



回路ノート CN-503



テスト済み回路設計集“Circuits from the Lab™”は共通の設計課題を対象とし、迅速で容易なシステム統合のために製作されました。さらに詳しい情報又は支援は <https://www.analog.com/jp/CN0503> をご覧ください。

接続または参考にしたデバイス

ADPD4101	マルチモード・センサー・フロント・エンド
LT1761	TSOT-23 パッケージの 100mA 低ノイズ LDO マイクロパワー・レギュレータ

マルチパラメータの光学式液体測定プラットフォーム

評価と設計支援

回路評価用ボード

CN-0503 回路評価用ボード (EVAL-CN0503-ARDZ)

ADICUP3029 開発ボード (EVAL-ADICUP3029)

設計および統合ファイル

回路図、PCB レイアウト・データ、部品表、機構図面、ソフトウェア

回路の機能とその利点

光学技術は液体分析技術の様々な領域で使われており、吸光度、蛍光発光、散乱、後方散乱などの現象を利用して、化学組成、pH、混濁度などの化学的性質や物理的性質が調べられています。光学技術には、非接触、非破壊、高精度、高感度、といったいくつかの利点があります。しかし、電氣的誤差や物理的誤差を補正するために、多くの場合複雑な電子回路を必要とします。また、光路を定め周辺光による干渉を防ぐためには、これらを収容するための設計を注意深く行う必要があります。

図 1 に示す図は、再構成が可能なマルチパラメータ光学式液体測定プラットフォームで、比色分析、濁度測定、蛍光分析が可能です。この設計では、4 個の LED を同時に駆動し、4 対のフォトダイオードを柔軟なサンプリング・レートで同期測定できる、高集積マルチモード・センサー・フロント・エンドを使用

して複雑さを最小限に抑えています。更に、フロント・エンドにはオンチップ・デジタル・フィルタや優れた周辺光除去機能が備わっているため、周囲の照明条件に関わらずプラットフォームはその性能をフルに発揮して動作できます。

このシステムは、卓上機器の性能を持ちながら、持ち運びが必要なアプリケーションやハンドヘルド・アプリケーションに対応できます。LED 電流は最低 2mA まで設定可能で、200nA のスタンバイ電流と柔軟な出力データ・レートにより、システムは超低消費電力を実現しています。更に、メイン・ボードは Arduino 互換シールド・フォーム・ファクタで設計されているため、一般的なプロセッサ・プラットフォームを使用して迅速なプロトタイプ化が可能です。

このプラットフォームは赤外線から紫外線までの幅広い範囲にわたる波長の LED 光源に対応しており、4 つの独立した光路を同時に測定できます。その上、これらの光路のうち 2 つは、蛍光や混濁度などのアプリケーション向けに垂直方向測定をサポートしています。

各光路には入射ビームの強度をサンプリングする測定・リファレンス用フォトダイオードが配置されているため、LED 電流源の精度、LED のドリフト、機構的不完全性などによる誤差をほぼ除去することができます。

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。※日本語版資料は REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。

Rev. 0

©2020 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

アナログ・デバイセズ株式会社

本社／〒105-6891 東京都港区海岸 1-16-1 ニューピア竹芝サウスタワービル 10F
電話 03 (5402) 8200
大阪営業所／〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原 3-5-36 新大阪トラストタワー 10F
電話 06 (6350) 6868
名古屋営業所／〒451-6038 愛知県名古屋市中区牛島町 6-1 名古屋ルーセントタワー 38F
電話 052 (569) 6300

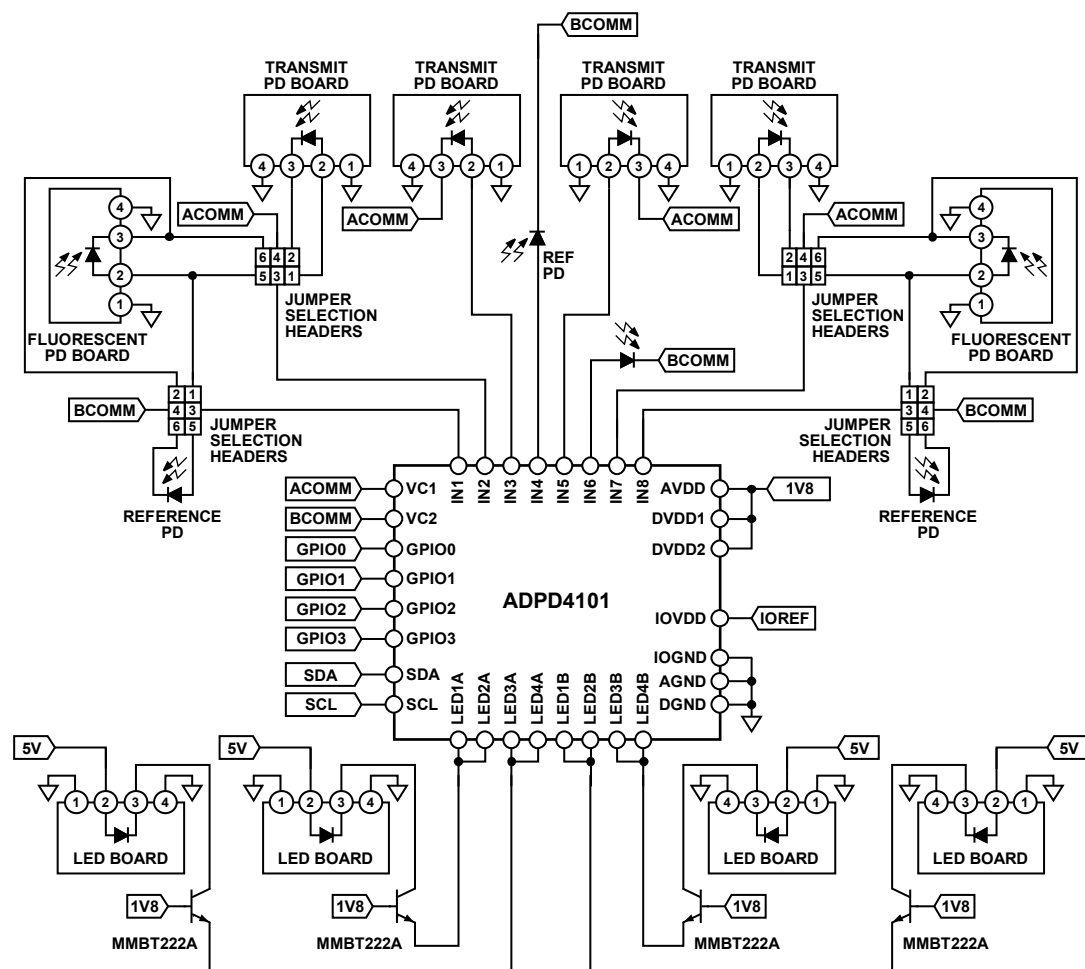


図 1. 光学式液体測定プラットフォームの簡略化した回路図

回路の説明

光学測定の基本と理論

光学を基本とする測定を行うには、光による現象をデジタル化して表示や更なる処理を行うために電気信号に変換できる、様々な光学素子、電子素子、光電子素子が必要です。図 2 に示すように、光学測定システムは、通常、固定波長または波長調整可能な単色光源、サンプル配置の決定手段（キュベットやフロー・スルー・セルなど）、1 個または複数のフォトディテクタなどで構成されます。ドリフトを補正するために入射光強度のサンプリング手段が含まれる場合もあります。また、周辺光による干渉はビームを変調、すなわちチョッピングし、これと同期して検出器出力を復調することで除去できます。

半導体光源および検出器の進歩により、小型低消費電力の光学測定システムが可能となりましたが、LED を駆動し、フォトダイオード電流を増幅してデジタル化し、意味のある測定結果を計算するには、精度の高い回路が必要です。

ADPD4101 マルチモード・センサー・フロント・エンド

この CN-0503 の中核をなすのは、高集積マルチモード・センサー・フロント・エンドである ADPD4101 です。ADPD4101 は、必須となる LED 駆動回路とフォトダイオード・シグナル・コンディショニング回路をすべて内蔵しています。このデバイスは、最大 8 個の LED を励起し、戻り信号を最大 8 つの別々の電流入力で測定します。タイムスロットが 12 個あるため、サンプリング周期ごとに最大 12 の測定ができます。制御回路には柔軟な LED 信号制御と同期検出機能があり、一定な周辺光や変調された周辺光（太陽光、LED、蛍光、その他の光源など）による干渉を除去できます。内部でのデジタル・フィルタ処理により、他のノイズ源だけでなく光害（不要光による悪影響）によるノイズも更に除去できます。

合計 400mA の LED 駆動能力、100dB のダイナミック・レンジ、8 個の入出力を備えた ADPD4101 は、フォトメトリック液体分析アプリケーションを含む高性能の実験室用計測器やハンドヘルド計測器に最適なソリューションです。

サンプリング・レートと LED 駆動電流は微調整可能であり、消費電力と S/N 比（SNR）とのバランスを図ることができます。毎秒 25 サンプリング時の消費電力は、LED 駆動と ADPD4101 の消費電力を合計して 30 μ W で、持ち運び可能な計測器や、バッテリー駆動型のモノのインターネット（IoT）向けセンシング・ノードでの使用に最適です。

周辺光除去と SNR の最適化

ADPD4101 は、LED 電流を変調し、励起されたオン状態と暗（オフ）状態の間の差を同期測定することで、一定な周辺光（太陽光など）による悪影響を除去します。この周辺光の除去は、外部の制御ループ、DC 電流の減算、あるいはデジタル・アルゴリズムなどを必要とせず、自動的に行われます。励起パルス幅は最小 1 μ s の幅までプログラム可能で、これにより最新の半導体光源からの最大 1MHz、白熱灯からの 50Hz または 60Hz、従来型の安定器を備えた蛍光灯の影響を除去できます。パルス幅を短くすることで、最大限の周辺光除去と最小限の消費電力が可能になりますが、SNR は悪化します。

サンプリングごとのパルス数を増加すれば、SNR は改善できます。パルスを 2 倍にすると 3dB の改善が得られます。パルス数の半分について積分器のシーケンスを反転させる、デジタル積分器チョッピングを追加することも可能です。このチョッピングにより、積分器によってもたらされる低周波数の信号が除去でき、SNR が更に向上します。

ADPD4101 には、様々な条件下で SNR と周辺光除去を更に向上できるモードも複数備わっています。ADPD4101 がサポートするその他のモードについては、表 1 を参照してください。

強力な周辺光除去は、光路の不完全性を補う手段と組み合わせることで、シールドの必要性が緩和もしくは除去され、ADPD4101 を使用する際の収容器の設計が大幅に簡素化されます。

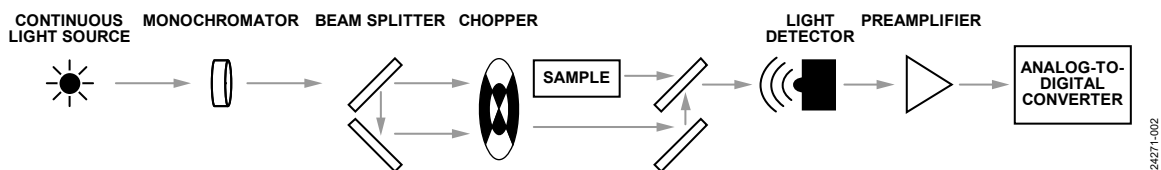


図 2. 代表的な光学測定システム

表 1. ADPD4101 の積分モード

モード	説明	目的
複数アナログ積分	サンプリング ADC の前に LEDx を複数回パルス駆動	光強度の非常に小さい応答をサンプリング
1 領域デジタル積分	暗状態のサンプルを明状態の前に取得	安定した周辺光条件下で光をサンプリング
2 領域デジタル積分	暗状態のサンプルの半数を明状態の前に取得し、残りの半数を明状態の後に取得	変動する周辺光条件下で光をサンプリング

光学測定経路の構成

CN-0503 には構成可能な光路が 4 つあります。それぞれの光路は、励起 LED、集光レンズ、ビーム・スプリッタ、リファレンス・フォトダイオード、透過光用フォトダイオードからなっています。外側の 2 つの光路には、垂直測定用フォトダイオードとフィルタ・レセプタクルがあり、蛍光測定や散乱測定が可能です。アプリケーション上必要な場合には、オプションで、狭帯域のバンドパス・フィルタと中性濃度 (ND) フィルタを各光路に追加することもできます。

ライザ・ボードは交換可能なため、光路ごとに様々な波長に設定することができます。このライザ・ボードによって、LED が集光レンズの焦点に配置されます。

集光レンズは、LED からの光を光路方向に向かう 1 本のビームに集光します。吸光度測定や蛍光発光測定など、特定波長の励起が必要な測定で広帯域 LED の使用を補助するため、バンドパス・フィルタを集光レンズの前に追加することもできます。更に、通常の LED 強度ではすぐに飽和してしまうような非常に弱い光測定が必要なアプリケーション向けに、ND フィルタを集光レンズの前に追加して LED 光を均一に減衰させることもできます。

ビーム・スプリッタは、入射ビームの一部をリファレンス・フォトダイオードに振り向けます。リファレンス・ダイオードの測定結果は入射光強度を示すもので、これを利用して、ADPD4101 の電流源の精度、LED の伝達関数、光路自体、温度ドリフトなどによる誤差を補正できます。

透過光用フォトダイオードは光路の直上に配置され、サンプルを透過した光を受けます。システムの 4 つの光路すべてが、リファレンス・フォトダイオードの測定結果と組み合わせて、吸光度と 180° 散乱について比率測定を実行できます。

外側の 2 つの光路では、光路から直角の方向に配置されたフォトダイオードが、サンプルによって放出または散乱された光を受けます。外側の各光路に使用するフォトダイオードの組み合わせは、選択ヘッドを使用して設定できます。また、狭帯域幅フィルタを垂直フォトダイオードの前に配置することで、蛍光を散乱光から更に分離することができます。

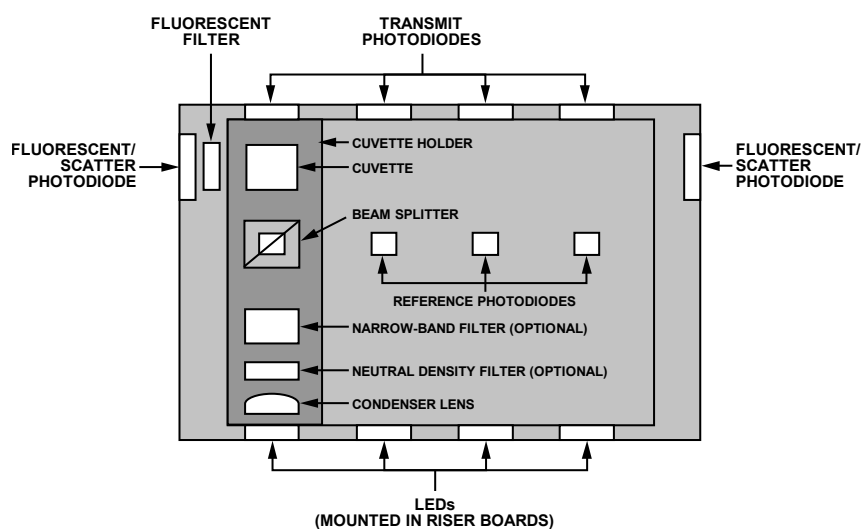


図 3. 光路の概要

24271-003

蛍光測定

蛍光発光は、特定の材料の電子が光（通常は紫外線の範囲の波長）のビームによって励起され、ほぼ同時に別の波長の光をその材料から放出させる現象です。放出される光の強度は材料の濃度によります。溶液中の材料の濃度を測定するために蛍光測定を用いた場合、吸光度測定を用いる場合よりはるかに高感度です。更に、蛍光測定は幅広い範囲の濃度にわたり直線的で

通常、蛍光測定では、測定時の入射光の影響を最小限に抑えるため、検出器を入射光に対し90°の位置に配置します。光源からのビームの歪み、外部照明、サンプルのわずかな動きなど、測定に影響する要因は複数あるため、入射光を測定するためのリファレンス検出器が使用されます。更に、蛍光検出器には単色フィルタまたはロングパス・フィルタを用いて、入射光と放光との分離を強化します。図4に、蛍光測定で使用する光路を示します。

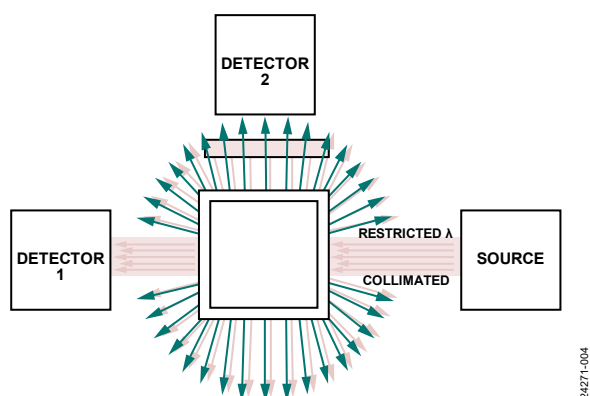


図4. 蛍光測定の光路

CN-0503 は、2つの外側光路のいずれかを使用することで蛍光測定が可能です。例えば、トニック・ウォーター中のキニーネの量を判定する場合を考えます。この場合、365nm の光で励起された場合 450nm の蛍光が発生します。365nm の LED は2つの外側光路の1つに組み込まれ、410nm のロングパス・フィルタが垂直方向のフォトダイオードの前に配置されます。蛍光（したがってキニーネの量）は、垂直方向測定と透過測定との比を取ることで求められます。

吸光度測定

比色分析は、液体溶液中の溶質による光吸収性を利用して、ランベルト・ベールの法則に基づきその濃度を決定するものです（式1）。

$$c = \left(\frac{l}{\varepsilon} \right) \log \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (1)$$

ここで、

c はモル濃度。

ε モル減衰係数。

l は光路長。

I_0 は入射光強度。

I は透過光強度。

比色分析はまた、溶質濃度が試薬の色変化で示されるような測定でも使用されます。

図5に、吸光度測定で使用する光路構成を示します。入射ビームはビーム・スプリッタに向けられ、ここでビーム強度がリファレンス・フォトダイオードによりサンプリングされ、残りの光パワーはサンプルを通過します。このリファレンス測定によって、ゲイン誤差とドリフトの大半をソフトウェアで除去できます。2つの同一の受光経路が測定ビームとリファレンス・ビームを同時にサンプリングするため、時間的に変動する周辺光の影響が除去できます。受光経路間のゲインの不一致は、受光パスを交互に切り換えその結果を平均化することで、更に軽減されます。

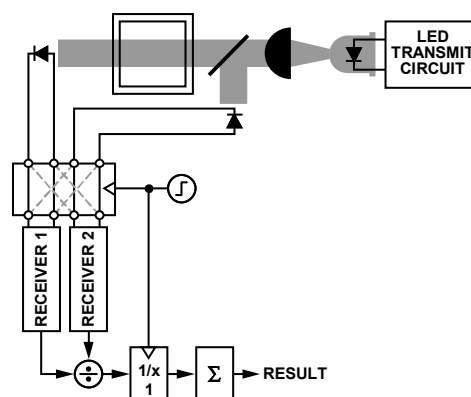


図5. 吸光度測定の光路

CN-0503 は、全光路において吸光度測定に対応します。これらの測定は、水質分析に各種アプリケーションのある比色分析で使用されます。例えば、プロモチモール・ブルーをインジケータとして使用し、溶液の pH を決定する場合を考えます。図6に、異なる pH に対応した、プロモチモール・ブルーの吸光度の波長依存性を示します。2つの異なる波長で、pH の違いに対応して吸光度の値が幅広い範囲で変化することがわかります。これを利用して、430nm と 615nm という2つの特定波長の光源を用いた吸光度測定に基づき、溶液の pH を効果的に求めることができます。

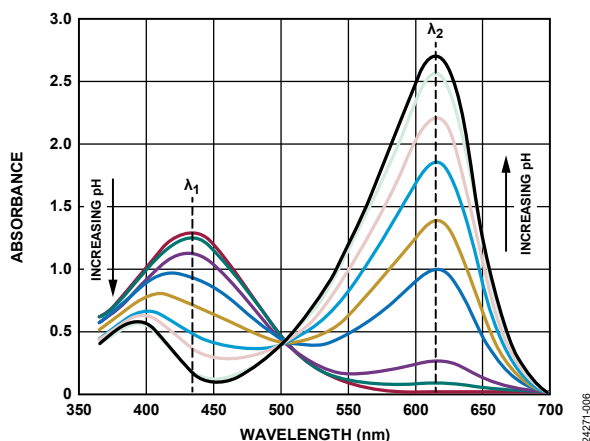


図 6. プロモチモール・ブルーの吸光度と pH の関係

キャリブレーション係数は、pH が既知の緩衝液の吸光度を測定して求めます。この値はその後未知のサンプルの pH を求めるために使用します。

濁度測定

濁度測定では、液体サンプルに懸濁された不溶性物質の光散乱性を利用します。材料によって散乱される光の量は散乱角と共に、入射光の波長と粒子サイズによって異なります。配置、検出器の数、光源の波長に応じて測定単位を設定する、濁度の濁度の測定標準が開発されました。図 7 に、90° または 180° の検出器を使用した濁度測定の光路を示します。

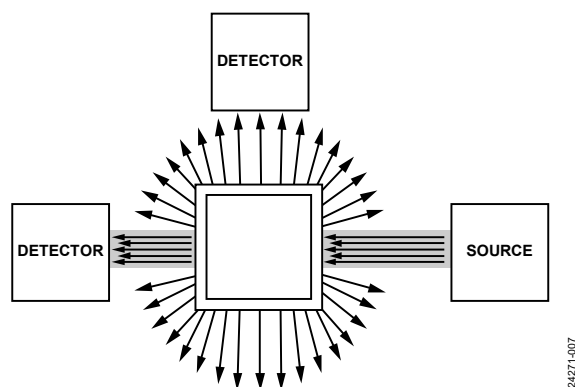


図 7. 濁度または散乱測定

プラットフォームでは、ネフェロメ濁度単位 (NTU)、ホルマジン濁度単位 (FTU)、減衰単位 (AU)、ホルマジン減衰単位 (FAU) の使用に焦点を置いています。

表 2. 検出器の位置と光源の波長に基づく濁度測定単位

Detector Position	Light Source	
	Broadband (400 nm to 680 nm)	Infrared (780 nm to 900 nm)
Single 90°	NTU	FTU
Single 180°	AU	FAU

- NTU は、入射ビームに対し 90° の位置に配置された単一の検出器を使用して測定されます。400nm~680nm にピーク・スペクトル出力を持つ広帯域光源を使用します。
- FTU は NTU と同様ですが、780nm~900nm にピーク・スペクトル出力を持つ単色赤外光源を使用して、飲料水の水质規格である ISO7027 に適合しています。
- AU は NTU と同様ですが、検出器は入射ビームに対し 180° の位置になっています。
- FAU は AU と等価ですが、ISO7027 に適合しています。

2 つの外側光路は、透過光用フォトダイオードとリファレンス・フォトダイオードの組み合わせ、または垂直測定用フォトダイオードとリファレンス・フォトダイオードの組み合わせを使用することで、濁度測定用に構成できます。ISO7027 に準拠するためには赤外線波長 LED を使用しますが、ISO7027 に準拠する必要のない大半の測定では、530nm の LED が適しています。

ソフトウェア操作

ADPD4101 は、同期検出や平均処理といった必要な再処理の多くを、ユーザに意識させることなく実行するため、アプリケーション・ソフトウェアのオーバーヘッドは著しく軽減されます。CN-0503 のサンプル・ファームウェアは、ADPD4101 のパラメータの設定と読出しを行う機能一式と、読出し値の組み合わせに対する算術演算機能（比、オフセット、多項式）を、すべて簡素なシリアル・テキスト・プロトコルで提供します。更に、各種設定は CN-0503 のオンボード EEPROM に保存することができ、アプリケーション・ソフトウェアは、電源投入時の既知の状態に容易に戻すことができます。

結果

図 8 に代表的な蛍光測定を示します。365nm の LED が光路 1 に配置され、450nm のフィルタが垂直検出光路に置かれています。最初にシステムを蒸留水で補正してから、0.04ppm のキニーネを含むサンプルをキュベット・ホルダーに挿入しています。

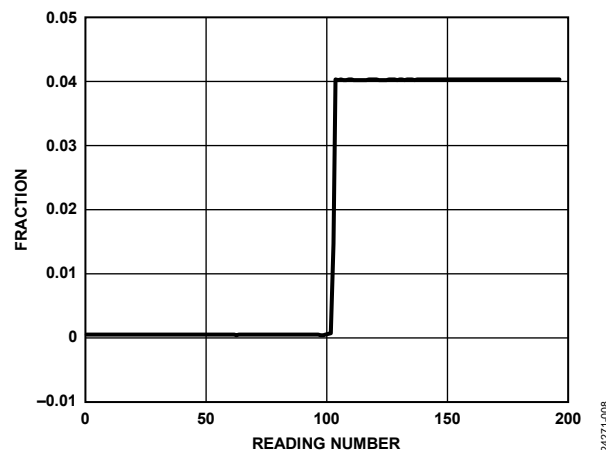


図 8. キニーネ・ステップ・テスト

バリエーション回路

ADPD4100 は、ADPD4101 のシリアル・ペリフェラル・インターフェース (SPI) 対応版で、最大 24MHz のシリアル・クロック周波数で動作し、広い帯域幅や確定的なタイミングを必要とするアプリケーションに適しています。CN-0409 は、本質的に CN-0503 のサブセットである濁度測定システムです。また、CN-0363 は、ディスプレイの A/D コンバータおよび励起回路に基づく色度計アプリケーションで、FPGA (フィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ) によって制御され ADPD4101 がカバーする範囲外でのタイミングとシグナル・コンディショニングを必要とするアプリケーションに適しています。

回路の評価とテスト

CN-0503 には Arduino シールド・インターフェースがあるため、互換性のあるその他の開発ボードを使用して評価とプロトタイプ化を行うことができます。ファームウェアとデモ・ソフトウェアは EVAL-ADICUP3029 コントローラ・ボードを使用しており、このシステムを使用して実行可能な様々な測定を例示できます。

必要な装置

- USB ポートを備えた PC、Mac、または Linux ホスト
- シリアル端末プログラム (PuTTY、TeraTerm など)
- EVAL-CN0503-ARDZ 回路評価用ボード・キット 1 台
- EVAL-ADICUP3029 開発ボード 1 台
- CN-0503 16 進ソフトウェア・ファイル

開始にあたって

このセクションでは、上記 3 種類の測定例を実行できる、CN-0503 の 4 つの光路を設定するための一般的な手順を説明します。機構部品を組み込みボードをセットアップするための詳細な説明については、EVAL-CN0503-ARDZ ハードウェア・ユーザ・ガイドを参照してください。

ファームウェアとソフトウェアのフロー、関数、Python の例の詳細は、EVAL-CN0503 ソフトウェア・ユーザ・ガイドを参照してください。

1. 垂直光用フォトダイオードとリファレンス・フォトダイオードを使用するため、ジャンパ選択ヘッダを光路 1 と光路 4 のフォトダイオード用に設定します。
2. Arduino コントローラから電力および入出力 (I/O) 電圧を使用するよう、すべての LED と I/O リファレンスを設定します。
3. 1.8V 低ドロップアウト・レギュレータ (LDO) への接続をイネーブルします。
4. EVAL-CN0503-ARDZ ハードウェア・ユーザ・ガイドに示す手順に従い、EVAL-CN0503-ARDZ システムを組み上げます。
5. 図 9 に、キューベット・ホルダーを光路 4 に配置した EVAL-CN0503-ARDZ のセットアップの完成像を示します。



図 9. 組み込みを完了した EVAL-CN0503-ARDZ セットアップ

6. Arduino コネクタを介して、EVAL-ADICUP3029 を EVAL-CN0503-ARDZ の底面に接続します。
7. micro USB ケーブルを介して EVAL-ADICUP3029 をホスト PC に接続します。
 - a. 構築済みの 16 進ファイルを DAPLINK ドライブに直接コピーして、CN-0503 デモ・ファームウェアを EVAL-ADICUP3029 にダウンロードします (ADICUP3029 ユーザ・ガイドを参照)。
8. シリアル端末を開き、ADICUP3029 COM ポートに接続します。デフォルト設定プロファイルが自動で読み込まれます。
9. コマンド「MODE CODE」を入力し、更に、「STREAM 5」を入力して、透過用とリファレンス用の各光路からの 5 つの読み取り値を取得し、ADC カウントの結果をレポートします。代表的な応答を図 10 に示します。

```
>mode CODE

RESP: MODE CODE

>STREAM 5

STREAM: A1 A2 B1 B2 C1 C2 D1 D2
>DATI: 78F1 6C47 9048 878 B62B 888 13F8E 853
DATI: 7829 6BAB 905A 878 B63C 88D 13F69 855
DATI: 7871 6BD1 9078 862 B638 873 13F43 86F
DATI: 7846 6BD6 907E 887 B628 874 13F2D 858
DATI: 786B 6BE1 9088 886 B627 87D 13F1B 86A
```

図 10. 中性サンプルの読み取り値、CODE モード

10. コマンド「**MODE ARAT**」を入力し、更に、「**STREAM 5**」を入力して、絶対比モード（透過光読み取り値のリファレンス光読み取り値に対する比）の5つの読み取り値を取得します。図 11 に、中性サンプルを光路 1 に挿入し、その他の光路には何も置かない場合の代表的な出力を示します。
11. 基本動作が確立したら、このプラットフォームは EVAL-CN0503-ARDZ ハードウェア・ユーザ・ガイドに記載されているその他の測定を実行するよう構成できます。

```
RESP: MODE ARAT
>STREAM 5

STREAM: RAT0 RAT1 RAT2 RAT3
>DATE: 9.3809E-01 2.6234E+02 2.9635E+02 1.0641E-03
DATE: 1.1259E+00 3.1535E+02 3.5999E+02 1.2732E-03
DATE: 1.1259E+00 3.1958E+02 3.5112E+02 1.2855E-03
DATE: 1.1258E+00 3.1260E+02 3.5570E+02 1.2131E-03
DATE: 1.1258E+00 3.2108E+02 3.5478E+02 1.1530E-03
```

24271-011

図 11. 中性サンプルの読み取り値、ARAT モード

更に詳しい資料

CN0503 設計サポート・パッケージ:

<https://www.analog.com/jp/CN0503-DesignSupport>

ADICUP3029 ユーザ・ガイド

データシートと評価用ボード

CN-0503 回路評価用ボード (EVAL-CN0503-ARDZ)

ADICUP3029 開発ボード (EVAL-ADICUP3029)

ADPD4101 データシート

改訂履歴

8/2020—Revision 0: 初版

「Circuits from the Lab／実用回路集」はアナログ・デバイセズ社製品専用で作られており、アナログ・デバイセズ社またはそのライセンスの供与者の知的所有物です。お客さまは製品設計で「Circuits from the Lab／実用回路集」を使用することはできますが、その回路例を利用もしくは適用したことにより、特許権またはその他の知的所有権のもとでの暗示的許可、またはその他の方法でのライセンスを許諾するものではありません。アナログ・デバイセズ社の提供する情報は正確でかつ信頼できるものであることを期しています。しかし、「Circuits from the Lab／実用回路集」は現状のまま、かつ商品性、非侵害性、特定目的との適合性の暗示的保証を含むがこれに限定されないいかなる種類の明示的、暗示的、法的な保証なしで供給されるものであり、アナログ・デバイセズ社はその利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許権もしくはその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。アナログ・デバイセズ社はいつでも予告なく「Circuits from the Lab／実用回路集」を変更する権利を留保しますが、それを行う義務はありません。商標および登録商標は各社の所有に属します。

©2020 Analog Devices, Inc. All rights reserved. 商標および登録商標は各社の所有に属します。