McLean E

大澤担当分 (pp.184~pp.195)

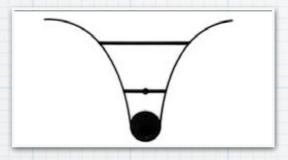
5.5.1 Classification

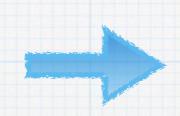
* 検出器の分類

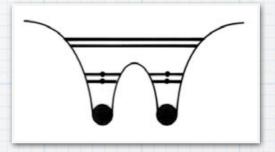
- Photon detectors: 個々の光子が検出器の物質と相互作用して、複数個の電子を放出する。適用範囲は χ 線から遠赤外線まで。
- ➤ Thermal detectors:
 光子のエネルギーが検出器で熱に変わり、電気伝導度のような装置の測定可能な性質が変わる。適用範囲は赤外線とサブミリ。
- ▶ Coherent detectors: 電場の波が直接感知され、位相情報が貯蔵されていく。 適用範囲は遠赤外線から電波まで。

5.5.2 半導体

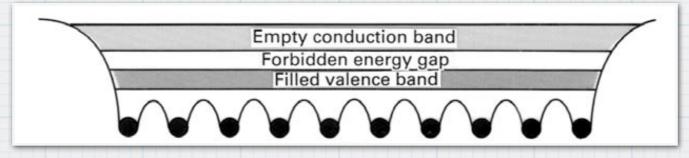
* 結晶構造を作るために個々の原子を近づけていくと、価電子同士が相互作用して、エネルギー準位が変化する。







* さらに多数の原子が結合すると、エネルギー準位は「バンド」に広 がっていく



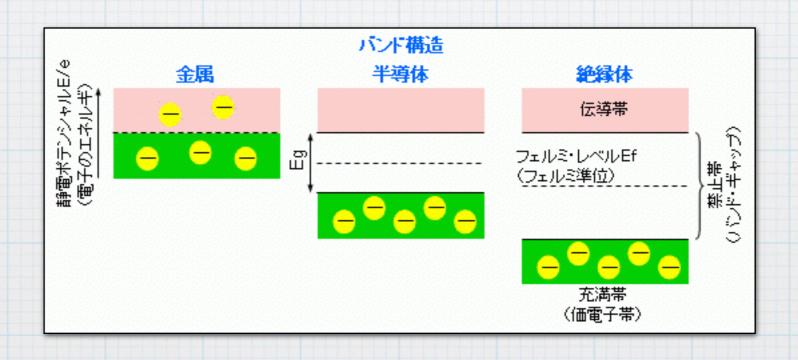
- * 価電子帯:すべてのエネルギー準位に電子が埋まっているバンド
- * 伝導帯:エネルギー準位に空きがあるバンド
- * 禁制帯: 価電子帯・伝導帯間の電子が存在できないエネルギー域

* 金属の場合:

価電子帯と伝導帯が重なりあい、多くの価電子が自由に動いて電気や 熱をよく通す。また、電場に応じて動くことができる。

* 絶縁体の場合:

広い禁制帯をもち、伝導帯には電子がないので電流は流れない。 また、価電子帯は完全に埋まっているので、価電子帯の電子も電場に 応じて動くことができない。



* 半導体の場合:

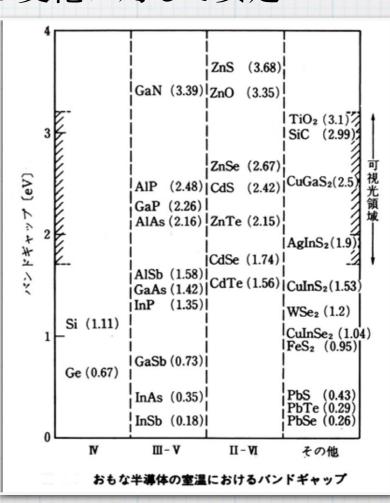
- ▶ 価電子帯の電子が禁制帯を越えて、伝導帯に移動できる。
- ▶ エネルギーギャップの幅(Ed)は大抵 1 eV (0~3.5 eVの幅あり)。
- ▶ 室温における結晶構造のランダムでミクロなぶつかり合いによる 熱エネルギー(Eth)で伝導帯に電子を移動できる。(熱雑音)

$E_{th}(eV) = kT = 0.026(T/300) eV$

伝導帯へ上がることのできる電子の数は exp(-E₆/2kT) と変化するので、大きなE₆を持った半導体が好まれる(環境の変化に対して安定

なため)。

▶ 光子を吸収して、価電子帯の電子を伝導帯へ あげることができる。



* 周期表で見た半導体

IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA
		5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	
		Al Aluminum	14 Si Silicon	Phosphorus	16 S Sulfur	Cl Chlorine
Cu Copper	Zn Zinc	Ga Gallium	32 Ge Germaniy 1	As As Arsenic	Se Selenium	35 Br Bromine
47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	Sb Antimony	Te Tellurium	53 I Iodine
79 Au Gold	Hg Mercury	81 Tl Thallium	Pb Lead	Bi Bismuth		

SiやGeのような
primary semiconductorは
4列目で4個の価電子
をもつ

- * 4列目の両側の元素の合金も半導体の性質を示す。
 - ▶ III V 族半導体: GaAs, InSb ...
 - ▶ II VI 族半導体: HgCdTe ...

- * 半導体の cutoff 波長
 - 半導体表面からの深さz (μm)での光子のフラックス l(z) l(z) = l(0) exp(-αz)
 αは吸収係数で温度と波長に依存する。
 - 300 K のとき
 - α 5 μm @ 400 nm, α 0.1 μm @ 800nm
 - 77 K (液体窒素) のとき
 - α $^{7}4μm$ @400 nm, α $^{7}0.25μm$ @600nm, α $^{7}0.005μm$ @800nm
 - ν αが小さくなるほど同じ吸収率に対してより深く進むことができる
 - ▶ 波長の長い光はエネルギーが低いので、深く進める。
 - →電子を伝導帯に上げることのできない波長がある(cutoff 波長)。 cutoff 波長はEoと光子のエネルギーhvが等しくなる波長だから

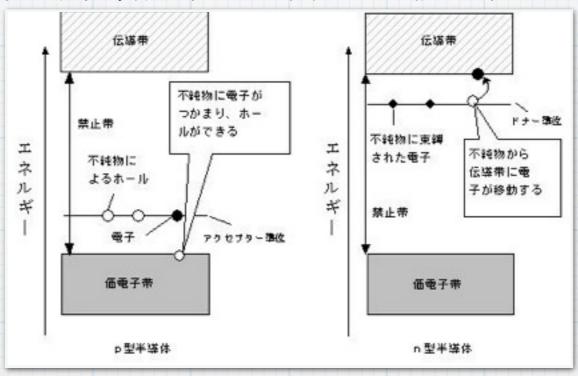
 λ_c = hc / Eo λ_c と Eoの単位をそれぞれ μ m, eVにすれば、hc = 1.24 これより長い波長の光には半導体はinsensitive

* 幾つかの半導体のエネルギーギャップとカットオフ波長

Name	Symbol	<i>T</i> (K)	E_G (eV)	λ_c (µm)
Gallium nitride	GaN	295	3.45	0.36
Silicon carbide	SiC	295	2.86	0.43
Cadmium sulfide	CdS	295	2.4	0.5
Cadmium selenide	CdSe	295	1.8	0.7
Gallium arsenide	GaAs	295	1.35	0.92
Silicon	Si	295	1.12	1.11
Germanium	Ge	295	0.67	1.85
Lead sulfide	PbS	295	0.42	2.95
Indium antimonide	InSb	295 77	0.18 0.23	6.9 5.4
Mercury cadmium telluride	$Hg_xCd_{1-x}Te$	77	$0.1 (x = 0.8) \\ 0.5 (x = 0.554)$	12.4 2.5

* 不純物半導体

- ▶ 真性半導体に不純物原子をドープして、禁制帯中に中間的な エネルギー準位を形成した半導体。
 - M型半導体: 不純物原子がより多くの価電子をもつ
 - p型半導体:不純物原子がより少ない価電子をもつ



▶ 不純物半導体は真性半導体よりも遷移エネルギーがずっと小さく なるので、赤外線の光子検出に使われる。

* 不純物半導体のカットオフ波長

Base	: Impurity	λ_c (µm)	Base	: Impurity	λ_c (μ m)
Silicon (Si)	:In	8.0	Germanium (Ge)	: Au	8.27
	:Ga	17.1		: Hg	13.8
	: Bi	17.6		: Cd	20.7
	:A1	18.1		: Cu	30.2
	:As	23.1		:Zn	37.6
	: P	27.6		: Ga	115
	: B	28.2		: B	119.6
	:Sb	28.8		: Sb	129

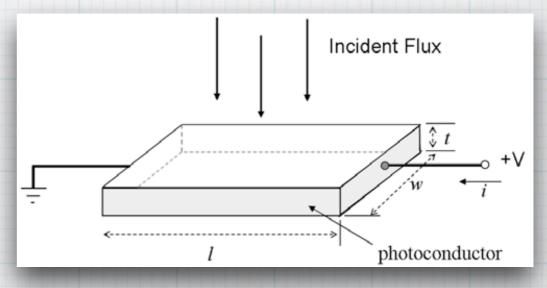
5.5.3 光伝導素子とフォトダイオード

* 光伝導素子(photoconductor):

光子が吸収すると伝導キャリアが生まれて電気伝導度が増加する。 その電気伝導度の増加として光を検出する装置。

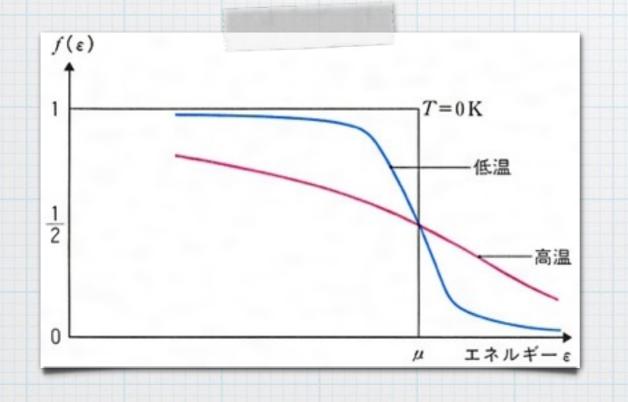
- ▶ 真性半導体の場合: 光子の吸収によって、励起した電子と価電子帯に残されたホール が伝導キャリアとして働く。
- ▼不純物半導体の場合:
 不純物イオンは移動できないため、伝導キャリアは、n型では

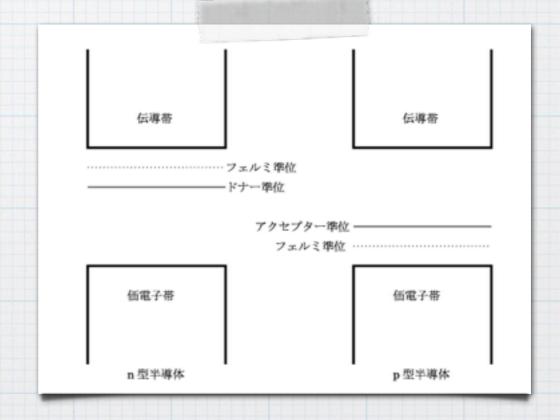
電子、p型ではホールに限られる。



- * パワー P(W) をもった入射フラックスによる平均的な光電流 $I = (e\eta P/hv)(v\tau/l)$
 - η は量子効率で、キャリアを生成する割合である。
 - ▶ P/hv は単位時間あたりに入ってきた光子の数。
 - τは生成された電子とホールが再結合して元に戻ってしまうまでの時間。
 - \mathbf{v} はキャリアの平均速度で、移動度と呼ばれる μ によって、電場 E と $\mathbf{v} = \mu$ Eという関係で結ばれている。
 - ν / 1 はキャリアが端から端まで移動するのに要する時間で、τ とこの比はゲインGになる(G = ντ/1)。
- 検出器の感度 S は I / P = (eηG/hc)λ となり、ゲインと量子効率の積できまる。
- * また、熱雑音はBを周波数の帯域として、√(4eGIB) となる。

- * フェルミ準位 (復習):
 フェルミ粒子系の化学ポテンシャルµのことで、フェルミ粒子の存在確率が1/2になるエネルギーを意味する。
 - ▶ 真性半導体の場合、エネルギーギャップの真ん中あたり。
 - ▶ p型半導体の場合、価電子帯の上端とアクセプター準位の間。
 - ▶ n型半導体の場合、ドナー準位と伝導帯の下端の間。



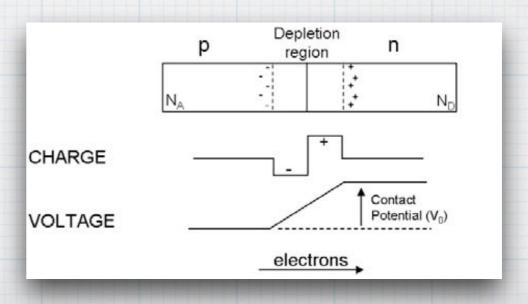


* pn 接合:

p型半導体とn型半導体を接合したもの。接合するとn型半導体の余剰な電子がp型半導体に移動してホールと接合して、接合部ではキャリアがなくなる空乏層が形成される。キャリアが移動しても不純物イオンは移動できないので、p型側は負に、n型側は正に帯電し、拡散電位が作られる。この電位によって、これ以上のキャリアの移動はできなくなる。

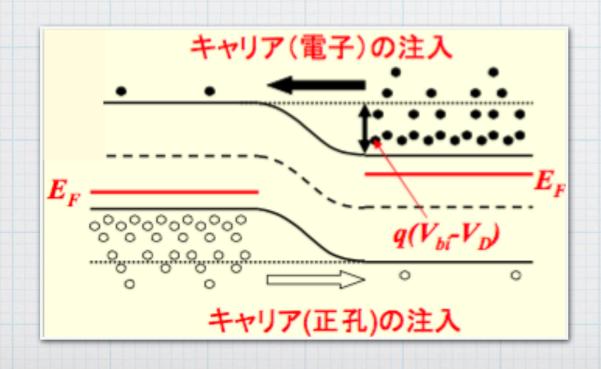
n側に正の電圧をかけると空乏層の電位差がさらに広がるので、電流 はほとんど流せない(逆バイアス)。

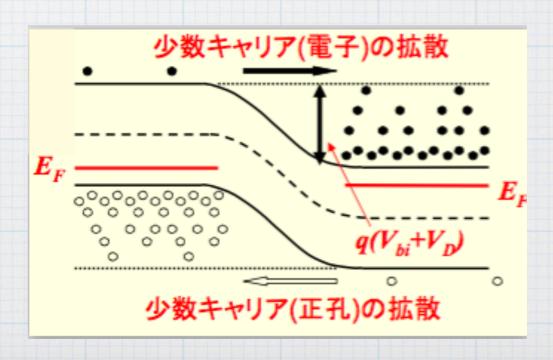
p側に正の電圧をかけると空乏層の電位差を打ち消す向きに電圧が かかるので電流が流れる(順バイアス)。



* pn 接合時のバンド構造

- ▶ 熱平衡ではフェルミ準位はどこでも同じなのでバイアス電圧が ない状態では、p型とn型のフェルミ準位が同じになる(同一準位 でのキャリアの存在確率が等しくなる)よう拡散電位がかかる。
- ▶ 順方向にバイアスをかけると、ポテンシャルが減少しキャリアの 密度もp側とn側で変わるので、それを打ち消すようにキャリアが 移動し電流が流れる。
- ▶ 逆方向にバイアスをかけると、ポテンシャルが増加しキャリアの密度もp側とn側で変わるが、移動するキャリアが少数キャリアなので、電流はほとんど流れない。



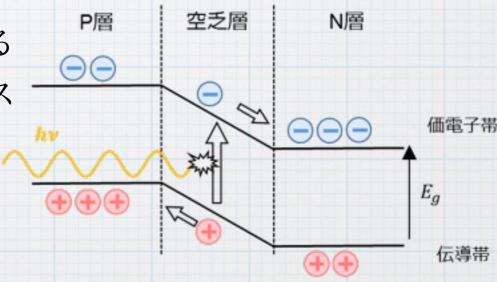


* フォトダイオード

- ▶ p型半導体とn型半導体を接合した pn 接合によるダイオードによって 光を検出する装置。
- ▶ 逆バイアス時に空乏層付近で光子吸収によってキャリアが生じるとこのキャリアで接合をこえて電流を流すことができる。この光電流を測定したり、蓄積される電荷を測定することで光を検出する。
- ▶ 生成された電子ホール対はポテンシャル の違いによって再結合する前に分離される ので、パワーP(W)をもった入射フラックス で生じる光電流 l は

I = eηP / hv 熱雑音は√(2eIB) となる。

光電流は光伝導素子でゲインを1にした ものに、雑音は√2 だけ減少している。



 E_g : バンドギャップエネルギーhv: 光のエネルギー (-光子)

5.5.4 Thermal detector

* ボロメータ:

- ▶ 熱容量 C [J/K] の吸収体と温度T₀の熱浴と両者をつなぐ熱コンダクタンス G [W/K]のワイヤから成る。
- ▶ P[W]のフラックスが入射した時のエネルギー平衡の式は

$C(d\Delta T)/(dt) + G\Delta T = P$

- 定常なエネルギー流入の場合,一定の温度に達し,それは ΔT = P/G
- この状態からエネルギー流入が突然なくなると、ATは

$\Delta T = (P / G) \exp(-t/\tau)$

と減少していく。ここでては時定数でて=C/Gである。

▶ 温度が上昇するとボロメータの抵抗が変化し、結果的に、ボロメータ間の電圧が変化し、その電圧変化が測定される。

5.5.5 Coherent detectors

* ヘテロダイン受信機:

- ▶ 観測する周波数に近い人工的な周波数を混合して、波の干渉性から、差周波(IF)を取り出す。VIF = VS VLO
- ▶ 406Hz以下の信号は増幅されてから変調され、406Hzより大きい信号は変調されてから増幅される。
- mixerが重要で、パワーを元の周波数からIFに変換する非線形な電流-電圧特性の装置で、半導体やSIS mixerが使われる。

