

〔日〕磁泡材料调查专门委员会 编

磁泡技术手册

李佐宜 刘贤德 姚凯伦 译

李如沆 校

国防工业出版社

磁泡技术手册

〔日〕 磁泡材料调查专门委员会 编

李佐宜 刘贤德 姚凯伦 译

李如沆 校

国防工业出版社

内 容 简 介

磁泡技术是促进计算机发展的一个重要技术领域。《磁泡技术手册》原书是日本电气学会组织的磁泡材料调查专门委员会经三年调查后,于1976年写成的总结。它便于有关人员掌握磁泡技术基础及其发展历史。

全书共分八章。其内容包括:一、磁泡基础;二、磁泡畴的物性;三、磁泡材料的特性;四、磁泡材料的制法;五、材料特性的测定法;六、磁泡回路的制造技术;七、磁泡的应用;八、与磁泡有关的专利资料。书末附有磁泡技术词汇和书中所涉及的人名英汉对照。

本书可供从事计算机、磁学、磁性材料等专业的科技人员和大专院校师生参考。

バブル技術ハンドブック
泡磁区材料調査専門委員会 編
電 気 学 会
1976年

*

磁泡技术手册

〔日〕 磁泡材料调查专门委员会 编
李佐宜 刘贤德 姚凯伦 译
李如沆 校

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张11¹/₄ 284千字

1984年4月第一版 1984年4月第一次印刷 印数: 0,001—4,200册

统一书号: 15034·2609 定价: 1.55元

译 者 的 话

磁泡技术是发展中的一个重要技术领域。磁泡存贮器具有密度高、传输率高的优点，此外，它兼有存贮和逻辑开关功能，具有非易失性。因此，磁泡技术自1967年问世以来，不少国家竞相研究，有的已付诸实用。在我国，有些单位也正在精心研究。为了促进磁泡技术的发展，特将此书译出。

该书是日本电气学会组织的磁泡材料调查专门委员会经三年调查后写成的总结，其内容比较丰富实用。

在翻译过程中，对于原书中的个别错误和叙述不确切之处，译者已作了修正；对原书中由英文译成日文的名词术语中某些相混或不确切之处，也作了更正和补充。但是，对于那些暂时译不准确的，则仍按日文原书译出，以免有误。

本书由华中工学院磁泡科研组的李佐宜、刘贤德、姚凯伦等翻译。由李如沆教授校阅。

由于我们水平有限，翻译中可能会有不妥之处，恳请读者批评指正。

原 序

1967年, 贝尔研究所A. H. 博贝克 (Bobeck) 发表了有关磁泡技术的文章。他认为, 磁泡技术是将来的计算机存贮器的重要方向。于是, 立即引起了全世界的重视。磁泡技术发展的初期, 由于结晶生成困难, 故对磁泡的研究仅仅停留在工作原理或物理兴趣上。此后, 以美国为中心的研究工作, 使得在发现新材料、提高结晶生长技术、改进测量方法等方面均有了较大的进展, 从而使得磁泡技术具备了实用的条件。在这期间, 人们发表了许多文献资料。

从发明磁泡技术到现在, 发表的这些文献资料虽然说明了磁泡技术飞跃发展的情况, 但都是研究者按其个人的立场各自发表的, 人们一直没有全面地统一整理成书面调查报告。

因此, 1972年5月, 在电气学会内设立了磁泡材料调查专门委员会。该会从电工学的应用出发, 以系统研究为目的, 对磁泡技术现状作了详细的分析。

本书是该委员会三年内所作报告的总结, 其内容相当广泛。它包括了从磁泡的特性、材料的制造到具体的应用回路等多方面的内容。本书还整理发表了与此有关的专利项目。

此外, 本书所收集的内容比较新颖。一般来说, 对于国外的研究成果, 都需从各国的期刊杂志上才能读到, 而且从研究发表, 到由期刊杂志出版, 再加上邮寄, 花上一两年时间是不足为奇的。然而, 对磁泡技术来讲, 则有所不同。由于世界各国的新研究成果照例大都登在每年春秋各开一次的“3M”会议(磁学与磁性材料会议)和“INTERMAG”会议(国际应用磁学会议)的会议录上, 而近年来, 本委员会参加这两种会议者又很多, 所以, 几乎在有关文章发表的同时, 我们就能得到各种详细研究内容的原始

资料，并且可以在当月或次月的委员会上讨论。鉴于上述情况，才有可能使磁泡用于大容量存储器，并在进入实用阶段的时候，把有关磁泡技术的新内容及时而广泛地编入手册。

磁泡技术虽然已由研究阶段进入实用化阶段，但许多新的现象仍在不断发现，例如阻碍磁泡高速运行的畴壁动态转换问题和非晶材料、高 g 因子材料等。此外，在应用方面，有关泡点阵等令人感兴趣的论文也相继发表。由于时间和篇幅的限制，这些新成果，没有能够全部收进本书，只好待以后再考虑。

由于磁泡技术是一个新领域，故用了很多新术语、新符号。为了避免在读者中造成混乱，本书力求统一这些术语和符号。至于容易混淆的术语，则仍用英文原文，而不译成日语。

实际上，对于术语和符号，必须经过各方面充分调查研究之后才能商定，这有待于将来尽早在学会的委员会上讨论后确定。

本《手册》的执笔者（按五十音图顺序）有：石原英雄、大照完、川西健次、小林寛、小西進、斎藤実、桜井良文、对馬立郎、富永滋、中島友円、古尾谷崇、三上五男、若生敏夫、渡辺昭治。

目 录

第一章 磁泡基础	1
1.1 什么叫磁泡	1
1.2 磁各向异性	3
1.3 亚铁磁性与补偿温度	4
1.4 稀土类铁石榴石的特征及磁性	8
1.5 磁泡材料的霍尔效应和光克尔效应	12
1.5.1 反常霍尔效应	12
1.5.2 光克尔效应	14
1.5.3 实验结果	15
1.5.4 考察	18
1.5.5 小结	19
1.6 磁泡材料的磁光性质	20
1.6.1 引言	20
1.6.2 采用磁光手段对磁泡元件材料特性的评价法	21
1.6.3 磁泡材料的吸收光谱	22
1.6.4 磁泡材料的磁光旋转谱	24
1.6.5 小结	28
参考文献	29
第二章 磁泡畴的物性	30
2.1 磁泡畴静力学	30
2.1.1 静力学概论	30
2.1.2 垂直磁化膜和磁泡畴	31
2.1.3 磁泡畴的数学表示	33
2.1.4 磁泡的磁能及其变化	34
2.1.5 磁泡稳定条件	38
2.1.6 磁泡的驱动力	43
2.1.7 硬泡	45
2.1.8 半泡和它的稳定性	50
2.2 磁泡畴动力学	52
2.2.1 畴壁平面的移动速度	52
2.2.2 磁泡畴动力学	67

参考文献	80
第三章 磁泡材料的特性	81
3.1 磁泡材料的发展史	81
3.2 材料特性要求	83
3.2.1 必要条件	83
3.2.2 希望条件	87
3.2.3 各条件的要点	89
3.3 正铁氧体及磁铅石	90
3.3.1 物性简述	90
3.3.2 磁泡	92
3.3.3 特征	96
3.4 石榴石	98
3.4.1 物性简述	98
3.4.2 块状单晶	100
3.4.3 外延膜	108
3.4.4 硬泡的抑制	123
3.5 非晶材料	124
3.5.1 物性简述	124
3.5.2 特性	126
参考文献	128
第四章 磁泡材料的制法	132
4.1 正铁氧体单晶的制法	132
4.1.1 助熔剂法	132
4.1.2 浮区熔法	135
4.1.3 其它的制法	136
4.2 石榴石单晶的制法	138
4.2.1 助熔剂法	138
4.2.2 液相外延生长法 (LPE法)	139
4.2.3 气相外延生长法 (CVD法)	155
4.3 特性的控制	162
4.3.1 硬泡抑制法	162
4.3.2 磁泡特性的精密控制	167
4.4 基片单晶的制法	169
4.4.1 基片的必要条件	169
4.4.2 基片单晶的生长法	170
4.4.3 基片单晶的质量	172
4.5 单晶的加工技术	175

4.6 非晶磁泡材料的制造方法	177
参考文献	180
第五章 材料特性的测定法	183
5.1 晶格常数的测定法	184
5.2 膜厚的测定法	185
5.3 磁化强度和特征长度的测定法	186
5.4 单轴各向异性常数 K_u 的测定法	188
5.5 畴壁矫顽力 H_c 的测定法	190
5.6 畴壁迁移率的测定法	192
5.7 磁泡材料缺陷分布的测量	198
5.7.1 对缺陷的规格要求	198
5.7.2 缺陷分布图的测定法	198
5.8 结晶特性的测定	208
参考文献	210
第六章 磁泡回路的制造技术	211
6.1 引言	211
6.2 磁泡器件的制造工艺	211
6.3 各工序的说明	215
6.3.1 光致抗蚀剂与光刻工艺	215
6.3.2 电子束曝光	223
6.4 磁泡制造中所用的其它曝光技术	224
6.4.1 X射线蚀刻	225
6.4.2 电子投影装置(ELIPS)	227
6.5 小结	229
参考文献	229
第七章 磁泡的应用	230
7.1 磁泡回路	230
7.1.1 磁泡的传输	230
7.1.2 磁泡的发生和消灭	240
7.1.3 开关回路和门回路	243
7.1.4 逻辑回路	245
7.1.5 磁泡检测回路	250
7.1.6 其它回路	254
7.2 磁泡的应用	255

7.2.1	磁泡应用回路的基础	255
7.2.2	大容量存贮器	255
7.2.3	单触拨号盘存贮器的应用	259
7.2.4	泡点阵外存贮器	262
7.2.5	由磁泡构成的全磁计算机	263
7.2.6	显示器	265
7.2.7	在信息处理方面的应用	266
7.2.8	其它方面的应用	269
参考文献		271
第八章 与磁泡有关的专利资料		273
附录		341
附录一 磁泡技术词汇		341
附录二 人名英汉对照		349

第一章 磁泡基础

1.1 什么叫磁泡

一九六七年，美国贝尔研究所博贝克 (Boeck) 发明了磁泡⁽¹⁾。由于磁泡很可能用作新型电子计算机的高性能存贮器，所以世界上对磁泡的研究进展很快。

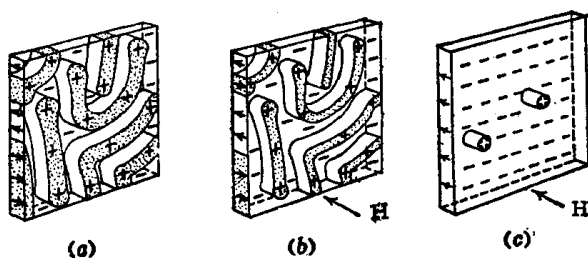


图1-1 磁泡形成过程

(a) 不加外磁场时；(b) 外加磁场弱时；(c) 外加磁场强时。

有一种磁性体，当没有外磁场作用时，正向磁化的磁畴同反向磁化的磁畴面积相等，并呈交替条纹花样，如图1-1(a)所示。对这样的状态，加反向偏置磁场时，正向磁畴面积减小，反向磁畴面积增大，起初成为图1-1(b)所示的状态，最后，正向磁畴的磁表面能变为极小，于是成为图1-1(c)所示的小圆柱形畴。

这种圆柱形畴称为磁泡。由于可控制它产生、消灭，还可使其移动，因此，可以用它作一个记忆单位；由于利用磁泡间的磁相互作用，还可以进行逻辑运算，所以，磁泡可以用作计算机的元件。

当在图 1-2 所示的平面内存在偏置磁场梯度时，磁泡能容易地朝梯度方向移动。因此，目前已普遍采用这样的偏置磁场梯度来驱动磁泡。现在再稍微严密地解说一下磁泡状态。在这种状态下，垂直磁性体表层膜面存在易磁化轴，这也是产生磁泡的必要

条件。进一步从原子的尺度来说, 磁交换能总是同磁晶各向异性能恰好保持平衡的。磁交换能同磁性体中相邻磁性原子间磁矩的排列有关, 而磁晶各向异性能, 则与磁交换能排列状态以及磁介质(包括晶体和非晶体两种情况)的取向间的相互作用有关, 磁晶各向异性能是决定易磁化方向的数量。这两项能量是决定畴壁能大小的最主要因素。

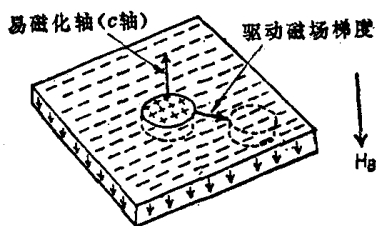


图1-2 磁泡朝磁场梯度方向移动

磁性体最大特征之一是, 它的饱和磁化强度 M 随温度而变化。图1-3所示为饱和磁化强度 M 随温度变化的曲线。图中, 横坐标是规格化温度 T/T_c ; T_c 是居里温度。由图可知, 在 $T/T_c = 1$ 附近, 磁化强度 M 急剧减小。比较图中所示的三种磁性体的温度曲线可见, 它们的中间部分各不相同, 但在 T 接近 T_c 时, 它们的 M 都同样地急剧减小。产生这样的磁化强度 M 的磁能, 是交换能, 其大小约等于 kT_c 。若以 E_{ex} 表示交换能, 则当磁性体为各原子磁矩作平行排列取向的铁磁性时, 其能量为 $-E_{ex}$; 当为反平行排列取向的反铁磁性时, 其能量为 $+E_{ex}$ 。

所谓亚铁磁性是指其反铁磁性在相邻部分没有完全抵销, 正向或反向成分要强一些。这时, 正向成分与反向成分的温度变化关系不一定相同, 两者之差引起的磁化强度有时由正向负变化。如

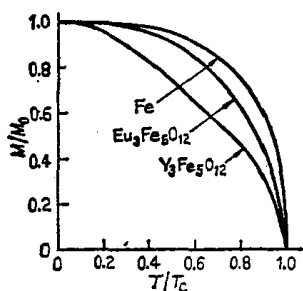


图1-3 各种磁性体磁化强度与温度的变化关系

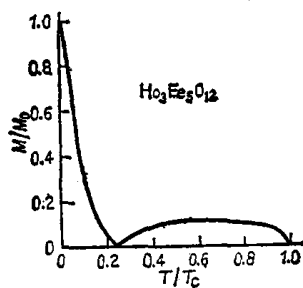


图1-4 出现补偿温度的情况

图 1-4 所示。对亚铁磁体来说，在温度 T_c 前，其磁化强度一度变
为零的温度称为补偿温度。多数磁泡材料属于稀土铁石榴石系，它
们都具有上述那样的补偿温度。这里讲了磁交换作用，下面再讲
磁各向异性。

1.2 磁各向异性

这里仅考虑单轴（即只有一个易磁化轴）各向异性磁泡材料。
因为通常沿该易轴方向磁化，所以磁化强度 M 应该有一项依赖于
晶体方向的磁化能量。我们称这种磁化能量为磁各向异性能，或
磁晶各向异性能。前面曾以 kT_c 代表交换能的大小，现在也可以
简单地决定各向异性能的大小。如图 1-5(a) 所示。因为在 $B_{\perp} =$
 B_K 点，磁化强度 $M_{\perp}$ 达到饱和，所以可用 B_K 反映各向异性能的
特性。图中作出了 C_0 的磁化曲线。一般磁化曲线的起始阶段为直
线。当磁化到 $B_{\perp} = B_K$ 的磁场处时，所需要的能量可用 $\frac{M}{2} B_K$
表示。若用最一般的方法表示，则可以得出：为使磁化绕易磁化
方向旋转 ψ 角度，需要的磁场为 $B_{\perp} = B_K \sin \psi$ ，从而各向异性能
为 $\frac{M_{\perp}}{2} B_{\perp} = \frac{1}{2} (M B_K \sin^2 \psi)$ 。其中， B_K 称为各向异性场。由此
而得到各向异性能密度为 $K_u = M B_K / 2$ 。在图 1-5(b) 中，对于
磁化强度 M 垂直于和平行于板平面的两种情况，各自用等效电流
表示。垂直的情况，同用 $I_1 = Mh$ 表示的两块电流板等效；平行
的情况，同具有电流 $I_z = (M/\text{单位长度})$ 的两块电流板等效。由
此可得，图 1-5(a) 中的磁能为 $E_{\uparrow} \approx -\frac{1}{2} M^2 h^2 \mu_0 l_z / \pi$ ，而图
1-5(b) 中的磁能为 $E_{\rightarrow} = -\frac{1}{2} M^2 l_z^2 \mu_0 h l_1 / l_2$ 。所以，垂直磁
化时的磁能密度为 $-\frac{1}{2} \pi \mu_0 M^2 (h/l_1)$ ，平行时磁能密度为 $-\frac{1}{2}$
 $\times \mu_0 M^2$ 。由此可得，垂直磁化的必要条件为：

$$K_u > \frac{1}{2} \mu_0 M^2$$

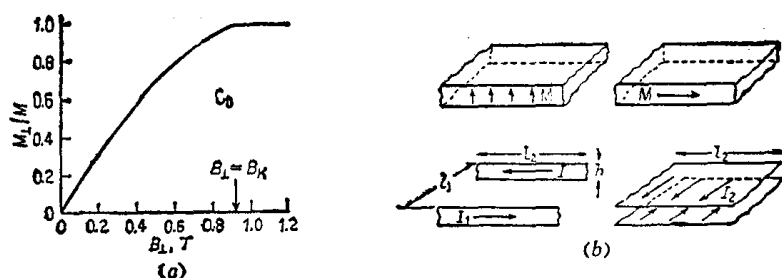
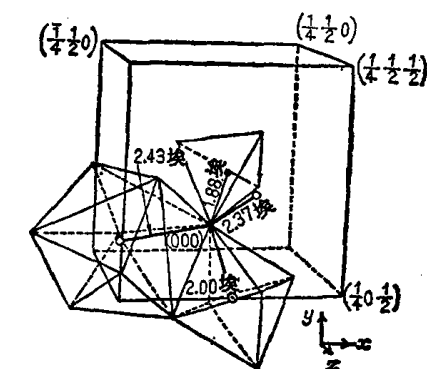


图1-5 磁各向异性及其等效电流表示
(a) 磁化曲线 (C_0)；(b) 等效电流表示法。

1.3 亚铁磁性与补偿温度

1.1节已大略提到，亚铁磁性的一个特征是具有补偿温度。在弄清产生补偿温度的原因之前，先对亚铁磁性的典型磁性体（稀土类铁石榴石和六角晶系铁氧体）的晶体结构加以说明。

图 1-6 为钇铁石榴石中氧离子周围金属离子的分布情况。



⊙, $\text{Fe}^{3+}(a)$ 在 $(00\frac{1}{2})$

○, $\text{Fe}^{3+}(d)$ 在 $(0\frac{1}{4}\frac{3}{8})$

○, Y^{3+} 在 $(\frac{1}{4}\frac{1}{8}\frac{1}{2})$ 及在 $(0\frac{1}{4}\frac{5}{8})$

O^{2-} 一般围成多面体，在 $(y, z, \frac{1}{2} + x)$

图1-6 石榴石型晶体结构

图1-7(a)表示钇离子周围氧离子形成的多面体，图1-7(b)表示 Fe^{3+} 周围氧离子形成的四面体，图 1-7(c)表示 Fe^{3+} 周围氧离子

形成的八面体。稀土-铁石榴石结构中，稀土类占据 Y 的位置，铁离子占两种位置，即有三种次晶格，按 $\{R_3^{3+}\}[(Fe_2^{3+})(Fe_3^{3+})O_{12}]$ 配置。其中， $[(Fe_2^{3+})]$ 与 (Fe_3^{3+}) 反平行，磁矩差为 $(3 \times 5) - (2 \times 5) = 5(\mu_B)$ 。此与 $\{R_3^{3+}\}$ 的磁矩 $3 \times m_R \mu_B$ 反平行结合，组成亚铁磁性的磁性体（表1-1）。

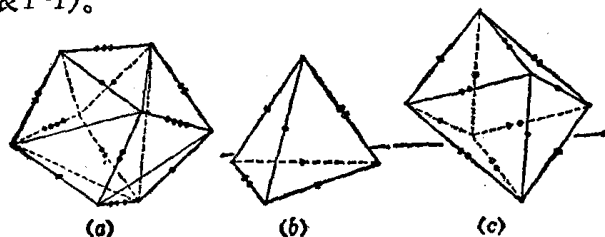


图1-7 石榴石型晶体中三种由氧离子组成的多面体

图1-8为钡铁氧体 $BaFe_{12}O_{19}$ 的原胞。图1-9表示钙钛石型晶体结构。在此系中，由于自旋反铁磁性排列有些倾斜，因而导致自发磁化的所谓弱铁磁性。同亚铁磁性相比，此居多数。图1-10示出了钆正铁氧体 $GdFeO_3$ 的晶体结构。这是立方晶系的钙钛石结构，但略有畸变，成正斜方形结构。

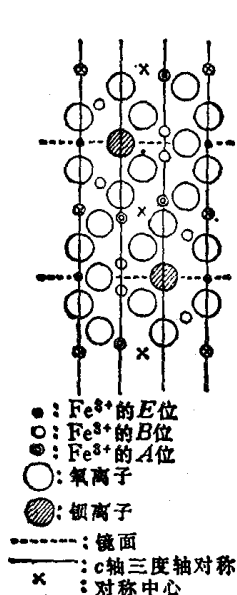


图1-8 六角晶系铁氧体的晶体结构

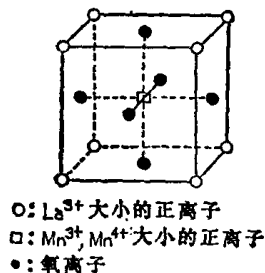


图1-9 钙钛石型的晶体结构

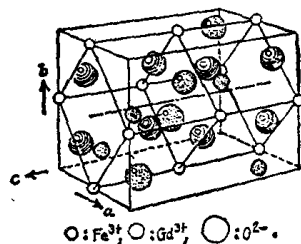


图1-10 $GdFeO_3$ 的晶体结构
(形变的钙钛石型)

表1-1 具有亚铁磁性的磁性体

晶 体	$\mu_0 M$ (特斯拉)	K_u (焦尔/米 ³)	Q	T_c (K)	λ (测量) (微米)	λ (方程3-11) (微米)	备 注
$BaFe_{12}O_{19}$	0.400	3.3×10^5	5.2	720	2.12×10^{-2}	4.5×10^{-2}	斯坦德勒 (Standley), (1962) 科伊 (Kooy), 恩兹 (Enz), (1960)
$YFeO_3$	0.011	4.3×10^4	910	730	18.0	22.0	罗索尔 (Rossol), (1969) 格诺拉 (Gianola) 等人, (1969)
$Eu_{0.6}Y_{2.4}Ga_{1.1}Fe_{3.9}O_{12}$	0.021	$\sim 10^3$	~ 6	400	~ 0.4	~ 0.7	吉斯 (Giess) 等人, (1971a)
$Eu_2YFe_8O_{12}$	0.149	3×10^4	3.4	550	6.9×10^{-2}	8.5×10^{-2}	普拉斯克特 (Plaskett) 等人 (1972)

所以，亚铁磁性是由于次晶格上正负磁矩之差而产生的。自从奈尔 (L. Neel) 1948年最初提出这一理论以来，实验证明，这是十分正确的。图1-11表示了各种磁次晶格磁化随温度变化的特性曲线。图中，N型及V型具有补偿温度。在补偿温度处，净磁化强度由正变为负。通常测量磁化强度要加外场，净磁化强度的方向常同外磁场方向平行。图中，虚线表示没有外磁场时净磁化强度的方向。由图可见，V型曲线即使在绝对零度时，磁化曲线的梯度也不为零。这就表示：由于磁化强度不会随温度而饱和，故热力学不允许的温度变化实际上是不存在的。R型曲线也是如此。图1-12(a)为P型曲线中两次晶格各自随温度变化的情况。图1-12(b)为具有补偿温度的N型曲线的两次晶格随温度变化的关系。

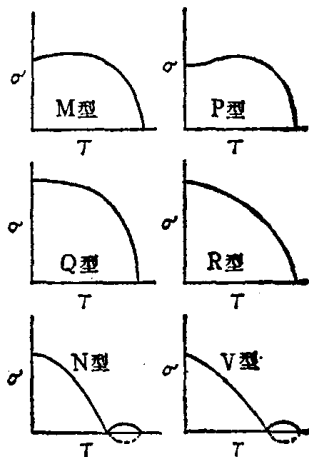


图1-11 亚铁磁性体的种类

图1-12(a)为P型曲线中两次晶格各自随温度变化的情况。图1-12(b)为具有补偿温度的N型曲线的两次晶格随温度变化的关系。

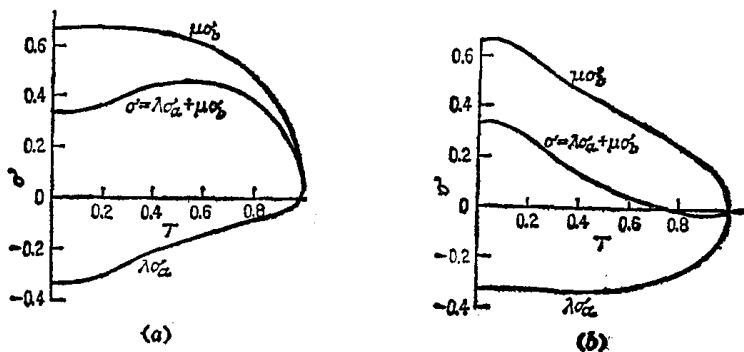


图1-12 次晶格的温度变化情况及其合成结果

(a) P型曲线；(b) N形曲线。

图1-13(a)为P型曲线，它是 NiCr_2O_4 的实验曲线〔由姆古利 (T. R. McGuire) 测量〕。图1-13(b)表示N型曲线，是戈特 (E. W. Gortor) 等对 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{1.25}\text{Cr}_{1.25}\text{O}_4$ 的实验结果。最