

## 3.2 高性能干渉計／偏光計計測

川端一男<sup>1)</sup>, 秋山毅志<sup>1)</sup>, 田中謙治<sup>1)</sup>, 岡島茂樹<sup>2)</sup>, 中山和也<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>核融合科学研究所, <sup>2)</sup>中部大学工学部

### Keywords:

Interferometry, polarimetry, electron density profile, two color laser, two color laser interferometer, ITER

### 3.2.1 はじめに

核融合研究は、世界各国における大型核融合実験装置の研究の進展によって、研究の究極の目標である核燃焼プラズマの実験が国際協力によって進められようとしている (ITER 計画)。この計画を成功させるためには、核燃焼によって生成されるアルファ粒子を制御し、反応を持続させることが不可欠である。そのためには、閉じ込められたアルファ粒子の振る舞いを調べることは重要な研究課題であるが、その生成、閉じ込めに関係したプラズマパラメータの詳細な分布計測も核燃焼プラズマの自律性を確保するために重要である。核反応率に密接に関係する密度分布と、プラズマの閉じ込め特性およびアルファ粒子の閉じ込めに密接に関係する内部磁場分布の計測は、ITER 計画を進める上で必須なものである。ここでは、核燃焼プラズマの計測を目的として開発を進めている遠赤外レーザー干渉計／偏光計測について紹介する。

### 3.2.2 短波長遠赤外レーザーの開発

ITER 計測では、電子密度／磁場分布の計測のためにポロイダル偏光計の設計を進めている [1]。ここでは、波長  $119\ \mu\text{m}$  の  $\text{CH}_3\text{OH}$  レーザーを光源とし、ファラデー回転計測とコットンムートン計測を計画している。しかしながら、ITER 規模のプラズマではプラズマ密度勾配による屈折の影響が大きくその計測に困難が予想される。そこで、より短波長の遠赤外レーザー計測が必要となるが、これまでのところ  $100\ \mu\text{m}$  から  $10\ \mu\text{m}$  の波長領域での計測は皆無といってよい状況である。そこで、先ず計測用のレーザー光源の開発から始めた。

遠赤外レーザーには、放電励起や光励起のガスレーザー、半導体レーザー、自由電子レーザー等があるが、現状では  $\text{CO}_2$  レーザー励起の分子レーザーが主となっている。現在までに、100種類以上の分子から4000本以上の発振線が報告されているが [2-4]、実用化されているレーザーは数10本と限られている。この理由として、(i)パルス発振のレーザーが多い、(ii)強い酸性や毒性をもつ分子からの発振線が多い、(iii)高出力のレーザーが少ない、(iv)ポンプオフセット周波数が高く通常のレーザーシステムでは発振が難しい、(v)得られる出力や圧力特性といった動作特性が分からないために注目されないレーザー線も多いなどが考えられる。特に、 $100\ \mu\text{m}$  以下の短波長遠赤外領域では、これまで需要がほとんどなかったために開発が遅れていた。そ

で、この波長領域における計測用光源を確立するために、広い波長範囲でのレーザー発振が可能な cw  $\text{CO}_2$  レーザー励起の遠赤外レーザー装置を製作した。そして、短波長遠赤外領域に多くの発振線をもつ  $\text{CH}_3\text{OH}$  とその同位体を中心にレーザー線を探査し、その動作特性を含めたデータベースを作成し、目的に合致したレーザーの開発を行った。

図1に cw  $\text{CO}_2$  レーザー励起の遠赤外レーザー装置を示す。装置は、励起用  $\text{CO}_2$  レーザーと2組の双子型遠赤外レーザーで構成されている。 $\text{CO}_2$  レーザーは内部鏡方式で、共振器長は約3.0 mである。共振器は波長選択のための回折格子と周波数微調整のための PZT (Piezoelectric Translator: 圧電素子の変位／電界特性を利用して、素子への印加電圧を制御することによって  $0.1\ \mu\text{m}$  以下の微少移動制御を行うもの)に取り付けた ZnSe 製の出力鏡で構成されている。回折格子は銅のオリジナル格子 ( $150\ \text{line/mm}$ ) に金メッキしたものであり、ZnSe 出力鏡は反射率55%、曲率半径20 mである。共振器間隔はフリーランニング動作での安定化のために低熱膨張率 ( $-1 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ) のネオセラムガラスロッドで固定されている。レーザー管は水冷2重管 (内径  $10.8\ \text{mm}$ ) で、中央が高電圧 (+)、両端が接地の4電極方式である。接地電極は単一モード発振を得るために中央に  $10\ \text{mm}$  の穴を開けたニッケル円盤である。遠赤外レーザーは、ヘテロダインビート計測用光源開発の目的から双子型とした。共振器パラメータの異なる遠赤外レーザーキャビティを設備し、広い波長領域での発振を可能と

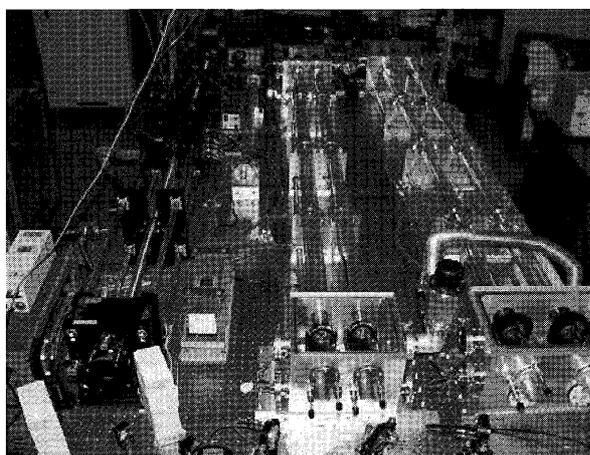


図1 双子型遠赤外レーザー発振装置。

した。共振器は金コーティングした銅平面鏡（励起光入力側）とシリコンのハイブリッドカップラ（遠赤外出力側）で構成されている。レーザー管は水冷2重管で、冷却器と不凍液を用いて $-12^{\circ}\text{C}$ までの冷却が可能である。遠赤外レーザーの管径は直径34 mm（固定）と、25 mm~54 mmまで可変のものを使用している。開発したCO<sub>2</sub>レーザー装置では、波長9  $\mu\text{m}$ ~11  $\mu\text{m}$ に、94本の発振線を得ている。最高出力は10 P（20）線で253 W、41本の発振線において200 W以上、82本の発振線において100 W以上の高出力動作が可能である。

表1に40  $\mu\text{m}$ ~100  $\mu\text{m}$ 領域において10 mW以上の発振出力が得られたレーザー線を示す。これらの発振線の中で比較的出力が強く、目的に適した波長であった9R(8) CO<sub>2</sub>レーザー励起の48  $\mu\text{m}$ 、57  $\mu\text{m}$  CH<sub>3</sub>ODレーザーに注目した。そして、レーザー装置の最適化と高出力化を行った結果、両レーザーの和出力で約2.4 Wを得た。このときの出力は、57  $\mu\text{m}$ レーザーで1.6 W以上、48  $\mu\text{m}$ レーザーで最高0.8 Wと見積もることができ、共に十分な高出力動作が可能であることが確認できた[5]。これらの発振線は遠赤外レーザー共振器の同調曲線から、48  $\mu\text{m}$ レーザーの6山目と57  $\mu\text{m}$ レーザーの5山目が重なること（それぞれの波長の整数倍がほぼ等しい）が観測されている。この重なる位置に共振器長を固定すると2つのレーザーの同時発振が得られる。9R(8) CO<sub>2</sub>レーザーでCH<sub>3</sub>ODを励起すると、波長48  $\mu\text{m}$ と57  $\mu\text{m}$ 以外にも波長289.6  $\mu\text{m}$ 、295  $\mu\text{m}$ 、306  $\mu\text{m}$ 、825  $\mu\text{m}$ のレーザーが発振することが知られている。そこで、この2波長のレーザーがそれぞれ単一発振であるかをCzerny-Turner型の回折格子分光器により調べた。その結果、先に述べた波長以外に48  $\mu\text{m}$ レーザーと同じ偏光方向を持つ54  $\mu\text{m}$ と85  $\mu\text{m}$ の新しい発振線を見つけた。これらのレーザー線はその圧力特性から、図2に示すように小出力でありしかも低圧力領域でのみの発振であることが分かり、この圧力依存性の違いから48  $\mu\text{m}$ レーザーと分離することが可能であることが判明した。また、57  $\mu\text{m}$ レーザーは単独発振線であることも確認できた。

### 3.2.3 計測用光学素子と検知器

計測システムを構成する光学窓やビームスプリッターはエタロンで使用する場合が多い。これらの光学素子を高精度で設計するには、使用する光学材料の屈折率と吸収係数が必要となる。しかし、短波長遠赤外領域では信頼性の高い光学定数はほとんど報告されていない。そこで、短波長遠赤外波長領域で良い光学素子となり得るCVD-ダイヤモンド（短波長遠赤外領域では信頼できる光学定数は知られていない）と高抵抗シリコン、そして遠赤外波長領域で広く用いられている結晶水晶に対する光学定数を測定した。表2にそれぞれの素子の屈折率および吸収係数を示す。表からわかるように、CVD-ダイヤモンドは吸収係数が小さく、厚さ1.023 mmに対する最大透過率は48  $\mu\text{m}$ レーザーで96.7%、57  $\mu\text{m}$ レーザーで97.5%であった。また、ダイヤモンドは透明で強度や熱伝導が大きく、プラズマ真空容器に取り付ける観測窓に最も適している。高抵抗シリコンは可

表1 40  $\mu\text{m}$ ~100  $\mu\text{m}$ 領域における高出力（10 mW以上）レーザー発振線。

CO <sub>2</sub> laser		FIR laser			
Line	Power (W)	Molecule	Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	Length (m)	Power (mW)
9R(10)	83	CH <sub>3</sub> OH	96.5	2.2	68
9P(34)	75	CH <sub>3</sub> OH	70.5	2.2	65
10R(16)	123	CH <sub>3</sub> OH	63.0	2.9	54
9R(34)	63	CD <sub>3</sub> OH	52.9	2.2	10
10R(18)	89	CD <sub>3</sub> OH	41.4	2.2	13
10R(16)	113	CD <sub>3</sub> OH	81.6	2.9	25
9R(8)	153	CH <sub>3</sub> OD	57.2	2.9	1.6 W
	153	CH <sub>3</sub> OD	47.6	2.9	0.8 W
10P(46)	43	CH <sub>2</sub> DOH	49.1	2.2	17
9R(30)	65	NH <sub>3</sub>	67	2.2	97

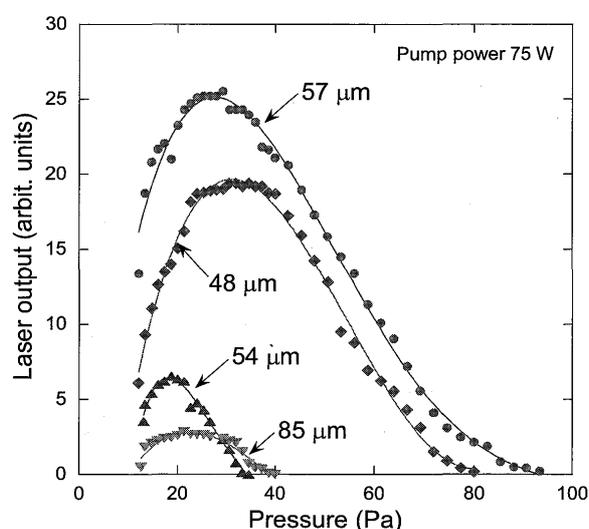


図2 波長48, 54, 57, 85  $\mu\text{m}$ の9R(8)CO<sub>2</sub>レーザー励起のCH<sub>3</sub>ODレーザー発振線の圧力依存性。

表2 CVD-ダイヤモンド、シリコン、結晶水晶の光学定数の計測結果。

	Refractive index (Absorption coefficient( $\text{cm}^{-1}$ ))		
	48 $\mu\text{m}$	57 $\mu\text{m}$	119 $\mu\text{m}$
Crystal quartz <sup>1)</sup>	2.260 (4.9)	2.2306 (2.9)	2.1691 (0.46)
Silicon <sup>2)</sup>	3.416 (0.33)	3.4164 (0.36)	3.4163 (0.14)
CVD-diamond	2.383 (0.25)	2.383 (0.19)	- (-)

<sup>1)</sup>Extraordinary ray

<sup>2)</sup>Resistivity 2.8k $\Omega\text{cm}$ , @19 $^{\circ}\text{C}$

視光に対して不透明であるが、吸収係数が小さいことから短波長遠赤外レーザー用の光学素子（窓やビームスプリッター）として良い材料となることがわかった。一方、結晶水晶は50  $\mu\text{m}$ 近傍では吸収係数が大きく光学素子としては不適格であった。

本計測システムを開発する上で、100  $\mu\text{m}$ 以下の短波長遠赤外波長領域で動作する高感度検出器は重要なコンポーネントである。遠赤外波長領域で広く使用されているものに

ショットキーバリアダイオード検出器がある。この検出器は室温で動作し、高感度・高速応答することから使い易い検出器として広く用いられている。また、通常使用されているコーナー反射型の検出器では、反射板とアンテナの距離、そしてアンテナの長さを調整することによって任意の波長に最適化することが出来る。ただし、これまでに119  $\mu\text{m}$ 以下の短波長の領域での使用実績はない。またダイオードの浮遊容量と直列抵抗の大きさによって決まるカットオフ周波数が適用領域を制限し、その値は数テラヘルツ以下と考えられている。まず既存の119  $\mu\text{m}$ 用ショットキー検出器を用いて、57  $\mu\text{m}$ と48  $\mu\text{m}$ のレーザー光の検出を試みた。レーザー光のアンテナへの入射角度を調整した結果、57  $\mu\text{m}$ レーザー光のビート信号を初めて検出することができたが、48  $\mu\text{m}$ のビート信号については検出することができなかった。また、得られたS/Nも低いことから、本検出器を計測用検出器には使用できないとの結論に達した。

次の候補として検討したものは液体ヘリウム温度で動作するInSb検出器である。この検出器は、JET装置の194  $\mu\text{m}$ と119  $\mu\text{m}$ の2波長レーザー干渉計[6]に使用されているものである。InSb検出器の検出感度は数10 GHzから約600 GHzまではほぼ一定の感度を示し、それよりも高周波の領域では感度が急減する。高周波波数領域での感度を上げるために磁気共鳴が用いられ、磁場強度を選ぶことによって2 THzおよび2.5 THzにおいてピーク値と変わらない検出感度が得られている。2.5 THzに最適化されたものは実際にJET装置の2波長干渉計に使用されている。この素子は磁場強度によって1-3 THzまでのチューニングは可能であるが、50  $\mu\text{m}$ 帯へのチューニングは困難な状況にある。

そこで、最終的に選択したものはGe:Gaフォトコンダクターである。この検出器は、一般に100  $\mu\text{m}$ 付近に検出感度のピークを持ち、短波長側に向かって徐々に感度が低下していく。50  $\mu\text{m}$ 帯における感度はピーク値の約3分の1程度である。検出器はクライオスタット内に取り付けられており、入射光の集光のためにコーンを用いている。コーンの前面には低雑音動作のためのローパスフィルターを取り付けている。

### 3.2.4 2波長同時発振型遠赤外レーザー干渉計

今回、新しく見つかった2波長同時発振する遠赤外レーザー光を用いた新型2波長レーザー干渉計装置[7]のブロックダイアグラムを図3に示す。炭酸ガスレーザーによって励起された2本の遠赤外レーザー(A, B)からは、57  $\mu\text{m}$ と48  $\mu\text{m}$ のレーザー発振線( $\omega_1, \omega_2$ )と、それぞれの周波数に対して僅かに異なる周波数の発振線( $\omega_1 + \Delta\omega_1, \omega_2 + \Delta\omega_2$ )が得られる。レーザーAの主成分はプラズマ中を伝搬した後、リトロ反射鏡(CCM)によって反射され、再びプラズマ中を伝搬した後、検出器D<sub>P</sub>に導入される。一方、ビームスプリッター(B.S.)によって分けられた一部のレーザー光は参照信号として検出器(D<sub>R</sub>)に導入される。それぞれのレーザー光は、局部発振光(レーザーB)によってヘテロダイン検出されることになる。検出器D<sub>P</sub>とD<sub>R</sub>の出

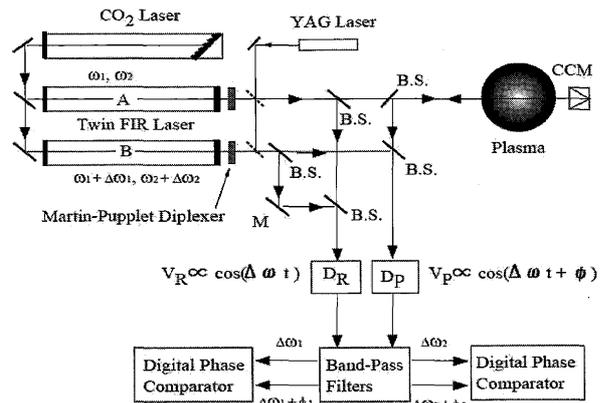


図3 2波長同時発振型レーザー干渉計の概念図。

力には、57  $\mu\text{m}$ と48  $\mu\text{m}$ レーザー光のそれぞれの干渉信号が含まれているが、それぞれのビート信号の周波数が異なるため電気的なバンドパスフィルターを用いることによって分離することができる。周波数分離された2つのビート信号成分は、各々のレーザーの干渉信号成分に対応しており、位相検出器(Digital Phase Comparator)によって変動成分が検出されることになる。

この干渉計の特徴は、(i)同一のレーザーからの2波長同時発振を用いている、(ii)発振波長が57  $\mu\text{m}$ と48  $\mu\text{m}$ であり、現在の磁場閉じ込め装置の干渉計測装置に用いられている波長119  $\mu\text{m}$ レーザーと比べて、プラズマによる屈折効果が約4分の1となり高密度プラズマに対応できる、(iii)使用する2波長の値が近接していることから、同じ光学素子および検出器が利用可能である、(iv)レーザーの出口から検出器まで全く同じ光学経路を伝搬することから、理想的な機械的振動の補正が期待できる。波長57  $\mu\text{m}$ と48  $\mu\text{m}$ のレーザー発振線は、遠赤外レーザー共振器の出力部において異なる偏光方向で発振している。57  $\mu\text{m}$ はCO<sub>2</sub>レーザー励起光に対して直交した方向に、そして48  $\mu\text{m}$ は平行方向の偏光面を有している。そのため、計測用レーザー光源として同時使用するためには偏光方向を揃える必要があり、ここでは、ダイプレクサーを用いて偏光方向を揃えている。

短波長遠赤外レーザーを用いた2波長干渉計の性能試験をするために構築した計測システムを図4に示す。干渉計システムは図3の概念図と同じマイケルソン型干渉計である。リトロリフレクターを除く全ての光学部品を一つの光学除振架台の上に設置している。ビームスプリッターおよびビーム合成器にはシリコンのエタロン板を使用している。シリコン板は可視光を通さないため、光学調整には工夫が必要となる。まず、遠赤外レーザー光の光軸を液晶フィルムで確認し、その軸に可視のヘリウムネオンレーザーの光軸を合わせる。そして、この軸に1.06  $\mu\text{m}$ YAGレーザーの光軸を合わせ、このYAGレーザー光を用いて干渉光学系の調整を行う。

以上の光学調整を行った結果、Ge:Gaフォトコンダクターを用いて検出された57  $\mu\text{m}$ と48  $\mu\text{m}$ のレーザー光に対応するビート信号を図5に示す。1.2 MHzに対応するものが57  $\mu\text{m}$ のビート信号であり、0.55 MHzに対応するものが

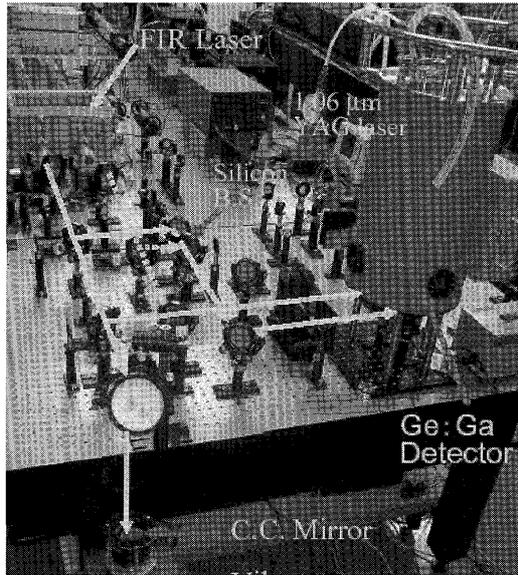


図4 光学架台上に据え付けられた2波長レーザー干渉計.

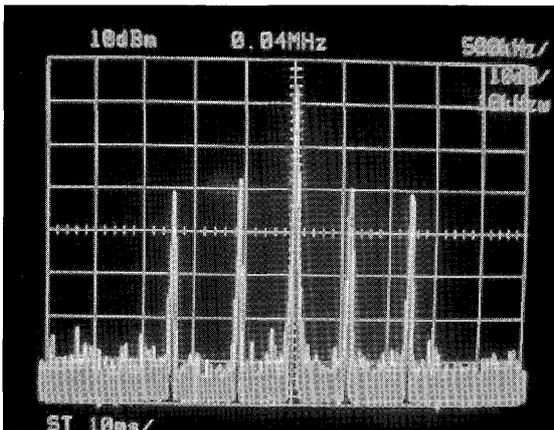


図5 Ge:Ga 検出器を用いて観測した2波長ビート信号.

48 μm のビート信号である。レーザー出力を約 1/100 以下に減衰させた状態で得られた S/N はおよそ 40 dB であり、多チャンネル干渉計を組み上げる上で十分な S/N であることが確認された。観測されたビート周波数は、遠赤外レーザーの共振器の調整とレーザーガス圧の調整によってある程度任意の値に調整可能である。このビート信号からそれぞれのレーザーの信号成分を取り出すために、周波数バンドパスフィルターを用いている。このようにして得られたビート信号の位相変化から求めた変動量とその差分を図 6 に示す。干渉位相変化を観測するために、反射鏡はピエゾ駆動型ステージ上に取り付けられている。鏡の駆動振幅はおよそ 50 μm (p-p) であり、周波数は約 10 Hz である。詳細な部分にはビート信号の歪みによる影響が見られるが、観測された振幅の大きさは2つのレーザー干渉計ともほぼ同じであることから、本2波長干渉計を用いて機械的振動の補正が可能である事が確認された。

### 3.2.5 偏光計測

コットンムートン偏光計測はフリッジジャンプのない電

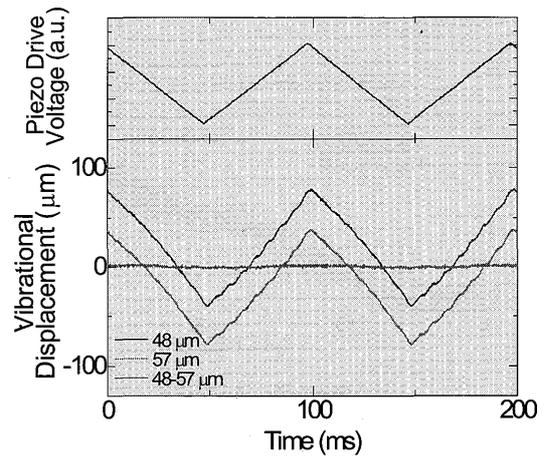


図6 2波長干渉計によって観測されたミラー変位量.

子密度計測法として期待されているが、実際の核融合プラズマ実験装置に適用された例はこれまで少なかった。そこで、計測精度や適用上の問題点を明らかにすることを目的に、遠赤外レーザー (HCN レーザー; 波長 337 μm) を用いたコットンムートン偏光計を Compact Helical System (CHS) にて開発した [8]。コットンムートン効果とは、Oモード (常光) 成分と Xモード (異常光) 成分とで屈折率が異なること (光学異方性) により、物質を透過する前後で偏光状態が異なる現象 (例えば、直線偏光が楕円偏光になる) を指す。O/Xモード成分間に生じる位相差は、磁化プラズマでは電子密度と磁場強度の積の線積分値に比例するため、磁場強度が既知である場合は、位相差より電子密度が評価できる。図 7 に CHS での計測原理図を示す。プローブリファレンス光には、差周波数  $\omega_b$  を与えた (CHS では  $\omega_b = 1$  MHz), O/Xモードに相当する直交直線偏光の合成光を用いる [9]。プローブ光はプラズマ透過後、直交成分に45度傾けた偏光子を通してビーム強度を測定する。プラズマを透過しないリファレンス光も、同様に検出する。検出器出力のビート信号  $I_{\text{probe}}, I_{\text{ref}}$  は、直交成分の和の二乗に比例するため、

$$I_{\text{probe}} = [\sin\{(\omega + \omega_b)t + \phi_0\} + \sin(\omega t + \phi_X)]^2 \propto \cos\{\omega_b t + (\phi_0 - \phi_X)\} + \text{Const.}$$

$\phi_0, \phi_X$ ; プラズマによる O/Xモードの位相変化

$$I_{\text{ref}} \propto \cos(\omega_b t) + \text{Const.}$$

となる。これらより、コットンムートン効果をもたらす位相差  $\phi_0 - \phi_X$  は、プローブ信号とリファレンス信号の位相差として計測できる。厳密には、(ファラデー回転により、直交成分がそれぞれ純粋な O/Xモードでなくなるため)

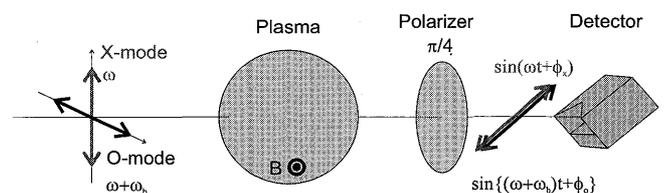


図7 CHSにおけるコットンムートン偏光計測の原理図.

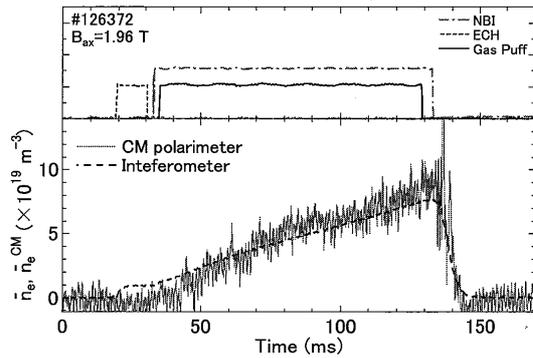


図8 コットンムートン偏光計測の計測結果.  $\bar{n}_e$ ,  $\bar{n}_e^{\text{CM}}$  はそれぞれ干渉計, コットンムートン偏光計から評価した線平均電子密度.

コットンムートン効果とファラデー効果の結合項が存在し, 電子密度の評価が複雑になるが, 両効果がそれぞれ十分小さい場合は無視できる. 本方式は, 強度計測ではなく, 位相計測であるため, レーザーの発振不安定性やプローブ光の屈折による強度変化は, 計測結果に直接影響を与えないという利点を持つ.

図8に, CHSにおける測定結果を示す[8]. CHSでは, コットンムートン偏光計測の性能評価のため, 同一光源, 且つ同時・同一計測コードで, 通常の干渉計測と偏光計測が可能なシステムにしている. 両者の計測結果は, 放電初期を除くと良く一致している. この時, デジタルバンドパスフィルタのバンド幅で決まる応答時間は0.32 msで, 密度の標準偏差は  $6.1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  である. 高周波ノイズは, 周波数偏移方法に起因するビート信号の周波数ノイズから生じることがわかっている. また, 光学素子間での多重反射成分や, 他のチャンネルとのクロストーク成分が存在すると, コットンムートン効果とは異なる位相変調が生じるため, それらを十分抑制することが不可欠である. 図8の計測結果は, 電子回路内でのクロストークの抑制, および検出器—光学素子間での多重反射成分抑制などの対処を施した後の結果であるが, 放電初期のずれは除去しきれない成分に起因している可能性がある.

ファラデー回転計測手法としては, 計測精度, 長時間安定性, およびシステムの簡便性に利点を持つ光弾性変調器 (Photoelastic Modulator; PEM) を用いた方式を検討してい

る. 本方式は, 実際にトカマク装置で原理検証され, ルーチン的な測定を行っている実績ある方式である[10]. しかし, これまで遠赤外領域で使用できるPEMがなかったため, 遠赤外領域に高い透過率を持つ高抵抗シリコンを光弾性変調素子としたPEMを開発し, 現在ベンチテストを進めている[11].

### 3.2.6 まとめ

核燃焼プラズマ (ITER) での干渉/偏光計測では, 遠赤外レーザー光を用いた計測が検討されている. 現在候補として考えられている波長  $119 \mu\text{m}$  の  $\text{CH}_3\text{OH}$  レーザー光は屈折の影響が大きく安定した計測に難があると考えられる. そこで, この影響を低減するために, より短波長のレーザー光源の開発を進める中で,  $\text{CH}_3\text{OD}$  ガスをレーザー媒質とする発振において, 2本のレーザー発振線 ( $57 \mu\text{m}$  と  $48 \mu\text{m}$ ) がこれまでにない強い発振を示すこと, しかも共振器長の調整によって同時発振することを確認した. 短波長のレーザー干渉計では, 干渉計システムの機械的振動の影響の除去が問題となるが, 2波長同時発振を有効利用することによって, これを除去できると考え, その開発を進めている. テストベンチを用いた計測において, 2波長レーザーの同時発振を用いた干渉計の構築によって, 本計測システムの基本動作を確認することができた. 電子密度計測法の候補であるコットンムートン偏光計をCHS装置に適用し, その有用性と問題点を確認した.

### 参考文献

- [1] A. Donne *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **70**, 707 (1999).
- [2] G. Moruzzi *et al.*, MICROWAVE, INFRARED and LASER TRANSITION of METHANOL Atlas of assigned Lines from 0 to  $1258 \text{ cm}^{-1}$ , 73 (CRC Press, 1995).
- [3] S. C. Zerbetto and E. C. C. Vasconcellos, Int. J. IR and MM Waves **15**, 889 (1994).
- [4] D. Pereira *et al.*, Int. J. IR and MM Waves **15**, 1 (1994).
- [5] K. Nakayama *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **75**, 329 (2004).
- [6] G. Braithwaite *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **60**, 2825 (1989).
- [7] K. Kawahata *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **70**, 707 (1999).
- [8] T. Akiyama *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **77**, 10F118 (2006).
- [9] S. E. Segre, Phys. Plasma **2**, 2908 (1995).
- [10] Y. Kawano *et al.*, Rev. Sci. Instrum **72**, 1068 (2001).
- [11] T. Akiyama *et al.*, submitted to Plasma Fusion Res.