

基于三端口网络模型的折叠波导行波管注波相互作用理论研究

颜卫忠 胡玉禄 李建清 杨中海 田云先 李斌

Research on the beam-wave interaction theory of folded waveguide traveling wave tubes based on three-port network model

Yan Wei-Zhong Hu Yu-Lu Li Jian-Qing Yang Zhong-Hai Tian Yun-Xian Li Bin

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 63, 238403 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.238403

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.238403>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/volumn/home.shtml>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[0.14THz 基模多注折叠波导行波管的理论与模拟研究](#)

颜胜美, 苏伟, 王亚军, 徐翱, 陈樟, 金大志, 向伟

2014, 63(23): 238404. 全文: [PDF](#) (1139KB)

[亚太赫兹波折叠波导扩展相互作用振荡器研究](#)

张开春, 吴振华

2013, 62(2): 024103. 全文: [PDF](#) (4413KB)

[一种折叠波导行波管大信号相互作用理论](#)

殷海荣, 徐进, 岳玲娜, 宫玉彬, 魏彦玉

2012, 61(24): 244106. 全文: [PDF](#) (1551KB)

[利用等效电路模型计算耦合腔行波管注-波相互作用](#)

白春江, 李建清, 胡玉禄, 杨中海, 李斌

2012, 61(17): 178401. 全文: [PDF](#) (526KB)

[变周期大结构低压工作折叠波导行波管的理论与模拟研究](#)

胡权

2012, 61(1): 014101. 全文: [PDF](#) (1095KB)

基于三端口网络模型的折叠波导行波管注波 相互作用理论研究^{*}

颜卫忠 胡玉禄 李建清 杨中海 田云先 李斌[†]

(电子科技大学物理电子学院, 微波电真空器件国家级重点实验室, 成都 610054)

(2014 年 6 月 26 日收到; 2014 年 7 月 22 日收到修改稿)

将周期性慢波结构中的单元结构等效为一个三端口网络, 利用高频结构模拟软件确定等效模型的参数, 由此建立了一种通用的慢波结构等效模型. 该方法不需要进行复杂的电路等效, 直接由高频软件得到通道内场分布, 因此较解析方法简单, 又不像等效线路模型那么烦琐. 基于该三端口网络模型, 建立了适用于折叠波导行波管的一维注波相互作用非线性理论模型, 编写了数值计算程序, 对一支折叠波导行波管进行了模拟. 该理论模型模拟的结果与实验结果误差小于 10%. 该理论模型可以用于指导新型折叠波导行波管的设计及非线性模拟研究.

关键词: 折叠波导, 行波管, 三端口网络, 注波相互作用

PACS: 84.40.Fe, 41.75.-i

DOI: 10.7498/aps.63.238403

1 引言

利用折叠波导作为慢波结构的行波管, 可以实现高频率、大功率及宽频带下的毫米波放大. 这些结构兼具耦合腔结构的功率容量大以及螺旋线结构的宽频带的优势^[1], 所以受到了研究者的重视^[2,3].

但对折叠波导非线性理论的研究报道甚少. Na 等^[4]利用 Magic3D 软件对折叠波导的非线性特性进行了研究. Booske 等^[5]将实测(或理论)模拟得到的相速度及耦合阻抗输入到 CHRISTINE 1D^[6]软件中, 能够模拟折叠波导行波管的小信号及大信号增益. 在国内, 殷海荣等^[7]基于速度调制理论, 建立了一种适用于折叠波导行波管的大信号理论, 与粒子模拟结果相比, 该大信号程序所预言的输出功率误差在 10% 以内, 饱和长度误差在 15% 以内. Peng 等^[8]从能量守恒定律出发建立了通用的高频场方程, 能够模拟包括折叠波导行波管在内的多种管型. 最近, Chernin 等^[9]将一种传输线模

型用于折叠波导行波管的相互作用计算, 并已将代码集成于行波管软件 CHRISTINE 中.

本文将周期结构中的单元结构等效为一个三端口网络, 建立了高频场方程, 再结合粒子运动方程和相位方程, 建立了自洽的注波相互作用非线性理论模型. 三端口网络模型描述了腔体与腔体、腔体与电子注之间的耦合, 能够表征腔体间功率的传输及电磁场与电子注换能的过程. 该模型与腔体内部结构无关, 可以处理复杂的慢波结构, 具有通用性. 本文由高频软件得到场分布, 再通过三端口网络求解场幅值, 与场的解析方法^[10-12]相比, 能够处理更复杂的结构^[13]. 此外, 与常见的等效电路模型^[14]相比, 无须建立复杂的线路模型. 本文以一支折叠波导行波管为例, 对中心频率处的注波相互作用进行了模拟. 同时, 还模拟了频带范围内的饱和输出功率和增益, 并与实验结果对比, 饱和输出功率相对误差小于 1 dB, 增益相对误差小于 10%. 基于该理论模型编写的注波相互作用计算程序, 相对于粒子模拟方法耗时更短, 可以缩短折叠波导行波管的设计周期.

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60931001, 61201003, 61071030, 61301054)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: libin@uestc.edu.cn

2 物理模型

2.1 等效模型

行波管一般为周期性慢波结构, 其中的单元结构可以等效为一个线性网络. 该线性网络通过若干个端口与外部相连, 其内部特性由矩阵元素表征. 折叠波导慢波结构可以用一个三端口网络模型^[15]等效, 如图1所示. 图中 $V_{b,j}$ 为第 j 个腔的间隙电压; $V_{i,j}$ 和 $V_{o,j}$ 分别为第 j 个腔的输入端口和输出端口的电压; $I_{b,j}$, $I_{i,j}$, $I_{o,j}$ 分别为对应端口的电流.

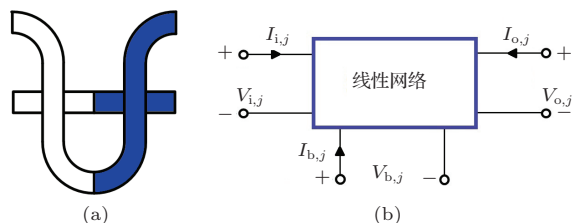


图1 折叠波导慢波结构等效模型 (a) 折叠波导慢波结构图; (b) 三端口网络等效模型

三端口网络的阻抗矩阵满足如下关系:

$$\begin{bmatrix} V_i \\ V_o \\ V_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ii} & Z_{io} & Z_{ib} \\ Z_{oi} & Z_{oo} & Z_{ob} \\ Z_{bi} & Z_{bo} & Z_{bb} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_i \\ I_o \\ I_b \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, Z_{ii} 等为阻抗矩阵的元素. 根据互易性及对称性, 有

$$Z_{io} = Z_{oi}, \quad Z_{ib} = Z_{bi}, \quad Z_{bo} = Z_{ob}, \quad (2)$$

$$Z_{ii} = Z_{oo}, \quad Z_{ib} = -Z_{ob}, \quad (3)$$

在冷腔情况 ($I_b = 0$) 下, 由Floquet定理可得 $Z_{ii} = Z_{io} \cos \theta$, 其中 θ 为单周期相移. 定义 Z_{ch} 为线路输入端的匹配阻抗,

$$V_i = Z_{ch} I_i, \quad (4)$$

其中, $Z_{ch} = i Z_{io} \sin \theta$, i 为虚数单位.

相互作用阻抗 K 反映了间隙电压与功率之间的关系. 其定义如下:

$$K = \frac{|V_b|^2}{2P}, \quad (5)$$

其中 P 为传输的功率. 同理, 可得

$$K = \frac{2|Z_{ib}|^2}{Z_{ch}} (1 - \cos \theta). \quad (6)$$

阻抗元素 Z_{bb} 可以在腔体谐振条件下将两端短路, 此时短路腔可以等效为一个RLC并联线路,

故

$$Z_{bb} = \frac{R_{sh}/Q}{1/Q + i \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} - i \frac{K}{\sin \theta}, \quad (7)$$

其中, ω 为信号的角频率; ω_0 为谐振角频率; $R_{sh}/Q = V_b V_b^*/(2U\omega_0)$, 为腔特性阻抗, U 为储能, $Q = \text{Re}(\omega)/2\text{Im}(\omega)$, 为品质因数, Re 和 Im 分别表示取实部和虚部操作.

至此, 确定了全部阻抗元素.

2.2 矩阵方程

由于腔体前后相连, 所以有 $I_{o,j} = -I_{i,j+1}$, $V_{o,j} = V_{i,j+1}$, 省略下标 i , 有

$$\begin{aligned} V_{b,j} &= Z_{bi,j} I_j - Z_{bo,j} I_{j+1} + Z_{bb,j} I_{b,j}, \\ V_j &= Z_{ii,j} I_j - Z_{io,j} I_{j+1} + Z_{ib,j} I_{b,j}, \\ V_{j+1} &= Z_{oi,j} I_j - Z_{oo,j} I_{j+1} + Z_{ob,j} I_{b,j}. \end{aligned} \quad (8)$$

输入端电流与电压存在如下关系:

$$I_j = \frac{V_d - V_j}{Z_{c,j}} = \frac{V_{\text{ext},j} - V_j}{Z_{c,j}}, \quad (9)$$

其中, V_d , $V_{\text{ext},j}$ 为输入的电压源; $Z_{c,j}$ 为腔体端口的特性阻抗. 所以

$$V_j = V_{\text{ext},j} - I_j Z_{c,j}. \quad (10)$$

输出端电流与电压存在如下关系:

$$V_{j+1} = Z_{c,j} I_{j+1}, \quad (11)$$

将(10), (11)式代入(8)式, 并考虑衰减, 写成如下单腔矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} (Z_{c,j} + Z_{ii,j}) e^{-\alpha_j} & -Z_{io,j} e^{-\alpha_j} & Z_{ib,j} e^{-\alpha_j} \\ Z_{oi,j} & -(Z_{oo,j} + Z_{c,j}) & Z_{ob,j} \\ Z_{bi,j} e^{-\alpha_j} & -Z_{bo,j} e^{-\alpha_j} & Z_{bb,j} e^{-\alpha_j} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_j \\ I_{j+1} \\ I_{b,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\text{ext},j} \\ 0 \\ V_{b,j} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其中 α_j 为第 j 个腔的衰减常数.

假设单腔矩阵表示第 j 个腔, $V_{\text{ext},j} = \sqrt{8P_{\text{in},j} Z_{c,j}}$, $P_{\text{in},j}$ 为输入功率, 所以

$$\begin{aligned} V_{\text{ext},j+1} &= \sqrt{\frac{Z_{c,j+1}}{Z_{c,j}}} V_{\text{ext},j} \\ &= \sqrt{\frac{Z_{c,j+1}}{Z_{c,j}}} (Z_{oi,j-1} I_{j-1} - Z_{oo,j-1} I_j \\ &\quad + Z_{ob,j-1} I_{b,j-1} + Z_{c,j} I_j), \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $Z_{c,j}$, $Z_{c,j+1}$ 为相邻的两个腔体的端口特性阻抗. (13) 式揭示了前后两个腔的外加电压源之间的关系.

2.3 高频场

高频场^[16]可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} & \langle \hat{z} \cdot E_{\text{rf},z}(z, t) \rangle_{\text{beam}} \\ &= V_{b,j} e_{z,j}(z) e^{-i\omega t} + \text{c.c.}, \end{aligned} \quad (14)$$

其中, 高频场幅值由间隙电压 $V_{b,j}$ 表示, $e_{z,j}(z)$ 为归一化轴向场分布, c.c. 表示共轭.

$$e_{z,j}(z) = \frac{E_{z,j}^{\text{ei}}(z)}{\sqrt{2K_j P_j^{\text{ei}}}}, \quad (15)$$

其中, $E_{z,j}^{\text{ei}}(z)$, P_j^{ei} 分别表示第 j 个腔的本征轴向场分布及本征功率.

2.4 源电流

由矩阵方程可以确定间隙电压, 进而得到高频场. 在此, 我们引入源电流的定义, 表征相互作用过程中电子注受高频场调制所产生的高频电流:

$$I_{b,j} = I \int_{\text{gap},j} dz e_j^*(z) \langle e^{i\omega t(z)} \rangle, \quad (16)$$

式中, I 为电子注电流, $\langle \cdot \rangle$ 表示一个信号周期内所有电子的平均, $I_{b,j}$ 为第 j 个腔对应间隙的端口电流.

3 数值模拟结果

3.1 模拟流程

互作用模拟流程如图 2 所示. 首先由矩阵方程

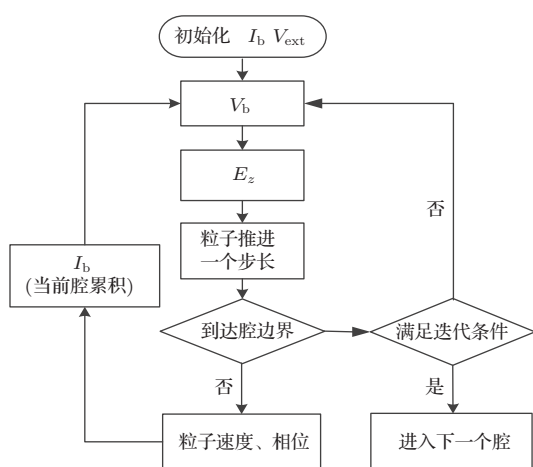


图 2 互作用模拟流程

求得间隙电压 V_b , 进而得到高频场. 再结合粒子运动方程和相位方程, 得到新位置的粒子状态. 将新的粒子信息代入到源电流 I_b 表达式, 得到新的高频电流, 再代入矩阵方程, 得到新的间隙电压 V_b , 如此循环. 当粒子到达边界且间隙电压满足收敛条件时, 结束当前腔体的模拟, 进入下一个腔体.

3.2 模拟结构

本文以一支 W 波段折叠波导行波管^[17]为例进行互作用模拟研究. 图 3 为折叠波导结构图, 该行波管的同步电压为 16.5 kV, 电子注电流为 50.0 mA, 电子注填充比为 0.3.

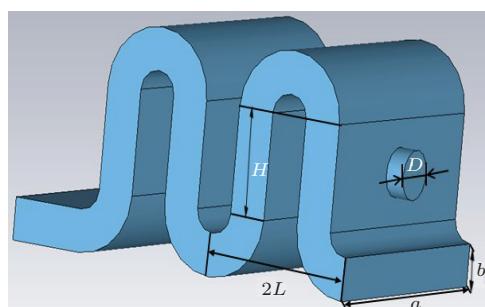


图 3 折叠波导结构

3.3 模拟结果及验证

3.3.1 单频计算

本文计算了 94 GHz 中心频率处输出功率、电子相位以及相对论因子情况, 结果如图 4 所示. 图 4(a) 为该频率下输出功率随轴向位置的变化, 图 4(b) 为电子相位随轴向位置的变化, 图 4(c) 为电子的相对论因子随轴向位置的变化. 从图 4 可以看出, 注波相互作用越强烈, 电子失去能量越多, 输出功率越大.

3.3.2 饱和输出功率及增益

利用一维互作用程序计算了 91.5—96.5 GHz 频率范围内的饱和输出功率及增益, 结果如图 5 和图 6 所示. 为了与实测结果比较, 我们设置输出窗的耦合损耗为 1.5 dB.

图 5 为工作频带内的饱和输出功率情况, 图 6 为工作频带内的增益情况. 从图 5 和图 6 可以发现, 饱和输出功率的模拟值与实验测量值的相对误差小于 1 dB, 饱和增益相对误差小于 10%. 该理论模型并未考虑返波、反射等影响, 这导致了频

带范围内的模拟值较实验值偏大, 后续工作将对此进行研究.

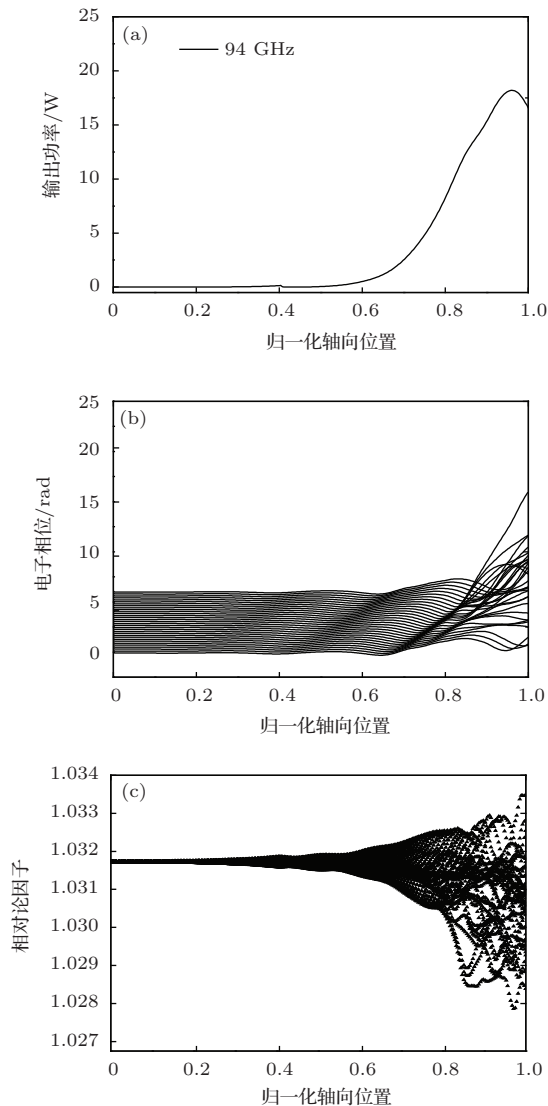


图4 94 GHz处饱和功率计算结果 (a) 输出功率随轴向位置的变化; (b) 电子相位随轴向位置的变化; (c) 电子相对论因子随轴向位置的变化

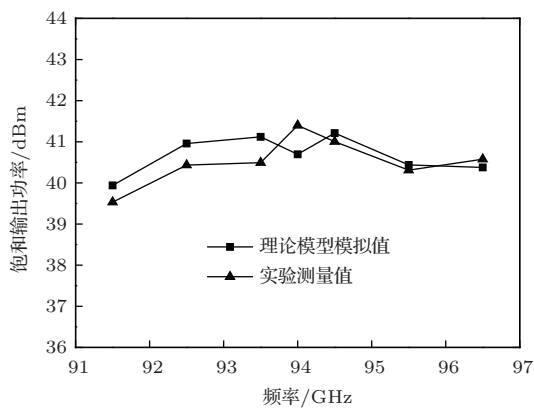


图5 饱和输出功率比较

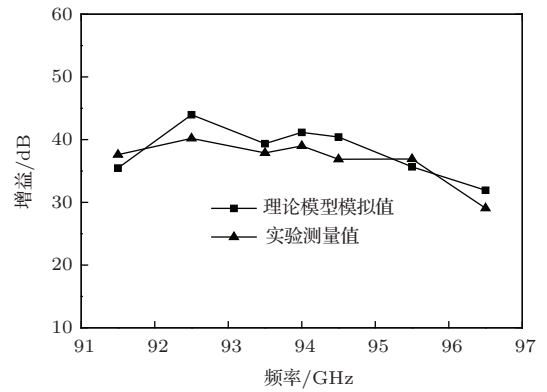


图6 增益比较

4 结 论

本文建立了适用于折叠波导行波管的等效模型, 利用编写的一维注波相互作用程序对一支折叠波导行波管进行了模拟, 并与实验测量结果比较, 饱和输出功率的相对误差小于1 dB, 增益相对误差小于10%. 该理论模型可以用于指导新型折叠波导行波管的设计及非线性模拟研究. 该理论模型也可以用于其他新型慢波结构的行波管, 后续工作将对其进行讨论.

感谢中国电子科技集团第十二研究所冯进军研究员、邬显平研究员、胡银富高工提供的帮助.

参考文献

- [1] Antonsen T M, Vlasov A N, Chernin D P, Chernyavskiy I A, Levush B 2013 *IEEE Trans. Electron Dev.* **60** 2906
- [2] Liu S K 1995 *Int. J. Infrared Milli. Waves* **16** 809
- [3] Liu S K 2000 *Int. J. Infrared Milli. Waves* **21** 655
- [4] Na Y H, Chung S W, Choi J J 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 1017
- [5] Booske J H, Converse M C, Kory C L, Chevalier C T, Gallagher D A, Kreischer K E, Heinen V O, Bhattacharjee S 2005 *IEEE Trans. Electron Dev.* **52** 685
- [6] Cooke S J, Mondelli A A, Levush B, Antonsen T M, Chernin D P, McClure T H, Whaley D R, Basten M 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 841
- [7] Yin H R, Xu J, Yue L N, Gong Y B, Wei Y Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 244106 (in Chinese) [殷海荣, 徐进, 岳玲娜, 宫玉彬, 魏彦玉 2012 物理学报 **61** 244106]
- [8] Peng W F, Hu Y L, Cao Z, Yang Z H 2013 *Prog. Electromagn. Res. M* **28** 73
- [9] Chernin D, Antonsen T M, Vlasov A N, Chernyavskiy I A, Nguyen K T, Levush B 2014 *IEEE Trans. Electron Dev.* **61** 1699
- [10] Kosmahl H G, Branch G M 1973 *IEEE Trans. Electron Dev.* **20** 621

- [11] Hu Y L, Yang Z H, Li J Q, Li B, Gao P, Jin X L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6665 (in Chinese) [胡玉禄, 杨中海, 李建清, 李斌, 高鹏, 金晓林 2009 物理学报 **58** 6665]
- [12] Peng W F, Hu Y L, Yang Z H, Li J Q, Lu Q R, Li B 2011 *Chin. Phys. B* **20** 078401
- [13] Lai J Q, Wei Y Y, Liu Y, Huang M Z, Tang T, Wang W X, Gong Y B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 068403
- [14] Curnow H J 1965 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **13** 671
- [15] Kino G S, Hiramatsu Y, Harman W A, Ruetz J A 1967 *Microwave and Optical Generation and Amplification* (London: Institution of Electrical Engineers) p49
- [16] Bai C J, Li J Q, Hu Y L, Yang Z H, Li B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 178401 (in Chinese) [白春江, 李建清, 胡玉禄, 杨中海, 李斌 2012 物理学报 **61** 178401]
- [17] Hu Y F, Feng J J, Cai J, Du Y H, Tang Y, Wu X P 2011 *IEEE International Vacuum Electronics Conference* Bangalore, India, February 21–24, 2011 p21

Research on the beam-wave interaction theory of folded waveguide traveling wave tubes based on three-port network model*

Yan Wei-Zhong Hu Yu-Lu Li Jian-Qing Yang Zhong-Hai Tian Yun-Xian Li Bin[†]

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 26 June 2014; revised manuscript received 22 July 2014)

Abstract

A general equivalent model for slow-wave structure is established in this paper, if the unit cell of the periodic slow-wave structures is represented by a three-port network and the parameters of the equivalent model are determined by a high frequency structural simulator. In this method, there is no need to find a complicated equivalent circuit, and the fields in the tunnels can be calculated by the high frequency software directly. Therefore, the three-port network model is simpler than the analytic method and no more complex than the common equivalent circuit model. A one-dimensional nonlinear beam-wave interaction theory suitable for the folded-waveguide traveling wave tubes (TWTs) is accomplished based on the three-port network model. And a one-dimensional nonlinear beam-wave interaction code, which complies with the MATLAB language, is used to simulate a folded-waveguide TWT. The difference between the results obtained from the code and the experimental data is less than 10%. This theory can be used in the design of novel folded-waveguide TWTs and research on nonlinear simulations.

Keywords: folded-waveguide, traveling wave tubes, three-port network, beam-wave interaction

PACS: 84.40.Fe, 41.75.-i

DOI: 10.7498/aps.63.238403

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60931001, 61201003, 61071030, 61301054).

[†] Corresponding author. E-mail: libin@uestc.edu.cn