

生体断層計測への光ヘテロダイン検出法の応用に関する研究

井 尻 和 夫*

【要 旨】

医療現場では、各種のX線投影が一般的に使用されているが、X線照射による患者への負担が大きく、人体への影響を与えないで、体内の境界面や異常箇所を検査・診断することができる赤外線を用いた検査装置の開発が求められている。

ここでは、高感度赤外線センシングユニットの実用化を目指し、断層投影や体内の異常箇所の検査などの医用検査・診断への赤外線応用の可能性を検証するため、低コストで実現できる低周波パルス変調LD光源を用いて、人体組成に近い豚肉を主原料とする加工肉を供試体とした高光散乱媒質の透過減衰量を電源ハム雑音や自然光、蛍光灯などの外乱光の多い環境下でも高感度で測定できる方法について検討した。

微弱光を高感度で検出できるヘテロダイン検出法と相似なロックイン検出法を採用したディテクション技術を用いて透過減衰量を測定した結果、供試体とした高光散乱媒質の透過光減衰量がBeerの法則を満たし指数関数的に減少していることを確認でき、透過光量を投影する方法を用いて生体断層を計測する光CTへの利用の可能性を検証することができた。

また、PINフォトダイオードの接合容量が、入射光量に対して高確度で変位することに着目した超微弱光の高感度検出方法の有効性についても検証することができた。

1. 緒 言

今日の医療現場において、従来のX線やMRI、超音波等による断層投影装置は、生体内の疾患を計測する高度医療の必須の医用測定装置となっているが、大掛かりな高額医療設備であり、また放射線や強磁場の生体への影響の問題もあり、局部疾患の診断やモニタリングに利用できる低コストの簡易断層投影装置の開発が求められている。

レザ光をプロブとした光断層計測手法は、生体へのダメージを与えず、生体の局部に発生した進行性疾患の計測や、筋肉や皮質・肉質などのモニタリングができるなど、様々な生体情報の計測を可能とするもので、従来のX線やMRI、超音波等の断層投影装置などの一部の測定機能を補

完するだけでなく、「異なる診断機能を有する装置」実現への高い可能性を持っている。また、光散乱媒質で形成されている動物や植物など様々な生体の透視ができるなど異分野への応用が期待される。

そこで、生体の窓と呼ばれている600～1200nmの可視から近赤外域の低周波パルス変調LD光源と、ロックイン検出法を採用した高感度ディテクション技術を用いて、光散乱媒質で形成されている生体断層の境界域を特定する測定方法の可能性を検証することにした。

(1) 光CT開発の可能性調査の経過

光ヘテロダイン検出法を用いた光断層投影システムの構成と機能評価、並びに、システムの利用・応用の可能性については、財団法人 京都産

* 研究開発課 専門員

業 2 1 が平成14年度に実施した、[光断層像技術に関する可能性調査](山形大学 湯浅哲也 助教授に委託)(以下 光CT技術調査)にその詳細が報告されている²⁾。

この光CT技術調査による光ヘテロダイン検波法を用いた投影システムは、ダイナミックレンジ140dB、最小検出パワー 10^{-17} Wという最高の検出感度と空間指向性を有するシステムであるが、システムを構成する音響光学変調器(AOM)などの要素部品が高額であり、汎用性の高い簡易光CTを実用化するうえで、測定系の低コスト化を図ることが大きな課題となっている。

光ヘテロダイン検波法を用いた光CTシステムは、図1²⁾に示すようにCWのLDビームをビームスプリッタで2分岐し、差周波が10数MHzとなる100MHz域の2つのAOMにより信号光と局部発信光を生成し、供試体を透過した信号光と局部発信光を、ビームスプリッタを介した合波光を

受信し、受信信号に転写された差周波信号から供試体を透過した光軸近傍前方散乱光の光スペクトル分散量を算出し、その結果から高精度の断層像を生成するものである。

(2) 技術可能性調査の課題

低コストの光CTを実現するには、生体の肉質など高光散乱媒質の光軸中心近傍の透過減衰量が、Lambert-Beerの法則に従って浸透深さに対して指数関数的に減少していることを検証するために深部に達する超微弱光量を高精度で計測できる計測方法を考案する必要がある。

この計測方法を実現することによって、X線CTと同様のアルゴリズムで強散乱媒質の透過光強度分布を投影する光CTを実現することが可能となる。

ここでは、光ヘテロダイン検波法を用いず、前方近軸散乱光の透過光量の変位量を低コストでありながら高感度計測が

可能であるヘテロダイン検波法と相似なロックイン検出法を採用した2つのディテクション方法について技術調査を行い、汎用性の高い簡易光CTシステムを低コストで実現できる可能性について検討することにした。

測定方法の1つは、100KHzの低周波パルス変調LD光源を用いて強散乱媒質中の光透過量が透過距離に対してBeer法則に従って

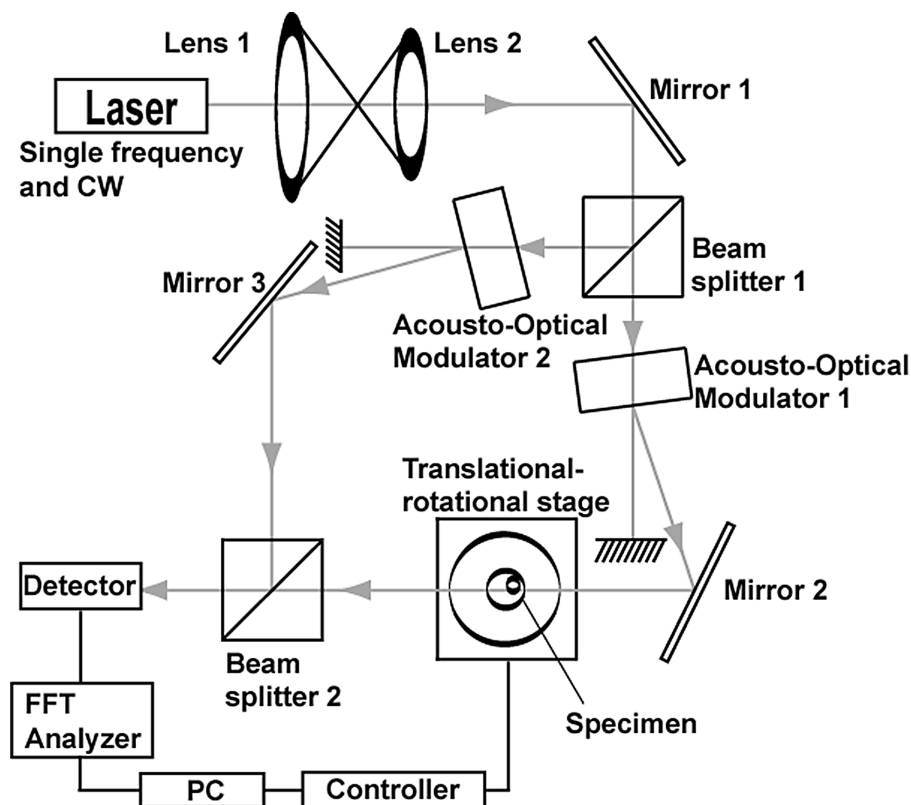


図1 . ヘテロダイン検波に基づく光CT映像装置

指数関数的に減衰することを、透過した変調光の基本波スペクトルの減衰量と変調波でロックインした波形から確認する方法である。

もう1つの測定方法は、PINフォトダイオードの接合容量が入射光量に依存して非線形ではあるが、高確度で変化することに着目した超微弱光の高感度検出の方法である。

2. 実験方法

(1) 低周波パルス変調LD光源を用いた高光散乱媒質中の透過減衰量の計測

ここに提案する計測方法は、光ヘテロダイン検波法を用いず、高散乱媒質を透過した低周波パルス変調LD光の散乱光を数100 μ mのスリットを介して前方近軸散乱光のみを直接受光する方法である。

ディテクターユニットは、ダイナミックレンジが大きく、しかも超微弱光量の高感度ディテクションを可能とするために、外乱光、電源ハムとその他の低周波電磁界雑音、回路素子のランダム雑音などのノイズ環境下においてこれらの影響を極力受けにくい高いコモンモード除去特性を有するものを実現する必要がある。

使用するLD光源には、生体組織の光吸収損失が比較的少ない生命の窓と言われている波長600~1200nmの近赤外域にある830nmのLD光源を用いることにした。

生体組織の光吸収は、主に水分子(1200nmより長い赤外波長域)とタンパク質や色素などの高分子(600nmより短い紫外・可視光域)によるものであり、波長600~1200nmの近赤外域では、外皮から深いところにある生体組織の状態を検出することが可能となる。

測定方法の評価は、人体組成に近い豚肉を主原料とする加工肉を供試体とした高光散乱媒質を透過する光軸近傍の前方散乱光の透過光量測定を行

い、透過光量が、肉厚に対してBeerの法則に従って指数関数的に減衰して行く変化を高確度で計測できることを検証することによって行うことにした。

加工肉は、脂肪層や肉骨粉などが攪拌されて混入されているために、豚肉より高い光散乱媒質であると推定される。

<光透過減衰量の測定系の構成>

測定系は、供試体とした加工肉の光軸近傍の透過光量を計測できるよう図2に示す構成とし、図中に示したAのコリメータレンズを有する100KHzパルス変調光源から照射したLDビームを、Cの供試体に照射し、Dの0.5mm角のスリットを介して光軸近傍の前方散乱光のみをEの20dBの差動アンプで構成したディテクターユニットで受信し、30dBのRFアンプと6dBのパワースプリッタを介して2分岐した信号をストレージオシロスコープとスペクトラム

アナライザを用いて受信波形とパルス変調周波数のスペクトル計測ができるようにした。

受信波形の計測では、ストレージオシロスコープを用いてパルス変調信号に同期したロックイン検出モードで受信し、数100回程度のアベレーシング処理をすることによって外乱光、回路素子などのランダム性の雑音除去を行い確度の高い波形観測ができるようにした。

スペクトラムアナライザを用いたスペクトル計測では、センター周波数：100KHz、RBW：10Hz、帯域幅：200Hzとした極めて超狭帯域に設定し、数100回程度のアベレーシング処理をすることによって近傍の外乱スペクトルの影響を低減し高確度でスペクトルの波高値の変位量を計測できるようにした。測定系の全景を写真1に示す。

ディテクターユニットは、同一特性を有する有

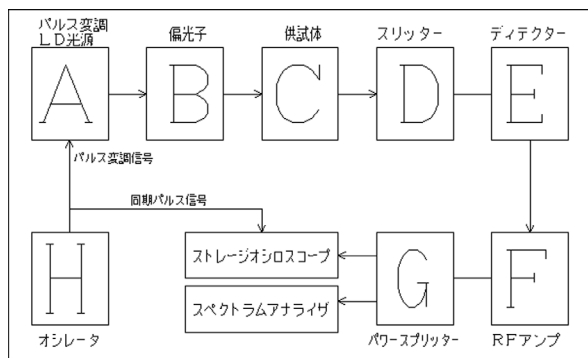


図2 光透過減衰量の測定系の構成

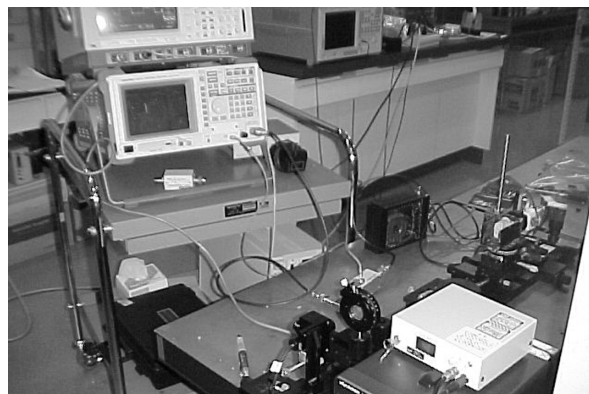


写真1 測定風景

使用機器

- LDパルス光源 : LDP - 8340 (40mW) 波長 830nm
- ストレージオシロスコープ : LC564A 最小入力感度 400 μ V/DIV (アベレーシング時)
- スペクトラムアナライザ : R3271A ダイナミックレンジ 120dB μ V

効受光面積：0.5mm²のPINフォトダイオードを2個近傍に配置し、3個のOPアンプで構成した差動アンプ回路で140dBの同相雑音除去特性を実現することによって、電源ハム雑音や自然光・室内灯などの外乱光によるコモン性雑音の影響をキャンセルできるようにした。試作したデテクタ - ユニットの写真を写真2に示す。

(2) PINフォトダイオードの接合容量変位に着目した超微弱光量の計測

PINフォトダイオードの接合容量は、PN接合によって形成されるコンデンサで応答速度を決定

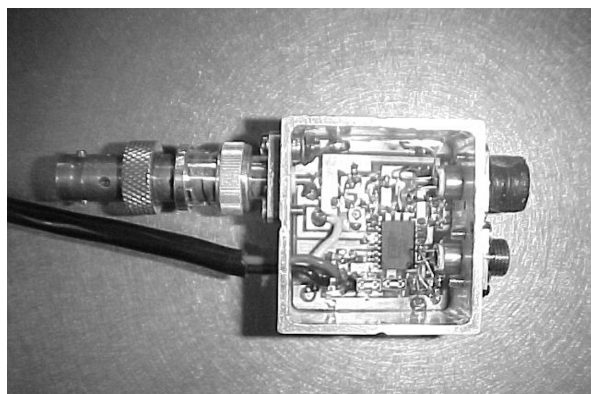


写真2 試作ユニット

付ける特性を有している。通常の使用では、逆電圧を印加することによって接合容量を小さくし高周波応答特性を改善している。

ここに提案する計測方法は、PINフォトダイオードの接合容量が入射波に依存して非線形ではあるが高確度で変化することに着目した超微弱光の高感度検出を実現する方法で、反射法 (TDR) によるインピーダンス計測の方法を用いてプローブ信号に対するPINフォトダイオードからの反射波を計測し、インピーダンス特性を求める方法である。

この計測方法は、PINフォトダイオードの端子間インピーダンスがダイオードの非線型な抵抗特性と接合容量に依存して決定付けられているため、反射係数が+1に近い値を呈し、微弱の入射光量に対してプローブ信号の殆どが反射し、プローブ信号と同等の高い信号レベルとなる。計測系には、ゲインの高いアンプを必要とせず、微弱光の入射量を容易に計測できる特徴を有していることである。

< 接合容量の測定系の構成 >

測定結果に示している相対入力光量は、LDビームをパワースプリッタで2分岐した出力を(1)と同様の測定方法で計測したdB μ Vで示された値を無次元で表現した値である。

測定は、低周波の方向性結合器を用いてプローブ信号に対する反射信号の波形から入射光量に対する位相変位量を計測する方法と、同等の方向性結合器を有する直流重畳が可能なインピーダンス/ゲイン・フェイズアナライザで接合容量の変位量を直接計測する方法を使用した。

位相変位量は、写真3に示すPINフォトダイオードのみを装着した受光ユニットと、方向性結合器、ストレージスコープとで構成し、プローブ信号をref信号としてロックインし反射信号を数100回程度アベレージングすることによって微量の位相変化を計測できるようにした。

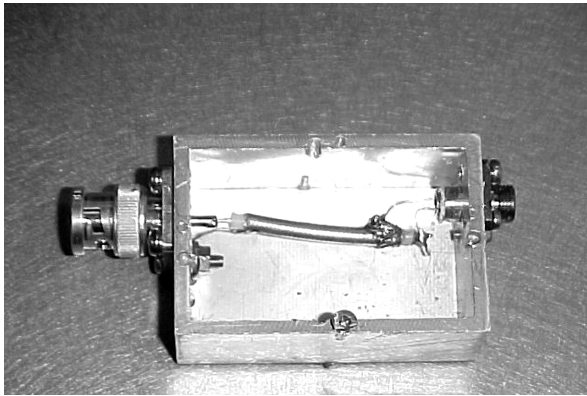


写真3 受光ユニット

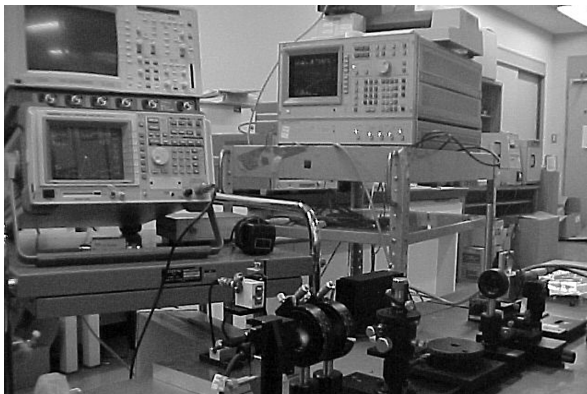


写真4 接合容量の測定風景

方向性結合器には、6 dBのパワースプリッターとトランス結合回路とで構成された40dBの結合度を有するものを使用した。

接合容量の測定は、写真4の構成で逆電圧印加時の接合容量の周波数特性を計測できるようにした。

3. 実験結果及び考察

(1) 低周波パルス変調LD光源を用いた高光散乱媒質の透過減衰量の測定結果

試作ディテクタ - ユニットの感度特性

試作したディテクタ - ユニットによる100KHzのパルス変調LDビームの受信波形とスペクトルを図3、図4に示す。

入射光量は、ディテクターのリニア特性の許容限界である最大光量とした。観測波形のなまりは、試作した差動アンプの高域特性に依存した結果である。

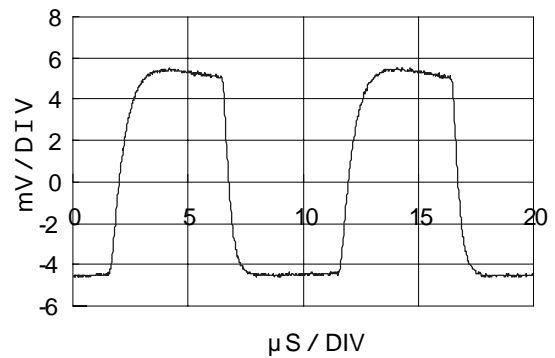


図3 パルス受信信号波形

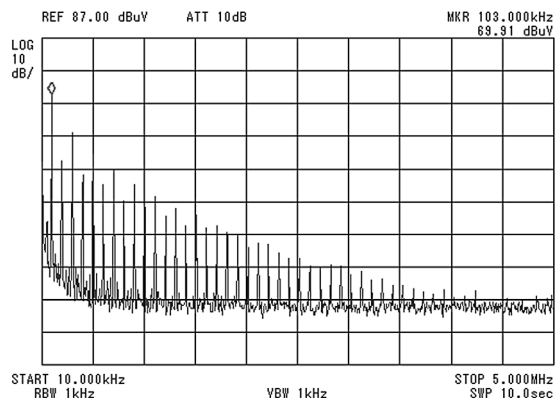


図4 パルス受信信号のスペクト分布

供試体の透過光減衰量の測定結果

測定結果に示している相対入力光量は、PINフォトダイオードからゲイン44dBのアンプを介してスペクトラムアナライザに入力して計測したdB μ Vで示された値を無次元で表現した値である。入力換算の光量は、相対入力光量が10dBで約 10^{-17} Wとなり、使用したPINフォトダイオード測定限界に近い値である。

加工肉の肉厚に対する100KHzパルス変調光の基本波のスペクトル減衰量を図5に示す。図6は、図5のピーク値の変化をプロットしたもので、肉厚に対する相対入力光量の変化が、肉厚：約40mmの深部まで - 2.48dB / mmの傾斜で減衰していることを示している。

この測定結果は、加工肉の深層部の透過光量が、浸透深さに対して指数関数的に減衰していること示しており、低周波のパルス変調光を用いた測定系が、Beer法則に従って指数関数的に減衰して

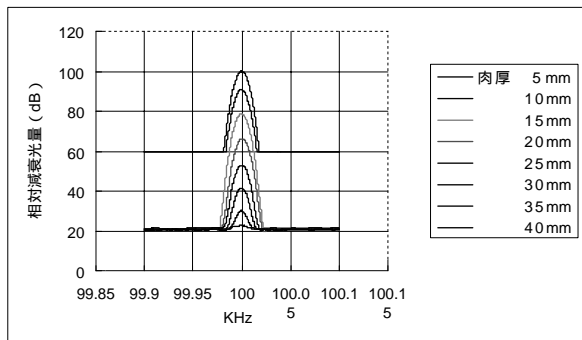


図5 肉厚に対する変調光スペクトル透過減衰

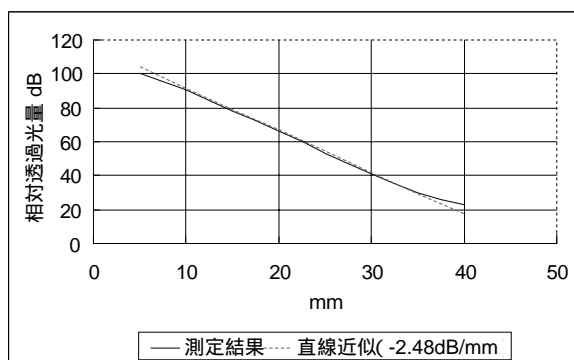
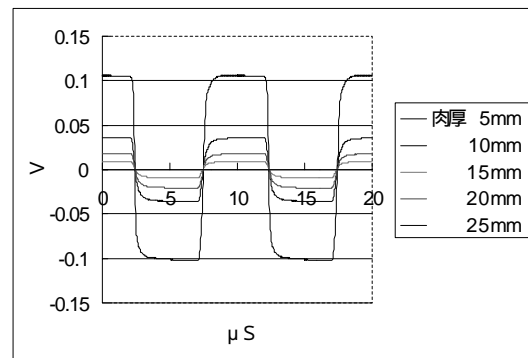


図6 加工肉の肉厚に対する光透過減衰量

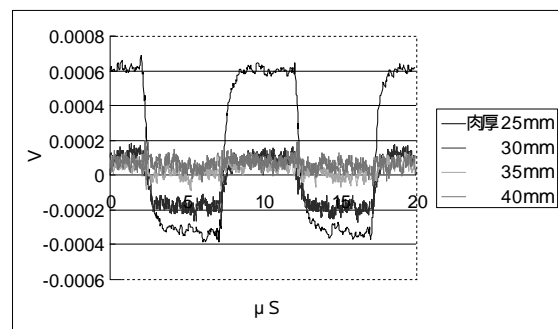
いくような生体断層などの光透過光量の測定方法として有効であることを示している。

次に、パワースプリッタの分岐出力をパルス変調信号に同期してストレージスコープで計測した肉厚に対する100KHzのパルス変調光の受信波形を図7に示す。(b)、(c)は、(a)の0V近傍の電圧軸を拡大したものである。(b)、(c)で顕在化しているノイズ成分は、試作した差動アンプのディファレンシャル性の内部雑音である。

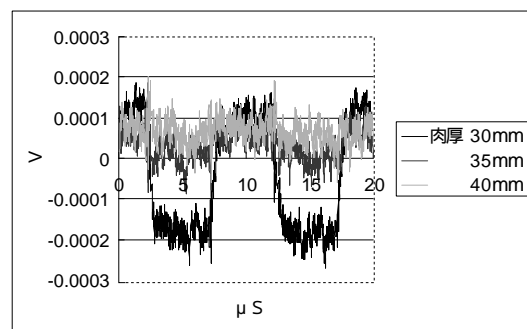
この測定結果からも加工肉の深層部の透過光量が、浸透深さに対して指数関数的に減衰している



(a)



(b)



(c)

図7 肉厚に対する100KHz変調光透過減波形

こと示しており、スペクトラムアナライザで計測した結果と同等の分解能で計測できることを示している。

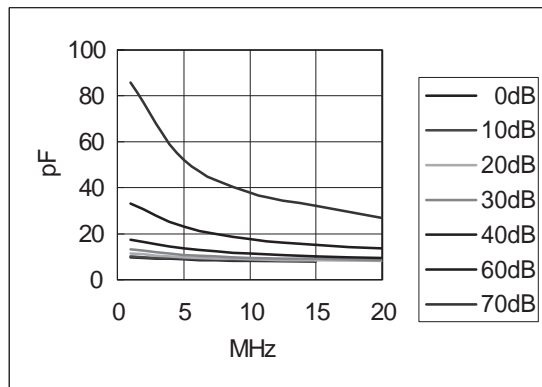
(2) PINフォトダイオードの接合容量変位に着目した超微弱光量の測定結果

接合容量の測定結果（逆電圧を印加なし）

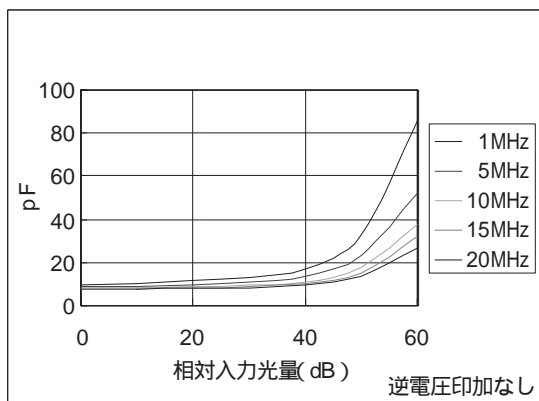
逆電圧を印加しない条件で測定した相対入力光量に対する端子間容量の周波数感度特性を図8(a)(b)に示す。測定結果は、超微弱入射光量の変位に対して直線に近い特性を示している。

端子間容量は、接合容量の他にリード線のインダクタンスやケースとの浮遊容量などが加算された数pF高い値を示しているが、ほぼ接合容量を反映した結果を呈している。

次に、プローブ信号を10MHzで測定した相対



(a)



(b)

図8 相対入力光量に対する端子間容量の周波数感度

入力光量に対する反射波の波形を図9に示す。図10は、図9のゼロクロス点に於けるプローブ信号に対する反射波の位相量を示したものである。

接合容量の測定結果（逆電圧を印加の有無）

逆電圧印加の有無の条件で1.5MHzで測定した相対入力光量に対する端子間容量の測定結果を、図11(a)(b)に示す。測定結果は、逆電圧印加の有無に大きく依存することを示している。何れの結果も、超微弱入射光量に対して接合容量の変位量は小さいが直線に近い特性を示している。

考察

2つの測定方法による結果は、共にPINフォトダイオードの測定限界に近い感度で超微弱光量を高確度で計測できることを検証できたことを示し

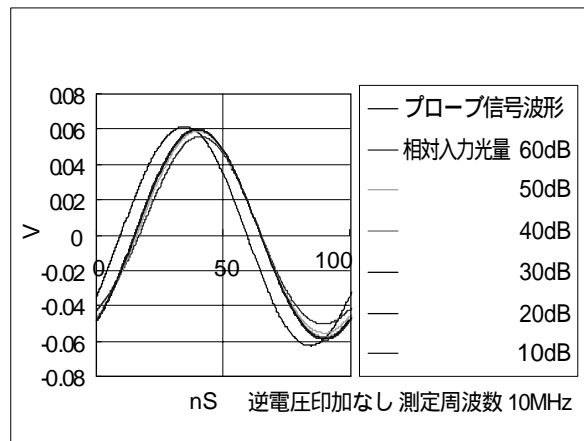


図9 入力光量に対する反射波の波形

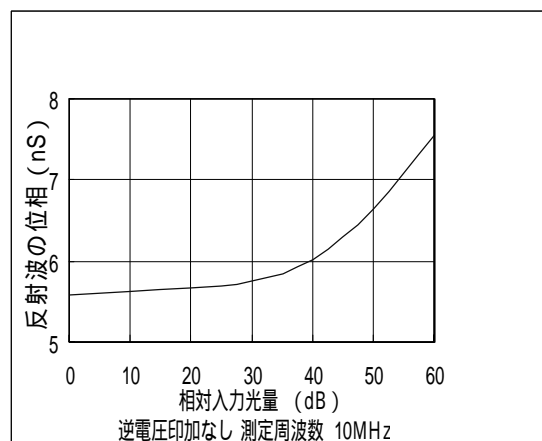
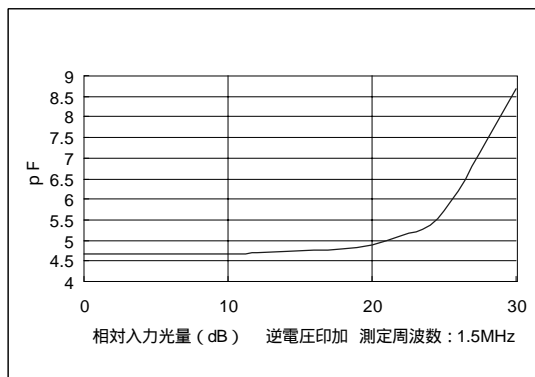
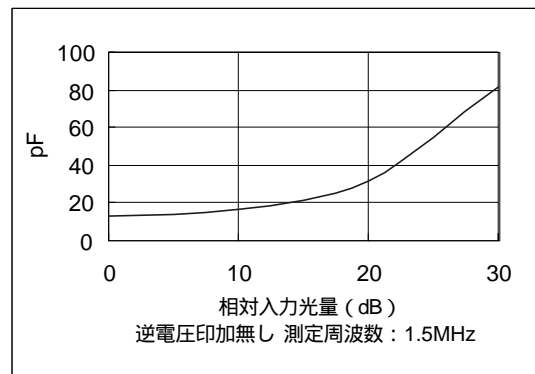


図10 入力光量に対する反射波の位相



(a)



(b)

図11 逆電圧印加の有無を測定条件とした相対入力光量に対する端子間容量

ている。

これらの結果は、提案した測定方法が生体などの高光散乱媒質の透過光強度分布を投影する光CTシステムのディテクションの方法として有効であり、X線CTと同様のアルゴリズムで強散乱媒質の透過光強度分布を投影する光CTを実現することが可能となることを示している。

低周波パルス変調LD光源を用いた高光散乱媒質の透過減衰量の計測方法は、120dBのダイナミックレンジとRBW:10Hzの周波数分解能を有する高感度スペクトラムアナライザに換わる測定系が必要であり、同調増幅器のような高いゲイン特性を有する狭帯域増幅器と対数増幅器を用いて実現することが可能であると考えられる。

また、PINフォトダイオードの接合容量変位に着目した超微弱光量の計測方法は、プローブ信号をref信号としてロックインし反射信号をアベレーシングして高感度計測を実現する方法であり、40dBの結合度を有する方向性結合器とダブルパラシットミキサなどを用いて、低周波域で高感度の位相検波をおこない検波出力から接合容量の変位を容易に求めることが可能であると考えられる。

これらの計測方法を実現する回路は、何れも低コストで容易に実現できるもので実用化の可能性は高いものと考えられる。

4. 結 言

本研究は、汎用性の高い光CTを低コストで実現することを目指して、生体の肉質など高光散乱媒質の光軸中心近傍の透過減衰量が、Lambert-Beerの法則に従って浸透深さに対して指数関数的に減少していることを検証できる深部に達する超微弱光量を高精度で計測できる計測方法を考案することを目的として実施した。

ここに提案した2つの計測方法が、ヘテロダイン検波法と相似なロックイン検出法を採用し、前方近軸散乱光の透過光量を高感度計測できる低コストで実現可能であり、汎用性の高い簡易光CTシステムを低コストで実現するための計測方法として有効であることが検証できた。

今後は、この計測方法の実用化を進めると共に、X線CTと同様のアルゴリズムで強散乱媒質の透過光強度分布を投影する光CTの原型システムを試作検討していく予定である。

(参考文献)

- 1) 井尻・黒川・安達・大東 京都府中小企業総合センター - 技報 36, 41(2002)
- 2) 財団法人 京都産業 21 [光断層像技術に関する可能性調査](平成13、14年度)
山形大学 湯浅哲也 助教授に委託