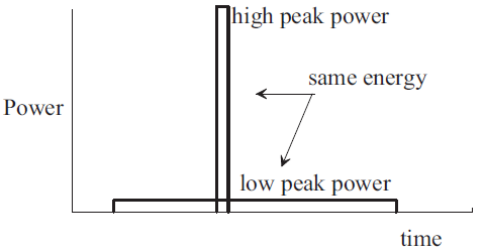
第１章：パルスパワー工学の基礎

パルスパワーの定義，パルスパワー工学の歴史と分類，応用分野と応用装置，パルスパワー技術の特長，装置の基本構成，電磁気学的基礎知識，容量性および誘導性エネルギー蓄積回路

1.1 パルスパワー工学とは

パルスパワーの定義：パルス状の電力（パワー）で，通常時間的空間的に高度に圧縮された状態

- エネルギー E [J] がパルス幅 τ [s] に放出されたときのパワー P [W] は



$$P = \frac{E}{\tau} \qquad (1.1)$$

- 小エネルギーでも，τ 小であれば高パワー
- 全世界の総発電容量：1012 W，パルスパワー：1014 W の例
- パルス幅：nsec ，電圧ピーク 数 10k～M V

パルスパワー工学の歴史と分類

発展の経緯

- 1925　マルクス回路(Marx generator)
- 1945　コンデンサ放電
- 1965　ハイパワービーム発生
- 1985　磁気パルス圧縮回路付きエキシマレーザ用電源
- 1995　全固体電源
- 2000　マイクロパルスパワー

研究分野別の大分類

- 軍事：
- 1960～1970：　核融合・プラズマ分野
- 1980～　：　上記＋加工・材料分野
- 1990～　：　生物・環境分野

代表的装置名

Lasers, Precision Thrusters, Simulators (nuclear weapons effects simulators), X ray generators, Precision /Localized Hardening of Metals, Micromachining, Magneforming, Shock forming, Particle accelerators, Fusion research, Detonators, Cigarette lighters, Communications, Radar, Acoustic Ranging, Lidar, Impulse welding, Magnetizing units, Electric guns, Toys, etc.

パルスパワー技術の特徴

1. 極限状態を簡単に実現できる従来の延長線上にはない新しい技術
2. ナノ秒以下の高電圧・パルス電力，を負荷に加える技術，計測技術
3. 極めて大きな電界強度とエネルギー密度による過渡，非線形現象が対象

1.2 電気磁気学の基礎知識

A) 基礎方程式

1）　クーロンの法則　$F = q\boldsymbol{E}$

2）　ビオ・サバールの法則　$F = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$

3）　ローレンツ力　$F = q(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})$

4）　マクスウェルの方程式（真空中）

$$\mathrm{rot}\boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$

$$\mathrm{div}\boldsymbol{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\mathrm{rot}\boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{i} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t}$$

$$\mathrm{div}\boldsymbol{B} = 0$$

5）　$\boldsymbol{D} = \varepsilon \boldsymbol{E},\ \boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{H},\ \boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E}$

H (A/m), D(C/m^2), B(T), H (A/m2), ρ(C/m^3)

B) 電界・磁界の計算例

1）　円柱導体回りの磁界

2）　環状ソレノイド内部の磁束密度：$B =$

3）　環状ソレノイドの自己インダクタンス：$L =$

4）　点電荷による電界

5）　線電荷による電界

6）　並行平板の磁界

7）　単位長さあたりの並行平板のインダクタンス（板厚，抵抗分無視）

8）　並行平板のキャパシタンス

並行平板のインピーダンス（抵抗分無視）

9）　同軸円筒導体の磁束密度

(1)　$r > b$:

(2)　$a < r < b$:

10）同軸円筒のキャパシタンス

11）同軸円筒のインピーダンス（抵抗分無視）

$\varepsilon \equiv \varepsilon_0 \varepsilon_r, \varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m

$\mu \equiv \mu_0 \mu_r, \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m

σ [S]

6)　ファラデーの法則 $V = -\dfrac{d\phi}{dt}$

$$\oint \boldsymbol{E} \bullet d\boldsymbol{l} = -\int_S \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} d\boldsymbol{s}$$

7)　アンペアの法則 $\oint \boldsymbol{H} \bullet d\boldsymbol{l} = NI$

$$\oint \boldsymbol{B} \bullet d\boldsymbol{l} = \mu_0 NI$$

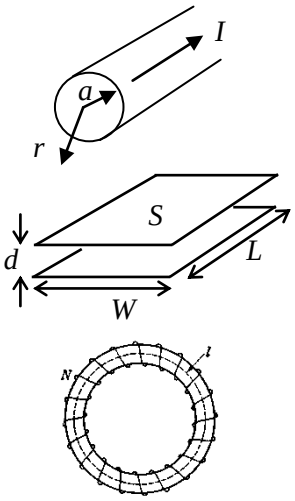
8)　ガウスの法則 $\oint \boldsymbol{E} \bullet \boldsymbol{n}\, ds = \dfrac{\rho}{\varepsilon_0}$

9)　ポインティングの定理

$$\mathrm{div}\left(\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}\right) + \boldsymbol{E} \bullet \boldsymbol{i} + \left(\boldsymbol{E} \bullet \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} + \boldsymbol{H} \bullet \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}\right) = 0$$

1 項:領域表面から出入りするエネルギー流
2 項:電流に対してなされる仕事
3 項:空間に蓄えられる電界, 磁界のエネルギーの変化分

12)　同軸円筒内部の電界集中
f :電界集中係数
13)　単位長さあたりの同軸円筒のインダクタンス
14)　誘電体と気体との電界分担
15)　表皮効果



1.3 パルスパワーの応用　（一種のエネルギー変換）

- 高速高電圧パルス放電（～100 kV, ～100 ns）
  パルスコロナ放電:NOx 処理, 脱臭処理, オゾン生成, プラズマイオンコート
- 誘導加速
- 大電流放電（> kA, < □s）
  軟 X 線発生（EUV）, 硬 X 線発生（診断）, 衝撃波発生（粉砕）,
- 微粒子生成, レールガン
- パルスレーザ
  ガラスレーザ（核融合）, エキシマレーザ（半導体リソグラフィ, 表面改質）
- 粒子ビーム
  電子ビーム（NOx 処理, イオンビーム（表面改質, 薄膜作成, 核融合）

EUV 光源開発を例にパルスパワー技術を考える

○光に関する基本事項

単色光	特定波長の光または振動数（波長）が一定の光:レーザ
スペクトル	可視光線その他の光を分光器で分解したときに得られる成分
コヒーレント光	光の位相が時間的に変化しない光:レーザ
インコヒーレント光	光の位相が時間的に変化する光:白熱電球, 蛍光ランプ

○放射の種類（放射とは電磁波あるいは粒子の形で伝搬するエネルギーのこと）

電磁放射	連続光
熱放射	連続光
ルミネセンス	線スペクトル

○用語

波長＝光速／振動数　$c = \lambda \cdot \nu$（ニュー, 振動数, 周波数）
光速＝2.988×108m/s
エネルギー＝プランク定数×振動数: $E = h \cdot \nu$, プランク定数＝6.63×10-34 J･s

＝ボルツマン定数×絶対温度: $E = kT$, ボルツマン定数＝1.38×10-23 J/K
1 エレクトロンボルト eV＝電気素量×1 ボルト＝1.60×10-19 J
1eV＝1.60×10-19 J＝8.06×103 cm-1＝2.42×1014 Hz=1.16×104 K
波数　　周波数　　温度
パワー(W)＝エネルギー／時間＝光子エネルギー×個数／時間
波長による波動の分類
宇宙線, ガンマ線, X 線, 極端紫外(EUV), 真空紫外(VUV), 紫外(UV)
可視光(Visible), 近赤外(near-IR), 遠赤外(FIR), 電波, 高周波・可聴周波・低周波,
UVA, UVB, UVC

○プランクの放射束：絶対温度，波長λにおける黒体の分光放射発散度

$$M_e\ \lambda, T\ = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad [\mathrm{Wm^{-3}}]$$

$$c_1 = 2\pi c^2 h = 3.742 \times 10^{-16}\ \ \mathrm{Wm^2}\ \ c_2 = \frac{ch}{k} = 1.439 \times 10^{-2}\ \ \mathrm{mK}$$

○半導体リソグラフィに使われる光源

1960　水銀ランプの g 線（436 nm）
1980　水銀ランプの i 線（365 nm）
1995　KrF エキシマレーザ（248 nm）
1998　ArF エキシマレーザ（193 nm）
20??　EUV 光源（極端紫外: Extreme Ultra-Violet）（13.5 nm）

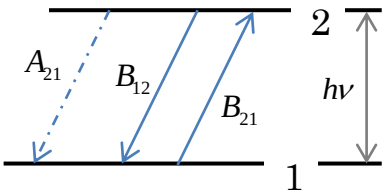
○パルスパワーによる短パルス　＜＞　短波長レーザ発振

熱平衡状態の粒子分布

$$N_2 = N_1 \exp\left(-\frac{W_2 - W_1}{k_B T}\right)$$

$W_2 - W_1 = h\nu$:エネルギー準位差

通常は反転分布: $N_2 >> N_1$とはならないので, 外部からエネルギー注入が必要
電流ポンピング
光ポンピング



$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2 + B_{12}N_1\rho(\nu) - B_{21}N_2\rho(\nu) = -\frac{dN_1}{dt}$$

A 係数　自然放出確率:周波数の 3 乗に比例して増加
γ_2 , γ_1
B 係数　誘導放出・吸収確率
係数の関係式: $\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi n^2 h\nu^3}{c^3}$
※　短波長, 高周波数ほど反転分布形成が困難