

O-X Mode Conversion of Electroncyclotron Wave in Magnetizednon-uniform Plasma

Yiyu Xiong[†], Changjian Tang

Key Laboratory of High Energy Density Physics and Technology Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610065, China

[†]Email: 1260070159@qq.com

Abstract

This study investigates the conversion mechanism and propagation characteristic of ordinary mode and extraordinary mode when electron cyclotron wave propagates in plasma. The result shows that the fundamental reason for the conversion of O mode and X mode is that the electric field polarization of the O mode and X mode of electromagnetic waves constantly changes with changes in plasma density, magnetic field, and the angle between the wave and magnetic field. This leads to the complete transformation of the O mode into the electric field polarization characteristics of the X mode near the cutoff layer, resulting in the so-called O-X mode conversion. In addition, the O-X mode conversion of electromagnetic waves in non-uniform plasmas is a gradual process, and electromagnetic waves can still propagate in X-mode after the cutoff layer. Therefore, the shielding effect of plasma on electromagnetic waves is not universal.

Keywords: Electromagnetic Wave; Mode Conversion; Plasma

电磁波在磁化非均匀等离子体中传播的 O-X 模式转换

熊一玉[†], 唐昌建

四川大学, 高能量密度物理及技术教育部重点实验室, 成都 610065

摘要: 研究了电磁波在磁化非均匀等离子体传播过程中的寻常模(O 模)与非寻常模(X 模)的转换机制和传播特征。研究表明, 导致 O 模与 X 模发生转化的根本原因是, 电磁波的 O 模与 X 模的电场极化不断随等离子体密度、磁场以及波与磁场夹角的变化而变化, 从而导致 O 模在接近截止层的区域可以完全蜕变为 X 模的电场极化特征, 发生所谓 O-X 模式转换。此外, 在不均匀等离子体中电磁波的 O-X 模式转化是一渐变过程, 且在截止层以后电磁波仍能够以 X 模传播。因此, 等离子体对电磁波具有屏蔽作用并不是普适的。

关键词: 电磁波; 模式转换; 等离子体

引言

当电磁波在磁化非均匀等离子体中传播时, 能够发生 O-X 模式转换。对于 O-X 模式转换, 已有文献提出了 O-X 模式转换的概念, 并给出了发生模式转换的数学条件^[1-3]。但在这些文献中没有给出发生模式转换的转换机制, 且由于模式转换带来对电磁波传播特征的影响也没有作深入讨论。

本文首先研究了电磁波在非均匀等离子体中传播的电场极化特征, 并由此解释了 O-X 模式转换的机制。研究还认为, 由于电磁波在非均匀等离子体中的传播存在着模式转换的物理, 在满足一定条件下, 电磁波能够透过等离子体的“截止层”。因此, 等离子体对电磁波具有屏蔽作用并不是普适的。

1 O 模和 X 模的电场极化特征

当电磁波在磁化冷等离子体中传播时，根据其色散关系^[4]可得：

$$N^2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (1)$$

式中， $A = S(\sin \theta)^2 + P(\cos \theta)^2$ ， $B = -LR(\sin \theta)^2 - SP(1 + (\cos \theta)^2)$ ， $C = PLR$ ， $P = 1 - X$ ， $R = (P - Y)/(1 - Y)$ ， $L = (P + Y)/(1 + Y)$ ， $S = (R + L)/2$ ， $X = \omega_p^2/\omega^2$ ， $Y = \omega_b/\omega$ 。 ω_p 、 ω_b 、 ω 分别为等离子体频率、电子回旋频率和电磁波的频率。 $N = cK/w$ ，为电磁波的折射率。式中“+”号表示 O 模，“-”号表示 X 模。电磁波在等离子体中传播时，各方向的电场比值为：

$$\frac{E_y}{E_x} = -i \frac{XY}{(1-Y^2)(1-N^2)-X} = T e^{i\varphi_{yx}} \quad (2)$$

$$\frac{E_z}{E_x} = -\frac{N^2 \sin \theta \cos \theta}{1-X-N^2(\sin \theta)^2} = S e^{i\varphi_{zx}} \quad (3)$$

φ_{yx} 、 φ_{zx} 分别为 y 向、z 向的电场相对 x 向的相位差。

根据(2)、(3)式，电磁波在等离子体中传播时，在平行于磁场方向为线极化，在垂直于磁场平面内为椭圆极化，而椭圆极化可看作左旋圆极化与右旋圆极化的合成。根据(2)、(3)式，设电磁波各方向电场的形式为：

$$\begin{cases} E_x = E_0 \cos (wt + \varphi_x) \\ E_y = T E_0 \cos (wt + \varphi_y) \\ E_z = S E_0 \cos (wt + \varphi_z) \end{cases} \quad (4)$$

将垂直于磁场平面的 E_x 、 E_y 写成左旋圆极化与右旋圆极化的形式：

$$\begin{cases} E_x = E_{l_x} + E_{r_x} = E_l \cos (wt + \varphi_l) + E_r \cos (wt + \varphi_r) \\ E_y = E_{l_y} + E_{r_y} = -E_l \sin (wt + \varphi_l) + E_r \sin (wt + \varphi_r) \end{cases} \quad (5)$$

由(4)、(5)式，可以推出平行于磁场的线极化的电场能量、垂直于磁场的左旋圆极化的电场能量和垂直于磁场的右旋圆极化的电场能量占总电场能量的比例分别为：

$$f_{E_{\parallel}} = \frac{S^2}{1+T^2+S^2} \quad (6)$$

$$f_{E_l} = \frac{1+T^2+2T \sin \varphi_{yx}}{2(1+T^2+S^2)} \quad (7)$$

$$f_{E_r} = \frac{1+T^2-2T \sin \varphi_{yx}}{2(1+T^2+S^2)} \quad (8)$$

根据(1)-(8)式可以得到O模和X模的不同极化的电场能量占总电场能量的比例与等离子体密度、磁场、电磁波与磁场的夹角 θ 的关系

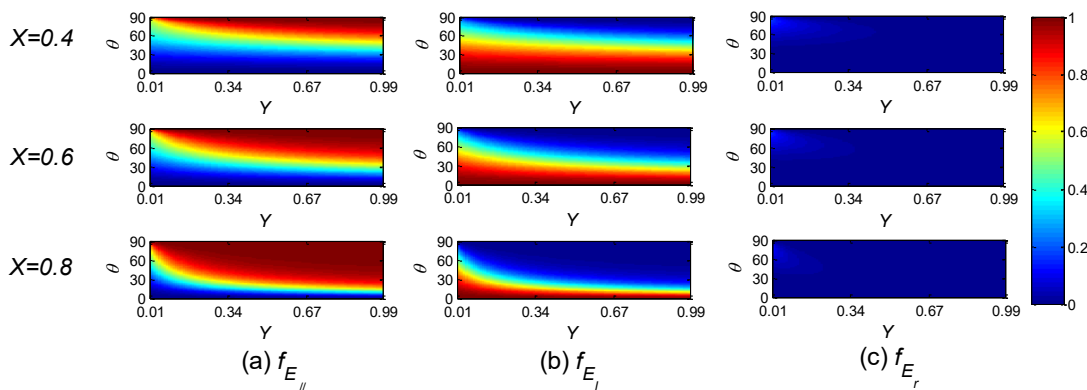


图 1 不同的等离子体归一化密度条件下，O 模的 $f_{E_{\parallel}}$ 、 f_{E_l} 、 f_{E_r} 随归一化磁场以及电磁波与磁场夹角 θ 的变化关系

从图 1 可以看到，对应于不同的等离子体密度、磁场和电磁波与磁场的夹角，O 模的线极化、左旋圆极化、右旋圆极化的比例不同。因此，O 模在等离子体中传播时，电场极化受等离子体密度、磁场和电磁波与磁场的夹角的影响。另外，当电磁波与磁场的夹角为 90 度时，O 模的极化形式是平行于磁场的线极化，与以往电磁波垂直于磁场传播时对 O 模的定义一致。从图 2 可以看到，X 模在等离子体中传播时，电场极化也受等离子体密度、磁场和电磁波与磁场的夹角三个因素的影响，表现出的规律比 O 模更复杂。另外，当电磁波与磁场的夹角为 90 度时，X 模的极化形式是垂直于磁场的椭圆极化，与以往电磁波垂直于磁场传播时对 X 模的定义一致。

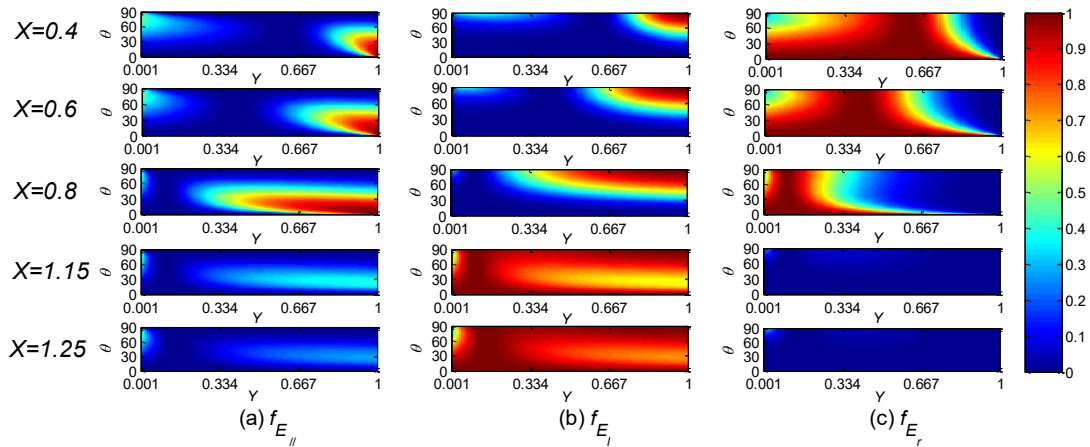


图 2 不同的等离子体归一化密度条件下，X 模的 $f_{E_{\parallel}}$ 、 $f_{E_{\perp}}$ 、 $f_{E_{\theta}}$ 随归一化磁场以及电磁波与磁场夹角 θ 的变化关系

2 O-X 模式转换

取 $Y = 0.85$ ，并且给定电磁波的平行于磁场的折射率 $N_{\parallel} = \sqrt{Y/(1+Y)}$ ，由(1)式可得 O 模和 X 模的垂直于磁场的折射率 N_{\perp} 。 $N_{\perp} = (\alpha + j\beta) \times c/\omega$ ，其中 c 为光速， ω 为电磁波的角频率， α 为电磁波的衰减因子， β 为电磁波的传播因子。电磁波的 O 模和 X 模在磁化非均匀等离子体中传播时垂直折射率的情况如图 3 所示。

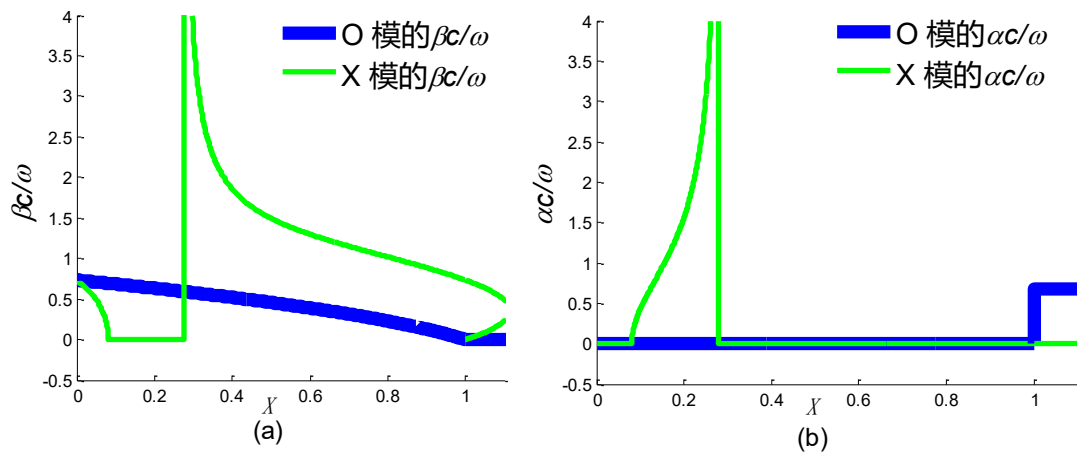


图 3 磁化非均匀等离子体中 O 模、X 模的传播和衰减

从图 3 可知，在磁化非均匀等离子体中，存在着两种电磁波的本征模式，即 O 模和 X 模。O 模在 $X < 1$ 的区域可以传播，在 $X = 1$ 处截止，在 $X > 1$ 的区域迅速衰减。X 模在 $X < 1$ 的区域存在着一个衰减区域，大概在 $(0.08-0.28)$ ，在衰减区域迅速衰减，在衰减区域以外部分区域可以无衰减传播，并且大概在 $X = 0.08$ 处截止。另外，值得注意的是，在 $X > 1$ 的区域内 X 模的折射率存在两个解。其物理意义是，上面的一条是 X 模的本征解，下面一条是由 O 模转换而成的 X 模。由于 O 模与 X 模是由其电场极化的形式来进行表征的，所以，为了说明上述转换的机

理，取与图3相同条件，可以由(6)-(8)式得到O模和X模的电场极化，如图4所示。可以发现，O模与X模的电场极化随着 X 的变化而不断变化，且当 $X=1$ 时O模与X模的电场极化完全相同。这说明，如果入射波是一纯的O模，那么，在 $X=1$ 处就完全蜕变为X模，这与图3的结果一致。

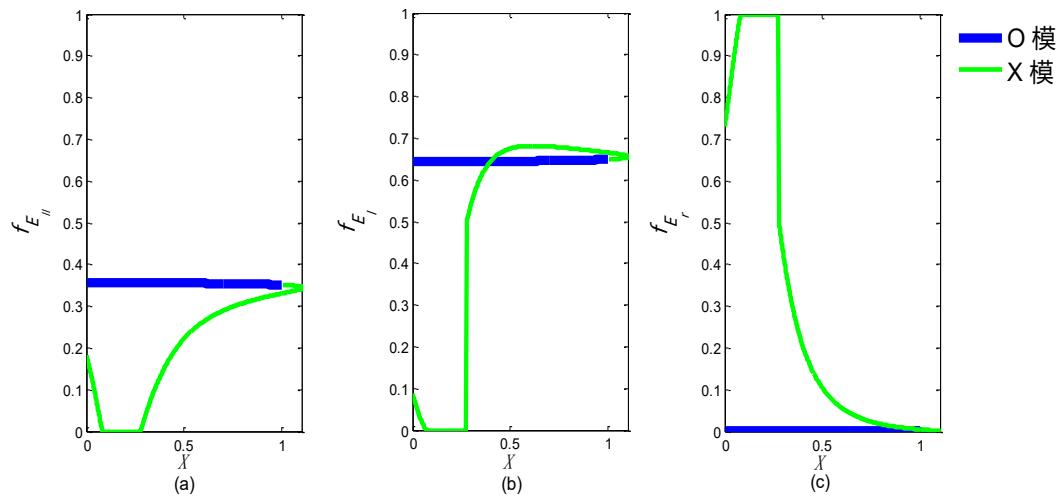


图4 O模和X模的 $f_{E_{\parallel}}$ 、 $f_{E_{\perp}}$ 、 f_{E_r} 随密度的变化

因此，虽然O模在 $X>1$ 的区域内不能传播，但是，O模可以变成图3中 $X>1$ 区域内下面一条色散关系的X模继续传播，发生O-X模式转换。

3 结论

非均匀等离子体中的电磁波，其O模或X模是由电磁波的电场极化来进行表征的，且O模或X模的电场极化受等离子体密度、磁场以及电磁波与磁场的夹角等因数的影响。

O模在等离子体中传播且满足一定条件时，能够发生O-X模式转换并以X模的形式传播。因此，等离子体对电磁波具有屏蔽作用的结论并不是普适的。

参考文献

- [1] Weitzner H, Batchelor D B. Conversion between cold plasma modes in an inhomogeneous plasma[J]. Phys. Fluids, 1979, 22: 1355-1358
- [2] F R Hansen, J P Lynov. Full-wave calculations of the O-X mode conversion process[J]. J. Plasma Phys, 1988, 39: 319-337
- [3] F R Hansen, J P Lynov, P Michelse. The O-X-B mode conversion scheme for ECRH of a high-density Tokamak plasma[J]. Plasma Phys. Control. Fusion, 1985, 27: 1077-1100
- [4] R. Prater. Heating and current drive by electron cyclotron waves[J]. Phys. Plasmas, 2004, 11: 2349-2376

【作者简介】



¹ 熊一玉 (1991-), 男, 汉族, 硕士,
主要研究等离子体物理理论。
Email: 1260070159@qq.com

² 唐昌建 (1954-), 男, 汉族, 博士, 教授, 主要研究等离子
体物理理论和磁约束聚变物理。
Email: 963740404@qq.com