

低温真空技术

電子工業出版社

低温真空技术 ——基础和应用

〔德〕R·A黑费尔 著

李旺奎 李润田 译
林璇 鲍贤杰 李智
陈丕瑾 校

电子工业出版社

* * *

低温真空技术

——基础和应用

〔德〕R·A黑费尔 著

李旺奎等 译

责任编辑 连潮东 高平

电子工业出版社出版（北京万寿路）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京科技印刷厂印刷

开本：850×1168 毫米 1/32 印张：2.45 字数：282 千字

1985年5月第一版 1985年6月第一次印刷

印数：1—5100册 定价：2.60元

统一书号：15290·106

译者序

“低温真空技术”一书是一本颇具特色的专著。作者根据他多年的科研实践经验，综合整理了大量新发表的文献，系统地论述了低温真空技术的物理基础，深入探讨了低温真空容器中的非平衡态气流理论，详细介绍了用低温手段获得真空的技术和各种低温泵的结构、性能及其应用。本书是一本对真空技术工作者有较大参考价值的新书。

本书作者黑费尔 (R·A·Haefer) 曾任瑞士物理基础部负责人，现为该部和奥地利电子显微镜研究中心顾问。他曾发表了有关真空技术、电子显微镜、固体物理、等离子体物理和低温物理等方面的论文80余篇，并出版了《低温真空技术》和《低温技术》两本书。

译者在翻译过程中曾得到中国科学院兰州近代物理研究所郭其第研究员的热情帮助，谨在此表示感谢。

译校者水平有限，错误难免，望读者指正。

译者

一九八五年

内 容 简 介

本书扼要地论述了低温真空技术的基础理论,介绍了低温泵的工作原理和制冷方法,讨论了低温泵各特性参数的计算及其实际结构,并对各种低温泵作了专门介绍。本书还介绍了低温真空技术在宇航研究、粒子束系统、等离子体物理和热核聚变、真空工艺、界面物理学和表面分析等方面的具体应用。

本书可供从事真空技术、表面科学研究的工程技术人员、工人和高等及中等专业技术院校的师生参考。

前 言

利用低温获得真空的低温真空技术，在目前出版的真空技术教科书中所占的篇幅很少。可是，近年来低温泵的重要性和有关这方面的资料却急剧猛增，因此，希望把低温真空技术与传统的真空技术分开来专门加以介绍。本书论述了低温真空技术的物理基础、实际结构和应用，它是根据作者在这一专业领域的生产和科研中多年积累的实践经验写成的。

众所周知，高真空泵需求量的不断增加，一方面是因为开辟了新的应用领域，另一方面则是由于对许多真空工艺流程提出了更高的要求，例如清洁的、不含碳氢化合物的残余气体气氛，低的极限压强，以及要求具有高的比抽速（这与泵入口面积有关），以尽可能缩短抽气时间。低温泵在这些特性方面胜过所有常规的高真空泵。

低温泵的结构形式种类繁多：有使用液氦（LHe）冷却的阱式低温泵（贮槽式低温泵），也有采用靠氦气流连续冷却低温板致冷的、靠再生式致冷机或焦耳-汤姆逊阀式致冷机致冷的低温泵，或利用膨胀引射器致冷的低温泵。尽管这些致冷方法不同，但是，由于其抽气低温面的结构形式适应性很强，故始终能与被抽空的容器相匹配。按照这种方式工作的低温泵，可以在所需要的地方甚至在设备难于接近的位置上充分发挥其全部抽速。

最近几年研制出运行可靠的致冷机低温泵，实现了抽气系统的全自动化，在抽速约为 $10\text{米}^3/\text{秒}$ 时，这种泵的投资费用和生产成本并不比常规泵贵，它正越来越多地在真空工艺流程中使用。在空间模拟和核裂变的大型装置中抽速必须大于 $100\text{米}^3/\text{秒}$ ，这只有利用低温泵才能经济地获得这样大的抽速。由此可知，低温泵

在真空技术中占有十分重要的地位。

从事真空工作的专业技术人员必须具备一定的低温技术知识,才能在应用低温泵时准确地判断采用哪种致冷方法最为有利,选用哪些低温技术测量方法和辅助手段最适宜。而另一方面,低温专业技术人员也需要掌握真空技术物理基础的详尽知识,掌握在大低温抽气面的容器内气体流动和压强测量等知识,还要了解低温泵的各种机理和低温泵的计算方法,以便能够确定在一定的使用情况下致冷装置的最佳尺寸。本书特别着重于通过相应的物理和技术上的数据资料以及大量的应用实例帮助读者加深理解。

本书内容包含下列有关章节:第一章论述整个低温真空领域的概况,并提出了几个重要问题。第二章论述了真空技术基础原理,主要是气流形式和不等温真空容器中分子流以及连续流范围内的压强测量问题。以后各章叙述低温泵的各种机理,即纯气体的冷凝(第三章),气体冷凝物上的低温吸附(第四章),多孔固体的低温吸附(第五章),混合冷凝作用和低温捕集(第六章),钛升华泵中的低温吸气(第七章)。第八章阐述低温泵各个特性参数的计算,第九章介绍低温泵的实际结构形式;这两章还讨论了低温技术基础以及致冷方法和测量方法。最后,第十章介绍低温真空技术在下列领域中的应用:宇宙研究,粒子束系统、等离子体物理和热核聚变,真空工艺技术、界面物理学和表面分析,低温电子技术和氦II致冷系统。附录的表格中有对实验工作十分重要的真空技术和低温技术数据。本书使用国际单位制。书后附有详细的参考文献目录。

格拉茨,
电子显微技术研究中心
R·A黑费尔
1980年11月

常用符号和量度单位

名 称	符 号	量 度 单 位
面积	A	m^2 (米 ²)
平衡压强常数	B	—
流导	C	$m^3 \cdot s^{-1}$ (米 ³ /秒)
平均净吸附能	D	$J \cdot mol^{-1}$ (焦/摩尔)
能量	E	J (焦)
发射粒子流密度	E	$m^{-2} \cdot s^{-1}$ (1/米 ² /秒)
一个粒子占据的面积	F	m^2 (米 ²)
焓差	ΔH	$J \cdot mol^{-1}$ (焦/摩尔)
粒子流密度	I	$m^{-2} \cdot s^{-1}$ (米 ⁻² /秒)
克努曾数	K	—
长度	L	m (米)
摩尔质量	M	$kg \cdot kmol^{-1}$ (千克/千摩尔)
阿伏伽德罗数	$N_A = 6.02252$ $\times 10^{26}$	$kmol^{-1}$ (1/千摩尔)
粒子流量	N	s^{-1} (秒 ⁻¹)
气流, PV积, 抽吸量	Q	$P_a \cdot m^3 \cdot s^{-1}$ (帕·米 ³ /秒)*
气量, PV积	\bar{Q}	$P_a \cdot m^3$ (帕·米 ³)*
热流, 致冷功率	Q	W (瓦)
气体常数	$R = 8.3143$	$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ (焦/摩尔·K)
雷诺数	Re	—

(续表)

名称	符号	量度单位
抽速	S	$m^3 \cdot s^{-1}$ (米 ³ /秒)
温度	T	K
容积	V	m^3 (米 ³)
容积流量	\dot{V}	$m^3 \cdot s^{-1}$ (米 ³ /秒)
功率	\dot{W}	W (瓦)
返回数	Z	—
覆盖率	a	mol/mol (摩尔/摩尔)
适应系数	a	—
捕获几率	c	—
层厚度	d	m (米)
热辐射的辐射率	e	—
焓	h	$J \cdot kg^{-1}$ (焦/千克)
玻耳兹曼常数	$k = 1.38054 \times 10^{-23}$	$J \cdot K^{-1}$ (焦/K)
蒸发焓	I_v	$J \cdot kg^{-1}$ (焦/千克)
平均自由程	\bar{l}	m (米)
质量	m	kg (千克)
质量流量	\dot{m}	$kg \cdot s^{-1}$ (千克/秒)
粒子数密度	n	m^{-3} (米 ⁻³)
压强	P	1 Pa = 0.01 mbar
极限压强	P_u	P_a (帕)
最佳情况下达到的	P_e	P_a (帕)
极限压强		
时间	t	s (秒)
热辐射透射率	t_p	—

(续表)

名称	符号	量 度 单 位
吸附能力	v	$P_a \cdot m^3 \cdot kg^{-1}$ (帕·米 ³ /千克)
热速度	\bar{v}	$m \cdot s^{-1}$ (米/秒)
传输几率	w	—
被抽几率	w_p	—
粘附系数	α	—
凝结系数	α_c	—
微晶大小	δ	m (米)
电离真空计的相对灵敏度	Σ	—
粘滞系数	η	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ (千克/米秒)
绝热系数	$\kappa = C_p/C_v$	—
热导率	λ	$w \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (瓦/米·K)
密度	ρ	$kg \cdot m^{-3}$ (千克/米 ³)
司蒂芬-玻尔兹曼常数	$\sigma = 5.6697 \times 10^{-8}$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ (瓦/米 ² ·K ⁴)
滞留时间	τ	s (秒)

· 单位 $P_a \cdot m^3$ 和 $P_a \cdot m^3 \cdot s^{-1}$ 依照表 A·2 在 20°C 气体中应用,按通常习惯“在 20°C 下”这个提示在多数情况下不予写出。其它单位的换算见表 A·1 和 A·2

参考文献

- 1.1 Tait, P.G.; Dewar, J.: Proc. Roy. Soc. (Edinburgh) 8 (1874) 348, 628
- 1.2 Dewar, J.: Collected Papers. Cambridge: Univ. Press 1927
- 1.3 Grassmann, P.: Kältetechnik 2 (1950) 183
- 1.4 Chuan, R.L.: Univ. South Calif., Eng. Center Rep. 56-201 (1957)
- 1.5 Bailey, B.M.; Chuan, R.L.: Trans. Nat. Vac. Symp. 5 (1958) 262
- 1.6 Lasarev, B.G.; Borovik, Je.S.; Fedorova, M.F.; Zin, N.M.: Ukr. Phys. J. (1957) 176
- 1.7 Gifford, W.E.; McMahon, H.O.: Adv. Cryog. Eng. 5 (1960) 354
- 1.8 Prast, G.: Philips Tech. Rev. 26 (1965) 1
- 1.9 Scott, R.B.: Cryogenic engineering. Van Nostrand 1967
- 1.10 Barron, R.: Cryogenic systems. McGraw-Hill 1966
- 1.11 Kropschot, R.H.; Birmingham, B.W.; Mann, D.B.: Technology of liquid Helium, NBS Monograph 111, 1966
- 1.12 Frey, H.; Haefler, R.A.: Tieftemperatur-Technologie. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1981
- 1.13 Klipping, G.: Cryogenics 13 (1973) 197
- 1.14 Dushman, S.: Scientific foundations of vacuum technique. New York: Wiley 1962
- 1.14a Power, B.D.: High vacuum pumping equipment. London: Chapman & Hall 1966
- 1.15 Redhead, P.A.; Hobson, J.P.; Kornelseñ, E.V.: The physical basis of ultrahigh vacuum. London: Chapman & Hall 1968
- 1.16 Roth, A.: Vacuum technology. Amsterdam: North-Holland 1976
- 1.17 Wutz, M.: Theorie und Praxis der Vakuumtechnik. Braunschweig: Vieweg 1979
- 1.18 Santeler, D.J.; Jones, D.W.; Holkeboer, D.H.; Pagano, F.: Vacuum technology and space simulation. NASA SP 105 (1966)
- 1.19 Moore, R.W. jr.: Trans. Nat. Vac. Symp. 8 (1961) 426
- 1.20 Haefler, R.A.: Festschrift Max Auwärter, 1978, p. 139 - Vacuum 30 (1980) 19 und 193
- 1.21 Gareis, P.J.; Hagenbach, G.F.: Ind. Eng. Chem. 57 (1965) 27
- 1.22 Holland, L.: Brit. J. Appl. Phys. 16 (1965) 1053
- 1.23 Kidnay, A.J.; Hiza, M.J.: Cryogenics 10 (1970) 271

- 1.24 Haefer, R.A.: *Le Vide* 25 (1970) 65
- 1.25 Bailey, C.A.: *Advanced cryogenics*. London, New York: Plenum Press 1971, p. 317
- 1.26 Davey, G., in [1.25] p. 339
- 1.27 Hobson, J.P.: *J. Vac. Sci. Technol.* 10 (1973) 73
- 1.28 Barron, R.F.: *Adv. Cryog. Eng.* 20 (1975) 402
- 1.29 Thibault, J.J.: *Proc. 3rd Int. Cryog. Eng. Conf.* (1970) 25
- 1.30 Haefer, R.A.: *J. Phys. E* (im Druck)

- 2.1 Chapman, S.; Cowling, T.G.: *The mathematical theory of non-uniform gases*. Cambridge: Univ. Press 1970
- 2.2 Hirschfelder, J.O.; Curtiss, C.F.; Bird, R.B.: *Molecular theory of gases and liquids*. New York: Wiley 1967
- 2.3 Hurlbut, F.C.: *Molecular scattering at solid surfaces*, Estermann, I. (ed.). New York: Academic Press 1959
- 2.4 Nocilla, S.: *Rarefied gas dynamics*, Proc. 3rd Int. Symp., A. Laurmann, J. (ed.), Vol. 1. New York: Academic Press 1963
- 2.5 Brown, R.F.; Trayer, D.M.; Busby, M.R.: *J. Vac. Sci. Technol.* 7 (1970) 241
- 2.6 Knudsen, M.: *Ann. Phys.* 31 (1910) 205, 633. - *The kinetic theory of gases*. New York: Wiley 1934
- 2.7 Edmonds, T.; Hobson, J.P.: *J. Vac. Sci. Technol.* 2 (1965) 182
- 2.8 Liang, S.C.: *J. Phys. Chem.* 57 (1953) 910 - *J. Appl. Phys.* 22 (1951) 148 - *J. Phys. Chem.* 56 (1952) 660 - *Can. J. Chem.* 33 (1955) 279
- 2.9 Summers, R.L.: *NASA Rep. TND 5285* (1969)
- 2.10 Brombacher, W.G.: *NBS Techn. Note* 298 (1967)
- 2.11 Young, J.R.: *J. Vac. Sci. Technol.* 10 (1973) 212
- 2.12 Moesta, H.; Renn, R.: *Vak. Techn.* 6 (1957) 35
- 2.13 Reich, G.: *Z. Angew. Phys.* 9 (1957) 23
- 2.14 Bennewitz, H.G.; Dohmann, H.D.: *Vak. Tech.* 14 (1965) 8
- 2.15 Kleber, P.: *Diss. Univ. Tübingen 1974 - DFVLR Forschungsber. DLR FB 73-90 - Vacuum* 25 (1975) 191
- 2.16 ISO-R-1608, 1st ed. 1970
- 2.17 Buhl, R.; Trendelenburg, E.: *Vacuum* 15 (1965) 231 - *Proc. 3rd Int. Vac. Congr.*, Vol. II/1 (1965) 221
- 2.18 Steckelmacher, W.: *Vacuum* 15 (1965) 24
- 2.19 Bates, B.L.; Laurenson, L.; Steckelmacher, W.: *Vacuum* 16 (1966) 597
- 2.20 Buhl, R.: *Vacuum* 16 (1966) 589
- 2.21 Dayton, B.B.; Stickney, W.W.: *Trans. Nat. Vac. Symp.* 10 (1963) 105
- 2.22 Haefer, R.A.: *Vak. Techn.* 16 (1967) 149, 185, 210
- 2.23 Haefer, R.A.: *Sulzer Tech. Rev.*, Res. No. 8 (1970) 1-15
- 2.24 Levenson, L.L.; Milleron, N.; Davis, D.H.: *Trans. Nat. Vac. Symp.* 7 (1960) 372

- 2.25 Clausing, P.: Ann. Phys. 12 (1932) 961 - Versl. Afd. Nat. Kon. Akad. Wet., Amsterdam 35 (1926) 1023
- 2.26 Davis, D.H.: J. Appl. Phys. 31 (1960) 1169
- 2.27 de Marcus, W.C.: The problem of Knudsen flow, Parts I - VI, US AEC Rep. K 1302, AD 12457 (1956)
- 2.28 Berman, A.S.: J. Appl. Phys. 36 (1965) 3356
- 2.29 Berman, A.S.: J. Appl. Phys. 40 (1969) 4991
- 2.30 Levenson, L.L.; Milleron, N.; Davis, D.H.: Le Vide 103 (1963) 42
- 2.31 Pinson, J.D.; Peck, A.W.: Trans. Nat. Vac. Symp. 9 (1962) 406
- 2.32 Delafosse, J.; Mongodin, G.: Les calculs de la technique du vide. Le Vide 92 (1961) 3-108
- 2.33 Loevinger, R., in: Guthrie, A.; Wakerling, R.K. (eds.), Vacuum equipment and techniques. New York: McGraw-Hill 1949
- 2.34 Holland, L.; Steckelmacher, W.; Yarwood, J.: Vacuum manual. London: Spon. 1974, p. 38-43
- 2.35 Benvenuti, C.; Blechschmidt, D.; Passardi, G.: Le Vide, Suppl. 169 (1974) 117
- 2.36 Garwin, E.L. in: R. Vance (ed.), Cryogenic technology. New York: Wiley 1963, p. 332
- 2.37 Clausing, P.: Z. Phys. 66 (1930) 471
- 2.38 Reynolds, T.; Richley, E.A.: Flux patterns resulting from free molecular flow. NASA TN D (1964)
- 2.39 Chubb, J.N.: Proc. 4th Int. Vac. Congr. (1968) 433
- 2.40 Harries, W.: Z. Angew. Phys. 3 (1951) 296
- 2.41 Oatley, C.W.: Brit. J. Appl. Phys. 8 (1957) 15, 495
- 2.42 Steckelmacher, W.: Brit. J. Appl. Phys. 8 (1957) 494
- 2.43 Steckelmacher, W.; Turner, D.: J. Sci. Instrum. 43 (1966) 893
- 2.44 Füstöss, L.; Toth, G.: J. Vac. Sci. Technol. 9 (1972) 1214
- 2.45 Füstöss, L.: Vacuum 22 (1972) 111
- 2.46 Ballance, I.O.: Proc. 3rd Int. Vac. Congr. (1965) 85
- 2.47 Haefler, R.A.: Vacuum 30 (1980) 217
- 2.48 Pisani, C.: Proc. 4th Int. Vac. Congr. (1968) 439
- 2.49 Wu, Y.: Rarefied gas dynamics. New York: Academic Press 1961, p. 141 - J. Chem. Phys. 48 (1968) 889 u. 52 (1970) 1494
- 2.50 Steckelmacher, W.: Vacuum 16 (1966) 561 - Proc. 6th Int. Vac. Congr. (1974) 117
- 2.51 Haefler, R.A.: Proc. Int. Cryog. Eng. Conf. 3 (1970) 374
- 2.52a Wu, Y.: Proc. 2nd Int. Symp. rarefied gas dynamics 1960
- 2.52b Haefler, R.A.: Cryogenics 11 (1971) 210
- 2.53 Haefler, R.A.: Proc. Int. Cryog. Eng. Conf. 4 (1972) 314
- 2.54 Haefler, R.A.; Kleber, P.: Le Vide 31 (1976) 19
- 2.55 Haefler, R.A.; Kleber, P.: Proc. 4th Int. Vac. Congr. (1968) 237
- 2.56 Haefler, R.A.: Unveröffentlicht, Kastenstruktur
- 2.57 Hands, B.A.: Cryogenics 13 (1973) 699 - Vacuum 26 (1976) 11

- 2.58 Oswatitsch, K.: *Gasdynamik*. Wien: Springer 1952
- 2.59 Sauer, R.: *Einführung in die theoretische Gasdynamik*. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1951
- 2.60 Bland, M.E.: *Le Vide*, Suppl. 169 (1974), 131
- 2.61 Dawson, J.P.; Haygood, J.D.: *Cryogenics* 5 (1965) 57
- 2.62 Wutz, M.: *Proc. 3rd Int. Vac. Congr.* 2 (1965) 79 - *Vak. Techn.* 14 (1965) 126
- 2.63 Hobson, J.P.: *Trans. Nat. Vac. Symp.* 8 (1961) 26
- 2.64 Kraus, Th.: *Vak. Techn.* 8 (1959) 39
- 2.65 Dayton, B.B.: *Trans. Nat. Vac. Symp.* 8 (1961) 42 - 7 (1960) 101
- 2.66 Schram, A.: *Le Vide* 103 (1963) 55
- 2.67 Lewin, G.: *Fundamentals of vacuum science and technology*. New York: McGraw-Hill 1965
- 2.68 Fischer, E.; Zankel, K.: CERN-ISR-VA 73-52 (1973)
- 2.69 Horikoshi, G.; Satoh, K.; Mizuno, H.: *Proc. 6th Int. Vac. Congr.* (1974) 205
- 2.70 Diels, K.; Jaeckel, R.: *Leybold Vakuum-Taschenbuch*, 2. Aufl. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1962
- 2.71 Jaeckel, R.: *Trans. Nat. Vac. Symp.* 8 (1961) 17
- 2.72 Schittko, F.J.: *Vak. Techn.* 12 (1963) 294
- 2.73 Strausser, Y.E.: Review of outgassing results. *Techn. Rep. VR-51*, Varian (1967)
- 2.74 Norton, F.J.: *Trans. Nat. Vac. Symp.* 8 (1961) 8 - *J. Appl. Phys.* 28 (1957) 34
- 2.75 Perkins, W.G.: *J. Vac.-Sci. Technol.* 10 (1973) 543
- 2.76 Henry, R.P.: *Cours de science et de technique du vide*. Soc. Francaise du Vide, Paris 1974
- 2.77 Flecken, F.A.; Nöller, H.G.: *Trans. Nat. Vac. Symp.* 8 (1961) 58
- 2.78 Crank, J.; Park, G.S.: *Diffusion in polymers*. London: Academic Press 1968
- 2.79 Barrer, R.M.: *Diffusion in and through solids*. Cambridge: Univ. Press 1951
- 2.80 Crank, J.: *The mathematics of diffusion*. Oxford: Univ. Press 1956
- 2.81 Lewin, G.: *J. Vac. Sci. Technol.* 6 (1969) 420
- 2.82 Calder, R.; Lewin, G.: *Brit. J. Appl. Phys.* 18 (1967) 1459
- 2.83 Phillips, J.R.; Dodge, R.F.: *Am. Inst. Chem. Eng.* 14 (1968) 392
- 2.84 Barton, R.S.: *Atomic Energy Res. Establ. AERE Z/M* 210 (1958), M. 599 (1960)
- 2.85 Urey, W.D.: *J. Am. Chem. Soc.* 54 (1932) 3887
- 2.86 Barton, R.S.; Govier, R.P.: *J. Vac. Sci. Technol.* 2 (1965) 113 - *Proc. 4th Int. Vac. Congr.* (1968) 775
- 2.87 Strausser, Y.E.: *Proc. 4th Int. Vac. Congr.* (1968) 469
- 2.88 Messer, G.; Treitz, N.: *Proc. 7th Int. Vac. Congr.* (1977) 223
- 2.89 Holland, L.: *Vacuum deposition of thin films*. London: Chapman & Hall 1974
- 2.90 Farnsworth, H.E.: *J. Appl. Phys.* 29 (1958) 1150
- 2.91 Hagstrum, H.D.; D'Amico, C.: *J. Appl. Phys.* 31 (1960) 715

- 2.92 Benninghoven, A.: Z. Phys. 230 (1970) 403
- 2.93 Benninghoven, A.; Loebach, E.: Rev. Sci. Instrum. 24 (1971) 49
- 2.94 Jones, A.W.; Jones, E.; Williams, E.M.: Vacuum 23 (1973) 227
- 2.95 Hait, P.W.: Tech. Rep. Varian VR 42 (1967) - Vacuum 17 (1967) 547
- 2.96 Kutzner, K.; Wietzke, I.: Vak. Tech. 21 (1972) 267
- 2.97 Singleton, J.H.: Trans. Nat. Vac. Symp. 10 (1963) 267
- 2.98 Power, B.D.: High vacuum pumping equipment. London: Chapman & H \ddot{u} 1966
- 2.99 Moraw, G.R.; Dobrozemsky, R.: Proc. 6th Int. Vac. Congr. (1974) 261
- 2.100 Yoshikawa, H.; Gomay, Y.; Sugiyama, Y.; Mizuno, M.; Komiya, S.; Tazima, T.: Proc. Int. Vac. Congr. 7 (1977) 367
- 2.101 Nuvolone, R.: Proc. 7th Int. Vac. Congr. (1977) 219
- 2.102 Denhoy, B.S.; Batzer, T.H.; Call, W.R.: Proc. Symp. Eng. Problems of Fusion Research 7 (1977) 1045
- 2.103 Steckelmacher, W.; Henning, H.: Vacuum 29 (1979) 31
- 2.104 Steckelmacher, W.: Vacuum 28 (1978) 269
- 2.105 Halama, H.J.; Harrera, J.C.: J. Vac. Sci. Technol. 13 (1976) 463
- 2.106 Davey, G.: Vacuum 26 (1976) 17
- 2.107 Santeler, D.J.: Trans. AVS Vac. Symp. 6 (1959) 129
- 2.108 Nuvolone, R.: Le Vide 33 (1978) 171
- 2.109 Dushman, S.: Gen. Electric Rev. 23 (1920) 493
- 2.110 Akiyama, Y.; Nakayama, K.; Saito, M.: Vacuum 21 (1971) 167
- 2.111 Hobson, J.P.: J. Vac. Sci. Technol. 16 (1979) 84
- 2.112 Haefler, R.A.: Vacuum 30 (1980) 193
-
- 3.1 Lennard-Jones, J.E.: Proc. R. Soc. London A 163 (1937) 127
- 3.2 McCarrol, B.; Ehrlich, G.: J. Chem. Phys. 38 (1963) 523; in: Rutner et al., (eds.), Condensation and evaporation of solids. New York: Gordon and Breach 1964
- 3.3 Hirth, I.P.; Pound, G.M.: Progress in materials science, condensation and evaporation. 11 (1963) Pergamon Press
- 3.4 Rutner, E.: J. Vacuum Sci. Technol. 4 (1967) 368
- 3.5 Klipping, G.; Mascher, W.: Vak. Tech. 11 (1962) 81; Z. Angew. Phys. 16 (1963) 471
- 3.6 Mascher, W.: Diss. TU Berlin 1967
- 3.7 Bächler, W.; Klipping, G.; Mascher, W.: Trans. Nat. Vac. Symp. 9 (1962) 216
- 3.8 Bachner, D.; Koelzer, W.; Müller, D.: Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 1643, 1966. Köln, Oplanden: Westdeutscher Verlag
- 3.9 Chubb, J.N.: 3rd Int. Vac. Congr. (1965) II/1, p. 97
- 3.10 Chubb, J.N.; Pollard, I.E.: Vacuum 15 (1965) 491
- 3.11 Thibault, J.J.; Roussel, J.; Nanoboff, A.: Proc. 1st Int. Cryog. Eng. Congr. (1966) 20

- 3.12 Foner, S.N.; Mauer, F.A.; Bolz, L.H.: J. Chem. Phys. 31 (1959) 546
- 3.13 Göhre, H.: 2. Europ. Symp. Vak. (1963) 112
- 3.14 Holland, L.; Priestland, C.: 3rd Int. Vac. Congr. (1965) II, 141
- 3.15 Baker, M.A.; Holland, L.: J. Vac. Sci. Technol. 6 (1969) 951
- 3.16 Levenson, L.L.: Nuovo Cimento, Suppl. 5 (1967) 321. - J. Vac. Sci. Technol. 8 (1971) 629
- 3.17 Bryson III, C.E.; Cazcarra, V.; Chouarain, M.; Levenson, L.L.: J. Vac. Sci. Technol. 9 (1972) 557
- 3.18 Bryson III, C.E.; Cazcarra, V.; Levenson, L.L.: J. Vac. Sci. Technol. 10 (1973) 310
- 3.19 Bryson III, C.E.; Cazcarra, V.; Levenson, L.L.: J. Vac. Sci. Technol. 11 (1974) 411
- 3.20 Brown, R.F.; Heald, J.R.: Adv. Cryog. Eng. 13 (1968) 243
- 3.20a Brown, R.F.; Caldwell, R.L.; Busby, M.R.: Appl. Phys. Lett. 14 (1969) 219
- 3.20b Arnold, F.; Busby, M.R.; Dawbarn, R.: AEDC-TR-70-172 (1970)
- 3.20c Busby, M.R.; Haygood, J.D.; Link, C.H.: AEDC-Tr-70-131 (1970)
- 3.21 Bentley, P.D.; Hands, B.A.: Proc. Int. Vac. Congr. 7 (1977) 73
- 3.22 Chubb, J.N.; Gowland, L.; Pollard, I.E.: 5th Symp. Fusion Technology, Oxford 1968. Brit. J. Appl. Phys. D 1 (1968) 361
- 3.23 Benvenuti, C.; Calder, R.S.: Phys. Lett. 25 A (1971) 291
- 3.24 Benvenuti, C.: J. Vac. Sci. Technol. 11 (1974) 591
- 3.25 Benvenuti, C.; Calder, R.S.; Passardi, G.: J. Vac. Sci. Technol. 13 (1976) 1172
- 3.26 Lee, T.J.; Gowland, L.; Reddish, V.C.: Nature Phys. Sci. 231 (1971) 193
- 3.27 Lee, T.J.: J. Vac. Sci. Technol. 9 (1972) 257 - Proc. ICEC 3 (1970) 388
- 3.28 Honig, R.E.; Hook, H.O.: RCA Review 21 (1960) 360-368
- 3.29 Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen, 6. Aufl. Band 2, Teil 2a. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1960
- 3.30 Grilly, E.R.: Cryogenics 2 (1962) 226
- 3.31 Borovik, E.S.; Grishin, S.F.; Grishina, E.Ya.: Zhur. Tekhn. Fiz. 30 (1960) 506
- 3.32 Buffham, B.A.; Henault, P.B.; Flinn, R.A.: Vac. Symp. Trans. 9 (1962) 205
- 3.33 Moody, T.L.: AEDC-Tr-66-231 (1967)
- 3.34 Brown, R.F.; Wang, E.S.J.: ARO, July 1964
- 3.35 Hengevoss, J.: Trans. 3rd Int. Vac. Congr. (1965) 51
- 3.36 Wang, E.S.J.; Collins, J.A.; Haygood, J.D.: Adv. Cryog. Eng. 7 (1961) 44
- 3.37 Sängner, G.: DFVLR-Bericht DLRFB 64-17 (1964) 320
- 3.38 Dawson, I.P.; Haygood, I.D.; Collins, I.A. jr.: Adv. Cryog. Eng. 9 (1963) 443
- 3.39 Arnold, F.; Busby, M.R.; Dawbarn, R.: Entropie Nr. 42 (1971) 84
- 3.40 Nocilla, S.: Entropie Nr. 49 (1973) 37

- 3.41 Mayer, H., in: Schneider, H.G.; Ruth, V. (eds.), *Adv. in endotaxy and epitaxy*. Leipzig: 1971, p. 63
- 3.42 Niedermayer, R.: In [3.41], p. 21
- 3.43 Chopra, K.L.: *Thin film phenomena*, New York: McGraw-Hill 1969
- 3.44 Kossel, W.: *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math. phys. Kl.* 135 (1927)
- 3.45 Stranski, I.N.: *Z. Phys. Chem.* 136 (1928) 259
- 3.46 Knacke, O.; Stranski, I.N.: *Erg. exakt. Naturwiss.* 26 (1952) 383
- 3.47 Frenkel, I.: *Z. f. Physik (USSR)* 9 (1945) 392
- 3.48 Eyring, H.; Gladstone, S.; Laidler, K.I.: *The theory of rate processes*. New York: McGraw-Hill 1941, p. 211
- 3.49 Roussel, J.; Thibault, J.J.; Nanoboff, A.: *Le Vide* Nr. 118 (1965) 249
- 3.50 Eder, F.X.: *Vak. Tech.* 21 (1972) 76
- 3.51 Armand, G.: *Surf. Sci.* 9 (1968) 145
- 3.52 Goodman, F.O.: *Progr. Surf. Sci.* 5, Part 3 (1974)
- 3.53 Volmer, M.: *Kinetik der Phasenbildung*. Dresden, Leipzig 1939, S. 80
- 3.54 Frank, F.C.: *Disc. Faraday Soc.* 5 (1948) 48
- 3.55 Burton, W.K.; Cabrera, N.; Frank, F.C.: *Philos. Trans. R. Soc. (London)* A 243 (1951) 299
- 3.56 Heyer, H.: *Angew. Chem.* 78 (1966) 130
- 3.57 Haefer, R.A.: Unveröffentlicht
- 3.58 Yuferov, V.B.; Bulatova, R.F.; Kobzev, P.M.; Kosan, V.S.: *Sov. Phys.-Tech. Phys.* 13 (1968) 238
- 3.59 Stranski, I.N.; Kaischew, R.: *Z. Phys. Chem. B* 26 (1934) 100, 317
- 3.60 Pound, G.M.; Karge, H., in: Niedermayer, R.; Mayer, H. (eds.). *Basic problems in thin film physics*, 1966, p. 19
- 3.61 Hemstreet, R.A.; Hamilton, I.R.: *J. Chem. Phys.* 34 (1961) 948
- 3.62 Dallüge, W.: *Diss. TU Berlin* 1971
- 3.63 Manzhelii, V.G.; Tolkatschow, A.M.; Voitowitsch, E.E.: *Phys. Stat. Sol.* 13 (1966) 351
- 3.64 Landolt-Börnstein: *Zahlenwerte und Funktionen*, 6. Aufl., Band 4, Teil 4. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1967
- 3.65 Gmelin: *Handb. d. Anorg. Chemie*, 8. Aufl., 1970
- 3.66 Caren, R.P.; Gilcrest, A.S.; Zierman, C.A.: *Adv. Cryog. Eng.* 9 (1964) 157
- 3.67 Rotgers, K.W.: *NASA CR-553* (1966)
- 3.68 Schulze, W.; Kolb, D.M.; Klipping, G.: *Proc. ICEC* 5 (1974) 268
- 3.69 Rosenberg, H.M.: *Low temperature solid state physics*, Oxford: Clarendon Press 1963, p. 43ff
- 3.70 White, G.K.; Woods, S.B.: *Phil. Mag.* 3 (1958) 785
- 3.71 Daney, D.E.: *Cryogenics* 11 (1971) 290
- 3.72 Ratcliffe, E.H.: *Phil. Mag.* 7 (1962) 1197
- 3.73 Hill, R.W.; Schneidmesser, B.: *Z. Phys. Chem., NF* 16 (1958) 357
- 3.74 Wilks, I.: *Nuovo Cimento, Suppl. X*, 9 (1958) 84