

講座：ミリ波・サブミリ波計測の基礎と応用VI

6. プラズマのミリ波・サブミリ波帯先端計測技術

間 瀬 淳

(筑波大学プラズマ研究センター)

(1995年5月10日受理)

Advanced Millimeter- and Submillimeter-Wave Plasma Diagnostic Technology

MASE Atsushi

Plasma Research Center, University of Tsukuba, Tsukuba 305, Japan

(Received 10 May 1995)

Abstract

Recent development of millimeter- and submillimeter-wave technology for plasma diagnostics are briefly reported. Two new areas of diagnostics, 2-D interferometry/radiometry and advanced pulse radar reflectometry, are identified where the invaluable contributions will be made in order to understand magnetically confined fusion plasmas.

Keywords:

plasma diagnostics, millimeter- and submillimeter-wave, advanced technology,

6.1 はじめに

前章までに記述されていたように、ミリ波・サブミリ波帯電磁波は、長波長マイクロ波に比較し鋭い指向性が得られること、可視光や赤外線に比べ霧や降雨時の減衰が少ないという伝播特性から、プラズマ計測のみならず地球環境観測あるいは宇宙観測の分野など幅広く利用されている。地球環境観測あるいは宇宙観測の受信システムは、遠方からの微弱電波を測定する必要上、非常に高い指向性をもつアンテナと積分時間を十分とった超高感度受信器で構成されている。一方、プラズマ計測においては特に時間・空間分解が重視されているなどの特徴がある。

ミリ波・サブミリ波プラズマ計測の進展は、i)

プローブビーム(光源)の開発はもちろんのこと、ii) 集積化技術、超精密加工技術の進歩、およびiii) 超高速デバイスの開発に帰するところが大きい。iv) データ収集および解析技術、すなわちハードおよびソフトの両面にわたる計算機システムの発達なども大きな要因となってきた。良く知られているように、近年の短パルス技術、光干渉技術、画像処理技術の進展は著しい。ミリ波・サブミリ波プラズマ診断の分野でもこれらの技術の適用が広がってきている。本章ではこれらの技術的發展に基づいた、最近の高空間分解測定および超高速測定について記述する。

6.2 プラズマ計測用光源および検出器の現状

現在研究が盛んに進められている反射計測法、電子サイクロトロン放射 (Electron Cyclotron Emission: ECE) 計測法, 特に ECE イメージング, さらには熱揺動からのコレクティブ散乱計測法の各計測法を大型装置でルーチンの適用していくためのハードウェアの開発は未だ十分とはいえない。また, 干渉・偏光, 放射および波動散乱など既存の計測法に対しても入射光源や検出器の改良は不可欠である。本節では, プラズマ計測の分野で使用されているミリ波・サブミリ波光源および検出器の現状について記述する。

光源について比較した結果を Table 1 に示す。透過干渉計には主としてサブミリ波帯を使用するため光励起あるいは放電励起形 CW 遠赤外レーザーが適用されている。散乱測定に正常波モードを使用する場合は干渉計と同じ波長領域であるが, 微小信号となるため SN 比の改善を目的として出力の大きい光源を用いる。例えば, 電子管としては後進波管 (Backward Wave Oscillator:

BWO) およびジャイロトロン, レーザーとしては光励起型大出力遠赤外レーザーなどである。一方, 反射計およびサイクロトロン放射測定のためのヘテロダイン受信機は主としてミリ波帯に位置しているため, ガン発振器などの固体発振器が使用されている。幅広い周波数同調範囲が必要なときには, BWO や固体発振器である HTO (Hyperabrupt Varactor-Tuned Oscillator) を過倍したものが使用可能である。特に後者は高速掃引特性を有している。また, 散乱測定に異常波モードを使用する場合は大出力ミリ波ジャイロトロンが適用されている。

電磁波の検出器は, その動作原理から, 熱検出を行うもの, 光子吸収によるもの, ダイオードの整流作用によるものに分類される。特にミリ波-サブミリ波帯においてはそれぞれ, InSb ボロメータあるいは焦電形検出器, Ge: Ga 光伝導検出器, ショットキー・バリア・ダイオード (Schottky Barrier Diode: SBD) が代表的なものである。その動作領域, 性能および特徴を Table 2 に比較した。

Table 1. Millimeter- and Submillimeter-Wave Sources

Type	Wavelength	Power	Tuning bandwidth	Comments
Optically pumped laser	119 μm	0.45 W	~ 5 MHz	Multichannel interferometry Collective scattering from ion thermal fluctuations
	385 μm	400 kW, 1.5 μs		
Discharge gas laser	190 μm	1.3 W	~ 5 MHz	Multichannel interferometry
Gunn oscillator	2-3 mm	0.01-0.1 W	1 GHz(E.T.) 6 GHz(M.T.)	Narrowband reflectometry, ECE
IMPATT oscillator	4 mm	0.5 W	500 MHz(E.T.) 5 GHz(M.T.)	Narrowband reflectometry
	3 mm	0.2 W		
HTO+Multiplier	3-5 mm	0.01 W	60-90 GHz.	Fast sweep broadband reflectometry
Backward wave oscillator (BWO)	4-6 mm	0.01-0.1 W	50-75 GHz	Broadband reflectometry Collective scattering from waves
	0.8 mm	1 W		
Gyrotron	0.7-4 mm	110 W, 0.6 ms	75-400 GHz	Collective scattering from waves Collective scattering from ion thermal fluctuations
	2, 5 mm	200-400 kW		

E.T.: Electronic tuning
M.T.: Mechanical tuning

Table 2. Millimeter- and Submillimeter-Wave Detectors

Type	Wavelength [mm]	Respose	Video NEP [W/Hz ^{1/2}]	Comments
InSb	0.1-3	1-5 μ s	$\sim 10^{-13}$	Need liquid helium cooling
Pyroelectric detector	< 1	1 μ s 10 ms	$\sim 10^{-7}$ $\sim 10^{-9}$	Room temperature operation
Ge:Ga	0.01-0.1	1 μ s	$\sim 10^{-13}$	Need liquid helium cooling
Schottky barrier diode	> 0.1	< 1 ns	$\sim 10^{-10}$	Room temperature operation, Respose depend on IF amplifier

6.3 二、三次元高空間分解測定

6.3.1 プラズマのイメージング

多数個の検出器を配列したプラズマ計測法は、プラズマパラメータの空間分布およびその揺動成分のパワースペクトル密度と分布測定に極めて有効である。電磁波を用いた計測法を多次元化することにより、密度の二次元分布、また、揺動成分の二次元波数スペクトルの導出が可能となり、揺動に起因する輸送現象の解明に寄与する。ミリ波・サブミリ波帯では、プレーナ型多チャンネル検出器を用いた位相イメージング、ECE イメージングへの適用が研究されている。検出器にはアレイアンテナにダイオードを接着するハイブリッド型検出器、両者が一体化したモノリシック型検出器がある。

ハイブリッド型検出器アレイは、ボウタイアンテナあるいは八木宇田アンテナで構成されたアンテナアレイに検出器が接着されたもので、検出器としてはマイクロボロメータあるいはショットキーバリアダイオードが用いられている。ヘテロダイン検波の場合広帯域の中間周波数 (Intermediate Frequency: IF) をもつ後者を用いることが多い。Fig. 1(a) がハイブリッド型二次元検出器アレイの例で、大きさ38.1 mm×38.1 mm、厚さ1 mmの石英基板上にフォトリソグラフィにより4×4配列のボウタイアンテナを蒸着し、各アンテナの給電点にビームリード形 GaAs ショットキーバリアダイオードが装着されている。なお、検出

器基板には基本波導波管で構成された二次元アンテナアレイを取り付けている。本検出器は Fig. 1(b) に示される周波数70GHz帯のヘテロダイン型位相イメージング法干渉計およびECE測定に適用された[1]。

カットオフ周波数 ~ 400 GHzをもつビームリード形 GaAs ショットキーバリアダイオード[2]を用いたハイブリッド型アレイ検出器は、94GHzにおいても良好なヘテロダイン検波特性 (SSB変換損失: 18dB, DSB雑音温度: 9,700K) を有することが確認されている[3]。現状において周波数100-200 GHz領域で動作することが期待され、ECEイメージングによる電子温度分布およびその揺動成分の測定、特に、米国テキサス大学のTEXT-Uトカマクあるいは核融合科学研究所CHSヘリカル装置などトラスプラズマにおけるMHD不安定性研究への適用が検討されている。ECEイメージング装置の概略をFig. 2に示す。相関法との併用で等磁束面上で多点測定を行うことにより、熱パルス輸送実験に適用できるなどの特徴も有している[4]。

ITERなどの大型装置におけるECE測定は、周波数400-500 GHzまで拡張されることが予想され、アンテナと検出器素子が一体となったモノリシック型検出器アレイが研究されている。その例をFig. 3に示す[5]。このモノリシックアレイはGaAsウエハ上に分子線エピタキシャル成長法(MBE)により製作され、ダイオード直列抵抗

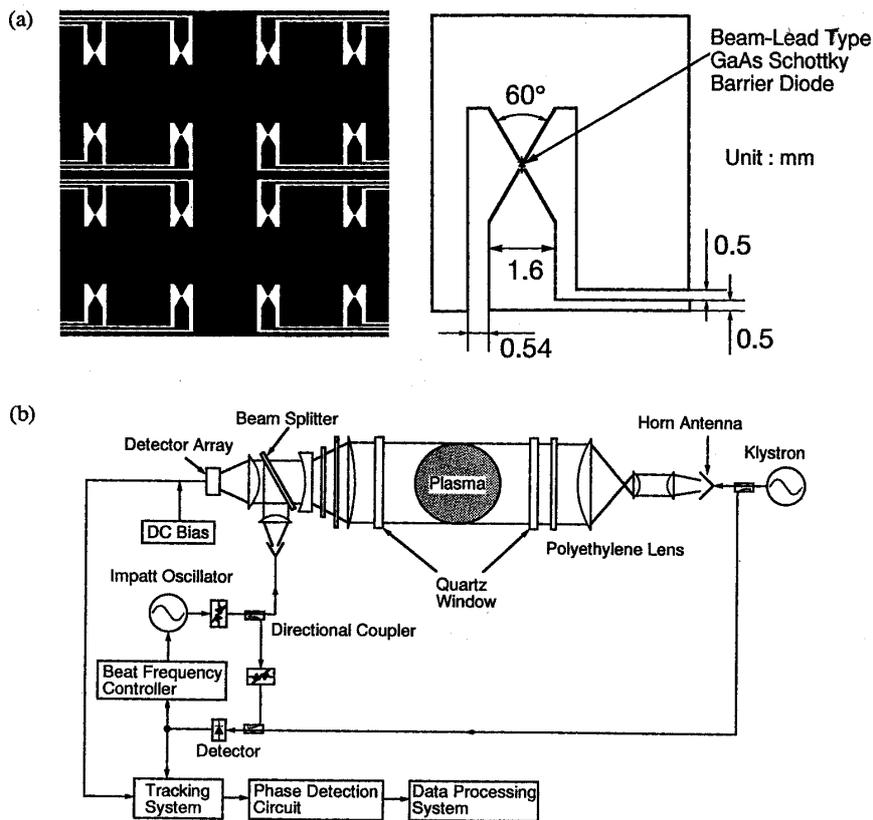


Fig. 1 (a) Layout of hybrid two-dimensional detector array, (b) Schematic diagram of the GAMMA 10 phase imaging interferometer system [1].

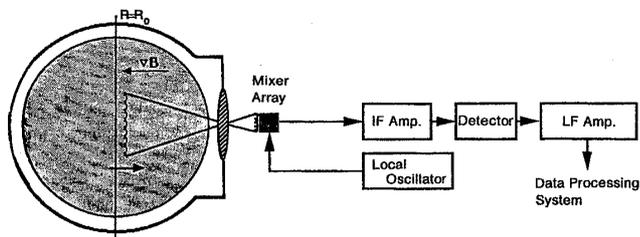


Fig. 2 Schematic of ECE imaging system.

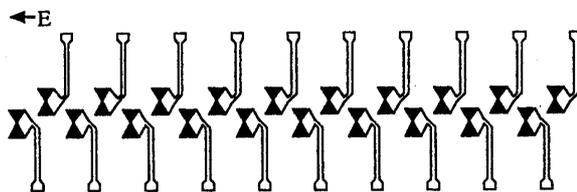


Fig. 3 Layout of monolithic detector array [5].

9-12 Ω が得られており、カットオフ周波数は 660-890 GHz と予想されている。

6.3.2 ファンビームを用いた干渉測定

核融合プラズマ実験装置においては、測定ポートの制約から、密度分布などの測定に反射計の適用が有力とされている。反射計は周辺部の測定には空間精度が高いことなど利点が多いが、中心領域の測定は不得意とされている。これに対し、干渉計はアーベル変換時の周辺部の分布誤差が大きいなどの短所がある。したがって、両者を相補的に用いてプラズマ全体の分布を決定することが不可欠となる。一方、通常の高チャンネルサブミリ

波干渉計の光路を同一断面上に設置することは測定ポートの大きさの関係から困難となっている。ITER のために考えられているのが放射状の入射ビーム、いわゆるファンビームを用いたマイケルソン干渉計である。そのような入射ビームを作り出すために種々の方法が考えられている。第一に、溝の周期を変化させた回転格子を用いたビームの分離がある[6]。回折格子への入射角と反射角の間にはよく知られた次式の関係がある。

$$\sin \alpha + \sin \beta = m\lambda/d \tag{1}$$

したがって、回転格子への入射角 α 、波長 λ を

一定とすると、溝の幅 d を変化させることにより反射角 β が変化し、ファンビームが得られることになる。このとき周波数シフトも同時に作り出されるため、各光路間のクロストークが抑えられる。

一方、機械的な回転格子の代わりにショットキー・バリア・ダイオードなどの素子を用いたアレイ形ビームコントローラにより入射ビームに周波数シフトとビーム偏向を持たせることが考えられている[4]。このときファンビームは小型送信ホーンを経由して作り出される。

6.4 高時間分解測定

6.4.1 短パルスミリ波の飛行時間測定

良く知られているように、反射計を用いた密度分布測定最大の課題は、周辺プラズマ部密度揺動によるフリッジ変化の影響を如何に除去するかである。そのため種々の方法が考えられてきた[7]。その一方法である短パルスミリ波を用いたレーダ法では、パルス幅 ~ 200 psの入射光源により空間分解 ~ 10 cmが実現されている[8]。ITER等の大型装置では、密度および温度などの基礎パラメータの測定は空間分解 ~ 30 cmが予定されており、500psのパルス幅で良いことになる。現在周波数110 GHzまでは市販のピンダイオード変調器により上記ミリ波パルスを得ることができ、それ以上の周波数帯は開発段階である。信

号処理は検波の後サンプリング時間 ~ 50 psのA/D変換器を使用することにより行われる。本方法では密度分布を決定する際、周波数の関数としての位相量をアーベル変換する必要がないという利点があるが、広帯域掃引発振器あるいは何台かの周波数固定発振器が必要であることには変わりがない。

6.4.2 超短パルス波・プラズマ相互作用

時間幅 τ_p をもつ短パルスはそのフーリエ成分として最大 $\omega_{\max} = 2\pi/\tau_p$ の周波数広がりをもっているため、周波数がミリ波領域に達するパルス幅50ps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る。このパルスが空間的に非一様なプラズマ中を伝播するとき、種々のフーリエ周波数成分はカットオフ層の位置の違いにより反射波に時間差が生じるため、検出器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。

一次元近似を用いた超短パルス反射計の計算機シミュレーションの例を Fig. 4 に示す[9]。Fig. 4(a) に描かれているように、初期条件として電界が

$$E(x, t=0) = \exp[-(x-x_p)^2/\tau_p^2] \quad (2)$$

で記述されるパルスが、

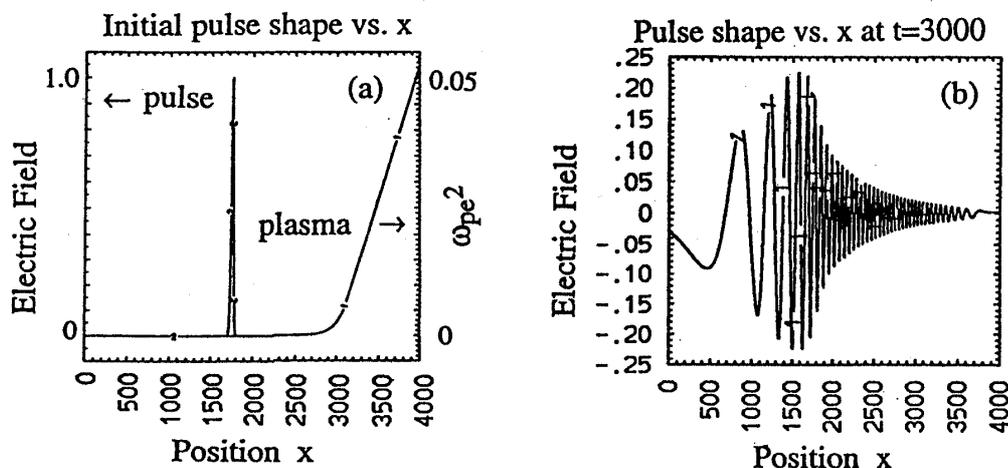


Fig. 4 (a) Initial configurations of electromagnetic pulse and plasma density as a function of position, (b) Reflected electromagnetic pulse vs. x [9].

$$n_e(x) = \begin{cases} n_0 \exp[(x-x_0)/L_s], & x < x_0 \\ n_0 [1 + (x-x_0)/L_s], & x \geq x_0 \end{cases} \quad (3)$$

のような密度分布をもつプラズマに入射されるときを考える。ここで、 x_p は $t = 0$ における入射パルスの規格化位置、 L_s は密度の特性長で、図では規格化座標で $L_s = 120$ に選んでいる。既に述べたように(2)式で表される短パルスは特性周波数 $\omega_0 = \pi/2\tau_p$ をもち、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。最初に反射する最小周波数成分に比較して最大周波数成分は $(\omega_{\max}/\omega_0)^2 L_s$ で表される距離を伝播する。したがって反射波パルスは $2(\omega_{\max}/\omega_0)^2 L_s$ の広がりを持つことが推定される。これは規格化座標で ~ 3800 に相当し、Fig. 4(b) のシミュレーション結果とよく一致している。

フーリエ変換スペクトルの高周波成分のうちカットオフ周波数より大きい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、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。

実験では、数 ps～数10ps の時間幅を持つインパルスを入射、反射波および透過波のフーリエスペクトルの時間変化を測定することになる。工学的課題としては、i) 超短パルスの発生、ii) 広帯域伝送回路および放射アンテナの設計製作、さらに iii) 超高速波形計測技術の開発がある。

6.4.3 超高速計測技術の開発

現在市販されているインパルス発生器はパルス幅65ps、出力電圧10 V を発生する。研究開発段階であるが、超短パルスの発生に非線形伝送線路 (Nonlinear Transmission Line: NLTL) を利用する方法が研究されている。NLTL は、原理的には高周波バラクタを周期的に配列したもので、並列容量が電圧に依存するため、伝送線路のインダクタンスを L とすると、回路中の入力パルスの伝播速度が $v_p = 1/\sqrt{LC(V)}$ のように振幅に依存するようになる。これにより出力パルスの立ち上がりを制御することが可能となる。さらに回路のフィルター特性もあるため短パルスが生成されることになる。実際、ボウタイアンテナあるいはスロットアンテナにビームリード形 GaAs ハイパーアラプト・バラクタダイオードを接着したハイ

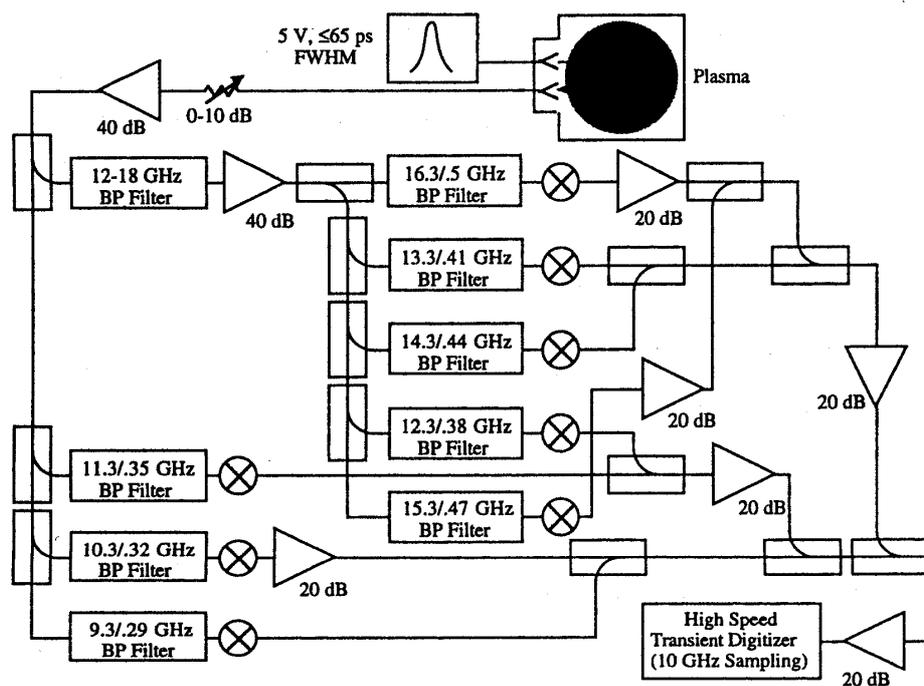


Fig. 5 Schematic diagram of the CCT ultrashort-pulse reflectometer system [10].

ブリッド型線路により $\tau_p \sim 65$ ps, 出力 5 V が得られており, 米国 UCLA の CCT 装置において超短パルス反射計の原理的実証実験が試みられている. 装置の概略を Fig. 5 に示す[10]. 一方, 数 ps のパルスの発生にはモノリシック型 NLTL が有望であり, GaAs あるいは InP をベースとした量子障壁バラクタにより, パルス幅 ~ 2 ps, 出力電圧 150 V が期待されている.

広帯域伝送線路としては, 矩形オーバーサイズ導波管あるいは円形コルゲート導波管が通常用いられている. 後者では, 低損失の HE_{11} モードが伝播し, 内径 6.35 cm (2.5 インチ) の導波管により 50–250 GHz の帯域にわたって 0.01 dB/m 以下の減衰特性が測定されている. また, 伝播方向の変更にはマイターバンド (< 0.1 dB/バンド) を使用する[11].

超高速波形計測の研究も進められている. もちろん波形ディジタイザにより A/D 変換し, 信号処理することは可能であり, そのときには波形解析が忠実に行われる利点もある. 現実に最高サンプルレート 5–100 ps をもつトランジェントディジタイザも市販されている. ただし, これによりプラズマ維持時間にわたってデータ収集するためには膨大な記憶容量が必要となる. 一方, 時間間隔カウンタあるいは時間–電圧変換後データ収集する方法があり, 低速の A/D 変換器を用いることができる. この方法で現在 50–70 ps の時間分解が得られている. さらに高時間分解を得るため考えられているのが量子化機能素子を用いた方法である. 共鳴トンネル効果を利用した共鳴トンネルダイオード (Resonant Tunneling Diode: RTD) の高速スイッチング特性を利用したもので, これをサンプリングヘッドに用いた InP 基板上のモノリシック集積回路により時間–電圧変換を行うことで 10 ps 以下の時間分解が可能とされている[12].

6.5 ニューラルネットワークとプラズマパラメータ

プラズマ計測の信号処理にニューラルネットワークを応用する試みが始まっている. 例えばプラ

ズマの分布を決定する際計算機処理が必要となるが, 関数近似のため従来用いられてきた反復法 (Iteration Method) に比較し, ニューラルネットワーク・アルゴリズムは計算時間の大幅な短縮をもたらすことが期待され, また, 初期条件の仮定も不要という特長がある. これまでに ECE 測定あるいは反射計測定におけるカーブフィッティングや像再生への応用例がある[13–15]. 一例として, 反射計により密度分布を導出する過程を考えると, 周波数掃引形反射計では周波数の関数としての位相変化 $\phi(f)$ が得られるが, 最初にエッジの点を仮定し, 逐次計算により分布を決定していくため相当な計算時間が必要となることが多い. ニューラルネットワークでは当初シミュレーションにより多くの関数例を入力しておくことにより, 測定点から直接適当な分布を実時間で決定することができる.

6.6 まとめ

ミリ波・サブミリ波プラズマ計測は, 磁場核融合装置において必要不可欠なものとなっており, 各コンポーネントの開発もさらに進められていくことが期待される. 次期大型装置を対象とした時, 各計測法で必要と考えられている波長あるいは周波数領域は以下ようになる.

1) 干渉計: 波長 5–200 μm の使用が考えられる. サブミリ波を使用するときには, 多チャンネルおよび安定動作のために, 小型かつプレーナー型のショットキー・バリア・ダイオード検出器の開発が望まれる.

2) 反射計: 周波数 26–90 GHz, 100–400 GHz が主要領域である. この領域をできるだけ少ないハードウェアでカバーするためには, 広帯域の掃引発振器および通倍器, ショットキー・バリア・ダイオード検出器の開発が必要である. また, 超短パルスレーダのためには時間応答 10 ps 以下の超高速信号変換器, パルス幅 1–10 ps, 出力 ~ 100 V のインパルス発振器の開発が必要である.

3) サイクロトロン放射計: 100–800 GHz が測定領域となる. 広帯域分散型ミキサーあるいはアレイ型検出器/ミキサーの開発が待たれる.

4) コレクティブ散乱：正常波モードでは干渉計と同様で波長領域 5-200 μm となるが、熱揺動散乱の場合には、レーザーの完成度から波長 \sim 10 μm の CO₂ レーザー散乱が有望とされており、原理的実証のための実験が望まれている。異常波モードでは60-140 GHz が主要範囲である。

参考文献

- [1] N. Oyama, A. Mase, T. Tokuzawa, Y. Ito, A. Itakura and T. Tamano, *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, 2006 (1995).
- [2] 三洋電機株式会社, SBL-221.
- [3] G. Cima, *US-Japan Workshop on Development of Millimeter- and Submillimeter-Wave Technology for Diagnostic Applications for Large Plasma Devices*, Los Angeles, 1992.
- [4] N.C. Luhmann, Jr., *US-Japan Workshop on Development of Millimeter- and Submillimeter-Wave Technology for Diagnostic Applications for Large Plasma Devices*, Tsukuba (1994) p. 1-1.
- [5] R.P. Hsia, W.R. Grek, S. Cheng, W-M. Zhang, C.W. Domier and N.C. Luhmann, Jr., *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 834 (1995).
- [6] J. Howard, *Rev. Sci. Instrum.* **61**, 1086 (1990).
- [7] M. Nagatsu, *J. Plasma and Fusion Res.* **71**, 132 (1995); C. Manso, *Progress Meeting on Microwave Systems for ITER*, San Diego, Jan. 1995.
- [8] S.H. Heijnen, M. deBaar, A.J.H. Donné, M.J. van de Pol, C.A.J. Hugenholtz and the RTP team, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 419 (1995).
- [9] B.I. Cohen, B.B. Afeyan, A.E. Chou and N.C. Luhmann, Jr., *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 1241 (1995).
- [10] C.W. Domier, N.C. Luhmann, Jr., A.E. Chou, W-M. Zhang and A.J. Romanowsky, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 399 (1995); *10th Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics*, Rochester, 1994.
- [11] E.J. Doyle, *Progress Meeting on Microwave Systems for ITER*, San Diego, Jan. 1995.
- [12] A. Miura, *US-Japan Workshop on Development of Millimeter- and Submillimeter-Wave Technology for Diagnostic Applications for Large Plasma Devices*, Tsukuba (1994) p. 13-1.
- [13] C.M. Bishop and C.M. Roach, *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 4450 (1992).
- [14] J. Sanchez, B. Branas, E. de la Luna, T. Estrada, V. Zhuravlev, H.J. Hartfuss, M. Hirsch, T. Geist, J. Segovia and J.L. Oramas, *Plasma Phys. Reports* **20**, 1 (1994).
- [15] 岩間尚文, 寺西大：「JT-60U プラズマ診断用 ECE像再生に関する調査(Ⅲ)」日本原子力研究所委託調査報告書, 1995年2月。