

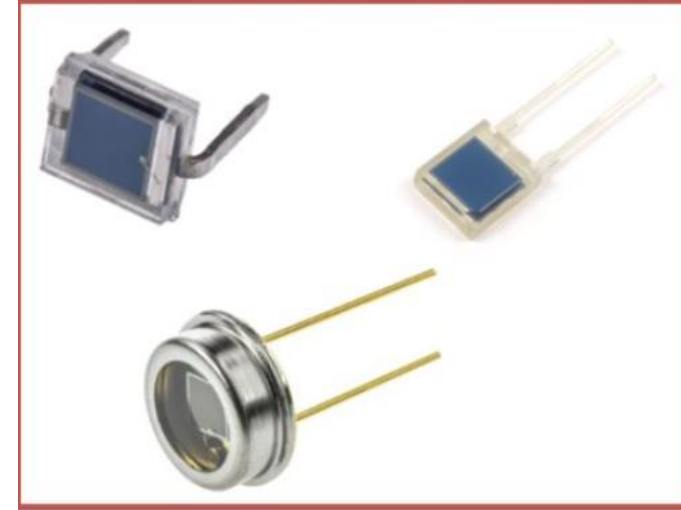
# フォトダイオードセンサー

E班 8223036 栗山淳  
8223005 新井翔太  
8223073 寺山依里

# フォトダイオードとは

8223036 栗山 淳

- ・ 光検出器
- ・ 半導体内部で光エネルギーを吸収して電気エネルギーに変換する
- ・ 光を照射すると電流や電圧が発生



## フォトダイオードの歴史

- ・ 光通信技術と共に発展
- ・ 1950年代前半にはpn型フォトダイオードにて光検出を可能にした。
- ・ 1970年代以降からpin型フォトダイオードやアバランシェフォトダイオードが発明された

- ・ 高感度：微弱な光でも電流を生成できる。（半導体材料の特性に依存）
- ・ 高速応答性：迅速な光変化に対しても即座に応答することができる
- ・ 低電力消費：センサーとして使用する際に、消費電力が少ないことが特徴
- ・ 暗電流：光が当たっていないときに流れる電流（ノイズ）が小さい

主に3種類

- ・ PN型フォトダイオード(PD)
- ・ PIN型フォトダイオード(PID)
- ・ アバランシェフォトダイオード(APD)

# PN型フォトダイオード(PD)

8223036 栗山 淳

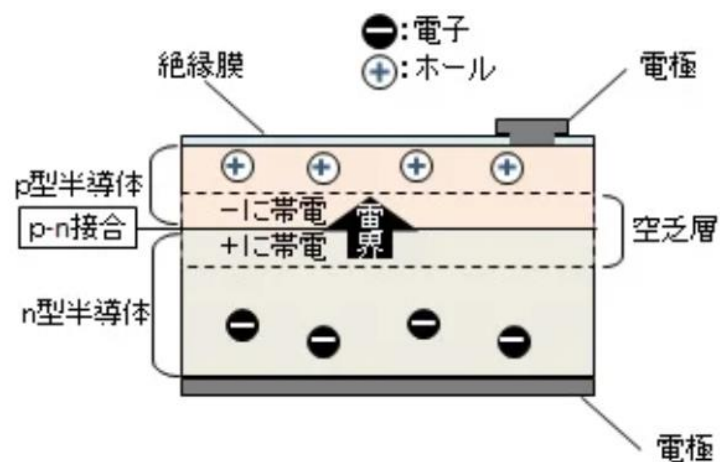


図 1 (a) PDの構造

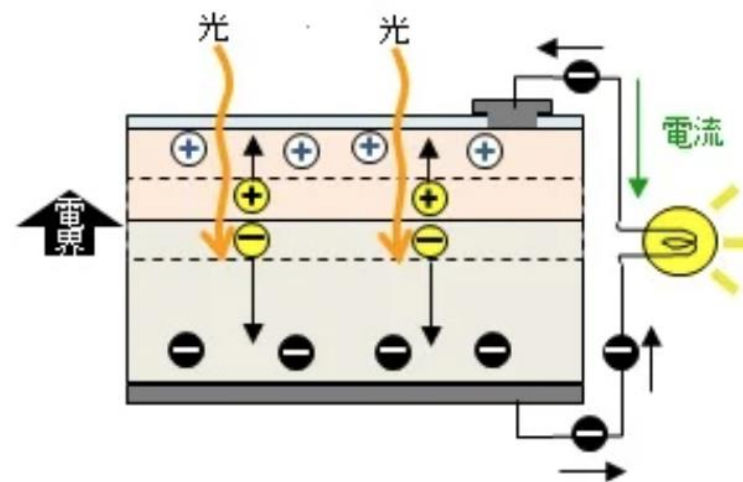


図 1 (b) PDの動作

- ・ 製造が容易
- ・ コストが低い
- ・ 安定した動作

# PIN型フォトダイオード(PID)

8223036 栗山 淳

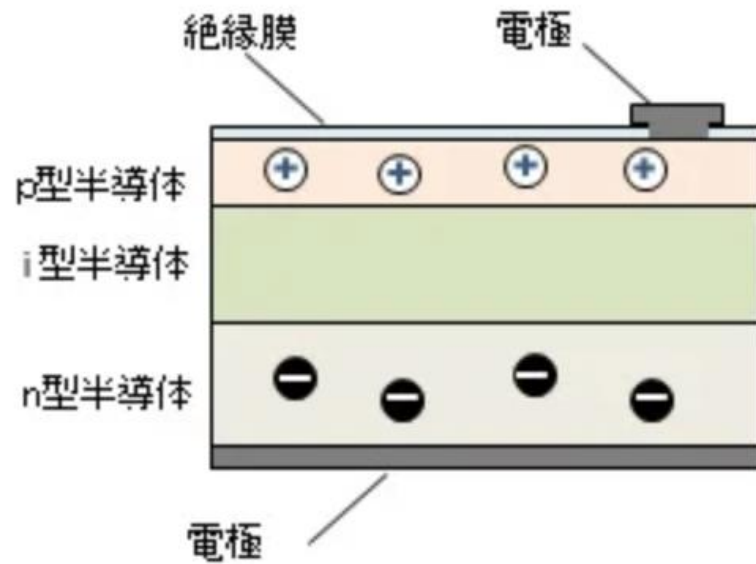


図 2 (a) PIN-PDの構造

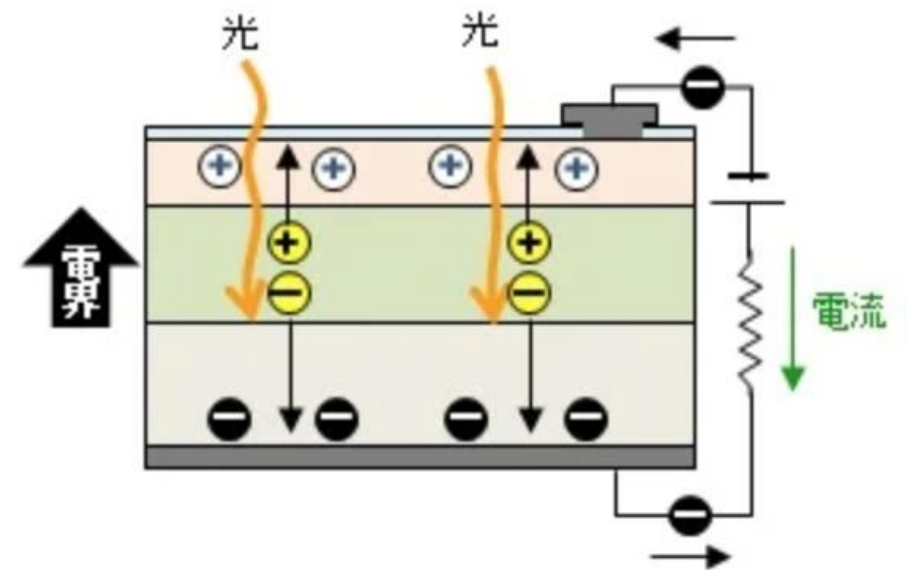


図 2 (b) PIN-PDの動作

- ・ より高感度
- ・ より高速

# アバランシェフォトダイオード (APD)

8223036 栗山 淳

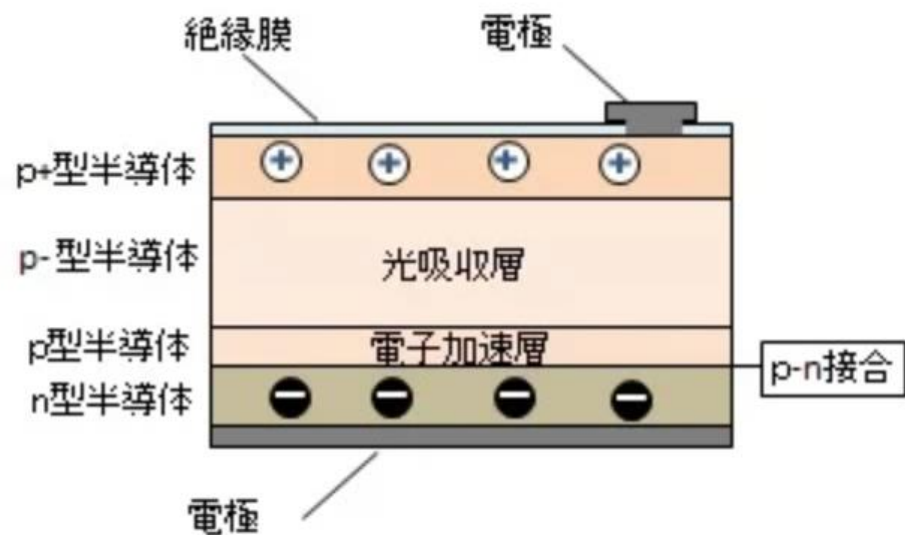


図 3 (a) APDの構造

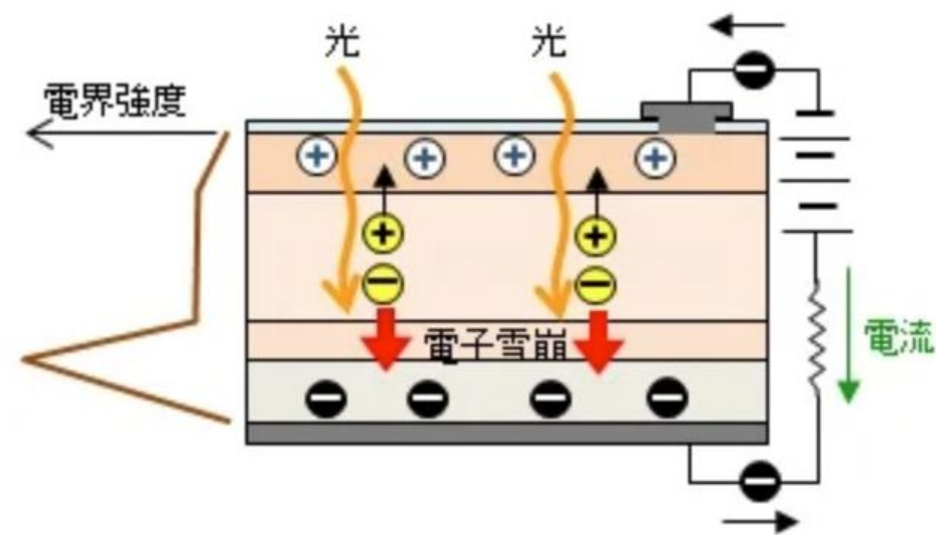


図 3 (b) APDの動作

- ・ 極低レベルの光でも検出可能である

# フォトダイオードセンサーの原理

- ・入射光が**光電変換**されて発生した光励起キャリア(電子、ホール)を電界によって走行させることで電流として取り出している

半導体内部で光エネルギーを吸収して、光によって電子を高いエネルギー状態に励起し、電気エネルギーに変換すること

## フォトダイオードセンサーと固体物理の関係

1. 電子のバンド間遷移
2. バイアス電圧による電子とホールの走行
3. pn接合、pin接合

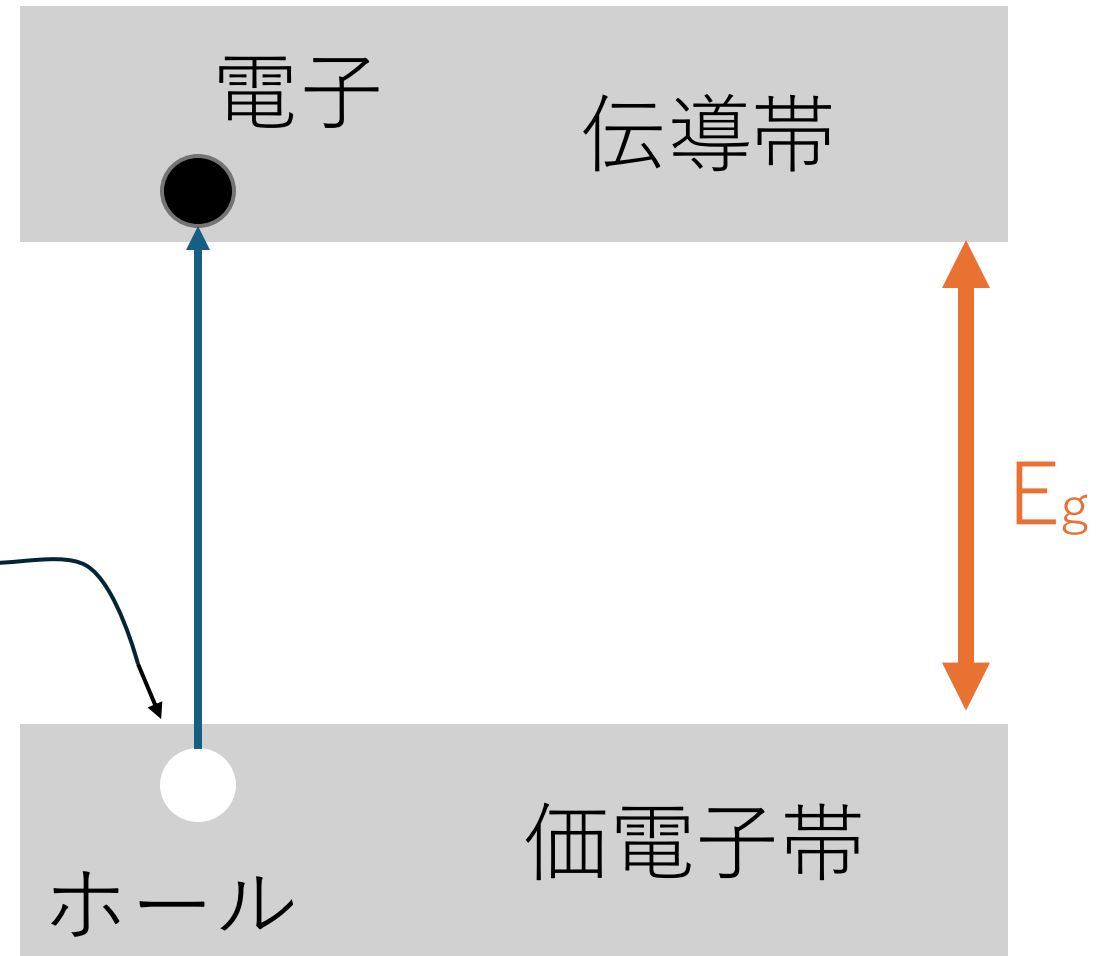


# 1. 電子のバンド間遷移

価電子帯の電子がフォ  
トンのエネルギーを吸  
収

→  $E_g$ を飛び越え伝導帯  
に遷移し、電子とホー  
ルを生成

フォトン



$E_g$ : バンドギャップエネルギー (禁制帯幅)

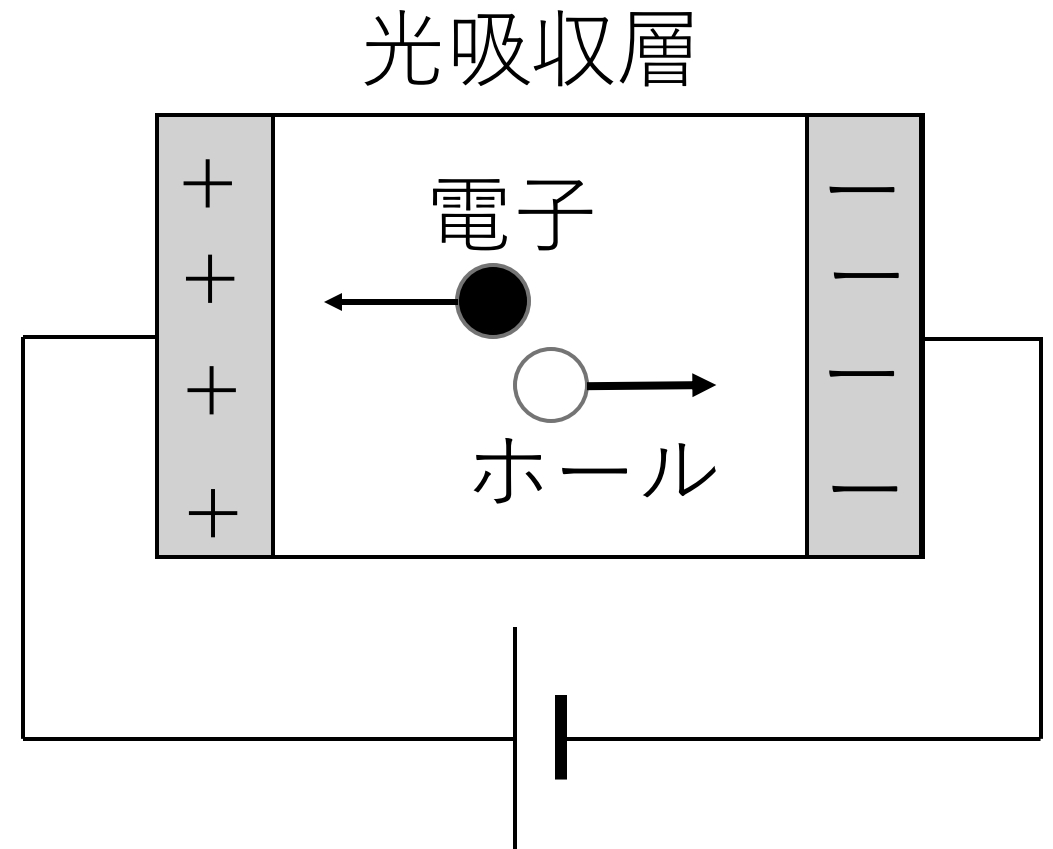
## 2. バイアス電圧によるキャリアの走行

8223005 新井翔太

バンドギャップを乗り越えて生成された電子とホールを電流として取り出したい。

→絶縁化された光吸収層にバイアス電圧を印加

→電界で電子とホールを走行させ電流として取り出す。



フォトダイオード内：光吸収層はコンデンサ

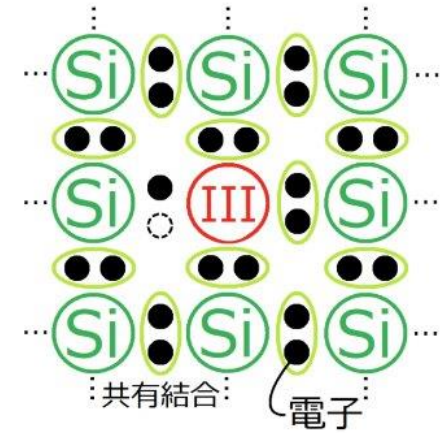
### 3. p型半導体

8223005 新井翔太

→Ga(ガリウム)などの第III族の原子をドナーしたもの。

p型半導体

ドナー時に電子が不足し、ホール(正孔)が形成され、ホールがキャリアとなって電気伝導を示す。



## 4. n型半導体

8223005 新井翔太

→P(リン)などの第V族の原子をドナーしたもの。

- ・ドナー時に電子が供給され、余った電子がキャリアとなって電気伝導を示す。

n型半導体



# 5. pn接合

8223005 新井翔太

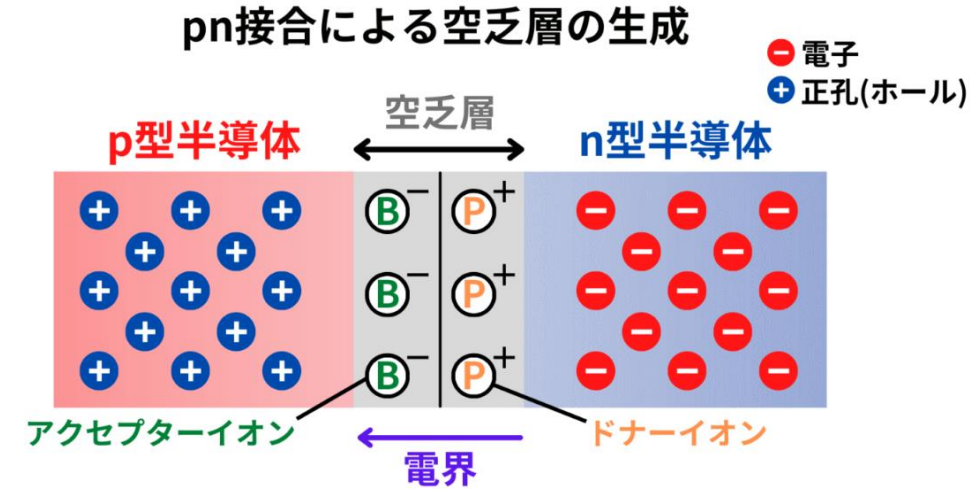
- ・ pn接合面はキャリアなし→空乏層
- ・ 電流を流す方向が重要

順方向バイアス

→空乏層が狭まり、キャリアが空乏層を飛び越える

逆方向バイアス

→キャリアが境界面から遠ざかる



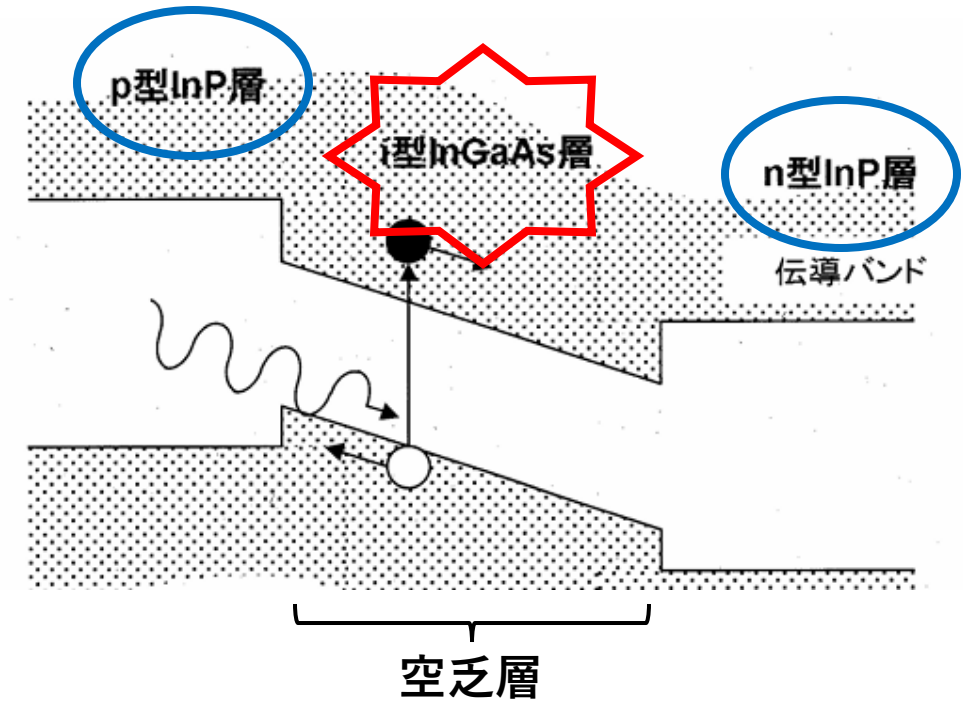
## 6. pin接合

8223073 寺山依里

- ・ p型とn型の間にi型層を挿入した構造
- ・ i層はキャリア濃度が低く、高抵抗・高電場領域を形成

→ キャリアの移動により空乏層が広がりやすくなり、感度上昇につながる

**光によって生成された電子・正孔対を内部電場で効率よく分離**



## 6. pin接合

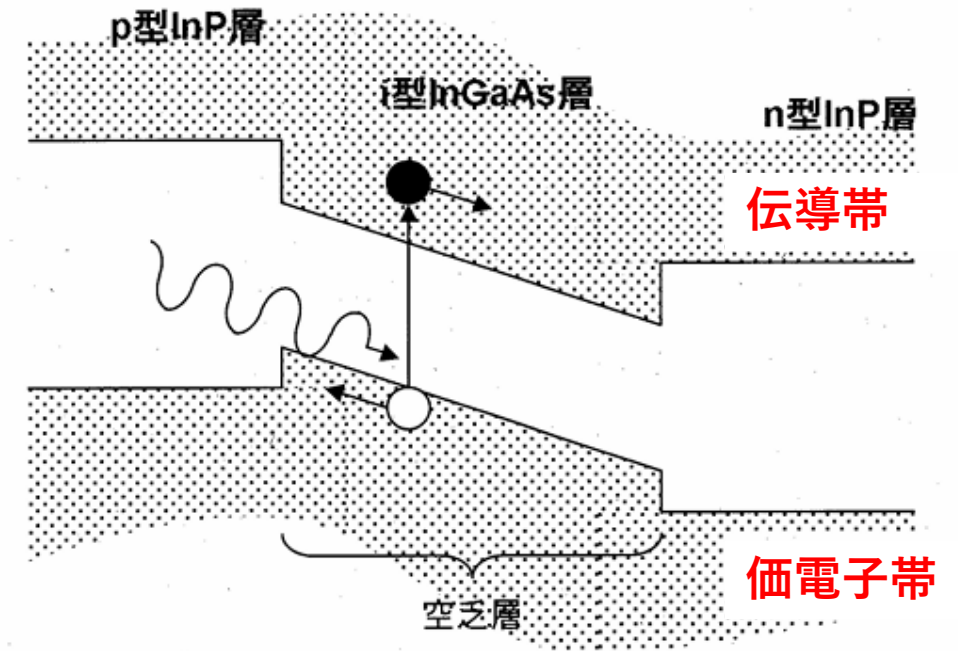
8223073 寺山依里

異なるフェルミ準位をもつp型・n型を接続

→バンドが曲がり、内部電場が発生  
→この電場が、光で励起されたキャリアを即座に引き離す力となる

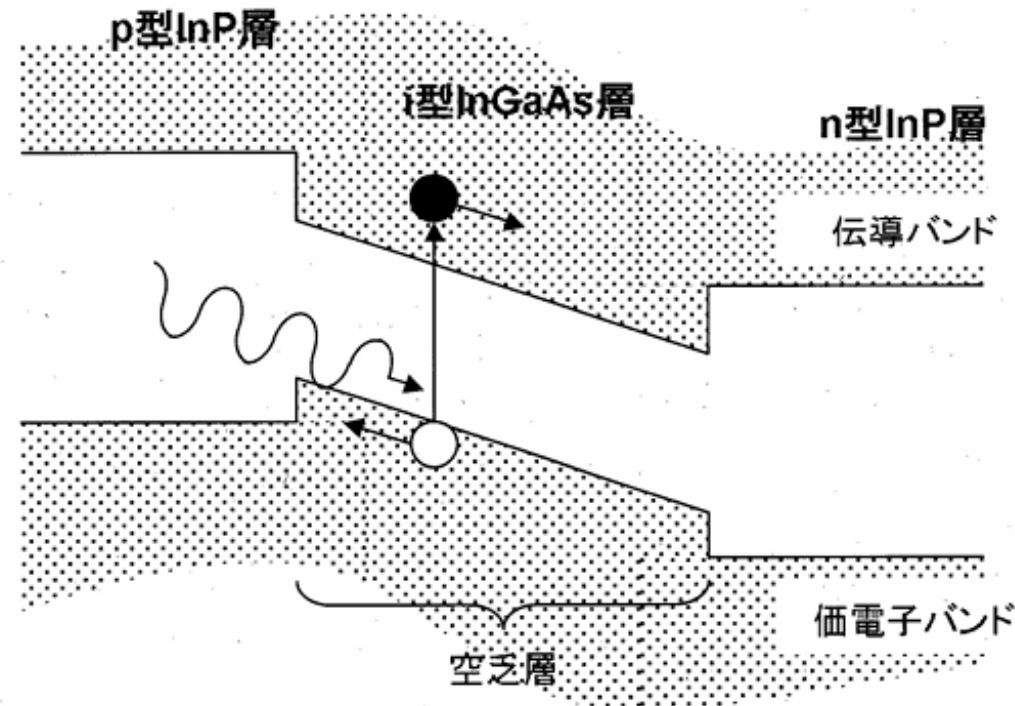
・光子がバンドギャップ以上のエネルギーを持つ

→電子は、価電子帯→伝導帯へ励起  
→内部電場で電子と正孔が分離される



## 6. pin接合

8223073 寺山依里




### [i層のメリット]

- ・ 電場が広くかかるため応答速度が向上
- ・ 広い領域で光を吸収できるため感度上昇
- ・ 暗電流が低減し、信号の精度が高まる



# フォトダイオードセンサーの実用例

- ・ 光ファイバー通信  
→ インターネットや電話回線の基盤技術
- ・ パルスオキシメーター  
→ 血中酸素を非接触で測定
- ・ 自動ドア  
→ 赤外線を用いた人物検知
- ・ CD/DVDプレイヤー  
→ レーザー光をディスク表面に照射



**高速応答  
小型  
低電力**

# 応答速度と感度のバランス

性能項目	高応答速度	高感度
pn接合の幅	薄いほど速い	厚いほど光を吸収
キャリアの寿命	短いほど速い	長いほど電流が大きい
バイアス電圧	高いほど速い	高いほど雑音までも吸収

- ・ 応答速度を優先すると、微弱な光に対する感度が下がる
- ・ 高感度化すると、ノイズ増加や応答遅延が起こることがある

→用途ごとにどちらを重視するかの最適化が必要

# 素材選びのポイント

材料	特徴	主な用途
Si	可視光～近赤外に対応	一般用途、低コスト
InGaAs	赤外域に高感度	光通信
Ge	長波長赤外線に対応	高速光通信

## [材料学的要素]

- ・ 結晶の欠陥密度が低いほどノイズが少ない
- ・ p層/n層の厚さと不純物濃度設計により感度・応答速度が調節可能

# 他の光センサーとの比較

特徴	フォトダイオード	CMOS	CCD
応答速度	◎	○	△
感度	○	○	◎
構造の単純さ	◎	△	△
主な用途	センサ、通信	カメラ	天文、医療

フォトダイオード  
→画像化よりも「1点の光強度」を高速・高精度に測定する用途向き

CMOS  
→低消費電力で多数のピクセルを同時に読み出せるが、ノイズ多め

## 未来展望・可能性

### 自動運転センサー(LiDAR)

周囲の距離や形状を光で測定

→ 反射光の検出にフォトダイオードが必要

### スペース通信

衛星通信の高速化のための

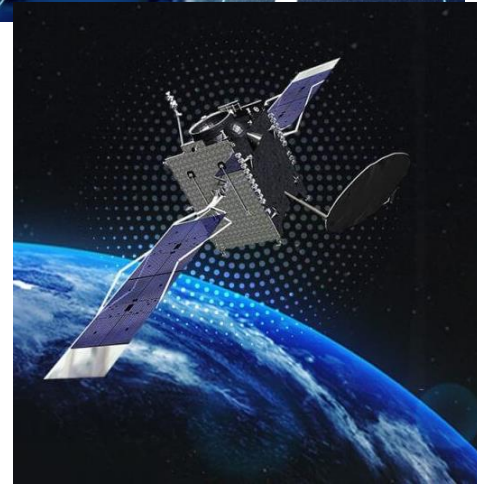
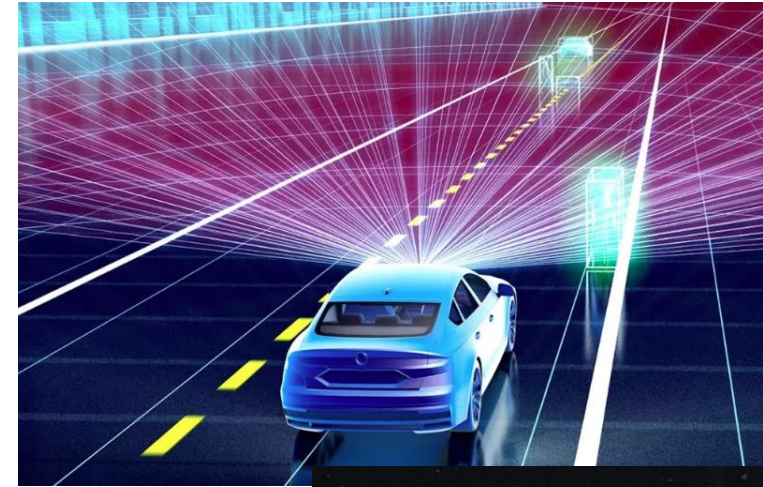
光通信に対応した高感度・高速検出器として

### ウェアラブル医療機器

無意識下で健康モニタリング

### マテリアルインフォマティクス

センサーに最適な材料の探索・設計を加速可能



# フォトダイオードの魅力と未来

## 原理：pn接合 × 光電効果

- ・ 電子・正孔対生成を活用
- ・ 固体物理の基本原理が応用に直結

## 特徴：高速・高感度・小型・省電力

- ・ 材料や構造によって性能が大きく変化
- ・ 医療～宇宙観測まで幅広い応用

## 材料工学の力がカギ

- ・ 新素材・微細構造の設計 → 高性能化
- ・ 量子ドット／有機材料の応用も

## 今後の可能性

- ・ 自動運転／ウェアラブル医療／光通信など

**“見えない光”で未来を拓く**

ご清聴ありがとうございました

## 参考文献

8223005 新井翔太

8223036 栗山淳

8223073 寺山依里

- <https://www.fiberlabs.co.jp/tech-explan/about-pd/>
- <https://butsurimemo.com/pn-junction/>
- <https://hegtel.com/handotai.html>
- [半導体のpn接合とバンド構造 | Semi journal](#)
- 加藤和利、計測と制御、45巻、4号、2006年
- [https://jidounten-lab.com/w\\_nikon-velodyne-lidar](https://jidounten-lab.com/w_nikon-velodyne-lidar)
- [スペースX、インテルサットの通信衛星2機を打ち上げ ファルコン9の第1段機体は14回目の飛行 | Infoseekニュース](#)
- [ウェアラブル医療機器生物医学カラーアイコンベクターイラスト - アイコンのベクターアート素材や画像を多数ご用意 - アイコン, イラストレーション, コンピュータ - iStock](#)