

超短パルスマイクロ波・プラズマ相互作用 の研究とプラズマ診断への応用

(研究課題番号 08558044)

平成8年度～平成9年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(1))
研究成果報告書

平成10年3月

研究代表者 間 瀬 淳
(筑波大学物理工学系)

超短パルスマイクロ波・プラズマ相互作用 の研究とプラズマ診断への応用

(研究課題番号 08558044)

平成8年度～平成9年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(1))
研究成果報告書

平成10年3月

研究代表者 間 瀬 淳
(筑波大学物理工学系)

平成8年度～平成9年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(1))
研究成果報告書

超短パルスマイクロ波・プラズマ相互作用の研究と
プラズマ診断への応用

(研究課題番号 08558044)

目次

I.	はしがき	1
II.	研究発表	2
	発表論文(学会誌, 国際会議録), 口頭発表	
III.	研究成果	16
	1. はじめに	16
	2. 超短パルス反射計の設計	17
	2.1 入射パルス幅の選択	17
	2.2 伝送系の選択	18
	3. 超短パルス反射計のガンマ10プラズマへの適用	19
	3.1 超短パルス反射計装置	19
	3.2 システムのシミュレーション実験	20
	3.3 セントラル部密度分布測定の原理的実証	21
	3.4 密度および密度揺動の同時測定	22
	4. 高速周波数掃引型反射計の改良	23
	4.1 はじめに	23
	4.2 反射計の構成と密度分布再構成	23
	5. 超短パルスマイクロ波・プラズマ相互作用の理論シミュレーション	25
	5.1 超短パルスマイクロ波の伝搬と反射法	25
	5.2 荷電粒子と分散性パルスの相互作用	27
	6. まとめ	28
	謝辞	28
	参考文献	29
IV.	添付資料	30

平成8年度～平成9年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(1))
研究成果報告書

I. はしがき

研究課題 超短パルスマイクロ波・プラズマ相互作用の研究とプラズマ診断
への応用

研究組織

研究代表者	間瀬 淳	筑波大学物理工学系	助教授
研究分担者	北條仁士	筑波大学物理学系	助教授
研究分担者	永津雅章	名古屋大学工学部	助教授
研究分担者	鮑本一裕	帝京大学理工学部	助教授
研究分担者	三浦 明	株式会社テラテック 第一研究部第一研究室	室 長
研究協力者	松浦裕之	株式会社テラテック 第一研究部第二研究室	室 長
研究協力者	Kubota Shigeyuki	筑波大学プラズマ研究 センター	講 師 (研究機関研究員)

研究経費

平成8年度	6,000 千円
平成9年度	2,000 千円
合 計	8,000 千円

II. 研究発表

(i) 学会誌, 国際会議録

1. A.Mase, H.Hojo, M.Kobayashi, N.Oyama, L.G.Bruskin, E.J.Doyle, T.Tokuzawa, A.Itakura, M.Ichimura, T.Tamano,
"ICRF Physics Measurements by Reflectometry", *Diagnostics for Experimental Thermonuclear Fusion Reactors*, Eds. P.Stott, G.Gorini, and E.Sindoni (Plenum Press, New York, 1996) p.153.
2. M.Nagatsu, A. Fuse, A. Mase,
"Application of Maximum Entropy Method to Density Profile Measurement via Microwave Reflectometry on GAMMA 10", *Plasma Phys. Contr. Fusion*. **38**, 1033 (1996).
3. K.Akimoto,
"Rapid Generation of Langmuir Wave Packets during Electron Beam-Plasma Instabilities", *Phys. Plasmas* **3**, 2559 (1996).
4. K.Akimoto,
"Properties and Applications of Ultra-short Electromagnetic Mono- and Sub-Cycle Waves", *J. Phys. Soc. Jpn.* **65**, 2020 (1996).
5. N. Takada, M. Nagatsu, I. Tsuchikura, S. Sasaki, M. Akiba, K. Nakamura,
"Reflectivity Characteristics of Carbon Materials Irradiated with Hydrogen Ion-Beam", *J. Plasma Fusion Res.* **72**, 776 (1996).
6. 間瀬 淳
"マイクロ波反射計によるプラズマ計測"
プラズマ・核融合学会第35回若手夏の学校講義テキスト (1996) p.130.
7. C.W.Domier, N.C.Luhmann, Jr., A.Mase,
"Edge Density Profile and Fluctuation Measurements Using Ultrashort-Pulse Reflectometry", *Bull. Am. Phys. Soc.* **41**, 1591 (1996).
8. K.Ikeda, Y.Nagayama, N.Yamaguchi, T.Aota, K.Ishii, T.Ishijima, Y.Okamoto, A.Mase, T.Tamano,
"Measurements of Impurity Rotation in the GAMMA 10 Tandem Mirror", *Proc. 1996 Int. Conf. on Plasma Physics, Nagoya* (1996) p.330.

9. M.Ichimura, A.Kumagai, M.Nakamura, S.Tanaka, S.Furukawa, S.Kanazawa, E.Ishikawa, C.Satake, S.Takayama, H.Hojo, A.Mase, M.Inutake, T.Tamano,
"Spontaneously Excited Alfvén Waves in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
Proc. 1996 Int. Conf. on Plasma Physics, Nagoya (1996) p.1318.
10. M.Yoshikawa, T.Aota, K.Ikeda, T.Ishijima, Y.Okamoto, N.Yamaguchi, A.Mase,
T.Tamano,
"Time- and Space-Resolving Vacuum Ultraviolet Spectrograph for Plasma Diagnostics in the
GAMMA 10",
Proc. 1996 Int. Conf. on Plasma Physics, Nagoya (1996) p.1470.
11. T.Cho, M.Hirata, J.Kohagura, Y.Sakamoto, S.Kanke, K.Takahashi, T.Okamura, A.Mase,
K.Yatsu, T.Tamano, S.Miyoshi, S.Tanaka, R.T.Snider, M.Bessenrodt-Weberpals,
"Cooperating Studies of Potential Related Physics Using X Rays from Plasmas in the
GAMMA 10 Tandem Mirror, the ASDEX Upgrade, and the DIII-D Tokamaks",
Proc. 1996 Int. Conf. on Plasma Physics, Nagoya (1996) p.1486.
12. N.Katsuragawa, H.Hojo, A.Mase,
"Simulation Study on Cross Polarization Scattering of Ultrashort-Pulse Electromagnetic
Waves", Proc. Int. 1996 Conf. on Plasma Physics, Nagoya (1996) p.1738.
13. R.Katsumata, M.Ichimura, M.Inutake, H.Hojo, A.Mase, T.Tamano,
"Eigenmode Excitation of Alfvén Ion Cyclotron Instability",
Phys. Plasmas 3, 4489 (1996).
14. G.Vayakis, N.Bretz, E.J.Doyle, V.A.Vershkov, A.J.H.Donné, J.Irby, M.E.Manso,
A.Mase, J.Sanchez, V.F.Shevchenko, C.I.Walker, and the ITER JCT and HT,
"Reflectometry on ITER", Rev. Sci. Instrum. 68, 435 (1997).
15. T.Tokuzawa, A.Mase, N.Oyama, A.Itakura, T.Tamano,
"Ultrafast Broadband Frequency-Modulation Reflectometer for Density Profile Measurements
in GAMMA 10", Rev. Sci. Instrum. 68, 443 (1997).
16. A.Mase, L.G.Bruskin, N.Oyama, T.Tokuzawa, H.Inutake, M.Yokoi, A.Itakura, H.Hojo,
M.Ichimura, T.Tamano,
"Measurement of Magnetic Fluctuations of Electromagnetic Plasma Waves by Cross-
Polarization Scattering", Rev. Sci. Instrum. 68, 454 (1997).

17. N.Oyama, A.Mase, T.Tokuzawa, K.Imamura, A.Itakura, T.Tamano, Y.Harada, K.Mizuno, "Millimeter-Wave Two-Dimensional Imaging Array for the GAMMA10 Tandem Mirror", *Rev. Sci. Instrum.* **68**, 500 (1997).
18. Y.Kiwamoto, H.Abe, T.Aota, L.G.Bruskin, T.Cho, T.Goto, M.Hirata, H.Hojo, M.Ichimura, K.Ikeda, K.Ishii, A.Itakura, K.Kajiwara, I.Katanuma, N.Katsuragawa, I.M.Khairul, J.Kohagura, A.Kumagai, A.Mase, Y.Nakashima, N.Ohyama, T.Saito, Y.Sakamoto, T.Takahashi, T.Tamano, S.Tanaka, Y.Tatematsu, T.Tokuzawa, K.Yatsu, M.Yoshikawa, Y.Yoshimura, "Behaviour of a Hot-Ion Plasma in the GAMMA 10 Tandem Mirror", *Plasma Phys. Contr. Fusion* **39**, A381 (1997).
19. I. Ghanashev, M. Nagatsu, H. Sugai, "Surface Wave Eigenmodes in a Finite-Area Plane Microwave Plasma ", *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, 337 (1997).
20. T.Aota, N.Yamaguchi, K.Ikeda, S.Aoki, M.Yoshikawa, A.Mase, T.Tamano, "Imaging Characteristics of a Channel Plate Collimator for Low Energy X-Rays", *Rev. Sci. Instrum.* **68**, 1661 (1997).
21. Y.Kogi, A.Mase, L.G.Bruskin, N.Oyama, T.Tokuzawa, A.Itakura, H.Hojo, T.Tamano, "Cross-Polarization Scattering from Low-Frequency Waves in a Tandem Mirror Plasma", *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, L587 (1997).
22. L.G.Bruskin, A.Mase, T.Tokuzawa, N.Oyama, A.Itakura, T.Tamano, "Wavelet Application for Reflectometry of Plasma Density Profile", *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, L632 (1997).
23. M.Nagatsu, G.Xu, I.Ghanashev, M.Kanoh, H.Sugai, "Mode Identification of Surface Wave Excited in a Planar Microwave Discharge", *Plasma Sources Sci. Tech.* **6**, 427 (1997).
24. A.Mase, T.Tokuzawa, L.G.Bruskin, Y.Kogi, N.Oyama, A.Itakura, T.Tamano, K.Yatsu, "Density Profile and Fluctuation Measurements on GAMMA 10 Using FM Reflectometer", *Proc. 3rd Workshop of Microwave Reflectometry for Fusion Plasma Diagnostics, Madrid (1997)* p.11.

25. K.Ikeda, Y.Nagayama, T.Aota, M.Ichimura, K.Ishii, T.Ishijima, Y.Kiwamoto, A.Mase, T.Saito, T.Tamano, T.Tokuzawa, N.Yamaguchi, M.Yoshikawa, "Rotation of Cylindrical Plasmas in the GAMMA 10 Tandem Mirror ", Phys. Rev. Lett. **78**, 3872 (1997).
26. T.Aota, N.Yamaguchi, M.Yoshikawa, K.Ikeda, T.Ishijima, Y.Okamoto, A.Mase, T.Tamano "Two Dimensional Imaging X-Ray Spectrometer for Plasma Diagnostics", Fusion Eng. Design **34-35**, 189 (1997).
27. K.Ikeda, Y.Nagayama, T.Aota, N.Yamaguchi, M.Yoshikawa, K.Ikeda, T.Ishijima, Y.Okamoto, A.Mase, T.Tamano, "Measurement of Plasma Rotation in a Tandem Mirror", Fusion Eng. Design **34-35**, 257 (1997).
28. A.Mase, M.Kobayashi, N.Oyama, T.Tokuzawa, H.Inutake, M.Yokoi, A.Itakura, H.Hojo, L.G.Bruskin, M.Ichimura, T.Tamano, "Reflectometric Measurement of Density and Magnetic Fluctuations in ICRF-Driven Waves", Fusion Eng. Design **34-35**, 371 (1997).
29. N.Oyama, A.Mase, T.Tokuzawa, K.Imamura, A.Itakura, Y.Ito, T.Tamano, "Plasma Diagnostics Using Millimeter-Wave Two-Dimensional Imaging Array", Fusion Eng. Design **34-35**, 407 (1997).
30. M.Nagatsu, M.Aoki, S.Kubota, H.Arimoto, K.Sato, "Study of the Dynamic Behavior of the STP-3(M) RFP Plasma Using Microwave Reflectometry ", Fusion Eng. Design **34-35**, 437 (1997).
31. L.G.Bruskin, A.Mase, T.Tamano, "Resolution of Microwave Correlation Reflectometry", Fusion Eng. Design **34-35**, 441 (1997).
32. H.Hojo, H.Honda, N.Katsuragawa, A.Mase, "Ultrashort-Pulse Microwave-Plasma Interactions and Reflectometry", Fusion Eng. Design **34-35**, 447 (1997).
33. T.Tokuzawa, A.Mase, N.Oyama, T.Uchiyama, A.Itakura, T.Tamano, "Reflectometric Density Profile Measurement Using an Ultrafast Sweep Oscillator", Fusion Eng. Design **34-35**, 451 (1997).

34. Y.Nakashima, M.Shoji, K.Yatsu, K.Tsuchiya, Y.Fukuchi, M.Inutake, N.Yamaguchi, A.Mase, T.Tamano,
"Charge-Exchange Neutral Particle Analysis on the ICRF-Heated Plasmas in the GAMMA 10 Tandem Mirror", *Fusion Eng. Design* **34-35**, 555 (1997).
35. Y.Nakashima, M.Shoji, K.Yatsu, S.Kobayashi, K.Tsuchiya, N.Yamaguchi, M.Yoshikawa, T.Aota, T.Ishijima, M.Ichimura, M.Inutake, A.Mase, T.Tamano,
"Behavior of Neutral-Hydrogen and Particle Confinement on GAMMA 10 Tandem Mirror", *J. Nucl. Mater.* **241-243**, 1011 (1997).
36. N.Oyama, A.Mase, T.Tokuzawa, A.Itakura, T.Tamano, K.Yatsu, Y.Nagayama, K.Kawahata, K.Watabe, K.Mizuno, A.Miura, H.Matsuura, Y.Harada,
"Development of Millimeter-Wave Two- Dimensional Imaging Array for Large Fusion Devices", *Proc. 8th Int. Symp. on Laser-Aided Plasma Diagnostics, Doorwerth (1997)*p.343.
37. K.Akimoto,
"Theory of Pulse-Particle Interaction in One Dimension",
Phys. Plasmas **4**, 3101 (1997).
38. H.Matsuura, K.Tezuka, I.Aoki, M.Yamanaka, S.Kobayashi, T.Fujita, A.Miura, Y.Nagayama,
"Fully Monolithic Millimeter-Wave Mixer and IF Amplifier with Bow-Tie Antenna on GaAs Substrate", *Electronics Lett.* **33**, 1800 (1997).
39. S.Kubota, T.Onuma, A.Mase, T.Tokuzawa, N.Oyama, A.Itakura, H.Hojo, L.G.Bruskin, T.Tamano, K.Yatsu, C.W.Domier, and N.C.Luhmann, Jr.,
"Development of an Ultrashort-Pulse Reflectometer for Density Profile Measurements on GAMMA 10", *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, L300 (1998).
40. L.G.Bruskin, A.Mase, T.Tokuzawa, N.Oyama, A.Itakura, T.Tamano,
"Measurement of Plasma Density Using Wavelet Analysis of Microwave Reflectometer Signal", *Rev.Sci. Instrum.* **69**, 425 (1998).
41. L.G.Bruskin, A.Mase, T.Tamano, K.Yatsu,
"Application of 1D WKB Approximation in Microwave Reflectometry of Plasma Density Profiles", *Rev.Sci. Instrum.* (in press).

42. G.Vayakis, T.Ando, N.Bretz, L.deKock, A.Donné, E.Doyle, J.Irby, E.Martin, M.Manso, A.Mase, J.Sanchez, V.Vershkov, D.Wagner, C.Walker, and the ITER JCT and HT, "Overview of the ITER Reflectometry Diagnostics Systems", International Workshop on Experimental Fusion Reactors, Varenna (1997). (invited paper)
to be published in "Thermonuclear Fusion Reactors", Eds. P.Stott, G.Gorini, and E.Sindoni (Plenum Press, New York, 1998). (to be published).

(ii) 口頭発表

1. 大山直幸, 間瀬 淳
"ミリ波イメージングアレイによるガンマ10プラズマ計測"
東北大学通電気通信研究所共同プロジェクト研究会, 1996年6月28日.
2. 池田勇公, 谷津 潔, 中嶋洋輔, Islam Md. Khairul, 森脇武之, 小林進二,
長谷川陽子, 広永行孝, 大石正雄, 際本泰士, 間瀬 淳, 玉野輝男
"GAMMA 10 アンカー部の周辺プラズマの挙動及び熱流計測"
プラズマ・核融合学会第13回秋季講演会, 新潟大学, 1996年10月1-3日.
3. 長谷川陽子, 中嶋洋輔, 谷津 潔, 庄司 主, Islam Md. Khairul, 池田勇公,
森脇武之, 小林進二, 広永行孝, 大石正雄, 市村 真, 間瀬 淳, 長 照二,
吉川正志, 斉藤輝雄, 際本泰士
"ガンマ10セントラル ECRH 実験におけるイオン温度の計測 "
プラズマ・核融合学会第13回秋季講演会, 新潟大学, 1996年10月1-3日.
4. 吉川正志, 岡本裕司, 山口直洋, 青田達也, 池田勝則, 石島達夫, 河森栄一郎,
間瀬 淳, 上林賢一, 玉野輝男
"真空紫外分光器を用いたガンマ10プラズマの不純物イオンスペクトル測定 II"
プラズマ・核融合学会第13回秋季講演会, 新潟大学, 1996年10月1-3日.
5. 小林進二, 中嶋洋輔, 庄司 主, 谷津 潔, 山口直洋, 吉川正志, 石島達夫,
Islam Md. Khairul, 森脇武之, 池田勇公, 長谷川陽子, 広永行孝, 大石正雄,
間瀬 淳, 玉野輝男
"軸方向 H α 線検出器を用いたガンマ10セントラル部中性粒子計測"
プラズマ・核融合学会第13回秋季講演会, 新潟大学, 1996年10月1-3日.

6. 近木祐一郎, 間瀬 淳, 大山直幸, L.G.Bruskin, 徳沢季彦, 板倉昭慶, 犬竹弘明, 今村顕史, 横井雅宏, 北條仁士, 市村 真, 玉野輝男
"Cross-Polarization Scattering による電磁波動の測定 III"
プラズマ・核融合学会第13回秋季講演会, 新潟大学, 1996年10月1-3日.
7. 今村顕史, 間瀬 淳, 大山直幸, 徳沢季彦, 横井雅宏, 犬竹弘明, 近木祐一郎, 板倉昭慶, 玉野輝男
"ガンマ10セントラル部電子共鳴加熱時の電子サイクロトロン放射"
プラズマ・核融合学会第13回秋季講演会, 新潟大学, 1996年10月1-3日.
8. 大山直幸, 間瀬 淳, 今村顕史, 徳沢季彦, L.G.Bruskin, 板倉昭慶, 玉野輝男
"ガンマ10におけるECEイメージング計測と揺動測定"
プラズマ・核融合学会第13回秋季講演会, 新潟大学, 1996年10月1-3日.
9. 徳沢季彦, 間瀬 淳, L.G.Bruskin, 大山直幸, 横井雅宏, 近木祐一郎, 板倉昭慶, 玉野輝男
"超高速FMリフレクトメーターによる密度分布および密度揺動の同時測定"
プラズマ・核融合学会第13回秋季講演会, 新潟大学, 1996年10月1-3日.
10. 菊野長興, 石井亀男, 石橋信次, 長崎将雄, 香月勇三, 後藤哲也, 五井康裕, 小野芳裕, 間瀬 淳, 片沼伊佐夫, 板倉昭慶, 谷津 潔, 玉野輝男
"ガンマ10パリア部の高速2次元電位分布の測定 II"
プラズマ・核融合学会第13回秋季講演会, 新潟大学, 1996年10月1-3日.
11. 小林英樹, 服部邦彦, 鈴木崇之, 吉沼幹朗, 池田宏一, 安藤 晃, 犬竹正明, 間瀬 淳
"マイクロ波反射計とプローブ計測による密度および磁場揺動の径方向分布の比較"
プラズマ・核融合学会第13回秋季講演会, 新潟大学, 1996年10月1-3日.
12. 飽本一裕
"パルスと粒子の相互作用の理論"
日本物理学会秋の分科会, 山口大学, 1996年10月1-4日.
13. A.Mase, T.Tokuzawa, Y.Kogi, L.G.Bruskin, N.Oyama, A.Itakura, M.Ichimura, H.Hojo, T.Tamano,
"Density Profile and Fluctuation Diagnostics Using FM Reflectometer",
4th Australia-Japan Workshop on Plasma Diagnostics, Canberra, Nov. 18-21 (1996).

14. A.Mase, N.Oyama, K.Imamura, T.Tokuzawa, A.Itakura, T.Tamano,
"Millimeter-Wave Imaging Diagnostics for the GAMMA 10 Tandem Mirror",
4th Australia-Japan Workshop on Plasma Diagnostics, Canberra, Nov. 18-21 (1996).
15. 間瀬 淳, 近木祐一郎, L.G.Bruskin, 大山直幸, 徳沢季彦, 板倉昭慶, 北條仁士,
市村 真, 玉野輝男
"プラズマの内部磁場揺動測定のための Cross-Polarization Scattering の適用"
核融合科学研究所研究会「大型装置計測のためのミリ波技術」1997年1月8日.
16. L.G.Bruskin, A.Mase, Y.Kogi, T.Tokuzawa, N.Oyama, A.Itakura, T.Tamano,
"Microwave Reflectometry of Plasma Motion"
核融合科学研究所研究会「大型装置計測のためのミリ波技術」1997年1月8日.
17. 大山直幸, 間瀬 淳
"ミリ波二次元イメージングアレイによるガンマ10プラズマ計測"
核融合科学研究所研究会「大型装置計測のためのミリ波技術」1997年1月8日.
18. 間瀬 淳
"ガンマ10におけるマイクロ波反射計測" 仙台プラズマフォーラム「超短パルス
技術を用いたプラズマ計測ならびに応用」1997年1月29-30日.
19. 大山直幸, 間瀬 淳, 今村顕史, 徳沢季彦, L.G.Bruskin, 板倉昭慶, 玉野輝男
"ガンマ10におけるECEイメージング"
プラズマ・核融合学会第14回講演会, 工学院大学, 1997年3月24-27日.
20. 間瀬 淳, 北條仁士, 徳沢季彦, 大山直幸, L.G.Bruskin, 板倉昭慶, 玉野輝男
C.W.Domier, N.C.Luhmann, Jr.
"超短パルス反射計のガンマ10プラズマへの適用"
プラズマ・核融合学会第14回講演会, 工学院大学, 1997年3月24-27日.
21. 服部邦彦, 小林英樹, 福士研司, 鈴木崇之, 吉沼幹朗, 池田宏一, 安藤 晃,
犬竹正明, 間瀬 淳
"HITOPプラズマにおけるマイクロ波反射計計測"
プラズマ・核融合学会第14回講演会, 工学院大学, 1997年3月24-27日.
22. 石川英治, 金澤清光, 市村 真, 田中 覚, 佐竹周子, 高山星一, 中村基征,
下坪友哉, 茂木信二, 中嶋洋輔, 間瀬 淳, 板倉昭慶, 犬竹正明, 玉野輝男
"ガンマ10における高周波加熱実験"
プラズマ・核融合学会第14回講演会, 工学院大学, 1997年3月24-27日.

23. 高山星一, 田中 覚, 市村 真, 犬竹正明, 金澤清光, 石川英治, 佐竹周子, 中村基征, 下坪友哉, 茂木信二, 石井亀男, 北條仁士, 間瀬 淳, 際本泰士, 玉野輝男
"ガンマ10における高周波イオン加熱と周辺プラズマの低周波揺動IV"
プラズマ・核融合学会第14回講演会, 工学院大学, 1997年3月24-27日.
24. 後藤哲也, 石井亀男, 菊野長興, 香月勇三, 五井康裕, 長崎将雄, 小野芳裕, 石橋信次, 間瀬 淳, 市村 真, 片沼伊佐夫, 板倉昭慶, 谷津 潔, 玉野輝男
"GAMMA 10のICRF加熱が端損失イオン速度分布に与える影響II"
プラズマ・核融合学会第14回講演会, 工学院大学, 1997年3月24-27日.
25. 近木祐一郎, 間瀬 淳, 大山直幸, L.G.Bruskin, 徳沢季彦, 板倉昭慶, 犬竹弘明, 今村顕史, 横井雅宏, 北條仁士, 市村 真, 玉野輝男
"Cross-Polarization Scatteringによる電磁波動の測定IV"
プラズマ・核融合学会第14回講演会, 工学院大学, 1997年3月24-27日.
26. 田中 覚, 下坪友哉, 市村 真, 金澤清光, 石川英治, 佐竹周子, 高山星一, 中村基征, 茂木信二, 間瀬 淳, 玉野輝男
"ガンマ10における低周波磁場揺動測定"
プラズマ・核融合学会第14回講演会, 工学院大学, 1997年3月24-27日.
27. 中村基征, 茂木信二, 市村 真, 熊谷 晃, 田中 覚, 金澤清光, 石川英治, 佐竹周子, 高山星一, 下坪友哉, 犬竹正明, 北條仁士, 間瀬 淳, 玉野輝男
"AIC波動の軸方向構造"
プラズマ・核融合学会第14回講演会, 工学院大学, 1997年3月24-27日.
28. L.G.Bruskin, 間瀬 淳, 徳沢季彦, 大山直幸, 板倉昭慶, 玉野輝男
"ウェイブレットを利用したプラズマ密度の測定"
プラズマ・核融合学会第14回講演会, 工学院大学, 1997年3月24-27日.
29. 小林進二, 中嶋洋輔, 庄司 主, 谷津 潔, 山口直洋, 吉川正志, 石島達夫, Islam Md. Khairul, 森脇武之, 池田勇公, 長谷川陽子, 広永行孝, 大石正雄, 間瀬 淳, 玉野輝男
"GAMMA10 セントラル部における中性粒子輸送モンテカルロシミュレーションIII"
プラズマ・核融合学会第14回講演会, 工学院大学, 1997年3月24-27日.

30. C.W.Domier, Y.Roh, N.C.Luhmann, Jr., A.Mase,
 "Ultrashort Pulse Reflectometry Density Profile and Fluctuation Measurements on
 GAMMA 10" American Physical Society, Div. of Plasma Physics, Nov. 17-21 (1997).
31. 徳沢季彦, 間瀬 淳, Leonid Bruskin, 後藤巨樹, 大山直幸, Shigeyuki Kubota,
 板倉昭慶, 玉野輝男, 谷津 潔
 "高速掃引型反射計による密度分布計測"
 プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
32. Kubota Shigeyuki, 小沼 剛, 間瀬 淳, 徳沢季彦, 大山直幸, 板倉昭慶,
 北條仁士, Bruskin Leonid, 玉野輝男, 谷津 潔, Domier Calvin, Luhmann Nevile, Jr.
 "ガンマ10における超短パルス反射計の開発 (I)"
 プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
33. 北條仁士, 鮑本一裕, 間瀬 淳
 "サブサイクル電磁波の物理と診断への応用"
 プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
34. 長崎将雄, 石井亀男, 菊野長興, 石橋信次, 香月勇三, 後藤哲也, 五井康裕,
 小野芳裕, 山梨 陸, 片沼伊佐夫, 間瀬 淳, 市村 真, 板倉昭慶, 玉野輝男,
 谷津 潔,
 "ガンマ10 プラグ・バリア部に発生する低周波揺動"
 プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
35. 高山星一, 田中 覚, 市村 真, 犬竹正明, 金澤清光, 石川英治, 佐竹周子,
 中村基征, 茂木信二, 竿崎宗春, 坂田勝亮, 北條仁士, 間瀬 淳, 玉野輝男,
 谷津 潔
 "ガンマ10における高周波イオン加熱と周辺プラズマの低周波揺動 V"
 プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
36. 田中 覚, 高山星一, 市村 真, 犬竹正明, 金澤清光, 中村基征, 石川英治,
 佐竹周子, 茂木信二, 竿崎宗春, 坂田勝亮, 北條仁士, 間瀬 淳, 石井亀男,
 玉野輝男, 谷津 潔
 "ガンマ10における高周波イオン加熱と周辺プラズマの低周波揺動 VI"
 プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.

37. 小林進二, 中嶋洋輔, 庄司 主, 山口直洋, 吉川正志, Islam Md. Khairul, 長谷川陽子, 広永行孝, 大石正雄, 石本祐樹, 佐藤大輔, 和田篤志, 間瀬 淳, 玉野輝男, 谷津 潔
"GAMMA10 セントラル部における中性粒子輸送モンテカルロシミュレーション IV"
プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
38. 今村顕史, 間瀬 淳, Kubota Shigeyuki, 大山直幸, 徳沢季彦, 板倉昭慶, 近木祐一郎, Bruskin Leonid, 北條仁士, 玉野輝男, 谷津 潔
"ガンマ10における電子サイクロトロン放射スペクトルと電子温度解析 IV"
プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
39. 中村基征, 茂木信二, 市村 真, 熊谷 晃, 田中 覚, 金澤清光, 石川英治, 佐竹周子, 高山星一, 竿崎宗春, 坂田勝亮, 北條仁士, 犬竹正明, 間瀬 淳, 中嶋洋輔, 玉野輝男, 谷津 潔
"AIC 波動の軸方向構造 II"
プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
40. 茂木信二, 中村基征, 市村 真, 田中 覚, 金澤清光, 石川英治, 佐竹周子, 高山星一, 竿崎宗春, 坂田勝亮, 北條仁士, 間瀬 淳, 玉野輝男, 谷津 潔
"ICRF 波動入射によるプラズマ計測—AIC モードの境界条件"
プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
41. 近木祐一郎, 間瀬 淳, 大山直幸, L.G.Bruskin, 徳沢季彦, 板倉昭慶, 今村顕史, 北條仁士, 市村 真, 玉野輝男, 谷津 潔
"Cross-Polarization Scattering による電磁波動の測定 V"
プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
42. 玉野輝男, 中嶋洋輔, 吉川正志, 河森栄一郎, 山形智生, 市村 真, 際本泰士, 小林進二, 間瀬 淳, 大山直幸, 斉藤輝雄, 徳沢季彦, 谷津 潔, P.W.Fisher, M.J.Gouge, S.L.Milora
"ガンマ10 タンデムミラーにおける水素ペレット入射計画"
プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
43. 長谷川陽子, 中嶋洋輔, 庄司 主, Islam Md. Khairul, 小林進二, 広永行孝, 大石正雄, 石本祐樹, 佐藤大輔, 和田篤志, 市村 真, 間瀬 淳, 長 照二, 吉川正志, 斉藤輝雄, 際本泰士, 玉野輝男, 谷津 潔
"GAMMA10 セントラル ECRH 実験におけるイオンのエネルギーバランスの検討"
プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.

44. 大石正雄, 中嶋洋輔, 長谷川陽子, 庄司 主, Islam Md. Khairul, 小林進二, 広永行孝, 石本祐樹, 佐藤大輔, 和田篤志, 市村 真, 間瀬 淳, 谷津 潔
"荷電粒子交換中性粒子分析によるプラズマ局所部イオン温度の解析法の検討"
プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
45. 大山直幸, 間瀬 淳, 根岸広和, 徳沢季彦, L.G.Bruskin, 板倉昭慶, 玉野輝男, 谷津 潔
"ミリ波二次元イメージングアレイによるガンマ10プラグ部計測"
プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
46. 黒沢良夫, 北條仁士, 間瀬 淳
"超短パルスマイクロ波伝播の2次元シミュレーション"
プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
47. 間瀬 淳, 徳沢季彦, Leonid G.Bruskin, 近木祐一郎, 大山直幸, 板倉昭慶, Shigeyuki Kubota, 北條仁士, 市村 真, 玉野輝男, 谷津 潔
"マイクロ波反射計による密度分布および揺動計測"
プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
(招待講演)
48. 谷津 潔, 石井亀男, 板倉昭慶, 市村 真, 片沼伊佐夫, 際本泰士, 斉藤輝雄, 立松芳典, 玉野輝男, 長 照二, 平田真史, Leonid G.Bruskin, 北條仁士, 中嶋洋輔, 間瀬 淳, 吉川正志
"ガンマ10における加熱と輸送"
プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
(招待講演)
49. 石井亀男, 後藤哲也, 五井康裕, 菊野長興, 香月勇三, 長崎将雄, 小野芳裕, 石橋信次, 山梨 睦, 片沼伊佐夫, 市村 真, 間瀬 淳, 板倉昭慶, 玉野輝男, 谷津 潔,
"タンデムミラーにおける端損失イオン解析とイオン輸送"
プラズマ・核融合学会第14回年会, 大阪大学, 1997年11月25-28日.
50. 大山直幸, 間瀬 淳
"大型装置計測のためのミリ波イメージングアレイの開発"
東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究「ミリ波・サブミリ波帯計測システムの開発」研究会, 1997年12月19日.

51. 渡部謙一, 大山直幸, 間瀬淳, 水野皓司
"筑波大学 GAMMA10 用ミリ波イメージング光学系"
東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究「ミリ波・サブミリ波帯計測システムの開発」研究会, 1997年12月19日.
52. 渡部謙一, 大山直幸, 間瀬 淳, 水野皓司
"ミリ波イメージングアレイ用光学系"
核融合科学研究所研究会「大型装置計測のためのミリ波技術」1998年1月6-7日.
53. 大山直幸, 間瀬 淳, 長山好夫, 川端一男, 渡部謙一, 水野皓司, 三浦 明,
松浦裕之
"大型装置計測のためのミリ波イメージングアレイの開発"
核融合科学研究所研究会「大型装置計測のためのミリ波技術」1998年1月6-7日.
54. 北條仁士, 黒沢良夫, 間瀬 淳
"Microwave Diagnostic Simulator"
核融合科学研究所研究会「大型装置計測のためのミリ波技術」1998年1月6-7日.
55. Kubota Sigeyuki, 小沼 剛, 間瀬 淳, 徳沢季彦, 大山直幸, 板倉昭慶, 北條仁士,
Bruskin Leonid, 玉野輝男, 谷津 潔
"GAMMA 10 における超短パルス反射計の開発"
核融合科学研究所研究会「大型装置計測のためのミリ波技術」1998年1月6-7日.
56. 徳沢季彦, 間瀬 淳, Leonid Bruskin, 後藤巨樹, 大山直幸, Shigeyuki Kubota,
板倉昭慶, 玉野輝男, 谷津 潔
"反射計における密度揺動の効果と密度分布再構成"
核融合科学研究所研究会「大型装置計測のためのミリ波技術」1998年1月6-7日.
57. 間瀬 淳, 徳沢季彦, 近木祐一郎, L.Bruskin, 大山直幸, 板倉昭慶, 北條仁士,
市村 真, 玉野輝男, 谷津 潔, 犬竹正明
"マイクロ波散乱/反射計によるガンマ10の揺動分布計測と電場依存性"
仙台プラズマフォーラム「電場シアと揺動に関する研究会」1998年1月27-28日.
58. A.Mase, N.Oyama, H.Negishi, K.Watabe, K.Mizuno, Y.Nagayama, K.Kawahata,
H.Matsuura, A.Miura, Y.Harada,
"Development of Millimeter-Wave Imaging Array on GAMMA 10 and LHD"
US-Japan Workshop on Development of Time-Dependent Spectrometer in Millimeter and
Submillimeter-Waves, University of California at Davis, Feb.26-27 (1998).

59. K.Watabe, N.Oyama, A.Mase, K. Mizuno,
 "Millimeter-Wave Imaging Optics for GAMMA 10",
 US-Japan Workshop on Development of Time-Dependent Spectrometer in Millimeter and
 Submillimeter-Waves, University of California at Davis, Feb. 26-27 (1998).
60. A.Mase, T.Tokuzawa, S.Kubota, L.G.Bruskin, Y.Kogi, H.Hojo, T.Onuma, N.Goto,
 A.Itakura, T.Tamano, K.Yatsu, C.W.Domier, N.C.Luhmann, Jr.,
 "Density Profile and Fluctuation Measurements with FM and Ultrashort-Pulse Reflectometry
 on GAMMA 10", US-Japan Workshop on Development of Time-Dependent Spectrometer in
 Millimeter and Submillimeter-Waves, University of California at Davis, Feb. 26-27 (1998).
61. H.Hojo, Y.Kurosawa, A.Mase,
 "Microwave Diagnostic Simulator",
 US-Japan Workshop on Development of Time-Dependent Spectrometer in Millimeter and
 Submillimeter-Waves, University of California at Davis, Feb. 26-27 (1998).
62. 服部邦彦, 福士研司, 堀 史生, 安藤 晃, 犬竹正明, 間瀬 淳
 "HITOP 装置におけるマイクロ波反射計測"
 日本物理学会第 5 3 回年会, 日本大学, 1998年3月30日-4月2日.
63. 谷津 潔, 石井亀男, 板倉昭慶, 市村 真, 片沼伊佐夫, 際本泰士,
 Kubota Shigeyuki, 小波蔵純子, 斉藤輝雄, 坂本宣照, 立松芳典, 玉野輝男,
 長 照二, 徳沢季彦, 中嶋洋輔, 濱田 稔, 平田真史, L.G.Bruskin, 北條仁士,
 間瀬 淳, 吉川正志
 "ガンマ 1 0 における粒子閉じ込め"
 日本物理学会第 5 3 回年会, 日本大学, 1998年3月30日-4月2日.
64. 斉藤輝雄, 立松芳典, 際本泰士, 吉村泰夫, 梶原 健, 阿部 拓, 梅原成範,
 市村 真, 間瀬 淳, 玉野輝男, 谷津 潔
 "ガンマ 1 0 における AIC 波動励起時の端損失電子の特性"
 日本物理学会第 5 3 回年会, 日本大学, 1998年3月30日-4月2日.
65. 飽本一裕, 北條仁士, 間瀬 淳
 "荷電粒子と分散性パルスの相互作用"
 日本物理学会第 5 3 回年会, 日本大学, 1998年3月30日-4月2日.
66. 北條仁士, 黒沢良夫, 間瀬 淳
 "マイクロ波プラズマ診断シミュレータ"
 日本物理学会第 5 3 回年会, 日本大学, 1998年3月30日-4月2日.

III. 研究成果

1. はじめに

最近の超短光パルス技術開発の進展は著しい。現在ではフェムト秒 (fs) 域の超短パルスレーザー発振が実現、それを利用した高時間分解分光法が実用化しつつあり、光通信への応用も期待されている。プラズマ計測の分野では、ピコ秒 (ps) 短パルスレーザーを利用したライダートムソン散乱測定により 10 cm の空間分解で電子温度測定に成功している。さらなる改善のためには高時間分解測定など周辺技術の高速化が鍵となると考えられている。

磁場閉じ込めプラズマでは特性周波数 (カットオフ周波数, 共鳴周波数など) がマイクロ波一ミリ波領域に分布しているため, 入射電磁波としてこの領域の波長を用いることによりプラズマとの相互作用を期待することができ, 干渉, 散乱および放射などの計測法に幅広く応用されている。能動計測にはプローブビーム (光源) が必要で, 周波数固定発振器, 狭帯域発振器, および広帯域発振器が用途に応じて用いられてきた。

時間幅 τ_p をもつインパルスは, そのフーリエ成分として, 特性周波数 $\omega_0 = \pi/2\tau_p$, 最大周波数 $\omega_{\max} = 2\pi/\tau_p$ で分布するスペクトルを有する。従ってその周波数がマイクロ波領域に達するパルス幅 100 ps 以下の超短パルス波は, 一台のパルス発振器で多数個の周波数固定発振器あるいは広帯域掃引発振器と等価な役目をもつことになり, このパルスが空間的に非一様なプラズマ中を伝搬するとき様々な相互作用を同時に観測することが可能となる。例えば, プラズマのカットオフ周波数より低いフーリエ周波数成分は, カットオフ層により反射されるが, 周波数によって反射点が異なり反射波に時間差が生じるため, 検出器への到達時間と周波数スペクトルを測定することにより, プラズマの密度分布を決定することができる。一方, 高周波成分はプラズマ中を屈折あるいは電子サイクロトロン共鳴周波数領域では吸収を受けながら透過する。この電磁波の屈折はプラズマの密度の関数であり, また, 吸収は密度および電子温度両者の関数であるため, 透過波の周波数スペクトルを測定することにより電子温度を決定することも可能となる。

超短パルスマイクロ波・プラズマ相互作用の重要な応用として, 核融合実験装置の計測手段として最も期待されている反射法への適用が考えられる。反射計により密度分布を測定するには, 一般的に狭帯域発振器を多数個合成する方法, あるいは広帯域掃引発振器を用いるいわゆる周波数掃引形 (FM) 反射計が用いられてきたが, 反射波と参照波の間の干渉測定により得られる位相変調信号 (ビート信号) がプラズマの密度揺動による変調信号によってマスクされる場合測定が困難となる。反射計における反射点の位置測定精度は次式で与えられる [1]。

$$\sigma = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \frac{c}{\Delta f} \cdot \frac{1}{\sqrt{S/N}} \quad (1)$$

ただし、 c は光速、 Δf は掃引周波数幅、 S/N は測定の実信号対雑音比である。したがって雑音となる密度揺動成分のできるだけ小さい条件で測定することが測定精度向上に必要となる。この密度揺動の影響を避けるため種々の方法が提案されてきた。FM反射計において、周波数掃引時間を密度揺動の特性時間より速くとることにより密度揺動レベルの小さい領域にフリンジ周波数（ビート周波数）を持っていき検出を行う方法[2, 3]、周波数の接近している2台あるいは3台の発振器を用い、密度揺動による位相変調成分をキャンセルする二波長あるいは振幅変調形反射計（AMリフレクトメータ）[4, 5]、密度揺動の凍り付いた時間内で測定を行うパルスレーダー等である[6, 7]。

本研究は、超短パルスマイクロ波とプラズマの相互作用に関する実験的および理論的解析を進め、工学的応用への指針を与えること、特に反射計に適用しその原理的実証を図ること、超短パルスマイクロ波伝搬に関する計算機シミュレーションを行い、実験との対応を調べることにより、プラズマ診断法としての確立を図ることを目的とした。

2. 超短パルス反射計の設計

2.1 入射パルス幅の選択

超短パルス反射計のガンマ10への適用を目的として、入射光源（インパルス）の仕様を検討した。参考資料としてガンマ10セントラル部の特性周波数の半径方向分布を図1に示した。ただし、磁場はセントラル中心で4.06 kGの標準モード、電子密度は中心で $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ のパラボリック分布を仮定した。入射波として正常波(O)モードを用いた場合カットオフ周波数が12.6 GHz以下、異常波(X)モードを用いた場合11.4-19 GHzとなり、両伝搬モードに対して7-18 GHzが主要領域となる。

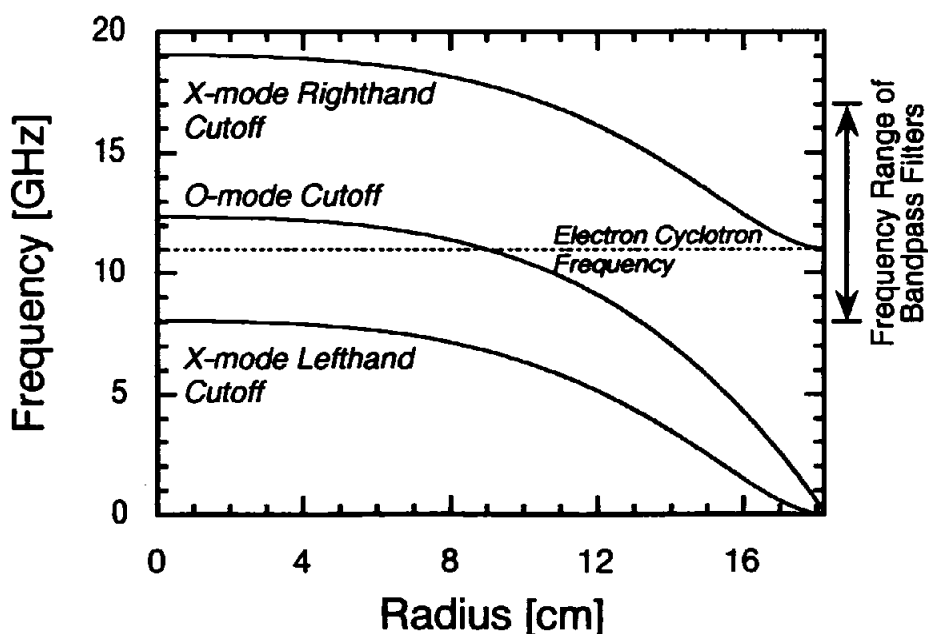


図1 ガンマ10セントラル部の特性周波数。

図2は、市販されているピコ秒領域のインパルス発生器とそのフーリエ周波数成分を示す。以上より、光源としてパルス幅（半値幅：FWHM）65 ps、振幅8 Vのインパルス発生器（Picosecond Pulse Laboratory 社：3500D型）を用いることとした。

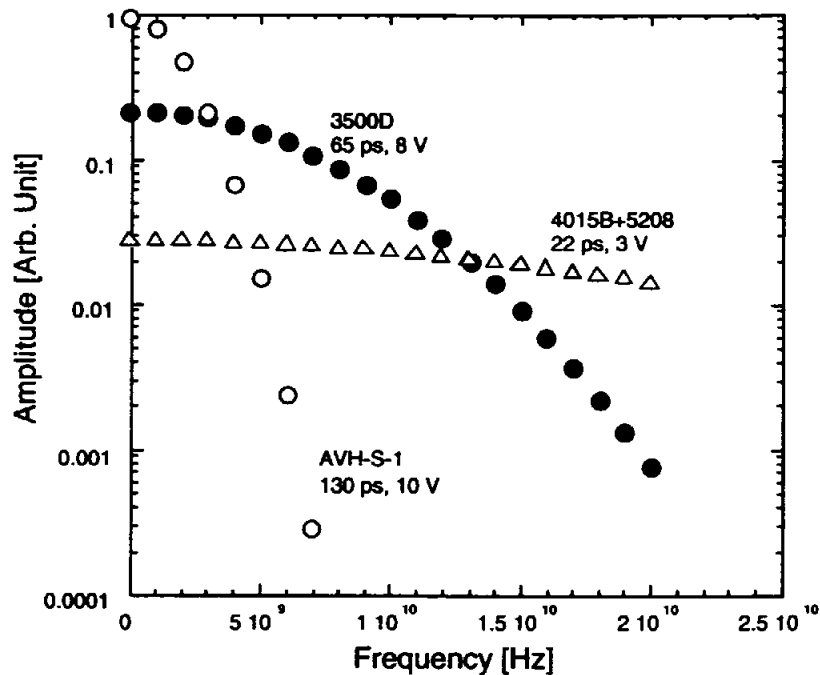


図2 市販されているインパルス発生器とそのフーリエ周波数成分。

2.2 伝送系の選択

周波数領域が8-17 GHz帯であるため、伝送系の一部は低損失のセミリジッド同軸ケーブルを使用することができる。同軸導波管変換器からアンテナまでは、広帯域のダブルリッジ導波管WRD-750を用いることができる。問題はパルス振幅8 Vが入射電力として十分かという点である。インパルス発生器の出力波形はガウシアン分布であるため図2にも示されているように、フーリエ周波数としては直流成分が最大で単調減少する形となっている。したがって、このパルスをそのまま増幅した場合には低周波成分で飽和してしまい、高周波領域で必要な出力を得ることが困難となる。この点を解決するため考えられたのが、導波管の分散特性の利用である。インパルス出力は導波管を通過させると、その周波数成分により伝搬速度が異なるため、時々刻々周波数の変化するチャープパルスを得ることができる。また、低周波成分は導波管のカットにより減衰するため、必要な周波数領域を効率よく増幅することが可能となる。実験では最適な波形を得るため、長さ0.3 mのWRD-750導波管を利用した。

3. 超短パルス反射計のガンマ10プラズマへの適用

3.1 超短パルス反射計装置

ガンマ10セントラル部に設置した超短パルス反射計の概略を図3に示す[8]。発振器としては2章で議論したように、パルス幅65 ps、出力8 Vのインパルス発生器を用いた。繰り返しは最大1 MHzとなっている。パルス出力は、分散特性を持つ導波管を通すことによりチャープパルスとなる。図4(a)にインパルス発生器出力、(b)に0.3 mのWRD-750導波管通過後に得られるパルス波形を示した。このチャープパルスは、帯域幅6-18 GHz、利得23 dBのマイクロ波増幅器で増幅された後、再び導波管に変換され、角錐ホーンによりテフロン窓を経由してガンマ10上部ポートよりプラズマに照射される。反射波は独立の角錐ホーンにより受信されるが、実験に使用した2台の角錐ホーンは同一のものでなく、方位角方向の測定領域を考慮して、送信側は高利得ホーン、受信側は開口面の小さい低利得ホーンを使用した。

反射波信号は、帯域幅6-18 GHz、利得40 dBのマイクロ波増幅器で増幅され、中心周波数8-15 GHz、帯域幅3% (240-450 MHz)のフィルターバンクにより8チャンネルの周波数領域に分けられた後、ショットキーダイオードにより自乗検波される。データ収集は二種類の方式について検討を進めた。当初は図3にあるように、最小サンプリング時間100 ps、入力帯域幅750 MHzのデジタルストレージオシロスコープ(LeCroy: 9362)によりAD変換し記録したが、1チャンネル/台のためショット毎に測定周波数を変え

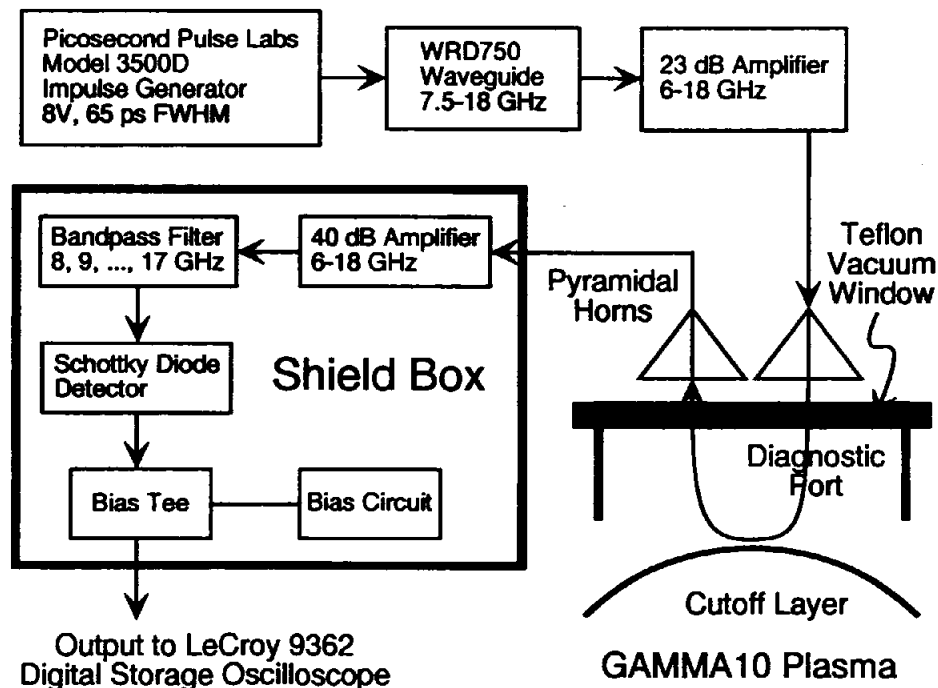


図3 ガンマ10超短パルス反射計の概略図。

ていく必要があった。現在は時間-電圧変換器（Time-to-Amplitude Converter：TAC）により電圧に変換した後デジタル化する方法的整備を図っており、3.3に示すように結果も得られつつある。なお、後者の時間分解は ~ 25 psとなっている。

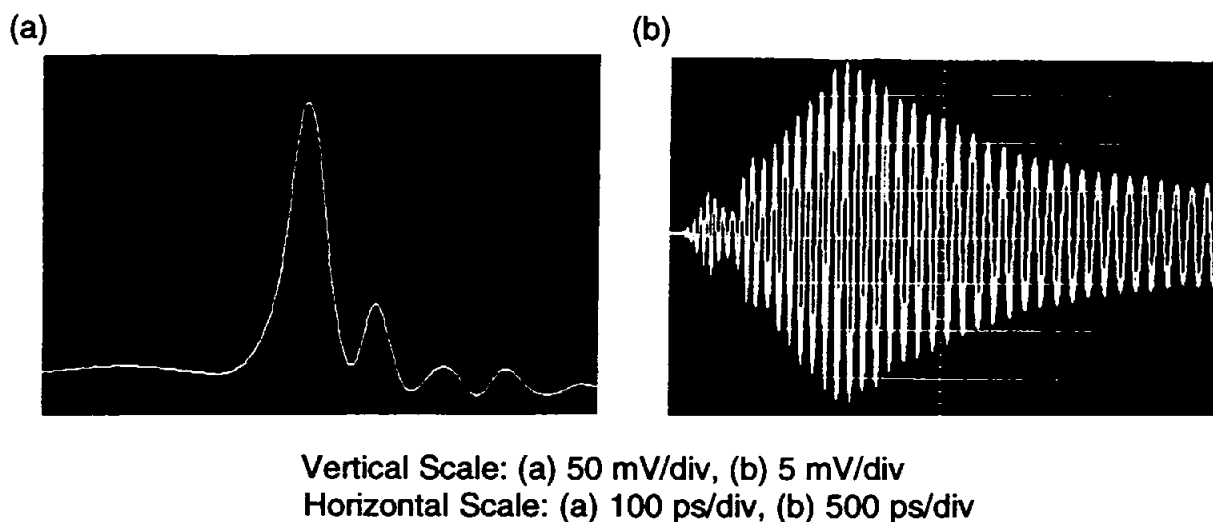


図4 (a) インパルス発生器出力, (b) チャーフトパルス波形。

3.2 システムのシミュレーション実験

金属ミラーを用いた反射計システムのシミュレーション実験を実施した。図5は種々の金属ミラー位置からの反射波信号をホ同軸変換の後直接サンプリングスコープで観測したもので、システムとしての時間分解 ~ 25 ps, 空間分解 < 1 cmが得られている。

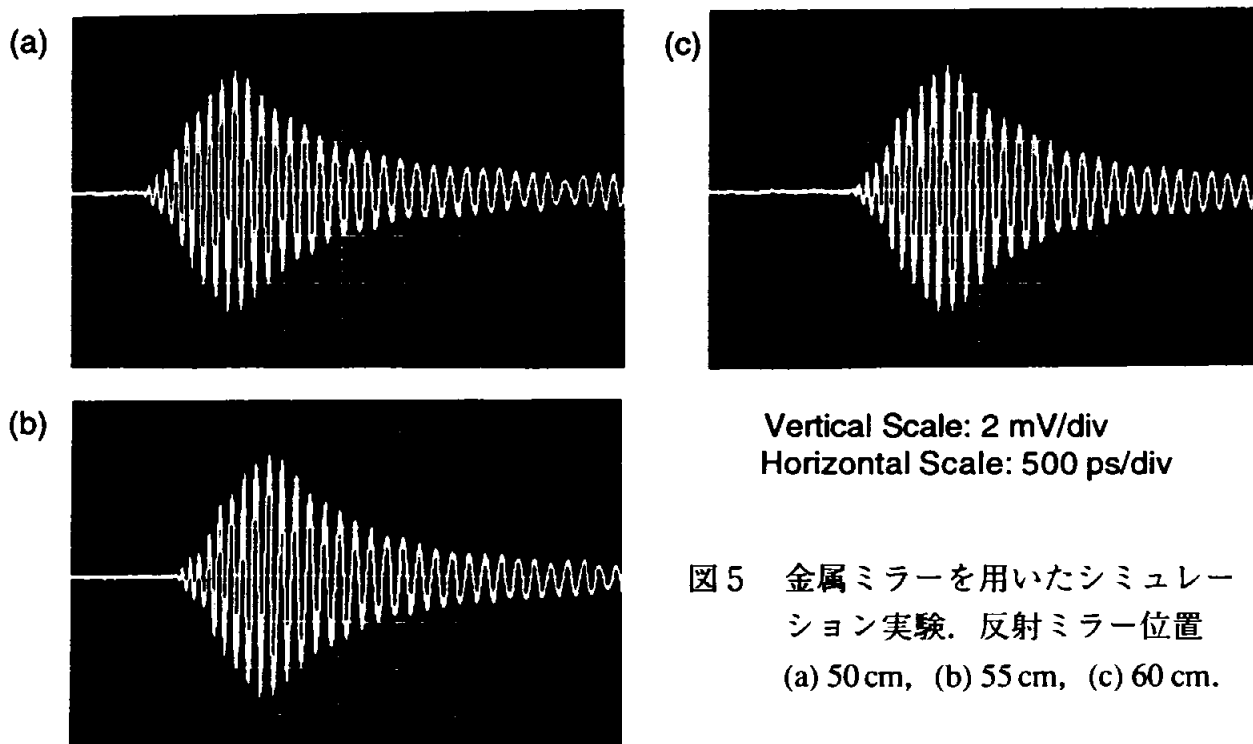


図5 金属ミラーを用いたシミュレーション実験。反射ミラー位置 (a) 50 cm, (b) 55 cm, (c) 60 cm。

3.3 セントラル部密度分布測定の原理的実証

図6および図7は、超短パルスを正常波モードで入射し、それぞれ中心周波数9 GHzおよび10 GHzのバンドパスフィルタにより得られた反射波信号を自乗検波した波形を描いたものである。(a)はプラズマ有り、(b)はプラズマなし、(c)は真空窓に金属板を置いたときの波形である。検波器出力のパルス幅2-3 nsはフィルタのバンド幅で決まっている。(c)と(a)の時間差が、真空窓とカットオフ密度層間の飛行時間に対応していることになる。(b)は対向壁からの反射を示している。このようにして得られた飛行時間を種々のフィルタ周波数に対してプロットしたものが図8で、実線はマイクロ波干渉計で測定された線密度をアーベル変換することにより得られた密度分布を用い、

$$\tau(f) = \frac{2}{c} \int_{x_w}^{x_1} dx \left(1 - \frac{f_{pe}}{f} \right)^{-1/2} \quad (2)$$

により計算した飛行時間を表す。ただし、 f_{pe} は電子プラズマ周波数である。反射計で得られた飛行時間は、マイクロ波干渉計で求められた密度分布から計算される値と誤差の範囲内で一致していることが分かる [8]。

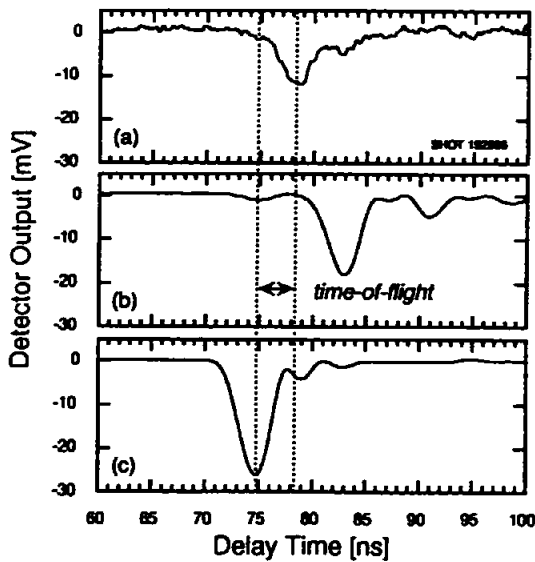


図6 検出器出力 (中心周波数 9 GHz).

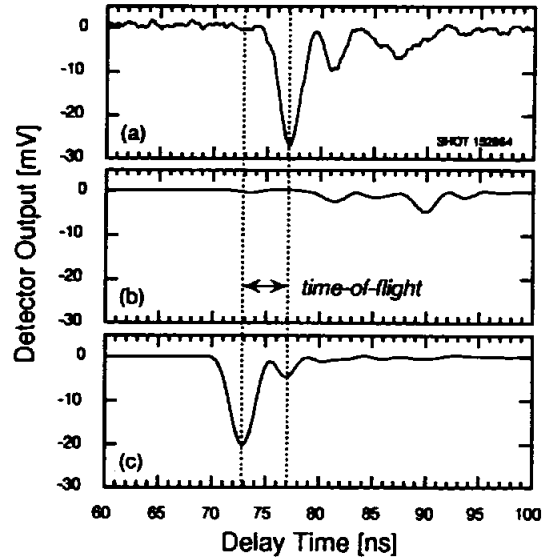


図7 検出器出力 (中心周波数 10 GHz).

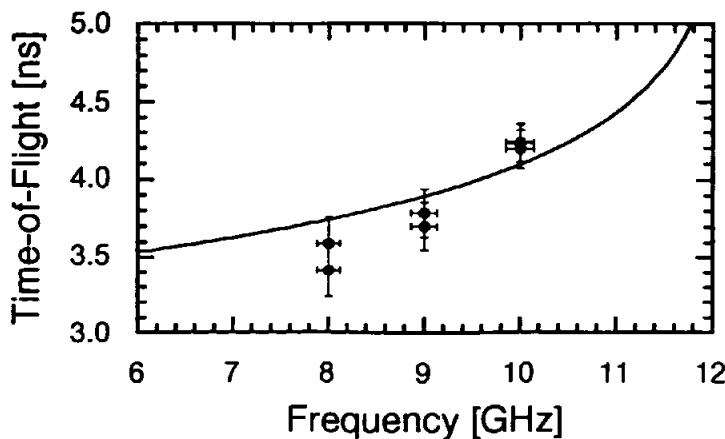


図8 種々のフィルタに対する飛行時間。

3.4 密度および密度揺動の同時測定

パルス発生器の繰り返しを利用し、カットオフ層の時間変化を観測することができれば、繰り返し頻度によっては、密度分布の時間変化と同時に密度揺動の測定も可能となる。これを実現するためには、1ショット/パルスのデータ収集のみが可能なデジタルストレージオシロスコープ (LeCroy : 9362 DSO) でなく、ディスクリミネータと時間-電圧変換器 (TAC) を組み合わせたデータ収集系が必要となる。

図9(a)は、TACシステムにより得られた飛行時間の時間変化で、パルスの繰り返しは50 kHzである。金属ミラーからの反射信号はほぼ一定の値を示しているが、プラズマからの反射では低周波のコヒーレントな振動が観測される。フィルターの中心周波数は10 GHzの場合で、カットオフ層が時間的に揺らいでおり、密度揺動が存在することが推定される。因みに、規格化密度揺動は $\sim 10\%$ と算出された。図9(b)はセントラル部に設置している、マイクロ波前方散乱法により得られた密度揺動の周波数スペクトルで、時間90 msにみられる周波数のピークは、超短パルス反射計で観測される低周波振動と良く一致しており、繰り返し時間を選択すれば、密度分布と同時に、密度揺動も測定することが可能となることが分かった。

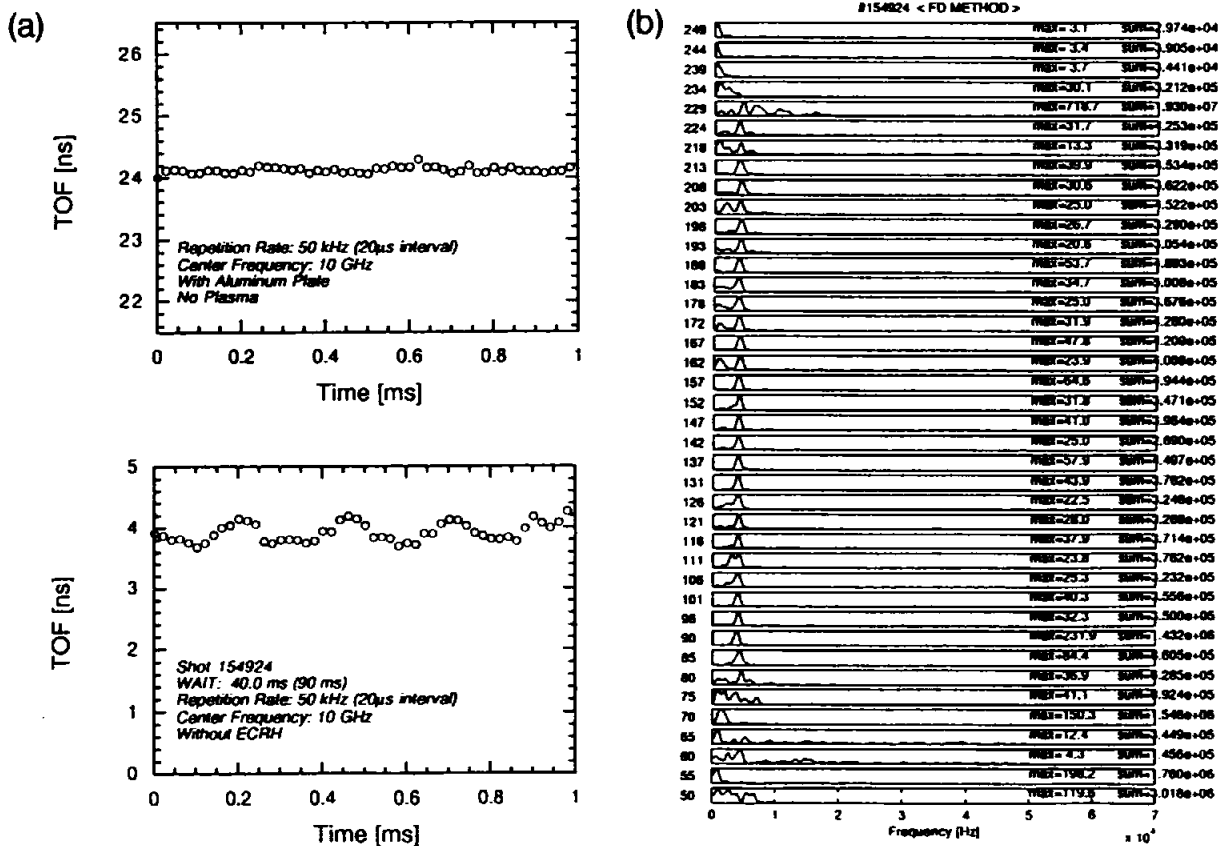


図9 (a) TACシステムにより得られた飛行時間の時間変化。
上：金属ミラーからの反射，下：プラズマからの反射 ($t=90$ ms),
(b) マイクロ波散乱法で得られた密度揺動のスペクトル。

4. 高速周波数掃引型反射計の改良

4.1 はじめに

研究代表者らは、周波数掃引型 (FM) 反射計において掃引時間を密度揺動の特性時間より速くとることにより、密度揺動レベルの小さい領域にフリンジ周波数 (ビート周波数) を持っていき位相検出を行う高速掃引型 FM 反射計の開発を行ってきた。本研究では、超短パルス反射計の開発と同時に、この FM 反射計の改良も並行して進めた。主要結果を以下にまとめる。

4.2 反射計の構成と密度分布再構成

図10に反射計の概略を示す。周波数 11.5-18 GHz, 出力 20-30 mW の HTO (Hyperabrupt Varactor-Tuned Oscillator) 出力は、方向性結合器により入射波と参照波に分離される。入射波は集光鏡を持つホグホーンアンテナを経てプラズマに照射される。独立のホーンにより受信された反射波信号は、参照波信号とミックスされフリンジ波形を得る。HTO は高速掃引可能な発振器であり、全周波数にわたっての最速掃引時間 $0.5 \mu\text{s}$ が確認されている。

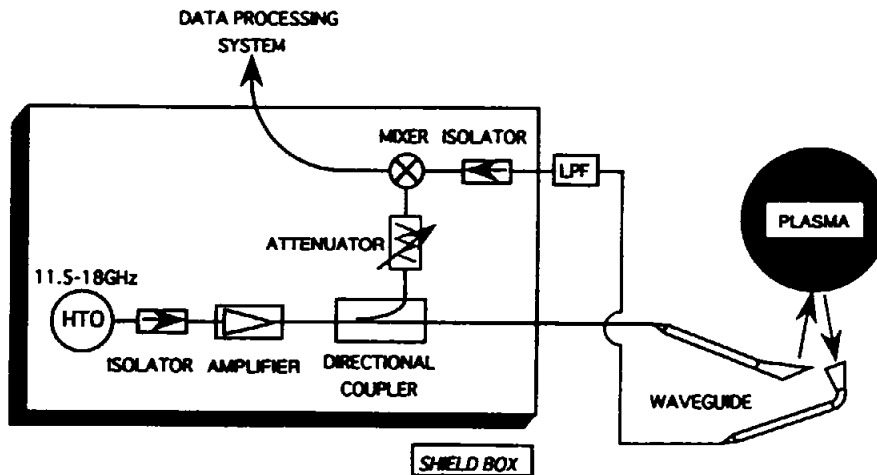


図10 高速周波数掃引型反射計の概略。

位相波形の信号解析法を工夫することも行われている。本研究グループでは、初期のゼロクロス法以外に、少ないデータ量で周波数分解が期待できる最大エントロピー法 (MEM) 解析による方法 [9], 原理的に時間一周波数解析が可能なウェーブレット変換による方法 [10], ソフトウェア上でヘテロダイン検波を行う Digital Complex Demodulation 法 (CDM) [11], などを比較しながら信号解析法の最適化を図っている。

図11 および図12 は種々の掃引周波数に対して得られた密度分布再構成の例で、それぞれ、ゼロクロス法および CDM 法による信号処理を行っている。実線がマイクロ波干渉計データをアーベル変換することにより得られた密度分布である。予想通り、掃引速

度に依存して分布再構成の信頼度が向上していることが分かる。また、信号解析法を工夫することにより掃引速度に対する要求が緩和されると同時に、掃引速度を上げることにより信号解析法に対する要求も緩和されると云うことができる。

FM 反射計における反射波と参照波間のミキシングによるビート周波数は、掃引速度に比例すると共に両者の光路差 ΔL にも依存していることが分かっている。実験では、 ΔL が大きくなりビート周波数が上昇するにつれ、分布再構成の信頼度が向上することも見られた。

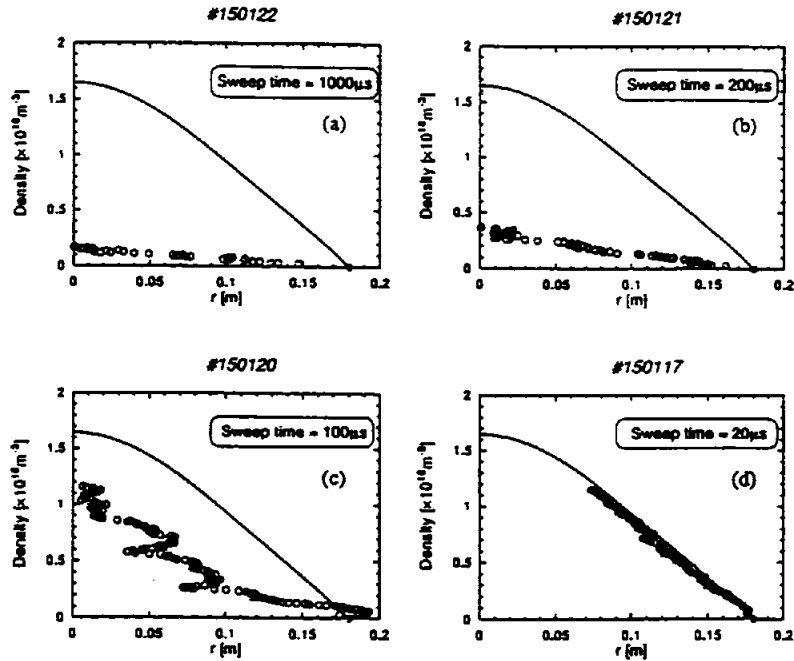


図 11 種々の掃引速度に対する密度分布再構成 (ゼロクロス法)。

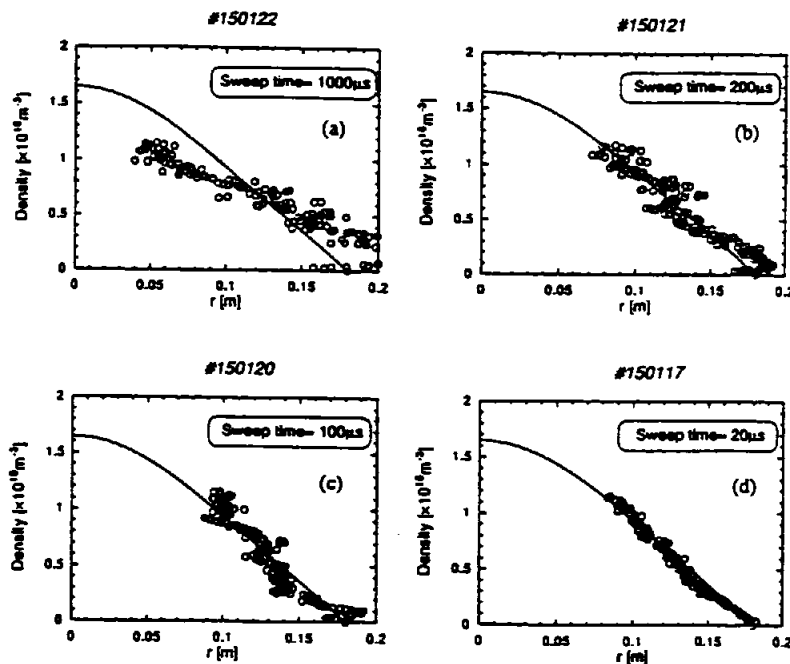


図 12 種々の掃引速度に対する密度分布再構成 (CDM 法)。

5. 超短パルスマイクロ波・プラズマ相互作用の理論シミュレーション

5.1 超短パルスマイクロ波の伝搬と反射法

マイクロ波は GHz 領域にあるので、マイクロ波の伝搬過程におけるマイクロ波に対するイオンの応答は近似的に無視することができる。この時、マイクロ波の伝搬を決定する基礎方程式は

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} E + c^2 \nabla(\nabla \cdot E) - c^2 \nabla^2 E + \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial}{\partial t} J = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial}{\partial t} J = \omega_{pe}^2 E - \frac{e}{m_e \epsilon_0} J \times B \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 E は電場、 J は電流密度であり、プラズマ密度分布はプラズマ振動数 ω_{pe} 、磁場分布は B の中に含まれる。外磁場を z 方向にとると、 E_z 成分は O モードを表し、 E_x 、 E_y は X モードに対応する。ここで考察する O モードを用いた超短パルス反射法に対しては、スラブモデルを用いる時、一次元モデルに対する基礎方程式は

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \omega_{pe}^2(x) \right] E(x, t) = 0 \quad (5)$$

に帰着し、また二次元モデルでは

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2 \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \omega_{pe}^2(x) \right] E(x, y, t) = 0 \quad (6)$$

に帰着する。ここで、電場 E は E_z を表す。O モードを用いた超短パルス反射法では密度分布の再構成は、

$$\tau(\omega) = \int_0^{x_r} dx \frac{2}{v_g} = \int_0^{x_r} dx \frac{2}{c} \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 - \omega_{pe}^2(x)}} \quad (7)$$

で与えられる反射波が帰ってくるまでの遅延時間 $\tau(\omega)$ が分かると、このアーベル逆変換からある周波数に対するカットオフの位置 x_r が次式から求めることができる。

$$x_r(\omega_{pe}) = \int_0^{\omega_{pe}} d\omega \frac{c\tau(\omega)}{\pi \sqrt{\omega_{pe}^2 - \omega^2}} \quad (8)$$

反射波の信号から遅延時間 $\tau(\omega)$ を求める方法としては、ゼロクロス法と、これと相補的なピークカウント法を用いて行った。これらの方程式を基に、一次元および二次元

モデルの双方に対して、超短パルス反射法に関するシミュレーションを行った。

一次元モデルによるシミュレーションでは、密度揺動がない場合はゼロクロス法とピークカウント法の双方とも密度分布を精度良く再構成できること、また密度揺動がある場合に対してはピークカウント法の方がゼロクロス法よりも精度良く再構成できることが分かった。ここで、図13において、実線はピークカウント法による再構成結果、破線はゼロクロス法による再構成結果、そして点線はオリジナルな密度分布を表す。

二次元モデルによるシミュレーションも実行し、一次元シミュレーション結果との相違を明らかにした。二次元シミュレーションでは二次元空間への波の拡がりから反射波の信号が一次元の場合よりも小さくなり、したがって高密度領域での再構成が一次元の場合よりも難しくなることが分かった。図14にサブサイクルパルスの二次元伝播の様子を、また図15には一次元および二次元シミュレーション（この場合 $y=0$ の面での電場を見る）での電場の波形の違いを示す。

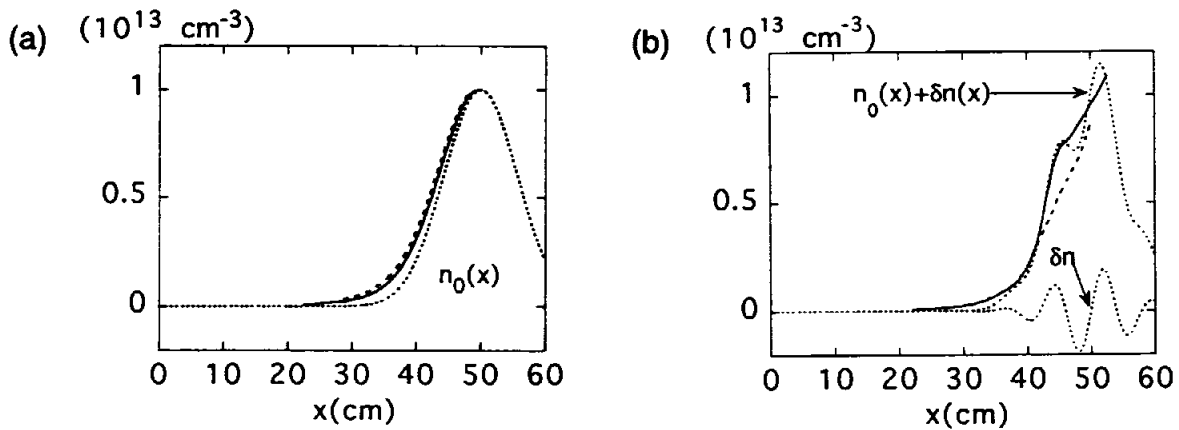


図13 超短パルス反射計における密度分布再構成。密度揺動 (a) なし, (b) あり。

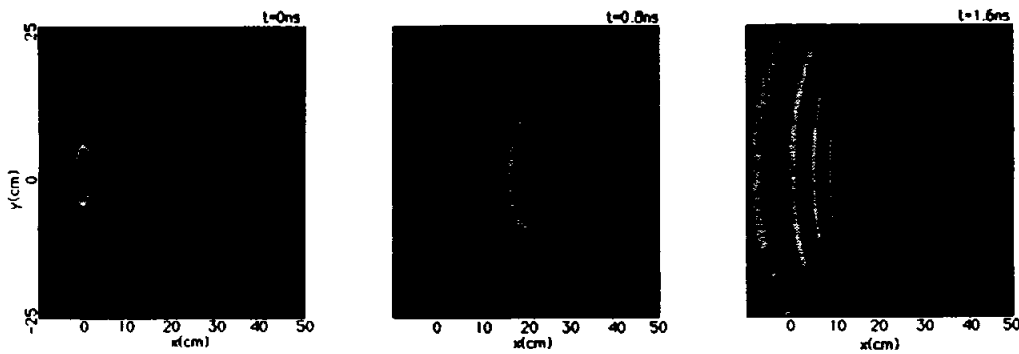


図14 超短パルス伝搬の二次元シミュレーション

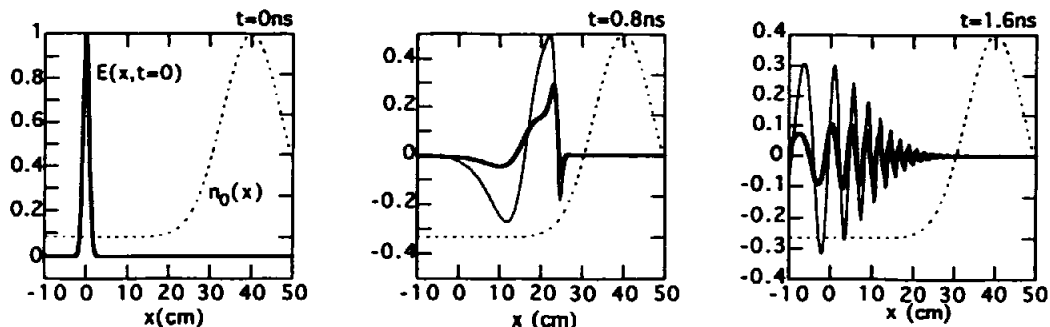


図15 一次元と二次元の数値計算結果比較。

5.2 荷電粒子と分散性パルスの相互作用

荷電粒子と分散性ラングミュア波パルスの相互作用についての数値解析を進めている。ラングミュア波パルスの場合、電子の走行時間中の分散効果としてのパルスの拡散は無視することができる。シミュレーション結果に基づいて形状を決定したパルスと電子の相互作用をテスト粒子計算によって解析した。その結果、従来の正弦波や非分散性パルスと同様に電子はその初速度によって走行時間加減速され得ることが判明した。また、特にパルス搬送波の位相速度に近い初速度を持つ粒子がパルスに入射されるとき、大きな速度変調を経験し、その大きさと周期とは正弦静電波による電子捕捉の理論結果で説明できる。この現象は、本質的には、共鳴電子がパルスを通過する際にパルスによって一時的に捕捉され1バウンド周期後にパルスから離脱することを表している。

図16は $Z/\lambda_e = -200$ から右方向に入射する電子が $-200 < Z/\lambda_e < 200$ に位置する静電パルスと相互作用する様子を表している。ただし、電子の初速度は $0.5V_e$ から $15V_e$ まで $0.5V_e$ 毎に量子化されている。時間経過につれて電子分布が渦構造を成す様子が見られる。この走行時間捕捉により、電子・パルス相互作用の位相が変化するための波の振幅変調が起こり、パルスがさらに増幅されるという帰還機構がラングミュア波乱流中に存在することも見出された。

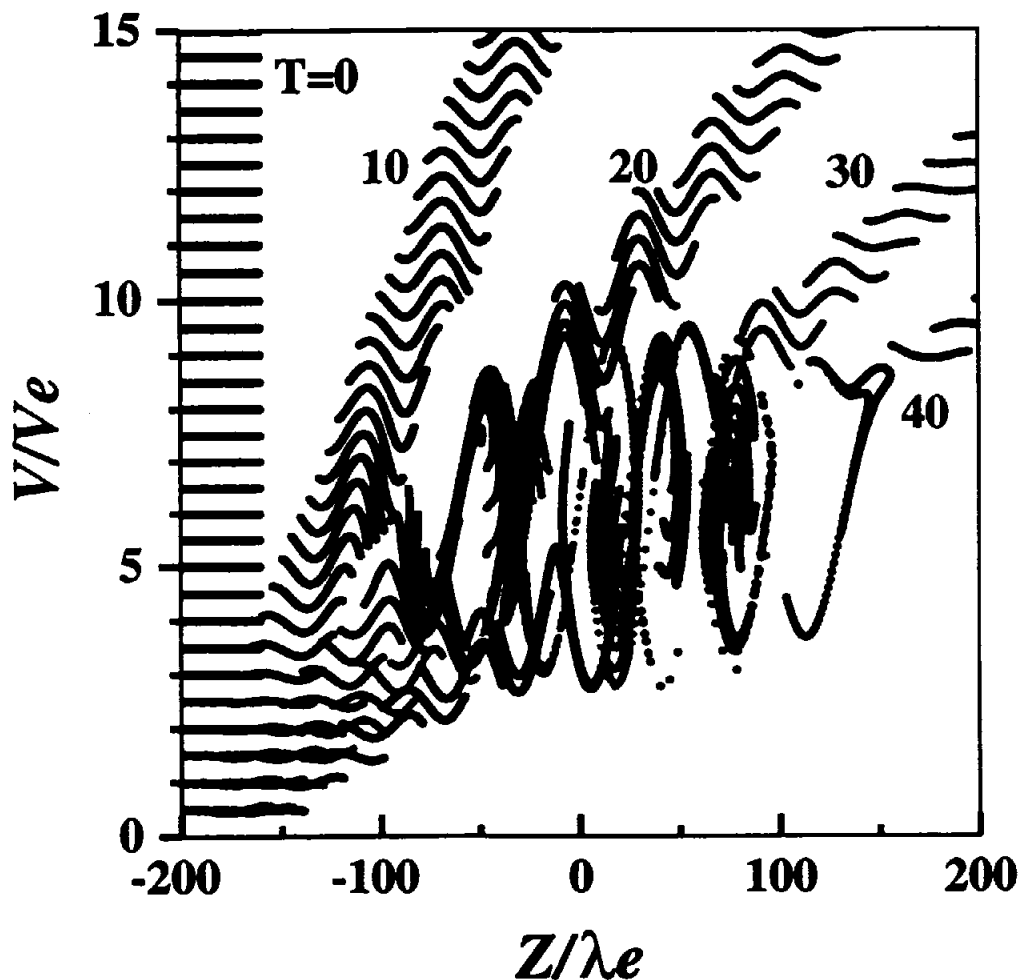


図16 電子と静電パルスとの相互作用。

6. まとめ

- 1) 超短パルスマイクロ波のプラズマ診断への応用として、超短パルス反射計を製作した。光源としてパルス幅 65 ps 振幅 8 V のインパルスを用い、導波管によりチャープトパルスとした後、マイクロ波増幅器 (23 dB, 6-18 GHz) で増幅し入射波とした。反射波信号は増幅後フィルタにより周波数分割し、検波したのち超高速デジタルにより A/D 変換した。同時に、ディスクリミネータと時間-電圧変換器によりパルスの時間差波高変換を行うシステムも製作した。
- 2) 超短パルス反射計をガンマ 10 プラズマに適用し、インパルスのフーリエ成分の周波数毎に、異なるカットオフ層までの伝搬に対応する飛行時間差を得た。この結果と干渉計で得た密度分布との比較を行い、両者が一致することを確認した。また、繰り返しパルスにより測定された飛行時間の揺らぎのスペクトルは、マイクロ波前方散乱信号と一致し、本反射計が密度分布および密度揺動分布の同時測定に有効であることを初めて実証した。
- 3) 超短パルス反射計との比較に用いる、周波数 8-26 GHz の高速掃引形反射計を製作し、ガンマ 10 に適用した。高速掃引 (< 20 μ s) とともに密度分布再構成の信頼度が向上すること、また、信号の計算機処理法の改良により、掃引速度への要求が緩和されることも確認した。
- 4) 超短パルスマイクロ波のプラズマ中の伝搬に関する計算機シミュレーションを実行し、反射法としての有効性を確認した。一次元モデルによるシミュレーションでは、密度揺動がない場合はゼロクロス法とピークカウント法の双方とも密度分布を精度良く再構成できること、また密度揺動がある場合に対してはピークカウント法の方がゼロクロス法よりも精度良く再構成できることが分かった。二次元モデルによるシミュレーションも実行した。二次元空間への波の拡がりから反射波の信号が一次元の場合よりも小さくなり、高密度領域での再構成が一次元の場合よりも難しくなることが分かった。
- 5) 分散性パルスと荷電粒子の相互作用に関する理論シミュレーションを実行した。分散性パルスは、他のパルスや正弦波と同様に、荷電粒子を捕捉あるいは加速することを確認した。また、この捕捉の効果は電子ビームにより励起されるラングミュア乱流において重要な役割を果たしていることが分かった。
- 6) 超高速マイクロ波モノリシック集積回路 (GaAs-HBT) を製作し、プラズマ計測に初めて適用した。

謝辞

本研究を遂行するに当たってご協力いただいたガンマ 10 グループの皆様へ深く感謝致します。また、貴重なご助言および討論とともにご協力を多くの皆様からいただきました。それらにつきましては個々の論文の中で感謝いたします。

参考文献

- [1] P. Millot, Proc. IAEA Technical Committee Meeting on "Microwave Reflectometry for Fusion Plasma Diagnostics", Princeton (1994).
- [2] T. Tokuzawa, A. Mase, N. Oyama, A. Itakura, and T. Tamano, Rev. Sci. Instrum. **68**, 443 (1997).
- [3] K. W. Kim, E. J. Doyle, T. L. Rhodes, W. A. Peebles, and C. L. Rettig, Rev. Sci. Instrum. **68**, 466 (1997).
- [4] J. Sanchez, B. Branas, T. Estrada, E. de la Luna, and V. Zhuravlev, Rev. Sci. Instrum. **63**, 4654 (1992).
- [5] G. R. Hanson, J. B. Wilgen, T. S. Bigelow, I. Collazo, A. C. England, M. Murakami, D. A. Ramussen, and J. R. Wilson, Rev. Sci. **66**, 863 (1995).
- [6] S. H. Helijnen, M. de Baar, A. J. H. Donné, M. J. van de Pol, C. A. J. Hegenholtz, and the RTP team, Rev. Sci. Instrum. **66**, 419 (1995).
- [7] C. W. Domier, N. C. Luhmann, Jr., A. E. Chou, W-M. Zhang, and A.J. Romanowsky, Rev. Sci. Instrum. **66**, 399 (1995).
C.W.Domier, N.C.Luhmann, Jr., and A.Mase, Bull. Am. Phys. Soc. **41**, 1591 (1996).
- [8] S. Kubota, T. Onuma, A. Mase, T. Tokuzawa, N. Oyama, A. Itakura, H. Hojo, L.G.Bruskin, T. Tamano, K. Yatsu, C. W. Domier, and N. C. Luhmann, Jr., Jpn. J. Appl. Phys. **37**, L300 (1998).
- [9] M. Nagatsu, A. Fuse, and A. Mase, Plasma Phys. Control. Fusion **38**, 1033 (1996).
- [10] L. G. Bruskin, A. Mase, T. Tokuzawa, N. Oyama, A. Itakura, and T. Tamano, Rev. Sci. Instrum. **69**, 425 (1998).
- [11] K. W. Kim, E. J. Doyle, W. A. Peebles, A. Ejiri, N. C. Luhmann, Jr., and C. L. Rettig, Rev. Sci. Instrum. **66**, 1229 (1995).

IV. 添付資料

1. A.Mase, H.Hojo, M.Kobayashi, N.Oyama, L.G.Bruskin, E.J.Doyle, 33
T.Tokuzawa, A.Itakura, M.Ichimura, T.Tamano,
"ICRF Physics Measurements by Reflectometry", *Diagnostics for Experimental
Thermonuclear Fusion Reactors*, Eds. P.Stott, G.Gorini, and E.Sindoni
(Plenum Press, New York, 1996) p.153.
2. M.Nagatsu, A. Fuse, A. Mase, 43
"Application of Maximum Entropy Method to Density Profile Measurement via
Microwave Reflectometry on GAMMA 10",
Plasma Phys. Contr. Fusion. **38**, 1033 (1996).
3. T.Tokuzawa, A.Mase, N.Oyama, A.Itakura, T.Tamano, 53
"Ultrafast Broadband Frequency-Modulation Reflectometer for Density Profile
Measurements in GAMMA 10", Rev. Sci. Instrum. **68**, 443 (1997).
4. A.Mase, L.G.Bruskin, N.Oyama, T.Tokuzawa, H.Inutake, M.Yokoi, 56
A.Itakura, H.Hojo, M.Ichimura, T.Tamano,
"Measurement of Magnetic Fluctuations of Electromagnetic Plasma Waves by
Cross-Polarization Scattering", Rev. Sci. Instrum. **68**, 454 (1997).
5. N.Oyama, A.Mase, T.Tokuzawa, K.Imamura, A.Itakura, T.Tamano, 60
Y.Harada, K.Mizuno,
"Millimeter-Wave Two-Dimensional Imaging Array for the GAMMA10
Tandem Mirror", Rev. Sci. Instrum. **68**, 500 (1997).
6. Y.Kogi, A.Mase, L.G.Bruskin, N.Oyama, T.Tokuzawa, A.Itakura, 64
H.Hojo, T.Tamano,
"Cross-Polarization Scattering from Low-Frequency Waves in a Tandem
Mirror Plasma", Jpn. J. Appl. Phys. **36**, L587 (1997).
7. L.G.Bruskin, A.Mase, T.Tokuzawa, N.Oyama, A.Itakura, T.Tamano, 67
"Wavelet Application for Reflectometry of Plasma Density Profiles",
Jpn. J. Appl. Phys. **36**, L632 (1997).

8. A.Mase, T.Tokuzawa, L.G.Bruskin, Y.Kogi, N.Oyama, A.Itakura,
T.Tamano, K.Yatsu,
"Density Profile and Fluctuation Measurements on GAMMA 10 Using
FM Reflectometer", Proc. 3rd Workshop of Microwave Reflectometry
for Fusion Plasma Diagnostics, Madrid (1997) p.11.

69
9. A.Mase, M.Kobayashi, N.Oyama, T.Tokuzawa, H.Inutake, M.Yokoi,
A.Itakura, H.Hojo, L.G.Bruskin, M.Ichimura, T.Tamano,
"Reflectometric Measurement of Density and Magnetic Fluctuations in
ICRF-Driven Waves", Fusion Eng. Design **34-35**, 371 (1997).

78
10. N.Oyama, A.Mase, T.Tokuzawa, K.Imamura, A.Itakura, Y.Ito, T.Tamano,
"Plasma Diagnostics Using Millimeter-Wave Two-Dimensional Imaging Array",
Fusion Eng. Design **34-35**, 407 (1997).

82
11. M.Nagatsu, M.Aoki, S.Kubota, H.Arimoto, K.Sato,
"Study of the Dynamic Behavior of the STP-3(M) RFP Plasma Using Microwave
Reflectometry ", Fusion Eng. Design **34-35**, 437 (1997).

86
12. L.G.Bruskin, A.Mase, T.Tamano,
"Resolution of Microwave Correlation Reflectometry",
Fusion Eng. Design **34-35**, 441 (1997).

90
13. H.Hojo, H.Honda, N.Katsuragawa, A.Mase,
"Ultrashort-Pulse Microwave-Plasma Interactions and Reflectometry",
Fusion Eng.Design **34-35**, 447 (1997).

95
14. T.Tokuzawa, A.Mase, N.Oyama, T.Uchiyama, A.Itakura, T.Tamano,
"Reflectometric Density Profile Measurement Using an Ultrafast Sweep
Oscillator", Fusion Eng. Design **34-35**, 451 (1997).

99
15. N.Oyama, A.Mase, T.Tokuzawa, A.Itakura, T.Tamano, K.Yatsu,
Y.Nagayama, K.Kawahata, K.Watabe, K.Mizuno, A.Miura,
H.Matsuura, Y.Harada,
"Development of Millimeter-Wave Two- Dimensional Imaging Array
for Large Fusion Devices", Proc. 8th Int. Symp. on Laser-Aided Plasma
Diagnostics, Doorwerth (1997)p.343.

103

16. K.Akimoto, 109
 "Theory of Pulse-Particle Interaction in One Dimension",
 Phys. Plasmas 4, 3101 (1997).
17. H.Matsuura, K.Tezuka, I.Aoki, M.Yamanaka, S.Kobayashi, T.Fujita, 121
 A.Miura, Y.Nagayama,
 "Fully Monolithic Millimeter-Wave Mixer and IF Amplifier with Bow-Tie
 Antenna on GaAs Substrate", Electronics Lett. 33, 1800 (1997).
18. S.Kubota, T.Onuma, A.Mase, T.Tokuzawa, N.Oyama, A.Itakura, H.Hojo, 123
 L.G.Bruskin, T.Tamano, K.Yatsu, C.W.Domier, and N.C.Luhmann, Jr.,
 "Development of an Ultrashort-Pulse Reflectometer for Density Profile
 Measurements on GAMMA 10", Jpn. J. Appl. Phys. 37, L300 (1998).
19. L.G.Bruskin, A.Mase, T.Tokuzawa, N.Oyama, A.Itakura, T.Tamano, 126
 "Measurement of Plasma Density Using Wavelet Analysis of Microwave
 Reflectometer Signal", Rev.Sci. Instrum. 69, 425 (1998).
20. H.Hojo, N.Katsuragawa, H.Honda, and A. Mase, 132
 "Study of Computational Reflectometry Using Ultrashort-Pulse Microwaves",
 submitted to J. Phys. Soc. Jpn.

以下の頁は著作権者の許諾を得ていない
ため、公表できません。

p. 33 ~ p. 150

p. ~ p.

p. ~ p.

p. ~ p.

p. ~ p.