

セラミックス材料学2019 (7回目)
セラミックス材料の機能：
絶縁体と誘電体

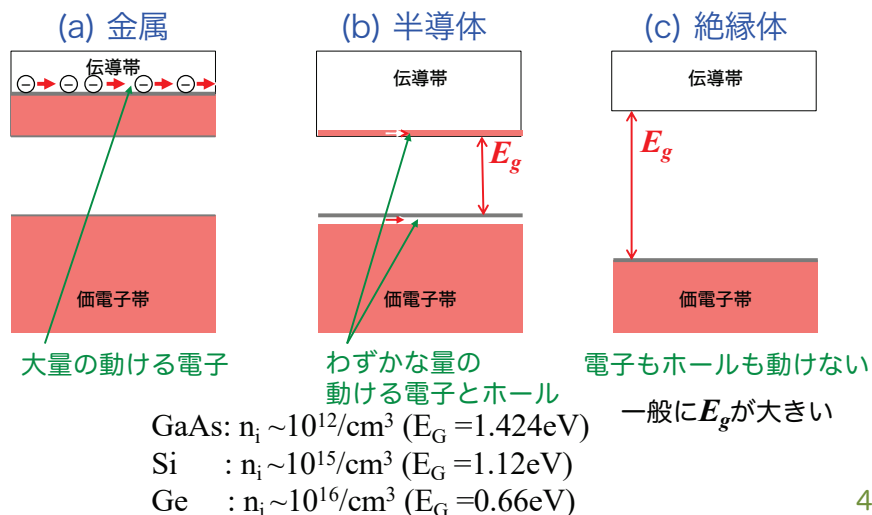


亀川 厚則

kamegawa@mmm.muroran-it.ac.jp

バンド構造と電気伝導

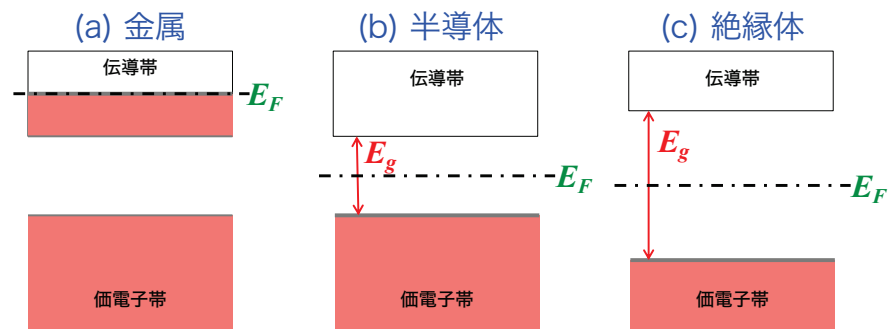
$T = T_1 \text{ K}$



バンド構造と電気伝導

$T = 0 \text{ K}$

E_F : フェルミエネルギー：絶対零度において、電子が取り得る最大のエネルギー



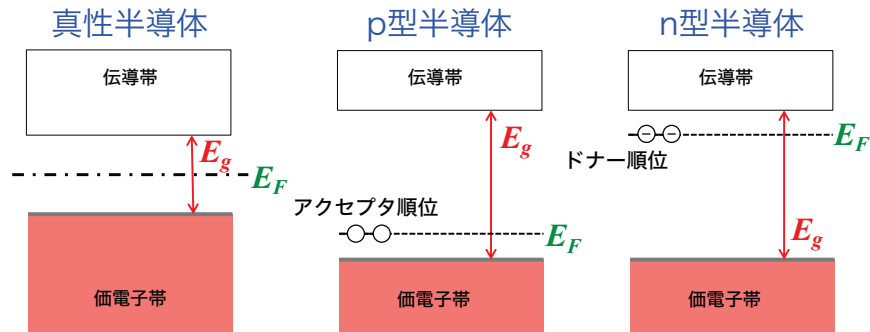
E_g : バンドギャップ：半導体、絶縁体においては、バンド構造における電子に占有された最も高いエネルギーバンド（価電子帯）の頂上から、最も低い空のバンド（伝導帯）の底までの間のエネルギーの差（およびそのエネルギー単位）

種々のセラミックスのバンドギャップ

ハロゲン化物		二元系酸化物, 炭化物, 窒化物	
材料	バンドギャップ(eV)	材料	バンドギャップ(eV)
AgBr	2.80	AlN	6.2
BaF ₂	8.85	Al ₂ O ₃ 平行	8.8
CaF ₂	12.00	Al ₂ O ₃ 垂直	8.85
KBr	0.18	BN	4.8
KCl	7.00	C(ダイヤモンド)	5.33
LiF	12.00	CdO	2.1
MgF ₂	11.00	Ga ₂ O ₃	4.60
MnF ₂	15.50	MgO	7.7
NaCl	7.30	α 型SiC	2.60~3.20
NaF	6.70	SiO ₂ (熔融シリカ)	8.3
SrF ₂	9.50	UO ₂	5.20
TiBr	2.50		

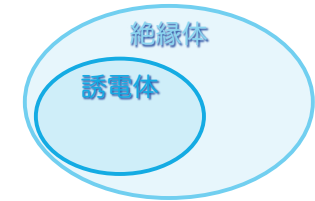
半導体のバンド構造

$T = 0 \text{ K}$



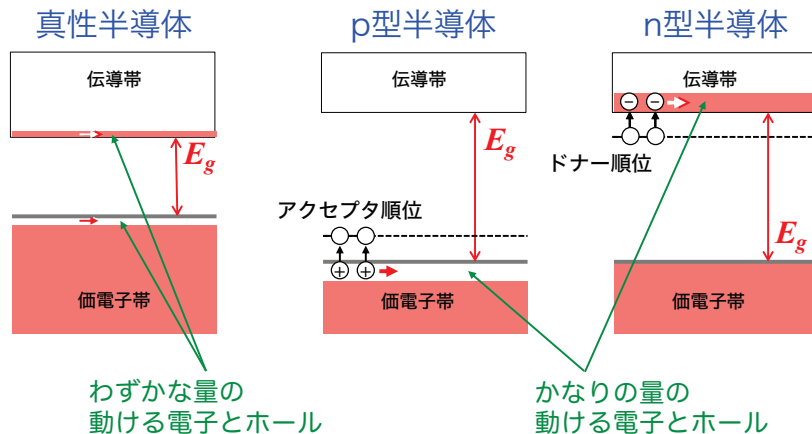
絶縁体 (insulator)

絶縁体：ある一定の電場において、電流をほとんど流さないもの。誘電率が低いことが望まれる。通常絶縁体といわれている物質が、常温で示す体積抵抗率 ρ の値は、 $10^{14} \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ 程度。誘電率が高いものは交流電流を通電することができ、誘電材料と呼ばれる。



半導体のバンド構造

$T = T_1 \text{ K}$



わずかな量の動ける電子とホール

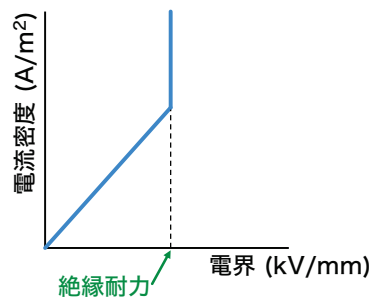
かなりの量の動ける電子とホール

様々な絶縁材料

材料名	長石質陶器	アルミナ		フォスフェライト	ムライト	ベリリア
主成分	$\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	96% Al_2O_3	99.5% Al_2O_3	2MgO \cdot SiO ₂	3Al ₂ O ₃ \cdot 2SiO ₂	99%BeO
比重 [gcm ⁻³]	2.3~2.5	3.75	3.90	2.8	3.1	2.9
熱膨張係数 [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	5~7	6.7	6.8	10	4.0	6.8
熱伝導率 [W/m \cdot K]	0.8~2.1	22	31	3	4	240
抵抗率 [Ωcm]	$10^{10} \sim 10^{12}$	$>10^{14}$	$>10^{14}$	$>10^{14}$	$>10^{14}$	$>10^{14}$
比誘電率@1MHz	2.0~6.0	9.0	9.8	6.0	6.5	6.8
絶縁耐力 [kVmm ⁻¹]	35	14	15	13	13	15
主な用途	電力用	耐熱用, プラグ用, IC基板用	耐熱用, 薄膜IC基板用	一般電気部品用, 高周波用	耐熱衝撃性良	高熱伝導基板用

絶縁破壊 (dielectric breakdown)

絶縁破壊：電気・電力・電子回路やその部品において、導体間を隔離している絶縁体（非導電性物質や空気層など）が破壊され、絶縁状態が保てなくなること。
絶縁耐力（絶縁破壊強さ）：絶縁性が保たれなくなる、材料に印加される電界強度のこと。
 アルミナ系セラミックスで大体10~15kV/mm程度



10

複素誘電率 (complex permittivity)

印加電場, $E \Rightarrow$ 交流電場

$$E = E_0 e^{j\omega t}$$

電束密度, D

$$D = D_0 e^{j\omega t - \delta}$$

δ : 印加電場に対する異相の遅れ

$$D = \epsilon_0 \epsilon^* E$$

複素誘電率: ϵ^*

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$$

$$\epsilon' = \frac{D_0}{\epsilon_0 E_0} \cos \delta$$

$$\epsilon'' = \frac{D_0}{\epsilon_0 E_0} \sin \delta$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

1秒間に単位体積あたりに誘電体が電場から受け取るエネルギー: W

$$W = \frac{1}{2} \omega \epsilon'' \epsilon_0 E_0^2$$

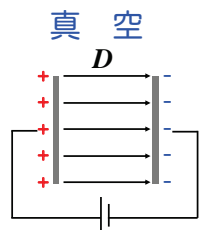
$$= \frac{1}{2} \omega \epsilon' \epsilon_0 E_0^2 \tan \delta$$

ϵ'' や $\tan \delta$ は誘電体に交流電場を印加したときのエネルギー損失

12

誘電分極 (dielectric polarization)

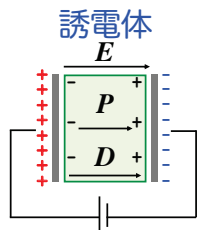
誘電現象：物体に対し外部から電場をかけたとき、(大小の差はあれ) ほとんどの物体では表面に誘導された電荷(誘導分極)が現れる「電場に対する応答」。



$$D = \epsilon_0 E$$

D : 電束密度

E : 電場 (電界)



$$D = \epsilon_0 E + P$$

$$P = \epsilon_0 \chi E$$

$$D = \epsilon_0 (1 + \chi) E$$

$$= \epsilon_r \epsilon_0 E$$

電気感受率: χ

分極: P

強誘電体のように線形関係にない場合は成立しない

比誘電率: ϵ_r

11

誘電材料 (dielectric materials)

各種材料・物質の比誘電率, ϵ_r

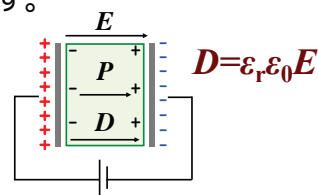
誘電体とは?

導電性より誘電性が優位な物質
 直流電圧に対して電流を流しにくい絶縁体

一般に、

誘電率の小さい材料を**絶縁材料**
 誘電率の大きな材料を**誘電材料**

と称す。



	物質名	ϵ_r
気体	空気@0°C	1.00059
	水素@0度	1.000264
	二酸化炭素	1.000985
液体	水	81
	エタノール	25.8
	アセトン	26.6
固体	ポリエチレン	2.2-2.4
	氷	4.2
	雲母	5.6-6.0
	石英ガラス(SiO ₂)	4.0
	シリコン	11.8
	酸化チタン	80-160
	チタン酸バリウム	1200-3000

13

コンデンサー (capacitor)

種々のコンデンサー

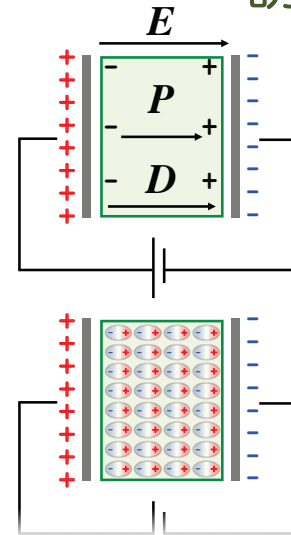


積層セラミックスコンデンサー Multilayer Ceramic Capacitor (MLCC)

外部電極 内部電極 セラミック誘電体

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = n \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{L/n}$$

誘電分極の機構



誘電分極：
正負電荷の対（電気双極子）が材料内に一様に分布しており、この正負電荷が変位している状態。

1. 電子分極 (～10¹⁵ Hz)かなり速い
原子・分子内の電子が外部電場に引っ張られ、その位置がズれる事で分極する
2. イオン分極 (～10¹³ Hz)速い
固体中のイオンが電場によってズレ、分極を生じる
3. 配向分極 (10⁶–10⁹ Hz)遅め。
双極子をもつ分子が電場により回転し、分極を生じる
4. 空間電荷分極 (～10⁴ Hz) かなり遅い
イオンが大きく移動し分布を変え、分極を生じる

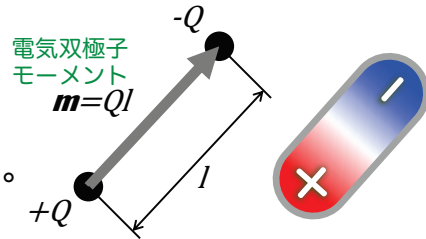
誘電体内の様子

μ：電気双極子モーメント

電気双極子モーメント

電気双極子：

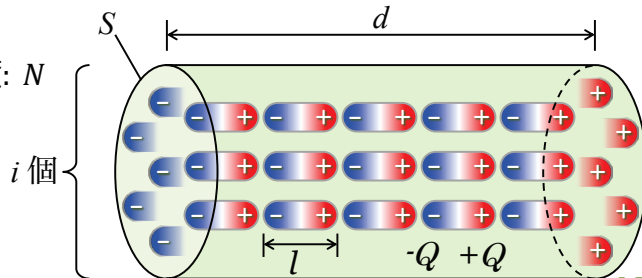
近接した正負の電荷のペア。
電気双極子は自身が電場を作るだけでなく、外部に印加された電場によって力を受ける。



巨視的分極: P

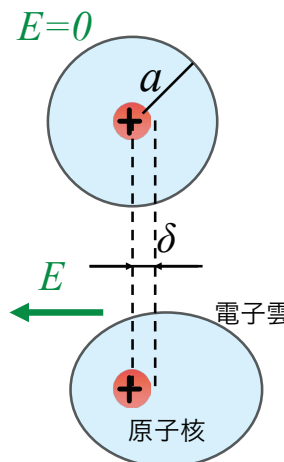
双極子の体積密度: N

$$P = Nm$$



分極の機構

～ 電子分極 (electric polarization) ～



電気双極子モーメント: μ_e

$$\mu_e = \alpha_e E$$

電子分極率: α_e

$$\alpha_e = 4\pi \epsilon_0 a^3$$

⇒原子体積に比例

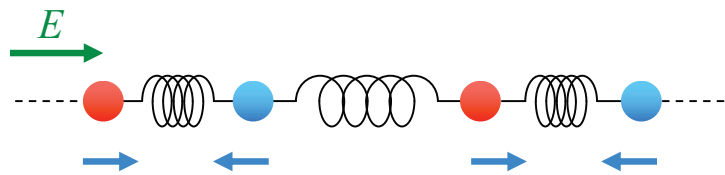
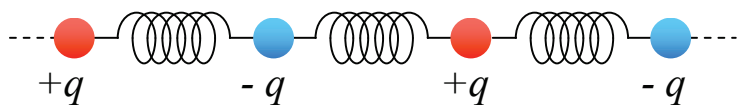
単原子イオンのイオン分極率(10⁻²⁴ cm³)

Li ⁺¹	Be ⁺²	B ⁺³	C ⁺⁴	O ⁻²	F ⁻¹	Ne
0.029	0.008	0.003	0.0013	3.88	1.04	0.390
Na ⁺¹	Mg ⁺²	Al ⁺³	Si ⁺⁴	S ⁻²	Cl ⁻¹	Ar
0.179	0.094	0.052	0.0165	10.2	3.66	1.62
K ⁺¹	Ca ⁺²	Sc ⁺³	Ti ⁺⁴	Se ⁻²	Br ⁻¹	Kr
0.83	0.47	0.286	0.189	10.5	4.77	2.46
Rb ⁺¹	Sr ⁺²	Y ⁺³	Zr ⁺⁴	Te ⁻²	I ⁻¹	Xe
1.40	0.86	0.55	0.37	14.0	7.10	3.99
Cs ⁺¹	Ba ⁺²	La ⁺³				
2.42	1.55	1.04				

分極の機構

~イオン分極 (ionic polarization) ~

$E=0$ (電場ゼロ)



電気双極子モーメント: μ_i

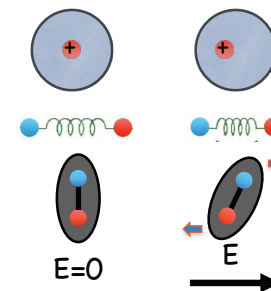
$$\mu_i = \alpha_i E$$

電子分極率: α_i

18

分極の機構 (origins of polarization)

- 電子分極, α_e
- イオン分極, α_i
- Ionic Crystals, NaCl
- 配向分極, α_o
- Polar Molecules, HCl
- 界面分極, α_s



各分極機構による分極率の総和:

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_i + \alpha_o + (\alpha_s)$$

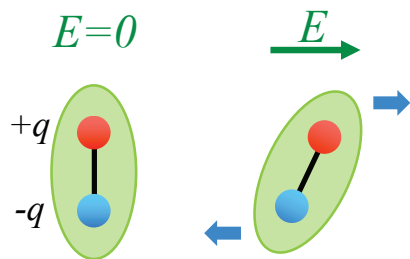
$$\alpha = \alpha_e + \alpha_i + \frac{\mu}{3kT} + (\alpha_s)$$

分極の機構

~配向分極 (dipolar polarization) ~

正負電荷の重心がずれた分子や基は永久双極子モーメント μ をもつ

- ◆ μ は熱運動により無秩序な方向分布
- ◆ 電界 E により配向



双極子モーメント μ と電場 E は古典統計力学的 (Boltzmann 分布則) に整理される

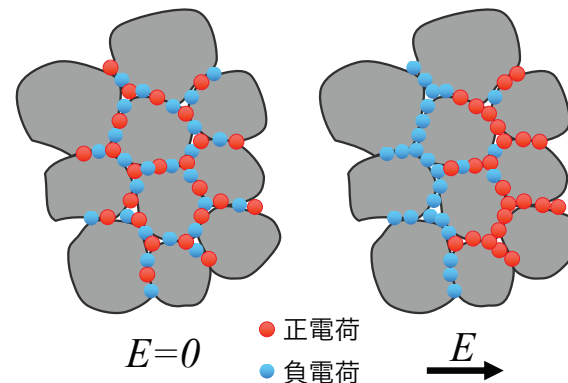
$$\alpha_p = \frac{\mu}{3kT}$$

⇒ 温度が高いほど、熱振動により分極はそろいにくい

電場によって配向する

19

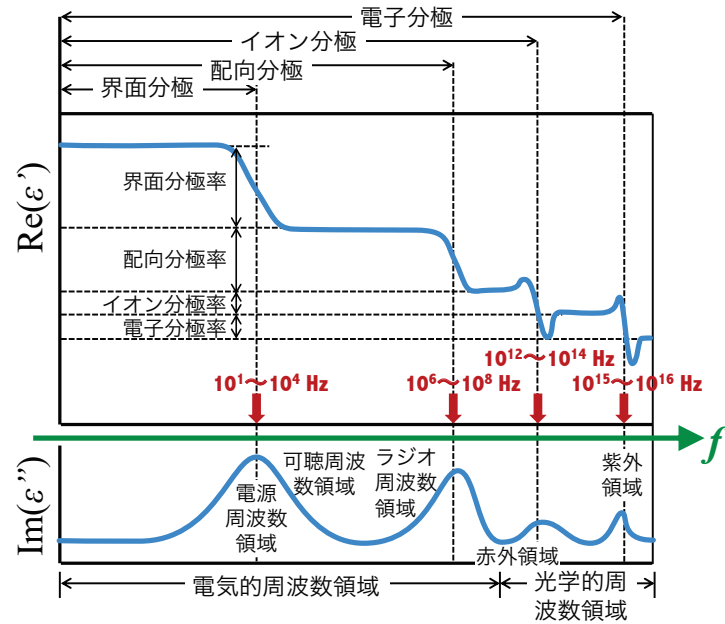
界面分極 (interfacial polarization)



誘電体が不均一の場合、異種物質間の境界に正負の電荷が蓄積される。例えば、材料内には多数の結晶粒界が存在する。その粒界には正負の空間電荷が蓄積されているが、外部電界が印加されると、分極が生じる。

21

誘電分散 (dielectric dispersion)



誘電分散 (dielectric dispersion)

誘電率が周波数によって変化⇒誘電分散

外部から印加する交流電場の振動速度を上げていくと、動きの遅い成分から次第に追従できなくなり、誘電率に寄与できなくなっていく

