

小特集

磁場閉じ込め高温プラズマにおけるレーザー応用プラズマ計測の最近の進展

2. 干渉・偏光

2.2 LHD における干渉・偏光測定

川端 一男, 岡島 茂樹¹⁾
(核融合科学研究所, ¹⁾中部大学工学部)

Interferometry and Polarimetry Interferometry and Polarimetry on LHD

KAWAHATA Kazuo and OKAJIMA Shigeki¹⁾

National Institute for Fusion Science, Toki 509-5292, Japan

¹⁾*College of Engineering, Chubu University, Kasugai 487-8501, Japan*

(Received 30 May 2000)

Abstract

On LHD, the electron density has been measured by the use of two kinds of laser diagnostics; an interferometer and a polarimeter. A 13-channel 119- μm CH_3OH laser interferometer has been constructed and is routinely used for measurement of the spatial and temporal behavior of the electron density. A CO_2 laser polarimeter has been developed to monitor the electron density of long-pulse discharges in LHD.

Keywords:

interferometry, polarimetry, Faraday rotation, laser, electron density profile, Large Helical Device

2.2.1 まえがき

遠赤外レーザー干渉計[1]は大型ヘリカル装置(Large Helical Device, LHD)の電子密度分布計測の主力計測装置である。干渉計システム設計のスタート時点においては、干渉計システムに偏光計を併設する案も検討したが、磁場計測に対する必要度がトカマク装置に比べて低い、光学系システムが複雑になる、干渉光学系配位の選択が制約される、安定した干渉計を構築したい等の理由で採用しなかった。その後、LHD実験計画の中で定常プラズマ実験計画の検討が進み、この実験の遂行には、干渉計に比べて密度計測に関して計測精度は劣るが信頼性の高い偏光計測の必要性が高まり、1996(平成8)年度よりLHD計画共同研究(東工大、中部大)として、 CO_2

authors' e-mail: kawahata@nifs.ac.jp, sokajima@isc.chubu.ac.jp

レーザーを用いた偏光計の開発がスタートした。ここでは、それぞれの計測システムとその計測結果について報告する。

2.2.2 干渉計測の概要

LHD装置の干渉計システムの設計開始(1980年代末)にあたって、計測対象とする実験装置に関する情報[2]としては、プラズマの大きさは主半径4-5 m(3.9 m)、小半径0.5-0.6 m(0.6-0.65 m)、磁場強度4 T(3 T)であり、重水素放電を計画し、そのための放射線対策を行うという内容であった(なお、括弧内の数値は現在稼働中の実機のものである)。このような与えられた計測条件に対して最適な基本設計を行い、そのために必要な検討

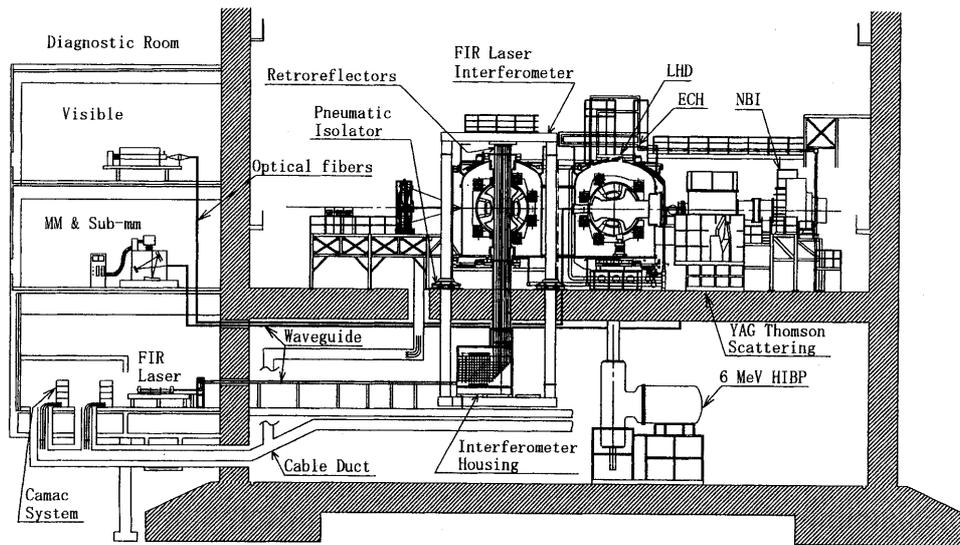


Fig.1 Schematic drawing of a 13-channel FIR laser interferometer installed on LHD.

課題を抽出し、必要な R&D を実施した。その主な項目は、1) 干渉計システムを構成する主要部品をどのように配置するか、2) 干渉計の心臓部であるレーザー発振装置には何を選ぶべきか、またメーカー品は使用可能か、3) 干渉光学計はマイケルソン型、マッハ・ツェンダー型どちらを選ぶべきか、4) レーザー光の長距離伝送にはミラー伝送か導波管伝送か、5) 干渉光学系の組み立てには強固な据え付け架台が必要となるが、どのような構造物がよいか、等であった。

これらの検討の後、最終的に決まった取り付け概念図を Fig.1 に示す。レーザー発振装置はプラズマ実験中に調整が必要となると考え、厚さ 2 m の壁で仕切られた計測室に設置した。このため、LHD 本体までのレーザービームの長距離伝送が必要となるが、導波管伝送はミラー伝送と比べて光軸安定性が高いことからこれを採用した。これまでの誘電体導波路にはパイレックスガラス管が用いられてきたが、口径精度の悪さ、長さの制約(1本あたり約 1.5 m)からの製作上問題が多いと考え、新しく内径 47 mm のアクリルパイプを用いた長さ約 40 m の誘電体導波路を採用した(バンド 5 個を含めた総合伝送効率は約 80%)。干渉計配位には上下ポートを利用したマイケルソン型を採用し、LHD 本体直下に多チャンネル干渉光学系を、上ポート上部にコーナーキューブ鏡を設置している。干渉信号検出部を 2 m 厚の床下に配置することで放射線対策が可能であること、反射鏡を除く光学部品を一体の光学定盤(2.9×3.9×0.1 m)に設置可能なことから、高い光学安定性が得られると考えた。このよ

うな光学系の配置を実現するには LHD の床下から上部ポートに及ぶ背の高い(約 19 m)干渉計架台が必要となる。この架台は Fig.1 に見られるように、LHD 装置の中心部に 1 本、外側に 2 本の柱(直径 0.7 m)を用いて上部、および下部架台を一体化し、LHD 本体を囲む構造とした。全体を LHD 設置面より吊り下げることによって、重心点をほぼ固定点のレベルに持ってくるのが可能となり、地震時における揺れ幅を抑えている。干渉信号への機械的振動の影響を抑えるために、干渉計架台は空気バネ(固有振動数は約 3 Hz)を用いて設置床面からの振動の影響を取り除いている。

2.2.3 遠赤外レーザー発振装置

レーザー発振装置は干渉計システムの中心部となるもので、レーザーの出力および発振周波数の安定性が干渉計の性能を決める重要な要素となる。現在、プラズマ計測に用いられている高出力動作する遠赤外レーザーを Table 1 に示す。遠赤外レーザーはこれまでに約 4000 本の発振線が報告されているものの、実用化されているものは大変少ない。多チャンネル干渉計に要求されるレーザーの波長は、一般にプラズマの密度勾配による屈折効果とプラズマの大きさから使用可能なプローブ波長の上限[3]が決まり、LHD 装置では約 200 μm である。この波長領域において高出力の得られる遠赤外レーザー光源としては、195- μm DCN レーザー[4, 5], 184- μm CH₂F₂ レーザー[6], 119- μm CH₃OH レーザー[5, 7] 等がある。LHD 装置に対しては最終的に、高いビート周波数が

Table 1 CW far-infrared lasers and examples of their applications as interferometers and polarimeters.

Laser	Power [W]	Plasma Device	Detector
337- μ mHCN	0.5	CHS, TEXTOR	S.B.D., Pyro.D.
195- μ mDCN	0.8	JET, ASDEX	InSb, S.B.D.
119- μ mCH ₃ OH	1.25	JT-60, LHD	Ge-Ga, S.B.D.
10.6- μ mCO ₂	250(10)*	JT-60, LHD, C-MOD	HgCdTe

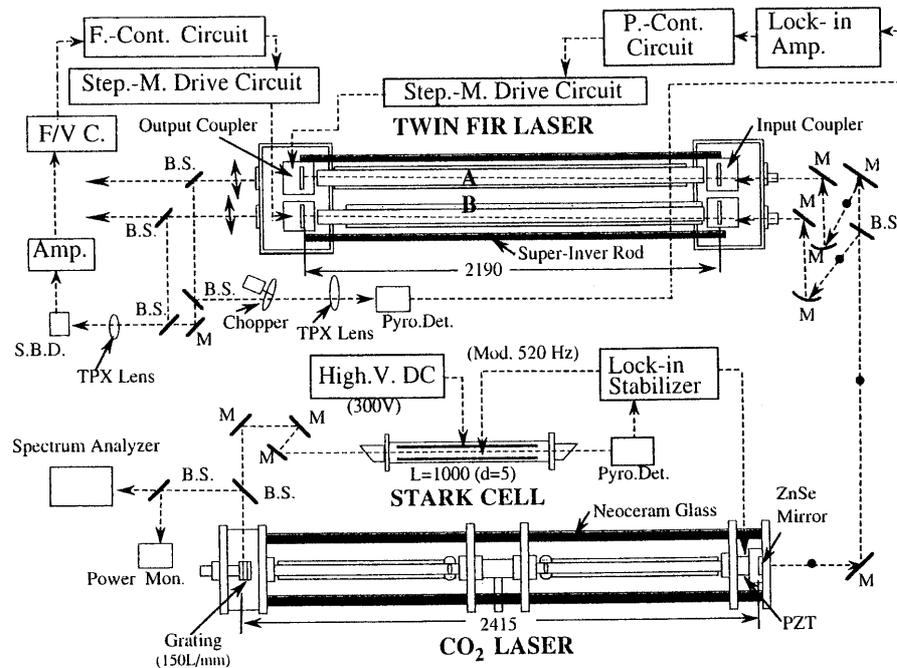
*generally used

とれること、大きなレーザー出力が得られること、保守が容易であること、安全であること、より高密度のプラズマ計測に対応できることから119- μ mCH₃OHレーザーを選定した。

本レーザーはCO₂レーザー励起型レーザーである (Fig. 2)。レーザーおよび関連する光学系は大きさ1.5×4.2 mの除振台上に設置され、空気バネにより床面からの機械的振動の影響を取り除き安定したレーザー発振が可能な構造にしている。CO₂レーザーには、レーザー共振器を放電管内に取り付けた内部鏡方式と外部に取り付けた外部鏡方式の2つのタイプがある。LHD用には、単一モード動作に有利なことから内部鏡方式を採用している。そのためにレーザー放電管は4電極構造にして、放電管中央部の電極を負の高圧側、両端の電極をアース電位にして、放電中に行う共振器調整作業の安全を図って

いる。内部鏡にしたことにより放電による共振器鏡のダメージが心配された。現在までに約2,000時間を超える運転を行っているが、レーザー出力に大きな変化は観測されていない。また、CO₂レーザーの安定した出力を得るためには、レーザー管および共振器の温度制御が重要である。本装置では、レーザー共振器間隔を熱膨張率の小さいネオセラムロッドで固定してフリーランニングでの安定化を施した後に、レーザー放電管、電極部、共振器等には水冷管を取り付け、0.1℃の精度で温度制御した冷却水を流している (設定温度は約20℃)。

遠赤外レーザー光を効率よく励起するためにはCO₂レーザーの周波数を遠赤外レーザー分子の吸収線に合わせる必要がある。また、遠赤外レーザー出力を安定化するためには、その周波数でCO₂レーザー周波数を安定化させることが大切である。そのために回折格子(レーザー共振器の反射鏡として使用、150本/mm)からの0次光をシュタルクセルに導入し、変調信号をロック・イン・スタビライザを介し、PZTでCO₂レーザーの共振器長を制御している。CO₂レーザー光はZnSe板により2分割したのち、双子の遠赤外レーザー共振器に導入する。干渉計のプロブ光となるレーザー光は、その出力が一定となるようにパルスモータによって同調曲線のスロープ上の1点にロックする。参照光となるレーザー光はプロブ光とのビート周波数が1 MHzになるように制御され

Fig.2 Schematic of stabilization system for the optically pumped 119- μ m CH₃OH laser.

る。本干渉計での位相検出精度は0.01 フリンジを目標としているので、1 MHz ビート周波数の変動を ± 10 kHz以内に制御する必要がある。このために必要とする共振器間隔の制御精度は、レーザーの縦モード間隔が69 MHzであることから約85 Åとなる。以上の方法でレーザーを制御してレーザー出力の変動の大きさを0.5%以内に、ビート周波数1 MHzに対する変動を ± 5 kHz以内に抑えている。

2.2.4 干渉光学系

プラズマの密度分布情報をできるだけ正確に得るために干渉計の多チャンネル化は欠かせない。取り付け可能なチャンネル数はレーザーの波長が決まれば、真空窓の大きさとプラズマ中心から光学系までの距離によって機械的に決まる。LHDでは、主プラズマ中のチャンネル数が10、主プラズマ外が2、参照コード1を含めて13チャンネルである。多チャンネル干渉光学系の詳細図をFig. 3に示す。ビームを多チャンネルに分割するビームスプリッターには、金属メッシュと結晶水晶が考えられる。水晶板によるレーザー光の吸収を考えると、レーザー光を有

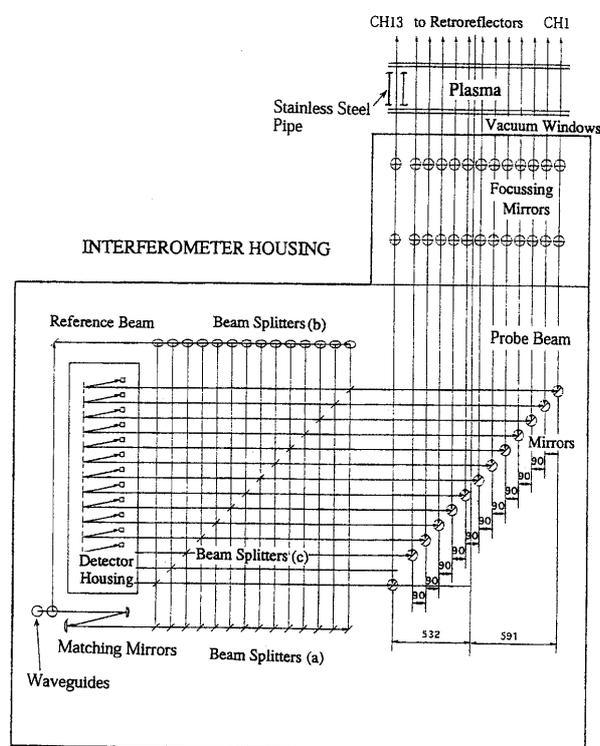


Fig.3 Schematic diagram of the arrangement of the optical system. The main optical components are on one optical bench made of epoxy resin reinforced by fiberglass with a honeycomb structure.

効に活用するためには金属メッシュの方が適当である。しかし、He-Ne レーザーを用いた光軸調整が容易であることから、結局は結晶水晶を採用した。結晶水晶のエタロン効果を利用して、ビームを効率よく各チャンネルに分配（入力パワーの約5%）している。このときに用いた光学定数（屈折率： N ，吸収係数： α ）は、常光線および異常光線に対して、それぞれ N_o (2.12026), α_o (0.58 cm^{-1}), N_e (2.16914), α_e (0.46 cm^{-1}) である。多チャンネルに分割されたレーザービームはビーム整形光学系を通過してプラズマに入射し、上ポート上部に取り付けたコーナーキューブ鏡により反射させ、ビームスプリッターにおいて参照光と合成された後ショットキー・バリア・ダイオードによって電気信号に変換させる。このようにして得られた1 MHzのビート信号と参照信号との位相差は、位相検出器（位相分解能： 3.6° ）により測定し、最終的には電子密度情報に変換する。

短波長のレーザー干渉計測では、干渉信号に含まれる機械的振動成分の除去が課題となる。そのための対策として可視光レーザーを用いた干渉計を併設して振動成分を検出する手法が一般的である。しかし、ビーム伝送を波長の異なるレーザー光に対して最適化することが難しいこと、真空窓の曇りの影響が可視領域で大きいこと等の問題がある。そこで、LHDでは2種類の振動検出器を用いている。中心コードのCH5には、He-Ne レーザーによる距離計を併設し、1/4波長の精度で振動成分を検出している。CH13（参照コード）の一番外側に位置する干渉コードには内径100 mmのSUSパイプを被せプラズマの影響を除去することで、振動成分のみによる干渉信号を検出している。このように、計測コードの異なる2種類の振動成分を用いて各々の計測コードの振動成分の除去を可能としている。LHDでは、磁場が超伝導コイルによって作られているため、他の実験装置で見られるようなコイル通電に伴うパルス的な振動成分はない。実験中に観測されている振動成分は周期約40秒という非常に長周期の成分が主であり、その大きさは $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 程度である。

2.2.5 干渉測定例

NBI加熱によって得られた80秒の長時間ヘリウム放電時の線密度の時間変化をFig. 4 (a)に示す。現在のところLHDでは長時間放電に対応した密度フィードバックシステムが稼動していないため、放電開始から約5秒後にマニュアル操作によるガス流量の調整に切り換えている。そのためFig. 4 (a)に示すように密度波形に大きな変

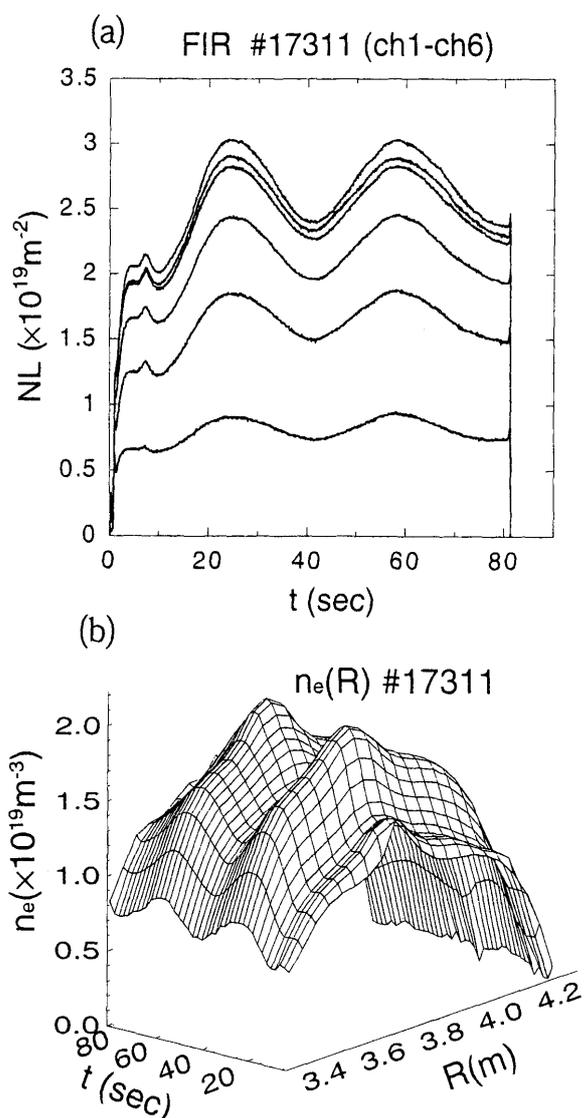


Fig.4 (a) Examples of the temporal evolution of line density measured by the 13-channel FIR laser interferometer. (b) Temporal evolution of the radial electron density profile.

調がかかっている。長時間対応の密度フィードバックシステムは2000(平成12)年度の実験より稼動する予定である。計測データが示すように全放電時間を通じて位相ジャンプもなく安定して測定することができた。線密度の分解能は位相検出器の計測精度で決まっており、1/100フリッジ程度 ($NL = 0.9 \times 10^{17} \text{m}^{-2}$) である。

多チャンネル干渉計によって測定された線積分電子密度の情報から密度分布を求める手法として、軸対称性を持つ密度分布の場合にはアーベル変換がよく知られている。しかしながら、非円形プラズマでベータ値の大きな場合のアーベル変換はまだ確立された手法となっていない。ここでは、磁気面を10個程度のスライスにし、それ

ぞれのスライスにおける線平均電子密度を外側のスライスから順に求める手法(slice and stuck法)を用いた。アーベル変換に用いる磁気面はあらかじめ圧力分布 $P(\rho)$ を $P(\rho) = P_0(1-\rho^2)(1-\rho^8)$ (ρ は規格化平均半径, P_0 は中心圧力)と仮定し、平均ベータ値を0.1%ごとに変えて平衡計算から求めておく。そして、それらの磁気面を用いてアーベル変換を行い、磁気軸の外側のアーベル変換と内側のアーベル変換が最もよく一致するものを選択する。

Fig.4(b)にこのようにしてFig.4(a)の線密度分布を用いて求めた密度分布の時間変化を示す。 R は干渉計の測定断面における赤道面上での大半径を示す。上記の手法は簡易な手法[8]であるが、求めた密度分布は干渉計で測定した線密度分布、トムソン散乱で測定した電子温度分布から平衡計算を繰り返して求めた密度分布とほぼ一致する[9]。LHDプラズマの密度分布は、短時間の放電の場合には、通常平坦から少しホロー気味であるが、ここに示した長時間放電では、動作ガスをゆっくりと増加させることによりヘリウム原子が中心まで侵入して、その結果ピーキングした密度分布が形成される興味深い現象が観測されている。

2.2.6 偏光計測

大型ヘリカル装置では30分を超える長時間放電を計画しており、そのために信頼性の高い電子密度計測系の準備を進めている。このためには、干渉計の完成度を高める努力は当然のことであるが、基本的に干渉計データは過去の位相の履歴に依存している関係上、放電途中におけるフリッジジャンプを完全になくすることは難しい。その点、偏光計測は原理的に過去データに依存しない瞬時計測法であり、その点で干渉計にない信頼性の高い計測が可能となる。特に、ヘリカル系では内部磁場がほとんど外部磁場コイルの電流で決まり、磁場の空間分布を計算で求めることができるため、ファラデー回転角から電子密度を評価することが可能となる。計測コードの選択としては、垂直(または水平)および接線コードが考えられるが、前者の配置では中心コードにおいて偏光角はゼロとなり、密度情報は得られない。したがって、接線コードを利用することになるが、この場合、光路長が長くなり(LHDでは約11m)プラズマによる屈折の影響が大きい。この影響を避けるには、短波長のレーザー光を使用すればよい。他方、ファラデー回転角は波長の2乗に比例するため短波長レーザーでは回転角度が小さくなる。そこで、これら相反する要請をいかにして両立させるかが課題となる。

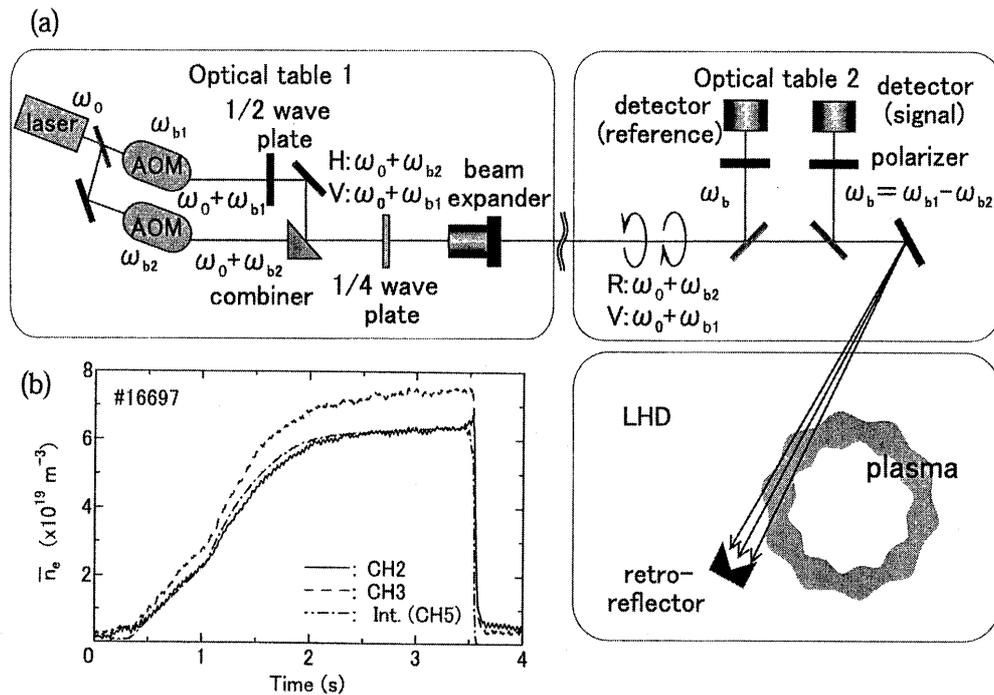


Fig.5 (a) Optical setup of the frequency-shift heterodyne polarimeter. (b) Comparison of the density derived from the Faraday rotation measurement with the interferometer data.

以上を考慮して大型ヘリカル装置では、 $10.6\text{-}\mu\text{mCO}_2$ レーザー偏光計[10]を採用した。その光学系を Fig. 5 (a) に示す。本システムでは、回転角の測定精度を上げるために、周波数偏移ヘテロダイン計測法[11]を採用している。音響光学変調素子 (AOM) と1/2波長板を用いて異なる周波数に偏移させた直交した直線偏光を、1/4波長板で反対向きに回転する円偏光に変換してプラズマに入射する。対向面に取り付けたコーナークューブ反射鏡で反射された透過光を偏光子を通して検出すると、ファラデー回転角をビート信号 (周波数: 100 kHz) の位相変化として検出することができる。この検出システムの特徴は、短波長レーザーを用いる時に問題となる機械的振動の影響やレーザーの発振周波数変動の影響を、光路長を同じくする両回り円偏光レーザーのビートを取ることで取り除いていることである。現在の計測システムでは時間分解能 16 ms の時、 0.01° の角度分解能が得られている。このようにして測定した回転角を用いて、電子密度分布は一様と仮定して評価した線平均電子密度の時間変化を Fig. 5 (b) に示す。比較のために遠赤外干渉計による線平均電子密度を併せて記している。中心コードの偏光計の測定値 (CH2) は、干渉計の結果とほぼ一致しているが、CH3 は15%程度大きな値となっている。これは、周辺コードの偏光角は電子密度分布の形状、ベータ値によ

って大きく影響を受けるためと考えられる。したがって、チャンネル数を増やすことにより電子密度分布、プラズマベータ値の評価が可能となる。

2.2.7 まとめ

大型ヘリカル装置における干渉・偏光計測では、長時間放電プラズマの信頼性の高い電子密度計測装置の構築をめざした。超伝導磁場コイルを用いた閉じ込め装置では、磁場強度はプラズマ実験中ほぼ一定に保持される。そのため、磁場のパルス印加に伴って発生する機械的振動はなく、その影響を直接受ける干渉・偏光計測では測定精度の高い計測が可能となる。現在観測されている振動成分は約40秒という長周期のものであり、通常の放電 (放電時間10秒以下) では振動成分の補正を必要としない。干渉計測において観測された干渉位相出力の飛びは、ベレット入射時の高密度放電において形成される急峻な密度勾配によるレーザービームの屈折によるものである。それ以外の要因、例えばレーザー発振装置の不安定動作、位相計の誤動作等によるものは観測されていない。偏光計測では、測定精度をどこまで上げられるかが課題であったが、 0.01° という高い測定精度が得られている。これも定常磁場装置であることが寄与している。

ITER における電子密度計測では、遠赤外レーザー光

を用いた干渉計とCO₂レーザー光を用いた偏光計の併用が高精度で信頼性の高い計測法になると考える。しかしながら, ITERでの電子密度計測には波長50 μm帯の干渉計が必要となるが, 今のところ, 確立した計測器はないのが現状である。この波長帯におけるレーザー光源を含めた計測システムの開発が急務である。

参考文献

- [1] K. Kawahata, K. Tanaka, Y. Ito, A. Ejiri and S. Okajima, *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 707 (1999).
- [2] 大型ヘリカル装置設計グループ: 大型ヘリカル装置の基本設計 (核融合科学研究所, 1989).
- [3] D. Véron, *Infrared and Millimeter Waves* (Academic, New York, 1979) Vol.2.
- [4] D. Véron, P. Belland and M.J. Beccaria, *Infrared Phys.* **18**, 465 (1978).
- [5] 岡島茂樹, 川端一男: 固体物理 **31**, 326 (1996).
- [6] T. Lehecka, N.C. Luhmann, Jr., W.A. Peebles, J. Goldhar and S.P. Obenschain, *Handbook of Microwave and Optical Components* (John Wiley & Sons, New York, 1990) Vol. 3.
- [7] J. Farhoomand and H.M. Pickett, *Int. J. Infrared Millim. Waves* **8**, 441 (1987).
- [8] K. Tanaka *et al.*, *Proceedings of 26th European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics* (Maastricht, 1999) p.405.
- [9] K. Yamazaki *et al.*, *Proceedings of 26th European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics* (Maastricht, 1999) p.411.
- [10] S. Tsuji-Iio, T. Akiyama, E. Sato, H. Murayama, T. Nozawa, R. Shimada, K. Nakayama, S. Okajima and K. Kawahata, *to be published in J. Plasma Fusion Res. SERIES*.
- [11] G. Dodel and W. Kunze, *Infrared Phys.* **18**, 773 (1978).