 558-564.
 - [19] Mazed, D. and Baaliouamer, M. (1999) A semi-microscopic derivation of gas gain formula for proportional counters. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **437**, 381-392.
 - [20] Mazed, D. (2007) Experimental gas application study in boron-lined proportional counters for neutron detection. *Nuclear Instruments and Methods A*, **42**, 245-250.
 - [21] Andronic, A., Biagi, S., Munzinger, P.B., Garabatos, C. and Tsileidakis, G. (2004) Drift velocity and gain in argon- and xenon-based mixtures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **523**, 302-308.
 - [22] Knoll, G.F. (1989) Radiation detection and measurement. 2nd Edition, Wiley, New York.
 - [23] Ségur, P., Olko, P. and Colautti, P. (1995) Numerical modeling of tissue-equivalent proportional counters. *Radiation Protection Dosimetry*, **61**, 323-350.