

表面のふく射性質の測定

若林英信

-
- (1) ふく射伝熱評価
 - (2) 2方向反射率の測定 ...
 - (3) 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の開発 ... R_{NN} と N
 - (4) 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の拡張 ... R_{NH} と N
-

表面のふく射性質の測定

若林英信

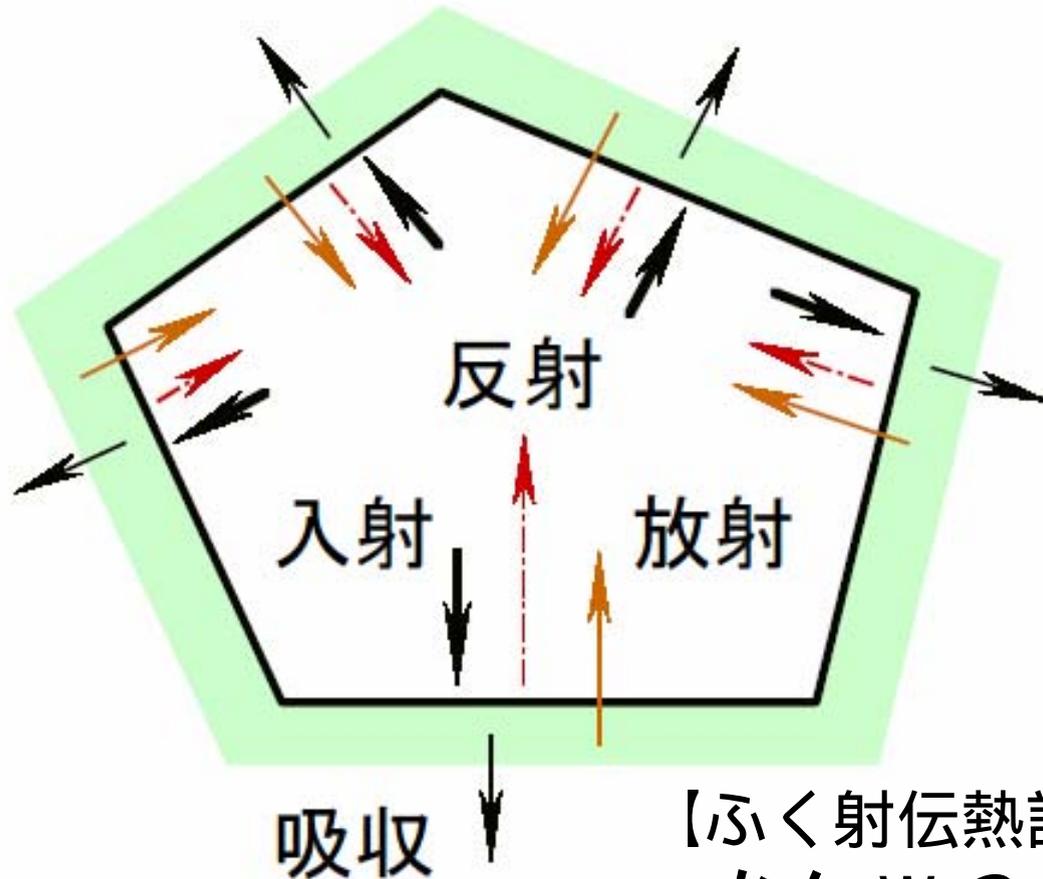
(1) ふく射伝熱評価

(2) 2方向反射率の測定 ...

(3) 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の開発 ... R_{NN} と N

(4) 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の拡張 ... R_{NH} と N

表面間のふく射エネルギー交換



【ふく射伝熱評価の目的】

なん W ?

なん K ?

安全に所要の機能をはたす？

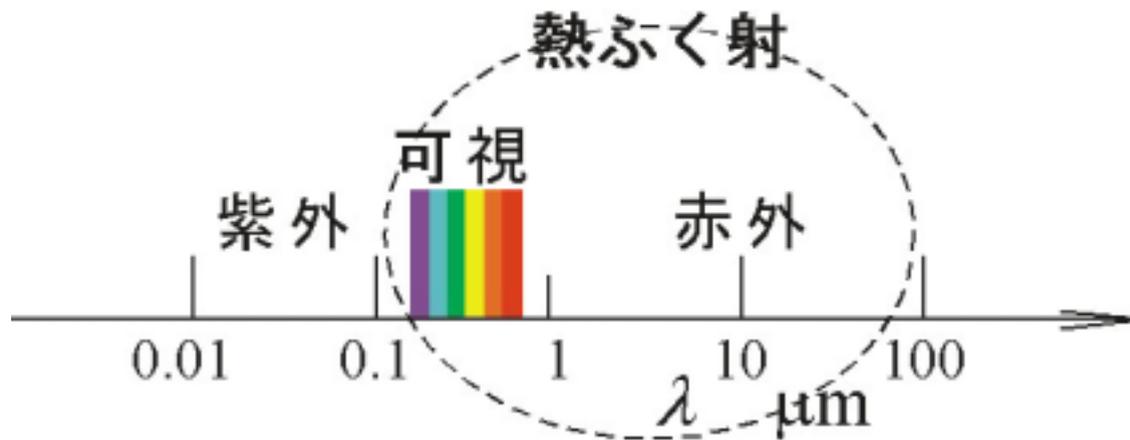
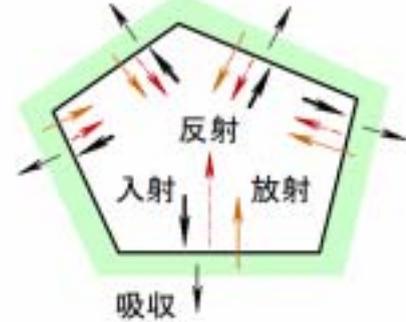
熱ふく射 thermal radiation

Planck 分布の及ぶ広い波長域 / 可視 ~ 赤外

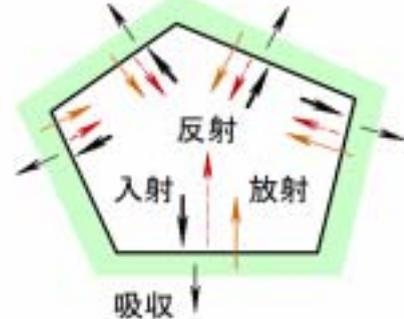
指向性の弱い / 拡散的なふく射

...レーザのふく射のように単色ふく射がビーム的に直進するものではなく

偏光性は強いものではない



実在表面 real surface

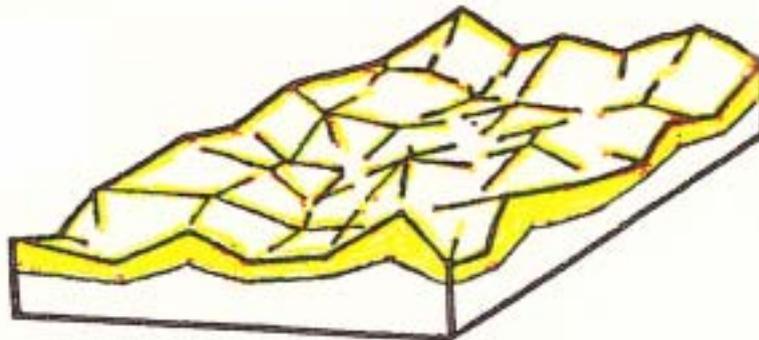
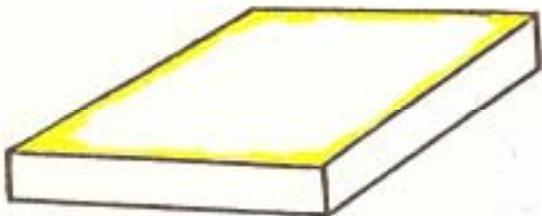


ふく射を不完全に拡散反射する

... 鏡面反射的にでもなく 完全拡散反射的にでもなく

表面状態は一意的に定義されず / 時々刻々にも変化しうる

... 工業的な表面加工プロセスでは積極的に変化させられる



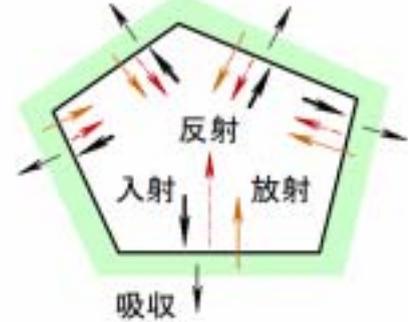
cf. 理想的な表面

! 系におけるふく射の伝搬をとり扱うのは易しくない

! 放射率などの表面のふく射性質の値を

その表面の環境に応じてあらかじめ推定するのは難しい

ふく射伝熱評価の伝統的な方法



【方向特性】完全拡散の仮定

- (1) **表面**が**放射**するふく射の等方性 ...完全拡散放射
- (2) **表面**に入射するふく射の等方性 ...半球等強度入射
- (3) **表面**が**反射**するふく射の等方性 ...完全拡散反射

【波長特性】灰色体の仮定

- (4) **表面**のふく射性質が波長に依存しない

形態係数・温度・全半球放射率

(系における表面の配置)

(...表面のふく射性質を代表する)

(...教科書・資料集にはその値がリストされる)

伝統的な方法の問題点

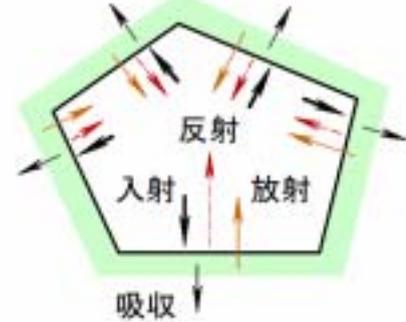
... 適切に評価できない / 確かでない

温度の有効数字 の 1桁め

ふく射エネルギーの オーダ

... ふく射の方向分布と波長分布についての仮定の乱暴さ

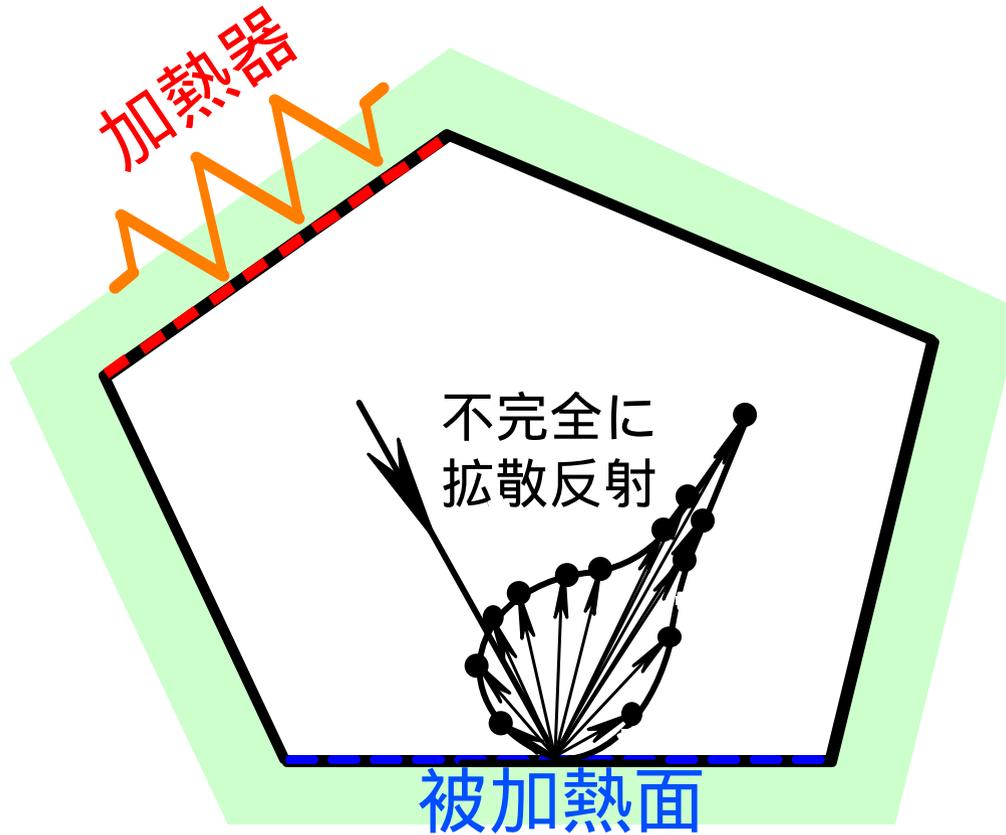
完全拡散 灰色体



ふく射の方向分布の仮定の乱暴さ ... 温度分布・表面の反射の方向特性

完全拡散

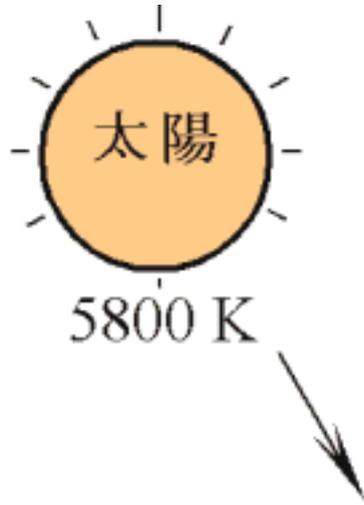
- (1) 表面が放射するふく射の等方性 ...完全拡散放射
- × (2) 表面に入射するふく射の等方性 ...半球等強度入射
- × (3) 表面が反射するふく射の等方性 ...完全拡散反射



ふく射の波長分布の仮定の乱暴さ ... 系に強い温度分布がある場合に顕著にな

灰色体

ϵ_H^t A_H^t
(全半球放射率) (全半球等強度入射吸収率)



cf.

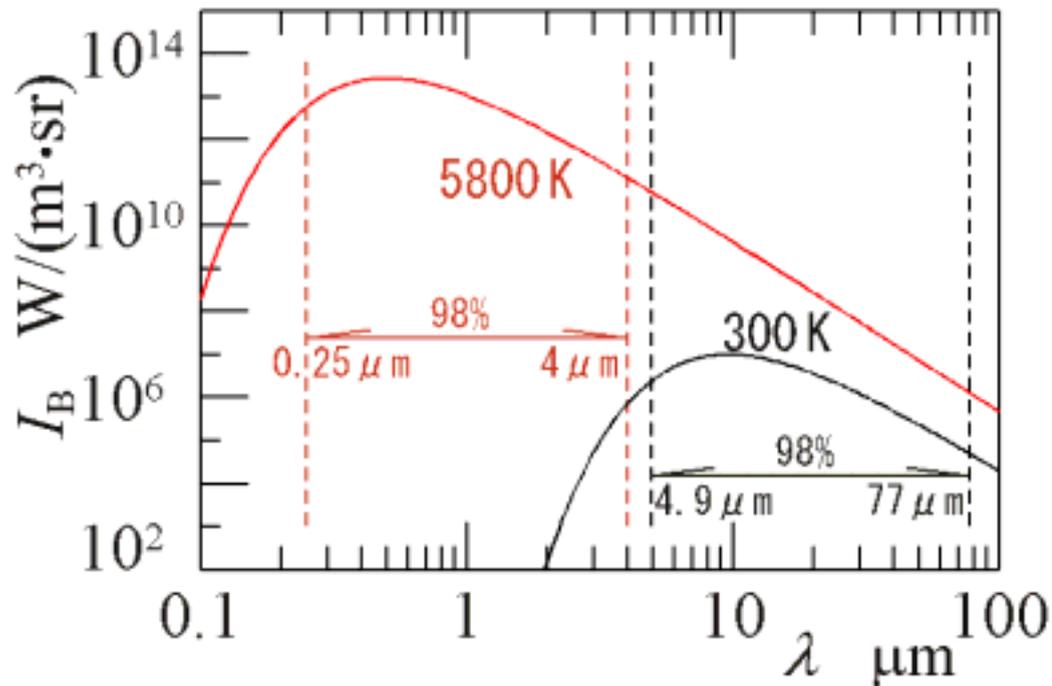
Kirchhoffの法則が成立するとすれば
(分光指向放射率) = (分光指向入射吸収率)

$(A_H^t =) 0.95$ 吸収 放射 $0.05 (= \epsilon_H^t)$

(太陽エネルギー波長選択吸収性)

表面

300 K



黒体の分光放射強度(スペクトル) ... Planckの式

$$I_B = I_B(\lambda, T)$$

$$= \frac{1}{\pi} \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

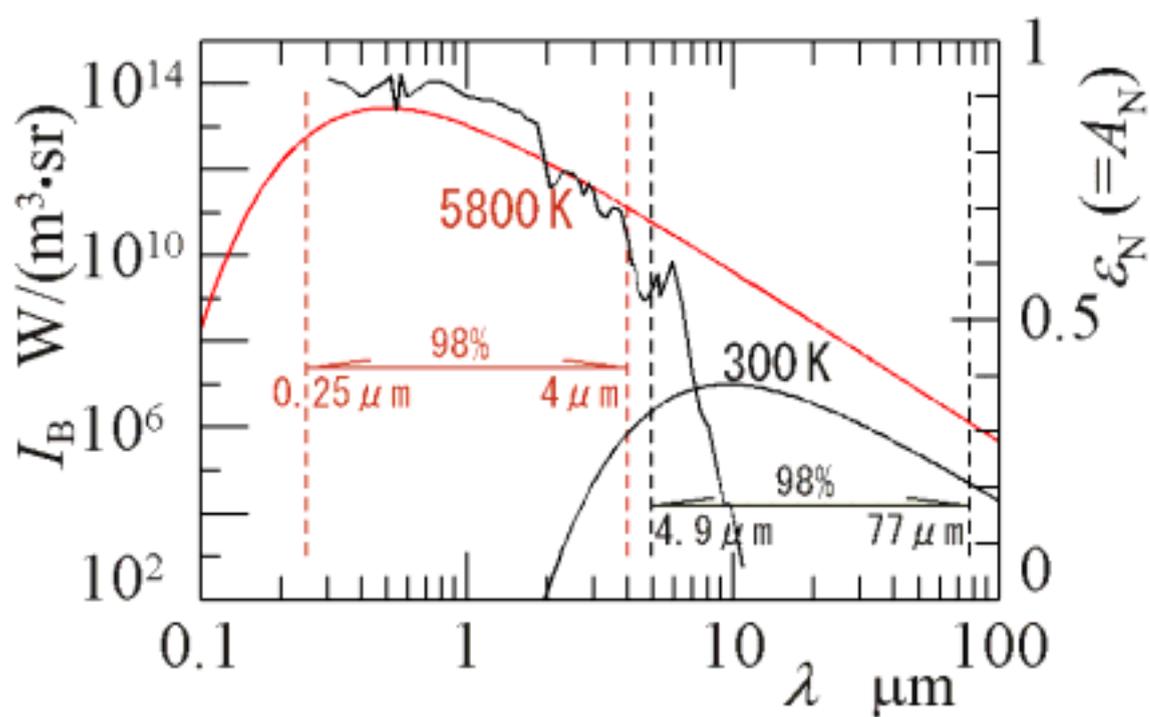
$$C_1 = 3.7415 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$$

$$C_2 = 0.014388 \text{ m} \cdot \text{K}$$

縦軸・横軸が対数目盛なので，

一見すると

98%も占めるようには見えないが...



分光垂直放射率(スペクトル)
 = 分光垂直入射吸収率(スペクトル)



全半球放射率 0.3
 全半球等強度入射吸収率 0.9

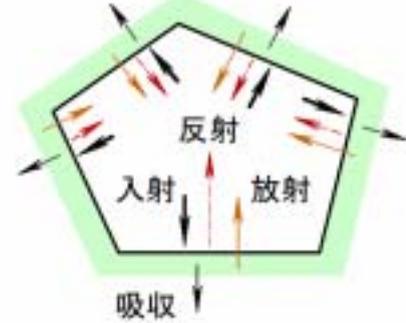
われわれの実験試料/
 われわれが分光測定した
 酸化ニッケル被膜つきニッケル表

熱工学の問題を改善するには

ふく射の【方向分布】と【波長分布】を考慮

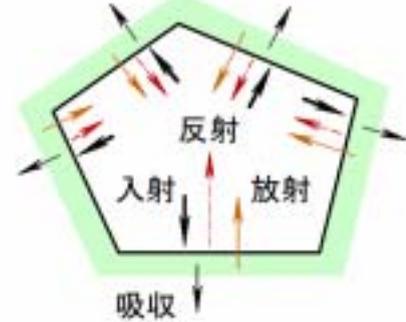
... 評価の目的に照らして

ある程度 乱暴な方法をとる



研究の方針

... ふく射伝熱の評価につながる研究



個々の実在表面の

~~2方向反射率の行列のスペクトルの詳細構造の時間変化
を詳細に調べる~~

- 適度に厳密に記述する方法 -

【方向特性】 半球反射率の鏡面反射成分と完全拡散反射成分

【波長特性】 多段の階段状のスペクトルモデル

【縦軸】 W の単位の量

表面のふく射性質の測定

若林英信

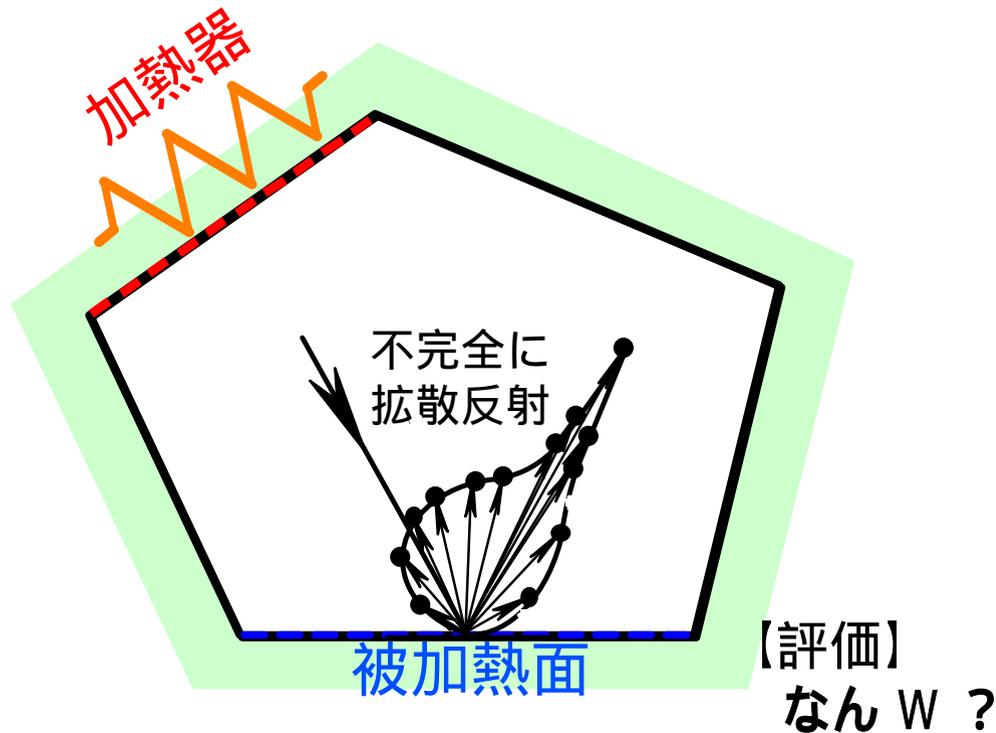
-
- (1) ふく射伝熱評価
 - (2) 2方向反射率の測定 ...
 - (3) 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の開発 ... R_{NN} と N
 - (4) 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の拡張 ... R_{NH} と N
-

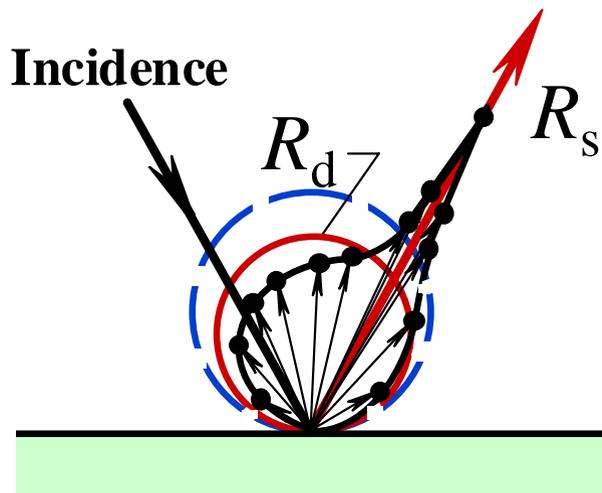
【課題】

表面に方向分布をもって入射するふく射が不完全に拡散反射される現象を簡潔に記述し、

工学系における個々の表面が吸収するふく射エネルギーを W の単位で評価できるようにする

方法を示すことである。





2 方向反射率



Bi-Directional
reflectance



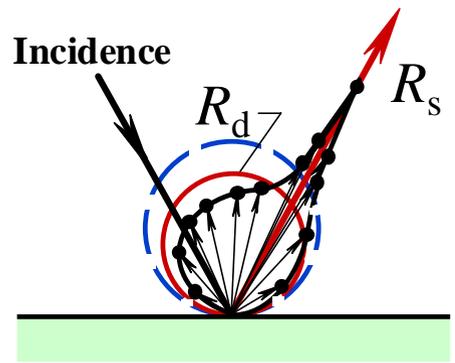
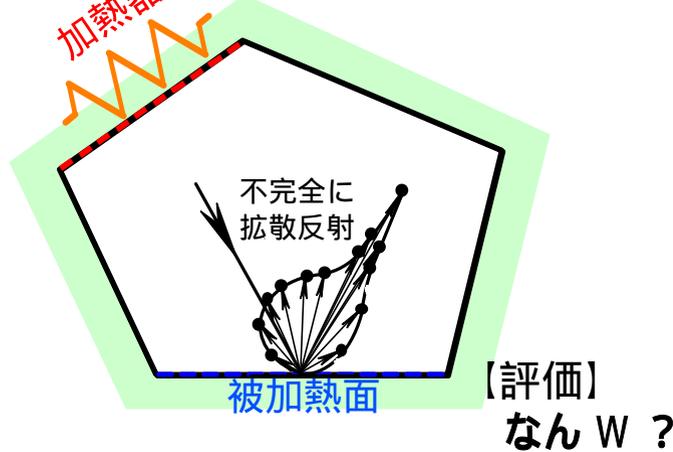
伝統的な方法

Perfect-Diffuse
assumptions

完全拡散
(完全拡散反射)
の仮定

R_s - & R_d -
components
of R_H

半球反射率 R_H の
鏡面反射成分 R_s
と
完全拡散反射成分 R_d



<さまざまなあらしをもつあらい表面・個々のあらい表面について>
 2 方向反射率 (の分布)を測定する・ 分布の実験値 —— を得る
 分布を 4 個(or 3 個)の少数のパラメータを含む計算式により表現する

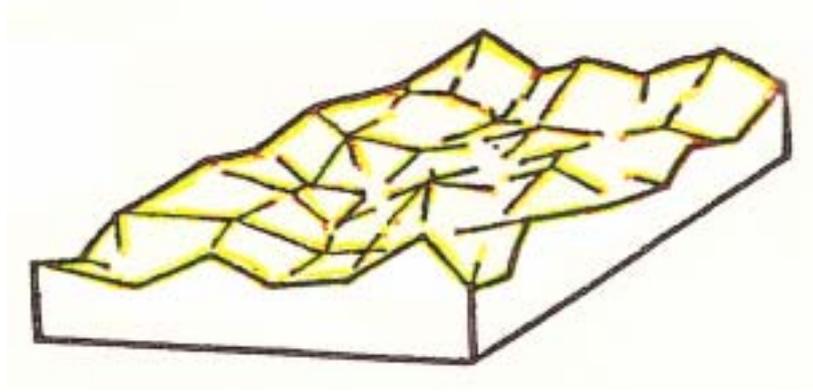
分布の実験値を計算式に curve fitして
 4 個(or 3 個)の少数のパラメータを決定する

(θ_i 方向入射)半球反射率 $R_H (= R_s + R_d)$ ・
 鏡面反射成分 R_s と完全拡散反射成分 R_d
 を θ_i を用いて計算する

エネルギー保存 $A + R_H = 1$ から
 (θ_i 方向入射)吸収率 A がわかる！

【評価】なんW？

不完全に拡散反射的な 実在表面 の典型例として
もっとも単純で代表的な反射特性研究の対象として



金属の裸のあらい表面

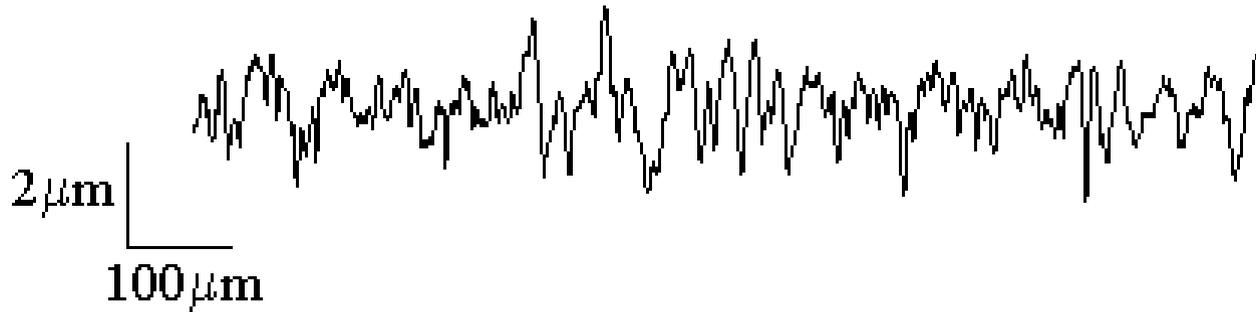
ステンレス鋼 JIS-SUS304

湿式研磨 JIS-mesh 240 ~ 3000 砥粒



あらい

なめらか



r m s あらさ $\Sigma = 1.5 \mu\text{m}(\text{あらい}) \sim 0.095 \mu\text{m}(\text{なめらか})$

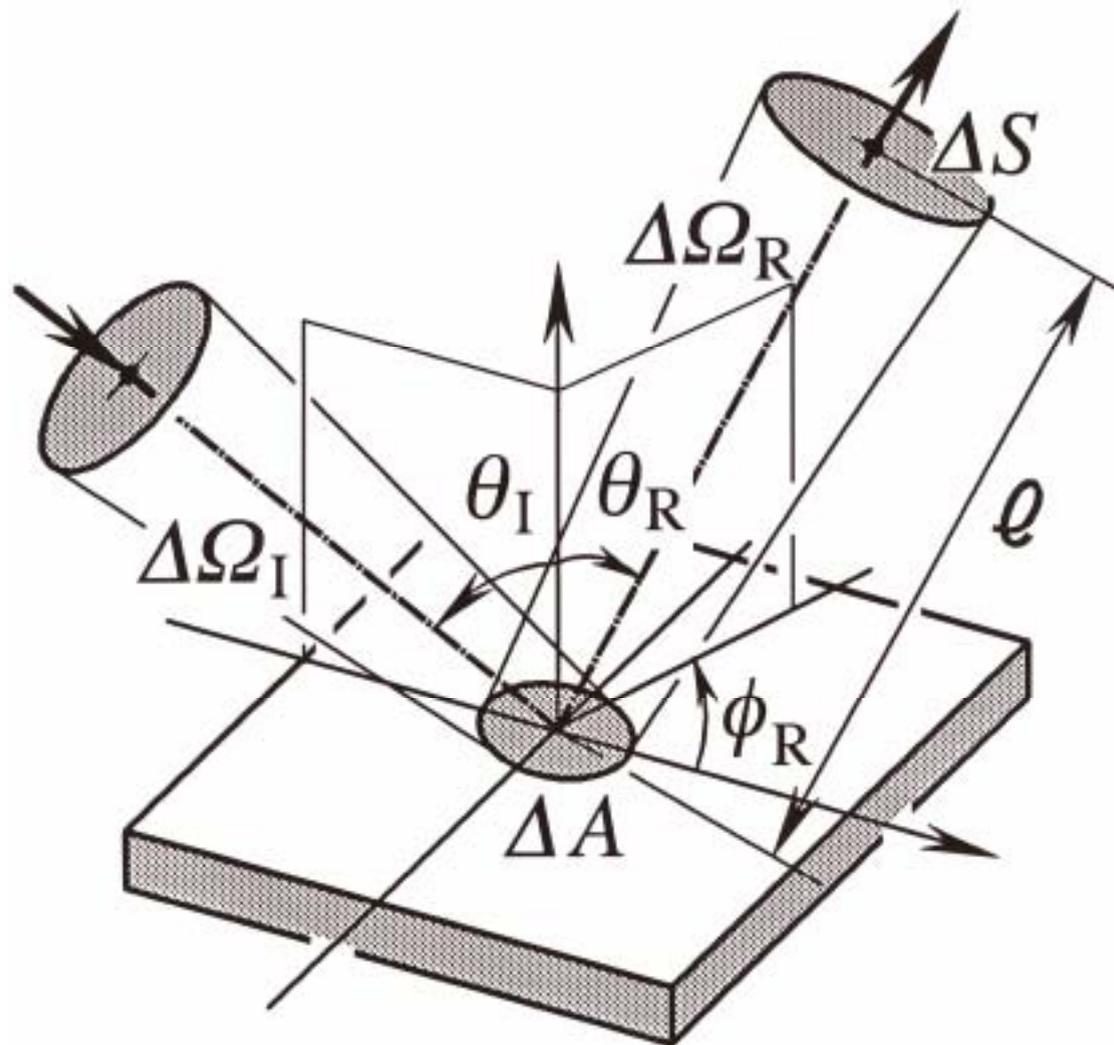
自己相関長さ $\tau_0 (\Sigma)$

入射ふく射の

波長 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}(\text{vis}) \ \& \ 3.39 \mu\text{m}(\text{ir})$

光学あらさ $\Sigma/\lambda = 2.4(\text{あらい}) \sim 0.028(\text{なめらか})$

広い光学あらさ域



2 方向反射率 ρ

$$\begin{aligned}\rho &= \rho(\theta_I, \phi_I, \theta_R, \phi_R) \\ &= I_R / q_I \\ &= I_R / \int_{\Delta\Omega_I} I_I \cos\theta_I d\Omega_I\end{aligned}$$

I_R 反射されるふく射の強度

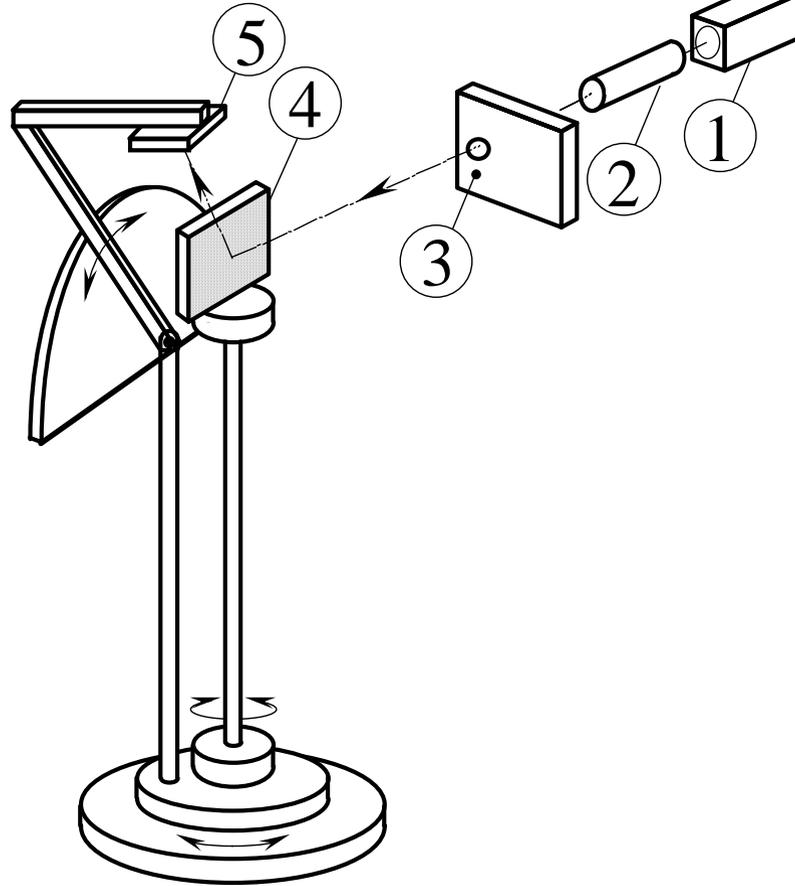
q_I 単位面積あたりに入射する
ふく射のエネルギー

$$\begin{aligned}R_H &= R_H(\theta_I, \phi_I) \\ &= \int_{\text{hemisphere}} I_R \cos\theta_R d\Omega_R / \int_{\Delta\Omega_I} I_I \cos\theta_I d\Omega_I \\ &= \int_{\text{hemisphere}} \rho \cos\theta_R d\Omega_R \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi/2} \rho \cos\theta_R \sin\theta_R d\theta_R d\phi_R \\ &= \int_0^1 \int_{-\pi}^{\pi} \rho \cdot (\sin\theta_R d\phi_R) \cdot d(\sin\theta_R)\end{aligned}$$

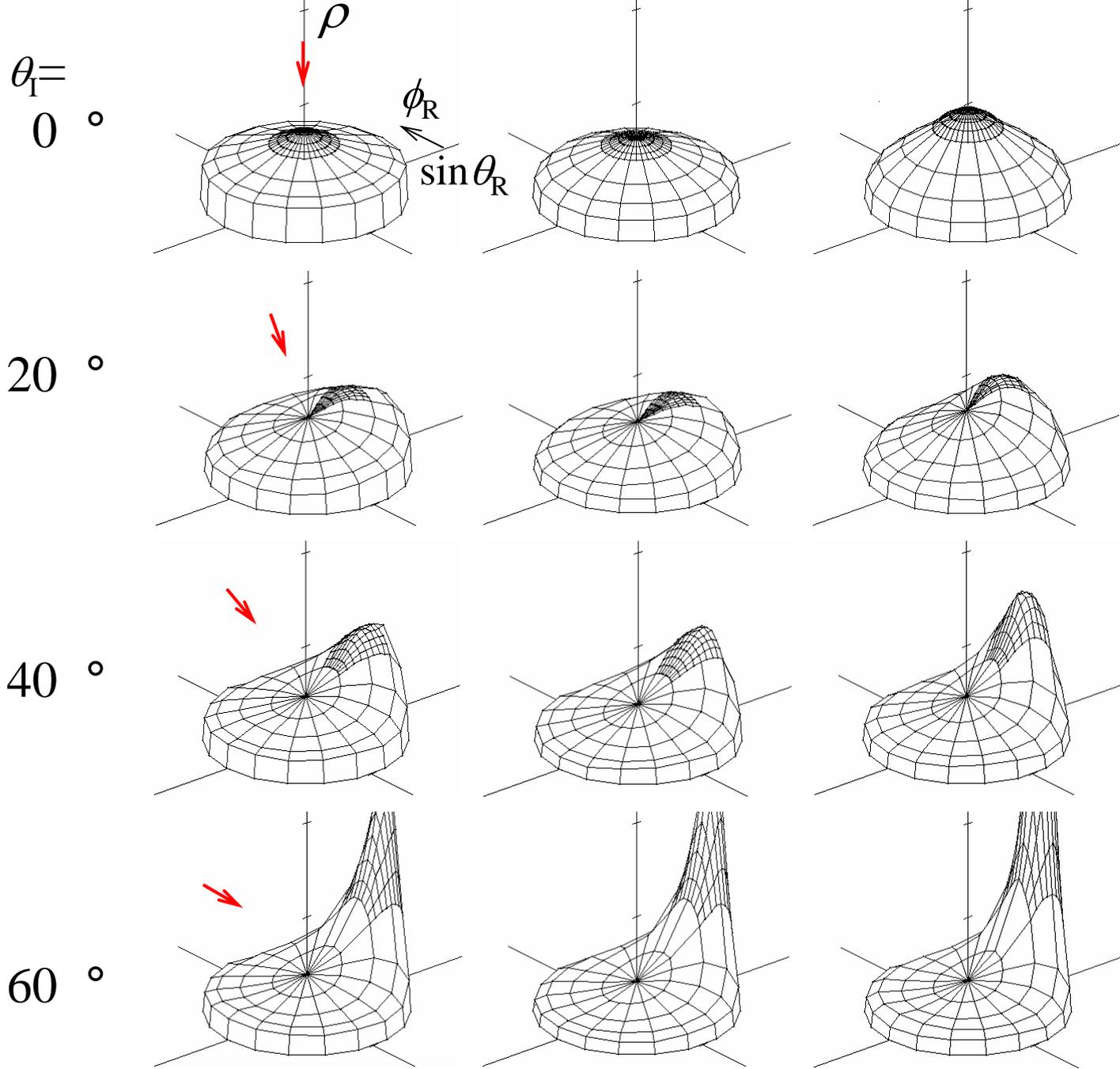
実験

$$\begin{aligned}(q_I \cdot \Delta A) &= I_I \cos\theta_I \cdot \Delta A \cdot \Delta\Omega_I \\ (q_R \cdot \Delta A) &= I_R \cos\theta_R \cdot \Delta A \cdot \Delta\Omega_R \\ \Delta\Omega_R &= \Delta S / \ell^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho &= I_R / q_I \\ &= \{(q_R \cdot \Delta A) / (q_I \cdot \Delta A)\} \cdot (1 / \cos\theta_R) \cdot (\ell^2 / \Delta S)\end{aligned}$$

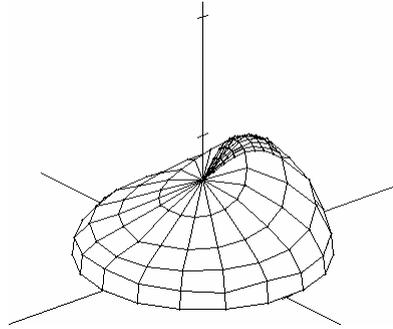


1. laser { vis 0.6328 μm
ir 3.39 μm
2. laser expander
3. optical chopper
4. specimen surface
5. optical detector { vis Si photodiode
ir HgCdTe photoconductive detector



(鏡面反射性が強くない)

A N Dモデル



$$\rho = \rho(\theta_R, \phi_R; A, \sigma, \rho_d, \theta_{Rmax})$$

$$= \rho_s + \rho_d$$

$$\rho_s \cos \theta_R = A \cdot \exp\{-f^2 / (2\sigma^2)\} \cdot \cos\{(\pi/2) \cdot (f/g)^2\}$$

$(\theta_R, \phi_R) = (\theta_{Rmax}, 0)$ のとき ,

$$f = 0, \quad g = (\text{実数}) \neq 0$$

$(\theta_R, \phi_R) \neq (\theta_{Rmax}, 0)$ のとき ,

$$f = (p^2 + q^2)^{1/2}$$

$$g = \{-kp + (f^2 - k^2 q^2)^{1/2}\} / f$$

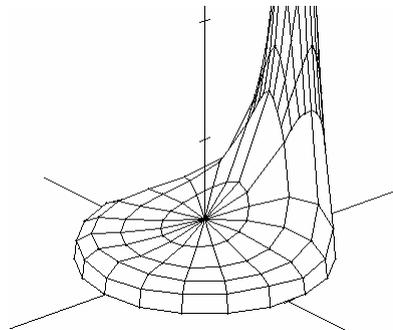
$$p = \sin \theta_R \cos \phi_R - k$$

$$q = \sin \theta_R \sin \phi_R$$

$$k = \sin \theta_{Rmax}$$

(鏡面反射性が強い)

円錐モデル



$$\rho = \rho(\theta_R, \phi_R; (\rho \cos \theta_R)_{max}, \alpha_h, \rho_d)$$

$$= \rho_s + \rho_d$$

$0 \leq \alpha \leq \alpha_h$ のとき ,

$$\rho_s \cos \theta_R = (\rho \cos \theta_R)_{max} (1 - \alpha / \alpha_h)$$

$\alpha > \alpha_h$ のとき ,

$$\rho_s \cos \theta_R = 0$$

目的関数 - 最小 2 乗処理 -

$$F^2 = \sum_j w_j \{ (\rho \cos \theta_R)_j^{\text{calc}} - (\rho \cos \theta_R)_j^{\text{exp}} \}^2$$

$$w_j = (\Delta\Omega)_j / \sum_j (\Delta\Omega)_j$$

(θ_I 方向入射) 半球反射率 $R_H (= R_s + R_d)$

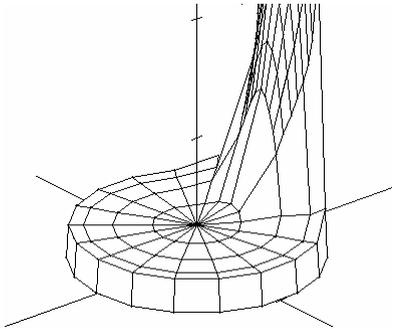
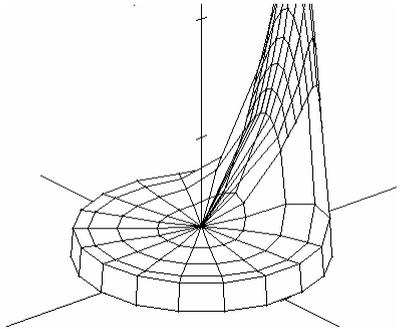
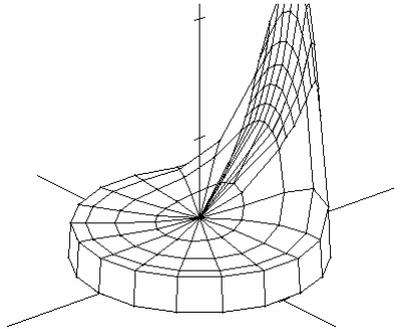
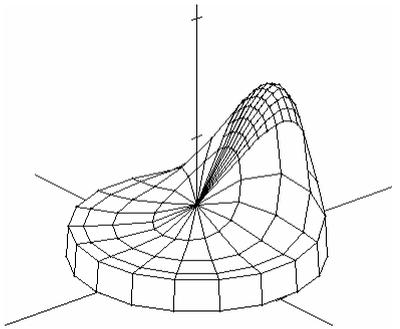
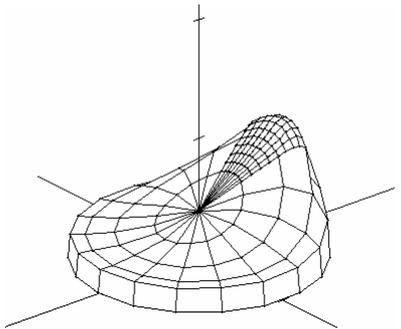
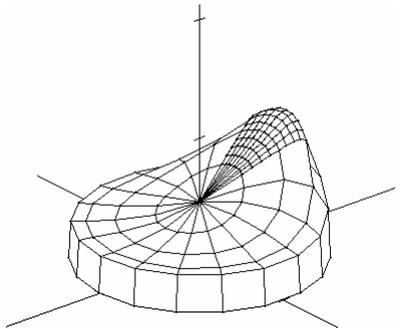
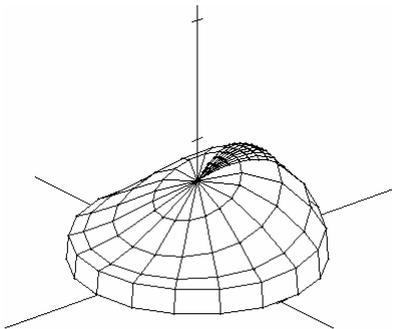
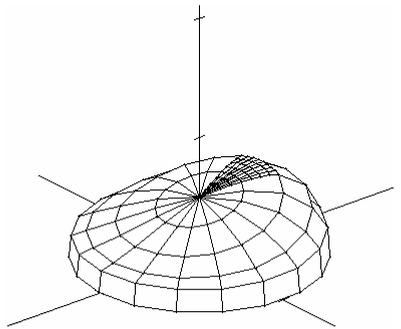
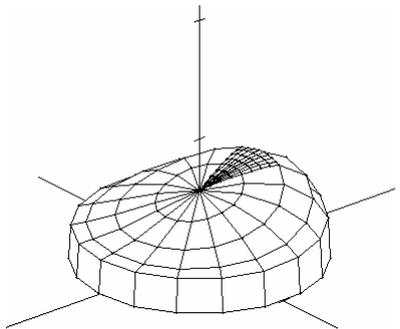
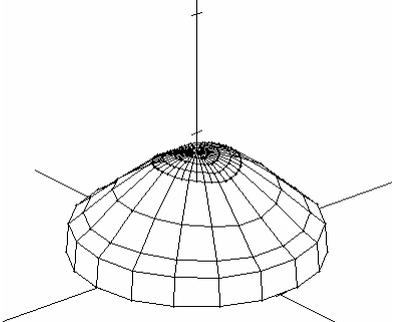
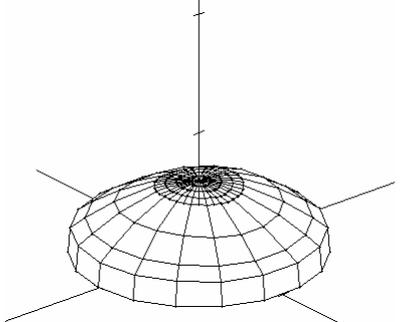
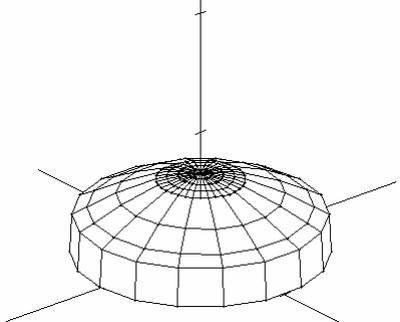
$$R_H = R_s + R_d$$

$$R_s = \int_{\phi_R=0}^{360^\circ} \int_{\theta_R=0}^{90^\circ} \rho_s(\theta_I, \theta_R, \phi_R) \cdot \cos \theta_R \sin \theta_R d\theta_R d\phi_R$$

$$R_d = \pi \rho_d(\theta_I)$$

specimen No.	θ_t °	A sr ⁻¹	σ	ρ_d sr ⁻¹	F sr ⁻¹	R_s	R_d	R_H	R_s/R_H
1(vis)	0	0.19	0.41	0.22	0.004	0.21	0.71	0.91	0.23
	20	0.17	0.44	0.19	0.009	0.20	0.60	0.80	0.25
	40	0.24	0.45	0.17	0.010	0.25	0.54	0.80	0.32
	60	0.36	0.38	0.14	0.023	0.28	0.46	0.74	0.38
2(vis)	0	0.21	0.62	0.17	0.002	0.36	0.54	0.91	0.40
	20	0.21	0.57	0.15	0.006	0.33	0.47	0.80	0.41
	40	0.27	0.49	0.14	0.010	0.35	0.45	0.80	0.44
	60	0.42	0.36	0.14	0.021	0.30	0.45	0.75	0.40
3(vis)	0	0.60	0.28	0.16	0.022	0.36	0.53	0.89	0.41
	20	0.60	0.26	0.17	0.065	0.31	0.53	0.86	0.36
	40	0.60	0.30	0.16	0.46	0.38	0.53	0.91	0.41
	60	0.94	0.19	0.27	3.9	0.30	0.88	1.18	0.26
	↓	61.0	0.013	0.25	0.16	0.01	0.79	0.80	0.01
1(ir)	0	0.50	0.26	0.17	0.031	0.27	0.56	0.82	0.33
	20	0.48	0.33	0.13	0.032	0.37	0.41	0.78	0.47
	40	0.77	0.20	0.17	0.049	0.26	0.53	0.80	0.33
	60	1.67	0.13	0.14	0.37	0.28	0.46	0.76	0.40
2(ir)	0	0.64	0.17	0.21	0.015	0.31	0.68	0.83	0.18
	20	0.43	0.30	0.17	0.071	0.15	0.54	0.83	0.34
	40	0.69	0.17	0.18	0.39	0.28	0.57	0.75	0.24
	60	0.94	0.15	0.27	1.33	0.18	0.68	0.90	0.24
	↓	135	0.013	0.25	0.14	0.22	0.78	0.82	0.06
3(ir)	0	↓ 389	0.031	0.098	0.036	0.38	0.31	0.69	0.55
	20	↓ 444	0.027	0.10	0.053	0.34	0.32	0.66	0.52
	40	↓ 542	0.025	0.094	0.054	0.35	0.30	0.65	0.54
	60	↓ 875	0.024	0.090	0.041	0.55	0.28	0.83	0.66

specimen No.	θ_t °	$(\rho \cos \theta_R)_{\max}$ sr ⁻¹	α_h rad	ρ_d sr ⁻¹	F sr ⁻¹	R_s	R_d	R_H	R_s/R_H
--------------	-----------------	---	-------------------	------------------------------	-------------------------	-------	-------	-------	-----------



表面のふく射性質の測定

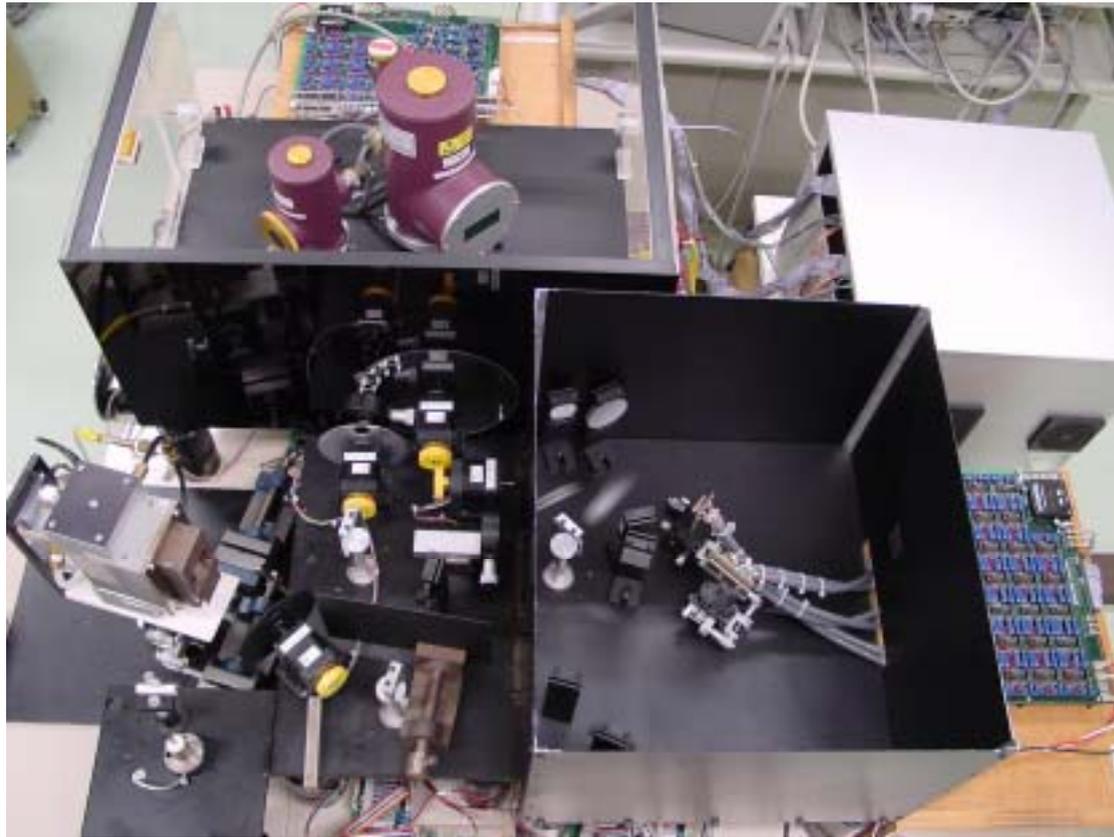
若林英信

-
- (1) ふく射伝熱評価
 - (2) 2方向反射率の測定 ...
 - (3) 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の開発 ... R_{NN} と N
 - (4) 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の拡張 ... R_{NH} と N
-

【課題】

工業装置の実環境下において

そのふく射性質が時々刻々にも変化する実在表面の現象を
系統的に研究する方法を示すことである。



広波長域高速ふく射スペクトル測定装置

(a) **広い波長域**

可視～赤外の

--- *Planck distribution for heat transfer*

--- *order of surface microstructure*

(b) **推移する現象**

くり返し測定 サイクル時間：数秒

--- *transient radiation phenomena*

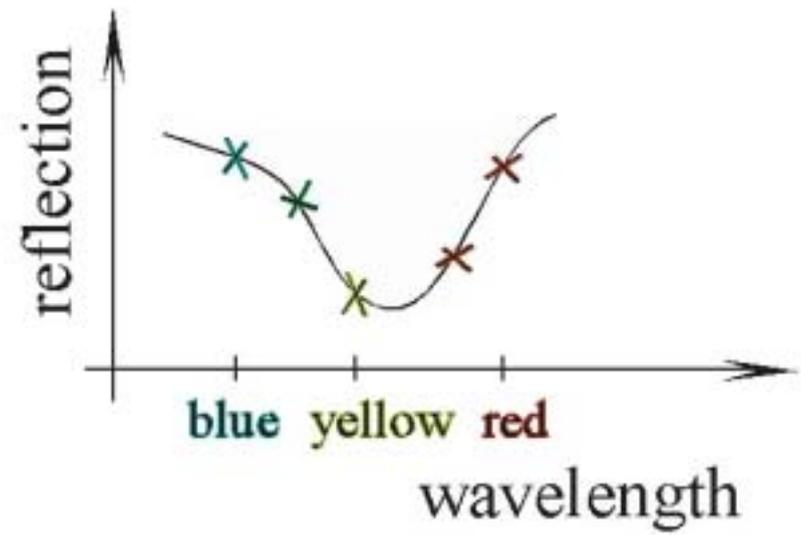
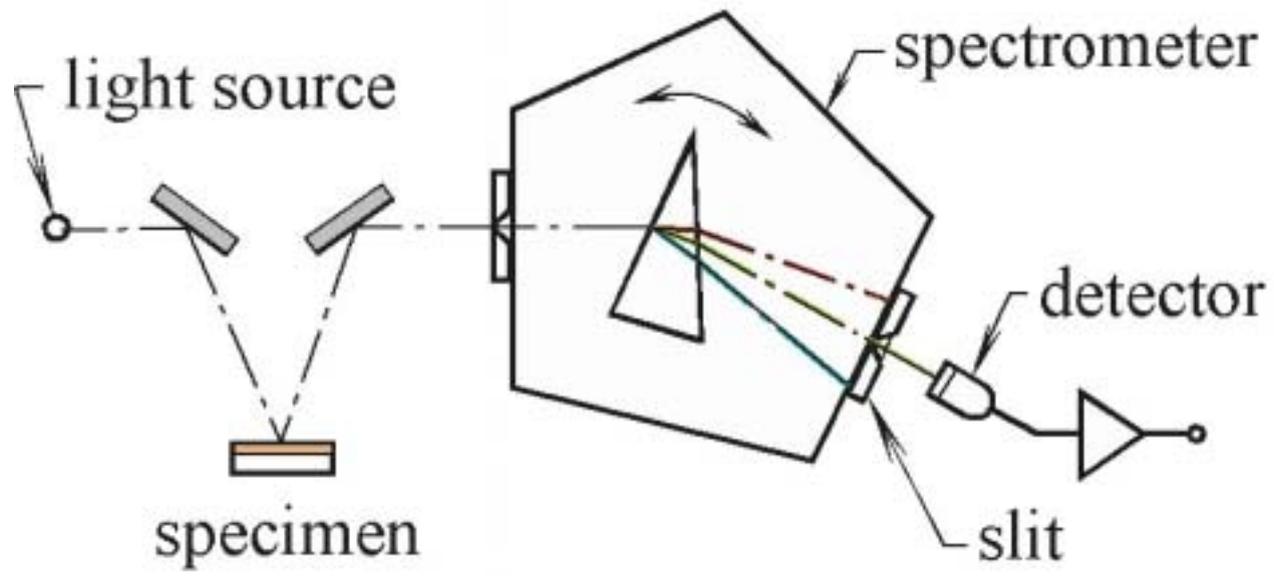
--- *real-time in-process surface diagnosis*

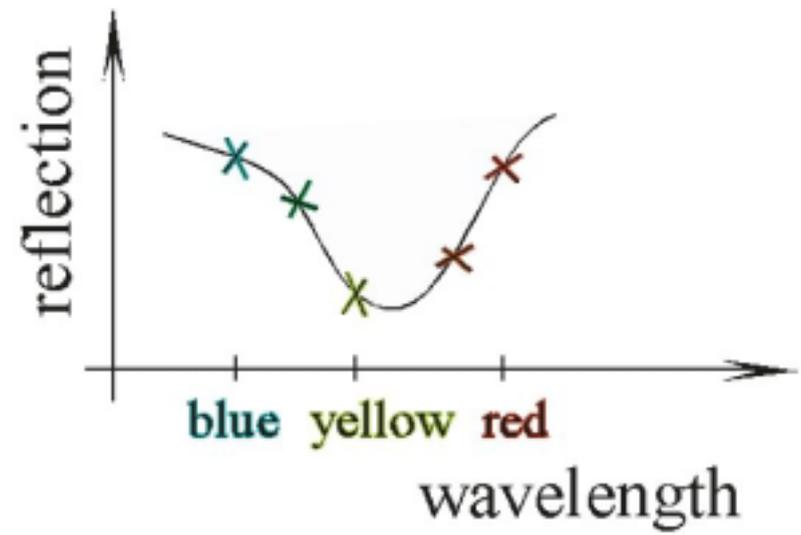
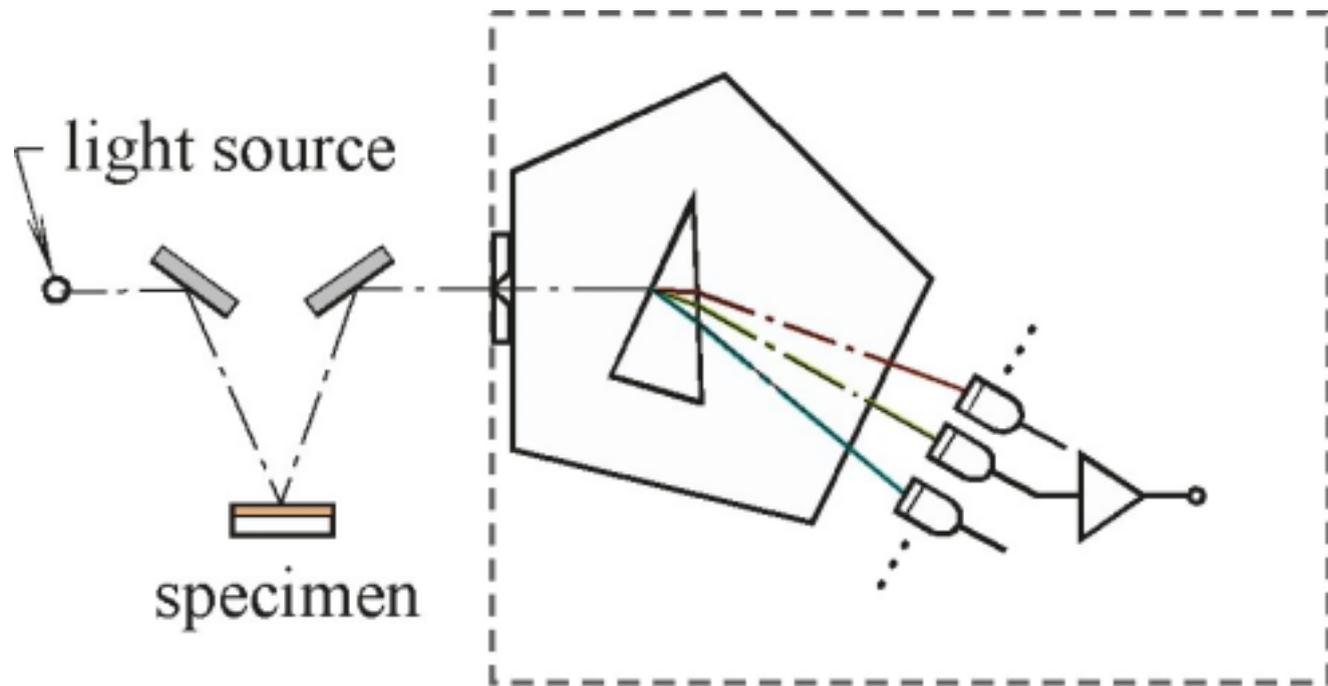
(c) **反射と放射**

反射・放射同時測定

--- *absorption and emission of radiation*

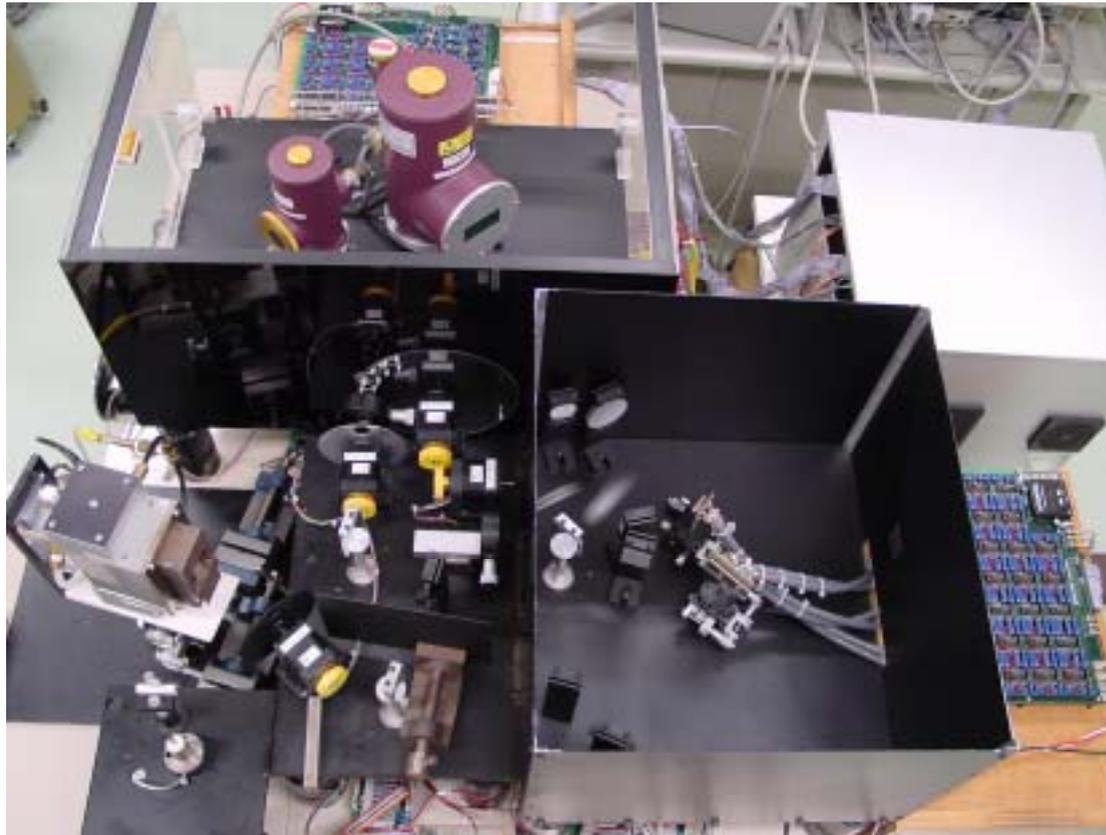
--- *hemispherical reflection by surface microstructure*

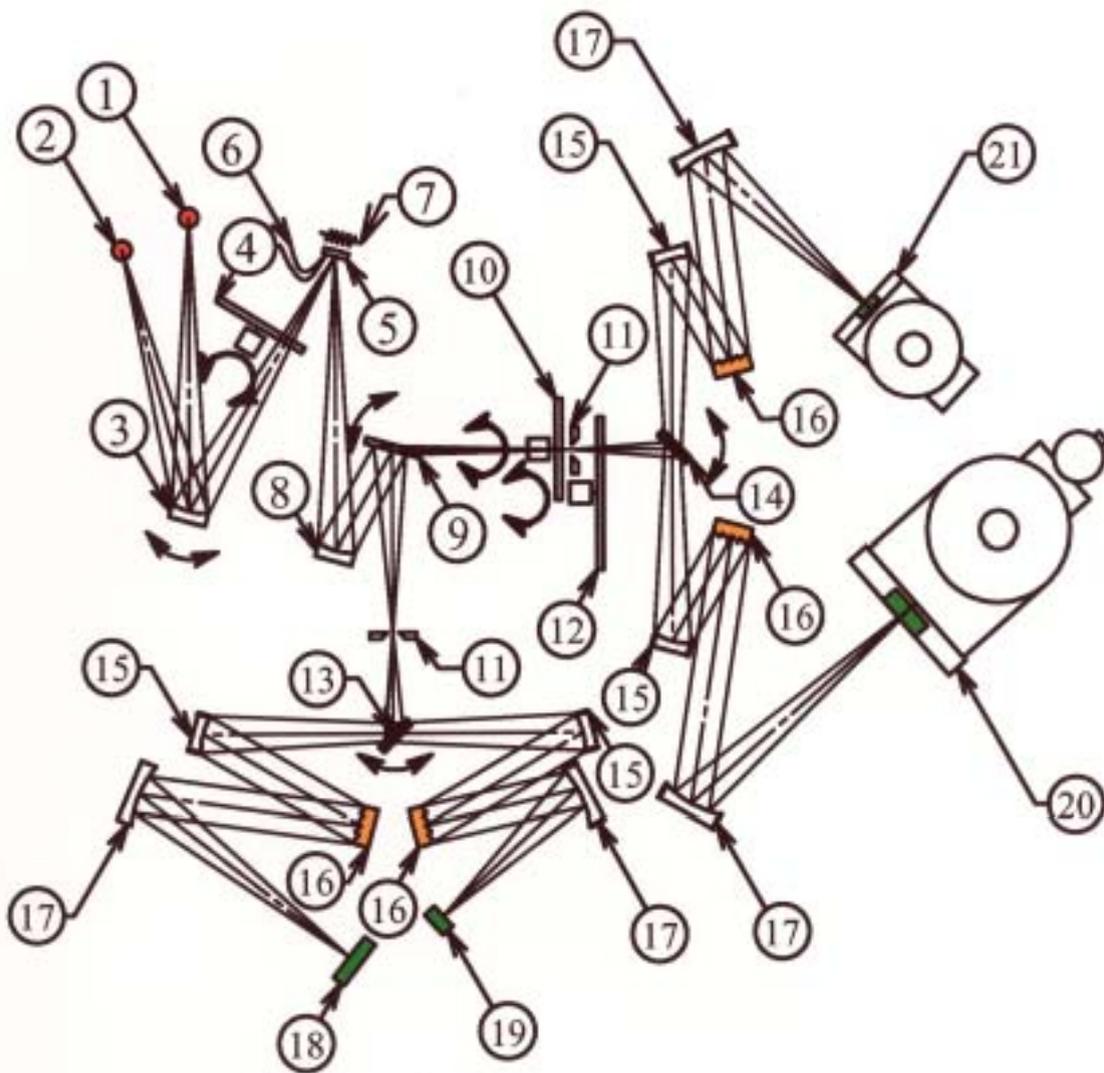




Spectrophotometer

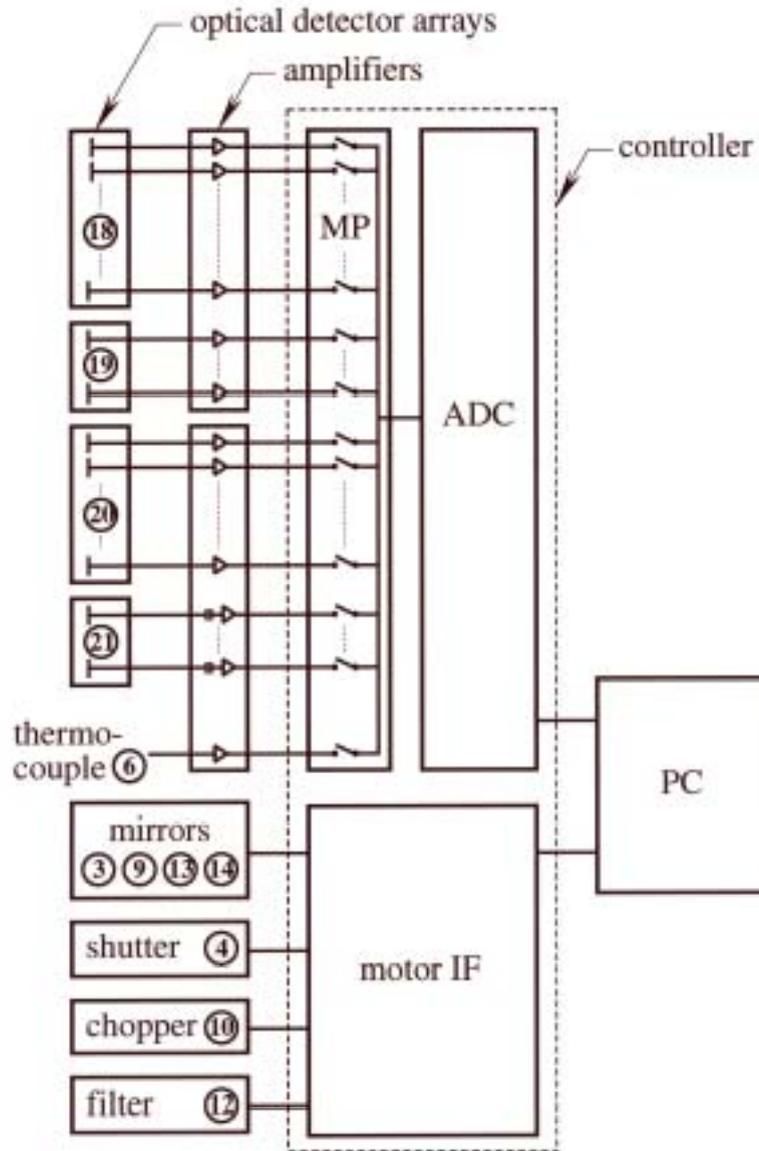
wavelength : 0.30 - 11 μm at 93 points
cycle time : 2 s
spectra : reflection, emission R_{NN} N
optics, sensors: 4 gratings, 7 motors, 99 detectors



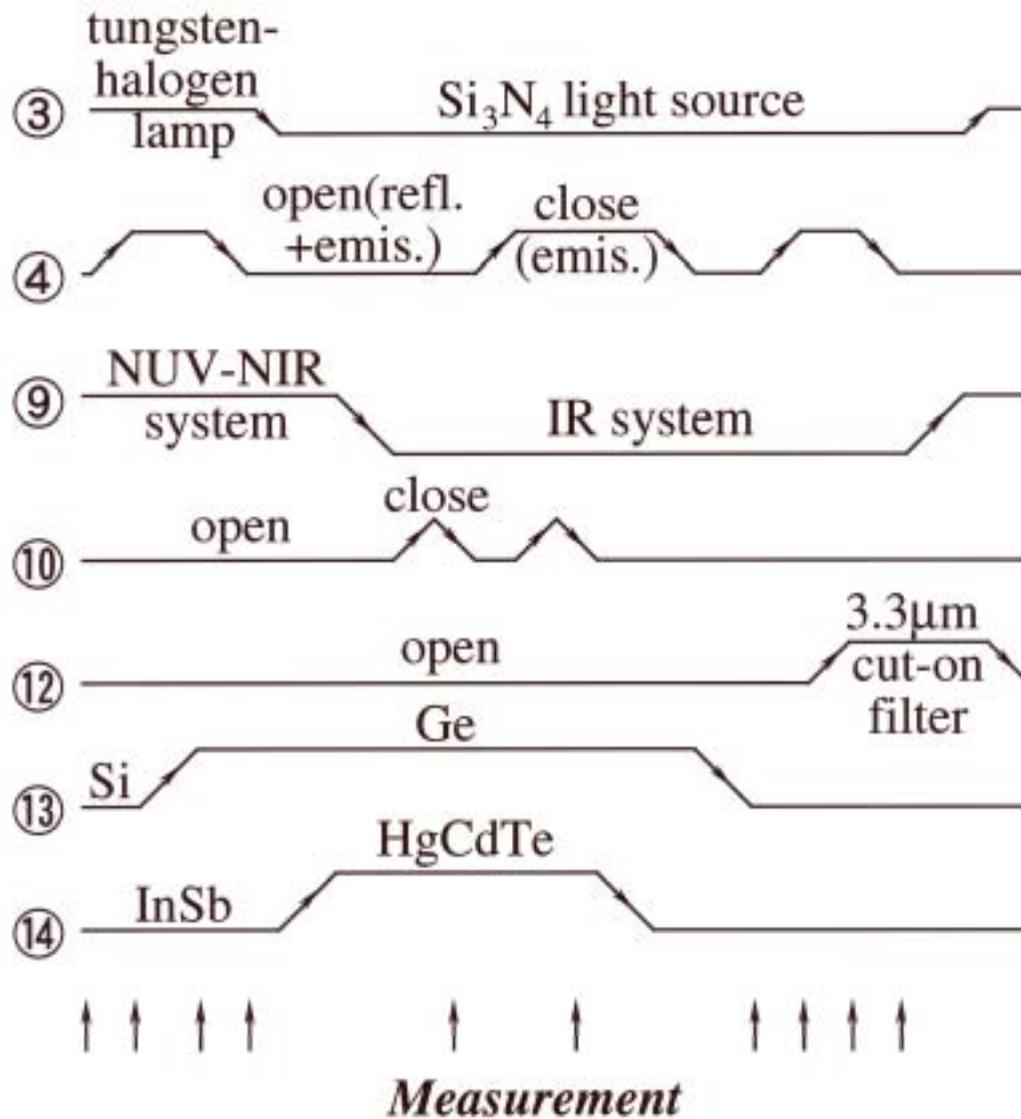


1. tungsten-halogen lamp
2. Si₃N₄ light source
3. rotary concave mirror
4. shutter disk
5. specimen
6. K-thermocouple
7. heater
8. concave mirror
9. rotary plane mirror
10. chopper
11. entrance slit
12. filter disk
13. rotary plane mirror 1
14. rotary plane mirror 2
15. collimator
16. diffraction grating
17. camera mirror
18. 35-Si photodiode array
19. 16-Ge photodiode array
20. 32-InSb photovoltaic array
21. 16-HgCdTe photoconductive array

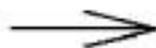
wavelength region	μm	0.30	1.1	1.8	5.5	11
light source		tungsten-halogen lamp			silicon nitride light source	
diffraction grating						
blaze wavelength	μm	0.80		1.25	3.20	6.79
number of grooves	/mm	200		150	41	12
higher-order light cut-filter						
cut-on wavelength	μm	0.30	0.57	0.90	1.7	3.3
detector element array		(Si)	(Ge)	(InSb)	(HgCdTe)	
element		silicon photodiode	germanium photodiode	InSb photo- voltaic detector	HgCdTe photo- conductive detector	
element size	mm	W0.9 \times H4.4	W0.8 \times H1.0	W1.0 \times H1.0	W1.0 \times H1.0	
element spacing	mm	0.1	0.2	0.25	0.3	
number of elements		35	16	32	16	



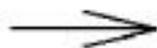
ADC : analog-digital converter
 motor IF : motor interface
 MP : multiplexer
 PC : personal computer



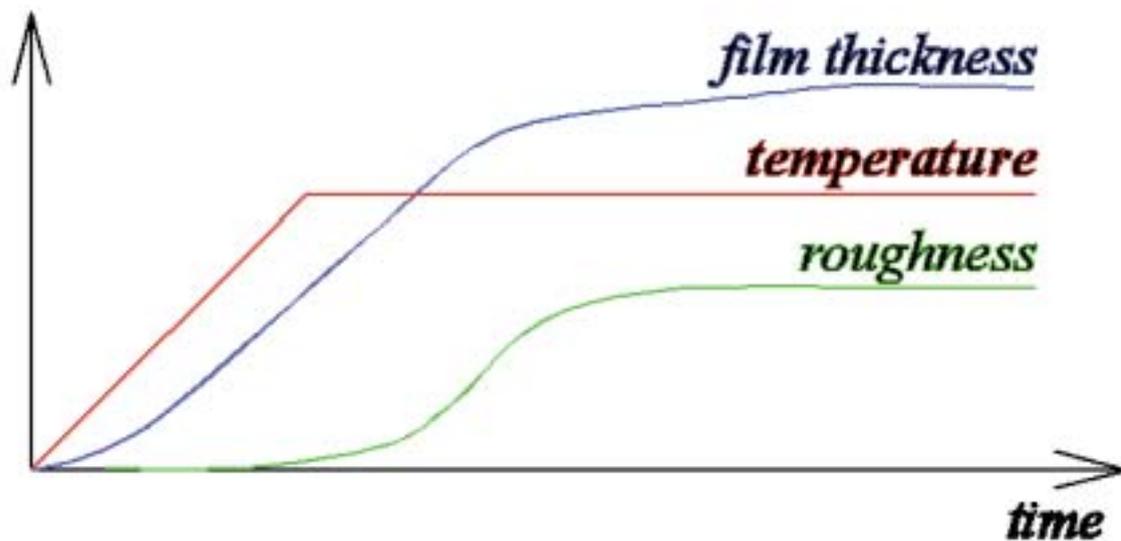
**clean optically
smooth surface**

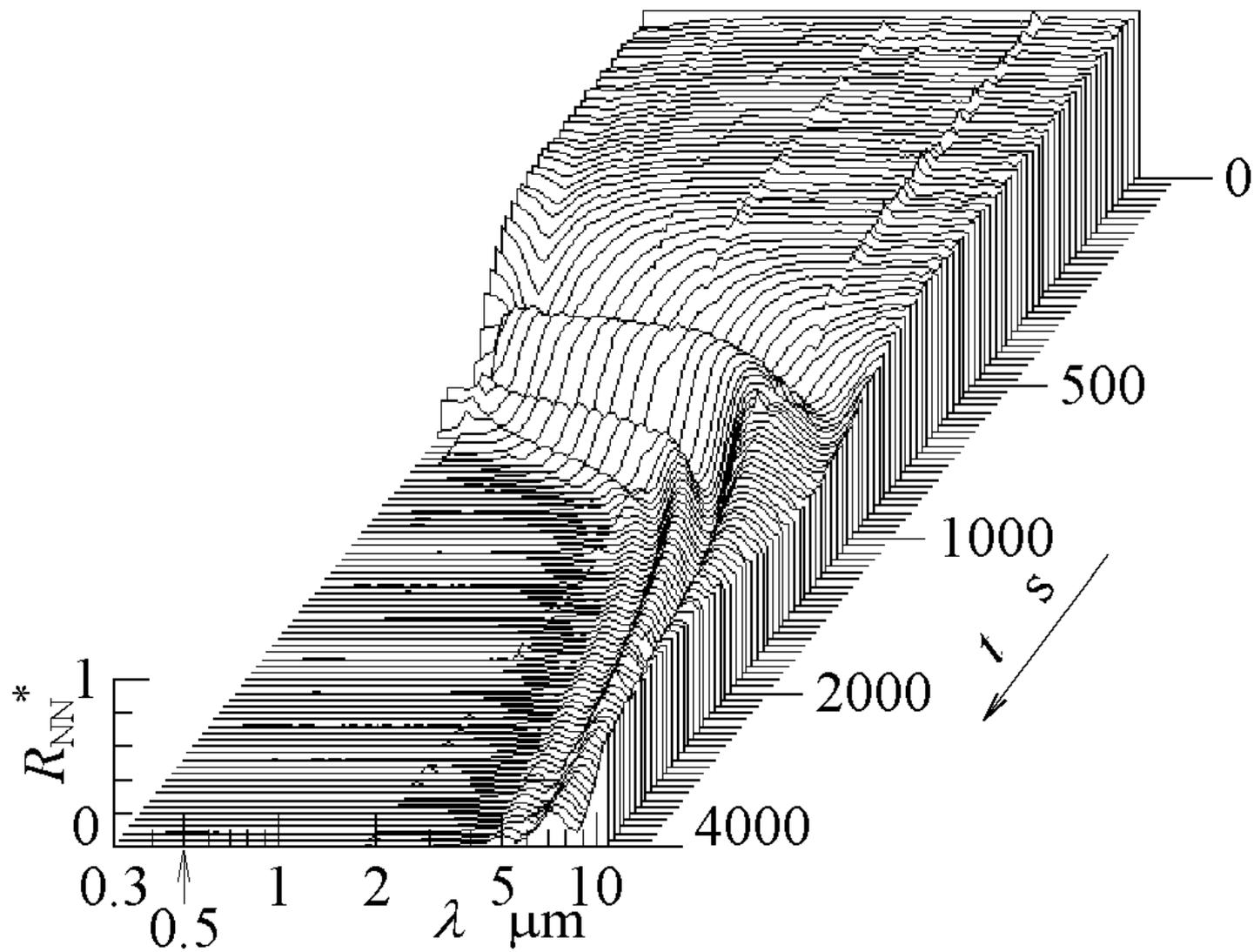


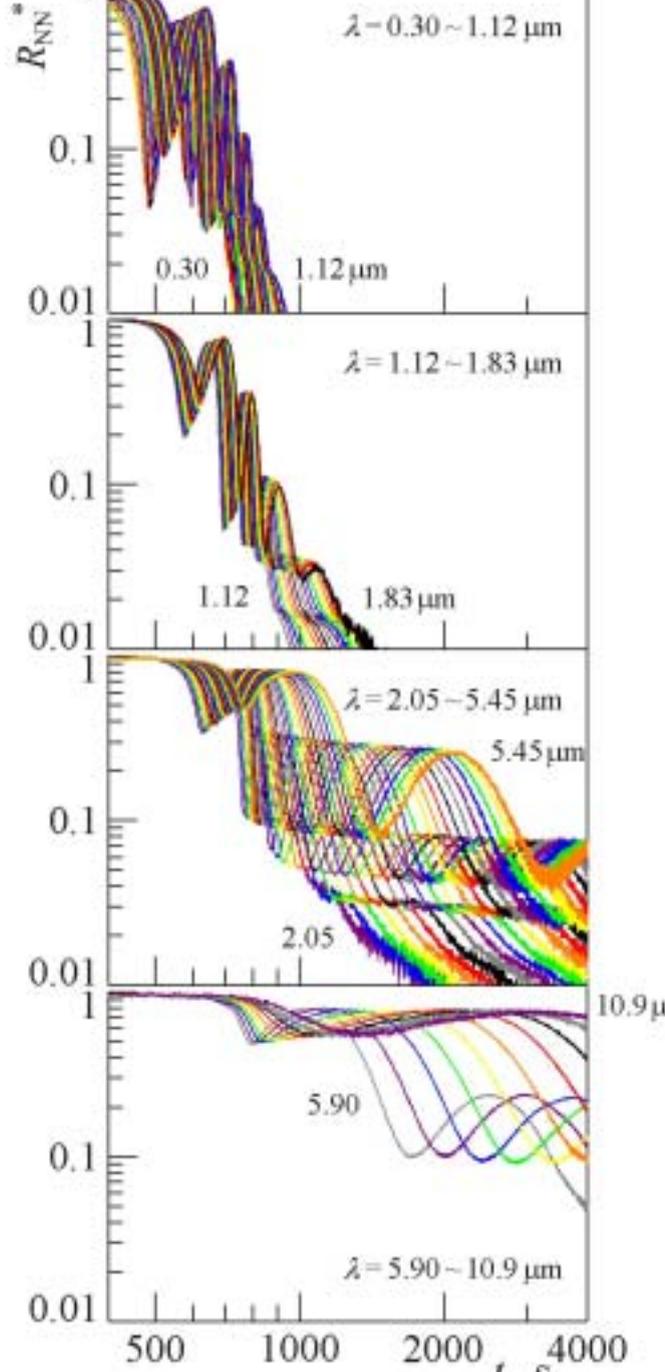
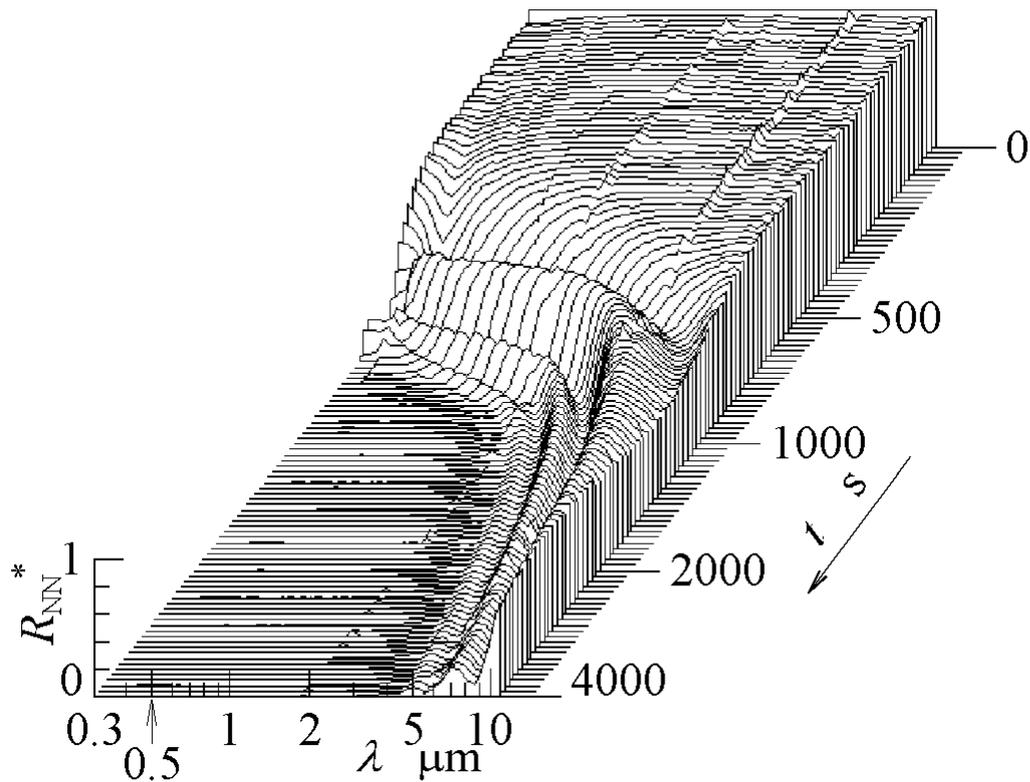
**oxidized
rough surface**



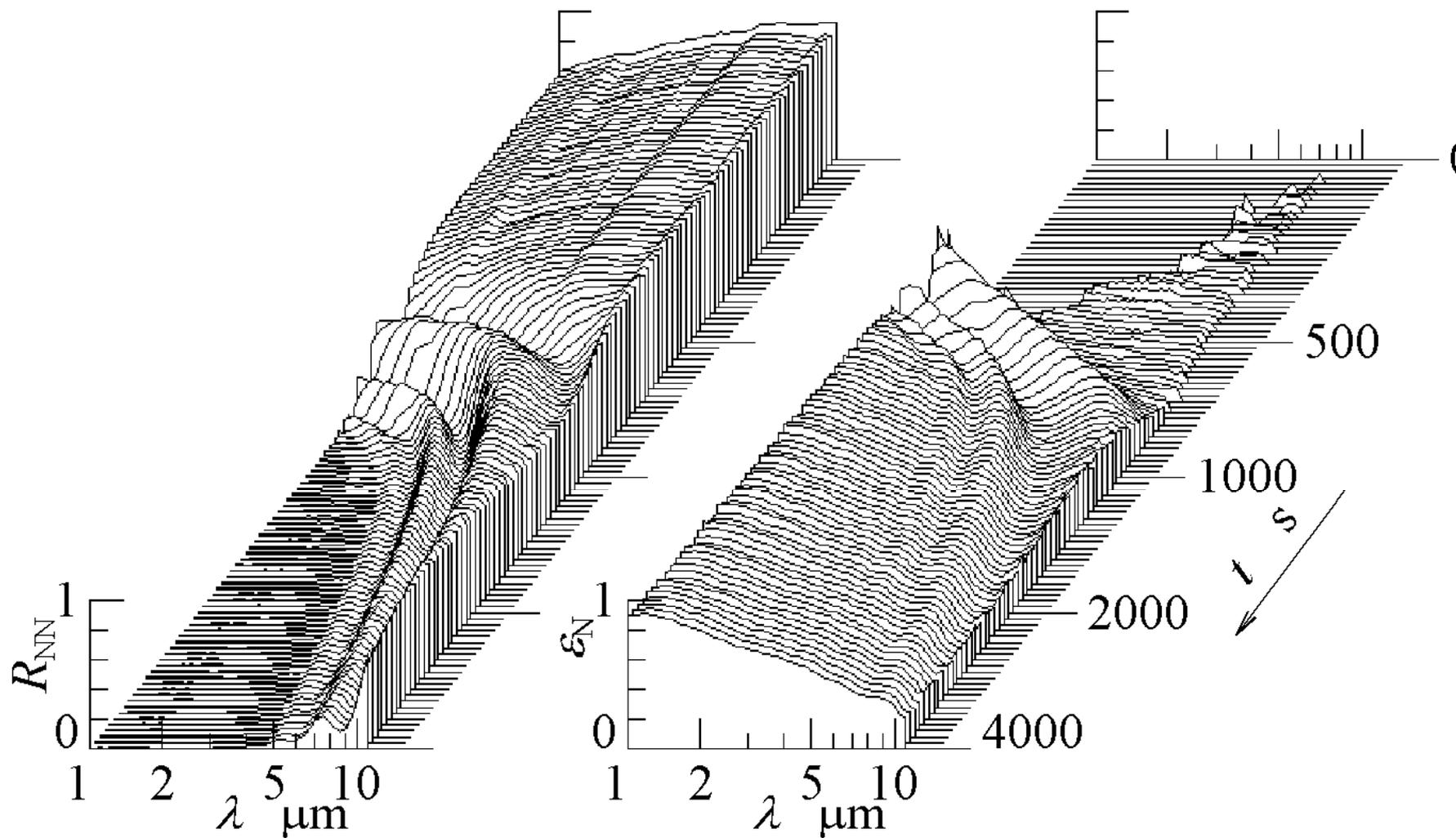
*high-temperature
air-oxidation*

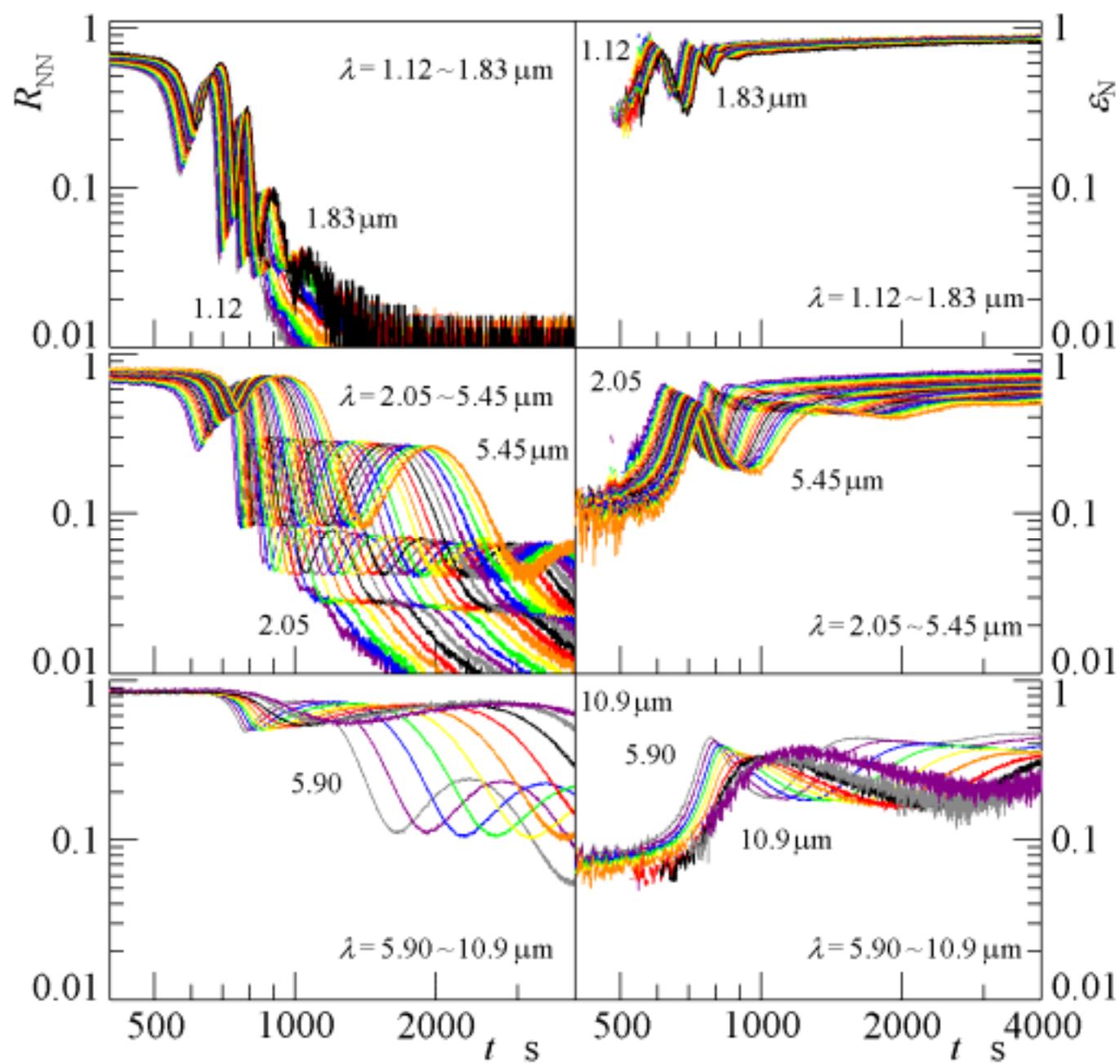


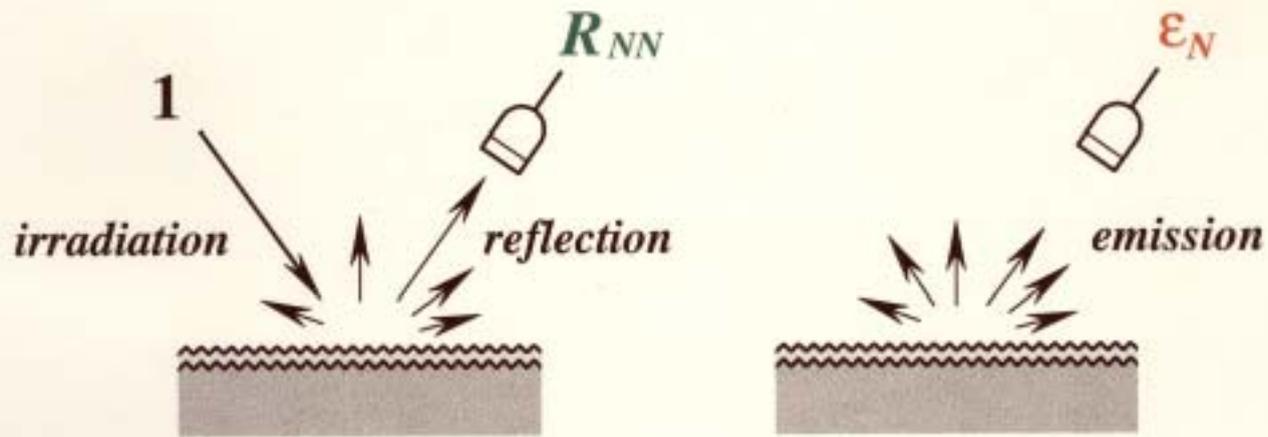




- (1) 山谷 ... ふく射の干渉 ... 被膜の成長
- (2) 減少 ... ふく射の回折 ... あらさの増大







Kirchhoff : $\epsilon_N = A_N$

Energy : $R_{NH} + A_N = 1$

$R_{NN} < R_{NH} = 1 - \epsilon_N$



diffuse reflection

\rightleftarrows *surface microstructure*

表面のふく射性質の測定

若林英信

-
- (1) ふく射伝熱評価
 - (2) 2方向反射率の測定 ...
 - (3) 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の開発 ... R_{NN} と N
 - (4) 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の拡張 ... R_{NH} と N
-

放射率・反射率

垂直放射率 N

(われわれの実験装置では 垂直 15°)

垂直入射垂直反射率 R_{NN}

垂直入射半球反射率 R_{NH}

半球等強度入射垂直反射率 R_{HN}

半球放射率 H

半球等強度入射半球反射率 R_{HH}

エネルギー保存・Kirchhoffの法則

$$A_N + R_{NH} = 1$$

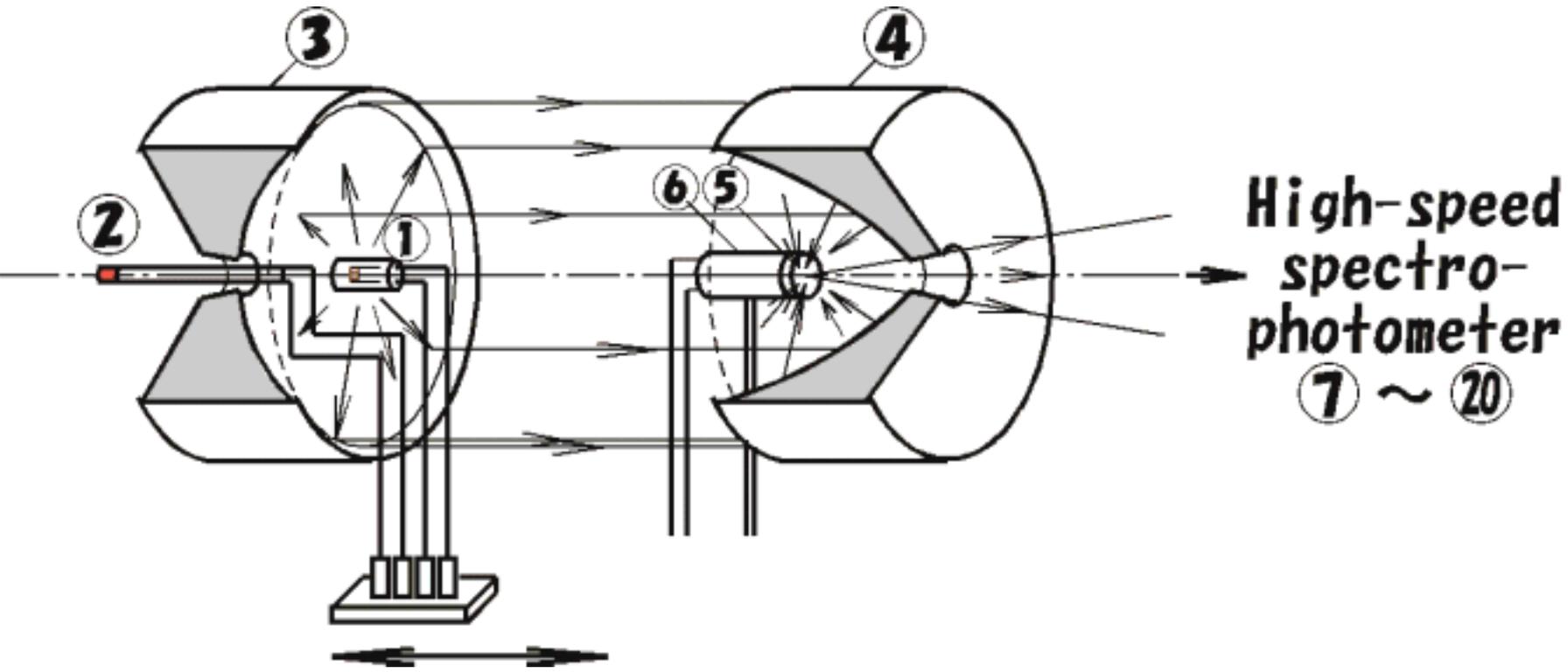
$$N = A_N$$

$$N + R_{NH} = 1$$

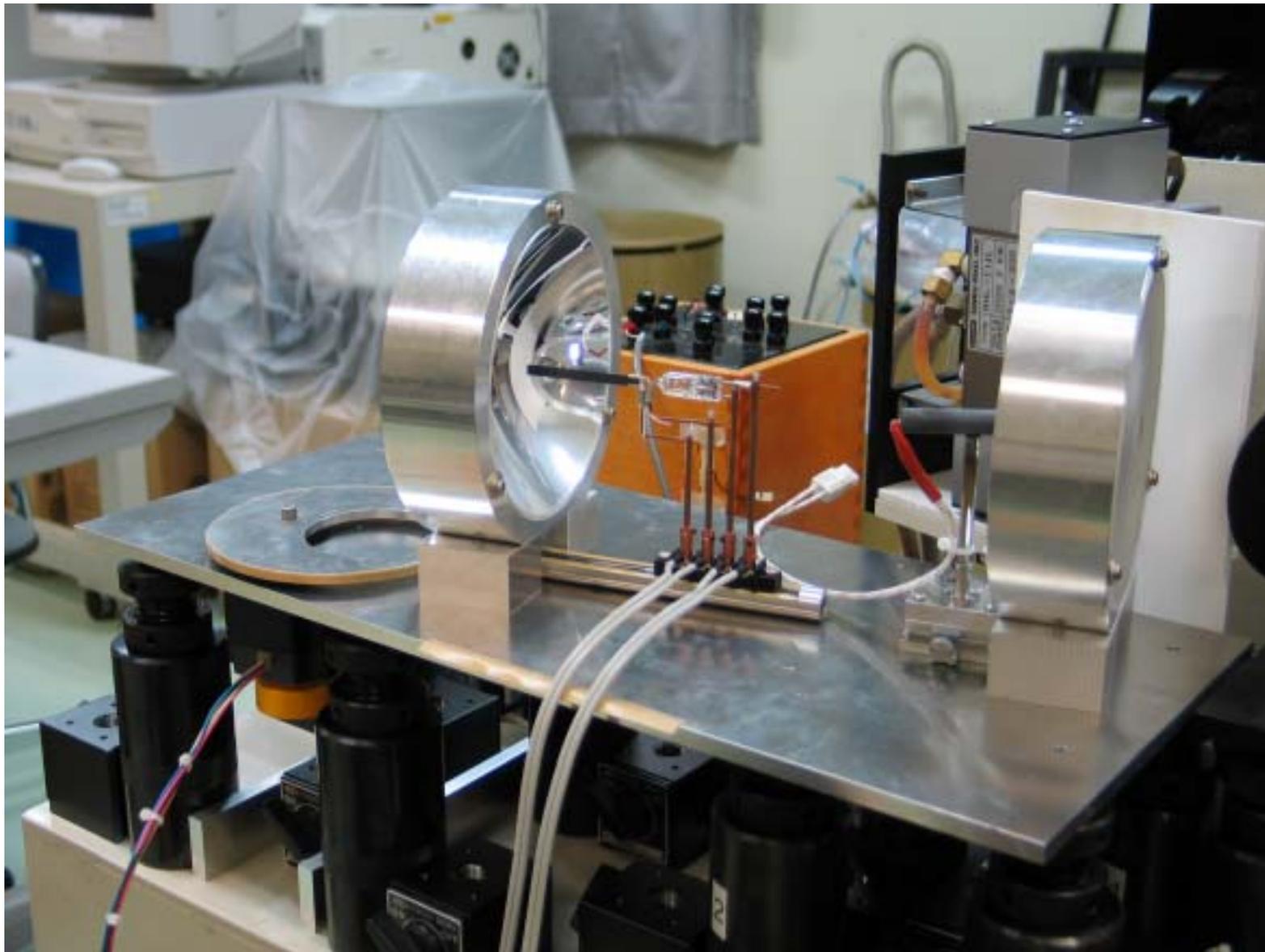
$$A_H + R_{HH} = 1$$

Helmholtzの相反則

$$R_{NH} = R_{HN}$$

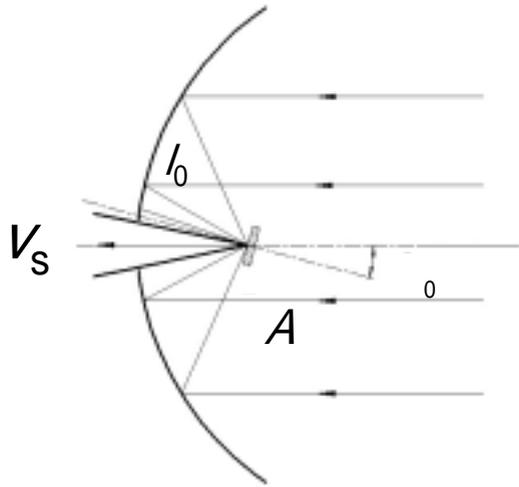


- 1. tungusten-halogen lamp
- 2. Si₃N₄ light source
- 3. paraboloidal mirror 1
- 4. paraboloidal mirror 2
- 5. specimen
- 6. heater

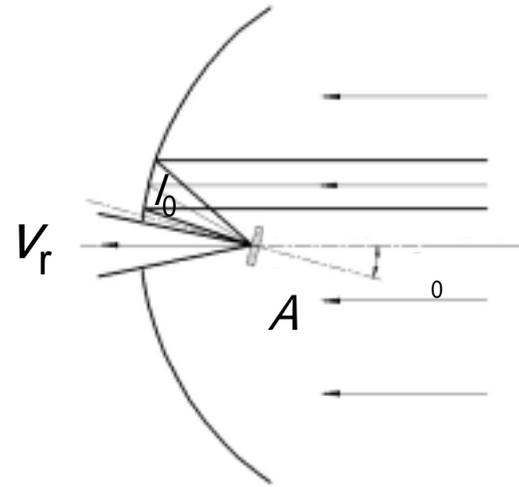


半球等強度入射垂直反射率

$$R_{\text{HN}} \equiv \frac{I_s}{I_0}$$



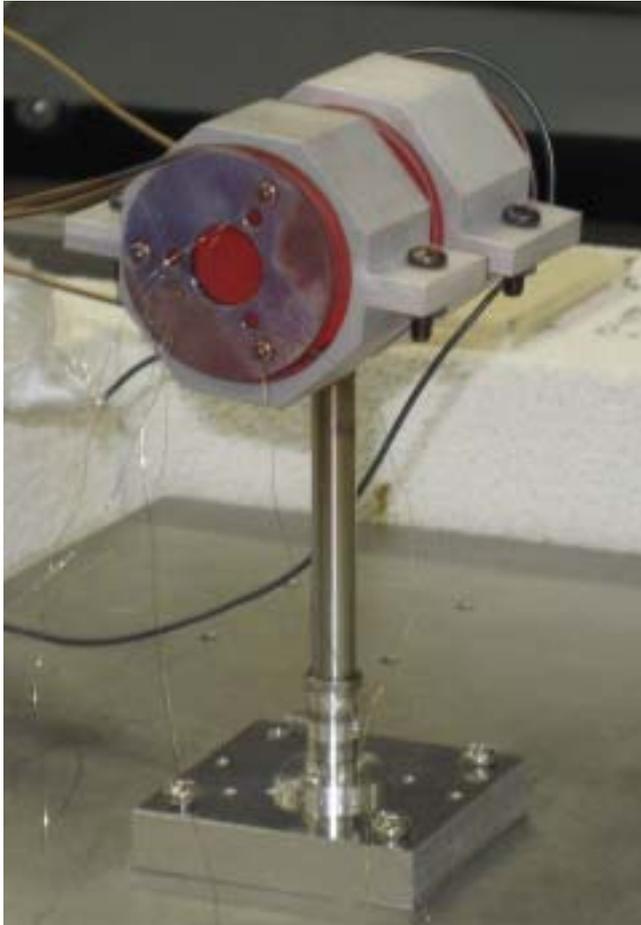
$$V_s = I_s A \cos \theta$$



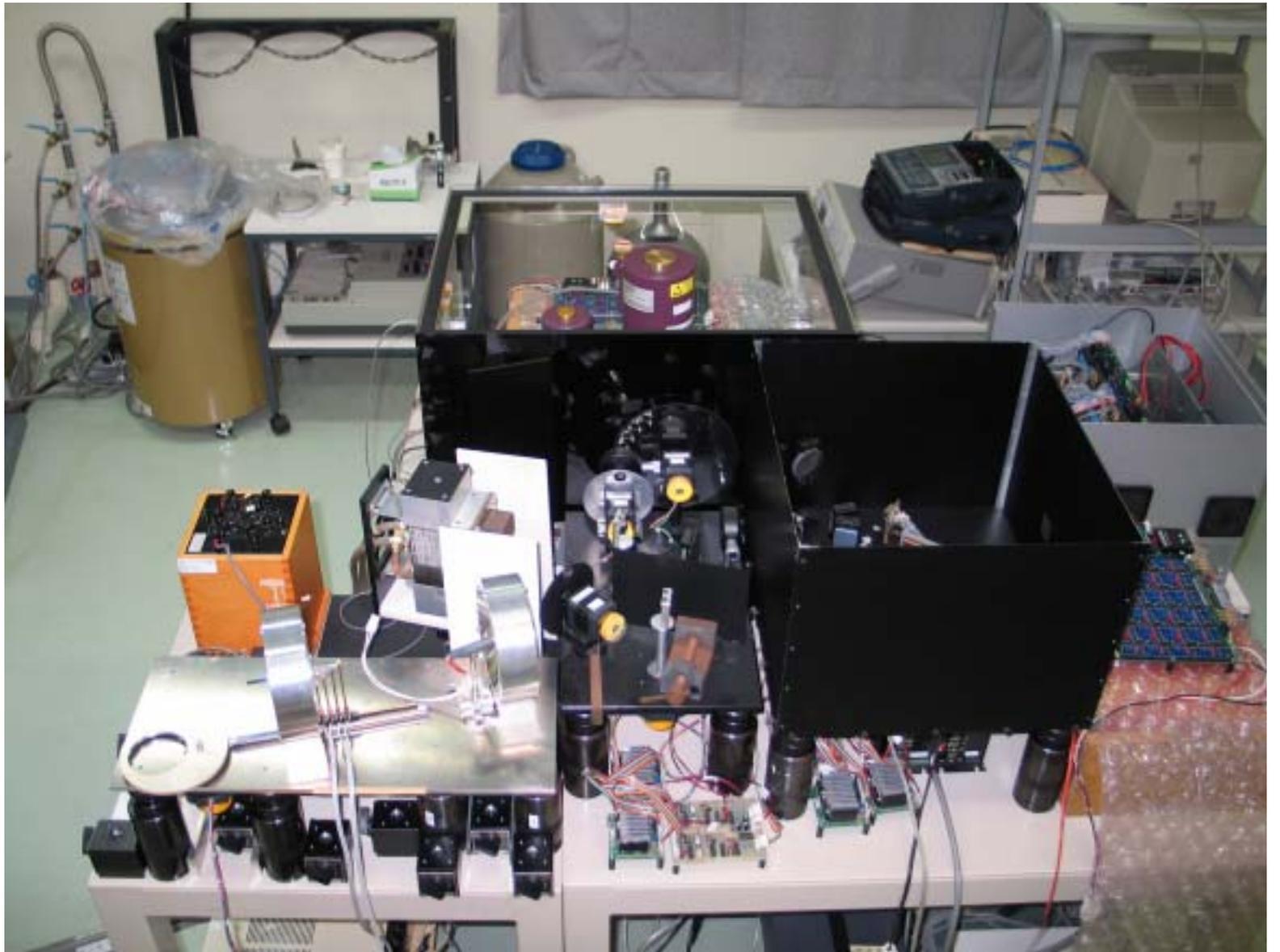
$$V_r = R(\theta) I_0 A \cos \theta$$

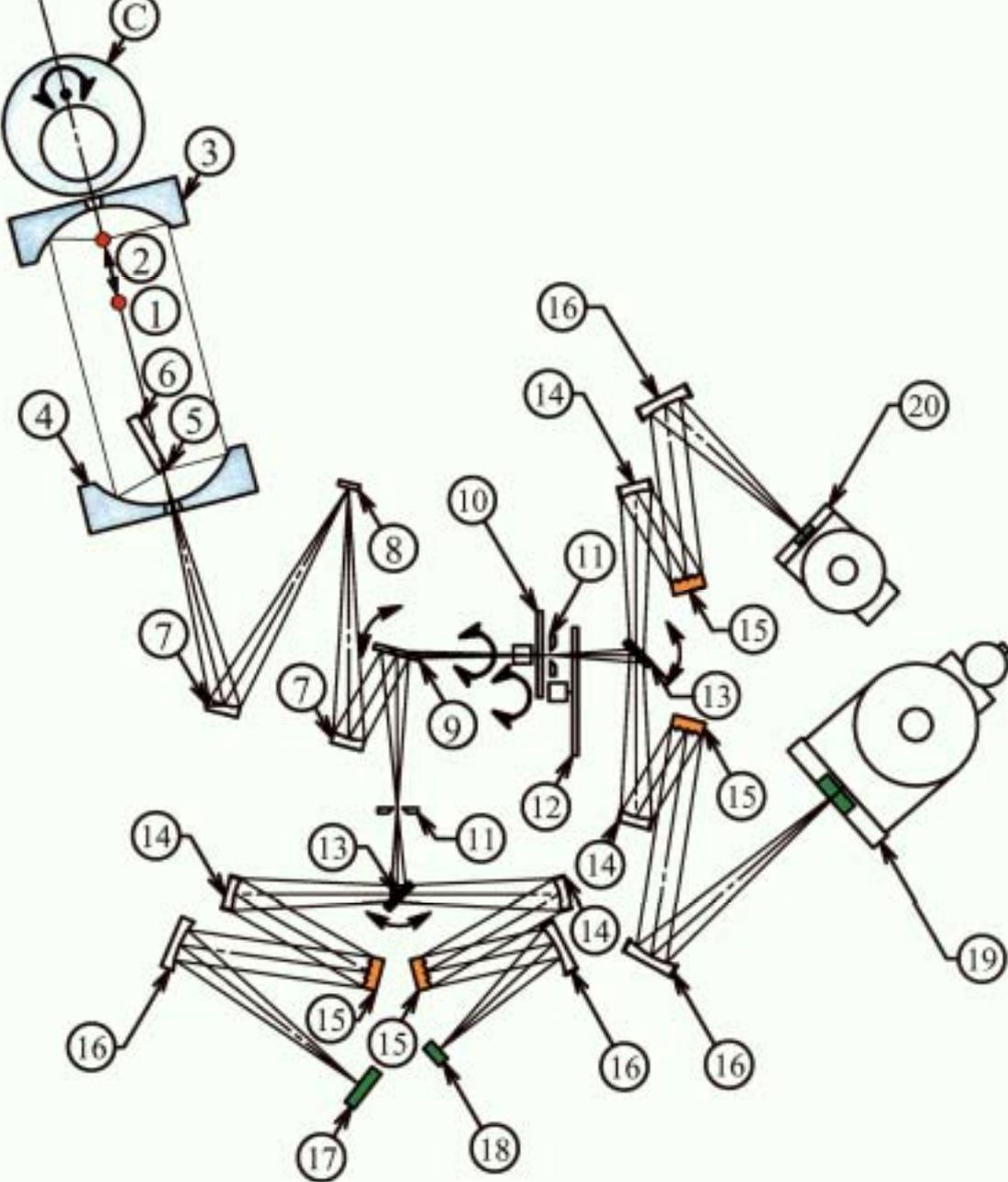
$$R_{\text{HN}} \equiv \frac{I_s}{I_0} = \frac{V_s}{V_r} R(\theta)$$

small reference blackbody



- ID $\phi 20$ mm \times 50 mm
- diaphragm: $\phi 10$ mm
- material: SUS304
- sheath heater: $\phi 1$ mm
 - ... 3 circuits: base, body & neck
- thermocouple: K $\phi 0.1$ mm
 - ... at base, body & neck
- calib. temps.:
 - 1000, 1050 and 1100 K
- emittance: 0.99





1. tungsten-halogen lamp
2. Si₃N₄ light source
3. paraboloidal mirror 1
4. paraboloidal mirror 2
5. specimen
6. heater
- C. cam mechanics
7. concave mirror
8. plane mirror
9. rotary plane mirror
10. chopper
11. entrance slit
12. filter disk
13. rotary plane mirror
14. collimator
15. diffraction grating
16. camera mirror
17. 35-Si photodiode array
18. 16-Ge photodiode array
19. 32-InSb photovoltaic array
20. 16-HgCdTe photoconductive array

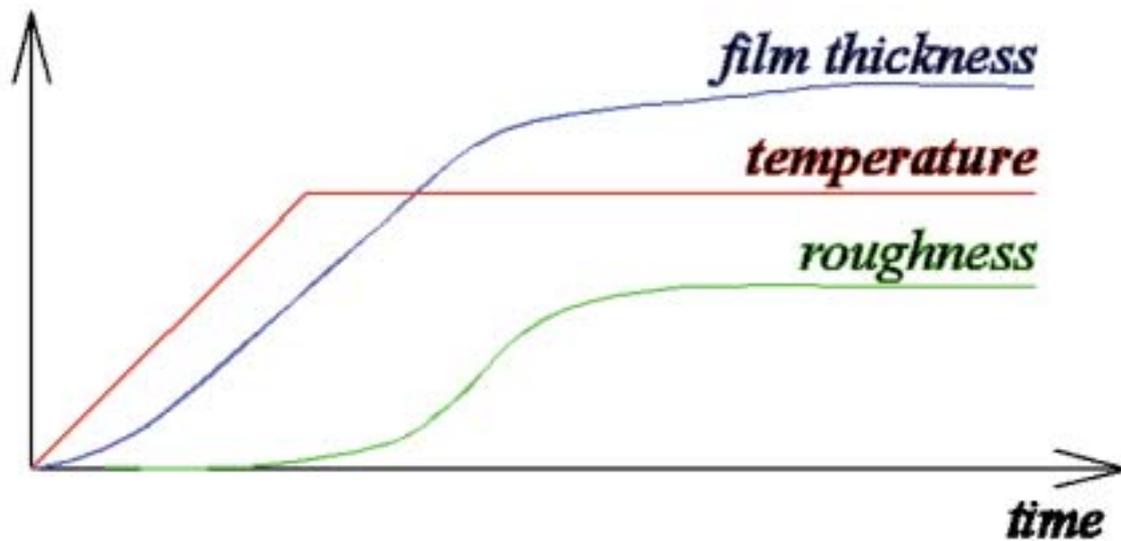
**clean optically
smooth surface**



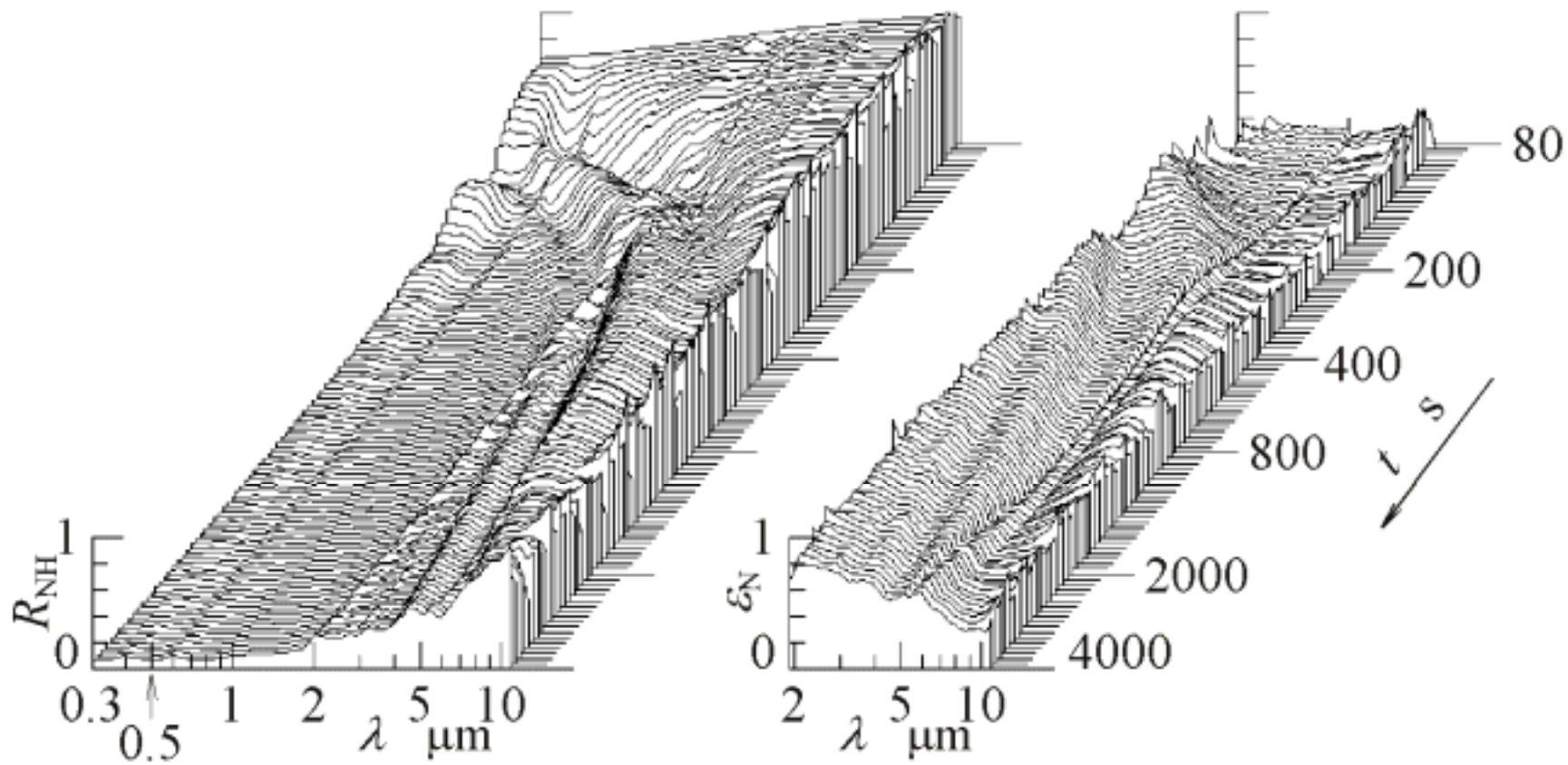
**oxidized
rough surface**



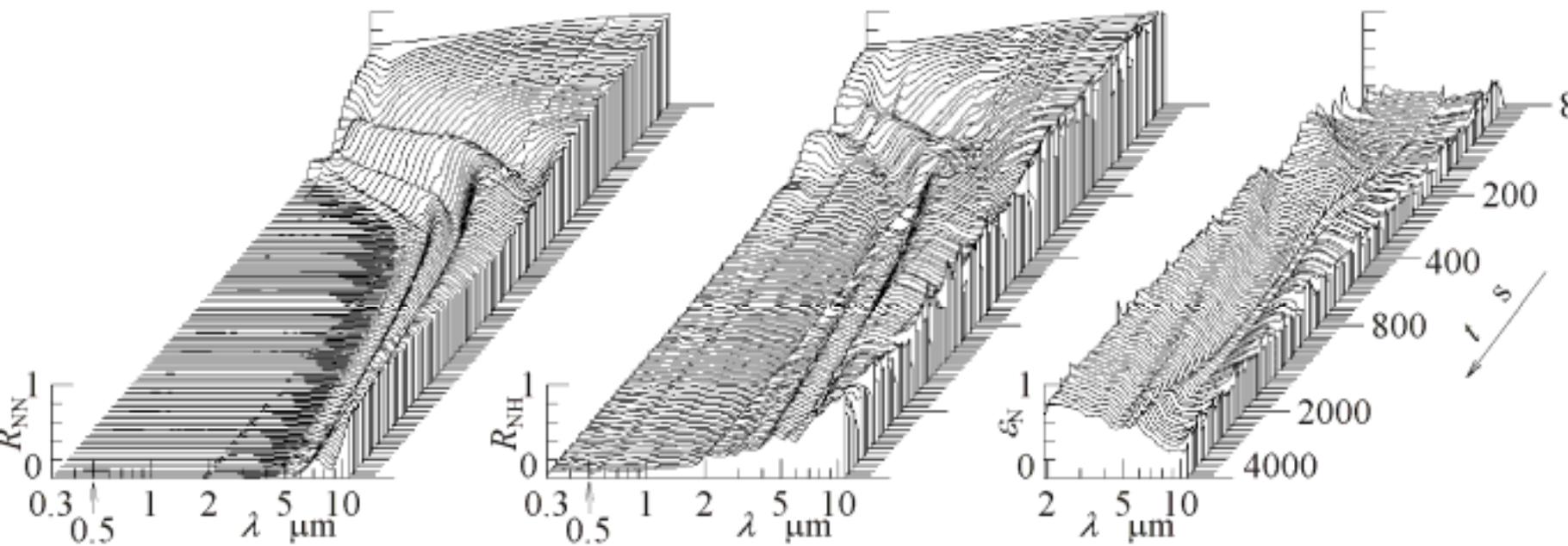
*high-temperature
air-oxidation*



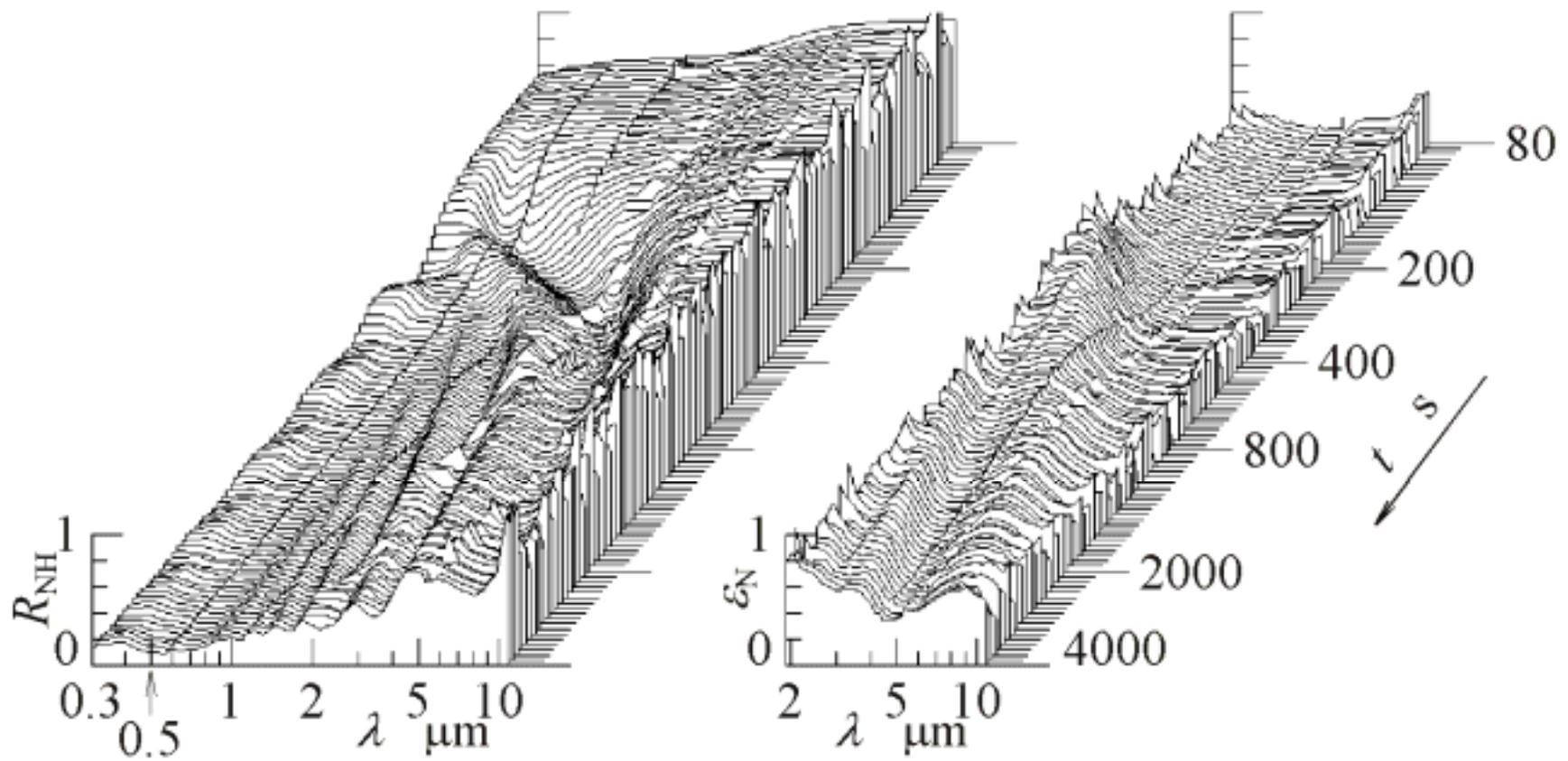
ニッケル (初期状態=光学鏡面)



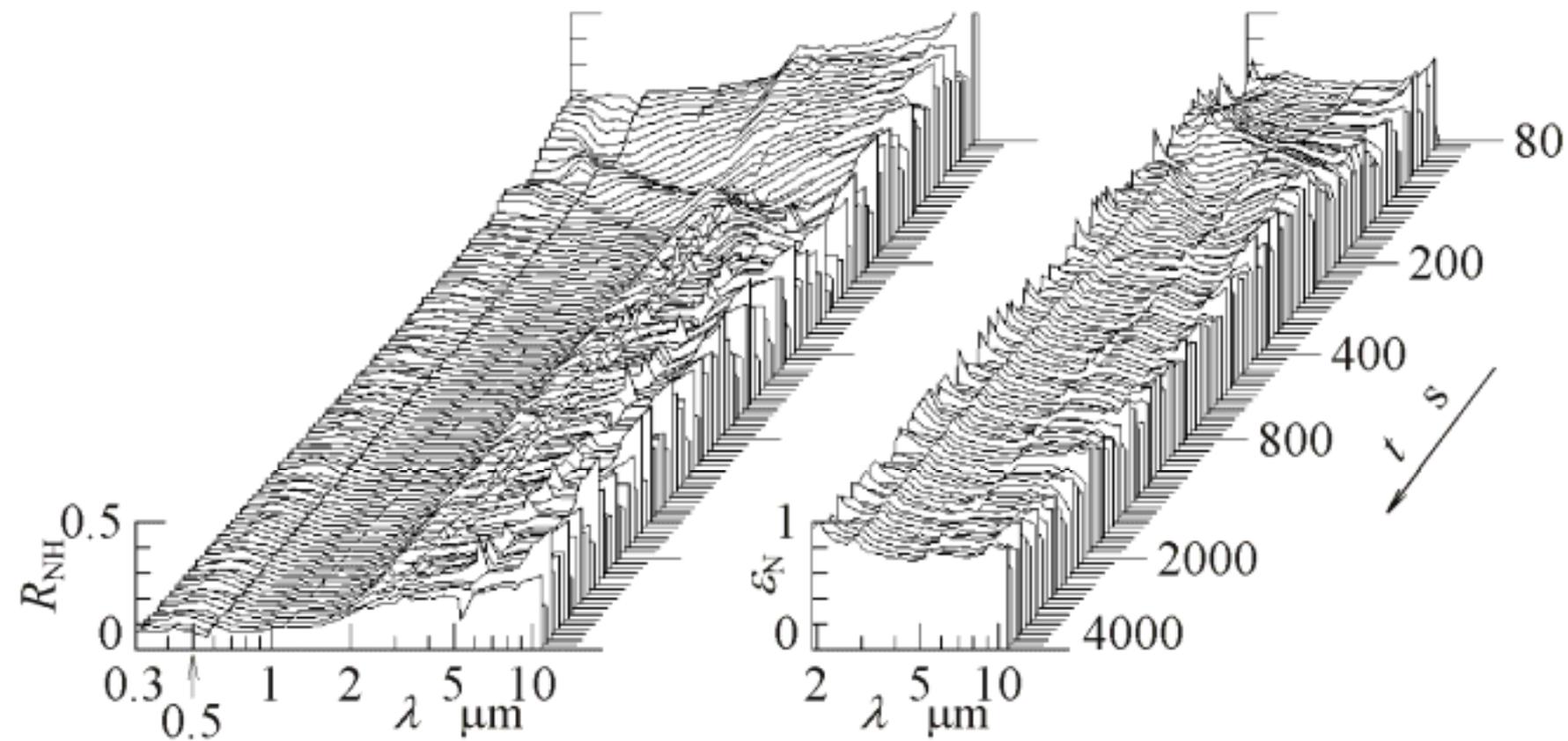
ニッケル (初期状態=光学鏡面)



クロム (初期状態=光学鏡面)



ニッケル (初期状態=あらい表面)



クロム (初期状態=あらい表面)

