

講義予定

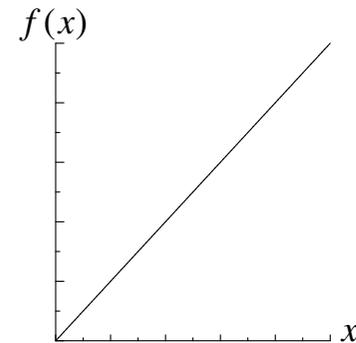
- 1. 光エレクトロニクスとは
- 2. 光の性質1: マクスウェルの方程式
- 3. 光の性質2: 物質中での光
- 4. 光の性質3: 干渉、回折、屈折
- 5. 光と物質の相互作用: 光の吸収・放出
- 6. レーザーの原理: 誘導放出・反転分布
- 7. 種々の光源: ランプ、LED、レーザー
- 8. 半導体レーザー
- 9. 光検出器
- 10. 撮像装置
- 11. 光導波路: 光ファイバーの原理
- 12. 光の制御: 光変調法
- 13. 光ディスクについて
- 14. **非線形光学現象について**
- 15. まとめ

非線形現象



・線形

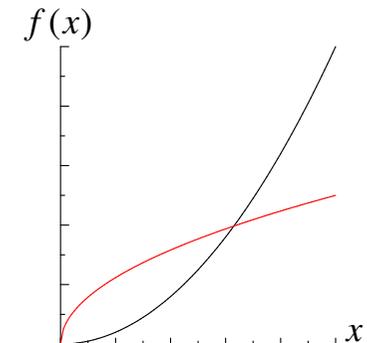
$$f(x) = ax$$



・非線形

$$f(x) = ax + bx^2 + cx^3 + \dots$$

$$f(x) = ax + bx^{1/2} + \dots$$

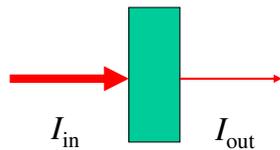


非線形光学現象

出力される光が入力する光に**比例しない**現象

屈折率、透過率などが光の強度に依存する

線形



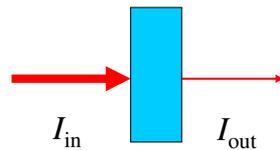
$$I_{out} = aI_{in}$$

$$1 \rightarrow 0.1$$

$$10 \rightarrow 1$$

$$100 \rightarrow 10$$

非線形



$$I_{out} = aI_{in} + bI_{in}^2 + \dots$$

$$1 \rightarrow 0.1$$

$$10 \rightarrow 2$$

$$100 \rightarrow 50$$

なぜ、こんなことが起こるのか？

Each nonlinear optical process may consist of two parts. The intense light first induces a nonlinear response in a medium, and then the medium in reacting modifies the optical fields in a nonlinear way.

.....

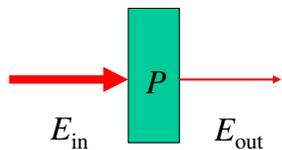
Are all media basically nonlinear? The answer is yes. Even in the case of a vacuum, photons can interact through vacuum polarization. The nonlinearity is so small that with currently available light source,

In the presence of a medium, the nonlinearity is greatly enhanced through interaction of light with matter. Photons can now interact much more effectively through polarization of the medium.

“The Principles of Nonlinear Optics” Y. R. Shen (2003)

物質の光に対する応答は基本的に「非線形」だから・・・

何が起きているのか？



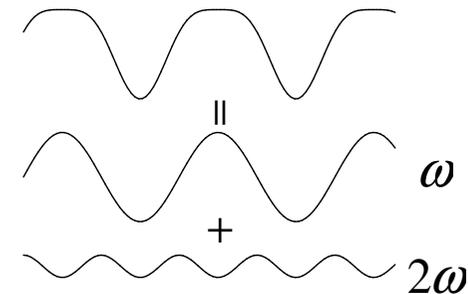
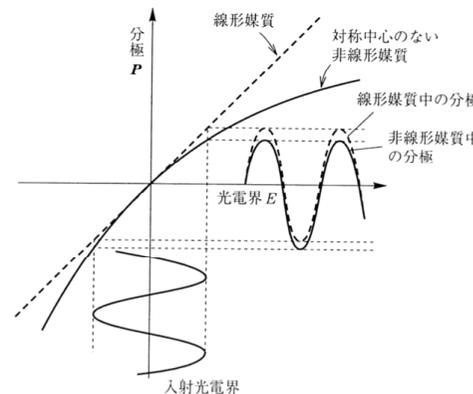
$$\begin{aligned}
 \mathbf{P} &= \mathbf{P}_L + \mathbf{P}_{NL} = \epsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E} + \mathbf{P}_{NL} \\
 &= \epsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E}\mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(3)} \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots \\
 &= \epsilon_0 (\chi^{(1)} + \chi^{(2)} \mathbf{E} + \chi^{(3)} \mathbf{E}\mathbf{E} + \dots) \mathbf{E}
 \end{aligned}$$

1. 強い光電場Eが物質に入射
2. 物質中に電場に比例しない分極P_{NL}が発生
3. その分極が電場を発生させて外部の電場と混ざる
4. 非線形信号として出力される

非線形光学効果

・光の周波数変換 非線形分極

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P} &= \mathbf{P}_L + \mathbf{P}_{NL} = \epsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E} + \mathbf{P}_{NL} \\
 &= \epsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E}\mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(3)} \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots \\
 &= \epsilon_0 (\chi^{(1)} + \chi^{(2)} \mathbf{E} + \chi^{(3)} \mathbf{E}\mathbf{E} + \dots) \mathbf{E}
 \end{aligned}$$



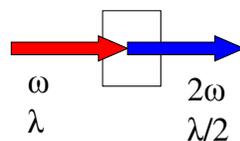
2次の非線形性

平面波 $E_i(z, t) = E_i(z) \cos(\omega_i t - \beta_i z)$ (i=1,2) $\cos(\omega t) = \frac{1}{2}(e^{i\omega t} + e^{-i\omega t})$

合成電場 $E(z, t) = E_1(z, t) + E_2(z, t)$

2次の分極 $P^{(2)}(z, t) = \epsilon_0 \chi^{(2)} E(z, t) E(z, t)$

- 2ω₁, 2ω₂ (第2高調波発生, SHG),
- ω₁+ω₂ (和周波発生, SFG),
- ω₁-ω₂ (差周波発生, DFG)



非線形光学結晶

	KDP	KD*P	LiIO ₃	KTP	BBO	LBO
透過波長範囲 (μm)	0.12 ~ 1.5	0.2 ~ 2.0	0.3 ~ 6.0	0.35 ~ 4.4	0.13 ~ 3.5	0.16 ~ 3.2
位相整合範囲 (μm)	0.517 ~ 1.5	0.732 ~ 1.5	0.57 ~ 5.5	1.0 ~ 2.5	0.1 ~ 3.3	0.4 ~ 2.6
タイプ	(I)	(II)	(I)	(I)	(I) 0.52μ ~ 3.3 (II)	

KH₂PO₄

LiIO₃

KTiOPO₄

βBaB₂O₄

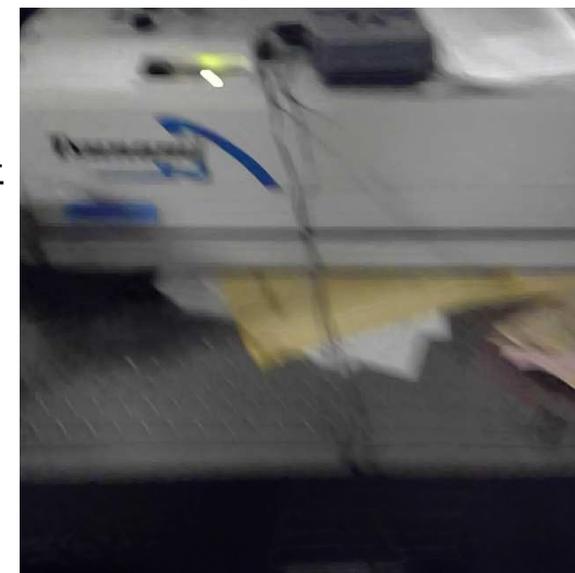
LiB₃O₅

SHGの例

チタン・サファイアレーザー
波長800nm/パルス幅1ps光パルス

↓
非線形結晶(β-BBO)

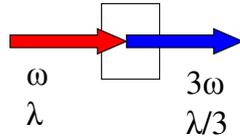
↓
2倍の周波数
(波長は半分の400nm)の光に



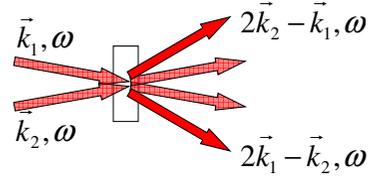
3次の非線形性

3次の分極 $P^{(3)}(z,t) = \epsilon_0 \chi^{(3)} E(z,t)E(z,t)E(z,t)$

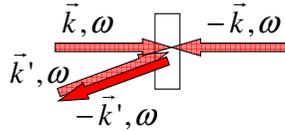
・第3高調波発生(THG):



・縮退4光波混合(DFWM):



・位相共役波:
(時間反転波)



・吸収飽和、光力一効果

$$P = P^{(1)} + P^{(3)} = \epsilon_0 \chi^{(1)} E + \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3 = \epsilon_0 (\chi^{(1)} + \chi^{(3)} E^2) E$$

$$= \epsilon_0 (\chi^{(1)} + \chi^{(3)} I) E = \epsilon_0 \chi(I) E$$

$$D = \epsilon_0 E + P = \epsilon_0 E + \epsilon_0 \chi(I) E = \epsilon(I) E$$

$$\hat{n}(I) = \sqrt{\frac{\epsilon(I)}{\epsilon_0}} = \sqrt{1 + \chi(I)}$$

= n(I) + iκ(I) 複素屈折率 → 実部: 屈折率、虚部: 消衰係数

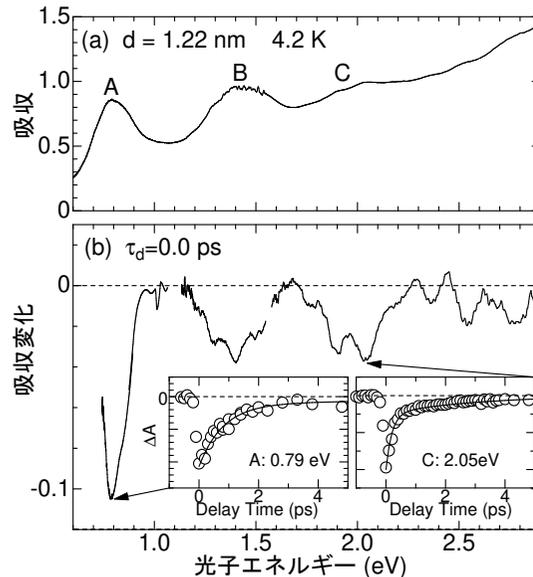
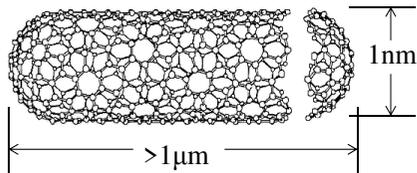
屈折率、吸収係数(透過率)が光の強度に依存

→ 光スイッチング

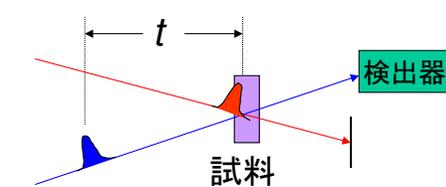


吸収飽和の例

単層カーボンナノチューブ



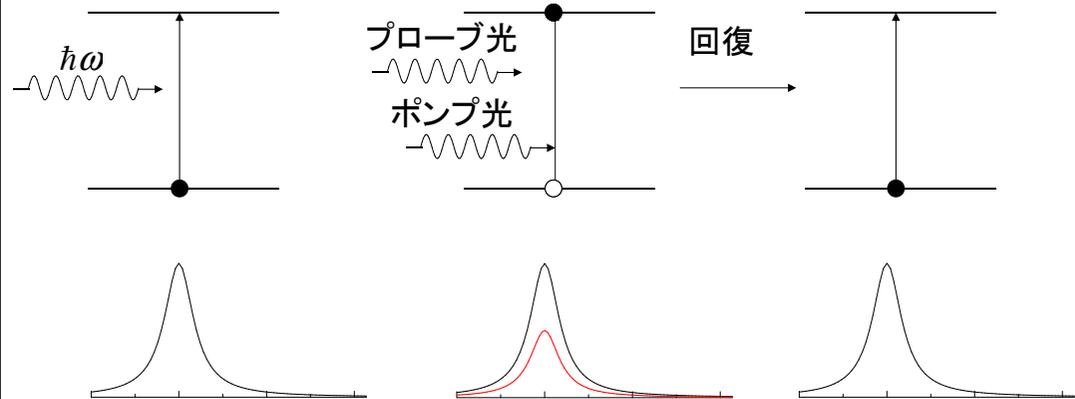
ポンプ光パルス



プローブ光パルス

ポンプ・プローブ分光

吸収



吸収変化は
励起状態の寿命を反映
非線形性を反映

カーボンナノチューブに光

透過量制御し高速通信

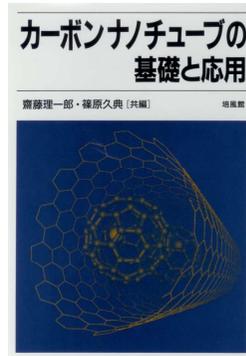
甲南大、情通機構と開発

【神戸】甲南大学理工学部の市田正雄教授は情報通信研究機構の齋藤伸浩主任研究員と共同で、カーボンナノチューブに光を当てると光の透過量の制御を時間で行えることを見つけた。通信に用いる光通信管光に用いるON/OFFの「値」を変えることができ、高速通信に利用できる。今後カーボンナノチューブのサイズや管長の波長を変え、光通信に最適な条件を探っていく。

カーボンナノチューブは、管の長さを変えて、光の透過量が変わる現象を利用する。カーボンナノチューブに光を当てると、光を透過して出てくる量は、管の長さや管の直径によって異なる。市田教授と齋藤主任研究員は、この現象を利用して、光の透過量を時間で行えるようにした。具体的には、管の長さや管の直径を変えて、光の透過量を制御する。これにより、光通信に用いるON/OFFの「値」を変えることができる。これは、従来の光通信とは異なり、光の透過量を時間で行えるという点で、大きな特徴がある。

実験では直径1.2ナノメートルの単層カーボンナノチューブを用いた。このカーボンナノチューブに、光通信に用いられる1.55ミクロメートルの波長(1550ナノメートル)の光を当てると、光の透過量が約40%減少した。これは、管の長さや管の直径によって異なる。市田教授と齋藤主任研究員は、この現象を利用して、光の透過量を時間で行えるようにした。具体的には、管の長さや管の直径を変えて、光の透過量を制御する。これにより、光通信に用いるON/OFFの「値」を変えることができる。これは、従来の光通信とは異なり、光の透過量を時間で行えるという点で、大きな特徴がある。

科学技術



「カーボンナノチューブの基礎と応用」 培風館
7章: ナノチューブの光物性の基礎と非線形光学

課題14

1. 非線形な物理現象を探してみましょう。
2. バネによる単振動はどういう場合には線形で、非線形だとどうなるだろうか？
3. 振り子の振動はどうでしょう？
4. カオス、フラクタル、ソリトンなどについて調べてみよう。