



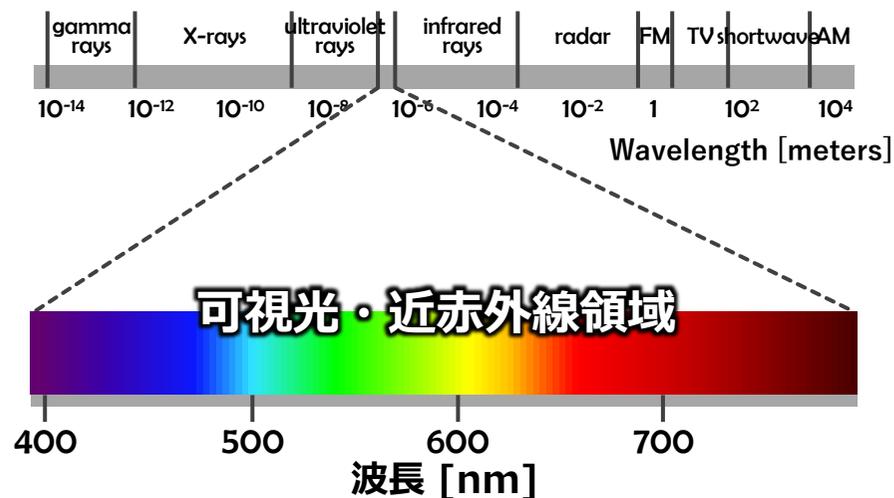
フィルタフリー波長検出センサ

豊橋技術科学大学 工学部
電気・電子情報工学系

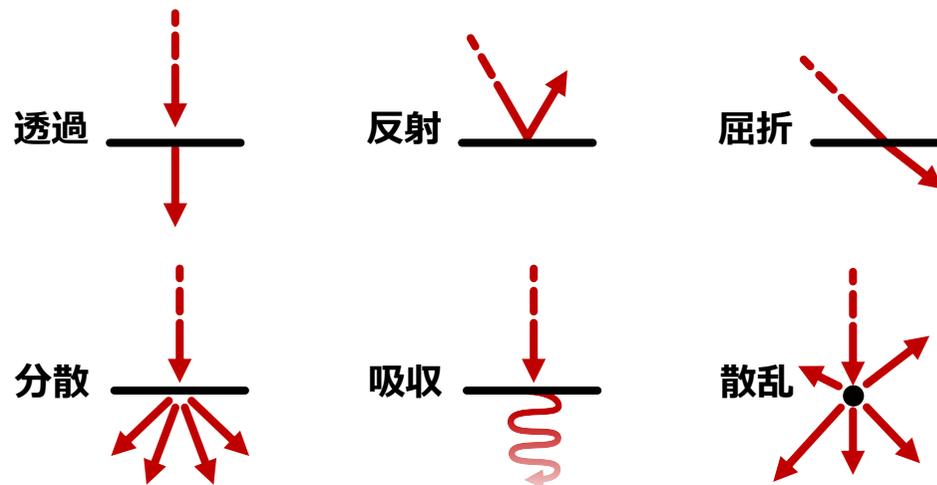
准教授 崔 容俊

光の波長と強度の検出と応用分野

可視光領域の波長



光の性質

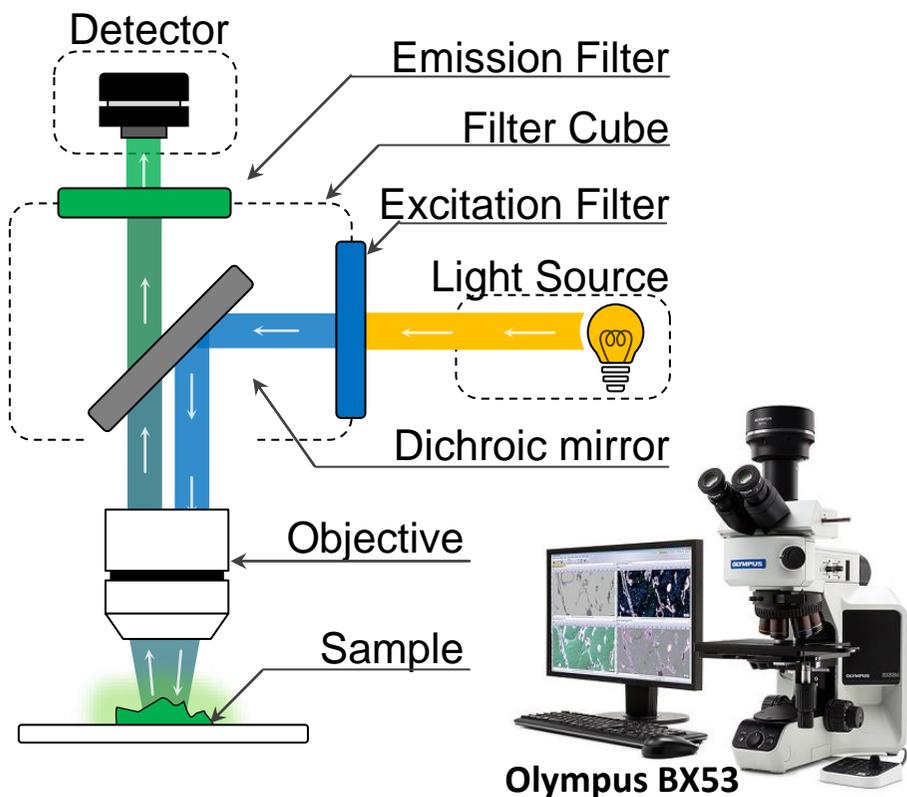


光検出技術の進化により、
私達の生活が変わって行く



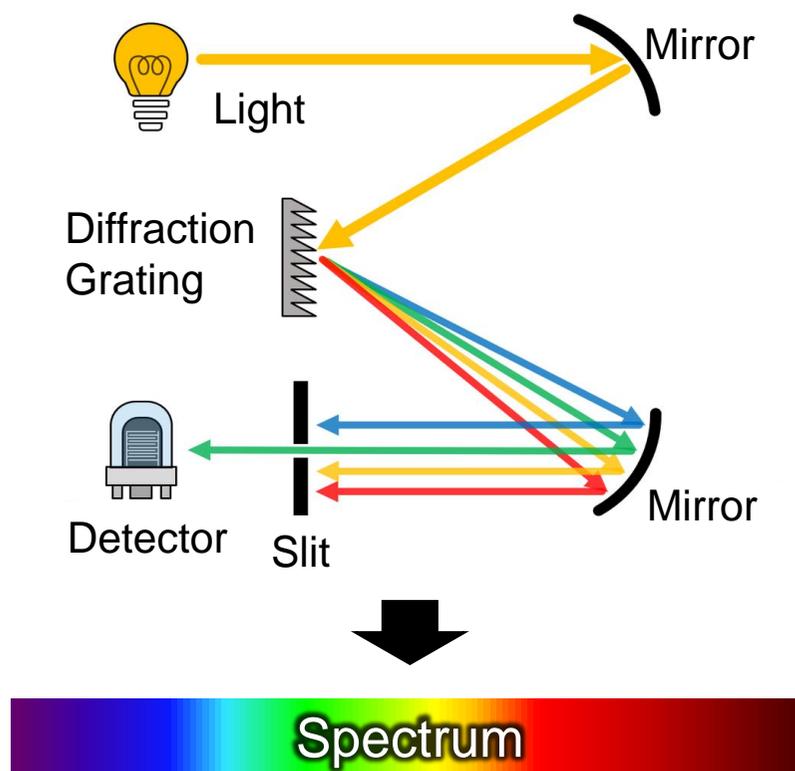
■ 光波長の検出システム^[1]

■ 蛍光顕微鏡(光学フィルター)



- 高感度・波長選択性・イメージング
- × 高価・大型・波長によりフィルター交換

■ 分光光度計 (モノクロメーター)

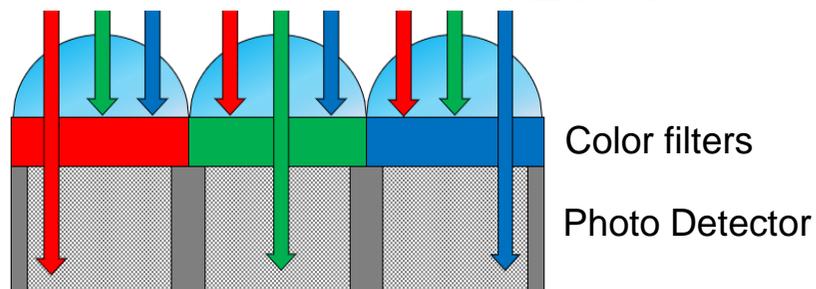


- 高い波長選択性
- × 高価・大型・ポイント計測

[1] Yong-Joon Choi, and Kazuaki Sawada, "Reference Module in Biomedical Sciences - Fluorescence Sensors", Elsevier BV, ISBN: 9780128012383, 2023.

■ 小型された光波長の検出システム

■ CMOSイメージセンサ

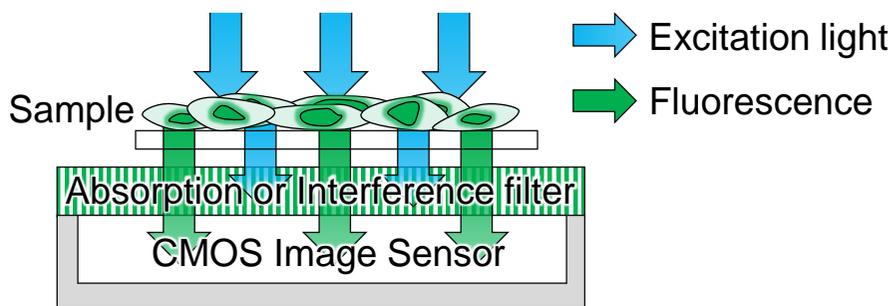


Red Green Blue

○ 高い空間分解能

× 空間情報のずれ、RGBのみ検出

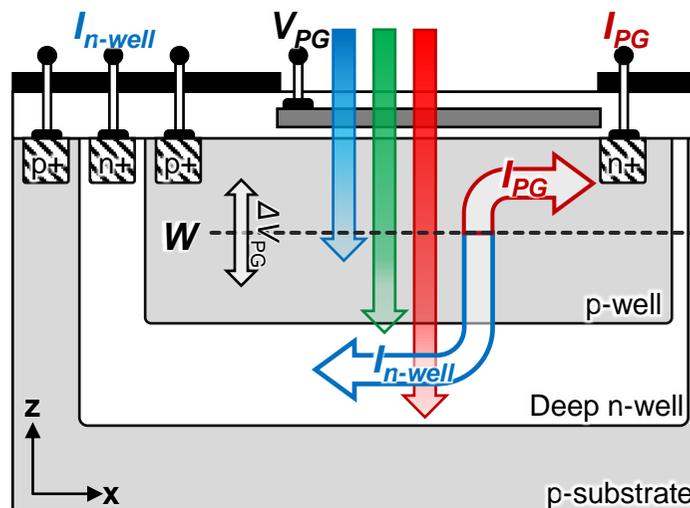
■ 蛍光CMOSイメージセンサ



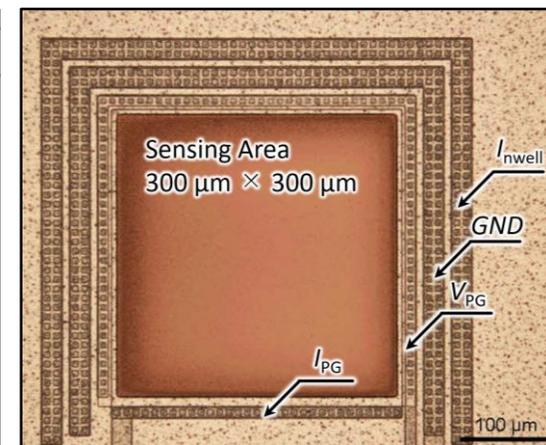
○ 高い空間分解能

× フィルターにより検出波長が依存

■ フィルタフリー波長検出センサ^[2]



(断面模式図)



(顕微鏡画像)

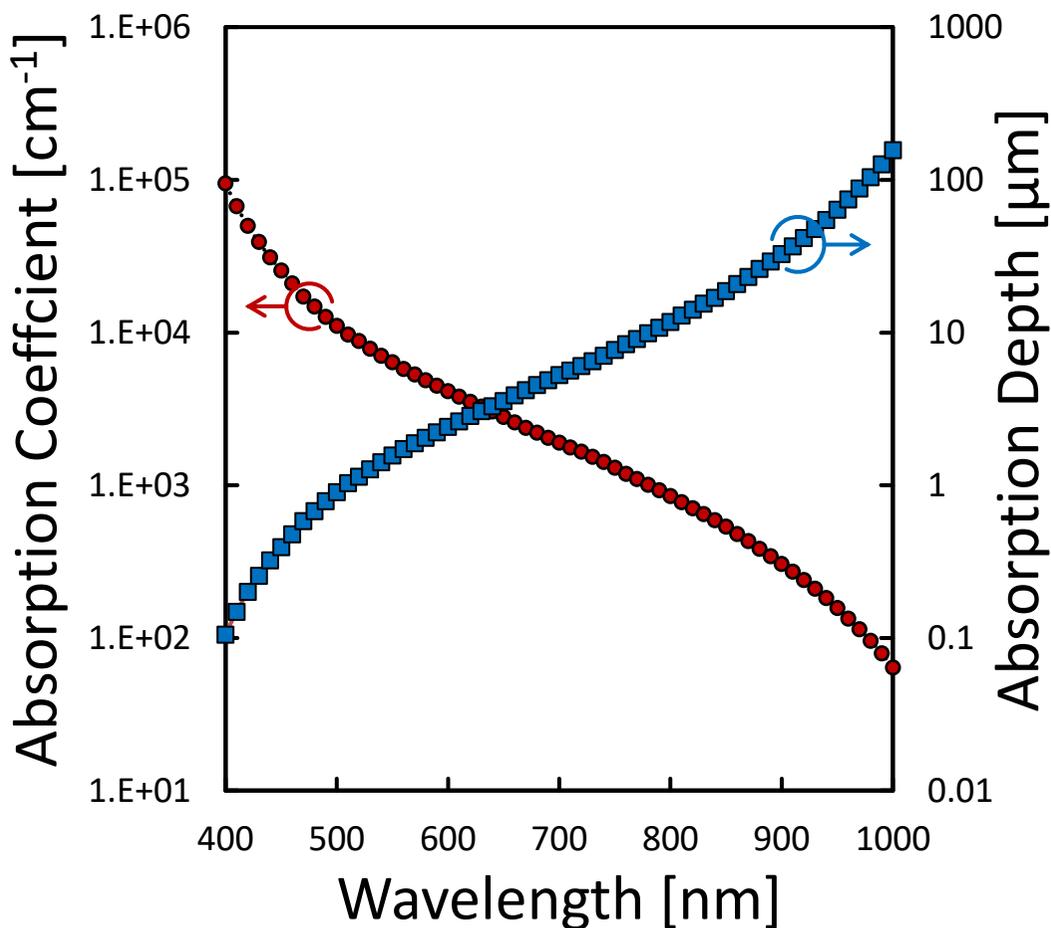
- ・ 光学フィルターが不要
- ・ 同一空間で波長情報を計測
- ・ 可視光～近赤外領域までの波長情報を検出
- ・ CMOSプロセスにより周辺回路の集積化

小型デバイスで波長情報の検出が可能

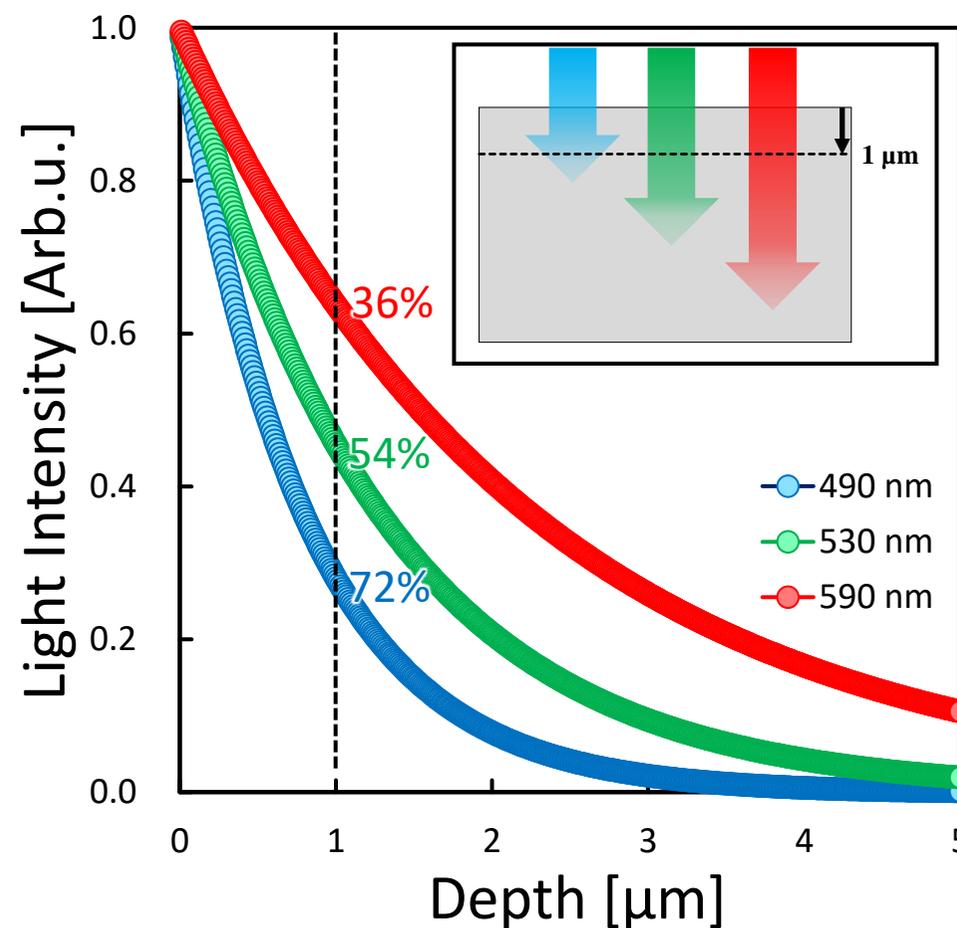
[2] Yong-Joon Choi, et al., "Demonstrating a Filter-Free Wavelength Sensor with Double-Well Structure and Its Application", *Biosensors*, 12(11), p.1033, 2023

■ 波長検出の原理

■ シリコンの吸収係数^[3]



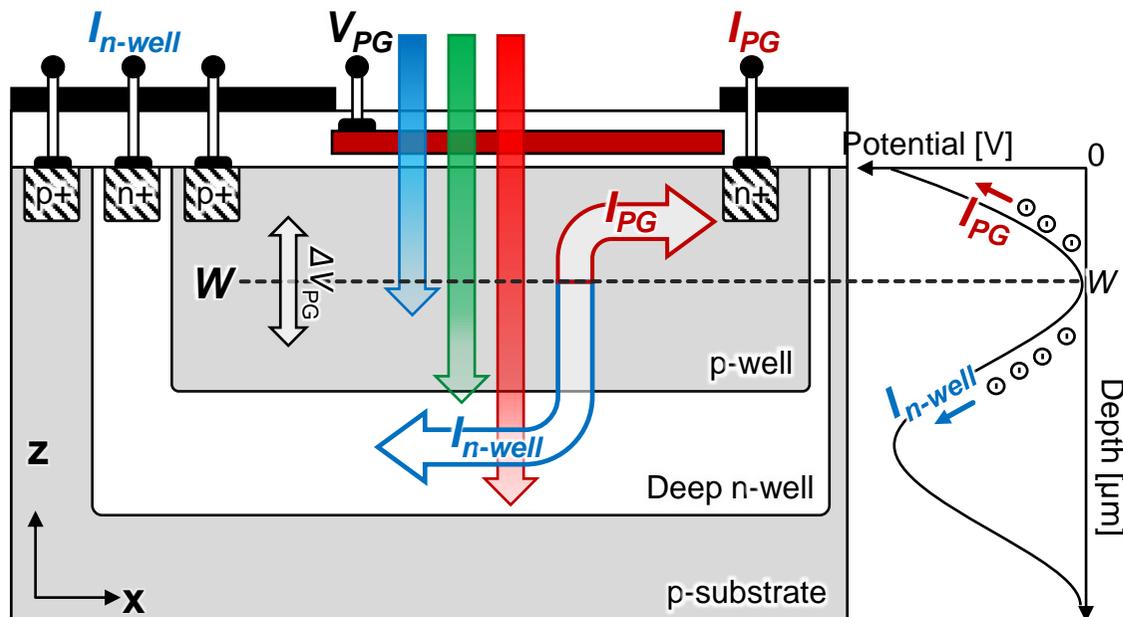
■ シリコンの光波長の吸収深さ



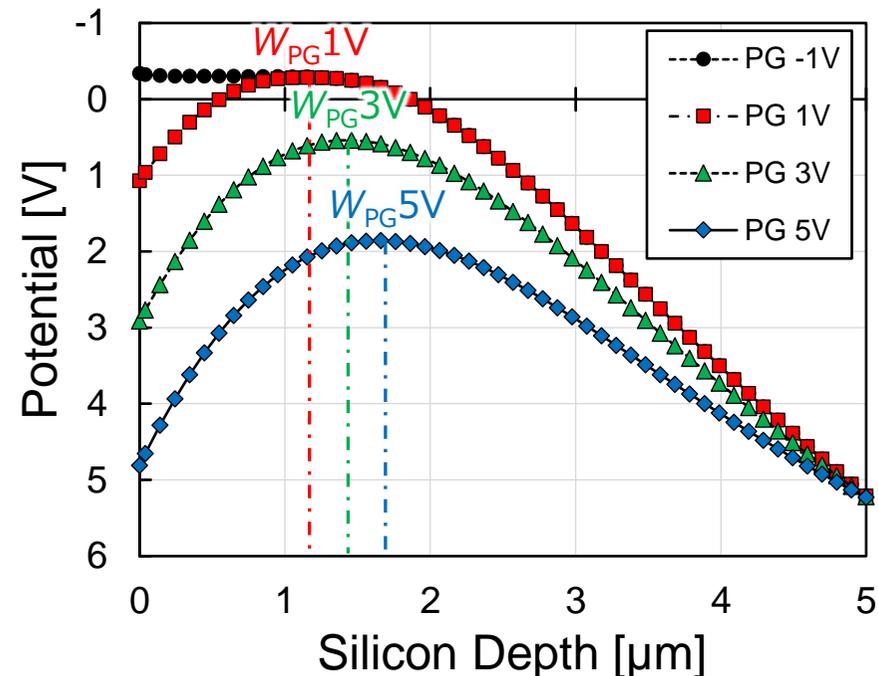
シリコンの吸収係数により光波長の吸収深さが異なる

[3] M. A. Green, "Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 K including temperature coefficients", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, p.1305, 2008

- フィルタフリー波長検出センサ
- センサの断面模式図^[3]



- PG電圧によるポテンシャル分布



Photogate(PG)の電圧印加によりポテンシャルピーク W が形成

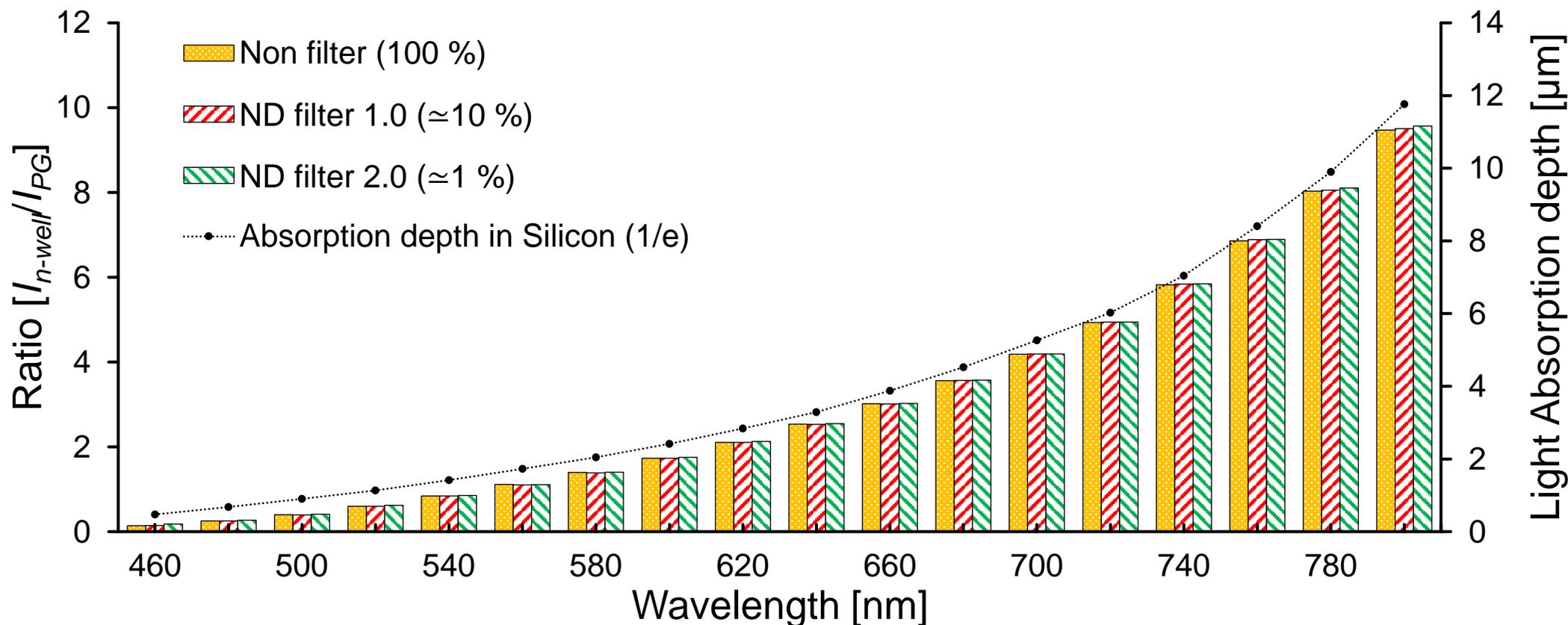


光照射による光電子を表面側電流(I_{PG})と基板側電流(I_{n-well})を分離

[3] M. A. Green, "Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 K including temperature coefficients", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, p.1305, 2008

フィルタフリー波長検出センサ

光の波長と強度の依存性^[2]



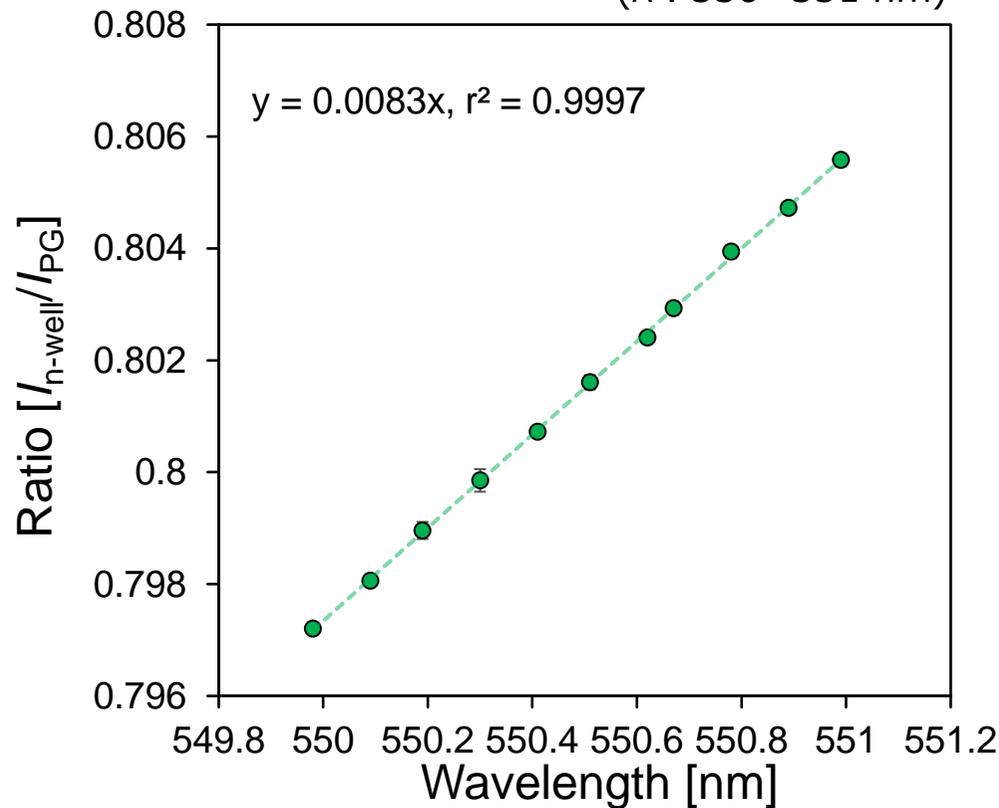
ポテンシャルピーク W を光を分岐する ⇒ **電流比率から波長の識別が可能**

シリコンの吸収係数により ⇒ **光強度は電流比率に依存しない**

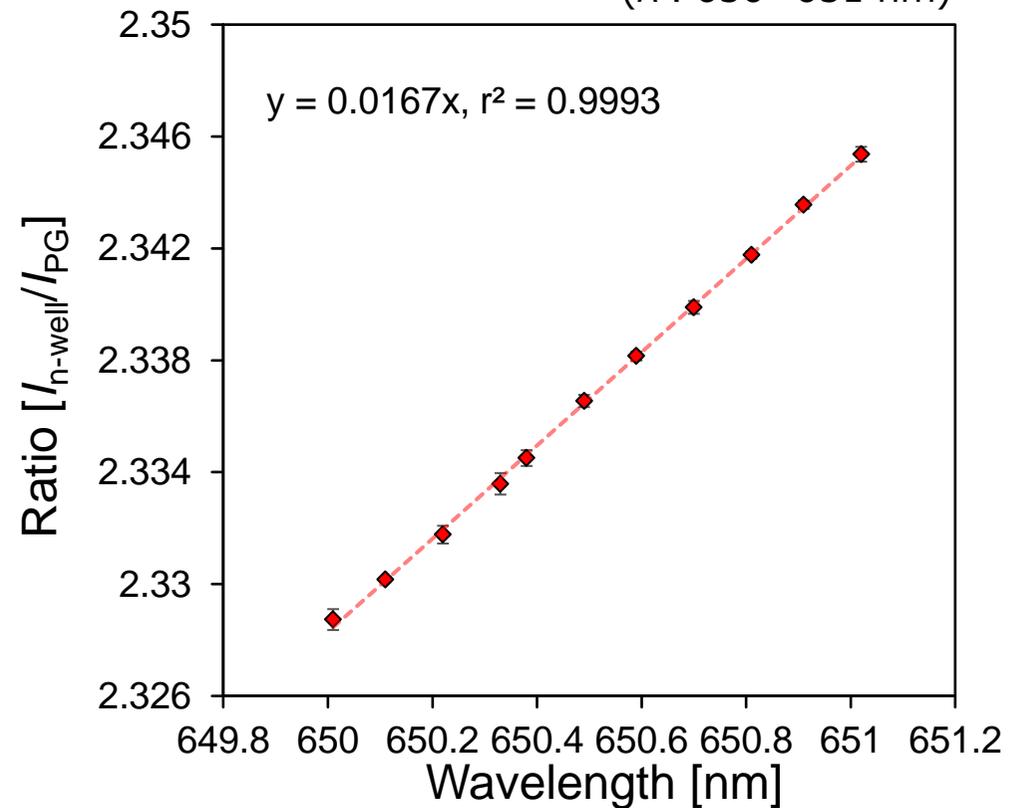
■ フィルタフリー波長検出センサ

■ 単一波長の分解能^[2]

(λ : 550~551 nm)



(λ : 650~651 nm)

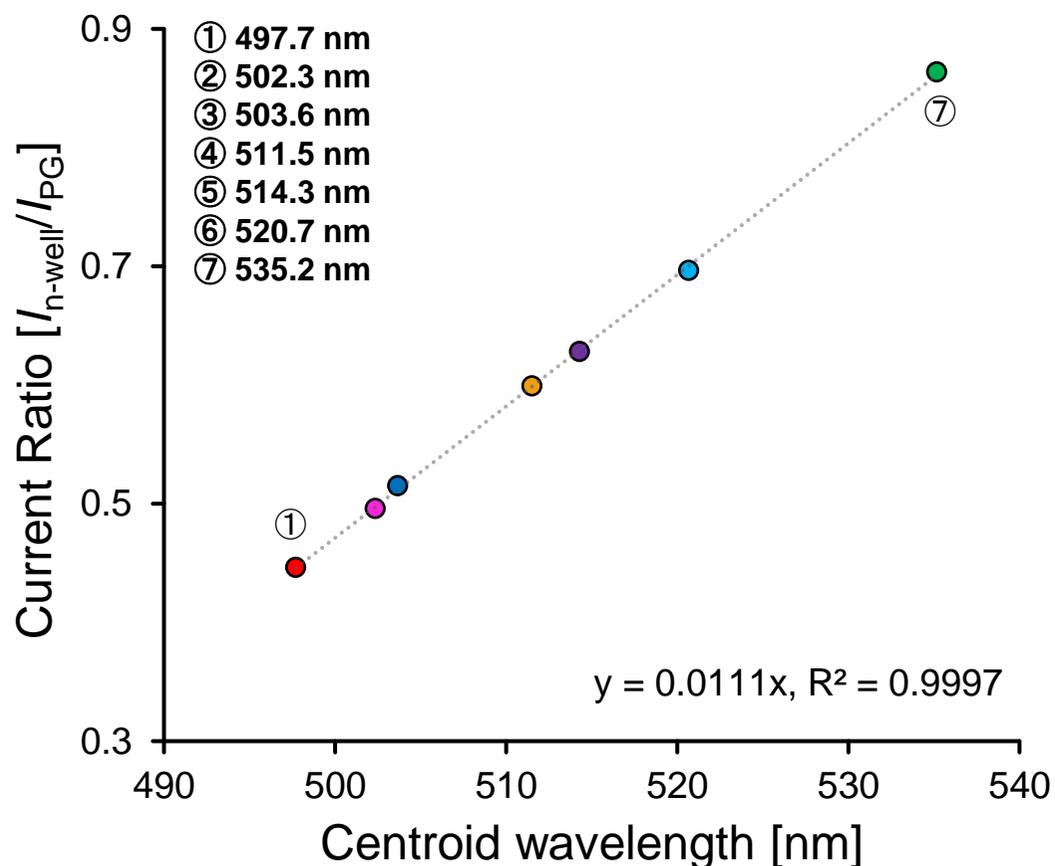
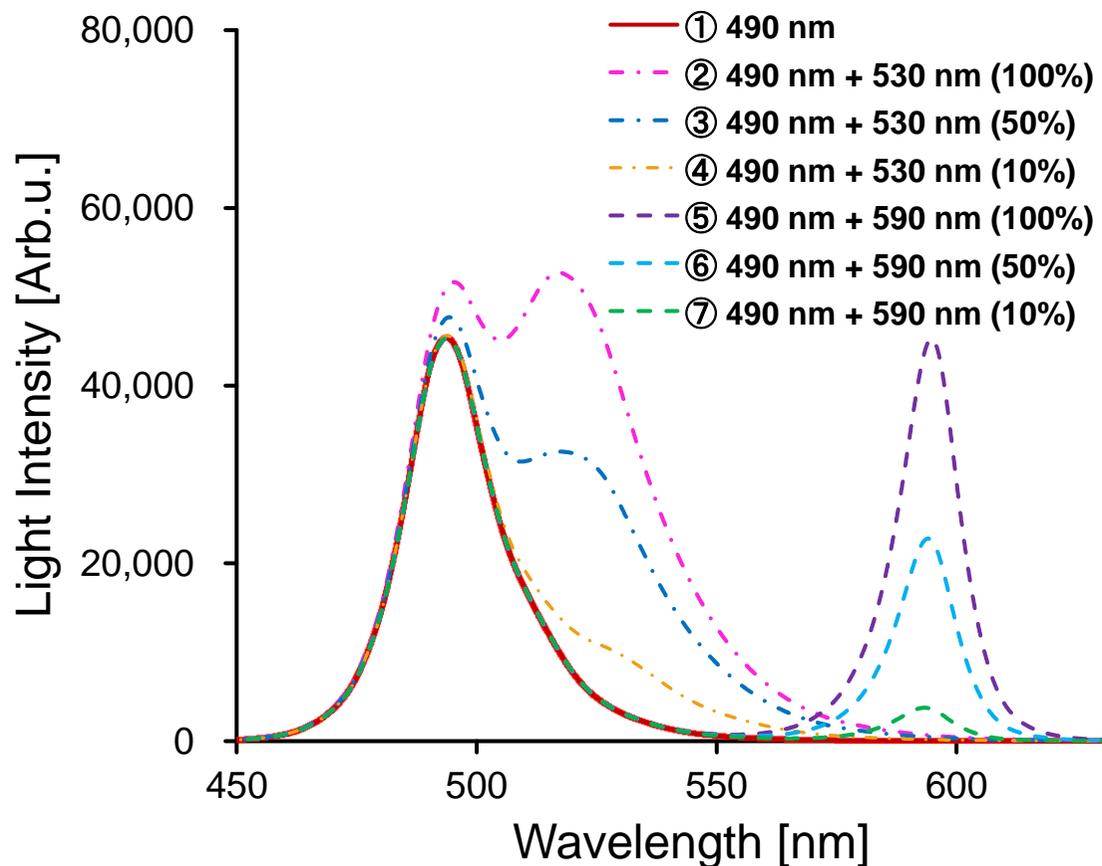


光波長を物理的な光学フィルターを使用せず，電気的な信号で計測



波長変化を0.1 nm以上の分解能で計測可能

■ フィルタフリー波長検出センサ
■ 複数波長による電流比率



センサの電流比率は重心波長に依存することが確認

■ 未知の光波長の特定方法

1. ポテンシャルピークWを推定

- i. 任意の基準波長を照射する
- ii. 電流を測定 (I_{PG} , I_{n-well})
- iii. 電流比を計算する ($I_{PG} : I_{n-well}$)
- iv. 式(1)により波長によるポテンシャルピークWを検出

$$\phi_W = \phi_0 \exp(-\alpha w) \dots \dots \dots (1)$$

2. 未知の光波長の検出

- i. 未知の波長による電流計測
- ii. 電流比率を計算する ($I_{pg} : I_{n-well}$)
- iii. (1-iv)で求められた深さWを基に波長λを求める[3]

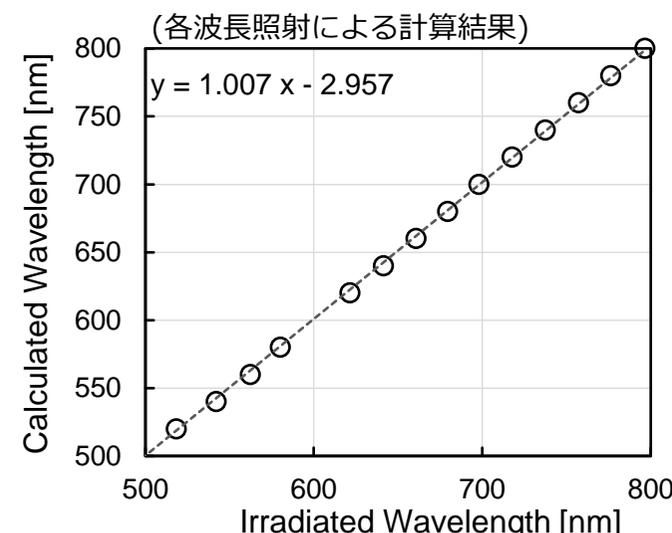
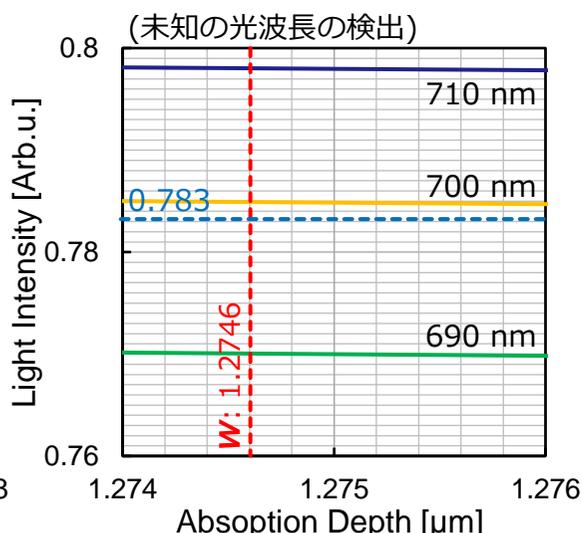
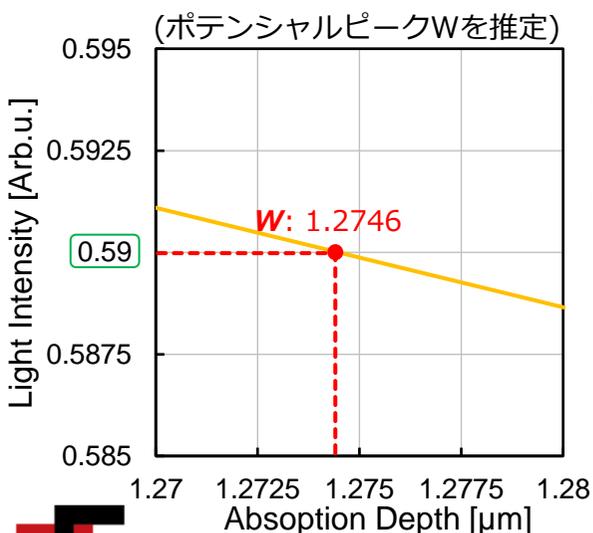
@Example

- i. $\lambda : 600 \text{ nm}$
- ii. $I_{PG} = 354.092 \text{ nA}$, $I_{n-well} = 514.519 \text{ nA}$
- iii. $I_{PG} : I_{n-well} \doteq 0.41 : 0.59$
- iv. $W = 1.2746$

(各波長照射による計算結果)

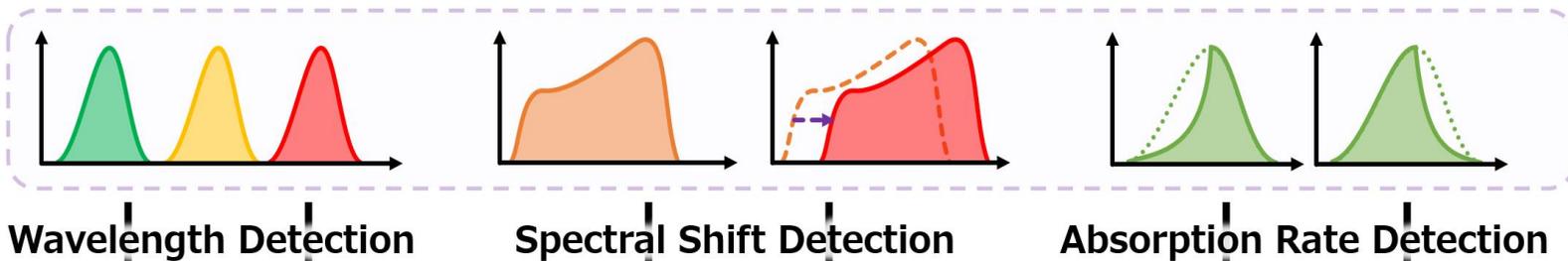
照射波長 (nm)	計算波長 (nm)
500	492.67
520	518.32
540	541.85
560	562.11
580	580.03
600	基準波長
620	621.29
640	641.28
660	660.60
680	679.39
700	697.91
720	717.54
740	737.29
760	756.97
780	776.19
800	796.41

- i. $I_{PG} = 414.74 \text{ nA}$, $I_{n-well} = 1490.93 \text{ nA}$
- ii. $I_{pg} : I_{n-well} \doteq 0.217 : 0.783$
- iii. $\lambda = 697.9$ (未知の波長は700 nm)

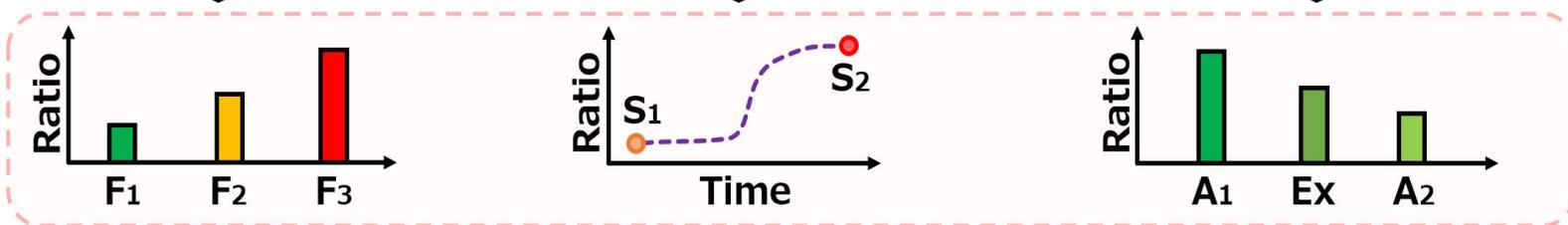


■ 応用に向けた研究のアプローチ

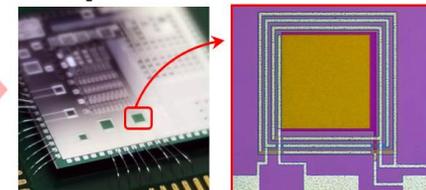
- 波長の検出^[2]
- 波長変化の識別
- 吸光度測定



Conventional systems



Proposed Device



蛍光の検出^[2]
 フローサイトメトリー^[4]
 レジオネラ菌の検出^[5]

COVID-19の検出^[6]

クロロフィルの検出^[7]

小型化された波長検出システムを開発して様々な応用分野へ展開

[4] T. Ide, et al., "Development of an on-chip microfluidic system with filter-free multiple-wavelength sensor for microflow cytometry", *Sensors and Actuators B*, 350(1), p. 130896 (2022)

[5] Y. Honda, et al., "Detection system for Legionella bacteria using photogate-type optical sensor", *JJAP*, 61, p.SD1010 (2022)

[6] Y.J. Choi, et al., "Proposal of compact LSPR sensor system by filter-free wavelength sensor", *Applied Physics Express*, 16(1), p.1305 (2023)

[7] Y.J. Choi, et al., "Proposal of leaf chlorophyll content and its a/b ratio measurement method using a filter-free multiple wavelength sensor", *JJAP*, 61, p.SD1041 (2022)

■ 小型化された光波長検出システム

■ 規格化されたシステムの開発

: LED光源との一体化、精密測定が可能な計測ケースの製作など

■ 応用分野に対するセンサ構造の最適化

: センシング領域のサイズの最適化、センサのアレイ化など

■ 産業現場での評価と補正

: 温度、湿度などの環境要因をフィードバックする回路設計など

■ 信号処理回路(PCB)の開発

: 電流計測回路、無線通信など

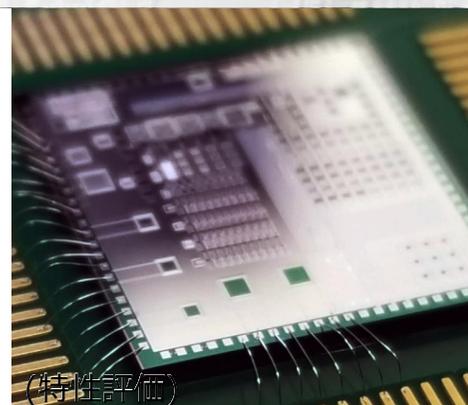
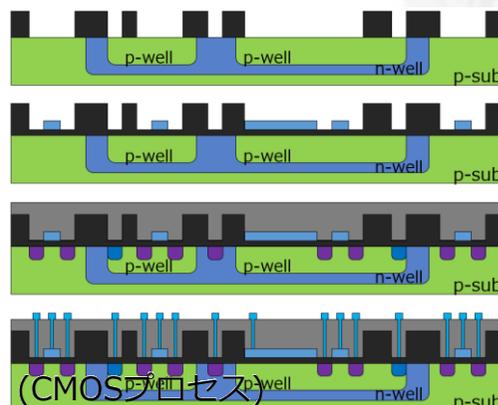
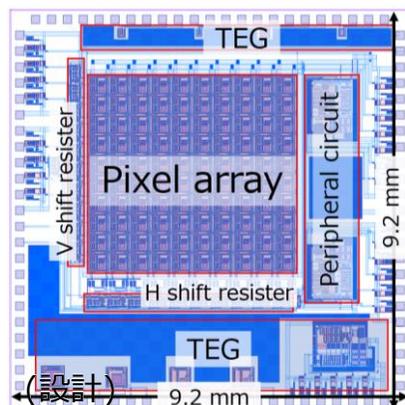
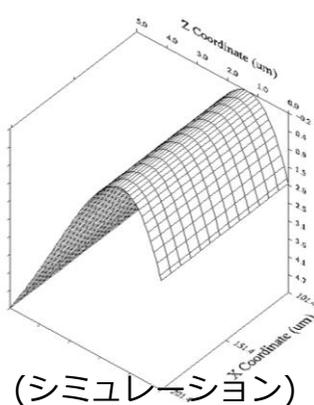
■ プログラミング言語作成

: 機械学習、波長の計算など

共同研究を希望

フィルタフリー波長検出センサの開発についてはシミュレーション・設計・CMOSプロセス・評価まで、すべてのプロセスを本学の施設(LSI施設, IRES²)で行っている。開発されたシステムと本デバイスの融合により、新たな価値を創出することが期待され、他の分野との共同研究を希望している。

光学計測法による精密計測・医療機器・水質検査・生物定量・食品評価・農業環境の計測など様々な分野への展開を考えている企業には、フィルタフリー波長検出技術の導入が有効と思われる。



■ 知的財産権

- **発明の名称** 半導体光センサを用いた光波長の特定方法
 - **出願番号** 特願2023-077131
 - **出願人** 豊橋技術科学大学
 - **発明者** 崔 容俊、澤田 和明
-
- **お問合せ先** ⇒ **研究推進アドミニストレーションセンター**
 - **Tel** 0532 - 44 - 6975
 - **FAX** 0532 - 44 - 6980
 - **E-mail** tut-sangaku@rac.tut.ac.jp
 - **担当** 白川 正知