

超高真空・低温近接場顕微分光システム用測定・制御機器の開発 —トラブルと対策にみるアナログ回路開発ノウハウ—

○豊田朋範^{#A)}、熊谷崇^{B)}、阿部真之^{C)}

^{A)}分子科学研究所 技術推進部

^{B)}分子科学研究所 メゾスコピック計測研究センター

^{C)}大阪大学大学院 基礎工学研究科 附属極限科学センター

概要

分子科学研究所の熊谷崇准教授の研究グループは、近接場光と AFM(原子間力顕微鏡)を融合したナノ顕微分光システムの開発を進めている。2023 年からは超高真空と低音環境も融合した近接場顕微分光システムの開発が始まり、我々はこのシステムで用いる測定器・制御機器の開発を行なった。すべてアナログ回路のみで構成するこれらの機器開発に際して遭遇したトラブルと対策の事例を報告し、アナログ回路開発のノウハウの共有並びに議論の提起を行なう。

1. 近接場と顕微分光システム

1.1 近接場光[1][2][3]

電磁波の一種である光は、波の性質を持つため、波長を有する。物質に可視光とその近傍の波長の赤外光や紫外光を照射し、物質を透過した光をレンズで集光・拡大することで物質を直接観察するのが、光学顕微鏡である。一方、光の波長より小さい物質に光を照射すると、物質の周囲に光が回り込む回折現象が生じる。このため、光の波長より小さい物質(たとえばウイルス)は光学顕微鏡では観察できない。

光の波長よりさらに小さい物質、たとえば金属のナノ構造体に光を照射すると、光が透過できなくなる代わりに周辺に光が染み出すような現象が生じる。これが近接場光である。

近接場光は一般的な光と異なり、遠方に伝搬せずにその場に留まる。そのため、近接場光は遠方からは観察できないが、回折現象が生じないため、光の波長より小さい範囲に光を照射できる。この近接場光の特徴を利用した顕微鏡が、近接場光学顕微鏡である。また、光記録媒体に応用することで、より高密度の記録が可能になる、半導体製造技術に応用することで、微小な高性能デバイスを製造できると考えられるなど、ナノフォトニクス技術と呼ばれる新しい技術の萌芽がある。

1.2 近接場光と AFM を用いた顕微分光システム

分子科学研究所メゾスコピック計測研究センターの熊谷崇准教授の研究グループは、近接場光学顕微鏡として AFM(原子間力顕微鏡)を、近接場光の光源として、超高速・超広帯域の LD 直接励起方式 Yb フェムト秒レーザー(100 fs、1030 nm)を使用することで、中赤外・近赤外~可視光の幅広い波長域で作り出した近接場光を、10-15 sec という時間領域に閉じ込めて電子や原子の運動を直接観測する、時間分解ナノ顕微分光の開発を進めている。

2023 年末に稼働開始した超高速・超広帯域近接場光顕微分光は、単一のタンパク質の観察に成功した[4]。研究グループはこれに続き、超高真空と低温環

境をも融合した近接場光顕微分光システムである、超高真空・低温光学走査プローブ顕微鏡の開発に着手した。このシステムは、原子スケールにまで閉じ込められた近接場光を操り、極限的な空間と時間における極微分光を可能とする。

2. 超高真空・低温近接場顕微分光システムの構築における課題

我々が開発した超高真空・低温近接場顕微分光システムのブロック図を図 1 に示す。

AFM のカンチレバー近傍に超短パルスレーザーを照射して生じる近接場光は、約 200 kHz の周波数を持つ光として検出できる。この光信号を光ファイバーで搬送し、フォトダイオードを伴う光信号検出・増幅器(図 1 における「Optical signal detector + Amplifier」)で電流/電圧変換と増幅を行なう。

この光信号は別途 A/D 変換して解析するが、時間経過に伴い、数 Hz 程度の非常に緩やかな周期でオフセットが増減する。このため、図 1 における「Optical signal feedback instrument」で一定時間ごとに平滑化し、図 1 における「Piezo stage driving instruments」で分光システムが乗るピエゾステージの Z 軸の正負方向を微調整する必要がある。

Optical signal detector + Amplifier は既存の自作品が存在するが、本システムで使用するためには増幅度が不十分で、2 倍以上の増幅度向上が必要とされた。また、Optical signal feedback instrument ならびに Piezo stage driving instruments は、本システムに適用できる市販品が存在しない。微小な光信号を精密に検出・増幅するには、低ノイズのアナログ回路が必須であり、しばしばノイズ源となるマイコンや FPGA(Field Programmable Gate Array)、スイッチング電源は使用を避けるのが賢明である。よって、3 種類の機器はすべてアナログ回路で構成することにした。

3. 開発した機器

開発した機器のフロントパネルを図 2~4 に示す。

図 2 の Optical signal detector + Amplifier は、光ファ

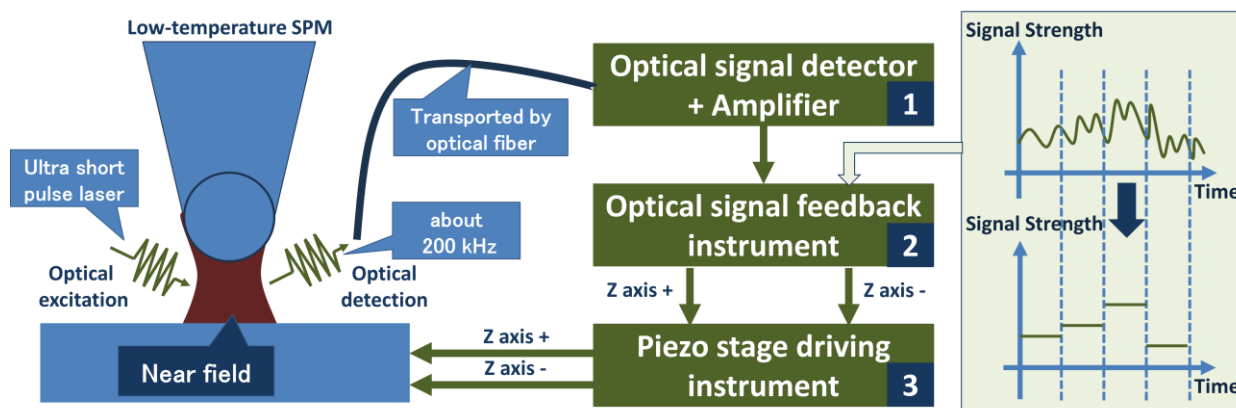


図1. 超高真空・低温近接場顕微分光システムのブロック図

イパーホルダーを介して、フォトダイオードに搬送してきた光信号を照射し、電流/電圧変換と増幅を行なう。電圧として増幅した信号に外部/内部からオフセット電圧を加えたものを AFM 計測・解析用の計測システムに入力するとともに、次段の Optical signal feedback instrument に入力する。

図3の Optical signal feedback instrument は、ロータリースイッチで平滑化する周波数を 0.1 Hz、1 Hz、10 Hz、平滑化なしの4種類から選択し、平滑化並びに内部で生成したオフセット電圧を加え、分岐して反転したものを合わせて正負2系統とした上で、次段の Piezo stage driving instruments に入力する。

図4の Piezo stage driving instruments は、入力電圧を10倍に増幅し、最大±150 Vをピエゾステージに印加して駆動する。



図2. 開発した Optical signal detector + Amplifier のフロントパネル



図3. 開発した Optical signal feedback instrument のフロントパネル



図4. 開発した Piezo stage driving instruments のフロントパネル

3. 開発におけるトラブル、原因、対策

3.1 フォトダイオードを用いた光検出回路

Optical signal detector + Amplifier の要は、フォトダイオードで受光した光信号を電流/電圧変換する光検出回路である(図5)。フォトダイオードの接合容量を低減して高速動作を促すために逆バイアス電圧を印加することがある。本装置でも、別回路で生成した -10V を印加する。

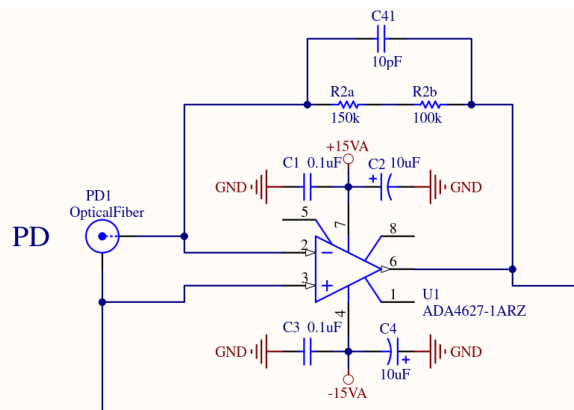


図5. フォトダイオードを用いた光検出回路(抜粋)

オペアンプの入力バイアス電流が出力誤差になるため、光検出回路では JFET タイプのように、入力バイアス電流が低いものを使用する。また、オフセット電圧がフォトダイオードに加わると暗電流が増加して出力誤差が大きくなるため、オフセット電圧が低いオペアンプが望ましい。一般に、入力バイアス電流とオフセット電圧はトレードオフの傾向があり、フォトダイオードを用いた光検出回路では入力バイアス電流が小さいことを重視することが多い。

本装置では、当初 AD797ANZ(Analog Devices 社)を使用していたが、高価であること、オフセット電圧は $25 \mu\text{V}(\text{typ.})@\text{A}$ タイプと小さいが入力バイアス電流は $0.25 \mu\text{A}(\text{typ.})@\text{A}$ タイプと比較的大きいことから、オフセット電圧 $\pm 2 \text{mV}(\text{typ.})$ 、入力バイアス電流 $3 \text{pA}(\text{typ.})$ の OPA356AID(Texas Instruments 社)を選定した。

しかしながら、OPA356AIDを実装したプリント基板は、±15V電源を投入した瞬間に+15Vと-15Vが短絡して破損するトラブルに見舞われた。プリント基板に不具合はなく、+15Vと-15Vが短絡するトラブルは初めてであり、検討に時間を要した。

結局、このトラブルの原因は、回路の電源電圧が±15Vであるのに対し、OPA356AIDの電源電圧は±2.75V(max)と、絶対最大定格を大きく超えることであった。入力バイアス電流とオフセット電圧に気を取られ、電源電圧の仕様を見落とすという初歩的なミスである。

再度AD797ANZを採用したが、システムに接続して試験した結果、約5MHz、約2Vp-pの発振と見られる不要な成分が発生した。検討の結果、出力に接続するBNCケーブル長が約5mと長いことが大きな要因と考えられたが、システムの配置の都合上BNCケーブルを短くすることは困難であり、別の対策を検討することにした。

本装置では光信号の周波数が約200kHzであるのに対し、AD797ANZはゲイン帯域幅積が110MHz@G=1000と大きく、かえって高周波ノイズまで増幅してしまうのではないかと推察した。そこで、JFETタイプ、ゲイン帯域幅積19MHz、入力バイアス電流5pA(max)、オフセット電圧200μV(max)のADA4627-1ARZ(Analog Devices社)を選定した。また、後段のバッファ回路などで使用するオペアンプに、ADA4084-1ARZ(Analog Devices社)を選定した。更に、出力にカットオフ周波数300kHzのアクティブフィルタを設けた(図6)。これにより、システムのBNCケーブル長を変更することなく、出力の発振を約2mVp-pに低減でき、実験に使用することが可能になった。

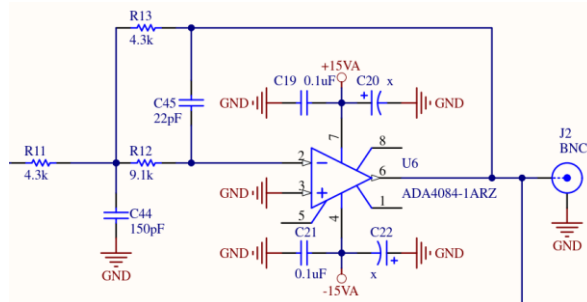


図6. 出力に設けたカットオフ周波数300kHzのアクティブフィルタ回路(抜粋)

3.2 定数切り替え可能な積分回路

Optical signal feedback instrumentでは、入力された光信号を一定時間単位で平滑化するため、定数の切り替えが可能な積分回路を設計した(図7)。切り替えは4回路アナログスイッチADG5234BRMZ(Analog Devices社)を使用する。ロータリースイッチで選択した定数に接続するADG5234BRUZのINが”L”レベルになると、SxB-Dx(xは1~4)間が導通し、定数であるコンデンサに充電され、積分が機能する。

当初、図8のように定数とADG5234BRUZの位置関係が逆であったが、時間経過に伴って出力電圧が

徐々に増加するトラブルに見舞われた。

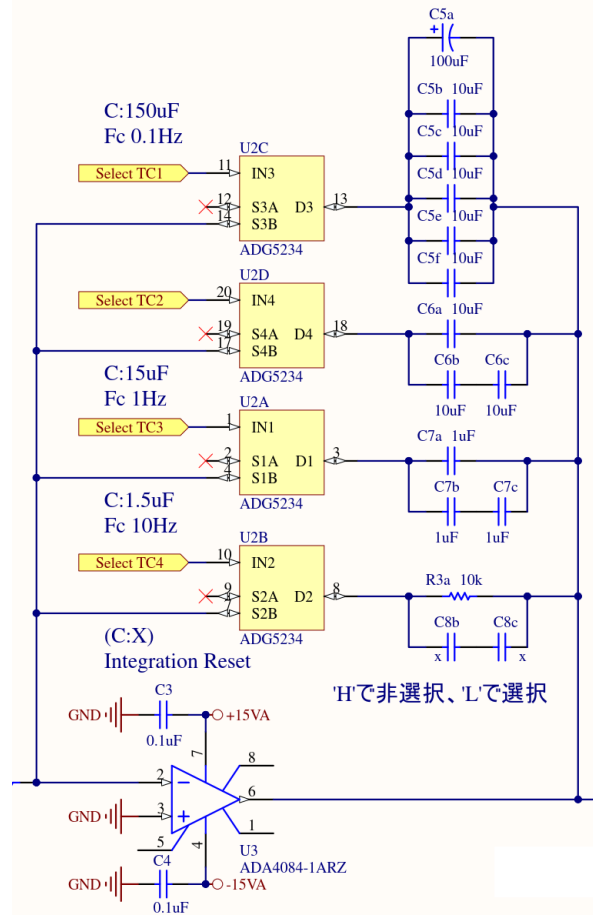


図7. 定数切り替え可能な積分回路(抜粋)

これは、ADG5234BRUZの漏れ電流(±0.02nA(typ.))と大きな定数=コンデンサが原因である。今回は最大150μFと大きい定数を使用した。図8の接続ではオペアンプの反転入力に向かう電流の一部が、未選択のコンデンサに常時流れ込み、電荷が蓄積される。アナログスイッチは一定の漏れ電流があるため、時間経過で電荷が蓄積するほどADG5234BRUZからの漏れ電流が増加し、出力のDC変動が大きくなったというものである。

3.3 サンプル&ホールド回路

Optical signal feedback instrumentでは、平滑化した信号を一定時間保持するため、積分回路の後段にサンプル&ホールド回路を配置する必要があった。しかしながら、サンプル&ホールド回路の実績や情報が乏しく、設計に難航した。調査の結果、Webに掲載されていたある回路を採用したが、まったく機能しなかった。

改めて調査した結果、サンプル&ホールド回路で定番ICの1つとされるLF298MX/NOPB(Texas Instruments社)を中心とする回路を、データシートを基に設計し(図9)、本装置に組み込んで試験したところ、問題なく動作した。

アナログICは全体的に長期間製造・販売されるが、LF298MX/NOPBのように長年使用される「定番」と

称されるICが複数存在する。設計に困った場合は「定番」ICを選択し、データシートを基に設計するという、アナログ回路設計の原点に立ち返る必要性は未だ健在である。

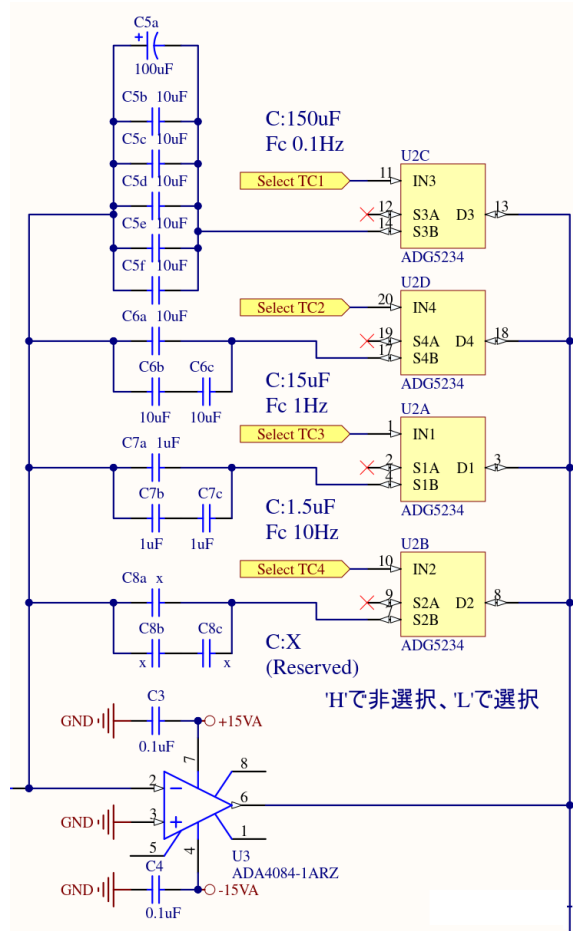


図8. 当初の積分回路(抜粋)

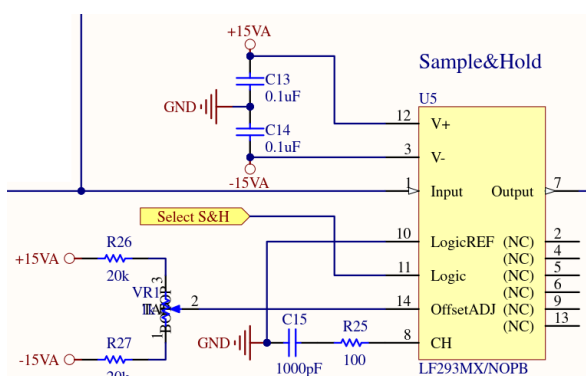


図9. 「定番」ICであるLF298MX/NOPBを使用したサンプル&ホールド回路(抜粋)

4. おわりにー古くて新しいアナログ回路設計ー

超高真空・低温近接場顕微分光システムに用いる3種類の機器開発は、システム全体が正常に稼働する

までにおよそ1年を要した。大型のプリント基板を何度も再製作した他、共同研究や試験に臨席し、結果と討論を受けて実行した回路定数調整は数十回に及ぶなど困難と苦勞の連続であったが、これまでの知識と技術を投入し、強化して本装置を開発する過程で得られた経験は、失敗や不具合を含めて非常に貴重である。

昨今の情勢は一見デジタル回路全盛に見えるが、自然界に存在する信号の検出や増幅はアナログ回路が不可欠であり、アナログ回路の必要性、重要性はむしろ高まっている。一方、アナログ回路の基本事項は、大学等の課程で使用される教科書からほとんど変化していない。古くて新しいアナログ回路設計の知識や技術、失敗や経験を継承し、発展させることは、年長者の責務であると考えます。

一連のコロナパンクを経て、ともすればオンライン万能に陥りやすい。Webの情報は玉石混交と言われるが、近年は検索エンジンのSEO(Search Engine Optimization)至上主義的な方針とアフィリエイト目的により、不要な情報や無意味な情報をテンプレートに沿って列挙したWebページが上位に表示される傾向が強まっており、オンラインのみで得る知識は実効性を伴わないものになる恐れが強い。どんな理想的な回路も、実際に測定や計測に使用できなければ無意味であり、「定番」ICや回路に立ち返る必要性は、アナログ回路ではより高まっている。

ユニークな研究・実験システムの立ち上げでは、それに最適な機器開発が必要となることが多い。時には実験現場に臨席して、研究者と膝を突き合わせて必要な機器の仕様について討論する必要性や重要性は不変である。研究・実験現場に寄り添い、共に考え歩む姿勢が、大学・研究機関の技術者には何より重要であると考えます。

5. 謝辞

Optical signal detector + Amplifierにおけるフォトダイオードの設置治具の製作は、松尾純一氏(分子研)によるものである。また、本装置のケースやパネルの設計と加工は、木村和典氏(分子研)によるものである。松尾氏と木村氏に深い感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 熊谷崇、西田純、“超高速・超広帯域近接場光顕微分光装置におけるパージボックスと原子間力顕微鏡用増幅回路の作成”、装置開発室 AnnualReport2022、2023年3月、P5-15.
- [2] Canon Inc.、“キヤノンサイエンスラボ 第4章 光、その未来 近接場光”、https://global.canon/ja/technology/s_lab/light/004/01.html
- [3] TDK、“テクノ雑学 第175回 小さい光の大きなパワー ～近接場光の可能性に迫る～”、<https://www.tdk.com/ja/tech-mag/knowledge/175>
- [4] Jun Nishida, Akihiro Otomo, Takanori Koitaya, Akitoshi Shiotari, Taketoshi Minato, Ryota Iino, Takashi Kumagai, “Sub-tip-radius near-field interactions in nano-FTIR vibrational spectroscopy on single proteins”, Nano Letters, 2024年1月9日掲載