

赤外光励起による半導体中の不純物拡散の制御

– Control of diffusion in seiconductors by IR excitation –

白井光雲

大阪大学、産業科学研究所
産業科学ナノテクセンター

Koun Shirai

Nanoscience and Nanotechnology Center
ISIR, Osaka University

Outline

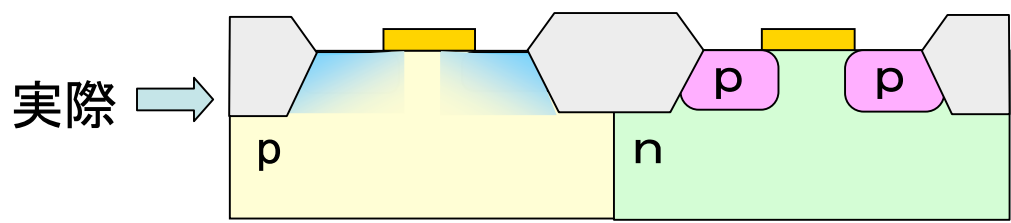
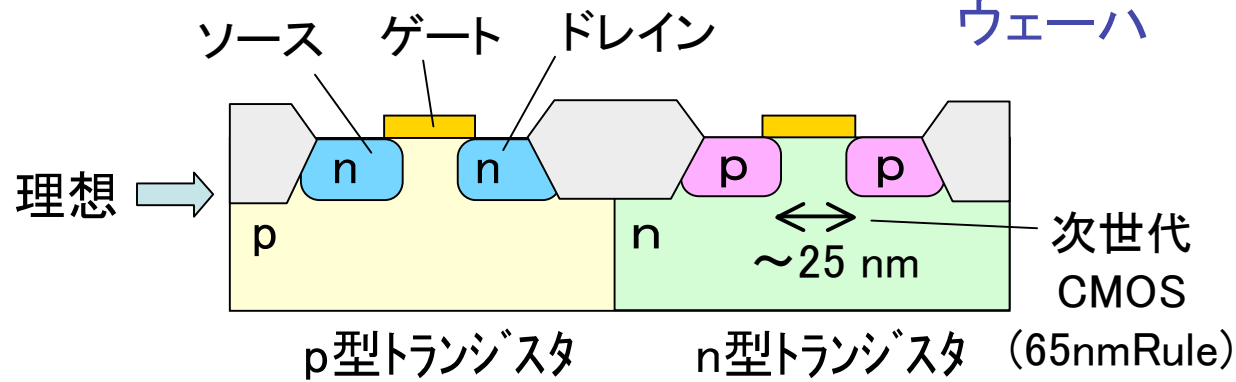
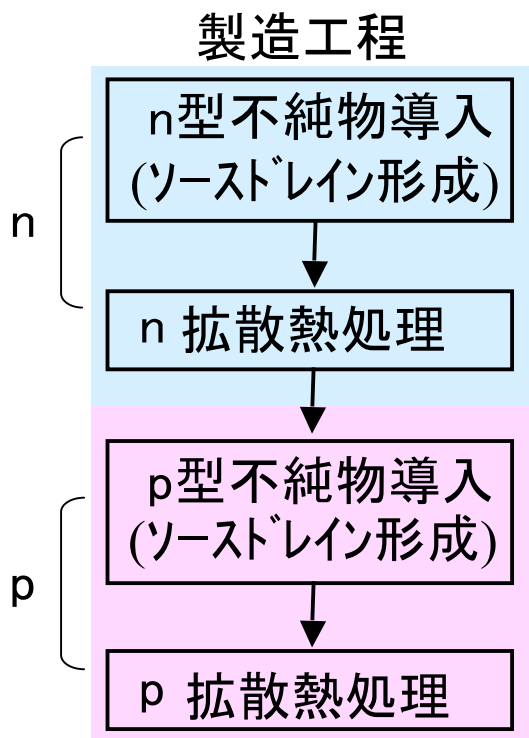
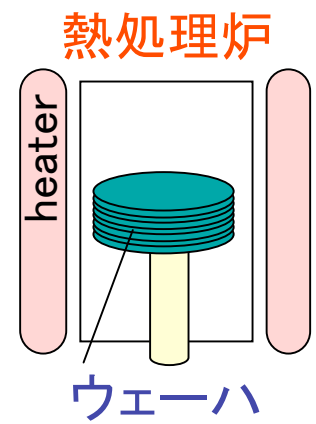
1 バックグラウンド

- ・ 産業応用からの
- ・ エネルギー緩和機構からの

2 赤外光励起による不純物拡散の試み

3 選択的拡散を目指したレーザー設計

選択的拡散の必要性



CMOSトランジスタの断面模式図

文部科学省、独創的革新技術開発研究、「赤外レーザー照射による半導体中不純物の選択的低温拡散技術の研究」 代表、金田寛(富士通)より

電子レンジ効果

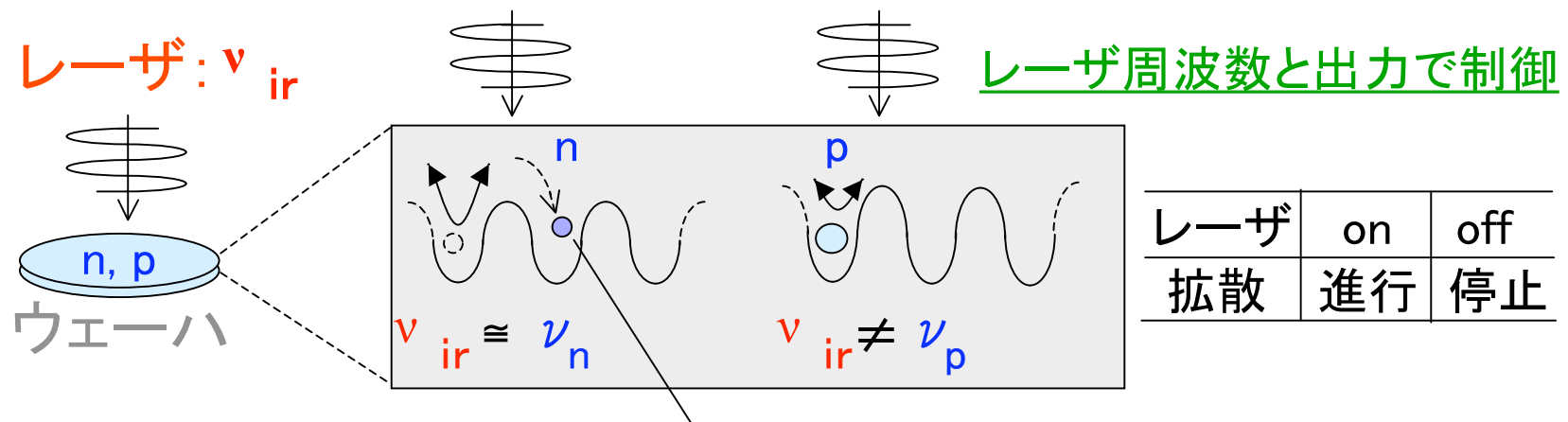
レーザの周波数 ν_{ir}

共鳴

不純物の固有振動数 ν_n, ν_p



特定の不純物の熱振動のみ加熱

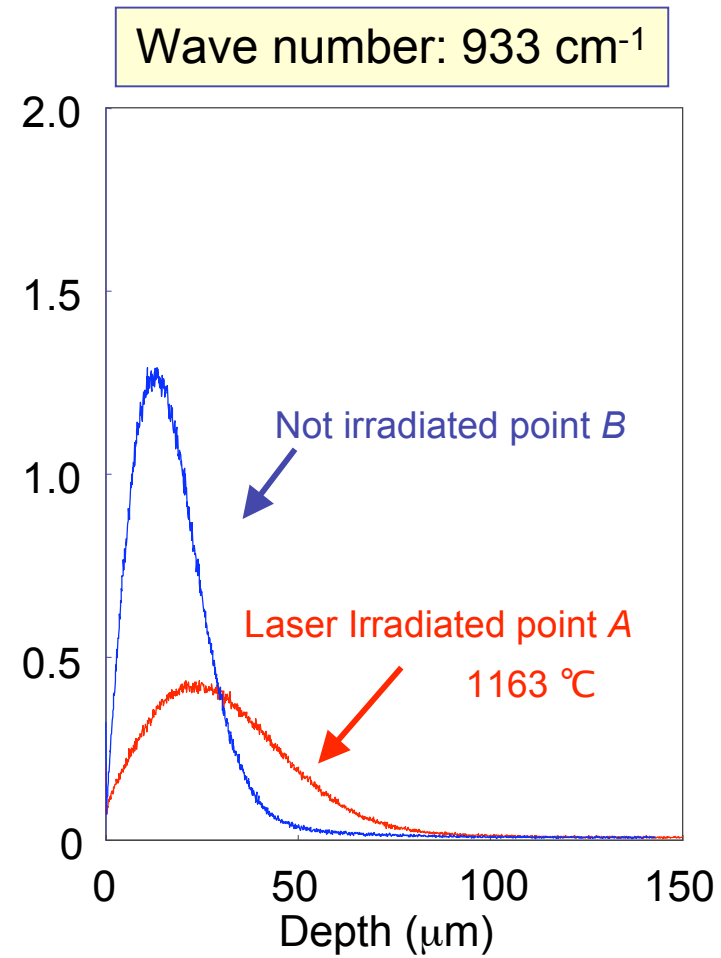
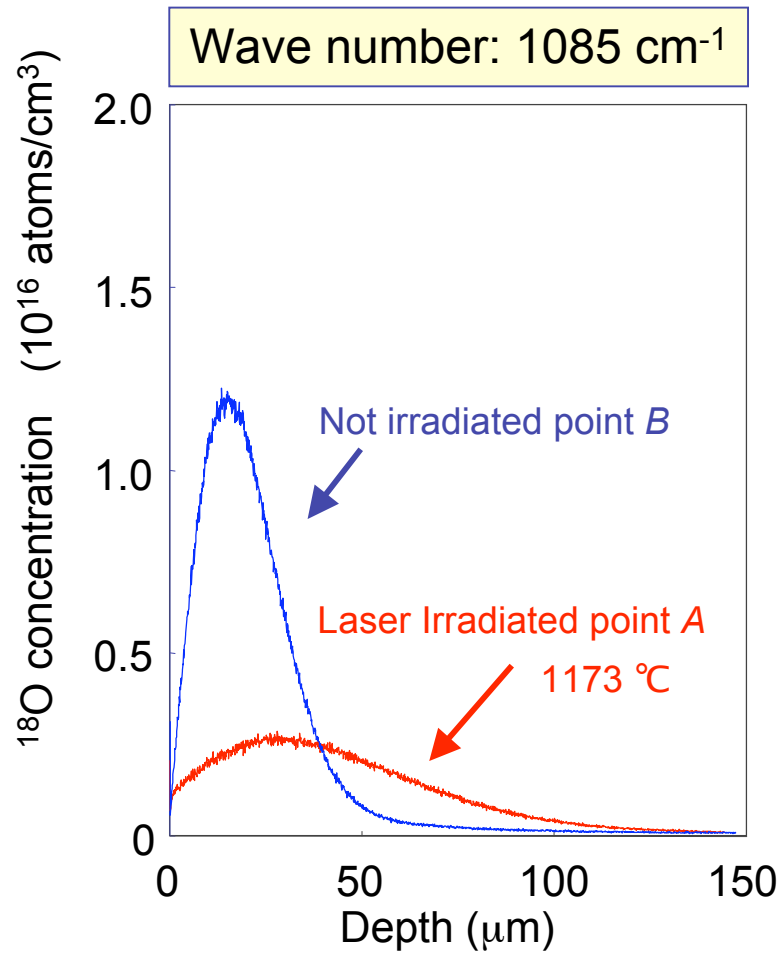


レーザに共鳴する不純物のみ拡散

- 不純物種を選択できる
- 低温で拡散できる
- 拡散を急停止できる

Laser-frequency dependence of ^{18}O diffusion enhancement

H. Kaneta (Fujitsu Ltd.)



赤外光励起のメリット

- 電子励起を引き起こさないことが必要な応用にとって重要

副作用がない

原子移動、拡散、、、

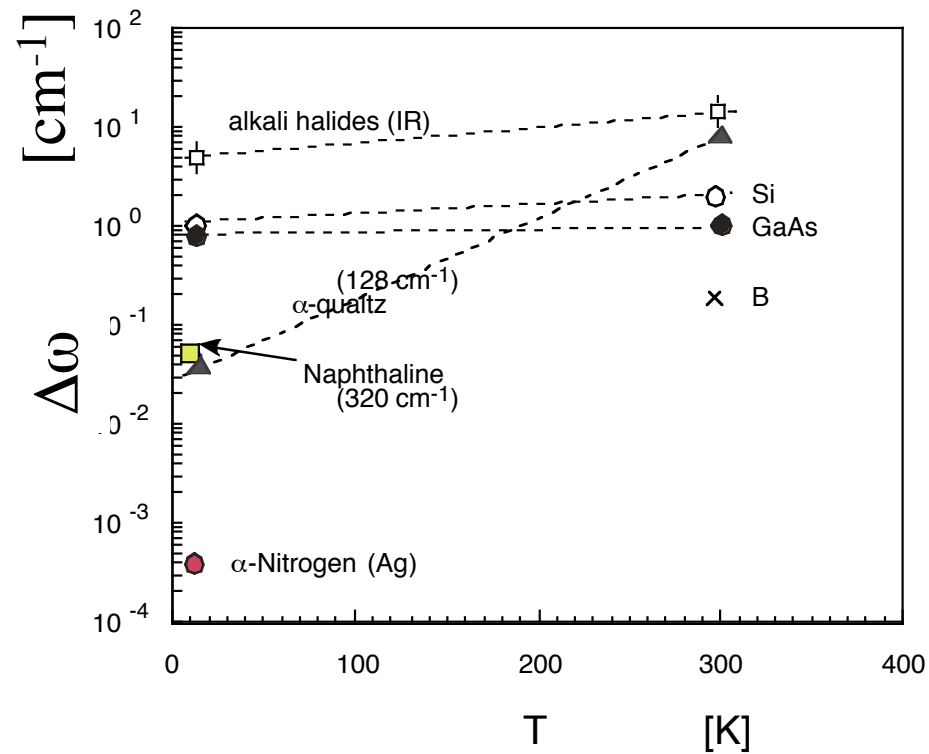
ラマン過程より直接的

- 特定の原子種を選択性

不純物振動モードがうまく選択できると、その原子種のみを変化

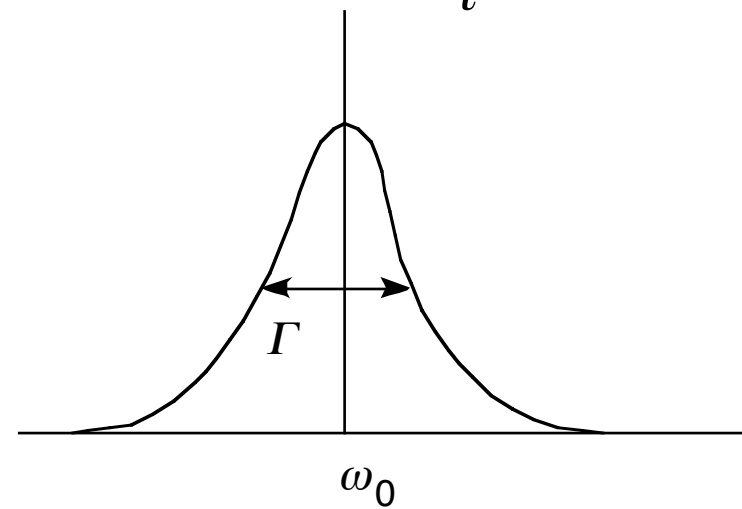
電子緩和に比べて原子緩和が遅い

フォノンのエネルギー緩和の研究



$$R(\omega) = \frac{1}{\omega^2 + i\gamma\omega - \omega_0^2}$$

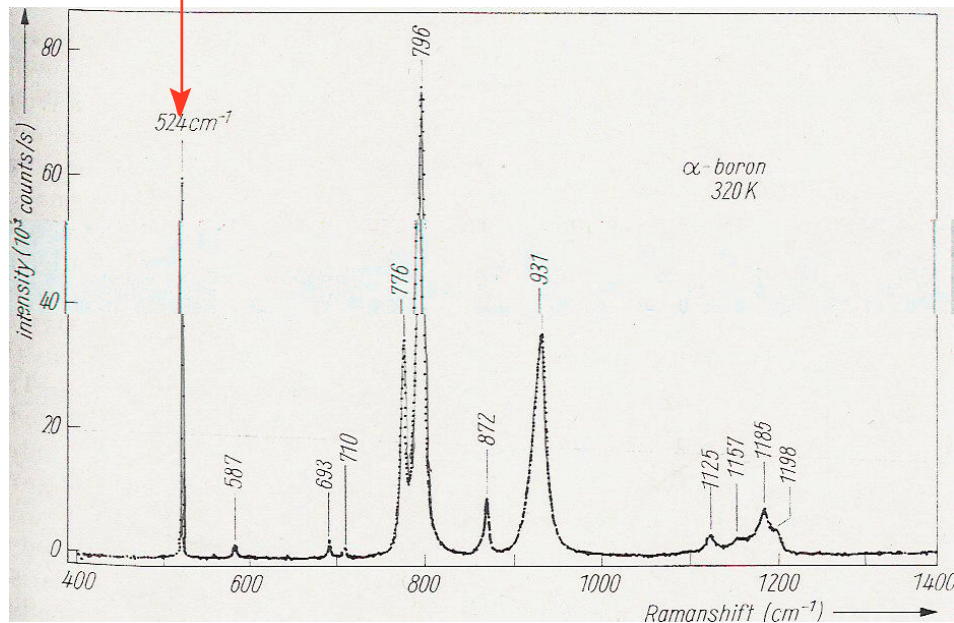
decay rate $\gamma = \frac{2\pi}{\tau}$



Story of the ghost peak

Ghost peak

Raman spectrum of α -boron



unusual properties

• $\Delta\omega < 1 \text{ cm}^{-1}$

• librational mode
why so high ω ?

• no pressure dependence
no anharmonicity ?

W. Richter and K. Ploog,
Phys. Status Solidi B **68** (1975) 201.

Phonon decay rate

probing light

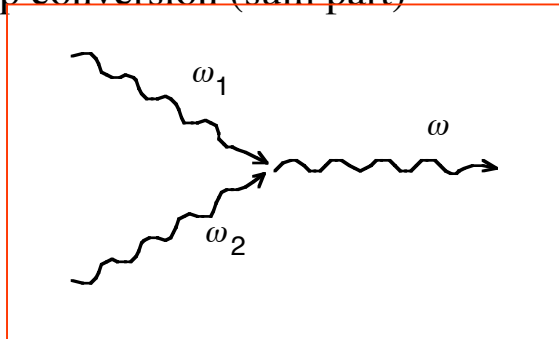
$$\Gamma(0j, \omega) = \frac{\pi \hbar}{16NM^3} \sum_{\mathbf{k}j_1, j_2} \frac{|\Phi(0j, -\mathbf{k}j_1, \mathbf{k}j_2)|^2}{\omega(0j)\omega(\mathbf{k}j_1)\omega(\mathbf{k}j_2)} S(\omega)$$

cubic anharmonic terms

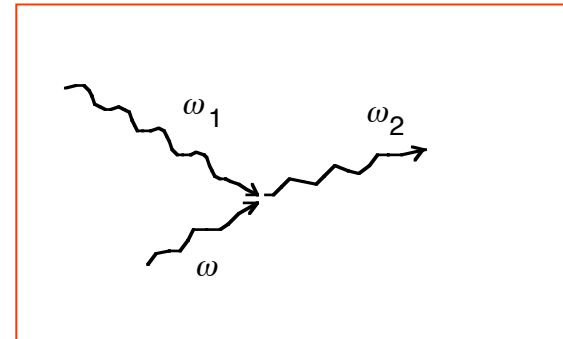
$$S(\omega) = (1 + n_1 + n_2)\delta(\omega_1 + \omega_2 - \omega) + 2(n_2 - n_1)\delta(\omega_1 - \omega_2 - \omega)$$

2-phonon DOS

up conversion (sum part)

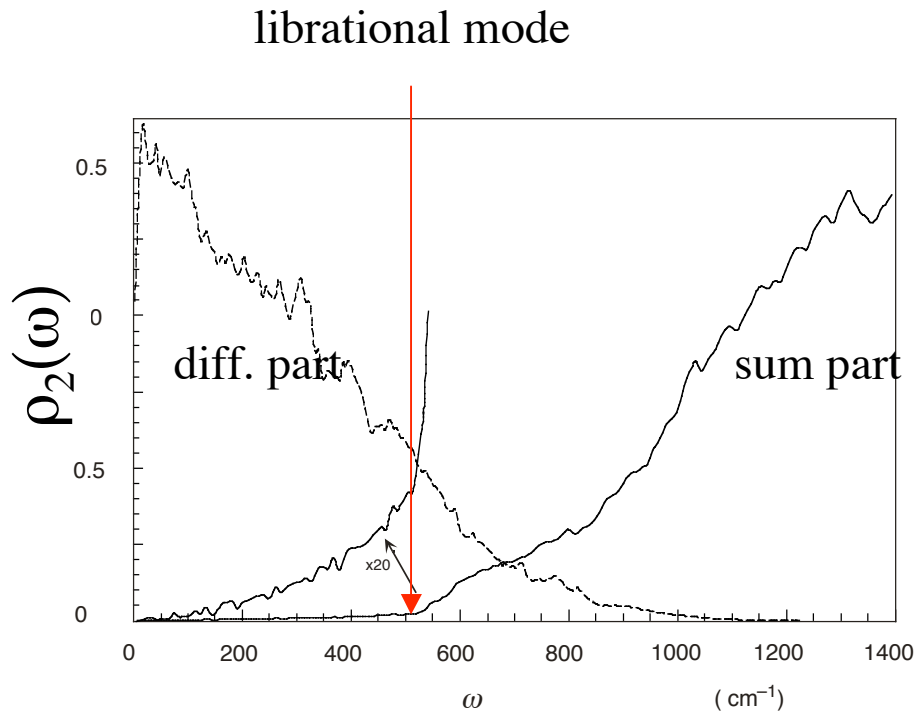


down conversion (difference part)



phonon linewidth

calculation of $\Delta\omega$



	j	$\Delta\omega/\omega$	ρ_2	γ	ω/ω_0	B	ch.
A_{1g}	36	1.7	1.1	0.142	0.22	1.21	11+11(40)
	33	1.2	0.56	0.199	0.21	1.7	29+2 (8)
	20	0.60	0.26	0.103	0.22	1.51	7+2 (16)
E_g	17	0.90	0.22	0.271	0.22	1.52	8+2 (30)
	35	1.2	1.04	0.106	0.22	1.25	12+9 (9)
	30	0.89	0.38	0.199	0.21	1.41	+3 (16)
	23	0.86	0.27	0.231	0.22	1.45	6+6 (14)
	19	0.85	0.25	0.186	0.22	1.43	8+1 (27)
	11	0.62	0.36	0.078	1.19	0.25	20-1 (10)
	6	0.10	0.58	0.008	1.90	0.18	33-6 (9)

K. Shirai, H. K.-Yoshida, J. Phys. Soc. Jpn. **67** (1998) 3801

decay time of H in Si

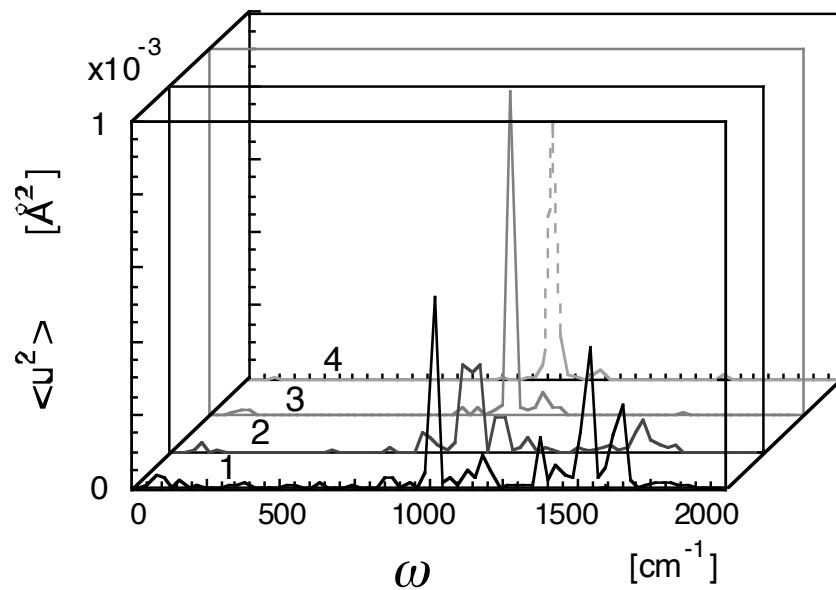
in the bulk

~ 1 ps

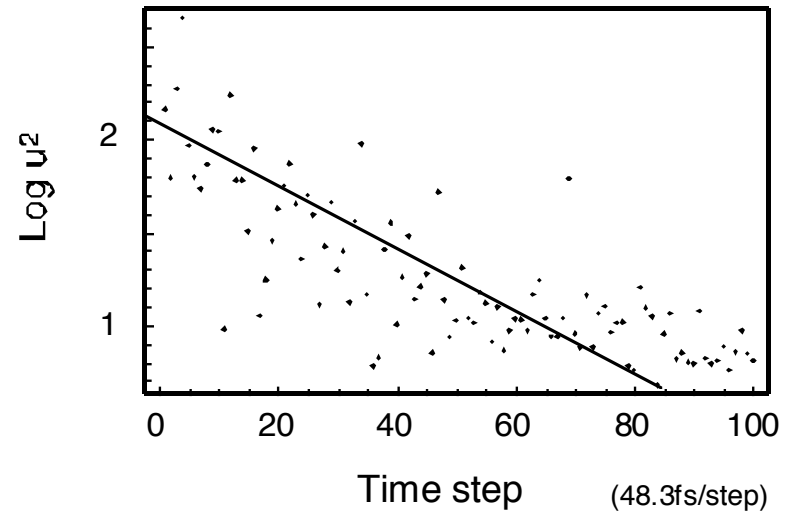
cf.

on the free surface

~ 1 ns



$\Delta t = 1.21$ fs
every 1000 steps



$\Gamma = 1.87$ cm⁻¹

K. Shirai, et al., submitted to PRB

exp.

$\Gamma = 0.73$ cm⁻¹
Budde, *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 1452 (2000)

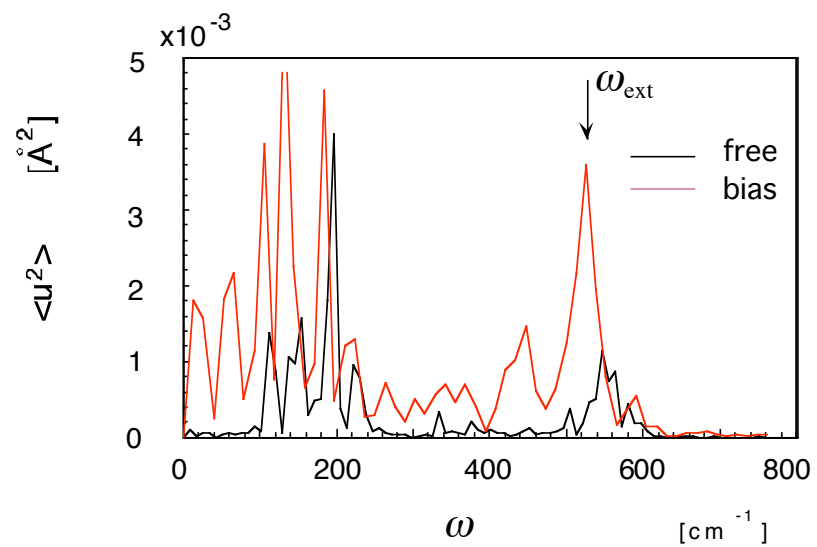
赤外光励起による半導体中の 不純物拡散の制御

最大の問題点 → 光源が限られる

計算機シミュレーションの必要性

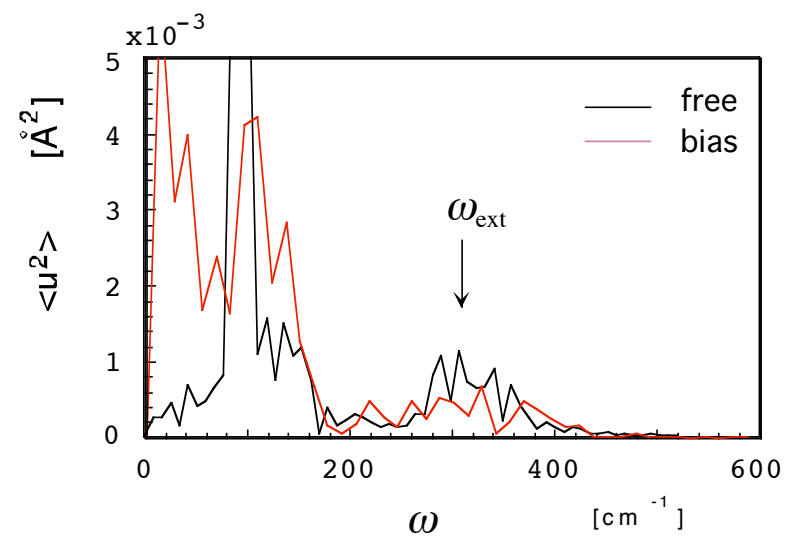
IV. Results

B

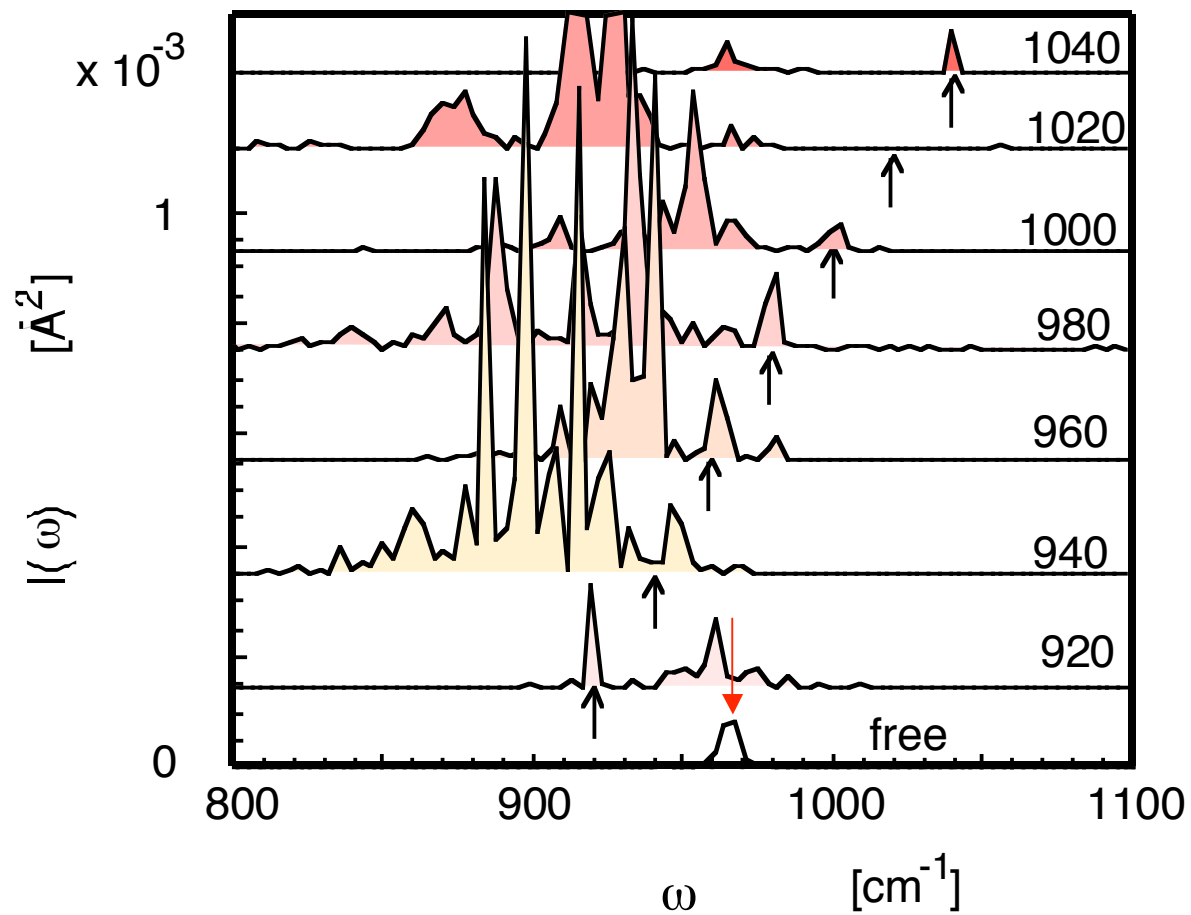


$$\Delta\omega = 17.05 \text{ cm}^{-1}$$

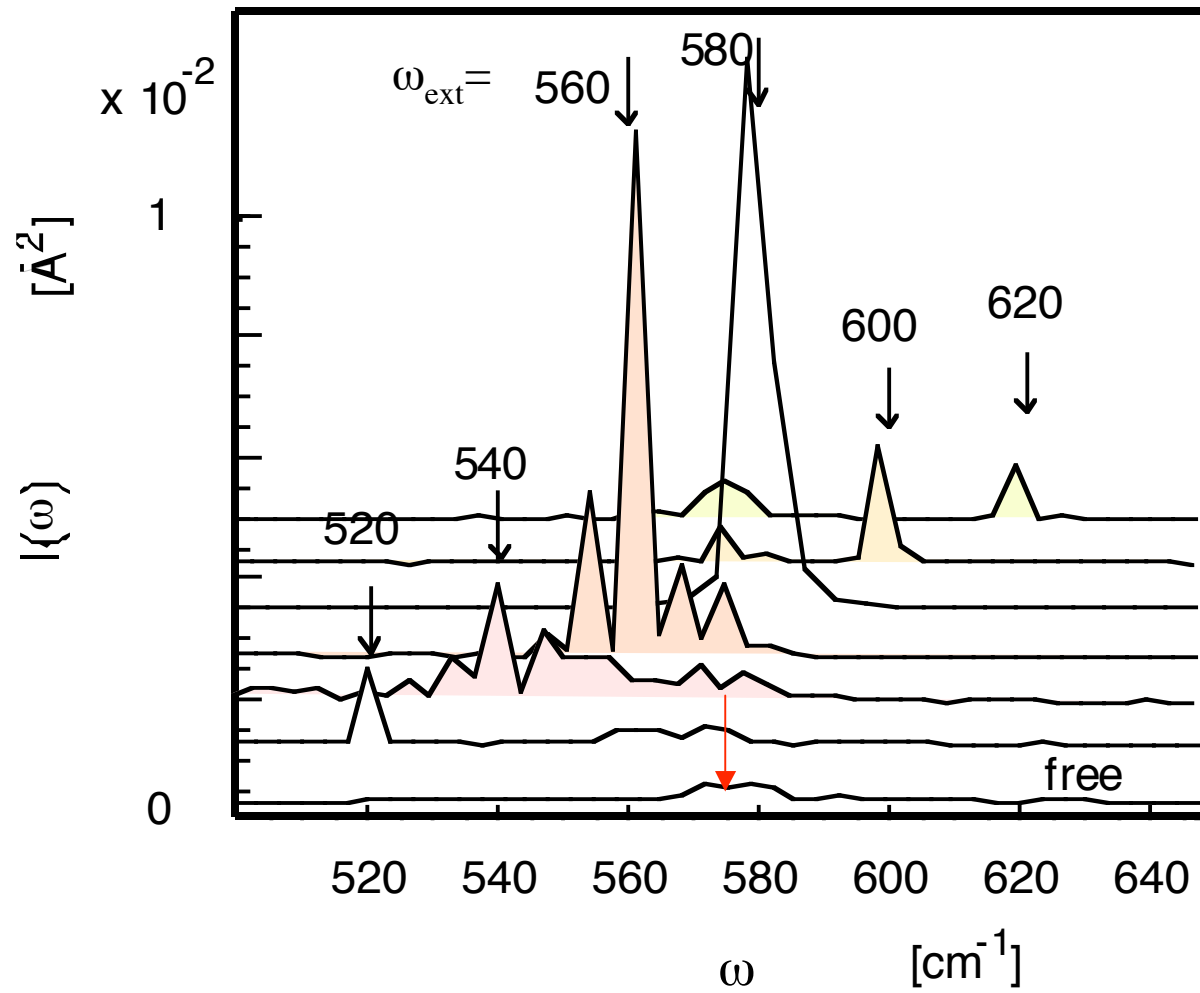
P



Resonance effect on O mode

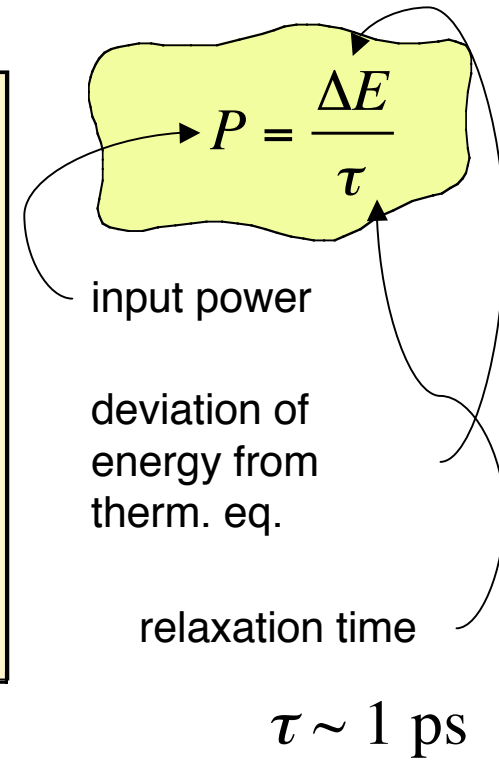
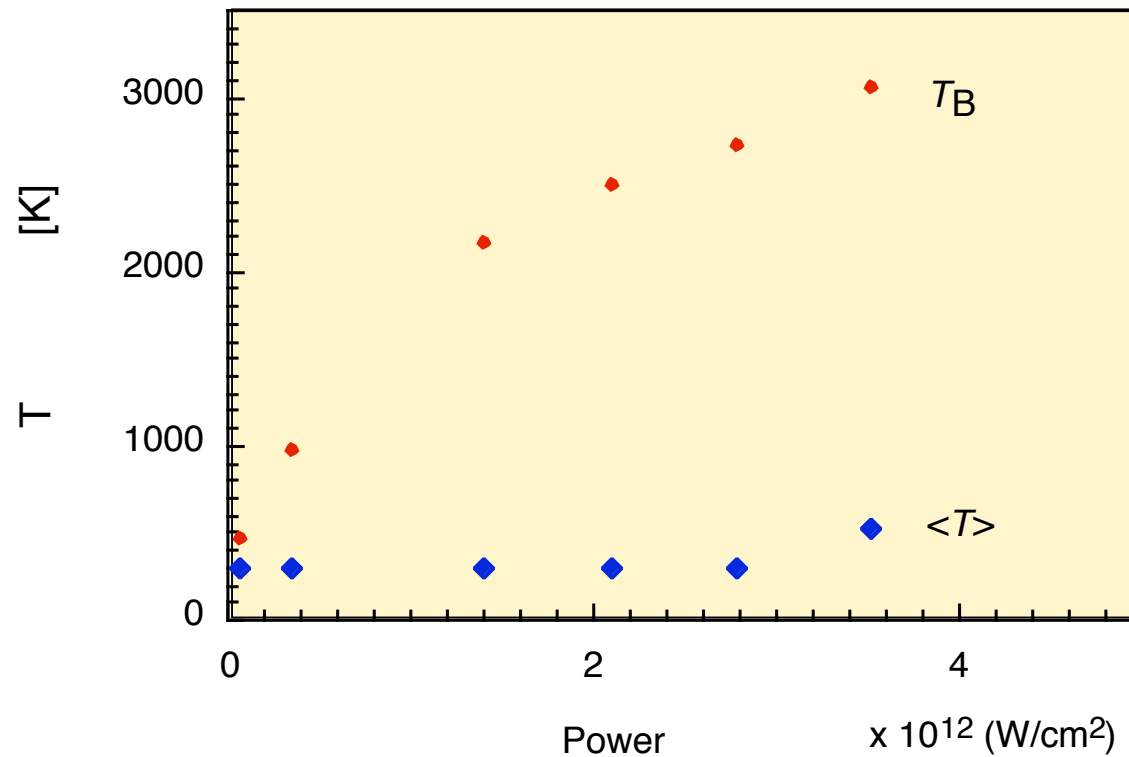


Resonance effect on B mode

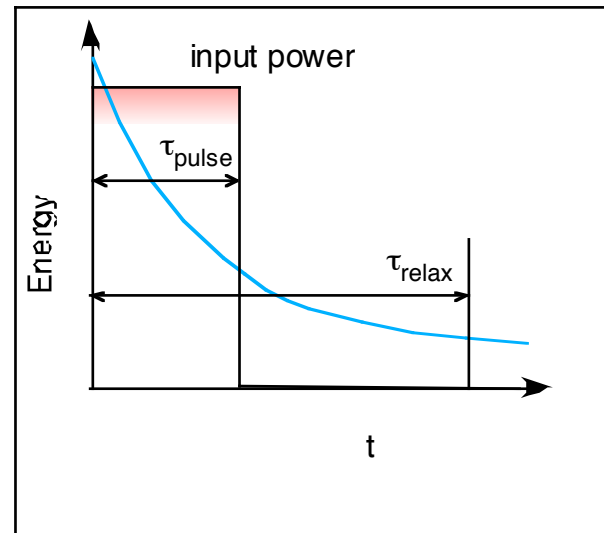
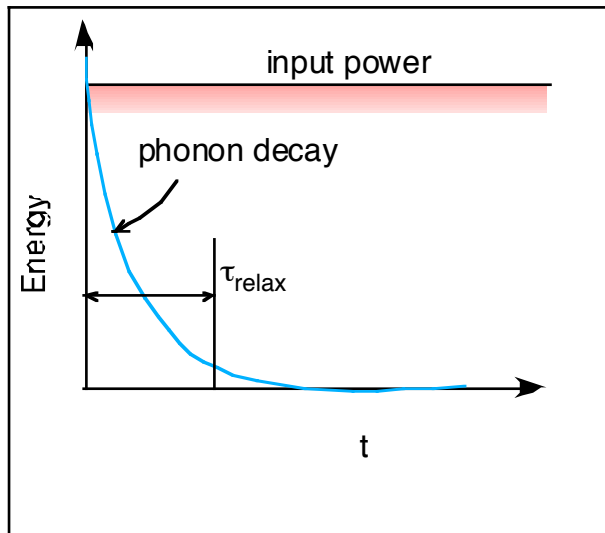


Power Dependence

B mode



Power consideration



$$\tau_{\text{phonon}} < \tau_{\text{pulse}} < \tau_{\text{decay}}$$

酸素拡散

$$D = D_0 \exp(-Q/kT)$$

$$D [\text{cm}^2/\text{s}] = 0.194 \exp(-2.54[\text{eV}]/kT)$$

T. Y. Tan and U. Gösele, Appl. Phys. A37 1 (1985)

T [K]	[eV]	D [cm ² /s]
1000	0.086	3.0 x 10 ⁻¹⁴
1600	0.137	1.9 x 10 ⁻⁹
2000	0.172	7.6 x 10 ⁻⁸
2500	0.215	1.4 x 10 ⁻⁶
3000	0.258	1.0 x 10 ⁻⁵

T [eV]	D [cm ² /s]	τ [s]	L _D [μm]
0.137	3.0 x 10 ⁻¹⁴	1	0.3

		10 ⁻¹	0.1
0.172	7.6 x 10 ⁻⁸	1	2.7

		10 ⁻²	0.27
0.215	1.4 x 10 ⁻⁶	1	11.8

		10 ⁻³	0.3

レーザーパルスの強度

原子あたり

$$P_{\text{atom}} = \frac{\Delta E}{\tau}$$

原子運動エネルギー
の熱平衡からのずれ

0.2 eV

フォノン緩和時間

10 ps

$$P_{\text{atom}} = 3 \times 10^{-9} \text{ [W/atom]}$$

不純物濃度

$$n_i = 1 \times 10^{18} \text{ [/cm}^3\text{]}$$

$$P_{\text{abs}} = n_i \times P_{\text{atom}} = 3 \times 10^9 \text{ [W/cm}^3\text{]}$$

吸収係数

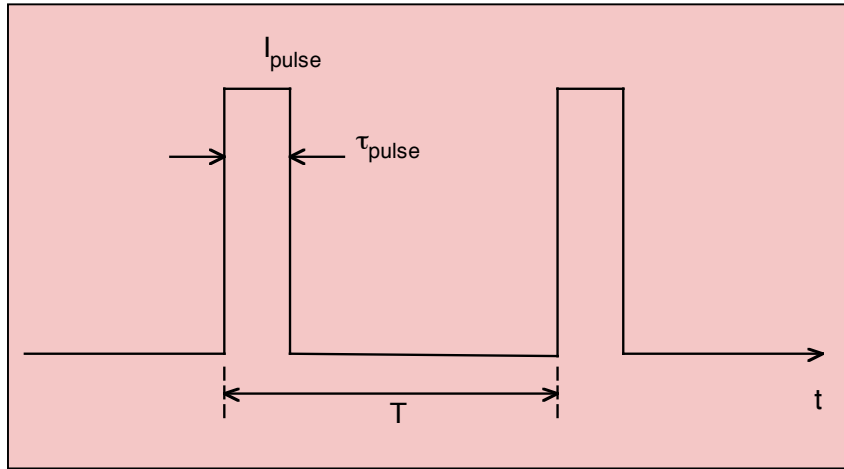
$$\alpha = 1 \times 10^4 \text{ [cm}^{-1}\text{]}$$

$$I_{\text{in}} = P_{\text{abs}} / \alpha = 3 \times 10^5 \text{ [W/cm}^2\text{]}$$

$$P_{\text{pulse}} = 3 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$$

SPring-8

BL43IR



$$\tau_{\text{pulse}} = 40 \text{ ps}$$

$$T = 25 \text{ ns}$$

$$\langle I \rangle = 45 \mu\text{W} \quad \text{by power meter}$$

$$I_{\text{pulse}} = \frac{T}{\tau_{\text{pulse}}} \times \langle I \rangle$$

$$I_{\text{pulse}} = 25 \text{ mW/pulse}$$

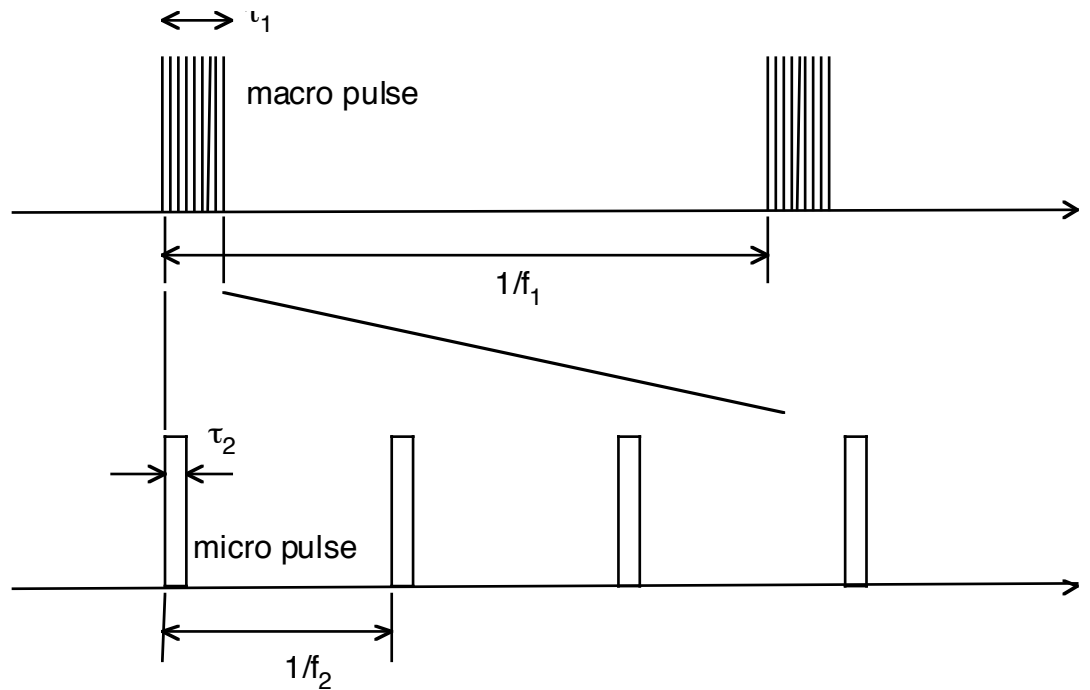
ビーム径: $10 \mu\text{m}$

$$I_{\text{pulse}} = 25 \text{ kW/cm}^2 \cdot \text{pulse}$$

1 s間の実効的照射時間

$$40 \text{ ps} \times \frac{1}{25 \text{ ns}}$$

$$= 2 \times 10^{-3} \text{ s}$$



1 s間の実効的照射時間

$$\tau_{\text{pulse}} \times f_{\text{micro}} \times f_{\text{macro}}$$

$$30 \text{ ps} \times \frac{1}{9.2 \text{ ns}} \times \frac{1.8 \mu\text{s}}{16 \text{ ms}}$$

$$= 0.36 \mu\text{s}$$

1 hあたり

1.3 ms

最大ピーク出力 $\sim 1 \text{ MW}$ ($100 \sim 1000 \text{ cm}^{-1}$)

このうち $\Delta\omega = 10 \text{ cm}^{-1}$ のみ取り出すとして

$$1 \text{ MW} \times \frac{10}{1000} = 10 \text{ kW}$$

ビーム径 $\sim 3 \text{ mm}$

パルスあたり

$$I_{\text{pulse}} = 100 \text{ kW/cm}^2$$

放射光を利用した実験

SPring-8利用者懇談会研究会
「赤外光励起による新物質プロセッシング」



	require- ment	BL43IR (SPring-8)	FEL (ISIR)
I_{pulse} [kW/cm ²]	300	25	100
t_d [s]	0.001	1	3600

Estimation of electric field

$$f_{AC} = 1 \times 10^{-2} \text{ (Ry/Bohr)}$$

atomic units

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e}{a_0^2} = 5.1 \times 10^9 \text{ (V/cm)}$$

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E^2 = 3.51 \times 10^{16} \text{ (W/cm}^2\text{)}$$

$$Q^* = 1$$

$$E = 5.1 \times 10^7 \text{ (V/cm)}$$

$$I = 3.51 \times 10^{12} \text{ (W/cm}^2\text{)}$$

	パルス幅	周波数	ピークパワ (MW)	パワー密度 (MW/cm ²)	積算照射時間
日本大学					
マクロパルス	10 μ	12.5			
マイクロパルス	0.23 p	2.856 G	6		
波長 μ m	0.87	6			
東京理科大学					
マクロパルス	1 μ	10			
マイクロパルス	2 p	2.856 G	4-12.5		
波長 μ m	4	16			
大阪大学工学研究科 Inst. FEL					
マクロパルス	20 μ	10			
マイクロパルス	10 p	2.856 G	5		
波長 μ m	5	22			
大阪大学産研					
マクロパルス	1.8 μ	60			
マイクロパルス	20-30 p	1.1 G	1	0.1	1
波長 μ m	10	100			