

带形离子束和轴对称离子束的相互转换

郁庆长

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文研究带形离子束和轴对称离子束相互转换的理论, 并且讨论利用薄透镜与偏转磁铁进行上述转换的方法。

在低能离子加速器和其它离子束装置中有时需要将带形离子束转换为轴对称离子束, 或者将轴对称离子束转换为带形离子束。

在一些离子源中束是通过狭缝引出的, 这种源所产生的束就是带形束。它的横截面近似为狭长的矩形^[1]。如果我们所需要的束是轴对称束, 可以利用一个束流光学系统来进行束形转换。例如, 在图1所示的强流离子注入机中, 就利用偏转

磁铁进行这种转换。当然, 带形束通过这种转换系统后它的横截面往往并不是精确的圆形, 而只是接近圆形或正方形, 但在本文中我们仍然近似地称它为轴对称束。

与此相反, 在某些情况下, 由于质谱或能谱分析器的分辨率与束宽度有关, 把轴对称束转换为带形束将有可能改善分辨率^[2]。

进行带形束和轴对称束的相互转换可以利用各种束流光学元素。最常使用的元素是偏转磁铁和四极透镜。前者的特点是在束形转换的同时还能对束进行偏转和分析。

目前对于带形束和轴对称束相互转换的理论还未进行过详细的研究。本文利用束流传输理论来讨论这一问题。考虑到带形束到轴对称束的转换有更大的实用价值, 我们将以这种转换作为例子进行研究。当然, 类似的方法也可用于它的逆转换——轴对称束到带形束的转换。在讨论中我们认为离子束是单一能量的连续束, 且不考虑束的空间电荷效应。

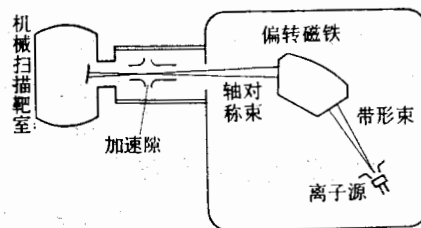


图 1

一、一般理论

我们取束轴为 z 轴, 取带形束短束径的方向为 x 轴的方向, 长束径的方向为 y 轴的方向。记 x 和 y 方向的束半径为 X 和 Y 。对于带形束 $X \ll Y$, 我们要把它转换为 $X = Y$ 的轴对称束。

我们用 σ_x 和 σ_y 矩阵描述离子束在 x 和 y 方向的特性, 它们都是 z 的函数.

$$\sigma_x = \varepsilon \begin{pmatrix} \beta_x & -\alpha_x \\ -\alpha_x & \gamma_x \end{pmatrix}, \quad \sigma_y = \varepsilon \begin{pmatrix} \beta_y & -\alpha_y \\ -\alpha_y & \gamma_y \end{pmatrix}. \quad (1)$$

这里 $\beta_x = \frac{1}{\varepsilon} X^2$, $\beta_y = \frac{1}{\varepsilon} Y^2$, $\alpha_x = -\frac{1}{\varepsilon} X \frac{dX}{dz}$, $\alpha_y = -\frac{1}{\varepsilon} Y \frac{dY}{dz}$, $\beta_x \gamma_x - \alpha_x^2 = 1$, $\beta_y \gamma_y - \alpha_y^2 = 1$, ε 为束的发射度¹⁾.

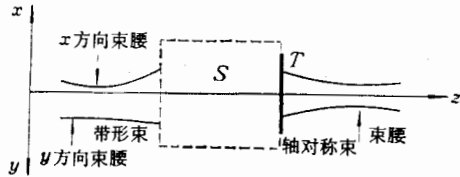


图 2

设束在 S 入口处的 σ_x 和 σ_y 矩阵为

$$\varepsilon \begin{pmatrix} \beta_{1x} & -\alpha_{1x} \\ -\alpha_{1x} & \gamma_{1x} \end{pmatrix} \text{ 和 } \varepsilon \begin{pmatrix} \beta_{1y} & -\alpha_{1y} \\ -\alpha_{1y} & \gamma_{1y} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

T 入口处的 σ_x 和 σ_y 矩阵为

$$\varepsilon \begin{pmatrix} \beta_{2x} & -\alpha_{2x} \\ -\alpha_{2x} & \gamma_{2x} \end{pmatrix} \text{ 和 } \varepsilon \begin{pmatrix} \beta_{2y} & -\alpha_{2y} \\ -\alpha_{2y} & \gamma_{2y} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

T 出口处的 σ_x 和 σ_y 矩阵都为

$$\varepsilon \begin{pmatrix} \beta'_2 & -\alpha'_2 \\ -\alpha'_2 & \gamma'_2 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

在很多情况下我们所关心的是上述束流光学系统前后离子束各束腰的尺寸与位置, 它们和式 (2)–(4) 中各矩阵元的关系列在附录中.

若子系统 S 在 x 和 y 方向的一阶传输矩阵为

$$\begin{pmatrix} R_{x11} & R_{x12} \\ R_{x21} & R_{x22} \end{pmatrix} \text{ 和 } \begin{pmatrix} R_{y11} & R_{y12} \\ R_{y21} & R_{y22} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

显然

$$\begin{aligned} \beta'_2 &= \beta_{2x} = R_{x11}^2 \beta_{1x} - 2R_{x11}R_{x12}\alpha_{1x} + R_{x12}^2 \gamma_{1x} \\ &= \beta_{2y} = R_{y11}^2 \beta_{1y} - 2R_{y11}R_{y12}\alpha_{1y} + R_{y12}^2 \gamma_{1y}. \end{aligned} \quad (6)$$

如果 S 只有一个可调节参量, 由上式即可确定此参量和 β'_2 的值; 如果 S 的可调节参量数大于 1, 我们可按上式选择适当的参量值使 β'_2 等于给定值.

α_{2x} 和 α_{2y} 可由下式计算

$$\alpha_{2x} = - \left[\alpha_{1x} + \frac{R_{x22}}{R_{x12}} \beta_{2x} - \frac{R_{x11}}{R_{x12}} \beta_{1x} \right],$$

1) 这里我们认为束在 x 和 y 方向发射度近似相等. 两发射度不等的束可能在某些 z 处 $X = Y$, 但不可能成为轴对称束.

$$\alpha_{2y} = - \left[\alpha_{1y} + \frac{R_{y22}}{R_{y12}} \beta_{2y} - \frac{R_{y11}}{R_{y12}} \beta_{1y} \right]. \quad (7)$$

如果 T 是薄四极透镜, 它在 x 方向的焦距为 f (我们规定聚焦透镜 $f > 0$), 则

$$\alpha'_2 = \alpha_{2x} + \frac{\beta'_2}{f} = \alpha_{2y} - \frac{\beta'_2}{f}. \quad (8)$$

由此可得

$$\begin{aligned} \alpha'_2 &= \frac{1}{2} (\alpha_{2x} + \alpha_{2y}) \\ &= -\frac{1}{2} \left[\alpha_{1x} + \alpha_{1y} + \left(\frac{R_{x22}}{R_{x12}} + \frac{R_{y22}}{R_{y12}} \right) \beta'_2 - \frac{R_{x11}}{R_{x12}} \beta_{1x} - \frac{R_{y11}}{R_{y12}} \beta_{1y} \right], \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} &= \frac{1}{2\beta'_2} (\alpha_{2y} - \alpha_{2x}) \\ &= \frac{1}{2\beta'_2} \left[\alpha_{1x} - \alpha_{1y} + \left(\frac{R_{x22}}{R_{x12}} - \frac{R_{y22}}{R_{y12}} \right) \beta'_2 - \frac{R_{x11}}{R_{x12}} \beta_{1x} + \frac{R_{y11}}{R_{y12}} \beta_{1y} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

当 $\alpha_{2x} > \alpha_{2y}$ 时 f 应为负, $\alpha_{2x} < \alpha_{2y}$ 时 f 应为正.

如果 T 是任意的非轴对称薄透镜, 它在 x 和 y 方向的焦距为 f_x 和 f_y ¹⁾, 则

$$\alpha'_2 = \alpha_{2x} + \frac{\beta'_2}{f_x} = \alpha_{2y} + \frac{\beta'_2}{f_y}. \quad (11)$$

我们可以选择适当的 f_x 和 f_y 使 α'_2 等于给定值.

在狭缝引出的离子源中, 多数源引出的带形束在 y 方向接近于平行束, 此时 $\alpha_{1y} \approx 0$, $\gamma_{1y} \approx 0$, 而 $\beta_{wx} \ll \beta_{wy}$. 这里 β_{wx} 为带形束 x 方向的束腰处的 β_x 值, β_{wy} 为带形束 y 方向的束腰处的 β_y 值. 下面我们将称这种束为常规带形束 (图 3(a)). 如果适当改变离子源的电极形状, 也可以在 y 方向得到会聚束^[3], 此时 α_{1y}, γ_{1y} 不再接近于 0, β_{wx} 也不一定远小于 β_{wy} (图 3(b)).

二、利用单个薄透镜进行转换

利用单个薄透镜也可以将带形束转换为轴对称束, 当然此薄透镜不能是轴对称的. 为了使薄透镜处 $\beta_x = \beta_y$, 需要调节薄透镜的位置. 现在我们把从带形束 x 方向的束腰到薄透镜这段漂移区看作图 2 中的子系统 S , 设其长度为 l . 此时 $\alpha_{1x} = 0$, $\beta_{1x} = \beta_{wx}$. 由式 (6),

$$\beta'_2 = \beta_{2x} = \beta_{wx} + l^2 \gamma_{1x} = \beta_{2y} = \beta_{1y} - 2l\alpha_{1y} + l^2 \gamma_{1y}. \quad (12)$$

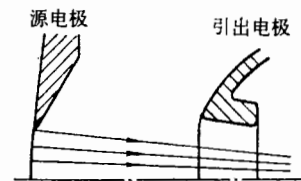
$$l = \frac{-\alpha_{1y} \pm \sqrt{\alpha_{1y}^2 - (\beta_{wx} - \beta_{1y})(\gamma_{1x} - \gamma_{1y})}}{\gamma_{1x} - \gamma_{1y}}. \quad (13)$$

如果薄透镜 T 是四极透镜,

$$\alpha'_2 = -\frac{1}{2} \left[\alpha_{1y} + \frac{2}{l} \beta'_2 - \frac{1}{l} (\beta_{1x} + \beta_{1y}) \right], \quad (14)$$



(a)



(b)

图 3

1) 例如, 一个带矩形孔的膜片透镜可以近似地看作这种薄透镜.

$$\frac{1}{f} = -\frac{1}{2\beta'_2} \left[\alpha_{1y} + \frac{1}{l} (\beta_{1x} - \beta_{1y}) \right]. \quad (15)$$

如果薄透镜 T 是任意的非轴对称透镜,

$$\alpha'_2 = \left(\frac{1}{f_x} - \frac{1}{l} \right) \beta'_2 + \frac{1}{l} \beta_{1x} = -\alpha_{1y} + \left(\frac{1}{f_y} - \frac{1}{l} \right) \beta'_2 + \frac{1}{l} \beta_{1y}, \quad (16)$$

由此式我们可以选择 f_x, f_y 使 α'_2 等于给定值.

对于常规带形束, 式 (12)、(13) 可简化为

$$\beta'_2 \approx \beta_{wy}, \quad l \approx \sqrt{\beta_{wx}\beta_{wy}}. \quad (17)$$

如果薄透镜 T 是四极透镜, 则

$$f = 2l, \quad \alpha'_2 \approx -\frac{1}{2l} \beta_{wy}. \quad (18)$$

如果薄透镜 T 是任意的非轴对称透镜, 则

$$\alpha'_2 \approx \left(\frac{1}{f_x} - \frac{1}{l} \right) \beta_{wy} \approx \frac{1}{f_y} \beta_{wy}, \quad (19)$$

显然 f_x, f_y, l 应满足

$$\frac{1}{f_x} - \frac{1}{f_y} = \frac{1}{l}. \quad (20)$$

三、利用薄透镜组进行转换

利用薄透镜组进行由带形束到轴对称束的转换是比较方便的. 下面我们讨论两种由两个薄透镜组成的透镜组, 薄透镜间距离为 d .

1. 两个薄四极透镜组成的透镜组

设两个薄四极透镜在 x 方向的焦距为 f_1, f_2 . 我们把第一个薄四极透镜和两透镜间的漂移区看作图 2 中的子系统 S , 它在 x 和 y 方向的一阶传输矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1 - \frac{d}{f_1} & d \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \text{ 和 } \begin{pmatrix} 1 + \frac{d}{f_1} & d \\ \frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix}. \quad (21)$$

由式 (6),

$$\begin{aligned} \beta'_2 = \beta_{2x} &= \left(1 - \frac{d}{f_1} \right)^2 \beta_{1x} - 2d \left(1 - \frac{d}{f_1} \right) \alpha_{1x} + d^2 r_{1x} \\ &= \beta_{2y} = \left(1 + \frac{d}{f_1} \right)^2 \beta_{1y} - 2d \left(1 + \frac{d}{f_1} \right) \alpha_{1y} + d^2 r_{1y}. \end{aligned} \quad (22)$$

设

$$\begin{aligned} A &= \beta_{1x} - \beta_{1y}, \quad B = \beta_{1x} + \beta_{1y} - d(\alpha_{1x} + \alpha_{1y}), \quad C = \beta_{2x0} - \beta_{2y0}, \\ \beta_{2x0} &= \beta_{1x} - 2d\alpha_{1x} + d^2 r_{1x}, \quad \beta_{2y0} = \beta_{1y} - 2d\alpha_{1y} + d^2 r_{1y}, \end{aligned} \quad (23)$$

则

$$\frac{d}{f_1} = \frac{B \pm \sqrt{B^2 - AC}}{A}. \quad (24)$$

这里 β_{2x0} 和 β_{2y0} 是当第一个薄四极透镜不起作用时 β_{2x} 和 β_{2y} 的值. 显然若 $\beta_{2x0} > \beta_{2y0}$, f_1 应为正, $\beta_{2x0} < \beta_{2y0}$, f_1 应为负¹⁾. 由式 (9), (10),

$$\alpha'_2 = -\frac{1}{2} \left[\alpha_{1x} + \alpha_{1y} + \frac{2}{d} \beta'_2 - \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{f_1} \right) \beta_{1x} - \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{f_1} \right) \beta_{1y} \right], \quad (25)$$

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{2\beta'_2} \left[\alpha_{1x} - \alpha_{1y} - \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{f_1} \right) \beta_{1x} + \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{f_1} \right) \beta_{1y} \right]. \quad (26)$$

对于常规带形束,

$$\beta'_2 \approx \left(1 + \frac{d}{f_1} \right)^2 \beta_{wy}, \quad (27)$$

$$\alpha'_2 \approx -\frac{1}{2} \left[\alpha_{1x} - \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{f_1} \right) \beta_{1x} + \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{f_1} \right) \left(1 + \frac{2d}{f_1} \right) \beta_{1y} \right]. \quad (28)$$

2. 轴对称薄透镜和薄四极透镜组成的透镜组

设第一个薄透镜是轴对称的, 焦距为 f_1 , 第二个薄透镜是四极透镜, 在 x 方向焦距为 f_2 . 我们把第一个薄透镜和两透镜间的漂移区看作图 2 中的子系统 S , 它在 x 和 y 方向的一阶传输矩阵都为

$$\begin{pmatrix} 1 - \frac{d}{f_1} & d \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix}. \quad (29)$$

由式 (6),

$$\begin{aligned} \beta'_2 &= \beta_{2x} = \left(1 - \frac{d}{f_1} \right)^2 \beta_{1x} - 2d \left(1 - \frac{d}{f_1} \right) \alpha_{1x} + d^2 \gamma_{1x} \\ &= \beta_{2y} = \left(1 - \frac{d}{f_1} \right)^2 \beta_{1y} - 2d \left(1 - \frac{d}{f_1} \right) \alpha_{1y} + d^2 \gamma_{1y}. \end{aligned} \quad (30)$$

我们同样可用式 (24) 计算 f_1 , 但其中

$$B = \beta_{1x} - \beta_{1y} - d(\alpha_{1x} - \alpha_{1y}), \quad (31)$$

其它同式 (23). 若 $\beta_{2x0} > \beta_{2y0}$, 在 $\beta_{1x} > \beta_{1y}$ 时 f_1 应为正, 此时束在 x 方向将受到较大的会聚作用; 在 $\beta_{1x} < \beta_{1y}$ 时 f_1 应为负, 此时束在 y 方向将受到较大的发散作用. 若 $\beta_{2x0} < \beta_{2y0}$, 在 $\beta_{1x} > \beta_{1y}$ 时 f_1 应为负, 在 $\beta_{1x} < \beta_{1y}$ 时 f_1 应为正. 由式 (9), (10)

$$\alpha'_2 = -\frac{1}{2} \left[\alpha_{1x} + \alpha_{1y} + \frac{2}{d} \beta'_2 - \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{f_1} \right) (\beta_{1x} + \beta_{1y}) \right], \quad (32)$$

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{2\beta'_2} \left[\alpha_{1x} - \alpha_{1y} - \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{f_1} \right) (\beta_{1x} - \beta_{1y}) \right]. \quad (33)$$

对于常规带形束,

1) 我们不考虑在两透镜间存在实束腰的情况.

$$\beta'_2 \approx \left(1 - \frac{d}{f_1}\right)^2 \beta_{wy}, \quad (34)$$

$$\alpha'_2 = -\frac{1}{2} \left[\alpha_{1x} - \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{f_1}\right) \beta_{1x} + \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{f_1}\right) \left(1 - \frac{2d}{f_1}\right) \beta_{wy} \right]. \quad (35)$$

四、利用均匀场偏转磁铁进行转换

均匀场偏转磁铁常用于将带形束转换为轴对称束。设磁铁的磁场沿 y 方向，偏转半径为 ρ ，偏转角为 φ 。磁铁的入口和出口边缘相当于两个薄四极透镜，它们在 x 方向的焦距分别为 $-\rho \operatorname{ctg} \psi_1$ 和 $-\rho \operatorname{ctg} \psi_2$ ， ψ_1 和 ψ_2 为磁铁入口和出口边缘的法线与束轴所成的角，以图 4 所示方向为正。下面我们讨论两种均匀场偏转磁铁。

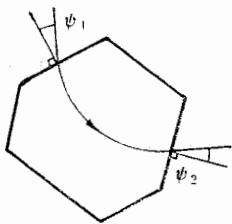


图 4

矩阵为

$$\begin{pmatrix} \cos \varphi & \rho \sin \varphi \\ -\frac{1}{\rho} \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \text{ 和 } \begin{pmatrix} 1 & \rho \varphi \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (36)$$

出口边缘相当于图 2 中的薄透镜 T 。我们选择适当的 φ 使磁铁出口处 $\beta_x = \beta_y$ ，选择适当的 ψ_2 使磁铁出口处 $\alpha_x = \alpha_y$ 。由式 (6)，

$$\begin{aligned} \beta'_2 &= \beta_{2x} = \cos^2 \varphi \beta_{1x} - 2\rho \cos \varphi \sin \varphi \alpha_{1x} + \rho^2 \sin^2 \varphi \gamma_{1x} \\ &= \beta_{2y} = \beta_{1y} - 2\rho \varphi \alpha_{1y} + \rho^2 \varphi^2 \gamma_{1y}, \end{aligned} \quad (37)$$

根据此式可确定 φ , β'_2 。由式 (9)、(10)，

$$\alpha'_2 = -\frac{1}{2} \left[\alpha_{1x} + \alpha_{1y} + \frac{1}{\rho} \left(\operatorname{ctg} \varphi + \frac{1}{\varphi} \right) \beta'_2 - \frac{1}{\rho} \operatorname{ctg} \varphi \beta_{1x} - \frac{1}{\rho \varphi} \beta_{1y} \right], \quad (38)$$

$$\operatorname{tg} \psi_2 = -\frac{\rho}{2\beta'_2} \left[\alpha_{1x} - \alpha_{1y} + \frac{1}{\rho} \left(\operatorname{ctg} \varphi - \frac{1}{\varphi} \right) \beta'_2 - \frac{1}{\rho} \operatorname{ctg} \varphi \beta_{1x} + \frac{1}{\rho \varphi} \beta_{1y} \right]. \quad (39)$$

对于常规带形束，

$$\beta'_2 \approx \beta_{wy}, \quad (40)$$

$$\alpha'_2 \approx -\frac{1}{2} \left[\alpha_{1x} - \frac{1}{\rho} \operatorname{ctg} \varphi (\beta_{1x} - \beta_{wy}) \right], \quad (41)$$

$$\operatorname{tg} \psi_2 \approx \frac{\rho \alpha'_2}{\beta_{wy}}. \quad (42)$$

2. $\varphi = \frac{\pi}{2}$ 的均匀场偏转磁铁

磁铁本体连同入口边缘相当于图 2 中的子系统 S ，它在 x 和 y 方向的传输矩阵为

$$\begin{pmatrix} \operatorname{tg} \phi_1 & \rho \\ -\frac{1}{\rho} & 0 \end{pmatrix} \text{ 和 } \begin{pmatrix} 1 - \frac{\pi}{2} \operatorname{tg}^2 \phi_1 & \frac{\pi \rho}{2} \\ -\frac{1}{\rho} \operatorname{tg} \phi_1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (43)$$

出口边缘相当于图 2 中的薄透镜 T 。我们选择适当的 ϕ_1 使磁铁出口处 $\beta_x = \beta_y$ ，选择适当的 ϕ_2 使磁铁出口处 $\alpha_x = \alpha_y$ 。由式 (6)，

$$\begin{aligned} \beta'_2 &= \beta_{2x} = \operatorname{tg}^2 \phi_1 \beta_{1x} - 2\rho \operatorname{tg} \phi_1 \alpha_{1x} + \rho^2 \gamma_{1x} \\ &= \beta_{2y} = \left(1 - \frac{\pi}{2} \operatorname{tg} \phi_1\right)^2 \beta_{1y} - \pi\rho \left(1 - \frac{\pi}{2} \operatorname{tg} \phi_1\right) \alpha_{1y} + \frac{\pi^2 \rho^2}{4} \gamma_{1y}, \end{aligned} \quad (44)$$

根据此式可确定 ϕ_1 和 β'_2 。显然若 $\phi_1 = 0$ 时 $\beta_{2x} > \beta_{2y}$ 则 ϕ_1 应为负，反之若 $\phi_1 = 0$ 时 $\beta_{2x} < \beta_{2y}$ 则 ϕ_1 应为正。由式 (9)、(10)，

$$\alpha'_2 = -\frac{1}{2} \left[\alpha_{1x} + \alpha_{1y} + \frac{2}{\pi\rho} \beta'_2 - \frac{\operatorname{tg} \phi_1}{\rho} \beta_{1x} - \frac{2 - \pi \operatorname{tg} \phi_1}{\pi\rho} \beta_{1y} \right], \quad (45)$$

$$\operatorname{tg} \phi_2 = -\frac{\rho}{2\beta'_2} \left[\alpha_{1x} - \alpha_{1y} - \frac{2}{\pi\rho} \beta'_2 - \frac{\operatorname{tg} \phi_1}{\rho} \beta_{1x} + \frac{2 - \pi \operatorname{tg} \phi_1}{\pi\rho} \beta_{1y} \right]. \quad (46)$$

对于常规带形束，

$$\beta'_2 \approx \left(1 - \frac{\pi}{2} \operatorname{tg} \phi_1\right)^2 \beta_{wy}, \quad (47)$$

$$\alpha'_2 \approx -\frac{1}{2} \left[\alpha_{1x} - \frac{\operatorname{tg} \phi_1}{\rho} (\beta_{1x} - \beta_{wy}) \right], \quad (48)$$

$$\operatorname{tg} \phi_2 \approx -\frac{\rho}{2\beta'_2} \left[\alpha_{1x} - \frac{\operatorname{tg} \phi_1}{\rho} (\beta_{1x} + \beta_{wy}) \right]. \quad (49)$$

五、结 语

我们已经研究了利用薄透镜和均匀场偏转磁铁进行上述束形转换的方法。下面我们以前述常规带形束到轴对称束的转换为例，对这些方法作一简单的讨论。

利用单个薄四极透镜进行转换是最简单的方法，它的缺点是得到的轴对称束束径较大 ($\beta'_2 \approx \beta_{wy}$) 而且发散 ($\alpha'_2 < 0$)，需要另加透镜对束进行聚焦。利用薄透镜组和均匀场偏转磁铁进行转换时如果适当选择参数就可得到束径较小的轴对称会聚束。此外，如前所述，偏转磁铁可在束形转换的同时对束进行偏转与分析，一物多用。因此在很多场合人们乐于采用它。除均匀场偏转磁铁外，也可利用非均匀场偏转磁铁。例如有些磁控管型或 PIG 型负氢离子源使用 $\phi_1 = \phi_2 = 0$ ， $n = 1$ 的非均匀场偏转磁铁将引出的带形束转换为轴对称束^[4]。近来 $\phi_1 > 0$ ， $\phi_2 > 0$ ， $n < 0$ 的偏转磁铁也受到了人们的注意(有时称它为强聚焦偏转磁铁)^[5]，它的优点是磁铁重量可以比均匀场偏转磁铁轻得多。对于这种磁铁我们将另行讨论。

这一工作得到了严声清同志的帮助，特此致谢。

附录 式 (2)–(4) 中各矩阵元与离子束有关束腰的尺寸与位置的关系

考虑图 2 所示离子光学系统前后的束腰。设带形束在 x 方向的束腰半径为 X_0 ， β_x 值为 β_{wx} ，与 S 入

口之间的距离为 L_x ; y 方向的束腰半径为 Y_0 , β_y 值为 β_{wy} , 与 S 入口之间的距离为 L_y ; 轴对称束束腰半径为 R_0 , β_x 与 β_y 值为 β_{w0} , 与 T 之间的距离为 L_0 (当某一束腰在系统内为虚腰时相应的 L_x, L_y, L_0 取负值)。则

$$\begin{aligned} r_{1x} &= \frac{1}{\beta_{wx}} = \frac{\varepsilon}{X_0^2}, \quad \alpha_{1x} = -L_x r_{1x}, \quad \beta_{1x} = \frac{1}{r_{1x}} (1 + \alpha_{1x}^2), \\ r_{1y} &= \frac{1}{\beta_{wy}} = \frac{\varepsilon}{Y_0^2}, \quad \alpha_{1y} = -L_y r_{1y}, \quad \beta_{1y} = \frac{1}{r_{1y}} (1 + \alpha_{1y}^2), \\ r'_2 &= \frac{1}{\beta_{w0}} = \frac{\varepsilon}{R_0^2}, \quad \alpha'_2 = -L_0 r'_2, \quad \beta'_2 = \frac{1}{r'_2} (1 + \alpha'^2_2). \end{aligned}$$

参 考 文 献

- [1] 郁庆长, “强流离子光学原理”, 原子能出版社, 1982, 22—94.
 [2] K. Tokiguchi et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **151**(1978), 47.
 [3] R. G. Wilson, *Adv. Electronics Electron Phys.*, Suppl. **13B**(1980), 52.
 [4] G. I. Dimov et al., *IEEE Trans.*, **NS-24**(1977), 1545; P. W. Allison, *IEEE Trans.*, **NS-24**(1977), 1594.
 [5] H. F. Glavish, *Nucl. Instr. Meth.*, **189**(1981), 43.

THE MUTUAL TRANSFORMATION OF STRIP ION BEAMS AND AXISYMMETRICAL ION BEAMS

YU QING-CHANG

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

In this paper, the theory for the mutual transformations of strip ion beams and axisymmetrical ion beams is studied. The methods of the transformations by means of thin lenses and deflecting magnets are discussed.