# 偏波ダイバーシティサンプリングヘッドユニットの開発

Development of Polarization Diversity Sampling Head Unit using Organic AANP Crystals

大谷昭仁 Akihito Otani, 津田幸夫 Yukio Tsuda, 井川考人 Koji Igawa

[要 旨]	これまでに我々が開発してきた KTP 結晶を用いた光サンプリングオシロスコープは,感度が低く,さらに光通信 システムの開発で必要となる偏波依存化と,測定帯域の拡大に対応できていないという問題点があった。今回, サンプリングヘッドユニットに非線形変換効率の高い有機非線形結晶 AANP (2-adamantylamino-5- nitropyridine)を搭載したときに得られる波長変換特性を詳細に調査し,そのデータを基に,サンプリングヘッ ドユニットの測定帯域拡大を行うための技術と,偏波無依存化技術の検討を行った。その結果,有機非線形結 晶を用いた偏波ダイバーシティヘッドユニットの開発に成功し,160Gbit/sの遠端波形測定においてその有用 性を確認した。
[Summary]	We have previously developed a turn-key-ready OSO (optical sampling oscilloscope) system with a KTP crystal. Recently, we studied the characteristics of an AANP (2-adamantylamino-5-nitropyridine) crystal, which is the newest organic crystal for achieving a high-sensitivity optical sampling head unit for the OSO system. We developed a polarization-independent sampling head with a high sum-frequency conversion efficiency over the C-L bands using the AANP crystals. This paper reports the characteristics of the AANP crystal and the developed configuration of a polarization-independent optical sampling head unit with AANP crystals. Furthermore, we demonstrate 160-Gbit/s far-end measurement using the OSO system with the developed sampling head unit.

#### 1 まえがき

光サンプリング技術による波形観測は、低ジッタでの測定が可能 であるとともに、プローブ光をゲート信号とし、非線形光学結晶を光 ミキサにするため、高い時間分解能で波形観測が可能である。しか も、サンプリングした後、低周波での電気的処理によって波形再生 を行う技術であるため、100Gbit/s を超えるような超高速の光信号 であってもリンギングを伴わず、正しい波形が再生できるという特徴 がある。

これまでに我々は、光サンプリングオシロスコープ(OSO:Optical Sampling Scope)を実現するために、電界吸収型変調器(EAM: Electro-Absorption Modulator)と分散減少ファイバー(DDF:Dispersion Decreasing Fiber)を用いてパルス幅 0.5ps 以下で、タイミングジッタの少ない短パルス列を発生させる技術<sup>11</sup>と、この技術を用いて外乱の影響を受けないコールドスタート可能な C バンド帯 (1530nm~1565nm)OSOの構築技術を報告してきた。<sup>2)</sup>

しかしながら,現在の光通信では,高感度で外乱による光信号の 偏光変動に影響されず,しかも C-L バンド(1530nm~ 1610nm)にわたる広い波長範囲において伝送光信号波形の観測 が要求されているのに対して,これまで報告してきた OSO は,感度 が低く,被測定信号の偏波状態に敏感で,偏光制御をしない状態 では観測波形の振幅が安定しないという課題があった。 そこで, 我々はこれらの課題を解決するために, OSO のサンプリ ングヘッドユニットに非線形変換効率の高い有機非線形 AANP 結 晶を, 光ミキサとして用いた場合の波長変換特性を詳細に調査した。 次に, この調査結果に基づいて, 測定波長範囲の広い偏波ダイ バーシティサンプリングヘッドの設計技術, モジュール化技術が実 現可能か否かを検討した。

その結果, AANP 結晶を用いて, 所望する性能を持ったサンプ リングヘッドモジュールが製作できることがわかった。また, これまで 偏波揺らぎが生じて安定に測定できなかった長尺な 160Gbit/s 伝 送信号の遠端波形測定においても, 試作したモジュールにより安 定に測定できることが確認された。そこで, 本論文では, これらの開 発で得られた AANP 結晶の評価結果と, 偏波ダイバーシティサンプ リングヘッドユニットの設計指針および評価結果について報告する。

#### 2 光サンプリングオシロスコープの基本構成と原理

図1に、光サンプリングの基本構成を示す。これらを装置化した OSO は、サンプリングパルス光発生器、偏波合波器としての偏波 ビームスプリッタ(PBS)、相互相関信号を発生させるための光ミキ サ、アバランシェホトダイオード(APD)、測定波形表示するための CPUとモニタで構成される。

サンプリングパルス光発生器で生成されたパルス幅の非常に狭

い短パルス光は, 偏波合波器によって被測定信号と合波され, 同 一光軸にある光ミキサ(非線形光学結晶)へ入射される。このとき, 光ミキサは, サンプリングパルス光と被測定光の間で第二種位相整 合が得られるような条件で配置される構成となっている。





一般に第二種位相整合が得られるような配置に置かれた光ミキ サは、直交する偏波の 2 つの光が同時に入射されたときのみ、入 カ光の和周波光(波長変換光)を出力する特性を有する。そのため、 OSO 内部では、被測定信号光とサンプリングパルス光が同時に光 ミキサに入力されたとき、2 つの光のピークパワーの積に応じた波 長変換光、つまり、相互相関強度に比例したパワーの和周波光が 発生されることになる。そこで、OSO では、和周波光(相互相関強 度信号光)をAPDによって電気信号に変換した後、CPUで処理し、 モニタ上にパーシストデータ表示することでサンプリングデータから 波形を再生する構成としている。

図2は、OSOの内部で行われているサンプリング原理を示すためのサンプリングパルス光と被測定信号光のタイミングチャートである。





fsをサンプリングパルスの繰返し周波数,  $f_0$ を被測定信号の繰返し周波数, Nをサンプリング番号(整数),  $\Delta T$ をサンプリング遅延時

間と仮定すると、サンプリングパルス光と被測定信号光の周波数の 関係は式(1)のように表せる。

$$\frac{1}{f_s} - \frac{N}{f_0} = \Delta T \tag{1}$$

したがって、被測定信号の繰返し周波数であるf<sub>0</sub>と、サンプリング 遅延時間ATとを決定すれば、サンプリングごとにATの遅延を与え ることができる。つまり、サンプリングパルス光の繰返し周波数 fs を 式(1)を基に決定することによって、コヒーレントサンプリング法によ る波形測定が実現可能となる。

そこで、実際の OSO では、被測定信号の繰返し周波数である $f_0$ と、サンプリング遅延時間 $\Delta T$ を入力して、適切なサンプリングパルス光の繰返し周波数 fsを求め、図2に示したような被測定信号光波形を時間領域で拡大した波形(サンプリングごとの相互相関波形のピークを結んだ包絡線波形)を得ている。

# 3 AANP 結晶の波長変換特性

 $\eta_{sg}$ を,光ミキサの非線形変換効率とし、 $P_{sig}$ をサンプリングポイントの被測定信号のパワー、 $P_{sam}$ をサンプリングパルス光のピークパワーと仮定すると、相互相関信号光である和周波光のパワー ( $P_{SF}$ )は、上記 (2) 式の関係を持つ。

$$\mathbf{P}_{\rm SF} = \eta_{sfg} \cdot \mathbf{P}_{\rm sig} \cdot \mathbf{P}_{\rm sam} \tag{2}$$

このため、OSO の感度を向上させるためには、サンプリングパル ス光のピークパワーを高めるか、非線形変換効率の高い光ミキサを 用いて、高い相互相関信号光強度、つまり、高い和周波光強度を 得ることが必要である。今回、η<sub>象</sub>が高い材料を光ミキサとして用い ることで OSO の感度向上することを検討課題とし、非線形光学定 数の高い AANP 結晶を用いることを検討した。

AANP 結晶は有機非線形光学結晶であり、従来用いていた KTP 結晶と比較し、非線形光学定数で 10 倍以上の値を有してお り、高い波長変換効率が実現できることが予想された。

そこで, AANP 結晶を光ミキサとして用いた場合の波長変換特性を実験的に評価したので,以下にその結果を述べる。

図3は、波長1552nm光を垂直に入射したときに位相整合状態 となるようにカットされた AANP 結晶において、その軸(a, b および c 軸)と、入射光の方向との機械的配置の関係を示したものである。

サンプリングパルス光の波長を1552nm に固定し, 被測定信号 波長を1530nm から1570nm(C-バンド)まで変化させたときの

AANP 結晶の波長変換特性について測定を行った結果を図4 に 示す。このとき、サンプリングパルスおよび被測定光の偏波状態は、 互いに直交する直線偏光状態を保ち、第2種位相整合条件が満 足できるようにして測定を実施した。図中、中空の四角()で示す プロットは、サンプリングパルスの偏光方向が AANP 結晶の a 軸に 平行で被測定信号の偏光方向が b-c 平面に平行である場合の測 定データである。塗りつぶしの丸(●)で示すプロットは、光サンプリ ングパルスの偏光方向が, AANP 結晶の b-c 平面に平行で、被測 定信号の偏光方向が a 軸に平行な場合の測定データである。



図 3 入射光方向と結晶軸の関係 Optical incident angle and crystal axes of AANP



図 4 正規化変換効率と入射光偏波状態の関係 Relationship of normalized conversion efficiency and polarization state for incident light

この結果より、中空の四角()で示すプロットされた波長変換 3dB帯域幅が35nmであるのに対して、塗りつぶしの丸(●)で示 すプロットの波長変換3dB帯域が100nm以上であることがわかる。 したがって、サンプリングパルス光の偏光方向を、AANP結晶のbc平面に平行に、被測定信号の偏光方向をa軸に平行にすること で、AANP結晶での波長変換特性を拡大化でき、結果としてOSO の測定帯域を拡大化できることがわかった。

次に,波長変換効率と入射角との関係について述べる。図5は, 入射光のAANP結晶に対する入射角を,垂直入射状態から+1°, 0°,および-1°だけ傾けたときの,波長変換効率の測定結果を示 したものである。このとき,入射角は,AANP結晶をa軸周りに回転 させることにより変化させた。測定は,サンプリングパルス光の波長 を1552nmに固定し,被測定信号の波長を1530nmから1570nm のCバンド帯内で変化させながら行った。



図 5 正規化変換効率と入射角の関係 Relationship of normalized conversion efficiency and incidence angle

図5から,結晶に入射する角度を-1°にすると効率が最大となる ピーク波長が長波長側にシフトし,逆に入射角度を+1°にすると ピーク波長が短波長側にシフトすることがわかる。このことから, AANP 結晶への入射光角度を調整することで,波長変換効率の ピーク波長を C-L バンドに合わせることができることがわかった。

以上の調査結果から、AANP 結晶と、偏波方向および入射角を 調整し、モジュールを組みあげることにより、C-L バンドをカバーす る高感度の光サンプリングヘッドユニットが実現できる可能性が確 認された。

さらに、非線形変換効率の高い AANP 結晶を用いても、非線形 光発生効率がスポットサイズに依存することから、非線形結晶に光 を入力するレンズの焦点距離によっては、高くならないことが予想さ れた。そこで、AANP 結晶への入射光のビームウエスト径と、波長 変換変換効率との関係も調査した。実験は、波長変換帯域が C-L バンドをカバーするようにしつつ、ビーム径の異なる3種類のレンズ を有した光サンプリングヘッドモジュールを試作し、その性能比較 を行うことでレンズの最適焦点距離を求めることにした。図6は試作 したモジュールの波長変換帯域幅を示している。この図から AANP 結晶を用いると、ビームウエスト径が 36μm 以下の小さなス ポットサイズの場合に、C-L バンドの帯域を持つ光サンプリングヘッ ドが製作可能であることがわかる。



図 6 正規化変換効率と入射光ビームウエスト径の関係 Relationship of normalized conversion efficiency and incident beam waist of prototype optical sampling head

そこで, 光軸調整の難易度, および温度に対する信頼性, 高非 線形光発生効率を考慮した C-L バンド対応サンプリングヘッドユ ニットを実現するには, ビームウエスト径が 20μm となる集光レンズ を用いることが, 最適と判断した。

# 4 偏波ダイバーシティサンプリングヘッドユニットの構成

図7は、設計した偏波ダイバーシティサンプリングヘッドユニット の構成図を示している。図に示すとおり、サンプリングヘッドは、偏 光子、偏波ビームスプリッタ(PBS)、2 個の TiO<sub>2</sub>結晶(偏波合波 器)、1/2 波長板、2 個の AANP 結晶、2 個の赤外線のカットフィル タ、および 2 個のアバランシェフォトダイオード(APD)によって構成 されている。サンプリングパルス光は、偏光子と PBS によって、パ ワーの等しい 2 つのサンプリングパルス光に分割される。被測定信 号光はその偏波状態に応じて、PBS により、2 つの偏波成分に分 割される。2 つの偏波合波器(TiO<sub>2</sub>結晶)は、おのおの、分割した サンプリングパルスの一方の偏光成分と、それに直交する被測定 信号の偏波成分とを、高い偏光消光比を持つ 1 つの光信号へと結 合させる機能を持っている。PBS と第 2 の偏波合波器の間に配置 された 1/2 波長板は、サンプリングパルスと被測定信号の間の光路 長の相対的な差異を補正する機能をもっている。もし、この 1/2 波 長板がなければ、各合波器において、サンプリングパルス光と被測 定信号光の合波されるタイミングが、相対的に異なることになり、 OSOの時間分解能の劣化を引き起こす要因となる。なぜなら、サン プリング光と被測定信号光が合波されるときの相対的な位相が、2 つの偏波合波器(TiO<sub>2</sub> 結晶)間で異なるようになり、実効的にサン プリングポイント位置がずれてしまうからである。



図 7 偏波ダイバーシティサンプリングヘッドユニットの構成図 Configuration of developed polarization diversity sampling head unit

それぞれの偏波合波器で合成されたサンプリングパルス光と被 測定信号光の合波光は最終的に AANP 結晶に入力される。このと き, 合波光のビームウエストサイズは 20µm となるようにした。AANP 結晶は, a 軸がサンプリングパルスの偏光方向に平行となるよう配 置し、結晶への入射光の入射角は、波長変換が C-L バンドにおい て生じるような条件で固定した。AANP1 結晶および AANP2 結晶 から出力される SFG 光は,赤外線カットフィルタを通り,2 つの APD にて、各々電気信号に変換される構成とした。 各 APD で出 力された2つの電気信号は、被測定信号の互いに直交する2つの 偏波成分(P偏光成分,S偏光成分)の強度にそれぞれが対応して おり, OSO 本体において, 偏波無依存測定モードにおいては, そ れらの強度が加算され,モニタ上に観測波形として表示される構成 とした。このとき、2 つの AANP 結晶における波長変換効率が互い に異なると, 偏波依存特性悪化の要因となるため, 2 つの APD 出 力信号を増幅する電気アンプの利得を微調整して,特定波長にお いて変換効率の差を補正するようにした。

#### 5 偏波ダイバーシティサンプリングヘッドユニットの評価

図8に, 試作した偏波ダイバーシティサンプリングヘッドユニット の構成が当初の設計とおりの特性をもつかどうかの評価を行うため, 偏波ダイバーシティサンプリングヘッドユニットモジュール単体(電 気アンプでの利得補正を行う前の状態)に搭載された2つの AANP 結晶の波長変換効率特性と, 従来の偏波依存型サンプリン グヘッドユニットで用いていた KTP 結晶の波長変換効率の特性比 較の結果を示す。試作した偏波ダイバーシティヘッドユニットの AANP 結晶の波長変換効率が, 従来のサンプリングヘッドに使用 していた KTP 結晶の波長変換効率に比較すると, C-L バンド全体 にわたって20倍程度高く, また, 3dB 帯域幅も, 2倍以上広く得ら れることが確認できる。



図 8 偏波ダイバーシティサンプリングユニットにおける AANP 変換効率 と従来の偏波依存型サンプリングヘッドユニットの KTP 変換効率 Characteristics of AANP conversion efficiency in polarization diversity head and KTP conversion efficiency of traditional sampling head

図9に、試作した偏波ダイバーシティーサンプリングへッドユニットの概観写真を示す。寸法は、大よそ70×70×15mmであり、非常に小型化されている。また、構成される光学系がすべてモジュール化構造およびファイバ光学系で構築されていることから、OSOへの実装が容易であり、さらに振動および環境温度等の外乱に対しても、信頼性の高いものになっている。

図10(a)(b)は試作した偏波ダイバーシティサンプリングヘッドユ

ニットを搭載し、さらに、1570nmで、P 偏光成分、S 偏光成分が一 致するように電気アンプの利得を調整した OSO によって、パル ス幅 2ps、ビットレート 40Gbit/s RZ 信号のアイダイアグラム波形を 測定した結果である。なお、図中に示した波形は、P 偏光成分、S 偏光成分を加算して偏波の依存性を無くす偏波無依存測定モード においての測定結果であり、被測定信号光が、波長 1550nm、平 均入力パワー40mW のときと、被測定信号光が波長 1610nm 平均 入力パワー40mW のときをそれぞれ示している。 1550nm と 1610nm において、被測定光波長が 60nm 離れているにもかかわ らず、同様な強度で波形が観測できていることが確認できる。



図 9 偏波ダイバーシティサンプリングヘッドユニット試作器の概観
Overview of prototype polarization diversity sampling head unit



- 図 10 2ps のパルス幅を持つ 40-Gbit/s RZ の波形
  - (a) DUT 信号の波形: 1550 nm
  - (b) DUT 信号の波形: 1610 nm
  - Waveforms of 40-Gbit/s RZ signal with pulse width of 2 ps
  - (a) Wavelength of DUT signal: 1550 nm
  - (b) Wavelength of DUT signal: 1610 nm

これらの結果から試作した偏波ダイバーシティサンプリングヘッド ユニットにおいては、波長に大きく関係せず、当初の設計とおり波 形測定ができることが確認できた。さらに、図8で得られた結果を考 慮すると、C-Lバンドにわたって偏波無依存型のサンプリングヘッド ユニットが実現できたと考えられる。

図11は,前述の実験と同様,1570nmで一致するように電気ア ンプの調整を施した偏波ダイバーシティサンプリングヘッドユニット をOSOに搭載し、P 偏光成分とS 偏光成分の出力電気信号が1 被測定光の偏波状態によってどのように変化するかを測定した結 果である。尚,本実験では,被測定信号の偏波状態を変化させつ つ,アイダイアグラム測定を行い,各偏光成分の波形振幅の大き さをプロットしている。丸(●)および四角(■)で示すプロットは, 互 いに直交する偏波成分(P 呼び S 偏光成分)に相当し、ひし形 (◆)で示すプロットはそれらの和を示したものである。この図より, 1550nm の被測定光に対して従来の偏波ダイバーシティヘッドユ ニット構造を採用していないサンプリングヘッドでは、測定されるア イダイアグラムの波形振幅がほぼ 100%近く変動するのに対して、 本ヘッドユニットを用いた場合は P 偏光とS 偏光成分を加算するこ とにより、OSO 測定波形の偏波の依存性が±3%に抑圧されること が確認できた。なお、この±3%の値は被測定光の波長に依存して いた。これは、今回の評価実験において AANP1 結晶と AANP2 結晶の波長変換特性を完全に C-L バンドの全帯域において一致 できていないことが起因している。今後, AANP 結晶の個体差やモ ジュール組み立て誤差による波長変換特性の差を,ソフト的な処理 により補正し、偏波依存性波長間のばらつきを抑えることは可能で あり、全波長において±1%以下も実現できるものと考える。



図 11 試作品の偏波ダイバーシティサンプリングヘッドを持つ OSO の 偏波依存性

Polarization dependency of OSO system with prototype polarization diversity sampling head

#### 6 160Gbit/s 伝送信号の遠端測定実験

伝送後の光信号の波形測定を行うためには、サンプリングヘッド の偏波無依存化が必須である。これは、光ファイバ伝送路が温度や 振動等の外乱を受けるため、伝送信号の偏波状態を頻繁に変化さ せるためである。このため、従来型のサンプリングヘッドを搭載した OSO では、伝送信号の波形測定を外部偏波制御器を用いず、安 定に行うことができなかった。

そこで、今回試作した偏波ダイバーシティヘッドユニットの有効性 を示すために、本ヘッドユニットを搭載した OSO を用いて、5km 伝 送させた 160Gbit/s RZ 信号のアイダイアグラム波形を遠端にて測 定する実験を行った。

図 12 は、アイダイアグラムの測定結果を示しており、パーシスト 時間 10 秒において、アイダイアグラム波形がつぶれることなく、大 きく開口していることが確認できた。このことから、偏波状態が常に 変動するような伝送後の被測定信号測定においても、偏波ダイ バーシティヘッドを搭載した OSO では、測定波形振幅の変動が生 じず、安定に波形測定が可能となることが確認され、その有効性が 実証できた。



図 12 偏波ダイバーシティヘッドを実装した OSO による 5km 伝送 160-Gbit/s 光信号の遠端波形 Far-end waveform of 160-Gbit/s signal after 5-km transmission measured by OSO with polarization diversity head

### 7 結論

波長 1552nm において位相整合されるようカットされた AANP 結晶を用いて、C-L バンドの広い波長範囲にわたって、従来の KTP 結晶と比較し 20 倍程度高い波長変換効率が維持できること を示し、あわせてモジュール化時の調整方法も明らかにした。加え て、偏波ダイバーシティヘッドユニットの構成の提案も行った。

次に,提案した偏波ダイバーシティサンプリングヘッドユニットを 試作し,OSOに実装したときの偏波依存性を評価するとともに有効 性を実証するために、従来のサンプリングヘッドでは測定できなかった伝送波形の測定実験を行った。その結果、伝送後の160Gbit/s RZ 信号光をパーシスト時間10秒において、振幅変動をともなわず安定 に測定できることが確認され、提案した偏波ダイバーシティヘッドユ ニットの有効性を実証できた。

#### 謝辞

この研究の一部は,独立行政法人 科学技術振興機構の「革新 技術開発研究事業」の一環として実施した。

Part of this work was supported by the "Research Program on Development of Innovative Technology" of the Japan Science and Technology Agency.

#### 参考文献

- T. Otsubo, A. Otani, and H. Watanabe: "Timing jitter of optical pulse using electroabsorption modulator with dispersion decreasing fiber," ECOC '99, Vol.I, pp.286-287 (1999)
- A. Otani, T. Otsubo, and H. Watanabe: "A turn-key-ready optical sampling oscilloscope by using electro-absorption modulators," ECOC '99, Vol.I, pp.374-375 (1999)

# 執筆者



大谷昭仁 コアテクノロジーR&D センター 光計測技術開発部



津田 幸 夫 コアテクノロジーR&D センター 光計測技術開発部



井川考人 コアテクノロジーR&D センター 光計測技術開発部