

高等学校教材

薄膜

BOMMO

[日] 金原 繁 著
藤原英夫

王力衡 译
郑海涛

电子工业出版社

高等学校教学用书

薄 膜

〔日〕金原 榮 藤原英夫 著

王力衡 郑海涛 译

電子工業出版社

薄 膜

〔日〕金原 粲 藤原英夫 著

王力衡 郑海涛 译

责任编辑：吴金生

*

电子工业出版社出版（北京市万寿路）

北京市隆昌印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本：850×1168 1/32 印张：12.25 字数：326千字

1988年4月第1版 1988年4月第1次印刷

印数：2000册 定价：2.20元

统一书号：15290·341

ISBN7-5053-0090-31/TN49

前 言

本书是为初学者编写的“薄膜物理”方面的一本入门书。

笔者是在五十年代开始研究薄膜的，记得当时还没有什么机会能让薄膜的研究人员聚集在一起发表他们的研究成果。由于薄膜的物理性能受表面的影响很大，而表面物理在应用物理学中早已成为一个独立的分支，所以当时薄膜的研究成果是借用了表面物理的一角才得以少量地发表。其实，严格说来“表面”并不是一种实体，而薄膜则确实是材料的一种物质形态，所以表面与薄膜在研究方法和目的等方面是有很大不同的。随着薄膜在电子工业方面的应用，无论在研究的量和质上都有了飞跃的发展。在这种情况下，薄膜研究当然不能总是作为表面物理的一部分，而终于作为应用物理学中的一个新的分支诞生了。今天，“薄膜”已经是几乎可以和“表面物理”并肩发展的一个领域了。这对在一线从事研究的人员来说，是极其值得庆幸的。

可是，从初学者的立场来看，还有一些不能令人满意的地方。一些老的学科都有比较合适的教材和书籍，这对初学者和第一线研究人员的学习和参考都是有利的。相比之下，对于在薄膜研究这一新领域中的初学者来说，就不能不说还有一些不足。当然，到目前为止已有H.Mayer, K.L.Chopra等人以及日本的一些学者写出了一些名著或好的著作，不过这些著作多近似于专著而不是入门书，同时一般读者又不太容易得到。

薄膜是一个正在大力研究着的新领域，虽然已积累了丰富的理论和数据，但基础研究尚不够充分，被公认为完全正确的理论还为数极少。

如果一本入门书的目的是向初学者提供已经确立的基础知识，那么笔者对于执笔写一本关于薄膜的入门书就感到有些犹疑

了。但是，薄膜研究现状已进入了相当高水平的研究阶段，而且不断有新的研究者开始从事这一研究工作，因此，作为入门书不仅要提供已经确立的理论知识，而且还应把现在正在研究的尚未确立的东西忠实地告诉读者，这对于刺激初学者，唤起他们的好奇心不也是很有意义的吗！？基于以上的考虑，笔者不顾自己才疏学浅，毅然担当了本书的执笔。希望能得到众多读者的批评，以便再版改正。

本书的第六章与第八章分别请日立制作所中央研究所的浅井彰二郎博士及樽谷良信氏写出了原稿，然后经笔者改写成使初学者容易理解的形式。但是，没有他们二位的协助，这两章是不可能写成的。第七章的内容，得到了东京大学物性研究所近角聪信教授、日立制作所中央研究所谷口哲博士，斋藤延男博士（现在是东京农工大学教授）、杉田愼博士的指导与帮助，谨在此表示深切的谢意。

笔者的恩师，东京大学名誉教授莲沼宏先生审阅了全书，并提出了中肯的意见，对先生的指导谨致郑重的感谢。

最后，本书从开始执笔到交稿经过了几年时间，在此期间裳华房的远藤恭平氏，真喜屋实孜氏不但对笔者的拖延怠笔毫不厌烦，还和笔者交上了朋友。另外，八寻千枝女士细致地完成了烦琐的校对工作，在此谨向他们表示衷心的感谢。

著者 1979年5月

译 者 的 话

本书是日本东京大学应用物理专业研究生薄膜物理课的主要参考书。本书主要作者东京大学金原粲副教授是日本薄膜方面的权威，无论是在理论方面还是在实际方面都具有丰富的经验，曾来我国讲学并指导过我国访问学者。本书的姊妹书——薄膜基本技术早已被我国翻译出版。

作者所说的“入门书”是指大学物理专业毕业生或研究生开始从事薄膜研究时，参考与学习的入门书。本书可作为我国有关专业的研究生和大学物理专业的高年级学生的主要参考书。也可供从事薄膜结构和从事薄膜力学、电学、光学、磁学性能以及超导薄膜和半导体薄膜特性研究的理论工作者和工程技术人员参考。

本书的第一、二、三、六章由王力衡同志执译，第四、七、八章由郑海涛同志执译，第五章由田树英同志执译。王力衡与郑海涛对全书进行了互校，郑海涛对全书的文笔作了统一处理。

由于译者水平所限，错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

译 者

1985年4月于西安交大

目 录

第一章 薄膜的制作方法	与膜厚的测试法	(1)
§ 1.1	真空蒸发法 (Vacuum dePosition method)	(1)
1.1.1	真空环境的必要性	(1)
1.1.2	蒸发: 平衡蒸气压和温度以及蒸发量	(6)
1.1.3	蒸发原子与蒸发分子的形态	(8)
1.1.4	真空蒸发装置	(9)
1.1.5	特殊的蒸发	(12)
§ 1.2	溅射法 (SPuttering method)	(17)
1.2.1	辉光放电和溅射现象	(17)
1.2.2	混入薄膜中的气体分子	(19)
1.2.3	溅射机理	(20)
1.2.4	溅射原子、分子的形态	(23)
1.2.5	直流二极溅射装置	(23)
1.2.6	特殊溅射法	(24)
§ 1.3	气相生长法	(27)
1.3.1	热分解法 (thermal decomPosition method)	(27)
1.3.2	还原法 (reduction method)	(28)
1.3.3	歧化反应法 (disProPortionation reaction method)	(29)
1.3.4	化学转移反应法 (Chemical ransfer reaction method)	(30)
§ 1.4	膜厚的测量方法	(31)
1.4.1	多光束干涉法测量形状膜厚	(32)
1.4.2	石英晶体振荡法测量质量膜厚	(35)
文献		(8)
第二章 薄膜的形成及其结构		(40)
§ 2.1	薄膜的形成过程和薄膜结构的观察结果	(40)

§ 2.2 核生成的现象论模型 (VWBD 理论)	(50)
2.2.1 帽形集合体的自由能和临界核	(51)
2.2.2 基片上的临界核密度	(54)
2.2.3 原子碰撞帽形集合体的几率	(55)
2.2.4 从现象论看不均质核的生成速度	(56)
§ 2.3 核生成的原子论模型I (Walton理论)	(58)
2.3.1 集合体密度的计算	(58)
2.3.2 临界温度的计算	(60)
2.3.3 核生成速度的计算	(61)
§ 2.4 薄膜形成的几率过程模型 (Zinsmeister 理论)	(63)
2.4.1 基本方程式	(63)
2.4.2 碰撞系数	(64)
2.4.3 近似解	(65)
§ 2.5 核生成的原子论模型II (Lewis-Campbell理论)	(69)
2.5.1 考虑了捕捉范围的核生成	(69)
2.5.2 不完全凝聚场合下的稳定核密度和凝聚系数	(70)
2.5.3 完全凝聚场合下的饱和核密度	(72)
§ 2.6 外延生长	(73)
2.6.1 外延生长的观测	(74)
2.6.2 用原子论解释外延生长的发生	(77)
2.6.3 拟似性结构和位错的发生	(78)
2.6.4 外延性的核生成 (epitaxial nucleation)	(82)
§ 2.7 核成长的模型	(84)
2.7.1 用无序移动模型 (random walk) 进行处理	(84)
2.7.2 二维气体扩散模型	(87)
§ 2.8 薄膜的结构缺陷	(89)
2.8.1 点缺陷	(90)
2.8.2 位错	(94)
2.8.3 层错缺陷	(99)
2.8.4 其它的结构缺陷	(100)
文 献	(101)
第三章 薄膜的力学性能	(105)
§ 3.1 薄膜的弹性性能	(105)

3.1.1	薄膜的弹性	(105)
3.1.2	单质薄膜 (Substrate-free film) 及其密度	(106)
3.1.3	薄膜的弹性常数	(107)
3.1.4	薄膜的内摩擦 (internal friction)	(111)
§ 3.2	附着	(113)
3.2.1	附着现象	(113)
3.2.2	附着力 (adhesive force)	(114)
3.2.3	附着力的测量方法	(115)
3.2.4	附着力的测量结果	(122)
3.2.5	附着的机理和增加附着力的方法	(124)
§ 3.3	内应力 (internal stress)	(127)
3.3.1	内应力现象	(127)
3.3.2	内应力的测量方法	(128)
3.3.3	内应力的测量结果	(132)
3.3.4	内应力产生的原因	(137)
3.3.5	内应力与薄膜的物理性能	(140)
§ 3.4	张力特性 (tensile Properties)	(142)
3.4.1	薄膜的张力特性	(142)
3.4.2	张力特性的测量方法	(142)
3.4.3	张力特性的测量结果	(145)
3.4.4	张力特性的几点说明	(146)
文 献		(147)
第四章	薄膜的电学性能	(150)
§ 4.1	不连续薄膜	(151)
4.1.1	一般特征	(151)
4.1.2	热电子发射过程 (thermionic emission Process)	(154)
4.1.3	热激活隧道过程 (activated tunneling Process)	(158)
4.1.4	热电子发射电流与热激活隧道电流的比较	(163)
4.1.5	不连续薄膜中电子的传导路径	(165)
§ 4.2	连续薄膜	(165)
4.2.1	一般特征	(165)

4.2.2	连续薄膜中电子传输的Sondheimer理论	(168)
4.2.3	自由电子论和玻耳兹曼的传输方程	(169)
4.2.4	用玻耳兹曼方程式计算薄膜的电导率—— Sondheimer理论	(170)
4.2.5	有磁场时的电导	(175)
4.2.6	考虑了晶界电子散射的 MayadasShatzkes理论	(180)
4.2.7	量子尺寸效应和电导	(183)
4.2.8	热电能	(187)
	文献	(191)
第五章 薄膜的光学性能		(193)
§ 5.1	基本公式	(193)
5.1.1	斯奈尔定律和光学常数	(194)
5.1.2	菲涅尔公式	(195)
5.1.3	吸收体的反射	(196)
5.1.4	薄膜的反射和透射	(197)
§ 5.2	薄膜光学常数的测量方法	(201)
5.2.1	偏光分析法	(201)
5.2.2	阿贝(Abeles)法	(203)
5.2.3	莫尔(Male)法	(205)
§ 5.3	光学性能的测量结果	(206)
5.3.1	透明体连续薄膜	(206)
5.3.2	吸收体薄膜	(208)
§ 5.4	金属薄膜中的光等离子体共振	(211)
5.4.1	光学常数和其它物理常数	(211)
5.4.2	金属内电子的等离子体振动	(212)
5.4.3	道尔徳(Drude)方程式和复介电常数	(213)
5.4.4	表面等离子体	(214)
5.4.5	金属薄膜中的光等离子体	(214)
§ 5.5	特殊薄膜	(218)
5.5.1	非均质薄膜 (inhomogeneous films)	(218)
5.5.2	岛状薄膜	(220)
5.5.3	多层膜及其应用	(226)

文献	(230)
第六章 半导体薄膜的性能及其特性的测量	(233)
§ 6.1 半导体的各种特征长度和半导体薄膜的特性	(234)
6.1.1 少数载流子的扩散长度 (minority Carrier diffusion length)	(234)
6.1.2 表面空间电荷层 (Surface space charge region)	(238)
6.1.3 平均自由程 (mean free Path)	(242)
6.1.4 德拜长度 (Debye length)	(243)
6.1.5 光吸收系数的倒数 (inverse absorption coefficient)	(244)
6.1.6 其它特征长度	(246)
§ 6.2 单晶薄膜与非晶态薄膜	(248)
§ 6.3 半导体薄膜特性的测量方法	(250)
6.3.1 测量电阻法	(250)
6.3.2 电容-电压法测量杂质浓度分布	(252)
6.3.3 用范德普 (Van-der-Pauw) 法测量霍耳效应	(255)
6.3.4 分步腐蚀和综合测量电阻与霍耳效应	(257)
6.3.5 光学评价法	(258)
文献	(262)
第七章 薄膜的磁学性能	(263)
§ 7.1 自发磁化 (Spontaneous magnetization)	(264)
7.1.1 自发磁化	(264)
7.1.2 薄膜的自发磁化	(266)
§ 7.2 薄膜的磁各向异性	(269)
7.2.1 磁性薄膜的形状各向异性	(270)
7.2.2 多晶坡莫合金薄膜的面内感应单轴磁各向异性	(270)
7.2.3 多晶磁薄膜的垂直磁各向异性	(277)
§ 7.3 薄膜的磁畴与畴壁	(280)
7.3.1 磁畴、畴壁的观察法	(280)
7.3.2 薄膜的畴壁	(283)
7.3.3 薄膜的磁畴	(288)
7.3.4 具有正垂直磁各向异性薄膜的磁畴构造	(290)

7.3.5 条纹状磁畴与可旋转各向异性(rotatable anisotropy).....	(293)
7.3.6 磁泡畴.....	(296)
§ 7.4 薄膜的磁化过程 (magnetization Process)	(300)
7.4.1 静磁化过程.....	(300)
7.4.2 坡莫合金薄膜的高速开关作用.....	(309)
7.4.3 畴壁的运动.....	(314)
7.4.4 磁泡的动特性.....	(320)
§ 7.5 磁共振(magnetic resonance)	(324)
7.5.1 铁磁共振(ferromagnetic resonance) (一致旋转模型)	(324)
7.5.2 自旋波共振.....	(326)
文献	(330)
第八章 超导薄膜	(337)
§ 8.1 超导体的一般性能及薄膜化后的效果.....	(338)
8.1.1 超导体的一般性能.....	(338)
8.1.2 超导薄膜的性能.....	(343)
§ 8.2 超导结及其应用.....	(346)
8.2.1 超导结.....	(346)
8.2.2 约瑟夫森效应.....	(352)
8.2.3 超导结的应用.....	(359)
§ 8.3 高临界温度超导体的研究.....	(370)
文献	(375)

第一章 薄膜的制作方法

与膜厚的测试法^[1]

薄膜的研究工作首先是从研究如何制作薄膜这样一种特殊形态的材料开始的。虽然薄膜的制作方法有很多种，但在物理学和电子学等领域内采用较多的方法是，真空蒸发法、溅射法、气相生长法等。本章将首先介绍这三种方法的基本内容。

薄膜的厚度，即膜厚的测量值，对于研究薄膜的物理性质是十分重要的。由于膜厚大都是在 $10^{-7} \sim 10^{-5} \text{cm}$ 范围，所以，在测量膜厚时，需要特别精确。而且，在膜厚这样薄的范围内，有必要对厚度的概念本身进行研究。本章在讨论厚度意义的同时，还对有代表性的膜厚测量方法进行了介绍。

§ 1.1 真空蒸发法^[1](Vacuum deposition method)

制作薄膜最一般的方法是真空蒸发法。这种方法是把真空室的气体排到 10^{-4}Torr 以下的压强，然后，加热被蒸发物质使其蒸发，并沉积在光滑的基片上。因此，这里所说的蒸发实际上包含了蒸发与沉积这样两个含意。

蒸发过程可分为排气、加热蒸发源中的物质使其蒸发并向基片上沉积等几个基本过程。

1.1.1 真空环境的必要性

首先定性地说明一下，在进行蒸发时，为什么蒸发的空间需要抽真空。其原因如下：

(1) 防止在高温下因空气分子和蒸发源发生反应，生成化合物而使蒸发源劣化。

(2)防止因蒸发物质的分子在真空室内与空气分子碰撞而阻碍蒸发分子直接到达基片表面,和在途中生成化合物或由于蒸发分子间的相互碰撞而在到达基片之前就凝聚等。

(3)防止在基片上形成薄膜的过程中,空气分子作为杂质混入膜内或者在薄膜中形成化合物。

为了能定量地估算在蒸发时需要多高的真空度(剩余气体压强),这里先推导如下的气体分子运动方程。

A. 碰撞单位面积的分子数

当气体分子在作无规则的运动时,假定把它的运动速度 v 在 x 、 y 、 z 方向的分量分别用 v_x 、 v_y 、 v_z 来表示,那么,它的速度 $v(v_x, v_y, v_z)$ 的分布函数 $f(v_x, v_y, v_z)$ 或 $f(v)$ 就可以用Maxwell-Boltzmann分布来描述,即

$$f(v_x, v_y, v_z) = g(v_x)g(v_y)g(v_z) \quad (1.1)$$

$$g(v_i) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{mv_i^2}{2kT}\right) \quad (1.2)$$

$i = x, y, z$

当 $f(v)$ 用直角坐标 v_x, v_y, v_z 进行积分时,因为它的积分元为 $4\pi v^2 dv$,所以把式(1.1)乘上 $4\pi v^2$ 后就得

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) \cdot 4\pi v^2 \quad (1.3)$$

因此,假定每单位体积的分子数为 n ,那么,在 v_x 和 $v_x + dv_x$ (取速度的 x 方向)之间的分子数由式(1.2)可得

$$ng(v_x)dv_x = n\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT}\right)dv_x \quad (1.4)$$

在 v 和 $v + dv$ 之间的分子数由式(1.3)可得

$$nf(v)dv = 4\pi n\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right)v^2 dv \quad (1.5)$$

由式(1.5)可以导出气体的各种性质的经典方程式。例如,气体分子的平均速度 $\bar{v}$ 为

$$\begin{aligned}
 \bar{v} &= \frac{1}{n} \int_0^{\infty} n v f(v) dv \\
 &= 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \int_0^{\infty} v^3 \exp \left(-\frac{mv^2}{2kT} \right) dv \\
 &= \left(\frac{8kT}{\pi m} \right)^{1/2} \quad (1.6)
 \end{aligned}$$

如果应用式(1.6)来计算300K下的H₂、N₂、Au各分子的速度那么, 它们的平均速度 $\bar{v}$ 就分别为1780、480、130m·s⁻¹。

现在来计算一下在 dt 时间内, 碰撞到与 x 轴垂直的单位面积上的分子数。由式(1.4)可知, 在 x 方向上每单位体积内速度在 v_x 和 $v_x + dv_x$ 之间的分子数应为 $ng(v_x)dv_x$, 即 $ng(v_x)dv_x$ 等于底面为所考虑的面、长度为 $v_x dt$ 的圆柱体内的分子数, 也就是说只有 $ng(v_x)dv_x dt$ 分子和单位面积相碰撞。如果计算所有速度的分子数, 则 dn 就为

$$\begin{aligned}
 dn &= n dt \int_0^{\infty} g(v_x) v_x dv_x = n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} dt \\
 &\quad \times \int_0^{\infty} v_x \exp \left(-\frac{mv_x^2}{2kT} \right) dv_x \\
 &= n \left(\frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2} dt \quad (1.7)
 \end{aligned}$$

因此, 若分子流的强度用 J 表示, 则单位时间内通过单位面积的分子数为

$$J = \frac{dn}{dt} = n \left(\frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2} = \frac{1}{4} n \bar{v} \quad (1.8)$$

式(1.8)也叫Hertz-Knudsen式, 而且是经常引用和经常使用的式子。假定 p 为压强, 由波义耳-查理定律可知, $p = nkT$ 。因此, 这里把 n 用压强 p (Torr) 代替后, 就可得到与 J 值对应的各种物质的压强 p 值。表1-1示出了它们的这些对应值。

一般的固体物质, 每单位表面积(1 cm²)上的分子数大约为10¹⁴左右。从表1-1可知, 在常温和10⁻⁴~10⁻⁵ Torr压强下, 每秒钟碰撞表面的分子数大体上相当于覆盖物质全表面的分子数。

表 1-1 气体分子流的强度

物质名称	分子量	温度(K)	$J. (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$		
			$p(\text{Torr})10^{-8}$	10^{-7}	10^{-6}
H_2	2	300	10×10^{15}	10×10^{17}	10×10^{19}
		1500	4.5×10^{15}	4.5×10^{17}	4.5×10^{19}
N_2	28	300	0.73×10^{15}	0.73×10^{17}	0.73×10^{19}
		1500	0.32×10^{15}	0.32×10^{17}	0.32×10^{19}
O_2	32	300	0.64×10^{15}	0.64×10^{17}	0.64×10^{19}
		1500	0.28×10^{15}	0.28×10^{17}	0.28×10^{19}
Si	28	300	0.73×10^{15}	0.73×10^{17}	0.73×10^{19}
		1500	0.32×10^{15}	0.32×10^{17}	0.32×10^{19}
Au	197	300	0.10×10^{15}	0.10×10^{17}	0.10×10^{19}
		1500	0.46×10^{14}	0.46×10^{16}	0.46×10^{18}

B. 蒸发分子的碰撞几率和平均自由程

现在来求蒸发源蒸发的分子在剩余气体中飞行时能够自由移动的距离。

当1个分子在剩余气体分子中运动时，当然要和气体分子相撞。经过足够长的时间后，对大量分子求平均，可得到每单位时间的平均碰撞次数 Z ，我们称之为碰撞几率。1个分子单位时间前进的距离就是由式(1.6)所给出的 $\bar{v}$ 。因此，1个分子不发生碰撞能够自由前进的距离的平均值 λ ，就可以用 $\lambda = \bar{v} / Z$ 来表示。这里把 λ 叫做平均自由程（取mean free path, 的字头，经常写成mfp）。

现在假定有来自蒸发源的 N_0 个分子向前进，且以分子束的形式进入剩余气体中。但是，分子束中的分子数由于它和剩余气体分子之间发生碰撞而会渐渐减少。假如取分子束的前进方向为 x 轴方向，那么，分子束中的分子数 N 就应是具有初始值 N_0 的 x 的函数。当分子束从某一 x 位置前进到 $x + dx$ 时，在这之间受到碰撞而散射的蒸发分子数应为

$$NZ \frac{dx}{\bar{v}} = N \frac{dx}{\lambda} = -dN \quad (1.9)$$

用 $x = 0$ ， $N = N_0$ 的边界条件来解式(1.9)，可得

$$N = N_0 e^{-x/\lambda} \quad (1.10)$$

也就是说，所谓 λ 就是分子束中的分子数（强度）减少到初始值的 $1/e$ 的距离。

下面，求 λ 和分子大小之间的关系。这里假定分子都是刚体球。设蒸发分子的半径为 r ，剩余气体分子的半径为 r' 。若蒸发分子以平均速度 $\bar{v}$ 向前前进，当取其中心的轨迹为轴时，它单位时间就要和长度为 $\bar{v}$ ，底面半径为 $r+r'$ 的圆柱内的所有的剩余气体分子相碰撞。假定剩余气体分子的分子浓度为 n ，则碰撞数 Z 为

$$Z = n \pi (r + r')^2 \bar{v}$$

$$\therefore \lambda = \frac{\bar{v}}{Z} = \frac{1}{n \pi (r + r')^2} \quad (1.11)$$

式(1.11)对于蒸发原子在剩余气体分子中自由地前进的距离来说是一个重要的公式。如果上式中的 n 用剩余气体压强 p 代替，又因为分子半径一般为 $1.5 \text{ \AA}$ 左右，则在常温下的平均自由程应为

$$\lambda \approx \frac{10^{-2}}{p} \quad (\lambda: \text{cm}, p: \text{Torr}) \quad (1.12)$$

从上式可以看出，为使 λ 达到 $10^1 \sim 10^2 \text{ cm}$ ，就需要 $p \approx 10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ Torr}$ 真空度。

现在再回到这一节的开头处，即蒸发时为什么需要真空和需要多高的真空度这一问题上。

用蒸发法向基片上沉积薄膜的速率大体上等于每秒在基片上沉积1个原子层（数 $\text{\AA}$ ）的蒸发物质。从式(1.8)和表1-1可以看出，在剩余气体压强为 10^{-5} Torr 时，剩余气体分子几乎和蒸发物质的原子以相同的数量到达基片。当然，这些分子不一定都能进入所形成的膜中，但 10^{-5} Torr 的真空度就成为衡量剩余气体影响的一个指标。此外，蒸发装置（实为真空室）的大小，大体上也多为 $10 \sim 100 \text{ cm}$ 左右。因此，从蒸发源到基片之间也大体上就是这样一个距离。为了让此距离等于分子的平均自由程，从