

一兆伏脉冲强流电子加速器*

脉冲强流电子加速器组

(中国科学院高能物理研究所)

前言

本文介绍一台 1MV 脉冲强流电子加速器。脉冲宽度为 25 ns, 上升时间为 11 ns, 最大束流为 20kA。用 0.1mm 厚的钨片作为阳极靶, 在强电子束轰击下产生韧致辐射, 其 γ 剂量率在离靶半米处 在 1.0×10^8 r/sec 以上。

脉冲强流电子加速器是在六十年代中才发展起来的, 特别是大功率加速器, 只是在最近几年才臻完善^[1,2]。目前这类加速器应用很广, 例如用来作相对论电子束性能的研究, 作直接点燃可控热核反应的氘氚物质的研究, 也有用来激励气体放电, 以产生大功率脉冲激光源的试验等。另外用作产生 γ 剂量的瞬时辐射源也多有应用。

简单工作原理

使一储有足够能量的冲击电压发生器, 以微秒级的脉冲高压对一双同轴线充电, 再经一油隙开关对负载(冷阴极二极管)放电, 由二极管的阴极上引出强大的快脉冲电子流。

加速器主要组成部分

1MV 脉冲强流电子加速器是由冲击电压

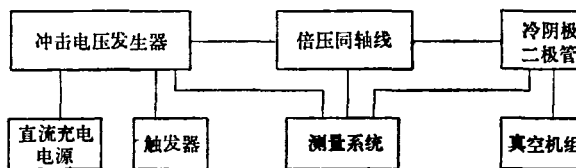


图 1 1 兆伏快脉冲强流电子加速器框图

发生器、直流充电电源、触发器、倍压同轴线(即双同轴线)、二极管、真空机组、测量系统等组成(见图 1)。其主要部件如下:

1. 冲击电压发生器

由十八个 MY-0.022 μ f 电容器和九对充气型火花球隙串联而成, 每六个电容器和三对火花球隙构成一排, 三个排并列而在电器上串接, 排与排间相对应的电容器, 由充电电阻 R 和接地电阻 R_g 连接, 使充电时电容器并联。这种连接称为 Z 型接法^[3], 详见图 2。

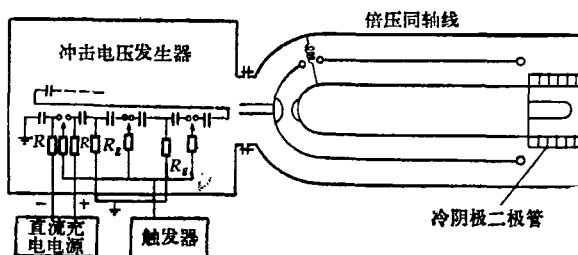


图 2 强流脉冲电子加速器原理图

发生器放电时九对充气火花隙导通, 十八个电容器串联放电, 从而得到脉冲高压。第一排三对火花球隙带有触发针尖, 可由触发器指令导通。整个发生器浸没在变压器油中, 并用玻璃钢吊带固定在油箱的盖板上, 可随盖板一同起吊, 便于检修。发生器装配结构见图 3, 4。发生器串联总电容量 $C_M = 1.22$ nf, 当直流充电为 ± 100 kV 时, 发生器输出电压 $V_M \approx 1.8$ MV。储能 $W_M = 1950$ J。

2. 双同轴线(倍压同轴线)

由三个同心圆筒组成, 圆筒由钢板卷制焊接而成, 各长 $L \approx 254$ cm, 三个圆筒的半径分别

* 1978年2月6日收到。

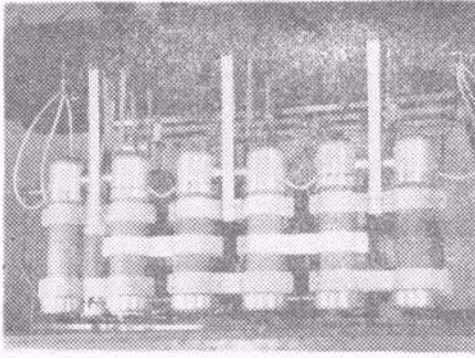


图3 发生器装配整体结构图

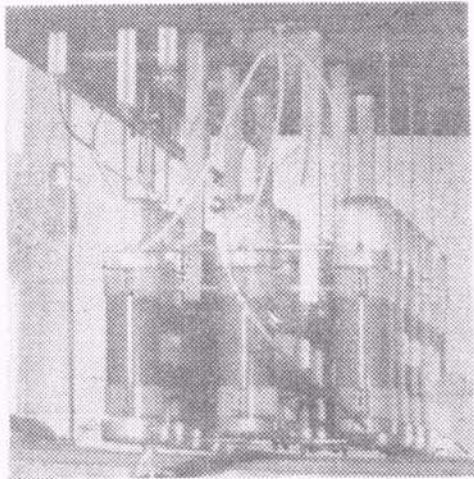


图4 发生器装配侧面图

为 $r_1 = 17.8\text{cm}$, $r_2 = 28.5\text{cm}$, $r_3 = 37.4\text{cm}$. 为了减小集肤阻抗, 三个圆筒的有用表面都镀了铜(外钢筒的外表面及内钢筒的内表面未镀). 三圆筒间充以变压器油作为介质. 同轴线与发生器之间由铜杆作电路连接. 为了便于检修, 把发生器与同轴线间的油路用绝缘板隔开. 在同轴线的设计中, 既要使二极管两端达到 1MV 的脉冲高压, 又要引出足够强的电子流, 因而必须同时兼顾充放电时的能量转换效率和电压转换效率. 注意到二极管阻抗不是一个恒定值, 权衡结果取同轴线总特性阻抗为 30Ω . 内外同轴线采取近似的等场设计, 内同轴线阻抗设计为 $Z_1 = 19\Omega$, 外同轴线阻抗 $Z_2 = 11\Omega$. 由于最初的设计考虑, 同轴线总电容量 $C_B = 1.833\text{nf}$, 相当于发生器中十二个电容器串联容量. 内圆筒与中间圆筒是用尼龙棒支撑在外圆筒上, 考虑到边缘电场效应, 同轴线边缘及接地电感

处的电场经仔细的计算, 作成椭圆卷边.

3. 二极管(电子枪)

其结构见图5. 阴极头曾用不锈钢和黄铜两种材料作试验. 阳极为 0.1mm 钨片. 阴阳极之间用有机玻璃绝缘, 管室由扩散泵排气以达到高真空.

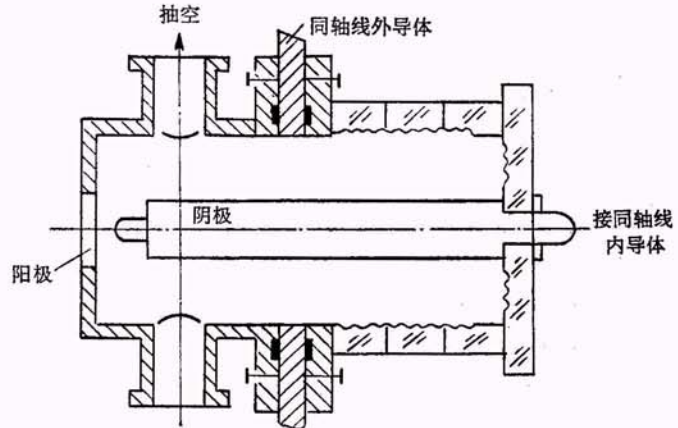


图5 二极管结构图

脉冲强流电子加速器除以上三个主要部件外, 还有一台 $\pm 100\text{kV}$ 直流充电电源, 用 QV-4 型高压静电电压表监测; 一个输出脉冲可达 100kV 的触发器. 发生器的输出端装有电阻分压器, 借以对发生器工作监测. 在同轴线与二极管连接处装有电容分压和电阻分压器, 通过示波器 SB-12, 可观察负载上毫微秒波形并进行拍照. 二极管内配有积分环, 用以测量阴极发射电流. 用法拉第筒和小电阻法测量束流; 用 LiF 热释光及 Li 玻璃测量 γ 剂量.

实验结果

1. 发生器开路试验

即发生器不接同轴线, 输出端仅接测量电阻分压器. 分压器阻值约为 $4\text{k}\Omega$, 如果没有杂散电容, 这个电路不会振荡, 但由图6实验曲线看出, 得到一衰减的振荡曲线, 这说明有杂散电容 C_p 的存在. 由于 $C_M \gg C_p$, 所以 $V_{C_p\text{max}}$ 可以很高. 在电容器直流充电电压为 $\pm 50\text{kV}$ 时, $V_{C_p\text{max}}$ 为 1.08MV .

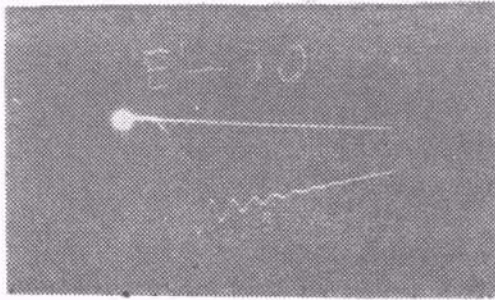
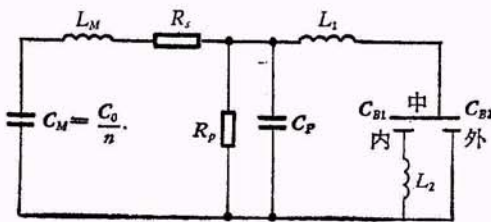


图6 发生器开路试验电压波形

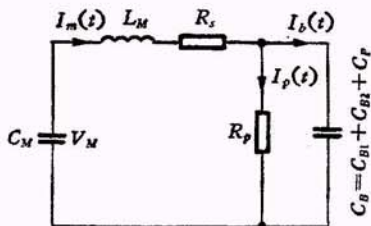
2. 发生器对同轴线充电实验

在脉冲强流电子加速器中，同轴线既是储能元件，又作为脉冲形成网络。将同轴线与发生器联接，而使同轴线开路，此时同轴线为发生器的容性负载，其等效电路见图7(a)。其中 L_M 为发生器的内电感， C_p 为发生器的杂散电容， L_1 为发生器与同轴线之间的引线电感， L_2 为内同轴线接地电感。由于 $L_M \gg L_1$;

$\frac{1}{C_{B1}\omega} \gg L_2\omega$ ，所以等效线路可以简化为图7(b)，用拉普拉斯变换近似算得，在谐振充电时



(a) 发生器对同轴线充电等效电路



(b) 发生器充电等效电路

图7

同轴线上的电压为：

$$V_B(t) = V_M \frac{C_M}{C_M + C_B} \left[e^{-\frac{t}{(C_M + C_B)R_p}} - e^{-\frac{\delta_1 + \delta_2}{2} t} \cos \omega t \right]$$

式中 $\delta_1 = R_s/L_M$; $\delta_2 = 1/R_p C_B$;

R_s ——发生器等效串联电阻；

R_p ——发生器等效并联电阻；

C_B ——同轴线总电容量；

当 $t = \pi/\omega$ 时， $V_B\left(\frac{\pi}{\omega}\right) = V_{B \max}$ 。

图8为实测的 $V_B(t)$ 的波形。

测出图6和图8两个放电波形的振荡周期，通过计算可得：

$$C_p = 0.32 \text{ nf},$$

$$L_M = 16.8 \mu\text{H}.$$

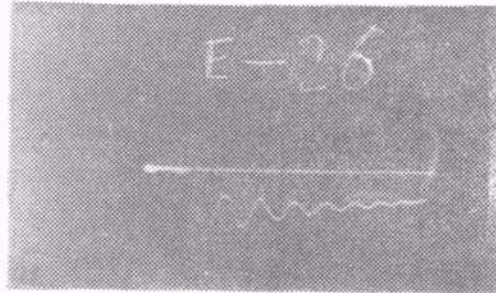


图8 发生器对同轴线充电波形

由图8的曲线可近似地求得 R_s , R_p 和 η_v (电压转换效率)。根据近似的理论计算也可以求得 R_s , R_p 和 η_v 。列入下表1:

表1 R_s , R_p 和 η_v 的近似理论计算值

	照片号	直流充电电压	R_s	R_p	η_v
试验值	E-26	$\pm 70 \text{ kV}$	16Ω	$2.8 \text{ k}\Omega$	62%
计算值	E-26	$\pm 70 \text{ kV}$	19Ω	$3.2 \text{ k}\Omega$	62.6%

从两种结果看出，试验值与计算值比较接近。

3. 发生器、同轴线、假负载联合试验

用硫酸铜水溶液作成阻值为 $R = 42 \Omega$ 的

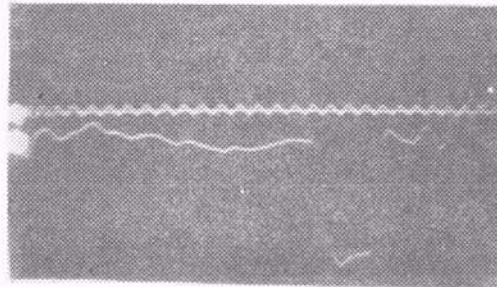


图9 发生器、同轴线、假负载的试验波形

假负载,测得假负载上的电压波形如图 9. 此时直流充电电压为 $\pm 80\text{kV}$. 按示波器的时标, 两峰间隔为 10ns .

4. 发生器、同轴线、二极管联合试验

图 10 为测得二极管两端电压波形. 此时发生器直流充电电压为 $\pm 100\text{kV}$, 按示波器时标, 两峰间隔为 10ns , 测出峰值电压约 1MV (有 1% 的误差), 上升前沿约 11ns , 半宽度为 25ns .

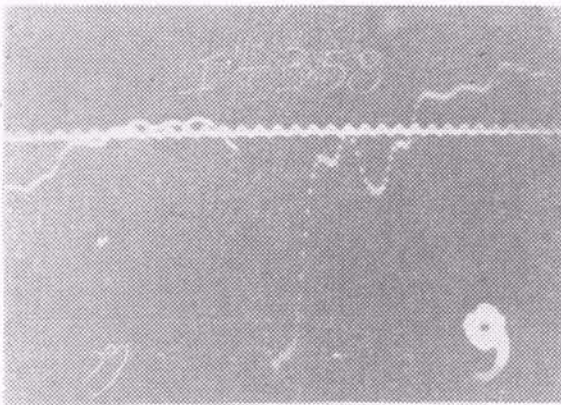


图 10 发生器、同轴线、二极管联合试验波形

图 11 为法拉第筒所测量的束流波形, 此图是在直流充电电压为 $\pm 90\text{kV}$ 时得出的, 这时束流幅值为 17kA . 当直流充电为 $\pm 100\text{kV}$ 时, 束流幅值大于 20kA .

图 12 为塑料晶体和光电二极管所测出的剂量波形. 其幅值相当于 $1.1 \times 10^3\text{ r/sec}$, 是在离靶 0.4M 处拍照结果. 二极管阳极为 0.1mm 钨片, 极间距离为 16mm . 在靶后用 LiF 热释光法和 Li 剂量玻璃法测得 γ 剂量, 结果列入下表 2.

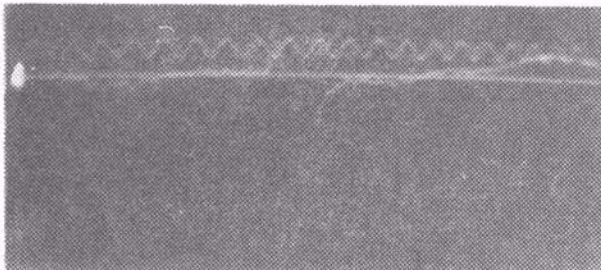


图 11 法拉第筒测量电流波形

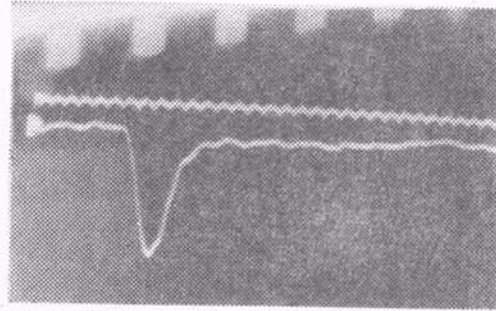


图 12 塑料晶体和光电二极管测出的剂量波形

表 2 LiF 热释光法和 Li 剂量玻璃法测得的 γ 剂量

沿轴离靶距离 (cm)	LiF 热释光法测得 γ 剂量 (r)	Li 剂量玻璃法测得 γ 剂量 (r)
20	19.4	16.3
50	3.6	3.45
100	0.6	/

几点讨论

1. 电压传输效率

根据计算, 各部分引起电压损失计有: (1) 发生器与同轴线电容量失配引起的损失为 20.7% . 其电压传输效率因此为 $\eta = 79.3\%$. (2) 发生器内阻、分布并联电阻及分布电容引起的电压损失约占 9.4% . 由此造成的电压传输效率 $\eta_2 = 78.6\%$. (3) 同轴线主开关的导通定为 $0.9V_{B\text{max}}$, 即 $\eta_3 = 90\%$. 于是发生器对同轴线电压转换总效率为:

$$\eta_v = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 56.2\%$$

实测与计算相差约 1% . 由以上分析可见, 同轴线与发生器容量失配及发生器的分布电容引起很大的电压转换损失. 这台加速器如果不考虑最初的试验安排, 而取 $C_M = C_B$; 发生器的电容不用库存的 $\text{MY-0.022}\ \mu\text{f}$, 而采用体积较小容量较大的电容器, 那么发生器对同轴线的电压转换效率将会提高不少.

2. 同轴线的内导体接电感的影响

同轴线的内导体接地电感的大小对产生前置脉冲有明显的的作用, 并造成同轴线充电电压的损失. 图 13 显出当接地电感 $L_g = 4.7\ \mu\text{H}$ 时

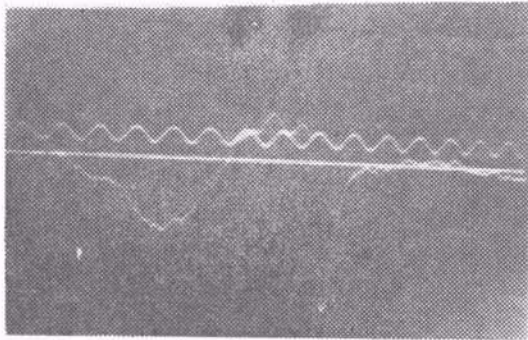


图13 接地电感 $L_g = 4.7\mu\text{H}$ 时放电前置图象

放电前置脉冲的图象。在此电感值时，同轴线充电电压损失约 10.5%。减小接地电感，令 $L_g = 1.8\text{MH}$ ，前置脉冲有所减小，如图 14。

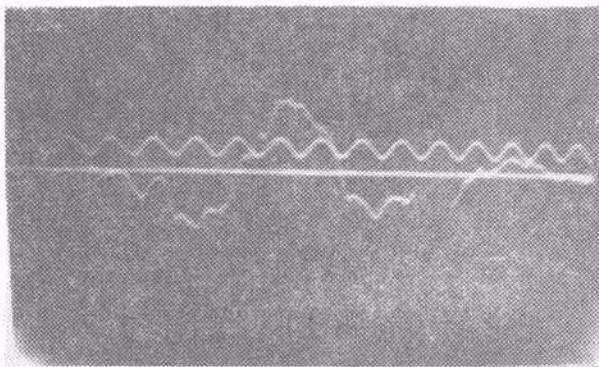


图14 前置脉冲随接地电感减小而减小

3. 测量波形前沿拉宽的原因:

(1) 主开关的时间常数; (2) 二极管分布参数的时间常数; (3) 测量系统的时间常数。而其中主开关作用最大。因为主开关具有一定的电感，因而具有一定的导通时间，并且在此时间内开关电阻由 ∞ 变到极小，这两个因素都会影响同轴线形成波形的上升时间。马丁^[2]指出，主开关电感的时间常数为：

$$\tau_L = L/Z_1.$$

电阻引起的时间常数为：

$$\tau_R = \frac{5}{Z_1^{1/3} E^{4/3}}.$$

Z_1 为内同轴线特性阻抗 (Ω); E 为主开关工作电场强度 (MV/cm); τ_R 单位为 ns。

在我们的情况下， $\tau_L = 1.47\text{ ns}$ ， $\tau_R = 3.62\text{ ns}$ ，主开关总的时间常数 $\tau = \tau_L + \tau_R = 5.09\text{ ns}$ 。

物理

由此主开关引起的上升时间 $t_r \approx 2.2\tau = 11.2\text{ ns}$ 。

二极管分布参数引起的上升时间近似计算为 $t_{r_2} = 7\text{ ns}$ 。测量系统引起上升时间为 $t_{r_3} = 2.5\text{ ns}$ ，总的上升时间为：

$$t_r = \sqrt{t_{r_1}^2 + t_{r_2}^2 + t_{r_3}^2} \approx 13\text{ ns}.$$

实测 $t_r = 11\text{ ns}$ ，与计算相差 15%。比较图 9 与图 10；波形的前沿几乎相等，而假负载和二极管的分布参数不尽相同，可见二极管的分布参数的影响远小于主开关。因此，如果改变主开关的电场情况，或用多通导开关或环形开关以减小开关电阻和电感，波形上升时间可能有显著的改进。

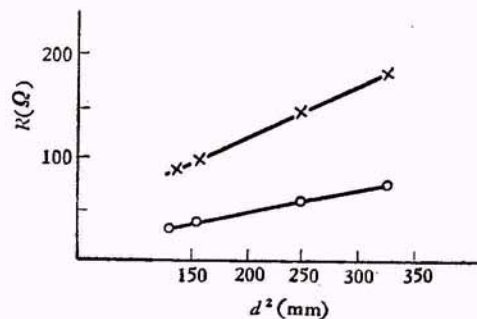


图15 二极管极间距离与其管阻抗关系
×——按郎谬尔公式计算值
○——实测阻抗值

4. 二极管的阻抗

在管电压 $V_T = 720 \pm 10\% \text{ kV}$ ，阴极用 $\phi 15\text{ mm}$ 不锈钢半球头的情况下，测量不同极间距离时的二极管的阻抗列入表 3

表3 不同极间距离时的二极管阻抗

极间距离 $d(\text{mm})$	实测 $R(\Omega)$	计算 $R(\Omega)$
12	36.3	82
12.5	44	88
16	63	145
18	74	185

图 15 表示极间距离与二极管阻抗的关系。实验表明，实测的阻抗与极间距离平方成线性关系，这比按郎谬尔公式所计算的值要小得多。这可能是由于等离子体的存在，离子中和了部分

空间电荷,使得电流增加,或者前置脉冲形成了等离子体并向前移动,使极间距离等效地变小了。

结 束 语

本加速器达到设计指标,并较稳定地运行了两年多。工作是可靠的。当发生器充气火花隙充以少量的 SF_6 气体时,在直流充电电压为 $\pm 100kV$ (额定充电电压)时能够稳定工作。对这台加速器如果稍作改进,其能量、流强和剂

量率可望进一步提高。在这台加速器的研制中,不少外单位同志参加协作,并作了许多工作,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] B. Bernstein, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-20-3** (1973), 294.
- [2] T. H. Martin, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-16-3** (1969), 59.
- [3] K. R. Prestwich, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-16-3** (1969), 64.
- [4] D. L. Johnson, **SC-DR-70-872** (1970).

两相区中生长单晶的几个问题*

郑 兆 勃

(中国科学技术大学物理系)

在非同成分配比条件下,从熔态中生长单晶体的问题是非常重要的。这是由于目前正在广泛应用和探索的新型单晶材料,大都是多组元体系,往往不存在固液同成分点,或者即使存在固液同成分点,但由于配料误差、非同成分的挥发损失,容易造成体系组分偏离同成分点,单晶生长过程也将是在固-液两相区进行。

为了讨论在两相区生长单晶发生的分凝现象, Pfann^[1] 推导了组分分布公式; Hurler^[2] 推导了不产生组分过冷的条件。他们的推导是在分凝系数 k 为常数的假定下进行的,也就是对二元系,固相线与液相线为直线相交于某一组元熔点的情况。

本文的目的是对分凝系数不为常量的一般二元系进行讨论,推导出一般条件下的晶相组分公式,得出了不产生组分过冷的条件。

考虑如图1所示的二元互溶体系,图1中,纵轴为温度,横轴为体系中B组元的克分子分数。

从熔态中结晶的过程是一个定向凝固的过程。考虑初始组分为 $x(p)$ 的熔体,当温度达到

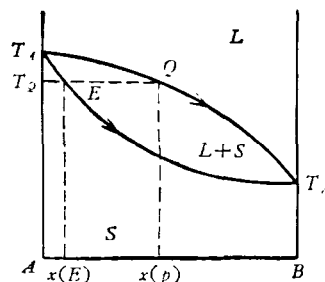


图1 非平衡定向凝固过程中熔体和晶体的组分变化路径

$T(Q)$ 时,开始出现组分为 $x(E)$ 的固溶相,由于实际单晶生长过程是以一定速度进行的,而固相中的扩散过程十分缓慢,因此可以认为已结晶部分中的组分不再改变,这样,随着温度的降低,界面不断推移,界面处将依次结晶出组分为 $x(E) \rightarrow x(F)$ 的固溶相。也就是晶相组分沿固相线变化,而熔相组分沿液相线变化。在一般的引上法和下降法中,由于体系总质量一般保持不变,因此在缓慢生长时,近似满足上述条件。

为了推导晶相组分分布公式,考虑如图2所示的生长系统。假定:(1)体系由A,B组

* 1978年2月17日收到。