

均匀磁化等离子体与雷达波相互作用的 数值分析^{*}

唐德礼 孙爱萍 邱孝明

(核工业西南物理研究院, 成都 610041)

(2001 年 10 月 19 日收到 2001 年 12 月 9 日收到修改稿)

采用平板几何对不同磁场强度下等离子体对电磁波的吸收、反射和透射特性进行了数值分析. 结果表明, 不同磁场可以显著改变等离子体对不同频率的雷达波的吸收和反射特性. 当雷达波频率接近等离子体高混杂频率时, 磁化等离子体将对该波产生强的共振吸收, 带宽在 2GHz 左右, 吸收比可达 90% 以上. 因此, 通过适当调整磁场强度、等离子体密度和碰撞频率, 可实现较宽雷达波段的等离子体隐身.

关键词: 电磁波, 磁化等离子体, 共振吸收, 等离子体隐身

PACC: 4225B, 5240D

1. 引言

在等离子体物理及其应用, 电磁波与等离子体相互作用一直是一个十分有意义的研究课题^[1,2]. 在磁约束核聚变研究中, 人们主要研究电磁波在热等离子体中的传输特性^[3]. 20 世纪 90 年代以后, 越来越多的人开始研究将等离子体作为电磁波的吸收或反射体^[4-10], 即研究弱电离的冷等离子体中电磁波的吸收、反射和透射特性. 例如, 美国的 Vidmar^[4]研究了雷达波与大气等离子体的相互作用, 并首次使用了等离子体隐身这个术语. Laroussi 等^[7,8]从理论和实验两方面探讨了电磁波在磁化非均匀等离子体中的传输特性. Koretzky 等^[9]从理论和实验上研究了等离子体炬产生的高密度等离子体能有效地衰减电磁波以及其在等离子体隐身方面的潜在应用. 1999 年初, 俄罗斯克尔德什科学研究中心研制出了第三代飞机等离子体隐身系统^[11]. 目前, 等离子体隐身技术已成为国际上十分热门的研究课题. 刘明海等^[10]研究了电磁波在均匀非磁化大气等离子体中的衰减与等离子体密度和碰撞频率的关系. 我们以前的工作^[12,13]表明磁化均匀等离子体比磁化非均匀等离子体能更有效地衰减雷达波.

总之, 已往的研究或是没有磁场或是没有分析不同磁场强度下等离子体对电磁波的衰减. 所以已往的研究中, 等离子体对电磁波的吸收频带不够宽. 飞机隐身系统的作用主要是让飞机不被雷达所发现, 即必须尽可能降低雷达的目标有效截面 (RCS)^[14]. 等离子体隐身的基本原理是利用电磁波与等离子体的相互作用, 即电磁波在等离子体中传播所产生的吸收、反射和折射等现象, 使入射电磁波能量大幅衰减, 从而大幅度降低反射电磁波能量和雷达的 RCS. 已往的研究表明, 利用等离子体来吸收或衰减某一频率段的电磁波是有效的. 然而, 为了对付日益发展的隐身技术, 某些反隐身的超宽带 (UWB) 雷达被发展起来. 与常规雷达波一个脉冲中只有一个波长不同, 超宽带雷达发射的一个短的脉冲中就包含了许多个波长. 因此, 这给隐身技术提出了更高的要求, 必须在较宽的频带范围内吸收雷达波.

本文从数值分析着手, 探讨了采用不同磁场强度, 使均匀等离子体在较宽的频率范围内吸收雷达波的可能性. 通过调整磁场强度和等离子体参量, 计算了雷达波从真空进入厚度为 L 的均匀等离子体平板所产生的吸收、反射和透射结果.

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 10005001) 资助的课题.

2. 电磁波与等离子体相互作用

我们假定如图 1 所示的一束平面电磁波入射到厚度为 L 的均匀磁化等离子体板, 磁场方向平行于等离子体平板. 功率为 P_i 的平面电磁波从真空中垂直入射到等离子体平板内, 电磁波在 $z=0$ 被等离子体部分反射, 剩余的被等离子体吸收和透射出去. 反射、吸收和透射的电磁波功率分别用 P_r, P_a, P_t 表示. 我们知道, 处于雷达波段的电磁波的频率远大于等离子体离子频率, 因此我们忽略离子的运动, 只需要考虑在雷达波作用下等离子体内自由电子的运动. 同时, 由于等离子体中电子的运动速率远小于真空中的光速, 所以磁场力远小于电场力, 因此磁化等离子体中的磁导率为真空磁导率 μ_0 . 在无外加电荷和电流密度的情况下, 电磁波在等离子体等色散媒质中的传播遵循以下麦克斯韦方程组^[7]:

$$\begin{aligned}\nabla \times E &= -j\omega\mu_0 H, \\ \nabla \times H &= (\sigma + j\omega\epsilon_r\epsilon_0) E,\end{aligned}\quad (1)$$

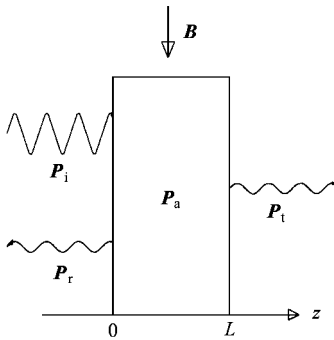


图 1 电磁波传播示意图

式中 E 为电场强度, H 为磁场强度, ω 为电磁波角频率, μ_0 为真空磁导率, σ 为电导率, ϵ_r 为等离子体的相对介电常量, ϵ_0 为真空介电常量. 在外场作用下, 等离子体中的自由电子产生定向电流, 从而有电流密度 $J = \sigma E$. 在此, 我们将方程 (2) 改写为

$$\nabla \times H = j\omega\tilde{\epsilon}_r\epsilon_0 E, \quad (3)$$

式中 $\tilde{\epsilon}_r$ 为外场中等离子体的复相对介电常量. 由方程 (1) 和 (3) 可得等离子体中的波方程为

$$\nabla^2 E = \frac{\tilde{\epsilon}_r}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad (4)$$

式中 c 为光速. 我们假设电磁波沿 z 方向传播. 因此平面电磁波在等离子体中传播的波方程 (4) 有如下解:

$$E = E_0 \exp(j\omega t - \tilde{\gamma} z), \quad (5)$$

式中 $\tilde{\gamma}$ 为电磁波的复传播常量. 由方程 (4) 和 (5) 可得到电磁波在等离子体中的色散关系

$$\tilde{\gamma}^2 = -\tilde{\epsilon}_r \frac{\omega^2}{c^2}. \quad (6)$$

一般地, 我们将传播常量 $\tilde{\gamma}$ 表示为

$$\tilde{\gamma} = \alpha + j\beta, \quad (7)$$

式中 α 被称为衰减常量, β 被称为相位常量. 不难看出

$$\alpha = -\frac{\omega}{c} \text{Im}(\sqrt{\tilde{\epsilon}_r}), \quad (8)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \text{Re}(\sqrt{\tilde{\epsilon}_r}). \quad (9)$$

我们假设平面电磁波的入射功率为 P_i , 垂直进入磁化均匀等离子体中. 由于均匀等离子体中不存在电磁波反射, 因此只在界面有反射. 反射功率 P_r 由下式给出^[15]:

$$P_r = P_i \left| \frac{1 - \sqrt{\tilde{\epsilon}_r}}{1 + \sqrt{\tilde{\epsilon}_r}} \right|^2. \quad (10)$$

在等离子体中某一点 z 处, 电磁波的功率为

$$P(z) = (P_i - P_r) \exp(-2\alpha z). \quad (11)$$

可见, 电磁波在等离子体中是衰减的, 在厚 L 的等离子体平板中的衰减量可由下式表示:

$$A(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_i - P_r}{P(L)} = 20\alpha L \log e. \quad (12)$$

电磁波经过等离子体平板后透射出去的功率 P_t 为

$$P_t = P(L) = (P_i - P_r) \exp(-2\alpha L). \quad (13)$$

那么, 电磁波被磁化等离子体吸收的功率 P_a 为

$$P_a = P_i - P_r - P_t. \quad (14)$$

通过以上公式我们可以看出, 只要知道磁化等离子体的复相对介电常量, 就可以计算出电磁波在磁化等离子体中传播所产生的反射、吸收和透射情况. 在磁化均匀等离子体中, 电子除受到电场力和中性气体作用外, 还受到外加磁场 B 的作用. 因此, 其复介电常量与电磁波、等离子体频率、等离子体碰撞频率和电子回旋频率都有关. Appleton^[16] 给出了平面电磁波以任意角度入射冷等离子体的复相对介电常量式中 ω_p 为等离子体频率, ω_{ce} 为电子回旋频率, ν_{en} 为等离子体碰撞频率, θ 为电磁波传播方向与磁场方向的夹角. (15) 式中符号“ $\pm$ ”中的“ $-$ ”号表示右旋偏振, “ $+$ ”号表示左旋偏振. Laroussi 等^[7] 的研究表明, θ 越小, 电磁波的反射和吸收功率越大, 透射功率减小. 为简单起见, 此处我们假定为垂直入射,

$$\tilde{\epsilon}_r = 1 - \frac{\frac{\omega_p^2}{\omega^2}}{\left[1 - j \frac{v_{en}}{\omega} - \frac{\frac{\omega_{ce}^2}{\omega^2} \sin^2 \theta}{2 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} - j \frac{v_{en}}{\omega} \right)} \right] \pm \left[\frac{\frac{\omega_{ce}^4}{\omega^4} \sin^4 \theta}{4 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} - j \frac{v_{en}}{\omega} \right)^2} + \frac{\omega_{ce}^2}{\omega^2} \cos^2 \theta \right]^{1/2}}, \quad (15)$$

所以 $\theta = 90^\circ$. 从 (15) 式中不难看出, 如考虑左旋偏振, 当 $\theta = 90^\circ$ 时, $\tilde{\epsilon}$ 中无 ω_{ce} 项. 这表明复介电常量与磁场无关, 此时的等离子体与非磁化等离子体相似. 另外, 左旋偏振与电子在磁场中的右旋特性相反, 左旋偏振波在等离子体中将没有共振发生. 这也显示出它将不受磁场的影响. 因此, 此处我们只考虑右旋偏振. 平面电磁波垂直入射到磁化均匀冷等离子体的复相对介电常量为

$$\tilde{\epsilon}_r = 1 - \frac{\frac{\omega_p^2}{\omega^2}}{\left[1 - j \frac{v_{en}}{\omega} - \frac{\frac{\omega_{ce}^2}{\omega^2}}{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} - j \frac{v_{en}}{\omega}} \right]}. \quad (16)$$

一般地, 在磁约束等离子体中垂直于磁场传播的右旋偏振电磁波称为非寻常波. 对于无碰撞的磁化等离子体, 以波数表示的非寻常波的色散关系为^[17]

$$\frac{c^2 \kappa^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2 (\omega^2 - \omega_p^2)}{\omega^2 (\omega^2 - \omega_h^2)}, \quad (17)$$

式中 $\omega_h^2 = \omega_{ce}^2 + \omega_p^2$ 称为高混杂频率. 从上式中不难看出, 当 $\omega \rightarrow \omega_h$ 时, $\kappa \rightarrow \infty$. 即当电磁波频率处于高混杂频率时, 波长将趋向于零, 这表明产生了共振. 此时等离子体对电磁波的吸收达到最大, 这被称为高混杂共振吸收. 可以推断, 对磁化碰撞等离子体, 当碰撞频率远低于电磁波频率时, 高混杂共振吸收仍应起主要作用. 对于不同频率段的雷达波, 可以通过调整磁场强度和等离子体密度等参量而使其达到共振吸收.

3. 数值结果与分析

我们知道, 雷达波的波长范围很宽, 长可达米波, 短可达毫米波. 相应的频率范围可从 0.1 到 24GHz, 甚至更宽. 常规的雷达工作在单一波长. 从上一节我们知道磁化等离子体的复介电常量与电磁波的频率有关. 因此, 对于不同频率段的雷达波, 它与等离子体相互作用的结果也将不同. 此处, 我们选雷达波频率为 $f = 1\text{--}20\text{GHz}$. 通过气体放电产生的

大气等离子体的密度可达到 10^{16} 到 10^{19}m^{-3} 之间, 我们考虑均匀碰撞等离子体, 等离子体密度取 $n = (10^{15}\text{--}10^{19})\text{m}^{-3}$, 等离子体碰撞频率取 $f_{en} = (0.1\text{--}10)\text{GHz}$, 外加磁场的磁感应强度 $B = (0.1\text{--}0.5)\text{T}$, 等离子体平板厚度为 $L = 10\text{cm}$.

首先, 我们计算了不同等离子体密度下, 雷达波垂直入射到磁化均匀等离子体中, 在界面所发生的反射以及在等离子体内部的衰减情况, 结果如图 2 和 3 所示. 此处等离子体碰撞频率为 $f_{en} = 5\text{GHz}$, 磁感应强度为 $B = 0.3\text{T}$. 由图 2 我们不难看出, 雷达波反射系数 P_r/P_i 随电磁波频率增加而减少, 随等离子体密度增加而增加. 当等离子体密度等于 $1 \times 10^{17}\text{m}^{-3}$ 时, 反射系数在较宽的雷达波段内均远小于 1%. 但当等离子体密度达到 $1 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$ 时, 其反射系数大大增加 (大于 60%). 从图 3 中可以看出, 单位长度内雷达波功率的衰减量随等离子体密度增加而增加. 但是, 从图 2 我们知道, 等离子体密度越高其反射系数越大. 因此, 等离子体密度并不是越高越好. 上述结果不难理解, 等离子体密度越高, 在雷达波与等离子体相互作用中将有更多碰撞发生, 从而使雷达波的衰减增加. 同时, 等离子体密度增加将使等离子体频率 ω_p 增加, 由 (10) 和 (16) 式可以看出, 等离子体密度越高, 雷达波在界面的反射也将增加.

其次, 我们计算了不同磁场强度下等离子体对雷达波的吸收情况. 由上述分析我们选择等离子体密度为 $n = 1.0 \times 10^{17}\text{m}^{-3}$, 等离子体碰撞频率为 $f_{en} = 1$ 和 5GHz . 结果如图 4 ($f_{en} = 1\text{GHz}$) 和图 5 ($f_{en} = 5\text{GHz}$) 所示. 图 4 和图 5 显示了不同磁场强度下, 厚度为 L 的均匀等离子体平板对入射雷达波功率的吸收比. 从图 4 和图 5 中可以看出, 功率吸收比曲线在雷达波频率范围内存在一个吸收峰, 吸收峰的位置随磁场强度的增加由低频向高频方向移动. 我们以图 4 曲线 c 为例, 此时的等离子体密度和磁感应强度分别为 $n = 1.0 \times 10^{17}\text{m}^{-3}$ 和 $B = 0.3\text{T}$, 对应的等离子体频率和电子回旋频率分别为 2.8GHz 和 8.4GHz . 那么, 它所对应的高混杂共振频率为 8.8GHz . 从图 4 中我们可以看出, 曲线 c 的吸收峰的位置在 $(8\text{--}10)\text{GHz}$. 可见吸收峰所处的频率段在略

吸收带,带宽约为 2GHz,吸收比高达 90% 以上,且磁化均匀等离子体对雷达波吸收比的最大值超过 99% .

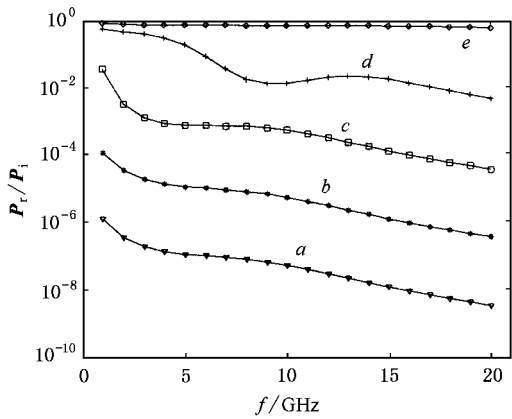


图2 雷达波反射系数随频率的变化 *a* 为 $n = 1.0 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$;*b* 为 $n = 1.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$;*c* 为 $n = 1.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$;*d* 为 $n = 1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$;*e* 为 $n = 1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

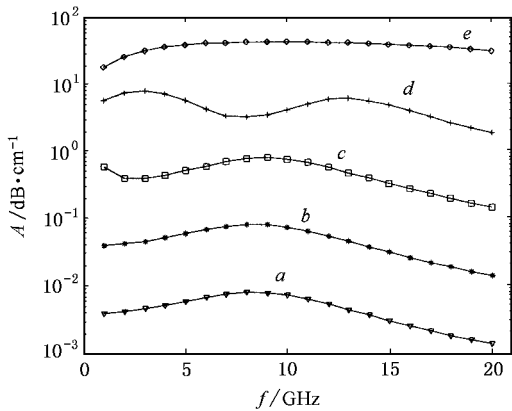


图3 雷达波衰减量随频率的变化 *a* 为 $n = 1.0 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$;
b 为 $n = 1.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$;*c* 为 $n = 1.0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$;*d* 为 $n = 1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$;*e* 为 $n = 1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

高于高混杂频率附近.这表明磁化碰撞等离子体存在与磁化非碰撞等离子体相似的高混杂共振吸收.从(17)式可以看出,高混杂频率与等离子体频率和回旋频率相关,不同的磁场强度将对应于不同高混杂频率,因此吸收峰的位置必然随磁场强度的增加由低频向高频移动.比较图 4 和图 5 还可看出,不同的等离子体碰撞频率对吸收峰的位置没有什么明显的影响.但是,随等离子体碰撞频率增加,吸收比曲线有逐渐平缓的趋势,即吸收比的最大值逐渐减小,吸收比的最小值逐渐增大.这表明随着等离子体碰撞频率的增加,高混杂共振吸收的作用逐渐减弱,而电子和中性气体的碰撞作用逐渐加强.从图 4 和图 5 中还可以看出,在高混杂频率附近存在一个强的共振

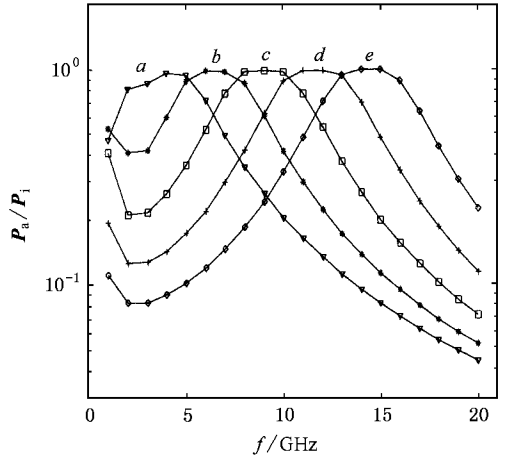


图4 雷达波吸收比随频率的变化 *a* 为 $B = 0.1 \text{ T}$;*b* 为 $B = 0.2 \text{ T}$;*c* 为 $B = 0.3 \text{ T}$;*d* 为 $B = 0.4 \text{ T}$;*e* 为 $B = 0.5 \text{ T}$

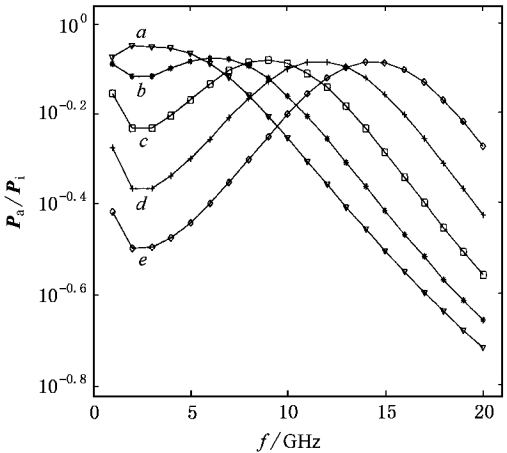


图5 雷达波吸收比随频率的变化 *a* 为 $B = 0.1 \text{ T}$;*b* 为 $B = 0.2 \text{ T}$;*c* 为 $B = 0.3 \text{ T}$;*d* 为 $B = 0.4 \text{ T}$;*e* 为 $B = 0.5 \text{ T}$

4. 结 论

本文从数值上研究了雷达波在均匀磁化等离子体中传播所发生的吸收、反射和衰减,得出了几个有重要意义的结果.通过适当选择磁场强度、等离子体密度和等离子体碰撞频率,可以使磁化均匀等离子体对某一雷达波段的吸收达到 90% 以上;等离子体密度是一个重要因数,合适的等离子体密度不仅可以增大对雷达波的吸收,同时减小了界面对雷达波的反射,且在理论和实践中均具有实际意义.磁场强度显著地影响均匀等离子体对雷达波的吸收,不同

的磁场强度对应不同频段的共振吸收峰,共振吸收带宽约为 2GHz、吸收比高达 90% 以上.后者使人们可以期望通过改变磁场强度实现对较宽雷达波段隐身.

[1] Qiu X M 1998 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **18** 53 (in Chinese) [邱孝明 1998 核聚变与等离子体物理 **18** 53]

[2] Ginzberg V L 1970 *The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasma* (New York : Pergammon Press)

[3] Yoon N S *et al* 1998 *25th EPS Conf. Contr. Fusion and Plasma Physics* **22** C 145

[4] Vidmar R J 1990 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **18** 733

[5] Santoru J, Gregoire D J and Schumacher R W 1990 *Bulletin Am. Phys. Soc.* **35** 2067

[6] Destle W W *et al* 1991 *J. Appl. Phys.* **69** 6313

[7] Laroussi M and Reece Roth J 1993 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **21** 89

[8] Laroussi M 1995 *Int. J. Infrared Millim. Waves* **16** 2069

[9] Koretzky E and Kuo S P 1998 *Phys. Plasmas* **5** 3774

[10] Liu H M *et al* 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 1225

[11] Lin D S *et al* 1998 *1st Symposium on Plasma Science of China Youth Scholars (Hefei)* (in Chinese) [林东生等 1998 第一届中国等离子体科学青年学者学术研讨会(合肥)]

[12] Sun A P 2000 *Ph. D Thesis* (Chengdu :Southwestern Institute of Physics) (in Chinese) [孙爱萍 2000 博士学位论文(成都 核工业西南物理研究院)]

[13] Sun A P *et al* 2001 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **21** 224 (in Chinese) [孙爱萍等 2001 核聚变与等离子体物理 **21** 224]

[14] Liu D H *et al* 1999 *Coating Industry* **7** 37 (in Chinese) [刘东晖等 1999 涂料工业 **7** 37]

[15] Gregoire D J, Santoru J and Schumacher R W 1992 *Electromagnetic Wave Propagation in Unmagnetized Plasmas* (AFOSR AD-A250710)

[16] Heald M A and Wharton C B 1978 *Plasma Diagnostics with Microwaves* (New York : Krieger) p71

[17] Goldston R J and Rutherford P H 1995 *Introduction to Plasma Physics* (London : IOP) p272

Numerical analysis on the absorption, reflection and transmission of radar waves by a uniform magnetized plasma slab^{*}

Tang De-Li Sun Ai-Ping Qiu Xiao-Ming

(*Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China*)

(Received 19 October 2001 ; revised manuscript received 9 December 2001)

Abstract

The absorption, reflection, and transmission of radar waves by a uniform and magnetized plasma slab are studied in this paper. The effect of various plasma parameters and different values of magnetic field intensity on the absorbed, reflected and transmitted power are discussed. The calculated results show that the effects of magnetic field on the absorbed power as well as the frequency band of resonant absorption are very significant. More than 90% of radar wave power can be absorbed and the resonant absorption band is about 2GHz.

Keywords : electromagnetic wave, magnetized plasma, resonant absorption, plasma cloaking

PACC : 4225B, 5240D

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10005001).