

量子消去実験に向けた
単一光子検出器の性能評価と干渉計の開発

東北大学理学部 物理学科
素粒子実験(加速器)研究室
渡辺夕子

2025年5月31日

概要

本研究は、量子もつれ光子を用いた干渉実験、特に「量子消去実験 (quantum eraser)」の実現を目指し、それに必要な単一光子検出器の改良・評価、光ファイバーによる干渉計の構築を行ったものである。量子消去とは、一度取得されたwhich-path情報 (光子がどの経路を通ったかの情報) を消去することで、再び干渉縞が現れる現象を指し、観測行為の本質を深く理解するための重要な手段である。

実験の中心となる単一光子検出器 (SPAD) については、出力信号からのノイズ除去、ブレイクダウン電圧の測定、光子対の同時計数率の測定を実施した。特に同時計数率の測定については、結晶温度の調整が光子対生成効率において重要であること、dichroic fiberの二つのfiberのsingle rate間に大きな差が存在すること、ならびに検出器系全体としての検出効率が期待される値よりも低いことが明らかとなり、改善の余地があることが示された。

さらに、干渉計の設計と構築についても詳細な検討を行った。fiberportを用いた光結合では、結合効率が10%以下にとどまる結果になった。その要因としては、MFDと入射ビームプロファイルの不一致、光がファイバーの軸に沿っていないことなどが挙げられる。これらの原因を踏まえ、結合効率を向上させるための具体的な手法についても検討を行った。

今回の実験ではfiberportのアライメント不良が干渉実験の実現に対する大きな障害となった。この問題を解決するため、今後アライメント手法を見直し、結合効率の向上を図る予定である。加えて、fiber portおよびretarderの構成に固執することなく、位相差を制御可能な他のセットアップの導入についても検討を進める。

目次

第1章 序論

1.1 研究の目的	4
-----------	---

第2章 原理

2.1 相補性	5
2.2 量子消去実験	5

第3章 干渉実験の概要

3.1 干渉実験	8
3.2 量子消去実験	9

第4章 単一光子検出器の改良と性能評価

4.1 SPAD	10
4.2 斎藤23号のノイズ除去	11
4.3 ブレイクダウン電圧の測定	13
4.4 同時計数率の測定	16

第5章 干渉計の構築

5.1 干渉計の設計	20
5.2 fiber portのアライメント	21

第6章 参考文献	26
----------	----

第一章 序論

1.1 研究の目的

量子力学は、その誕生以来、自然界の諸現象を体系的に記述し得る理論として成功を収めてきたが、依然としてその解釈については多くの議論を呼んでいる。中でも観測に関する問題は、長年にわたり重要な課題とされてきた。こうした問題に対する理解を深める手段の一つとして、量子もつれ状態を利用した干渉実験、特に量子消去実験が注目されている。量子消去とは、一度得られたwhich-path情報（経路情報）を消去することで、再び干渉縞が現れるという現象を指す。

これは、光の粒子性と波動性が相補的な関係にあることを示すものであり、特に干渉縞の有無を検出した後にwhich-path情報を消去する遅延消去実験は、観測はどの時点で成立するのか、あるいは観測という概念をどのように定義するべきかといった、観測行為の本質に関わる問いに対して重要な手がかりとなり得る実験である。

本研究では、光ファイバーを用いた干渉計を構築し、量子消去の効果がどのように現れるかを詳細に検討することを目的とする。そのための検出器の開発及び干渉計の設計を行う。

第二章 原理

2.1 相補性

相補性原理とはボーアが提唱した原理であり、大林によると、「『時空的記述』と『因果性』(その記述ということ言えば『因果的記述』ということ)との間に『相補性』という関係が生じること」とされている⁽¹⁾。光の粒子性と波動性についても相補的な関係にあることが知られており、それらは同時に観測することができない。また干渉計においては、光子がどういう経路を通ったかという情報 (which-pass情報) と干渉縞の可視性がそれぞれ粒子性と波動性に対応している。つまり光子がどの経路を通ったかを区別すると、干渉縞が破壊される。

2.2 量子消去 (quantum eraser)

量子消去の有名な実験に次のような実験がある。まず図1のようなセットアップを用意する。BBOからもつれ光子が二方向に出ており、二つの検出器Dp, Dsで同時計測されている。片方の経路にはダブルスリットがあり干渉が起こっている。この時2粒子状態は以下のように表される。

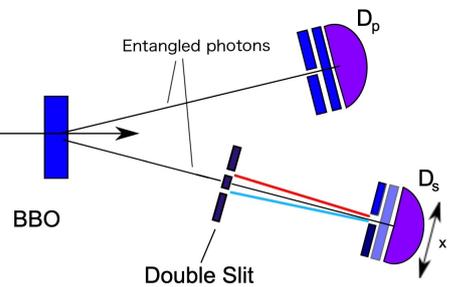


図1

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle)$$

$$|\psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle_{s1}|y\rangle_p + |y\rangle_{s1}|x\rangle_p), \quad |\psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle_{s2}|y\rangle_p + |y\rangle_{s2}|x\rangle_p)$$

ここでpは検出器Dpに入ることを表しており、s1は一方のスリット (スリット1とする) を通ってDsに入った場合、s2はもう片方のスリット (スリット2とする) を通ってDsに入ることを表している。

しかし図2のようにダブルスリットの前にλ/4板を置くと、光子がどちらのスリットを通ったかがわかり、干渉縞が消える。具体的にはスリット1前にx方向に対して遅軸が45°の角度をなすようにλ/4板をおき、スリット2の前には45°をなすようおくと、以下のようにφ1,2の状態が変化する。

$$|\psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|L\rangle_{s1}|y\rangle_p + i|R\rangle_{s1}|x\rangle_p) \quad |\psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|R\rangle_{s2}|y\rangle_p - i|L\rangle_{s2}|x\rangle_p)$$

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[(|L\rangle_{s1} + |R\rangle_{s2})|y\rangle_p + i(|R\rangle_{s1} - |L\rangle_{s2})|x\rangle_p] \quad (\text{式1})$$

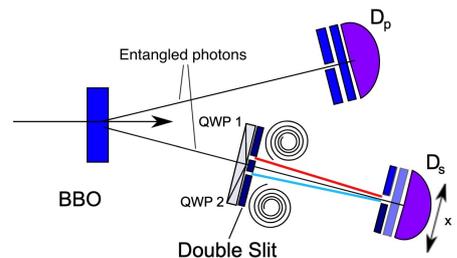


図2

よってDpでの偏光方向とDsでの偏光方向の組み合わせによってスリット1を通ったか、2を通ったかわかる。

これは $\lambda/4$ 板が速軸、遅軸間に $\pi/2$ の位相差をつける素子であり、次のように作用するからである。

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle + |y\rangle), |-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle - |y\rangle) \quad \text{基底で考える。この時、}$$

$$|L\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle + i|y\rangle) = \frac{1}{2}((1+i)|+\rangle + (1-i)|-\rangle) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1+i \\ 1-i \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{i\pi/4} \\ e^{-i\pi/4} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i\pi/4} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$$

$$|R\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle - i|y\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-i\pi/4} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$$

ここで $\lambda/4$ 板が $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}$ のように作用するように置かれているとすると
(つまり, $|+\rangle$: *slow*軸 $|-\rangle$: *fast*軸)

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} |x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} = e^{i\pi/4} |R\rangle \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} |y\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} = e^{-i\pi/4} |L\rangle$$

これは $\psi 2$ の場合であり、

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle_{s2}|y\rangle_p + |y\rangle_{s2}|x\rangle_p) = \frac{1}{\sqrt{2}}(e^{i\pi/4}|R\rangle_{s2}|y\rangle_p + e^{-i\pi/4}|L\rangle_{s2}|x\rangle_p) \propto |R\rangle_{s2}|y\rangle_p - i|L\rangle_{s2}|x\rangle_p$$

$\psi 1$ についても同様に示せる。

さらに図2の状態から上の検出器の前にポライザーをおくと、 $\lambda/4$ 板で記録した経路情報を消すような役割をして、干渉縞が復活する。ポライザーを置くことはx,y基底から+,-基底に見方を変えることに対応する。(図3)この時、先ほどの ψ_1, ψ_2 は以下のよう表すことができる。

$$|\psi_1\rangle = \frac{1+i}{2}(|+\rangle_{s1}|+\rangle_p + i|-\rangle_{s1}|-\rangle_p)$$

$$|\psi_2\rangle = \frac{1-i}{2}(|+\rangle_{s2}|+\rangle_p - i|-\rangle_{s2}|-\rangle_p)$$

$$\text{すなわち } |\Psi\rangle = \frac{1}{2}[(|+\rangle_{s1} - i|+\rangle_{s2})|+\rangle_p + i(|-\rangle_{s1} + i|-\rangle_{s2})|-\rangle_p]$$

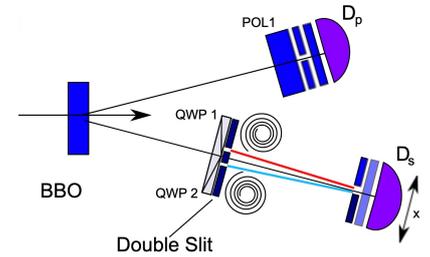


図3

なお以下を式1に代入した。

$$|x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle + |-\rangle) \quad |R\rangle = \frac{1-i}{2}(|+\rangle + i|-\rangle)$$

$$|y\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle - |-\rangle) \quad |L\rangle = \frac{1-i}{2}(i|+\rangle + |-\rangle)$$

Ψ を見ると、DpとDsでの偏光方向の組の情報を取得してもどちらのスリットを通ったかはわからない。よって干渉縞が現れる。このように一度記録した経路情報を消して干渉縞を復活させることをquantum eraserと呼ぶ。

さらに図4のようにDpをDsよりも遠い場所に配置することも可能である。この場合の状態ベクトル ψ は図3のものと全く同じになり、干渉縞が見られることが実験により確認されている。しかし直感的に考えると、 $\lambda/4$ 板で経路情報を取得してから、Dsで干渉縞の有無を観測し、その後ポライザーで経路情報を消しているため、干渉縞は見られないように思える。この矛盾は観測がどの時点で成立するのか正確に定義できていないことに起因している。このようなセットアップは”delayed eraser“と呼ばれており、量子力学における観測問題を検討する上で、極めて示唆に富む重要な例となっている。

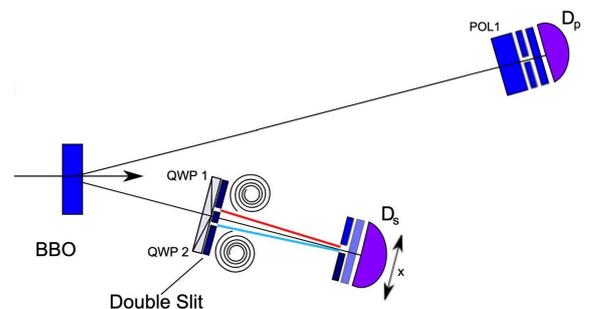
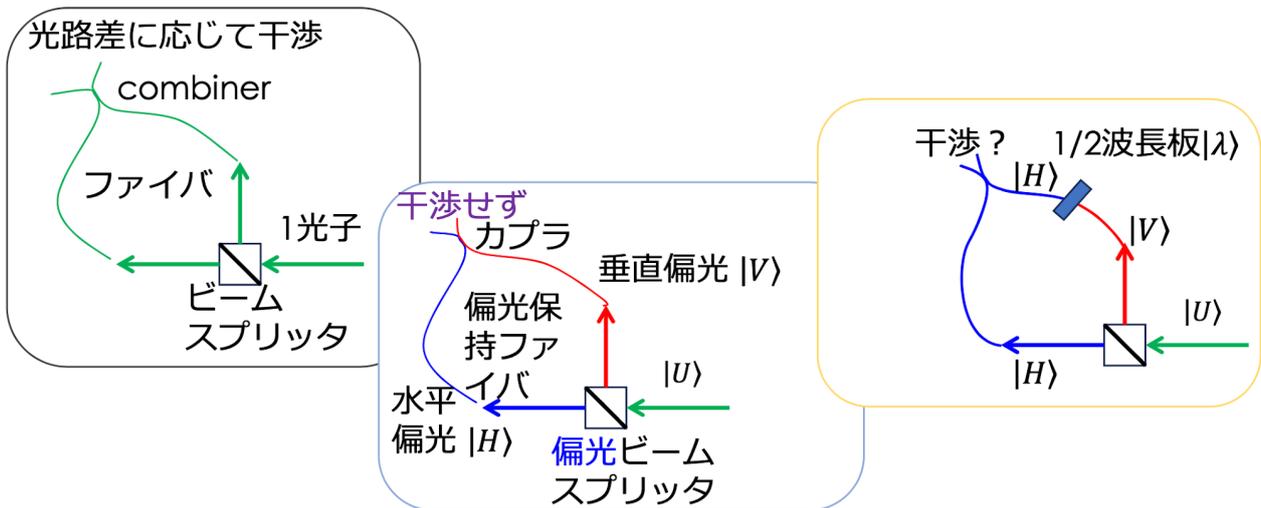


図4

第3章 干渉実験の概要

3.1 干渉実験

本実験では次に述べる三つの干渉実験を行った後に量子消去実験を行う。最初に行うのは図5左側の干渉実験である。この干渉計は、一光子をビームスプリッターに入射させ、コンビナーと呼ばれるファイバに入れて干渉させるという普通の干渉計となっている。次に行うのは、図5中央の図で表される実験である。ある偏光方向を持つ光を偏光ビームスプリッターに入射させ、ファイバーカップラで重ね合わせる。直交する偏光状態を持つ光同士は干渉しないことが知られており、実際に干渉しないことを確かめる。さらに片方の経路にλ/2板を挿入し、偏光状態を揃えると干渉するようになるのかを確かめる。(図5右側)



$$|H\rangle + |V\rangle|\lambda\rangle \rightarrow |H\rangle + e^{i\phi}|H\rangle|\lambda'\rangle$$

$$\text{検出強度 } 1 + \text{Re}(e^{i\phi}\langle\lambda'|\lambda\rangle)$$

図5

3.2 量子消去実験

図6に表されるようなセットアップで量子消去実験を行う。量子もつれ光子対としては、

$$|U\rangle = |HH\rangle + |VV\rangle$$

で表されるものを使用する。

右側で光子の偏光方向がわかるような測定が行うと、左側の光子の偏光状態が確定し、光子が通ってきた経路がわかるので干渉は起きないはずである。また右側で測定した経路情報を消すような操作を行うと干渉が復活するはずである。

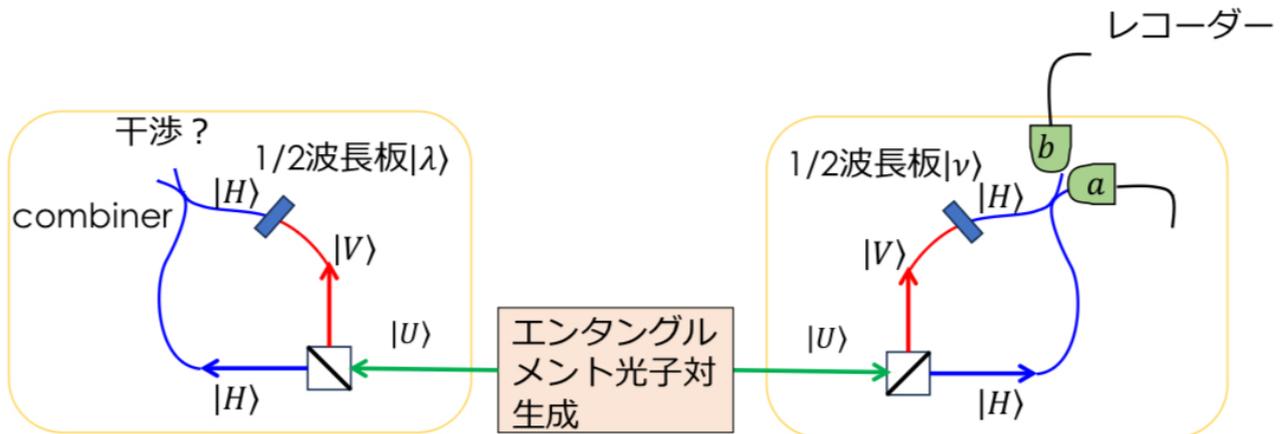


図6

第4章 単一光子検出器の改良と性能評価

4.1 SPAD

本実験では1550nmの量子もつれ光子を検出する必要があるため、SPAD (Single-Photon Avalanche Diode)と呼ばれる素子を使用した。SPADの特徴としては以下の4点が挙げられる。

- ・ InGaAs/InPという半導体を使用しており1550nmの光に感度がある。
- ・ tecと呼ばれる電流をかけると温度差をつけることができる素子が搭載されており、熱によるノイズを抑えている。
- ・ ガイガーモードにより1光子から検出することが可能である。
- ・ 静電気に非常に弱いので注意が必要。

SPADの読み出し回路は図7に示した。SPADをガイガーモードで使用するため、電源を用いてDC電圧を印加するとともに、ファンクションジェネレータを用いて1kHz,300ns,高さ5Vの矩形波の電圧を印加している。以後、前者をバイアス電圧、後者をゲートと呼ぶことにする。

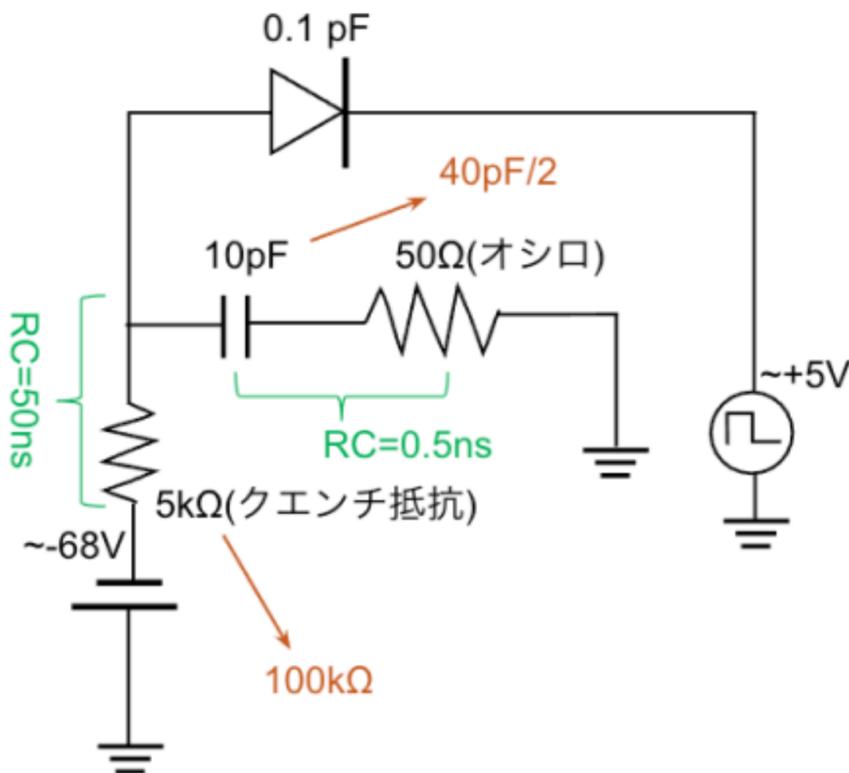


図7

4.2 斎藤23号のノイズ除去

目的

図8,9はそれぞれ石毛23号、斎藤23号にゲートだけかけた際のSPADからの信号を見たものであり、斎藤23号にゲートに伴ったノイズが見受けられる。このノイズは信号の邪魔になる可能性があるため、除去しようと試みた。

方法

二つの検出器の基板に注目したところ、石毛23号の方にはspadの信号ラインとゲートの信号ラインの間にグラウンド線があるのに対して、斎藤基板にはなかった。(図10,11)そこで該当箇所にグラウンド線を追加して、信号の変化を観察した。

結果

ノイズのpeak to peak値が16mVから4mV程度まで減少した。(図12)しかしノイズは完全には消えておらず、石毛23号にも同等の大きさのノイズがあることがわかった。

考察

グラウンド線を追加することで、ノイズのレベルが石毛23号と同等になったことから、最初に出ていたノイズはゲート信号からの双極子放射が原因であると考えられる。またグラウンド線を追加した後もゲートに伴ったノイズが残っていたのは、SPADが容量性カップリング (capacitive coupling) しているからだと考えられる。SPAD自体が原因であるため取り除くことはできない。

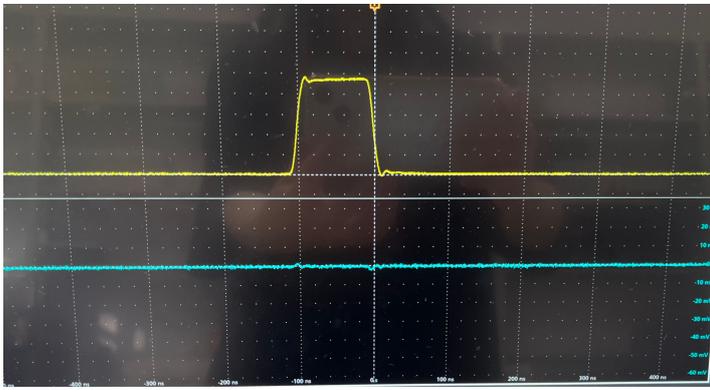


図8 (石毛23号)

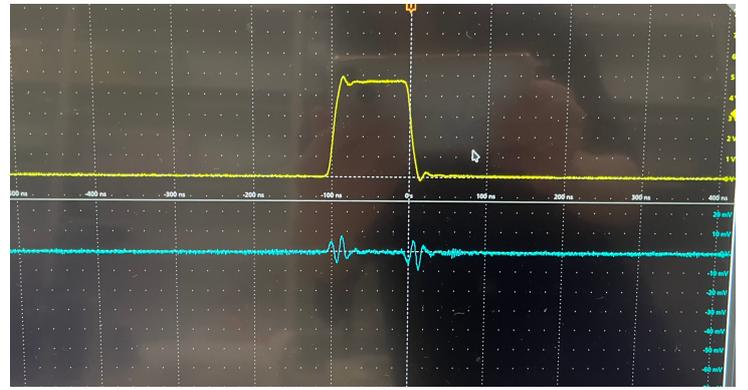


図9 (斎藤23号)

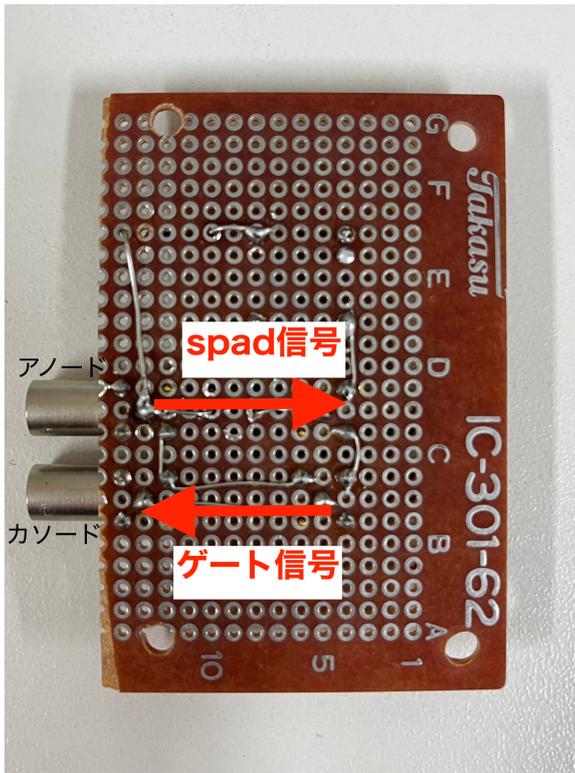


図10 (石毛23号)

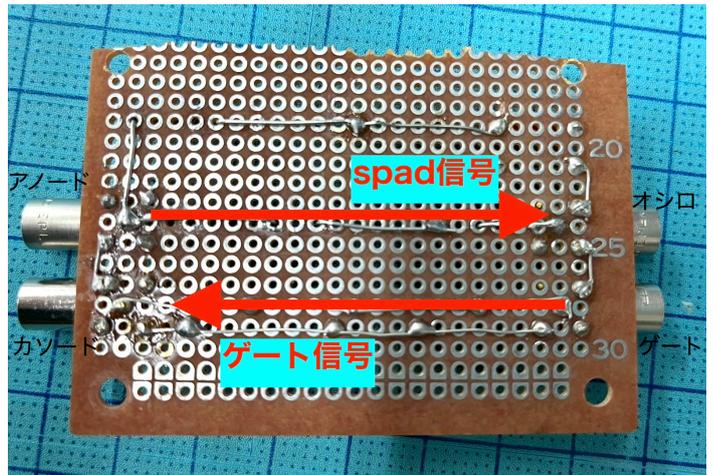


図11 (斎藤23号)

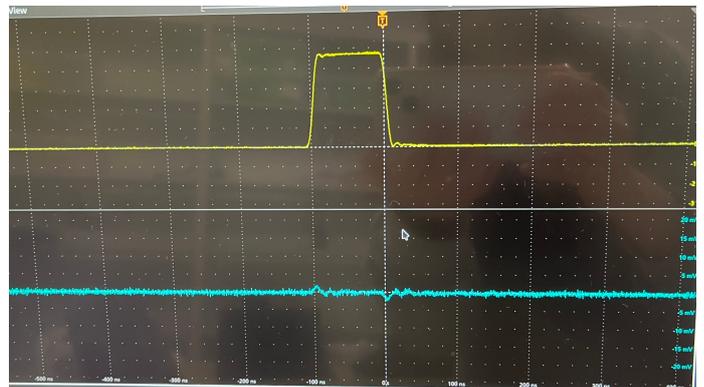


図12 グラウンド線追加後の斎藤23号

4.3 ブレイクダウン電圧の測定

目的

これまではゲートをかけた状態でバイアス電圧を徐々に上げていき、dark信号が現れ始めた電圧をブレイクダウン電圧としていた。こうして求めたブレイクダウン電圧でコインシデンスレートの測定を試みたが、最初は同期する信号が確認できなかった。しかしバイアス電圧を数百mV程度上げたところ、同期する信号が見られるようになった。このことからより高いバイアス電圧で計測を行う必要があることがわかったが、SPADに印加できる電圧には上限があり、ブレイクダウン電圧+10Vと決まっている。したがってSPADを安全に使用するためには正確なブレイクダウン電圧を知ることが不可欠である。

方法

アバランシェ増倍の増倍率はバイアス電圧に比例することが知られている。本実験では複数の異なるバイアス電圧で信号を観測し、その信号を積分した値を増倍率に比例する量として記録した。そしてデータ点を直線に近似し、増倍率が0となる電圧をブレイクダウン電圧と定義し求めることにした。

(図13)

具体的な方法としては、まず複数の電圧でオシロスコープを使って信号を平均化し、PCに取り込んで積分値を求めた。次に最小二乗法を使って直線にフィッティングしブレイクダウン電圧を計算した。

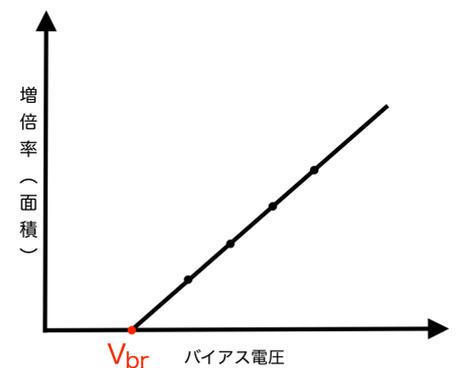


図13

結果

求めた信号の面積について表1,2に示す。これらの値からフィッティング直線を求めたところ以下のような結果となった。(有効数字は三桁とした。)なおこれらの値はgoogle スプレッドシートのLINEST関数(注1)という関数を使用している。

韓国spad

傾き： 5.78 ± 0.10 切片： -350.8 ± 6.6 ブレイクダウン電圧： 60.7 ± 1.6 V (+5V)

中国spad

傾き： 2.473 ± 0.056 切片： -166.1 ± 3.9 ブレイクダウン電圧： 67.1 ± 2.2 V (+5V)

図14,15は測定点とフィッティング関数を図示したものである。(青の点が測定点で、赤の線が最小二乗法でフィッティングした直線)

表1-1

バイアス電圧[V]	面積
62.2	8.6
62.5	11.1
63	13.8
63.5	15.8
64	19.7
64.5	22.2
65	24.9
65.5	28.3
66	30.8

韓国SPAD

表2-1

バイアス電圧[V]	面積
68	2.03
68.5	3.45
69	4.41
69.5	5.81
70	7.23
70.5	8.58
71	9.44
71.5	10.6

中国SPAD

ブレイクダウン電圧測定(韓国)

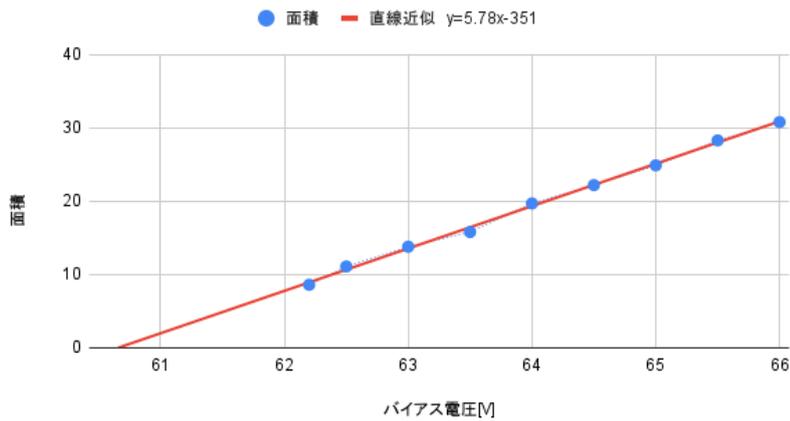


図14

ブレイクダウン電圧測定(中国)

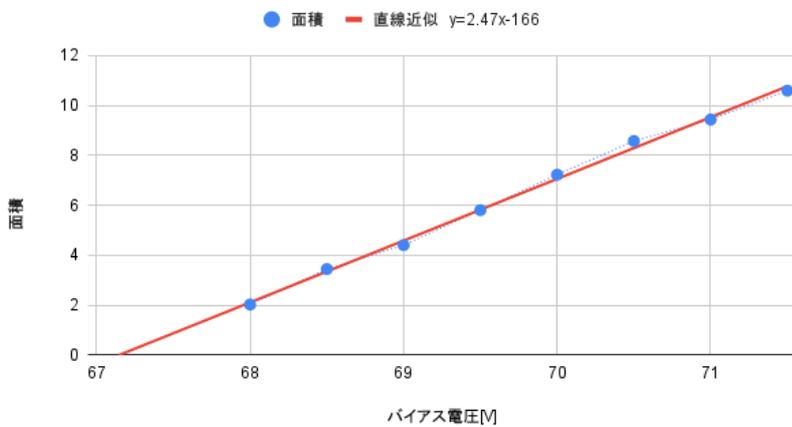


図15

考察

SPADの説明書に記載されているブレイクダウン電圧の値は以下の通りである。

韓国spad

Min : 60V Typ : 70V Max : 80V

中国spad

Min : 50V Typ : 70V Max : 90V

これらの値と比べると求めたブレイクダウン電圧 (韓国 : $65.7 \pm 1.6V$, 中国 : $72.1 \pm 2.2V$) は妥当であると言える。

また目視で決めたブレイクダウン電圧が韓国 : $67.3 \pm 0.2V$ 、中国 : $73.2 \pm 0.2V$ であり、誤差の範囲に入っている。よってこの方法は目視で求めるより精度が良いとは言えないのかもしれない。

(注1)

LINEST関数で求めた傾き、切片、それぞれの誤差は以下の式を用いて計算した場合と一致した。

$$a = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$\sigma_a = \sigma_y \sqrt{\frac{N}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad \sigma_b = \sigma_y \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum (ax_i + b - y_i)^2}$$

なお「測定値 x_i はほとんど誤差がないと仮定すると、係数 a, b の誤差は y_i の誤差から生じることになる。 y_i の値の誤差について何らかの決定をしなければならない。 y_i は真の値 $ax + b$ の周りに分布幅 σ_y で正規分布をしていると仮定する。」⁽²⁾
このように仮定された σ_y を使って誤差伝搬の式から $\sigma a, b$ を計算している。

4.4 同時計数率の測定

目的

第3章で説明した干渉実験を行うためには光子対の同時計測が不可欠である。

方法

図16に示したセットアップで同時計測を行った。また光源内の結晶付近にTECとサーミスタが入っており、TECに電流をかけ、サーミスタの抵抗をテスターで測ることで温度調節を行った。なお韓国spadには63.5(+5)V、中国spadには70(+5)Vの電圧を印加した。ゲートは1kHz、300ns、5Vをかけており、ゲートが開いている間は常に光が入っている状態であった。

さらにdichroic fiberの二つのfiberにおいてカウントレートの測定を行った。

結果

温度調節をした場合としなかった場合それぞれについてコインシデンスレートを求めた結果を表3,4に示す。温度調節をした場合の正味のカウントレートはしなかった場合の約4.8倍となった。

また、dichroic fiberの二つのfiberについてカウントレートを測定した結果を表5,6に示す。この測定は中国spadで行った。(温度調節あり)

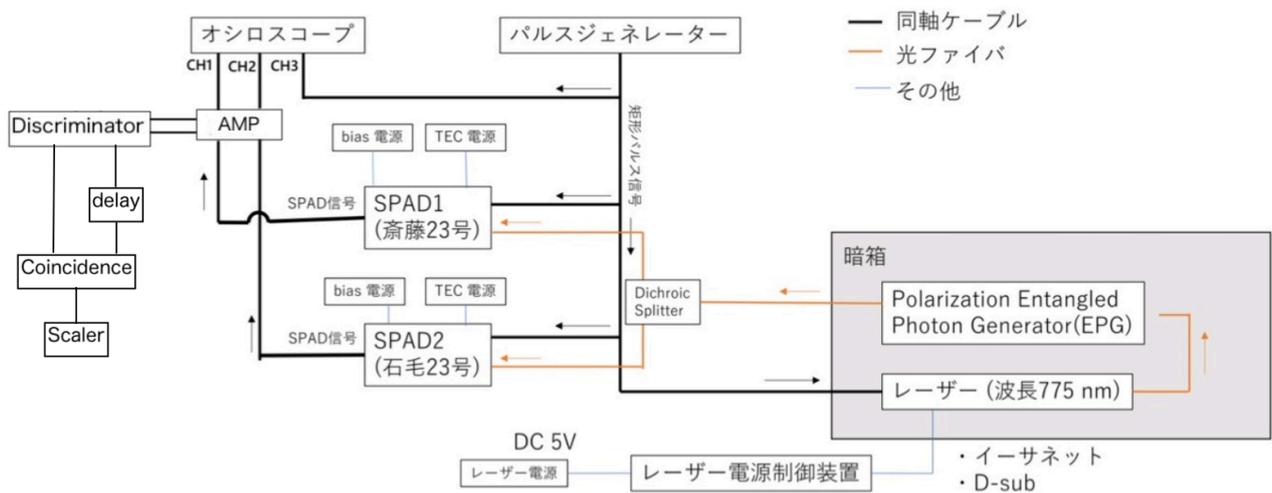


図16

表3

	ダーク/分	コインシデンス/分
1	9	148
2	1	173
3	6	187
4	4	157
5	6	163
平均	5.2	165.6
標準偏差	2.9	15.0

温度調節あり (33°C程度)

表4

	ダーク/分	コインシデンス/分
1	7	41
2	3	39
3	10	31
4	5	52
5	15	44
平均	8	41.4
標準偏差	4.69	7.64

温度調節なし (19°C程度)

表5

	ダーク/分	光あり/分
1	63	1350
2	54	1330
3	46	1360
4	68	1350
5	51	1350
平均	56.4	1348
標準偏差	8.96	10.95

fiber 1

表6

	ダーク/分	光あり/分
1	52	226
2	44	202
3	45	191
4	54	201
5	47	201
平均	48.4	204.2
標準偏差	4.39	12.99

fiber 2

考察

まずなぜ結晶の温度によってかわるのか、について考察する。本実験で使用したEPGではSPDCという現象によって光子対を生成している。SPDCが起こるためには以下の位相整合条件を満たす必要がある。

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad , \quad \mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i$$

本実験で用いたEPGにはマッハチェンダー干渉計が入っており、詳細な構成は不明だが、図17のような配置になっていると考えられる。なお、結晶の角度やポンプ光の入射角を変えることはできない。この時、ポンプ光、シグナル光、アイドラ光の方向が同じになる。さらに縮退SPDCであることから波数の条件を以下のように書き下すことができる。

$$n_p(\theta, \lambda_p, T) = \frac{n_s(\theta, \lambda_s, T) + n_i(\theta, \lambda_i, T)}{2}$$

n は屈折率、 θ は光学軸に対するポンプ光の入射角である。この式を解くと、

$$\theta = \theta(T)$$

のようになり、位相整合角が温度依存することがわかる。以上から温度によってコインシデンスレートが変化したのは、位相整合角が温度依存しているからだ結論づけることができる。

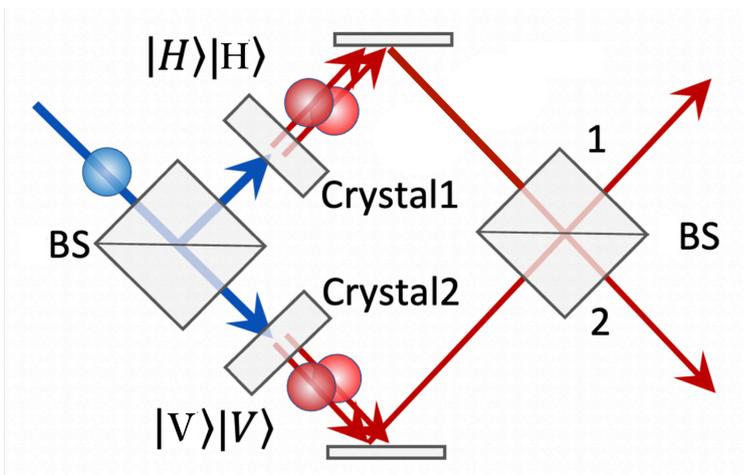


図17

次に得られたカウントレートについて評価を行う。この実験ではゲートが1kHz、300nsの幅でかかっていることから、1分間に0.018秒だけゲートが開いていることがわかる。よって表3,5,6から、真のカウントレートを次のように計算し直すことができる。なおダークカウントを引いて計算した。

Fiber1 single rate : 約71756cps

Fiber2 single rate : 約8656cps

Coincidences : 約8911cps

一方、本実験で用いたEPGのスペックは以下の通りである。

Raw data with 10% efficiency InGaAs SPD @94 μ W input

Alice Single rate: 30240cps

Bob single rate: 30740cps

Coincidences with 1ns Binwidth: 216cps

今回の実験ではレーザーの出力は14.6mWであったから、SPADの効率を10%と仮定すると、以下のようにカウントレートを見積もることができる。

single rate : 4736000cps

coincidences : 33500cps

この値と実測値を比較すると、single rateも coincidencesも1~3桁低いことがわかる。

よって本実験で使用した検出器および測定系全体（石毛・斎藤23号、カウントレートの計数方法を含む）の総合的な検出効率は、期待されるものよりも小さく、改善の余地があることがわかった。

またsingle rateに対してcoincidencesが多いことが確認できるが、その理由としては、スペックシートのbinwidthは1nsであるのに対し、本実験のディスクリミネーターの出力幅は20~30ns程度に設定していたことが挙げられる。binwidthを広く取った理由としては、韓国spadの信号に反射があり、反射した信号がthresholdに確実にかからないようにするためである。したがってbinwidthを狭くしてコインシデンスレートを測定し直すためには、反射をなくすか、thresholdを大きい値に設定することが必要である。

さらにfiber1、fiber2のシングルレートの間には大きな差が認められた。この原因としては、光側の問題（レーザーの波長がずれている、EPG内のアライメントがずれているなど）とfiber側の問題（dichroic fiberがうまく機能していない）が考えられるが、まだはっきりとした原因はわかっていない。

第5章 干渉計の構築

5.1 干渉計の設計

通常の光の干渉を見るために、図18のようなセットアップを考えた。まずEPGのpair productionモードを用い、古典的な光子対を発生させる。spdcによって生成された光子対にはわずかに波長差があり、dichroic fiberで二つに分けることができる。一方の光路にはfiber portとretarderを使って位相差を生じさせており、その後二つの光子はfiber couplerで重ね合わされ、SPADで検出される。

なおfiber portはファイバ間の結合を行う道具であり、内部にレンズが含まれておりアライメントが必要となる。またretarderは液晶でできており、電圧をかけることで屈折率が変わって位相差をつけることができる。

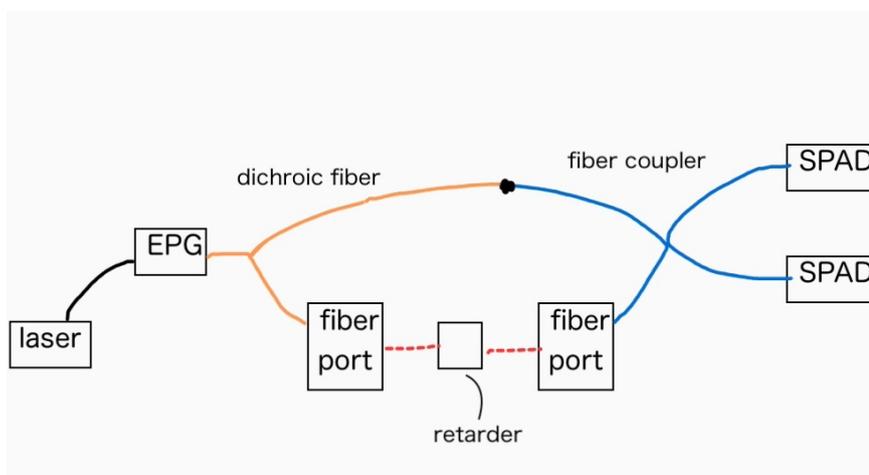


図18

5.2 fiber portのアライメント

方法

Fiber portの内部構造を図19に示す。tilt plateにレンズが磁石で取り付けられており、このtilt plateはxy方向とzθ方向の5方向に動かすことが可能である。

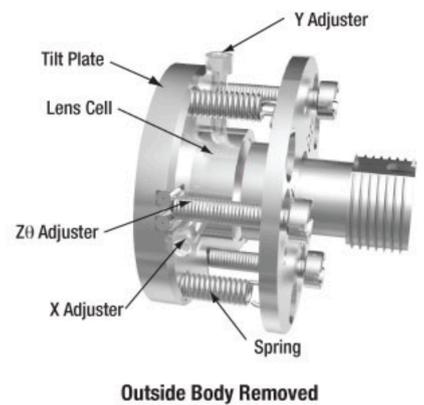


図19

fiber portのアライメント方法を図20に示す。図20にしたがってマルチモードファイバを使ってまずアライメントすることにした。

ステップ1	ステップ2	ステップ3
上記の「リアアライメント」のセクションで説明しているようにFiberPortのリアアライメントを実施してください。	システムに適合するマルチモードファイバをFiberPortとパワーメータに挿入します ² 。各位置の強度のピークを観察しながらXとYの位置をパワーが最大となるように調整してください。最大値に到達したら、後述のシングルモードファイバを使用する場合以外は、アジャスタの位置は変更しないでください。	調整を行うアジャスタの順番を決めたら、その順番を守ってください ¹ 。各Zθアジャスタを出力が極大になるように時計回りに回し、さらに回し続けて極大値を僅かに超えた値にします(極大値の約95%)。アジャスタを時計回りに回したときに出力が下がる場合は、その時の調整は行わずにスキップし、次の調整に進むことを繰り返してください。極大値が減少し始めたら回す方向を反対にし、アジャスタごとに出力が最大となるように回して、そこを行き過ぎないようにします。
シングルモードファイバのみ		
ステップ4	ステップ5	ステップ6(オプション)
シングルモードファイバに結合する場合には、まずマルチモードファイバをシングルモードファイバに交換します。パワーメータで測定される強度は大幅に下がることが予想されます。	ステップ3を繰り返します。システムはより敏感になるため、より細かい調整が必要になります。どのネジをどちらの方向に回しても出力が下がる場合は、ビームスポットがファイバのコア中心にあったとしても集光が不適切な場合があります。各アジャスタを少しずつ(1/16回転)同じ方向に回し、その後各Zθアジャスタごとに出力を極大にしてみてください。その極大値が前回よりも低い場合、各Zθアジャスタを少しだけ反対方向に回し、出力を極大にしてみてください。真の最大値が得られるまでこれを繰り返してください。	必要であれば、アジャスタは固定用カラーと付属のスパンレンチSPW403で固定できます。また、レンズセルは、FiberPort前面の4時の位置にあるネジ穴に、付属の0-80ネジを取り付けることで固定可能です。

図20 thorlabsより

具体的なセットアップを図21,22に示す。まず図21に示したセットアップでポストの高さと向きを調節した。ノギスを用いてfiber portの端と赤外線センサーカードの端を揃え、クランプで固定した。赤外線センサーカードにfiberの中心に当たる点をボールペンで書き、その点に光が来るようにポストを調節した。この操作は両方のfiber portについて行った。なお775nmのレーザーを使用した。

次に図22のようなセットアップでアライメントを行った。左側の基板にはLEDが取り付けられている。右側の基板にはフォトダイオードがはんだ付けされており、オシロスコープで信号を検出する。それぞれの回路図を図23,24に示す。フォトダイオードについてはローパスフィルタをつけて高周波成分をカットした。

さらに結合効率については、図25に示すように光源とdetectorを直接fiberで繋いだ場合と、fiber portを挟んだ場合の比として計算した。

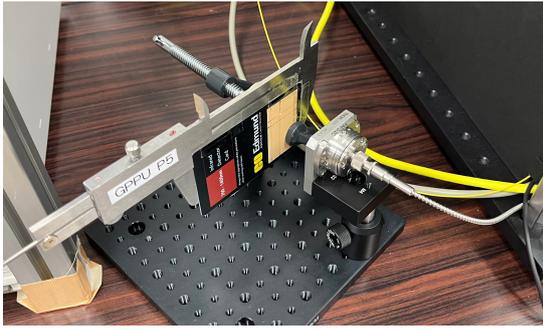


図21

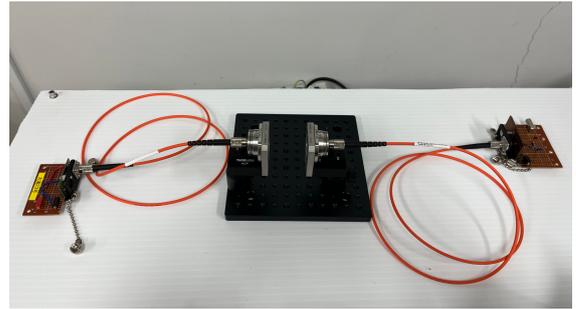


図22

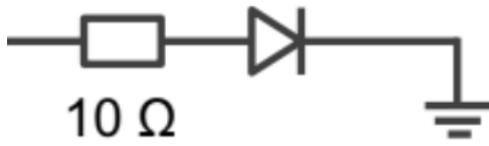


図23

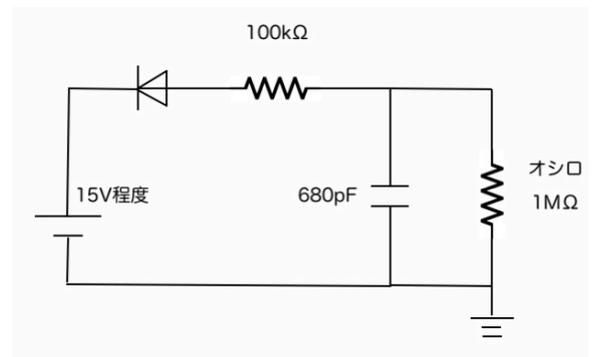


図24

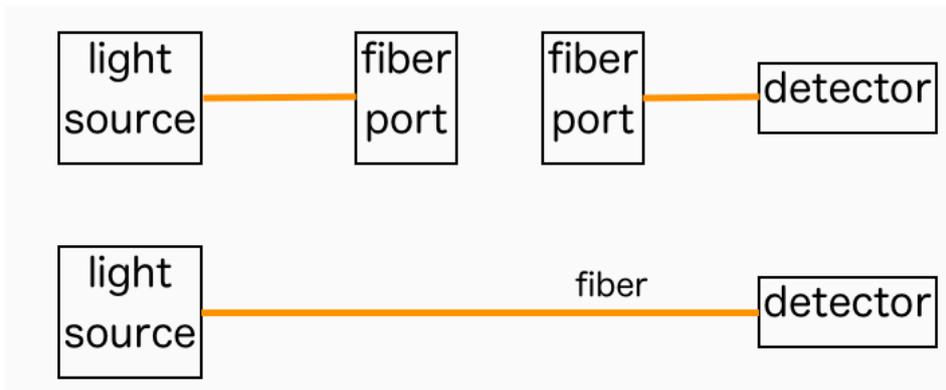


図25

アライメントの光源としては2種類のLEDとレーザーを用いた。これらの光源についての情報を以下に記す。なおLEDには1.3V程度のDC電圧を印加した。

①LED1 (Forward Current=50 mAの時の典型値)

Forward Voltage 0.72 V

Peak wavelength 1550nm

放射強度 0.27mW/sr

②LED2 (Forward Current=50 mAの時の典型値)

Forward Voltage 0.72 V

Peak wavelength 1550nm

放射強度 1.05mW/sr

レンズが取り付けられており前方に集光される。

③レーザー

Wavelength 775nm

また光の検出器としては以下の2種類のフォトダイオードとspadを使用した。spadについてはLED2を使ってアライメントを行った。

①775nm用

有効受光面積 0.12mm^2

②1550nm用

Active Area Diameter $120\mu\text{m}$ →円形だと仮定すると約 0.011mm^2

なおマルチモードファイバについては、NA0.5、コア径 $200\pm 5\mu\text{m}$ のものを使用した。

結果

アライメント後の結合効率を以下に示す。

LED1/フォトダイオード：約10%

LED2/フォトダイオード：5.74%

レーザー：99.1%

LED2/SPAD：0% (全く光が入っていない)

なおレーザーについてはsaturateしていたことがわかった。

考察

Fiber portの光結合の様子は図26のようになっていると考えられる。

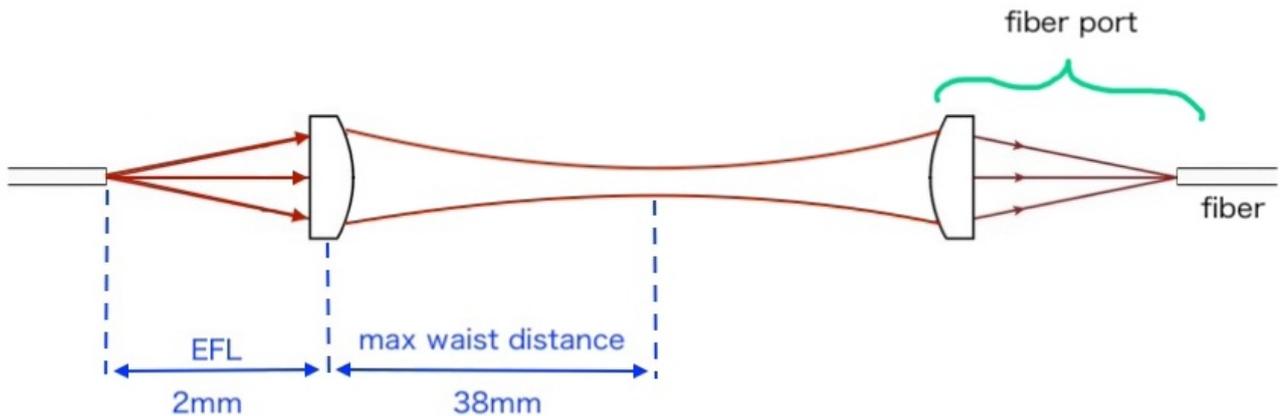


図26

thorlabsによると、結合効率が低い理由として「ビームウェスト径とMFDが一致しない、端面のモードスポットに対してビームの断面のプロファイルが歪んだり、中心がずれている、光がファイバーの軸に沿っていない」⁽³⁾ことが挙げられるそうだ。モードスポットとは光の伝播モードの形のことだと推察できる。

最初に挙げられた「ビームウェスト径とMFDが一致しない」という点について考える。今回の実験の場合、ビームウェスト径は焦点のビーム径に対応しており、以下の回折限界スポット径で表される。

$$\phi_{\text{spot}} = \frac{4\lambda f}{\pi D}$$

f : レンズの焦点距離、 λ : 入射光の波長、 D : レンズに入射するコリメートビームの $1/e^2$ 径

この回折限界スポット径がシングルモードファイバーのMFDと一致するほど、光がファイバーに結合することが知られている。

D の詳細な説明はなされていないが、ガウシアンビームについては以下の式を用いて計算可能であると考えられる。

$$z_R = \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{MFD}{2} \right)^2$$

$$w(z) = \frac{MFD}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2}$$

z_R はレイリー長（ビーム断面積が集光点の断面積の2倍になる距離）、 $w(z)$ は距離 z でのビーム半径を表す。この式を用いて $z=2\text{mm}$ でのビーム直径を以下のように見積もることができる。

$$D=2w(z)-0.78\text{mm} \quad (z=2\text{mm}, \lambda=1550\text{nm}, \text{MFD}=5\mu\text{m})$$

したがって、 $\Phi_{spot} \sim 5\mu\text{m}$ と計算できる。この結果から今回用いたfiber portは本実験のセットアップに適しており、十分アライメント可能であることが確かめられる。なおこの議論はガウシアンビームを仮定しているためマルチモードファイバで成り立つとは限らない。

今回の実験ではマルチモードファイバの時点でアライメントがうまくいっていない。この原因として最も有力なのは、三つ目に挙げられていた「光がファイバーの軸に沿っていない」という点である。つまりポストの調節がうまくいっておらず、ファイバーの端面が正面から向き合っていない可能性があることである。これはfiber benchを使うことで解決できる。後日、ポストからfiber portを取り外し、fiber bench につけ替えて再度同様の手順でアライメントを行ったところ、結合効率は5.15%となった。（レーザーの出力を15%にして計算した。）この結果から、ポストの調節が結合効率の低下の主因ではないことが明らかとなった。

さらにthorlabsが提供するfiber portのアライメント手順に関する動画を閲覧したところ、以下の新たな知見が得られた。

- ・アライメントの前にコリメートを行っている。
- ・結合効率の計算方法が異なり、片方のfiber portから出た光出力を分母にしている。
- ・ $z\theta$ 方向を調節しても光出力に大きな変化が見られない時、コネクターを緩めてファイバーを少し引き抜く操作を行っていた。この過程で光出力が上がればファイバーとレンズの距離を大きくする必要があることがわかる。
- ・ファイバーを取り付ける前にクリーニングを行っている。
- ・ファイバー間結合には忍耐強さが求められる。

今後は、これらの改善点を踏まえた上でアライメント作業を見直し、結合効率の向上を図る予定である。加えて、今回のfiber portおよびretarderの構成に固執することなく、位相差を制御可能な他のセットアップの導入についても検討を進めたい。具体的には、電氣的に位相を制御可能な位相変調器等を用いた干渉計の構築が挙げられ、これにより、アライメントを省略した上で、目的とする実験系の構築が可能となることが期待される。

第6章 参考文献

(1)大林雅之．ニールス・ボーアの相補性原理と生命観．科学基礎論研究．1985，17 卷，2 号，p. 97．

(2)深水孝則．“物理実験III－データ処理－”．琉球大学理学部物質地球科学科深水研究室．<http://www.cc.u-ryukyu.ac.jp/~fukami/p0.pdf>，(参照 2025/5/25)．

(3)Thorlabs．“Insights-ヒント集 「MFDがシングルモードファイバにおいて重要な結合パラメータである理由とは」”
．Thorlabs．2020．https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=12211&tabname=%E5%85%89%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%90#SMFiberCoupling，(参照 2025/5/25)．