

高等学校教材

微波固态振荡原理

潘儒沧 刁育才 编著

北京理工大学出版社

微波固态振荡原理

潘儒沧 刁育才 编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书系按原电子工业部的工科电子类专业教材1986—1990年编审出版规划，由工科电子类教材编审委员会《微波技术》编审小组征稿，审定。推荐作为本科生选修教材出版。

本书比较全面、系统地论述了微波固态振荡器的基本理论和工程设计中的有关问题，如振荡器频率的电调谐、振荡器的噪声和频率稳定度，以及功率合成技术等。

本书理论分析深入浅出、典型电路结合实际、文字叙述通俗易懂。适用于通信与电子系统、电磁场与微波技术、雷达、导航、电子对抗等专业本科生作为选修课教材（30学时），亦可供有关专业的工程技术人员参考。

微波固态振荡原理

潘儒沧 刁育才 编著

*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

三河县潮河印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 6.75 印张 151 千字

1990年12月第一版 1990年12月第一次印刷

ISBN 7-81013-382-9/TN·23

印数：1—2000册 定价：1.55元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极

提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本书系按原电子工业部的工科电子类专业教材1986—1990年编审出版规划，由工科电子类教材编审委员会《微波技术》编审小组征稿、审定、推荐作为本科生选修教材出版。编审者均依据《微波技术》编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅。责任编委是北京理工大学张德齐教授、主审为东南大学苗敬峰副教授。

微波固态源是各种微波装置的重要部件之一。近30年来，随着无线电技术的飞速发展，微波固态源已获得了长足的进展。振荡频率已从厘米波跨进了毫米波段；单管的连续波功率（ K_u 波段的FET管、 K_a 波段的IMPATT管）已达到瓦级。在中、小功率应用方面，已经取代了微波电真空器件振荡源。因此，在通信、雷达、空间技术和电子对抗等方面得到了广泛的应用。

本书共分四章，第一章阐述了转移电子器件、雪崩二极管及微波晶体管的基本工作原理，微波负阻振荡器的一般理论、实际电路及分析方法。第二章讲述了如何实现振荡器频率的电调谐，包括变容二极管调谐和YIG调谐；介绍了几种实际电路。第三章讨论了振荡器的噪声和频率稳定度；介绍了几种提高频稳度的方法。第四章的内容是功率合成。为了解决单管微波固态源输出功率较小的问题，近十几年来发展了功率合成技术，其内容相当广泛，但至今尚未在教材中有所反映。本章着重介绍了电路级功率合成器。

在编写本书的过程中，编者力求做到理论分析深入浅出、典型电路结合实际、文字叙述通俗易懂。本书的第一、二、三章由潘儒沧编写，第四章由刁育才编写。北京理工大学张德齐教授对本书的编写工作十分关心，给编者以莫大的鼓舞和支持。东南大学苗敬峰副教授认真细致地审阅了初稿，提出了许多宝贵的意见，使得本书更加趋于完美。在编写过程中还得到北京理工大学电子工程系微波教研室主任邓次平教授和教研室同事们的关心和支持。在此致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，加之时间匆促，书中难免存在不少缺点和错误，殷切希望读者给予批评指正。

编者

1990.2

目 录

第一章 微波负阻振荡器的一般理论

§ 1.1	引言	1
§ 1.2	转移电子器件	2
§ 1.3	雪崩渡越时间二极管	11
§ 1.4	微波晶体管	17
§ 1.5	负阻振荡器的一般理论	31

第二章 负阻振荡器频率的电调谐

§ 2.1	引言	44
§ 2.2	变容二极管调谐振荡器	49
§ 2.3	YIG 调谐电路	61

第三章 负阻振荡器的频率稳定

§ 3.1	引言	79
§ 3.2	频率稳定度的一般分析	79
§ 3.3	负阻振荡器的噪声	87
§ 3.4	外腔稳频法	102
§ 3.5	注入锁定法	134
§ 3.6	锁相环路法	139

第四章 功率合成

§ 4.1	引言	160
§ 4.2	芯片级合成器	166
§ 4.3	电路级合成器	169

§ 4.4	空间合成器	200
§ 4.5	多级合成器	203
§ 4.6	结束语	205
主要参考资料		207

第一章 微波负阻振荡器的一般理论

§ 1.1 引言

随着无线电技术的迅速发展，以及它在通信、雷达、电子对抗等方面的广泛应用，使用的频率逐渐从高频向超高频、特高频方向发展。目前微波段频率已获得普遍应用。微波振荡源是各种微波设备的重要部件之一。在60年代以前，微波振荡源几乎都是采用微波电真空器件。目前以及可以预见的将来在高频大功率发射器件方面，它虽仍将占有统治地位，但在中小功率方面，有逐步为微波固态器件所替代的趋势。

近20多年来微波半导体器件无论在器件原理、制造工艺以及电路设计等方面都取得了很大进展，使半导体器件向微波大功率方向迈进了一大步，从而为微波设备小型化奠定了基础。目前微波固态源的连续波输出功率已达到几瓦，脉冲输出功率已达到几千瓦的水平。其振荡频率也已达到毫米波甚至亚毫米波波段。并已实际应用于雷达、通信和空间技术等设备中，解决了相控阵雷达以及各种中小功率微波发射机功率源的固体化问题。

微波固态振荡源基本上可以分为两类：第一类是由从低频逐步发展起来的微波双极晶体管和微波场效应晶体管这样一些双端口器件构成的微波振荡器。第二类是一些新工作机理的半导体器件所构成的振荡器，如转移电子振荡器和雪崩

渡越时间二极管振荡器等。与上一类不同的是，这些器件均属于单端口器件。

微波固态器件尽管具有不同形式和特点，但它们产生振荡的机理都可归结为具有负阻特性；而且它们的负阻都是振幅的函数，也就是说，具有非线性的负阻特性。微波固态振荡器就是由具有这样负阻特性的微波固态器件和适当的外电路与之配合所组成的。它通过电路与固态器件之间的相互作用，把直流电源的功率转换成微波功率。对于诸如转移电子器件和雪崩渡越时间二极管这类单端口器件来说，通常只要适当地给它加以直流偏压，就可以在器件端口上产生负阻。这一类器件可以称为固有负阻器件。而对于象场效应晶体管这样一些双端口器件，则需将器件的输入端和输出端通过适当的耦合（正反馈），才能使器件产生等效负阻。由这些器件构成的振荡器也可以称为负阻振荡器。

许多振荡器尽管它们各不相同，但都有一些共同的特点，通过这些特点可以引出振荡器的一般理论，本章将阐明微波负阻振荡器的一般理论；为了便于衔接，开头将对常用的微波固态器件的基本工作原理作一简要介绍。

§ 1.2 转移电子器件

转移电子器件（TED）是一种无结器件，它是由一段两端为欧姆接触的均匀掺杂的N型砷化镓（GaAs）半导体构成的，如图1-2-1所示。砷化镓是一种多能谷半导体。它的工作机理是依靠电子从低能谷向高能谷转移所产生的负微分迁移率来实现微波振荡的，因而称为转移电子器件（或耿氏管）。

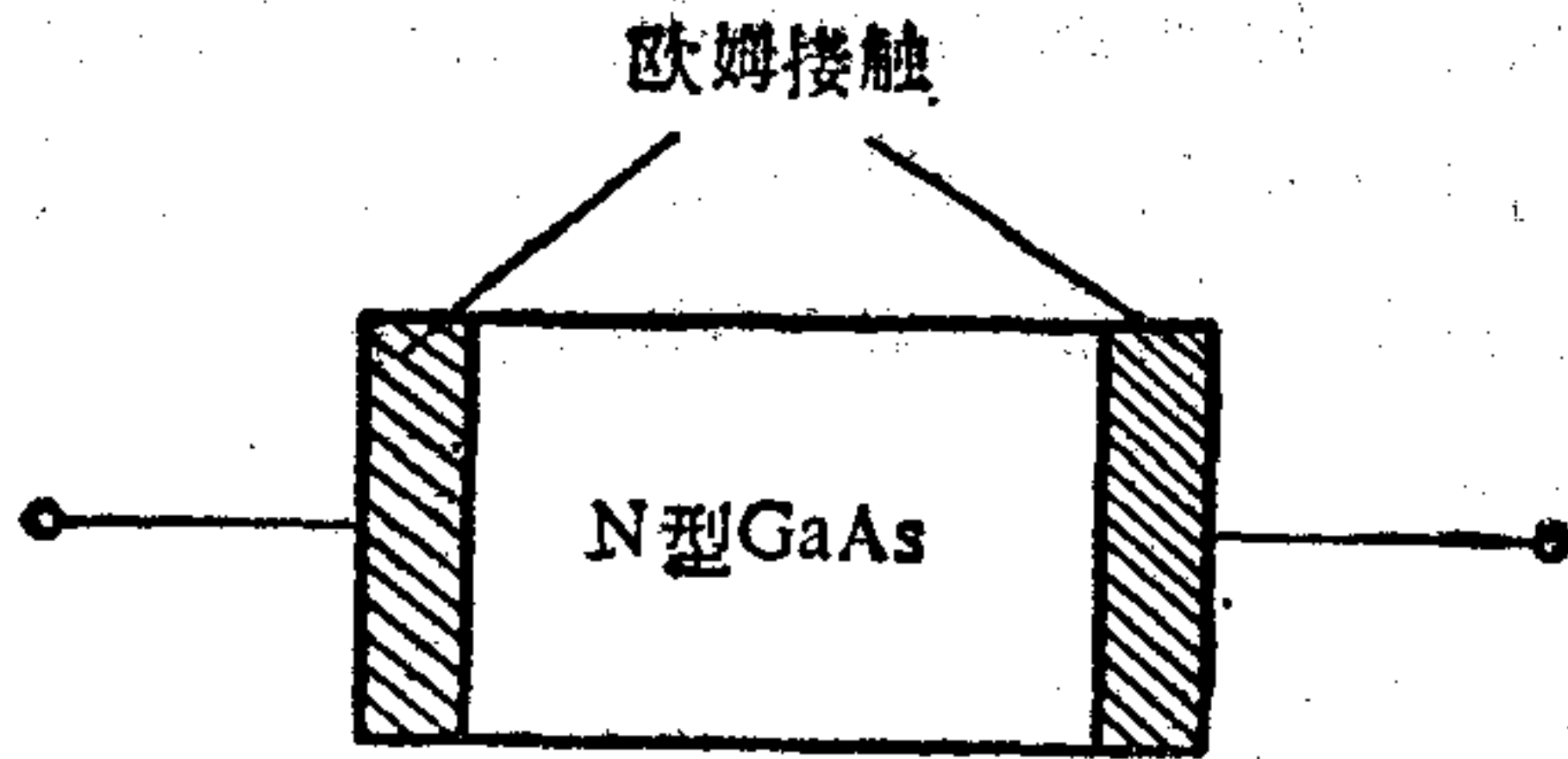


图 1-2-1 N型砷化镓转移电子器件示意图

一、N型砷化镓的能带结构和速度-电场特性

N型砷化镓的能带具有多能谷结构。在它的导带中，除有极小值的中心能谷外，其周围还对称地分布着六个子能谷。但其中具有重要意义的是位于中心位置具有最低能量的主谷和邻近的一个子谷。它们之间的能量关系及迁移率如图1-2-2所示。

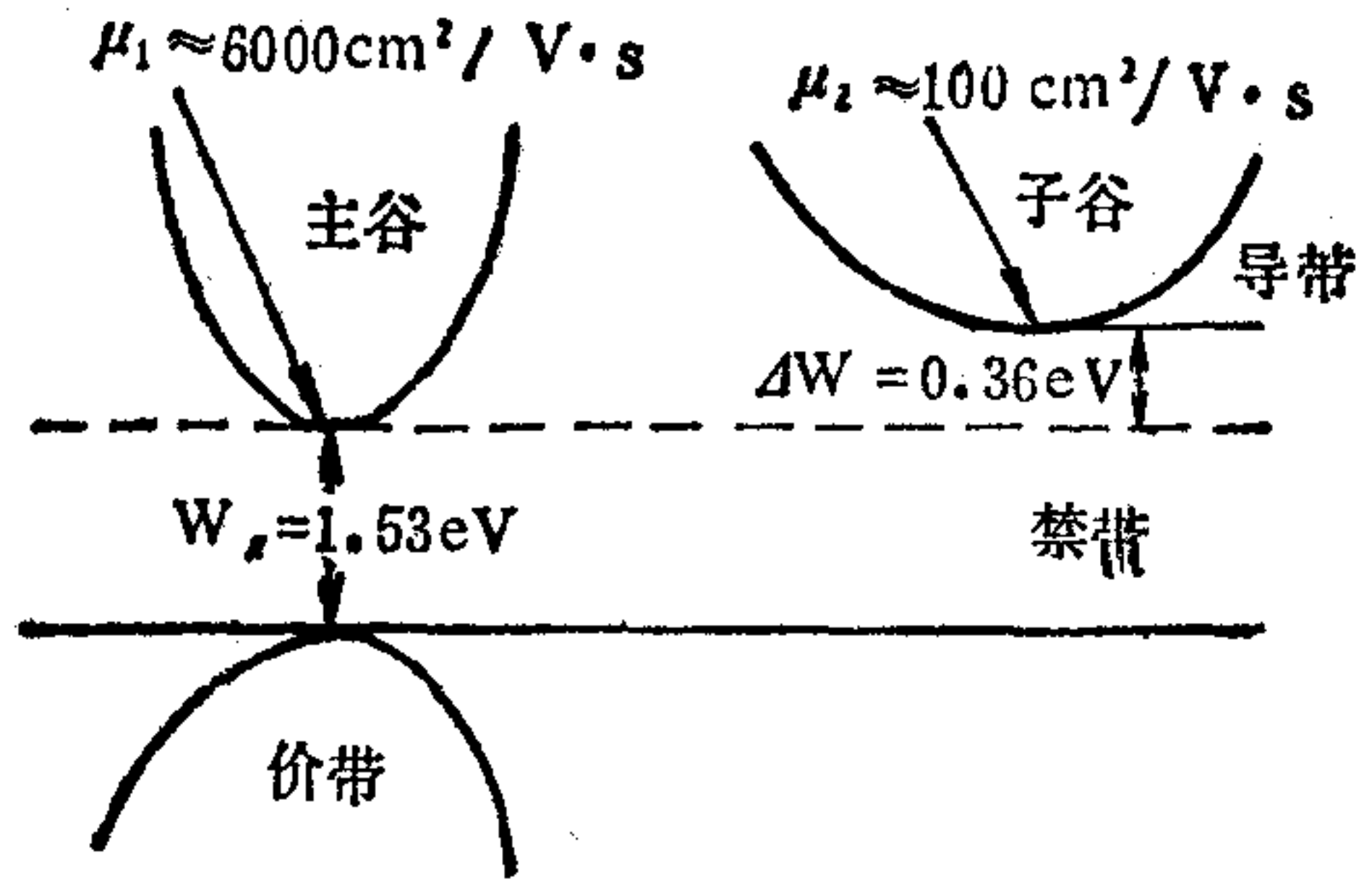


图 1-2-2 N型砷化镓的能带结构图

在室温和没有外加电场的情况下，电子的平均热动能为 $kT_0 \approx 0.025\text{eV}$ ，它远小于两个能谷之间的差值 0.36eV ，不足以使主谷的电子跃迁到能态较高的子谷，因此导带中的电

子几乎全部处于低能态的主谷中，可以认为子谷没有电子。

设样品内总的电子密度为 $n_0 = n_1 + n_2$ ，其中 n_1 、 n_2 分别为主谷和子谷的电子密度。在室温条件下，加电压后，电子平均漂移速度为

$$\bar{v} = \frac{n_1 \mu_1 + n_2 \mu_2}{n_0} E = \bar{\mu} E \quad (1-2-1)$$

式中 $\bar{\mu}$ 为电子平均迁移率。当电压小时，样品内电场未超过阈值（即 $E < E_{th}$ ），主谷中电子从电场获得的能量尚不足使它发生跃迁（即 $n_1 = n_0$ ， $n_2 = 0$ ），因此

$$v = \mu_1 E \quad (0 < E < E_{th}) \quad (1-2-2)$$

即电子漂移速度随电场成线性增加。

电压增加后，当 $E > E_{th}$ 时，部分电子能量超过 0.36eV ，电子开始从主谷跃迁到子谷。这时电子平均漂移速度由式

(1-2-1) 决定。随着电场的不断增加， n_2/n_1 随之增加。由于子谷的电子迁移率 μ_2 比主谷的 μ_1 小得多，使平均迁移率 $\bar{\mu}$ 下降，因此总的电子平均漂移速度 \bar{v} 将随着电场的增加反而减小。图 1-2-3 给出砷化镓晶体的速度-电场特性。可见，在 $E_{th} < E < E_b$ 的范围内， $\bar{v} - E$ 特性曲线呈现一个下降段。对应于这个下降段有

$$\mu_D = \frac{d\bar{v}}{dE} < 0 \quad (E_{th} < E < E_b) \quad (1-2-3)$$

μ_D 叫做微分迁移率。可见，在 $E_{th} < E < E_b$ 范围内，砷化镓晶体的微分迁移率为负值。

在导体或半导体中的电流密度为

$$j = \delta E \quad (1-2-4)$$

式中，电导率 δ 可以表示为

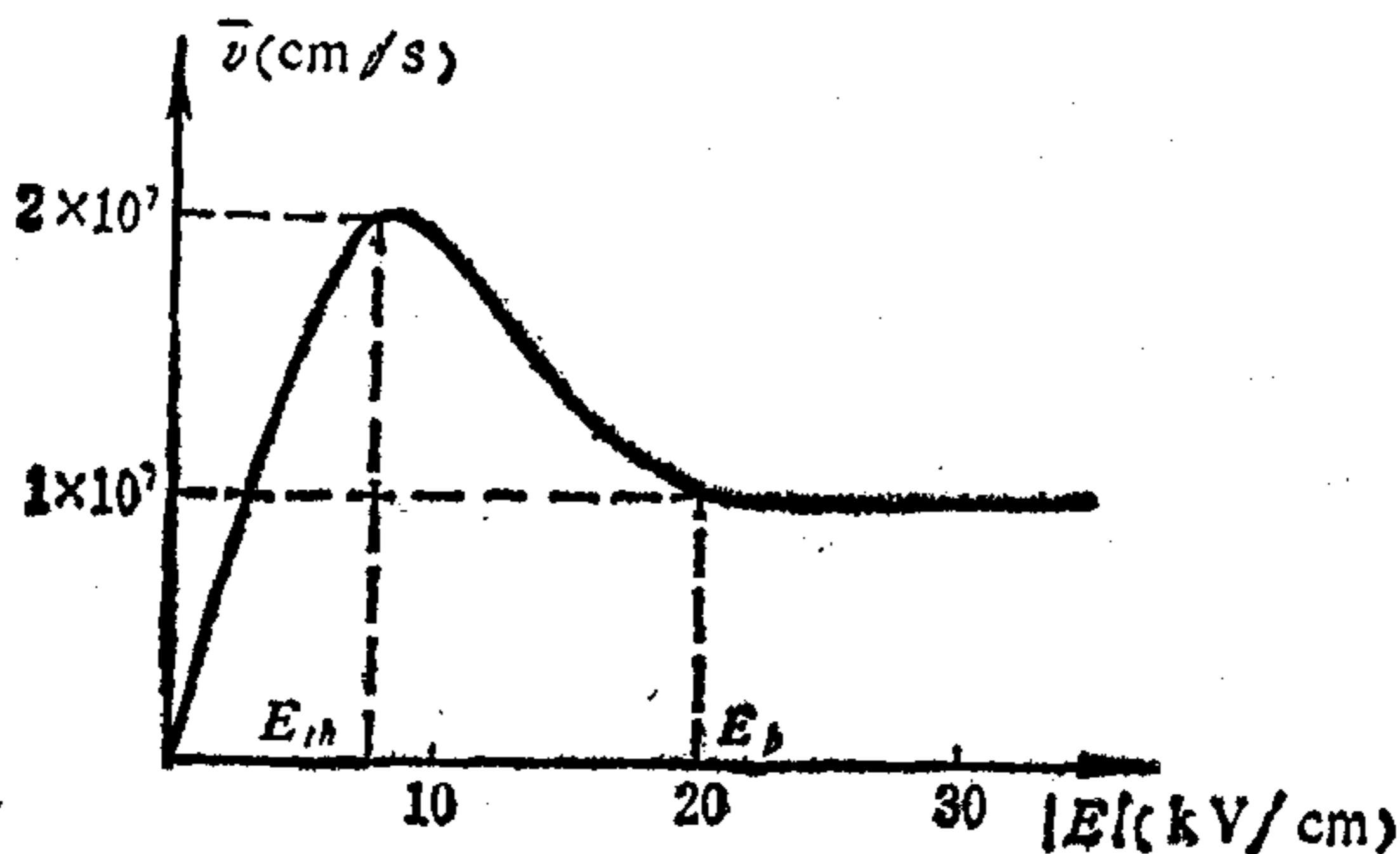


图 1-2-3 砷化镓晶体中电子的速度-电场特性

$$\delta = n_0 e \mu_D \quad (1-2-5)$$

由此可知，与负微分迁移率相对应，砷化镓在一定电场范围内具有负的微分电导率。这是砷化镓样品产生负阻的基本机理。

当 $E > E_b$ 时，所有电子获得足够能量，都已从主谷转移到子谷。这时 $n_1 = 0$ 、 $n_2 = n_0$ ，因此 $\bar{\mu} = \mu_2$ ，电子漂移速度将由 μ_2 决定（即 $v = \mu_2 E$ ）。但是，当电场强度超过 10^4V/cm 时，电子漂移速度趋近于饱和值 10^7cm/s ，因此曲线是平坦的，如图1-2-3所示。

除砷化镓材料外，具有这种转移电子效应的还有其它几种 III-V 族和 II-VI 族化合物，如磷化铟（InP）、碲化镉（CdTe）、硒化锌（ZnSe）等。目前应用最广的材料还是砷化镓。

二、振荡原理

下面将讨论在转移电子器件内，负微分迁移率如何导致微波振荡。

1. 偶极畴

对砷化镓样品外加一电压，当它增大到 $u > u_{th}$ (即 $E > E_{th}$) 时，由于阴极和砷化镓晶体接触的界面上不可避免地存在一个从重掺杂到轻掺杂，从低场区过渡到高场区的不连续性，因此阴极附近 x_1 处的电场将首先超过阈值 (图1-2-4 (a))。根据上述 $\bar{v} - E$ 特性，这里的电子漂移速度将低于它的左右两侧的电子漂移速度，结果在 x_1 的左边出现电子的积累，而右边出现电子被“抽空”的正离子区，因此在 x_1 处形成正、负电荷积累的偶极层，称为偶极畴。由于畴内正、负电荷所产生的电场方向和外电场方向相同，使畴内总电场升高。在外加电压一定时，畴外电场必然相应降低，使畴内电场比畴外电场高，因此偶极畴又称高场畴。畴内电场的升高使畴内电子漂移速度进一步减慢，从而加剧其正、负电荷的积累——即畴的进一步生长；畴的生长又促使畴内电场升高，畴外电场下降，这是一个互为因果迅速发展过程。但是这个过程不会无限地发展下去，因为样品的 $\bar{v} - E$ 特性是非线性的。当电场变化使畴内、外电子漂移速度相等时，畴不再成长，而形成稳定的偶极畴。与此同时，在电场的作用下畴逐步向阳极漂移。因此偶极畴就是这样边运动边成长，直至成熟。然后，成熟的稳态畴以一定速度向阳极渡越，如图1-2-4 (b)、(c) 所示。当畴到达阳极时将被吸收而消失 (图1-2-4(d))。这时电场恢复到初始状态，阴极附近又产生新的偶极畴；上述过程周而复始不断重复。具有这种稳态畴在样品内运动的振荡模式，统称为偶极畴模。显然，在稳态畴被阳极吸收而消失的瞬间，电路中将出现脉冲状的大电流，如图1-2-5所示。其周期取决于渡越时间 $\tau_p = L/v_s$ (L 为样品长度， v_s 为畴的饱和漂移速度)。

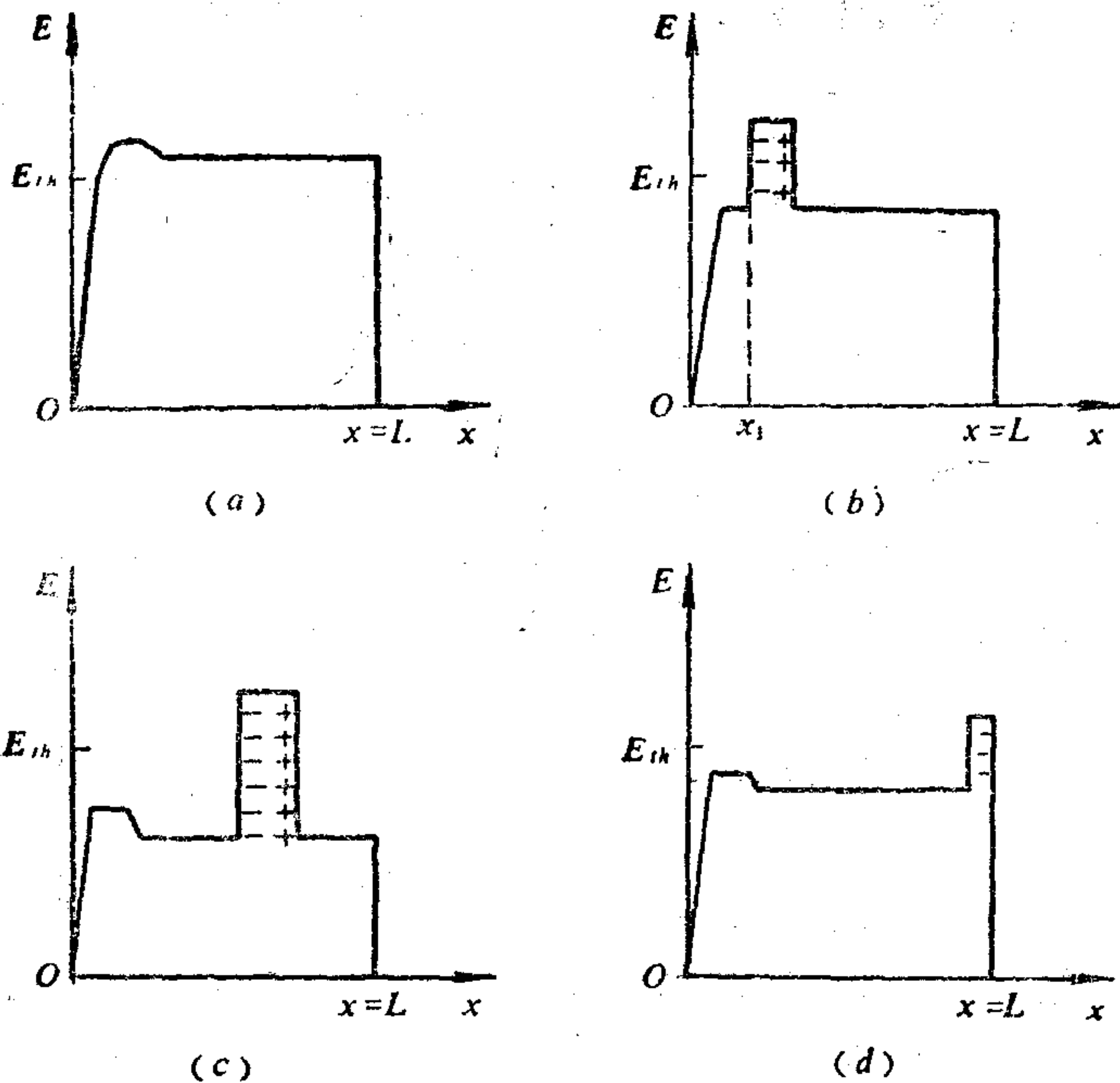


图 1-2-4 偶极畴的形成、渡越和消失过程

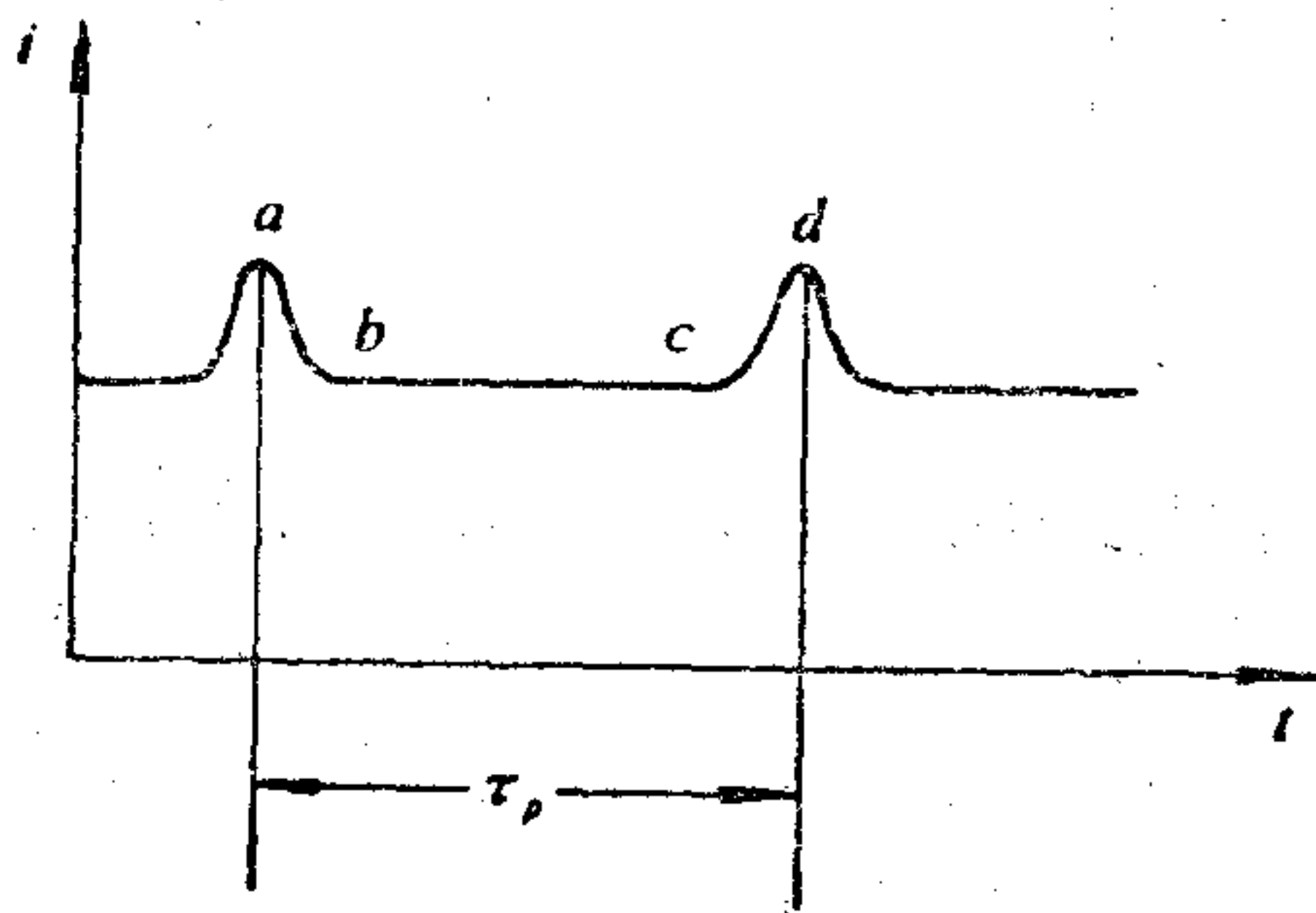


图 1-2-5 偶极畴振荡的电流波形

当样品置于微波谐振腔中，将谐振频率调到上述电流的基波频率 $(f_p = \frac{1}{\tau_p})$ ，则可组成一振荡器。在实际工作中，样品上的电压是由直流偏压和振荡电压叠加而成，并由它们共同控制畴的生长与消失，因此振荡频率不再决定于样品的长度，而是取决于腔体的谐振频率。它可以大于、等于或小于 f_p 。调节腔体可以实现振荡器的频率调谐，并具有相当宽的调谐范围（近一个倍频程）。

此外，如前所述，当改变管子上的外加直流电压时，将改变畴内及畴外电场大小，从而改变畴的漂移速度及相应的渡越时间。因此便可以改变振荡频率，这就是所谓的偏置调谐。但利用这种方法得到的调谐范围很窄，大约在 $\pm 10\%$ 左右。

用转移电子器件构成振荡器，当把特定的管子和谐振电路相结合时，可以观察到多种振荡模式。对偶极畴模（又可称为行畴模）来说，有纯粹渡越时间模、猝灭模和延迟模。偶极畴模的工作效率较低，理论值在 $7 \sim 14\%$ 之间，实际只有 $2 \sim 6\%$ 。可见，转移电子器件振荡器的效率是很低的。此外，还有限制空间电荷积累模（LSA）。它的效率较高，理论值为 $18 \sim 23\%$ ，但它对半导体材料要求较高，难以制备。故目前普遍工作于偶极畴模。

2. 等效电路

转移电子器件在偶极畴模工作时，其等效电路是一个参数与电压幅度有关的非线性电路，相当复杂，不用计算机辅助分析的方法是很难确定其电路参数的。下面仅提出一个最简单的转移电子器件的等效电路。

对于工作在成熟的偶极畴模器件来说，其等效电路可表