

E.KUFFEL M.ABDULLAH

高电压工程

繆始森 孙嘉平 等译



水利电力出版社

H
V
O
L
T
A
G
E
E
N
G
I
N
E
E
R
I
N
G

内 容 提 要

本书深入浅出、简明扼要地论述了高电压物理基础理论, 高电压试验设备和测量技术。全书共分六章。第一章概述气体放电物理过程; 第二、三章介绍气体、液体、固体击穿的机理, 近年来研究成果的试验数据和图表; 第四章介绍了一些较新的高压发生装置: 如工频串联谐振装置、操作波发生装置、冲击电压自动控制回路和触发系统、直流发生装置等; 第五章为高压测量部分, 包括螺旋电阻器、分压器、标准电容器、新型峰值电压表等的设计和校验方法; 第六章为非破坏性绝缘试验技术, 包括高电压介质损耗测量和局部放电测量等内容。

该书适用于电力、电工部门有关运行、设计制造、试验科研等技术人员和大专院校师生阅读。中专亦可参考。

E.KUFFEL M.ABDULLAH

HIGH-VOLTAGE ENGINEERING

Pergamon Press Ltd., Oxford, England, 1977

高 电 压 工 程

E.库弗尔 M.阿卜杜勒著

缪始森 孙嘉平等译

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 9印张 199千字

1984年1月第一版 1984年1月北京第一次印刷

印数 0001—9620册 定价 1.15元

书号 15143·5321



译 者 前 言

近年来，我国电力工业和电气制造工业发展很快，不仅对高电压试验和测量技术不断提出新的要求，而且在高压技术领域内也涌现出不少新的需要研究的课题。为了适应这种发展的需要，华北电力试验研究所和水利电力部科技情报研究所有关同志合译了《高电压工程》一书。该书由美国麻省理工学院科学博士E.库弗尔（E.KUFFEL）和物理学博士M.阿卜杜勒（M.ABDULLAH）共同撰写，一九七〇年第一次出版，一九七七年再版。该书论述了高电压物理基础理论、高电压试验设备和测量技术。内容新颖广泛、系统性强，对于大专院校电机工程系的师生和电力、电工部门从事运行、制造、设计、试验和科研工作人员都有一定的参考价值。

全书共分六章。第一章简要概述了气体放电的物理过程；第二、三章叙述了气体、液体和固体电击穿的主要机理；第四章介绍了各种新型的高电压发生装置。如工频串联谐振装置、各种操作波发生装置、冲击电压自动控制回路及新的触发系统、新的直流发生装置等；第五章是高电压的测量，内容包括有：100千伏螺旋电阻器的设计，新型峰值电压表的设计、75千伏、150千伏、300千伏高压标准电容器的设计、冲击电压分压器的设计及其校验等；第六章论述了非破坏性绝缘试验技术，包括高电压介质损耗测量和局部放电测量等内容。这些内容对于从事高电压设备的设计和使用的

工程技术人员有直接用处。

书中的译名，凡在第一次出现时都加注人名原文，以便读者查阅。

原作者序言最后三段是作者向一些个人和单位致谢的名单，译文未列入。

本书由缪始森（第一章）、孙嘉平（第二章）、胡维新（第三章）、王惠仁和邵长顺（第四章）、毕玉璞和汪启槐（第五章）、张之铨（第六章）同志翻译。全书由孙嘉平和胡维新同志校阅。

由于译校者水平有限，错误之处请广大读者批评指正。

译 者

一九八三年五月

序 言

在《高电压工程》这本书内，力求把高电压现象和高电压实验技术两个方面的重要问题都包括进去。全书分为两大部分：前三章讲放电理论，介绍了气体放电的物理过程并论述了气体、固体和液体电击穿的主要机理；后三章讲实验技术，分别论述了高电压的产生、测量以及评价电气绝缘的检测技术。

为使全书篇幅不致过长，对所论述的内容进行了认真的筛选与合理的安排。本书的第一部分只选择了放电理论方面最为重要的一些论题，其目的在于帮助：(a)有实践经验的工程师更新和加强其放电基础理论的知识；(b)大学生和初级研究人员熟悉高电压放电的基本原理。这样，对于专门从事气体放电研究的专家来说，就会感到这部分的论述过于简捷。不过，他们可以去参阅本书所列的参考文献，从中得到更为丰富的资料。

本书对高电压实验技术做了较为系统和详尽的论述，其目的是希望本书对从事高电压设备的设计和运行方面的工程师们更为有用。对于高年级大学生以及应用高电压实验技术从事其他领域科研的研究人员，也会从本书中获得收益。

E.库弗尔 M.阿卜杜勒

目 录

译者前言

序 言

第一章 游离和衰减过程	1
1.1 电子碰撞游离	1
1.2 光游离	5
1.3 原子准稳态互游离	6
1.4 热游离	7
1.5 电子逸离	7
1.6 复合衰减	8
1.7 附着衰减——负离子的形成	9
1.8 气体离子的迁移率和扩散衰减	11
1.9 阴极过程	16
(a) 光电发射	17
(b) 由正离子和激励原子撞击引起的电子发射	17
(c) 热发射	17
(d) 场致发射	18
1.10 汤逊第二游离系数 γ	19
第二章 气体中的电击穿	24
2.1 气体放电的汤逊准则	24
2.2 击穿放电电压	25
2.3 空间电荷对击穿电压的影响	27
2.4 放电发展的流注机理	28
2.5 均匀电场下的击穿电压特性	30
2.6 气体混合物的击穿：佩宁效应	33

2.7	压缩气体中的电击穿	35
2.8	冲击击穿电压——放电时延	38
2.9	电晕放电	45
2.10	非均匀电场中的击穿	52
2.11	操作冲击电压下的击穿	60
第三章 固体介质和液体介质的击穿		67
3.1	固体介质的击穿	67
(a)	固有击穿	67
(b)	电气机械击穿	68
(c)	流注击穿	69
(d)	热击穿	72
(e)	电腐蚀击穿	74
3.2	液体击穿	76
(a)	电子型击穿	77
(b)	气泡击穿	78
(c)	悬浮颗粒造成击穿的机理	80
第四章 高电压的产生		82
4.1	交流电压	82
(a)	串级变压器	82
(b)	用于高压交流试验的串联谐振回路	84
4.2	暂态电压	91
(a)	单级冲击电压发生器回路	92
(b)	多级冲击电压发生器回路	99
(c)	冲击电压发生器的触发和示波器的同步	107
(d)	操作波电压的产生	116
4.3	直流电压	125
(a)	倍压和串级回路	125
(b)	静电发生器	138
(c)	电压的稳定	147
第五章 高电压测量		157

5.1	静电电压表	157
5.2	球隙	166
5.3	均匀场间隙	195
5.4	电流表串联高阻抗	202
5.5	分压器	220
第六章 非破坏性绝缘试验技术		261
6.1	高电压介质损失的测量	261
(a)	西林电桥	261
(b)	大电容的测量	264
(c)	电感耦合比例臂电桥	265
(d)	整体设备的介质损失测量	266
6.2	局部放电测量	268
(a)	直测法	269
(b)	平衡法	272

参考文献

第一章 游离和衰减过程

概述

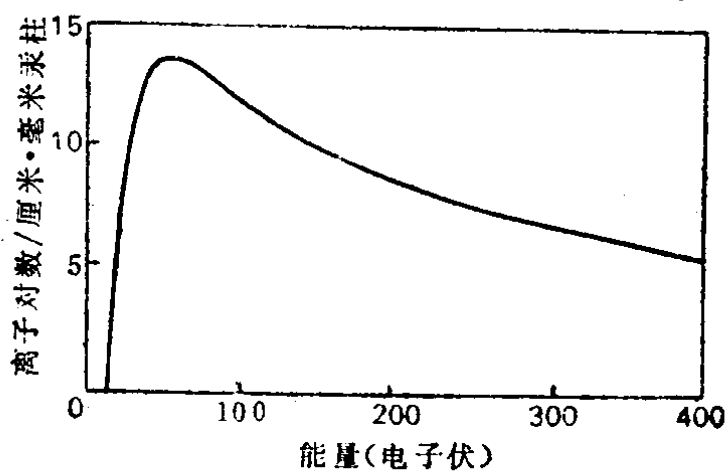
在放电过程中，离子的产生或消失可能有多种机理，它们既可单独作用，也可联合作用。近期出版的一些书籍和报导中^(1~6)，对气体放电的基本过程已作了广泛的讨论。本章简要地综述了气体放电中电流倍增或衰减的主要机理。所考虑的过程分为：(a)离子产生的过程，包括电子碰撞游离、光游离、正离子碰撞游离、热游离、电子游离、分级游离和二次 γ 效应等；(b)离子消失过程，包括电子附着、复合和扩散等。

1.1 电子碰撞游离

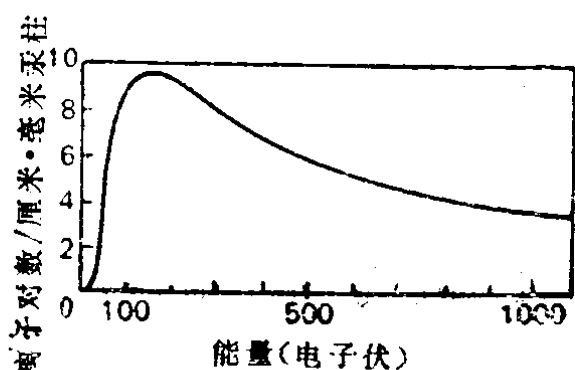
电子碰撞游离可能是气体击穿中最重要的过程。电子碰撞游离的有效性取决于电子的能量。运动很慢的电子不会引起游离，中等速度而能量小于游离电位的电子在与原子或分子碰撞时，可能使原子或分子激励，随后，它们与另外的慢速运动的电子碰撞时就会游离。这一过程只有在电子密度很高时才有意义。速度很高的电子也不易产生碰撞游离，因为高速电子可能从原子近旁通过，而不从原子中激发出电子。每种气体都存在最佳的电子能量范围，此时产生碰撞游离的几率最大。

图 1.1 为汞蒸汽和空气的单次游离几率随电子能量变化

的曲线。纵座标代表游离几率（定义为一个电子在1毫米汞柱压力的气体中移动1厘米时所产生的离子对的数目）。把游离几率称之为微分游离系数⁽⁷⁾似乎更为恰当。



(a)



(b)

图 1.1 由电子碰撞发生单次游离的几率

(a)在汞蒸汽中；(b)在空气中

汤逊第一游离系数

气体放电中起始电子源于宇宙射线和辐射，也可能是由于一个电极受照射而发生光电游离的结果。在没有外加电场的情况下，呈现为平衡状态。这时电子和正离子的发生率和消失率是相等的。当在电极之间施加足够的电场时，平衡就被破坏了。汤逊 (Townsend) 首先研究了平行平板电极之间的电流和外加电场强度的函数关系。他发现，间隙中的电

流起初是随外加电压成正比地增大，然后几乎保持在 i_0 值不变，而电流值 i_0 相当于外部紫外线照射时在阴极产生的光电流。当外加电压继续增高到某个数值，电流又随电压的增加而迅速地增大。电流和电压之间关系的一般形式如图 1.2 所示。汤逊把电流在 V_2 之后的增加归结为电子碰撞所引起的气体游离。随着电场强度的增加，由阴极逸出的电子在两次碰撞之间的加速越来越快，直到它们所获得的能量足以使之与气体原子或分子产生碰撞游离。碰撞游离产生的电子可再从电场中获得能量，然后又产生新的碰撞游离。

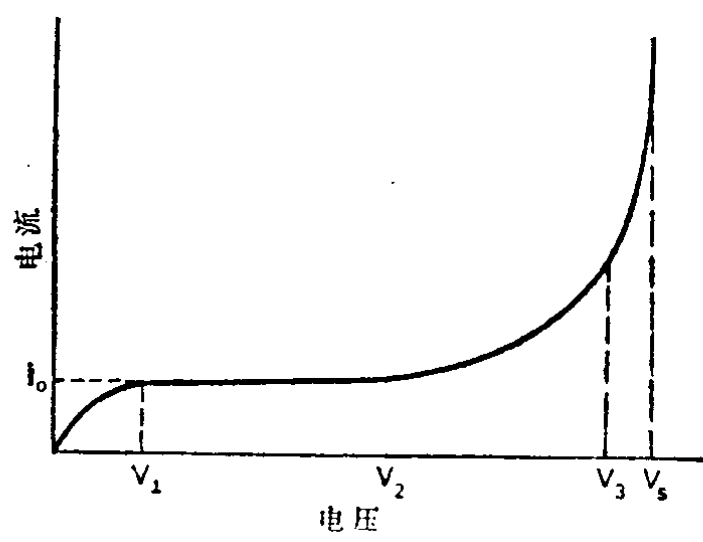


图 1.2 预击穿区的电流-电压关系

为了解释上述电流的增加，汤逊引用了参数 α ，现在通称为汤逊第一游离系数。它的定义是：单个电子沿电场方向运动 1 厘米距离所产生的电子数。在 dx 距离内电子数 n 的增量 dn 可写成：

$$dn = \alpha n dx$$

或
$$n = n_0 e^{\alpha x} \tag{1.1}$$

式中 n_0 是每秒从阴极逸出的电子数。这样，如果 I_0 为阴

极逸出电流，则间隙电流按下式成指数增长：

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (1.2)$$

式中， d 为间隙长度（单位为厘米）。实验和理论表明， α/p 是 E/p 的函数，其中， E 为电场强度， p 为气体压力。

汤逊已推导出了参数 α 和电场强度 E 以及气体压力 p 之间的理论关系。当电子沿电场方向移动一个自由行程 λ 后，获得的能量为 $Ee\lambda$ 。如果 $Ee\lambda \geq eV_i$ （ V_i 为气体的游离电位），则电子将使气体电离。电子引起游离的几率取决于自由行程 $\lambda \geq \lambda_i = V_i/E$ 的几率。

根据动力学理论，自由行程大于 λ_i 的电子数可由下式决定：

$$n = n_0 e^{-\lambda_i / \lambda_m} = n_0 e^{-V_i / \lambda_m E}$$

式中 n_0 为起始粒子数， λ_m 为平均自由行程，每厘米行程游离碰撞数 α 等于电子的平均碰撞数乘以自由行程大于游离长度 λ_i 的几率，并可表示为：

$$\alpha = \frac{1}{\lambda_m} e^{-V_i / \lambda_m E}$$

而 $1/\lambda_m = Ap$ ， A 为常数。

$$\frac{\alpha}{p} = A e^{-(AV_i p)/E}$$

或
$$\frac{\alpha}{p} = A e^{-B p / E}$$

因而， $\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right)$ 与实验结果相同。

对各个给定的 E 和 p 值，应用公式（1.2）进行试验就可测出相应的 α 。试验时， I_0 、 E 和 p 保持不变，改变 d ，测定 I 。一些气体的 α/p 的典型曲线示于图1.3。在确定 α 的数值时，必须注意只能应用低电流密度，以免空间电荷使电场

畸变，而电场畸变将导致错误的结果。

汤逊⁽⁸⁾和他的学院以及随后的研究者^(9~11)对不同气体的 α 进行了大量的测定。近来，米克（Meek）、克雷格斯（Craggs）以及洛伊布（Loeb）⁽¹⁾将其全部实验结果进行了整理和汇总。

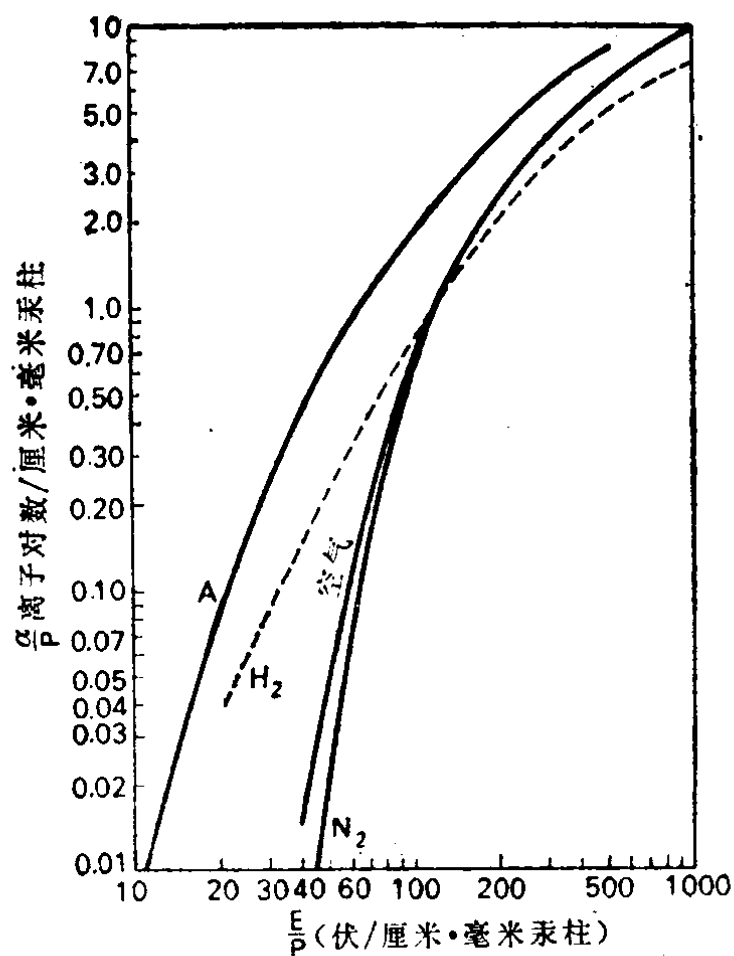


图 1.3 氮(N_2)、空气、氢(H_2)、氩(A)的游离系数 α

1.2 光 游 离

能量低于游离电位(V_i)的电子在碰撞时可使气体原子激励至较高的能量状态。这种反应可用符号式 $A + e + KE \rightarrow A^* + e$ 来表示。由这一状态恢复到正常状态需要 $10^{-7} \sim 10^{-8}$

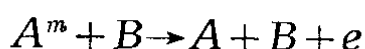
秒，恢复时原子会辐射出一定的能量或光子，它可能使另一个游离电位等于或小于光子能量的原子发生游离。

这一过程称之为光游离，并可用 $A+h\nu\rightarrow A^++e^-$ 来表示。式中 A 为气体的中性分子， $h\nu$ 为光子能量。要发生光游离， $h\nu$ 必须大于或等于原子或分子的 eV_i ，此处 V_i 为游离电位。如果能量 $h\nu$ 大于 eV_i ，则多余的能量可给被释放的电子以动能。当光子能量与游离能的差值 ($h\nu-eV_i$) 较小，为 $0.1\sim 1$ 电子伏时，则光子使原子或分子游离的概率最大。如果光子能量小于 eV_i ，它仍可能为原子所吸收而使原子上升到较高的能级，这一过程称之为光激励。

光游离是二次游离过程，它可能在汤逊击穿机理中起作用，并在流注击穿机理和某些电晕放电中起重要的作用。这方面的问题将在后面讨论。

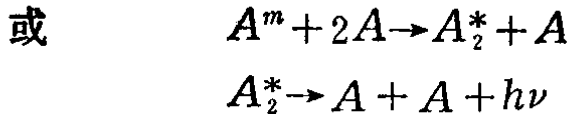
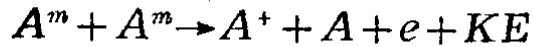
1.3 原子准稳态互游离

有些元素（惰性气体和周期表中的第二族元素）的某些激励状态的寿命长达数秒，这些状态称之为准稳态。处在准稳态的原子可简明地用 A^m 来代表。如果准稳态原子 (A^m) 的能量 V_m 大于另一个原子 B 的游离能 V_i ，则在碰撞时可能按下列反应式产生游离：



当原子 A^m 的能量 V_m 小于另一原子 B 的游离能 V_i 时，则碰撞时的反应可能导致另一个原子 B 的激励，并可用 $A^m+B\rightarrow A+B^*$ 来表达。

由准稳态原子产生游离的另一种可能性是当能量 $2V_m$ 大于原子 A 的游离能 V_i 时，反应可按下式进行：



在后一反应中所释放的光子能量太低，不足以在纯净的气体中引起游离，但它可能使阴极释放电子。准稳态互游离就这样在激励后长时延才起作用。这就是在某些气体⁽¹²⁾中观察到的放电具有较长时延的原因。这一问题将在第二章中予以讨论。

1.4 热 游 离

如果气体加热到足够高的温度，很多中性原子将获得足够的能量使被撞击的原子发生游离。一般来说，热游离是指在高温气体中发生分子碰撞、辐射和电子碰撞的游离。热游离在火焰和高压电弧中是主要的游离源。这一过程已由萨哈 (Saha)⁽¹³⁾ 根据热力学理论进行分析并用式 $A \rightleftharpoons A^+ + e - U_i$ 加以确定。式中 A 为中性原子， A^+ 为单次游离的原子， e 为离子逸出的电子， U_i 为游离能。

1.5 电 子 逸 离

在高场强的特定条件下，电子可能自负离子逸离。但是这一过程只有在负离子具有较高浓度时才能发生。洛伊布⁽³⁾ 对氧气 O_2 中的电子逸离进行了实验，发现在 E/p 为 90 伏/厘米/毫米汞柱时就发生电子逸离。曾经认为这一过程对于负极性尖端电晕放电起着很重要的作用。但是本书作者⁽¹⁵⁾ 对不同波头冲击电压下进行电晕放电研究的最新结果表明，负

极性尖端电晕可在远低于电子逸离所需要的场强下发生。在观察负极性电晕形成时，发现电晕起始场强随电压上升速度的减小而降低。

1.6 复 合 衰 减

无论何时，只要存在正极性和负极性的带电粒子，就会发生复合。这一过程是光游离的逆过程。复合时，电子-离子或离子-离子对的位能和相互间的动能以辐射量子的方式予以释放。这一反应可用符号表示如下：



式中 B^- 可以是电子或负离子。除此之外，反应也可能涉及到第三个粒子，它可能吸收复合时释放出的能量。

复合率与正离子和负离子或电子的浓度成正比。如果 n_+ 和 n_- 为单位体积内的正离子和负离子数，则

$$\frac{dn_+}{dt} = \frac{dn_-}{dt} = \alpha n_+ n_- \quad (1.3)$$

式中 α 是一常数，称之为复合系数。一般说来

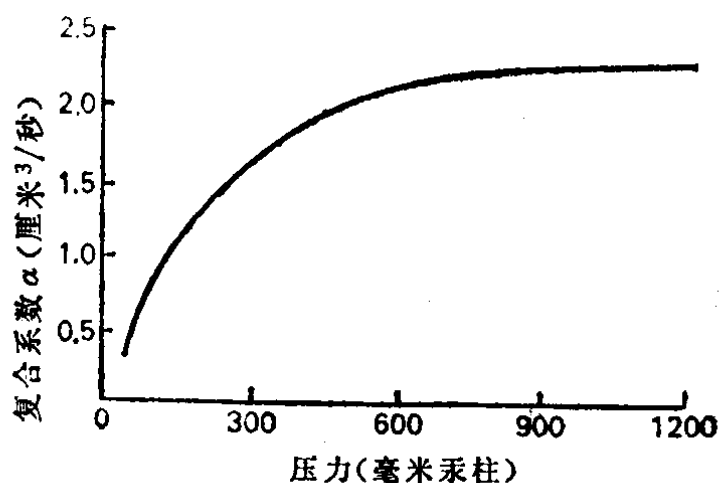


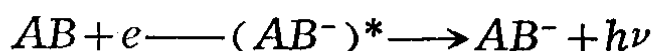
图 1.4 空气的复合系数

$$n_+ = n_- = n, \quad \frac{dn}{dt} = \alpha n^2 \quad (1.4)$$

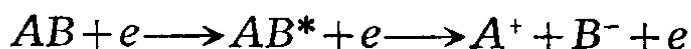
α 随压力变化的关系示于图1.4。在高气压下，复合过程特别重要，而扩散过程就比较次要。

1.7 附着衰减——负离子的形成

在某些气体中，电子能同中性原子或分子结合而形成负离子。负离子的形成对于高介电强度的气体是一个非常重要的过程。负离子既可由直接捕获电子过程而形成：



也可由离子对生成（离解）过程所产生：



由于A的游离电位通常比较高，发生电子捕获过程通常比离子对生成过程所需的电子能低得多。例如一氧化碳产生O⁻离子时，峰值约在9.6伏和21.1伏，前者相当于形成碳原子，后者相当于形成C⁺。负离子的稳定性可由中性的负电性粒子与电子的亲合力来衡量，它与游离或离解相似。

由于附着使游离气体中电子减少可用类似于气体中电子倍增的表达式（1.2）来表示。如果附着系数 η 和汤逊第一游离系数 α 具有相似的定义；即定义为单个电子沿电场方向运动1厘米时所发生的附着数，则在距离 dx 内由于附着而造成电子流的损失为

$$dI = -I\eta dx$$

$$\text{或} \quad I_2 = I_1 e^{-\eta x} \quad (1.5)$$

应用公式（1.5）来确定附着系数的方法已被一些研究者所采用。在这些方法中，附着系数 η 可由测量残留的栅极