

文章编号: 0258-7025(2007)08-1081-05

预群聚电子束团辐射特性

史宗君, 杨梓强, 梁 正

(电子科技大学高能电子学研究所, 四川 成都 610054)

摘要 研究了预群聚电子束团沿周期性理想金属光栅表面平行移动时产生的史密斯-帕塞尔辐射(SPR)。详细分析了电子束团能量、束团群聚长度、具有不同电流密度分布的电子束团以及光栅结构对辐射特性的影响,同时研究了多个群聚束团的辐射。分析发现,电子束团能量增加、束团群聚尺寸变小以及光栅周期变短,辐射能量角分布峰值所对应的频率明显向高频方向移动;光栅周期与电子束团参量相同的条件下,三角形光栅辐射能量角分布峰值所对应的频率明显高于正弦光栅;群聚束团尺寸越小辐射能量越大,并且束团的纵向群聚长度对辐射能量与辐射频率起主要作用。研究结果表明,通过合理选择光栅尺寸与束团参量,可获得工作频率锁定的太赫兹(THz)波段辐射。

关键词 光电子学;预群聚电子束团;史密斯-帕塞尔辐射;辐射能量角分布;光栅;太赫兹

中图分类号 TN 201 **文献标识码** A

Smith-Purcell Radiation from Prebunched Electron Bunches

SHI Zong-jun, YANG Zi-qiang, LIANG Zheng

(*Institute of High Energy Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054 China*)

Abstract Smith-Purcell radiation (SPR) from prebunched electron bunches moving in parallel with the surface of periodic ideal metal grating is analyzed. The influence on SPR by the energy, length, and current density distribution of electron bunches and grating structure is analyzed in detail. The radiation of multi-prebunched electron bunches is also studied. With the increase of electron bunches energy and decreases of prebunched electron bunches size and grating period, the corresponding frequency of the peak of the angular distribution of radiative energy becomes higher. For the same grating period and electron bunches parameters, triangle grating produces a higher corresponding frequency than sinusoidal grating. The less electron bunches size is, the larger the radiative energy is. The radiative energy and frequency are mainly dominated by the longitudinal length of electron bunches. Terahertz radiation will be obtained with reasonable parameters for bunches and grating.

Key words optoelectronics; prebunched electron bunches; Smith-Purcell radiation; angular distribution of radiative energy; grating; terahertz

1 引言

当电子束贴近金属光栅表面飞过,将激励起电磁辐射波^[1],其辐射波长将随观测角度变化。而近来的研究表明,其辐射功率也与观测角度有关。K. J. Woods^[2]在 60°和 72°的角度上分别测试到波

长为620 μm及1.3 mm的史密斯-帕塞尔效应的辐射功率输出。J. Urata等^[3]利用低能散度、低发射度的电子束驱动周期性光栅结构,在实验中观测到史密斯-帕塞尔效应的超辐射现象,实现了波幅的指数增长,极大地提高了辐射功率。

近年来,随着光阴极注入器及高性能射频加速

收稿日期:2006-10-23;收到修改稿日期:2007-04-04

基金项目:国家自然科学基金(60178011,60571020)资助项目。

作者简介:史宗君(1974—),女,重庆人,讲师,博士研究生,主要从事高功率微波与太赫兹技术的研究。

E-mail:shizongjun@163.com

导师简介:梁 正(1940—),男,湖南人,教授,博士生导师,目前研究方向为高功率微波与太赫兹技术。

E-mail:zqyang@uestc.edu.cn

器技术的发展,加速器本身能提供小尺寸的周期性束团,因此利用周期性的群聚束团^[4~7]产生相干辐射引起了人们的广泛兴趣。这一方面的研究已成为国内外太赫兹(THz)波段相干辐射源开发研究的热点。目前,科技工作者正在积极探索和利用周期性的群聚束团发展基于史密斯-帕塞尔效应的太赫兹波段相干辐射源。为此,本文对周期性群聚束团贴近金属光栅表面移动时的辐射情况进行了研究,特别是研究了电子束团能量、束团群聚长度、具有不同电流密度分布的电子束团以及光栅结构对辐射特性的影响。

2 物理模型

采用预群聚束团作为激励源,平行于反射光栅移动。以理想金属光栅作为反射光栅,其周期为 L ,图 1 为正弦光栅、三角形光栅与群聚电子束团作用产生史密斯-帕塞尔辐射(SPR)的基本模型,假设光栅镶嵌在真空中。群聚束团中单个电子沿光栅移动一个周期,每单位立体角内(sr)的辐射能量为^[8,9]

$$\frac{dW}{d\Omega} = \frac{e^2 n^2}{2L\epsilon_0} \frac{\cos^2\theta \cos^2\varphi}{(1/\beta - \sin\theta)^3} |R_n|^2 \exp\left(-\frac{x_0}{\lambda_e}\right), \quad (1)$$

式中 $\lambda_e = \lambda_n \frac{\beta\gamma}{4\pi \sqrt{1 + \beta^2 \gamma^2 \cos^2\theta \sin^2\varphi}}$, λ_e 为凋落波长, λ_n 为 n 阶辐射波长, $|R_n|^2$ 为 n 阶辐射效率因子, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, $\beta = v_0/c_0$, v_0 为电子的速度, c_0 为真空中的光速, x_0 为群聚束团中心与光栅的距离,本文取 $x_0 = 0.75$ mm。电子群聚束团中的 N_e 个电子

移动一个周期,每单位立体角内辐射能量为

$$\left(\frac{dW_n}{d\Omega}\right)_{N_e} = \frac{dW_n}{d\Omega} (N_e S_{\text{inc}} + N_e^2 S_{\text{coh}}), \quad (2)$$

$$S_{\text{inc}} = \int_{x_{\text{max}}}^{\infty} X(x) e^{-x/\lambda_e} dx, \quad (3)$$

$$S_{\text{coh}} = \left| \int_{x_{\text{max}}}^{\infty} X(x) e^{-x/2\lambda_e} \tilde{Y}(k_y) \tilde{Z}(\omega) dx \right|^2, \quad (4)$$

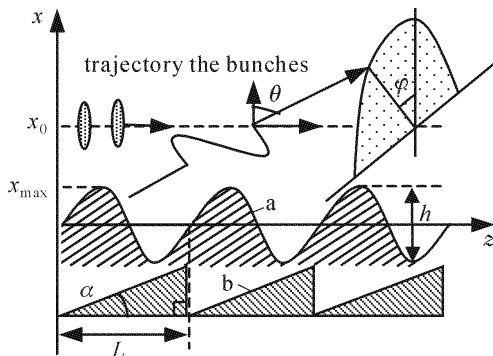


图 1 光栅结构模型图

Fig. 1 Grating structure configuration

式中 S_{inc} 与 S_{coh} 分别为束团电子产生的相干与非相干辐射因子, $\tilde{Y}(k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} Y(y) e^{-ik_y y} dy$, $\tilde{Z}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} Z(t) e^{-i\omega t} dt$, $k_y = k_0 \cos\varphi$, $k_0 = \omega(\epsilon_0 \mu_0)^{1/2}$. $X(x)$, $Y(y)$ 为电子束团横向分布函数。 $Z(t)$ 为电子束团的纵向分布函数。具有调制角频率为 ω_0 的 N_b 个束团产生的辐射为

$$\left(\frac{dW_n}{d\Omega}\right)_{\text{total}} = \left(\frac{dW_n}{d\Omega}\right)_{N_e} \left| \sum_{n=1}^{N_b} \exp(i2\pi n\omega/\omega_0) \right|^2 = \left(\frac{dW_n}{d\Omega}\right)_{N_e} \left[\frac{\sin(\pi N_b \omega/\omega_0)}{\sin(\pi \omega/\omega_0)} \right]^2. \quad (5)$$

3 群聚束团产生的史密斯-帕塞尔辐射

3.1 辐射效率因子

要分析群聚束团产生的辐射能量角分布,根据(1)式,首先必须知道电子与光栅作用产生的辐射效率因子 $|R_n|^2$ 随辐射角度的变化情况。采用积分方法^[10,11]分析了几种高能量的电子分别与正弦光栅和三角形光栅作用的辐射效率因子,本文只分析了一阶电磁波的辐射情况,并且只讨论了垂直于光栅平面的辐射情况,即 $\phi = 0^\circ$ 。图 2,图 3 为各种能量的电子与正弦型光栅和三角形光栅分别作用产生的辐射效率因子 $|R_{-1}|^2$ 随辐射角度的变化。正弦光栅结构模型见图 1,光栅深度与周期之比 $h/L = 0.17$ 。三角形光栅的几何结构如图 1b 所示,三角形光栅的倾角 $\alpha = 10^\circ$ 。角度的选择以光栅中心为起点,沿着电子团运动方向为 90° ,逆电子团运动方向为 -90° 。从图 2,3 可以看出随着电子能量的增大辐射效率因子大幅度地减小。比较图 2,图 3 可以看出辐射角度在小于 30° 的范围内,正弦光栅的辐射效率因子变化比较平稳,大于 30° 的范围内辐射效率因子变

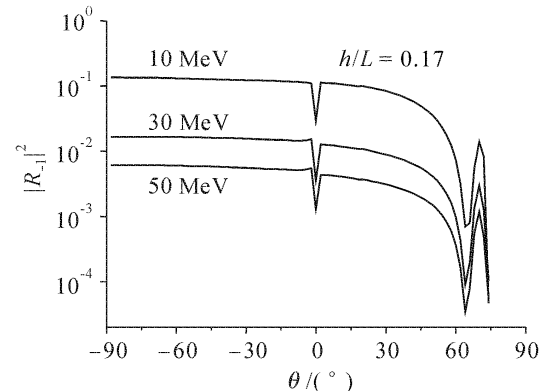


图 2 电子与正弦型光栅作用产生的辐射效率因子 $|R_{-1}|^2$

Fig. 2 Radiation efficiency $|R_{-1}|^2$ in electron-sinusoidal grating interaction for various electron energies

化比较剧烈,而三角形光栅的辐射效率因子在小于 -30° 时比较平稳,大于 -30° 时剧烈变化。两种光栅的辐射效率因子在垂直于光栅表面的 0° 位置上均出现了突变,Wood-Rayleigh^[12]认为这一现象是由于谐振的产生凋落波转化为辐射波的缘故。

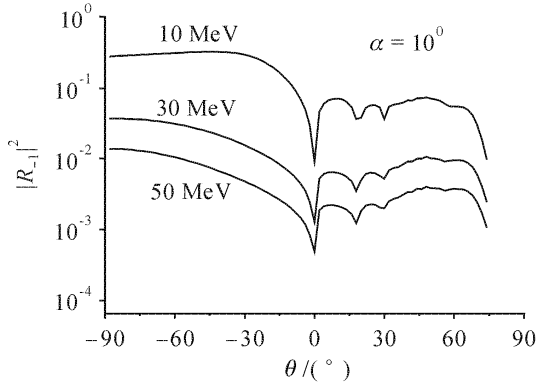


图3 电子与三角型光栅作用产生的辐射效率因子 $|R_{-1}|^2$

Fig. 3 Radiation efficiency $|R_{-1}|^2$ in electron-triangle grating interaction for various electron energies

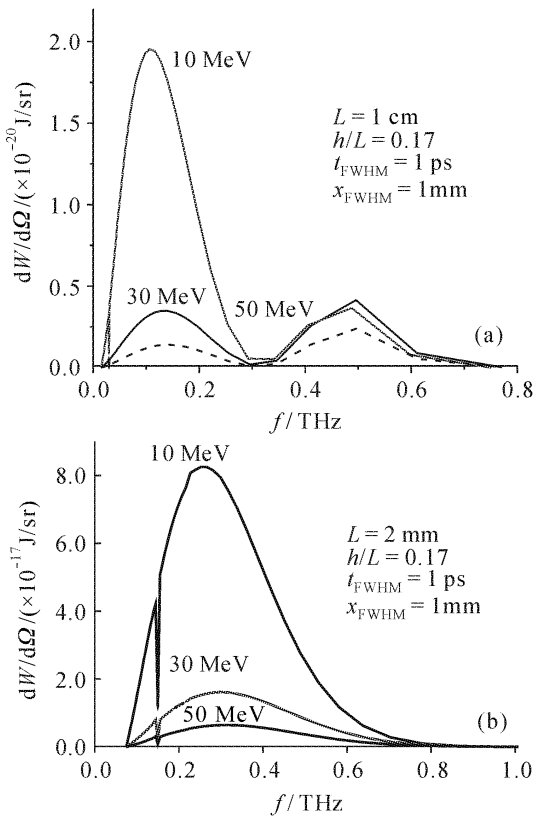


图4 各种能量的电子束团与正弦型光栅作用产生的辐射能量角分布

Fig. 4 Angular distribution of radiative energy in interaction of various energies electron bunches with sinusoidal grating

3.2 单位立体角内的辐射能量

电子与光栅作用产生辐射,其单位立体角的辐

射能量即辐射能量角分布是很重要的物理量,基于此研究了电子束团分别与正弦和三角形光栅作用产生辐射的能量角分布随频率的变化特性。图4为具有高斯分布的群聚电子束团与正弦光栅作用的辐射能量角分布,光栅深度与周期之比 $h/L=0.17$,束团纵向群聚分布 t_{FWHM} 为1 ps的半峰全宽(FWHM),横向群聚分布 x_{FWHM} 为1 mm的半峰全宽,分别计算了能量为10 MeV,30 MeV,50 MeV电子束团的辐射情况。图4(a)和(b)分别对应于光栅周期长度为1 cm,2 mm。比较图4(a),(b)可以看出,当光栅周期一定,电子束团能量增加的情况下,辐射能量角分布峰值所对应的频率向高频移动;同样能量的电子,当光栅周期变短,辐射能量角分布的峰值所对应的频率明显向高频方向移动,且带宽明显增加。图5是与图4相同的电子群聚束团参量,具有高斯分布的群聚电子束团与三角形光栅辐射能量角分布。与图4比较可以看出在三角形光栅的倾角 $\alpha=10^\circ$ 时,三角形光栅辐射能量角分布峰值所对应的频率明显高于正弦光栅。从图4,图5可以看出,这种参量条件下,辐射能量角分布峰值所对应的频率工作于太赫兹波段,并且在一定的频率范围内,

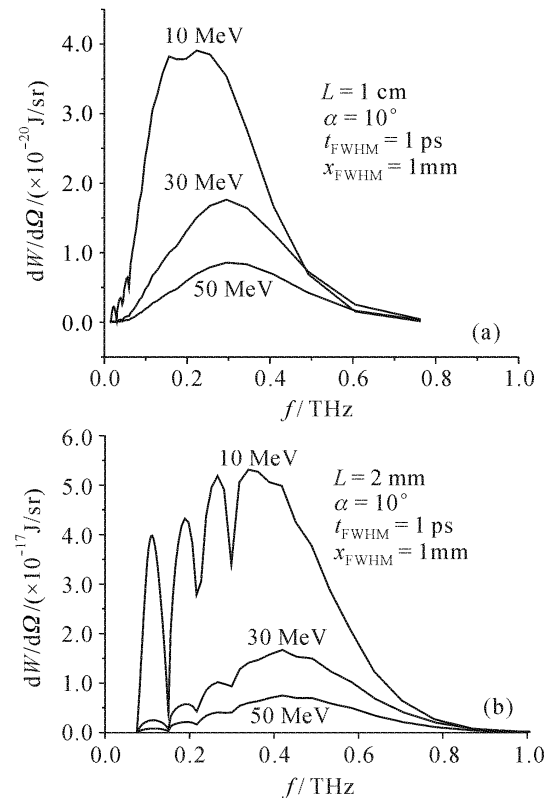


图5 各种能量的电子束团与三角形光栅作用产生的辐射能量角分布

Fig. 5 Angular distribution of radiative energy in interaction of various energies electron bunches with triangle grating

每单位立体角内的辐射能量随束团能量增加而减小。

3.3 群聚束团尺度变化对辐射特性的影响

群聚电子束团尺度大小对辐射特性有较大的影响。图6数值计算了以正弦光栅为例的不同群聚束团尺寸产生的辐射能量角分布。其中图6(a)为束团纵向长度为1 ps的情况下,束团的横向分布尺寸分别为0, 1 mm, 2.4 mm的辐射能量角分布的变化情况。从图6(a)可以看出束团横向尺寸大小的改变,辐射能量角分布几乎都在一个数量级范围内变化。图6(b)为束团横向长度为1 mm的情况下,束团的纵向分布分别为0, 1 ps, 4 ps, 8 ps(对应的纵向群聚长度分别为0, 0.3 mm, 1.2 mm, 2.4 mm)辐射能量角分布的变化情况。从图6(b)可以看出束团纵向群聚尺寸改变时,辐射能量角分布的值变化较大,束团纵向尺寸越小,辐射能量角分布对应的值越大,辐射的频率向高频方向移动,同时辐射的谱宽增加。因此可以通过缩小束团大小,特别是束团的纵向尺寸,来提高辐射能量及获得短波长的辐射。

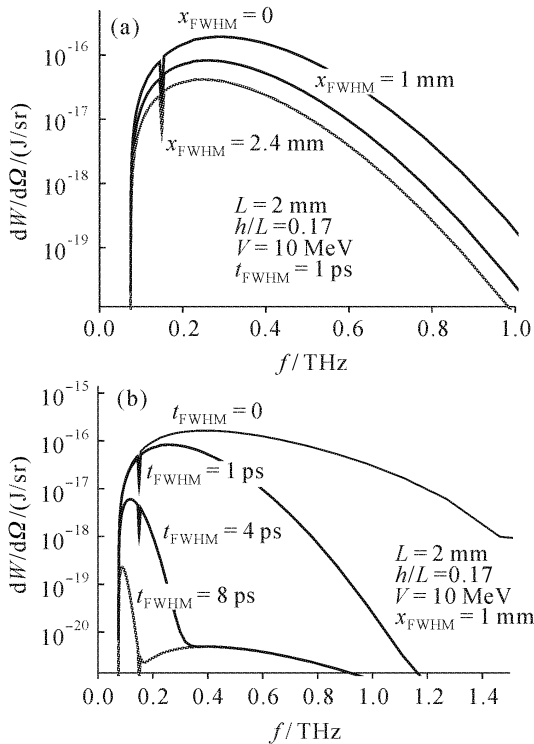


图6 不同群聚束团尺寸产生的辐射能量角分布
Fig. 6 Angular distribution of radiative energy for electron bunches of different length

3.4 群聚束团形态变化对辐射特性的影响

实际的群聚束团电子形态是很复杂的,不同的形态对辐射特性也有较大影响。图7给出了电子的纵向分布具有高斯型分布函数、矩形分布函数及正

弦分布函数的辐射情况。从图中可以看出,具有矩形分布的束团辐射能量角分布最大,其次是正弦型分布,高斯型分布最小。分析原因,具有矩形分布的一个群聚束团的半峰全宽宽度内100%的电子位于其中,而正弦型的占87%,高斯型的占76%,因此一个群聚束团的半峰全宽宽度内群聚电子越多辐射能量越大。

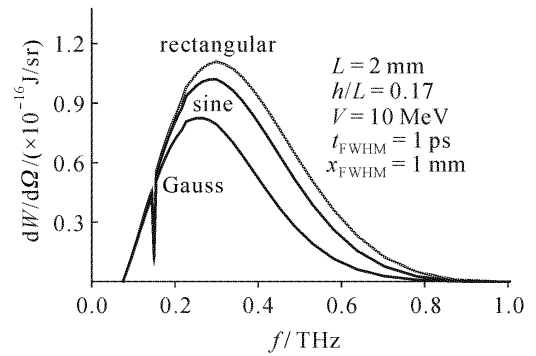


图7 不同群聚束团形状产生的辐射能量角分布
Fig. 7 Angular distribution of radiative energy for electron bunches of different shape

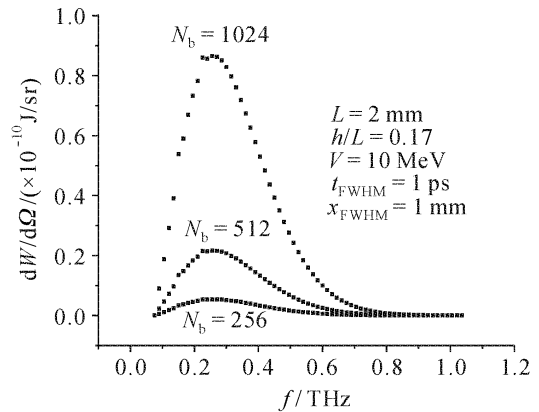


图8 N_b 个群聚束团产生的辐射能量角分布
Fig. 8 Angular distribution of radiative energy for N_b electron bunches

3.5 多个束团产生的辐射

图8为多个群聚束团调制频率为15 GHz时产生的相干辐射,辐射能量将是单个束团的 N_b^2 ,辐射谱为分离的。因此,可以通过增加群聚束团的个数来提高辐射能量以及锁定辐射的工作频率。

4 结 论

通过研究预群聚电子束团沿周期性理想金属光栅表面平行移动时产生的史密斯-帕塞尔辐射发现,电子束团能量、束团群聚长度、具有不同电流密度分布的电子束团以及光栅结构将影响史密斯-帕塞尔辐射特性。几十兆伏的电子与具有周期相同的正弦

光栅、三角形光栅作用产生的辐射效率因子与辐射能量研究表明,低能电子具有更高的辐射效率因子;同时电子与两种光栅作用产生的辐射效率因子具有相同的数量级;在同样光栅周期与电子束团参量条件下,三角形光栅辐射能量角分布峰值所对应的频率明显高于正弦光栅。通过分析具有不同电流密度分布的电子束团的辐射特性表明,束团尺寸特别是束团的纵向群聚长度越小,辐射的波长越短、能量越高。另外,可以通过增加群聚束团的个数来提高辐射能量以及锁定辐射的工作频率。研究结果表明,辐射能量和辐射波频率与选择光栅尺寸及束团参量有关,可以通过合理选择光栅尺寸与束团参量,设计出工作于太赫兹波段的相关器件。

参 考 文 献

- 1 S. J. Smith, E. M. Purcell. Visible light from localized surface charges moving across a grating [J]. *Phys. Rev.*, 1953, **92** (15):1069
- 2 K. J. Woods, J. E. Walsh, R. E. Stoner *et al.*. Forward direction Smith-Purcell radiation from relativistic electrons [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(19):3808~3811
- 3 J. Urata, M. Goldstein, M. F. Kimmitt *et al.*. Superradiation Smith-Purcell emission [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**(3): 516~519
- 4 S. E. Korbly, A. S. Kesar, J. R. Sirigiri *et al.*. Observation of frequency-locked coherent terahertz Smith-Purcell radiation [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(5):054803-1~054803-4
- 5 Chen Jiayu, Wang Minghong, Yang Ziqiang *et al.*. Novel Smith-Purcell tunable radiation source [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11):1289~1292
陈嘉钰,王明红,杨梓强 等. 新型史密斯-帕塞尔效应可调辐射源研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11):1289~1292
- 6 Avi Gover. Superradiant and stimulated-superradiant emission in prebunched electron-beam radiators. I. Formulation [J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2005, **8**(3):030701-1~030701-15
- 7 A. Gover, E. Dyunin, Y. Lurie *et al.*. Superradiant and stimulated-superradiant emission in prebunched electron-beam radiators. II. Radiation enhancement schemes [J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2005, **8**(3): 030702-1~030702-17
- 8 A. Gover, P. Dvorkis, U. Elisha. Angular radiation pattern of Smith-Purcell radiation [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1984, **1**(5): 723~728
- 9 O. Haeberle, P. Rullhusen, L.-M. Salome *et al.*. Smith-Purcell radiation from electrons moving parallel to a grating at oblique incidence to the rulings [J]. *Phys. Rev. E*, 1997, **55** (4):4675~4683
- 10 P. M van den Berg. Smith-Purcell radiation from a line charge moving parallel to a reflecting grating [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1973, **63**(6):689~698
- 11 P. M. van den Berg. Diffraction theory of a reflection grating [J]. *Appl. Sci. Res.*, 1971, **24**(6):261~293
- 12 R. Petit, L. C. Botten, M. Cadilhac *et al.*. *Electromagnetic Theory of Gratings* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1980. 160~201