

広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の開発・拡張

若林英信

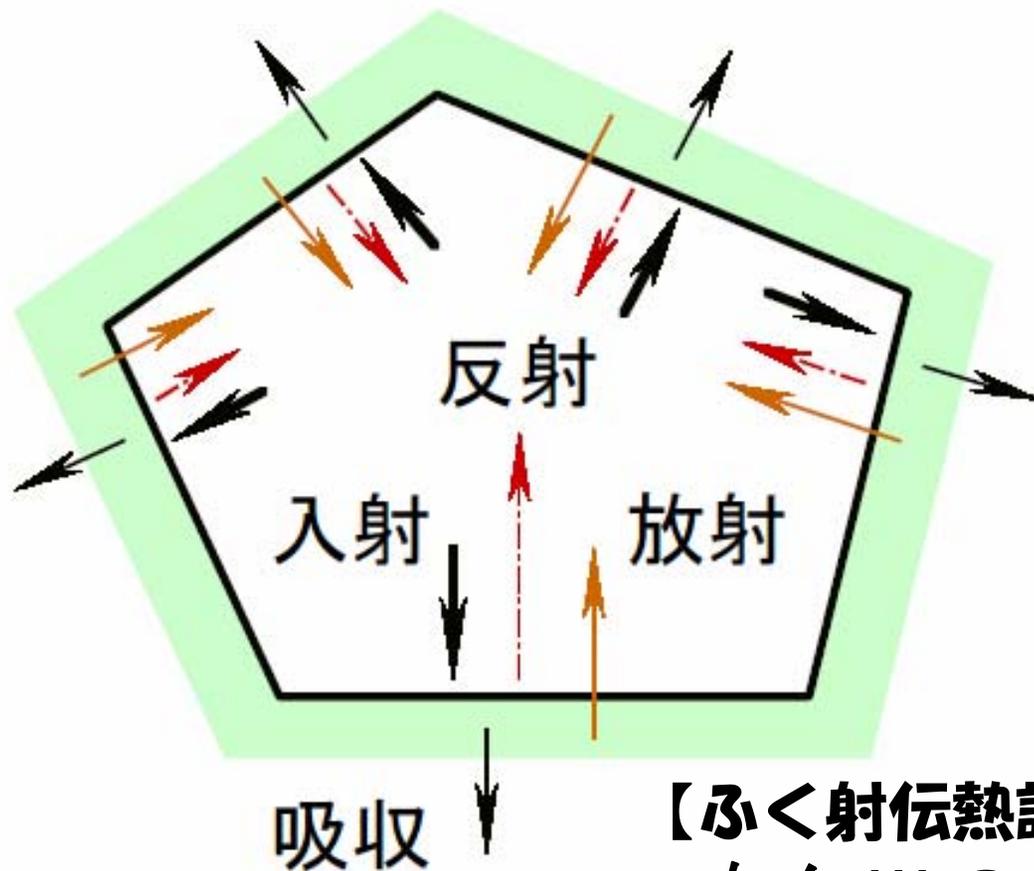
-
1. ふく射伝熱評価
 2. 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の開発
 3. 表面の温度・ミクロ構造の熱ふく射スペクトル診断法
 4. 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の拡張
 5. Kirchoffの法則の実験的検証
-

広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の開発・拡張

若林英信

-
1. **ふく射伝熱評価**
 2. **広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の開発**
 3. 表面の温度・ミクロ構造の熱ふく射スペクトル診断法
 4. **広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の拡張**
 5. Kirchoffの法則の実験的検証
-

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？

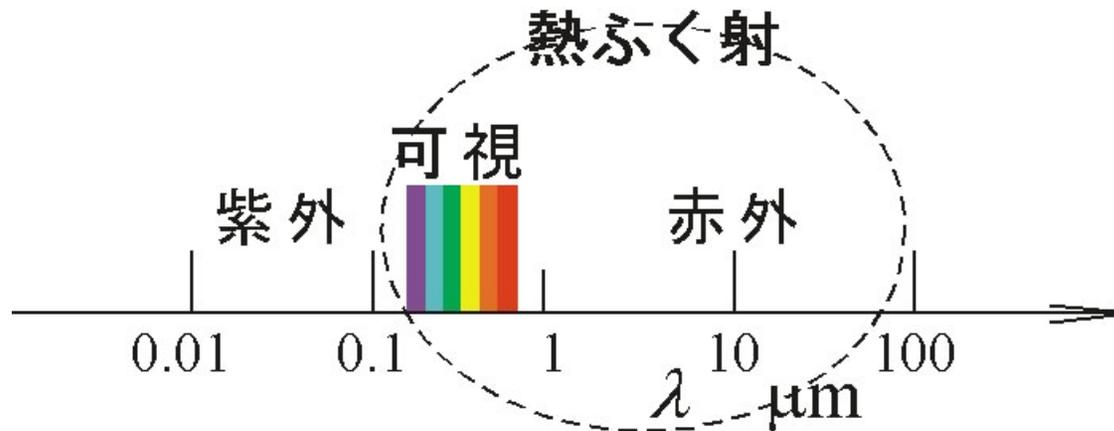
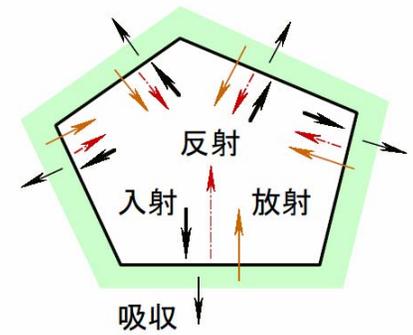
熱ふく射 thermal radiation

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



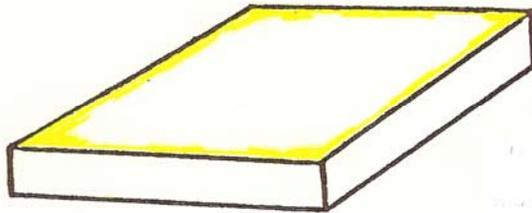
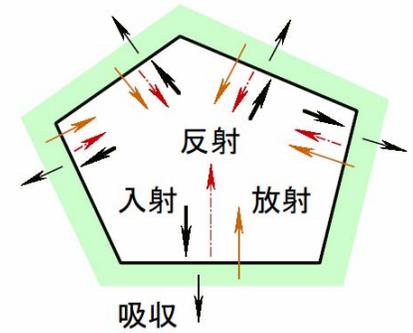
実在表面 real surface

ふく射を不完全に拡散反射する

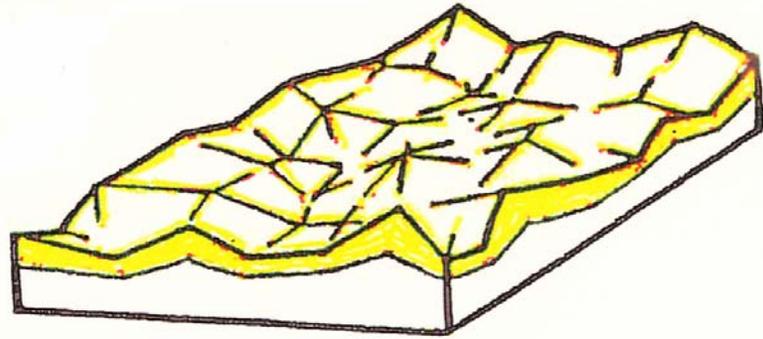
... 鏡面反射的にでもなく 完全拡散反射的にでもなく

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

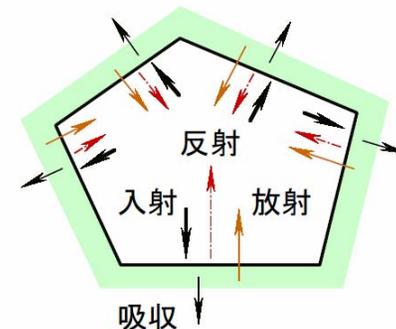


! 系におけるふく射の伝搬をとり扱うのは易しくない

! 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た)

全半球放射率 (or 全垂直放射率)

... 教科書・資料集にはその値がリストされた

TABLE A.8 Total, Normal (*n*) or Hemispherical (*h*) Emissivity of Selected Surfaces

Metallic Solids and Their Oxides^a

Description/Composition		Emissivity, ϵ_n or ϵ_h , at Various Temperatures (K)										
		100	200	300	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Aluminum												
Highly polished, film	(<i>h</i>)	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06						
Foil, bright	(<i>h</i>)	0.06	0.06	0.07								
Anodized	(<i>h</i>)			0.82	0.76							
Chromium												
Polished or plated	(<i>n</i>)	0.05	0.07	0.10	0.12	0.14						
Copper												
Highly polished	(<i>h</i>)			0.03	0.03	0.04	0.04	0.04				
Stably oxidized	(<i>h</i>)					0.50	0.58	0.80				
Gold												
Highly polished or film	(<i>h</i>)	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06				
Foil, bright	(<i>h</i>)	0.06	0.07	0.07								
Molybdenum												
Polished	(<i>h</i>)					0.06	0.08	0.10	0.12	0.15	0.21	0.26
Shot-blasted, rough	(<i>h</i>)					0.25	0.28	0.31	0.35	0.42		
Stably oxidized	(<i>h</i>)					0.80	0.82					
Nickel												
Polished	(<i>h</i>)					0.09	0.11	0.14	0.17			
Stably oxidized	(<i>h</i>)					0.40	0.49	0.57				
Platinum												
Polished	(<i>h</i>)						0.10	0.13	0.15	0.18		
Silver												
Polished	(<i>h</i>)			0.02	0.02	0.03	0.05	0.08				
Stainless steels												
Typical, polished	(<i>n</i>)			0.17	0.17	0.19	0.23	0.30				
Typical, cleaned	(<i>n</i>)			0.22	0.22	0.24	0.28	0.35				
Typical, lightly oxidized	(<i>n</i>)						0.33	0.40				
Typical, highly oxidized	(<i>n</i>)						0.67	0.70	0.76			
AISI 347, stably oxidized	(<i>n</i>)					0.87	0.88	0.89	0.90			
Tantalum												
Polished	(<i>h</i>)								0.11	0.17	0.23	0.28
Tungsten												
Polished	(<i>h</i>)							0.10	0.13	0.18	0.25	0.29

伝統的な方法の問題点

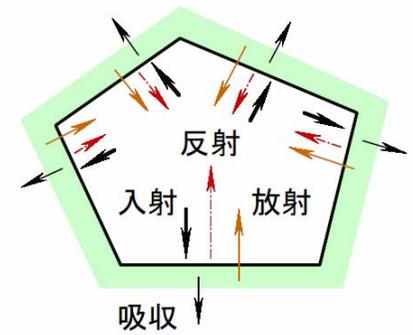
... 適切に評価できない / 確かでない

なんK? 温度の有効数字 の 1桁め

なんW? 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

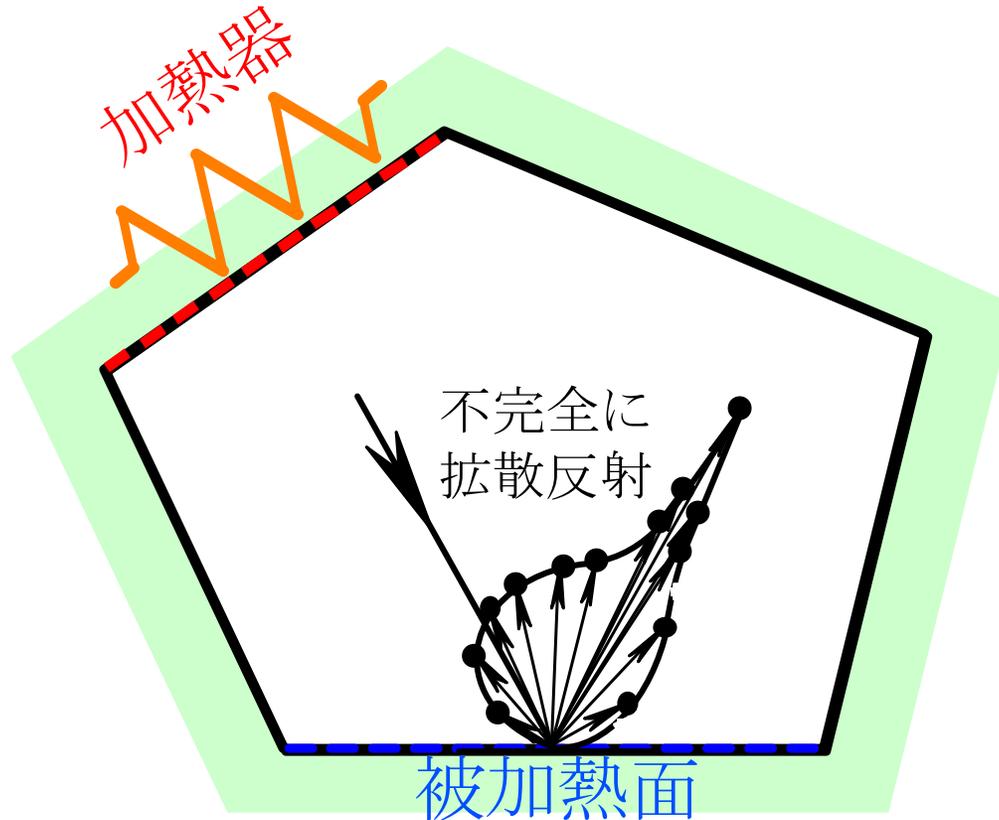
完全拡散 灰色体



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

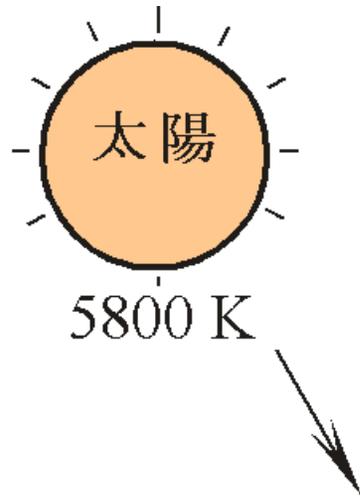


ふく射の波長分布の仮定の乱暴さ ... 系に強い温度分布がある場合に顕著になる

灰色体

$$\epsilon_H^t \quad A_H^t$$

(全半球放射率) \neq (全半球等強度入射吸収率)



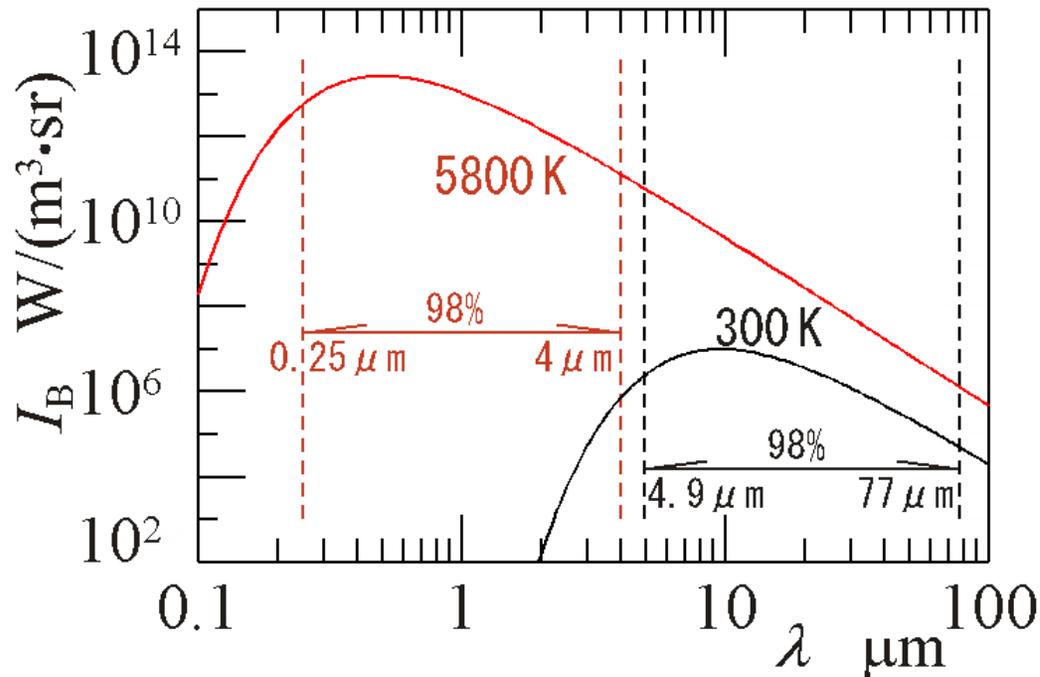
cf.

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 **0.05** ($=\epsilon_H^t$) 放射

(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

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

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

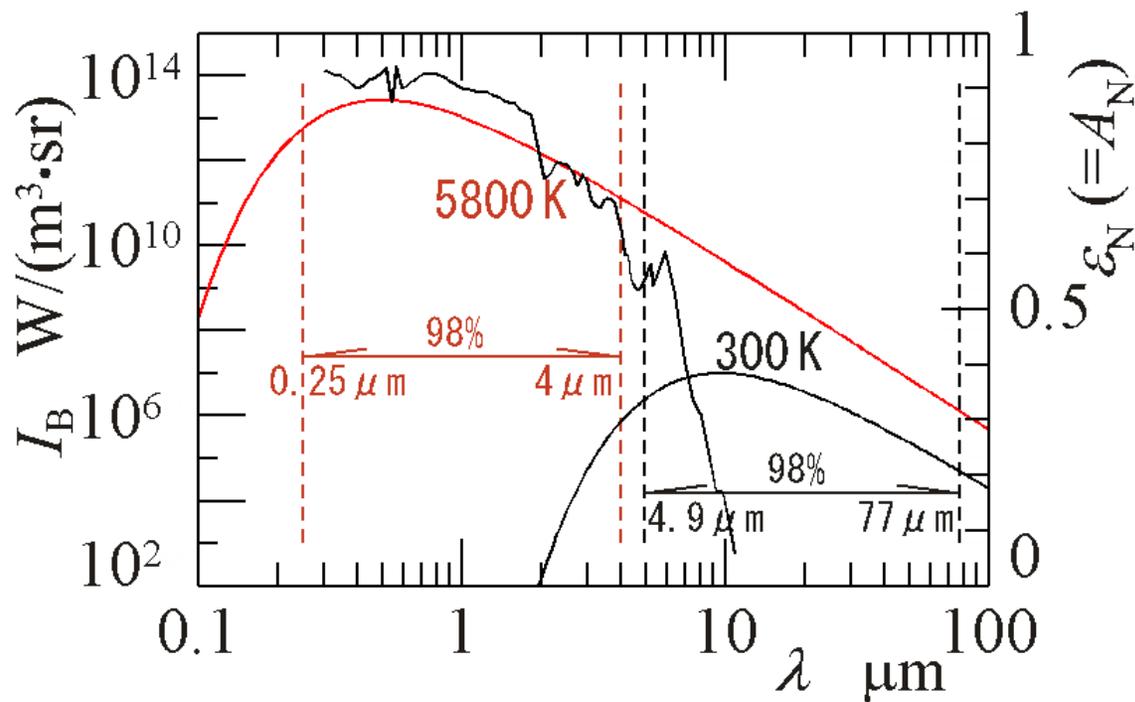
$$C_1 = 3.7415 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$$

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

※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面

分光指向放射率

$$\varepsilon(\lambda, \theta, \phi, T) \equiv \frac{I_{\text{emis}}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\text{B}}(\lambda, T)}$$

全半球放射率

$$\varepsilon_{\text{H}}^{\text{t}}(T) = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} \int_{\phi=0}^{360^{\circ}} \int_{\theta=0}^{90^{\circ}} \varepsilon(\lambda, \theta, \phi, T) I_{\text{B}}(\lambda, T) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\infty} \int_{\phi=0}^{360^{\circ}} \int_{\theta=0}^{90^{\circ}} I_{\text{B}}(\lambda, T) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi d\lambda}$$

分光指向入射吸収率

$$A(\lambda, \theta, \phi, T) \equiv \frac{I_{\text{abs}}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\text{in}}(\lambda, \theta, \phi)}$$

全半球等強度入射吸収率

$$A_{\text{H}}^{\text{t}}(T) = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} \int_{\phi=0}^{360^{\circ}} \int_{\theta=0}^{90^{\circ}} A(\lambda, \theta, \phi, T) I_{\text{in}}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\infty} \int_{\phi=0}^{360^{\circ}} \int_{\theta=0}^{90^{\circ}} I_{\text{in}}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi d\lambda}$$

5800Kの黒体ふく射が(半球方向から等強度で)入射するときの

全半球等強度入射吸収率

≡ **太陽光吸収率**

$$A_{\text{s}} = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} \int_{\phi=0}^{360^{\circ}} \int_{\theta=0}^{90^{\circ}} A(\lambda, \theta, \phi, T) I_{\text{B}}(\lambda, T_{\text{s}} = 5800\text{K}) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\infty} \int_{\phi=0}^{360^{\circ}} \int_{\theta=0}^{90^{\circ}} I_{\text{B}}(\lambda, T_{\text{s}} = 5800\text{K}) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi d\lambda}$$

Kirchhoffの法則が成立するとすれば

$$\varepsilon(\lambda, \theta, \phi, T) = A(\lambda, \theta, \phi, T)$$

$\varepsilon_{\text{H}}^{\text{t}}(T) = A_{\text{H}}^{\text{t}}(T)$ が成立するには

(1) 温度 T の黒体ふく射が入射する $I_{\text{in}} = I_{\text{B}}(\lambda, T)$

(2) $\varepsilon(\lambda, \theta, \phi, T) = A(\lambda, \theta, \phi, T)$ が波長によらない(灰色体の仮定)

のいずれかを条件とする

(5800 Kの黒体ふく射が入射するときの)
全半球等強度入射吸収率

(太陽光吸収率)

全半球放射率

	A_s	$\varepsilon_H^t(T=300\text{ K})$
アルミニウム, 研磨面	0.09	0.03
アルミニウム, アルマイト処理	0.14	0.84
レンガ, 赤	0.63	0.93
コンクリート	0.60	0.88
皮膚	0.62	0.97
金属, 黒コバルトめっき	0.93	0.30
金属, 黒ニッケルめっき	0.92	0.08
金属, 黒クロムめっき	0.87	0.09
金属, 白ペンキ	0.21	0.96
金属, 黒ペンキ	0.97	0.97
ステンレス鋼, as received, dull	0.50	0.21

←理想的な
太陽エネルギー波長選択吸収性の表面
に近い



黒ニッケルめっき



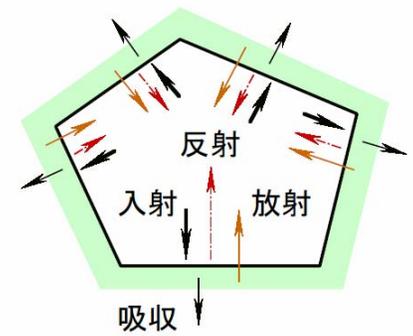
黒クロムめっき

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

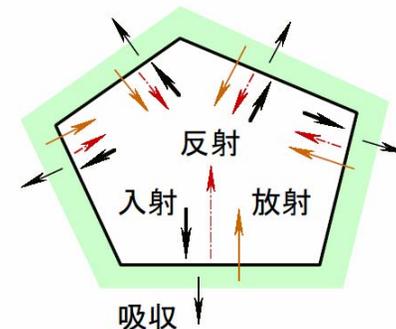
... 評価の目的に照らして

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

【有名なTPRCのデータ集より】 垂直入射垂直反射率スペクトル

反射率

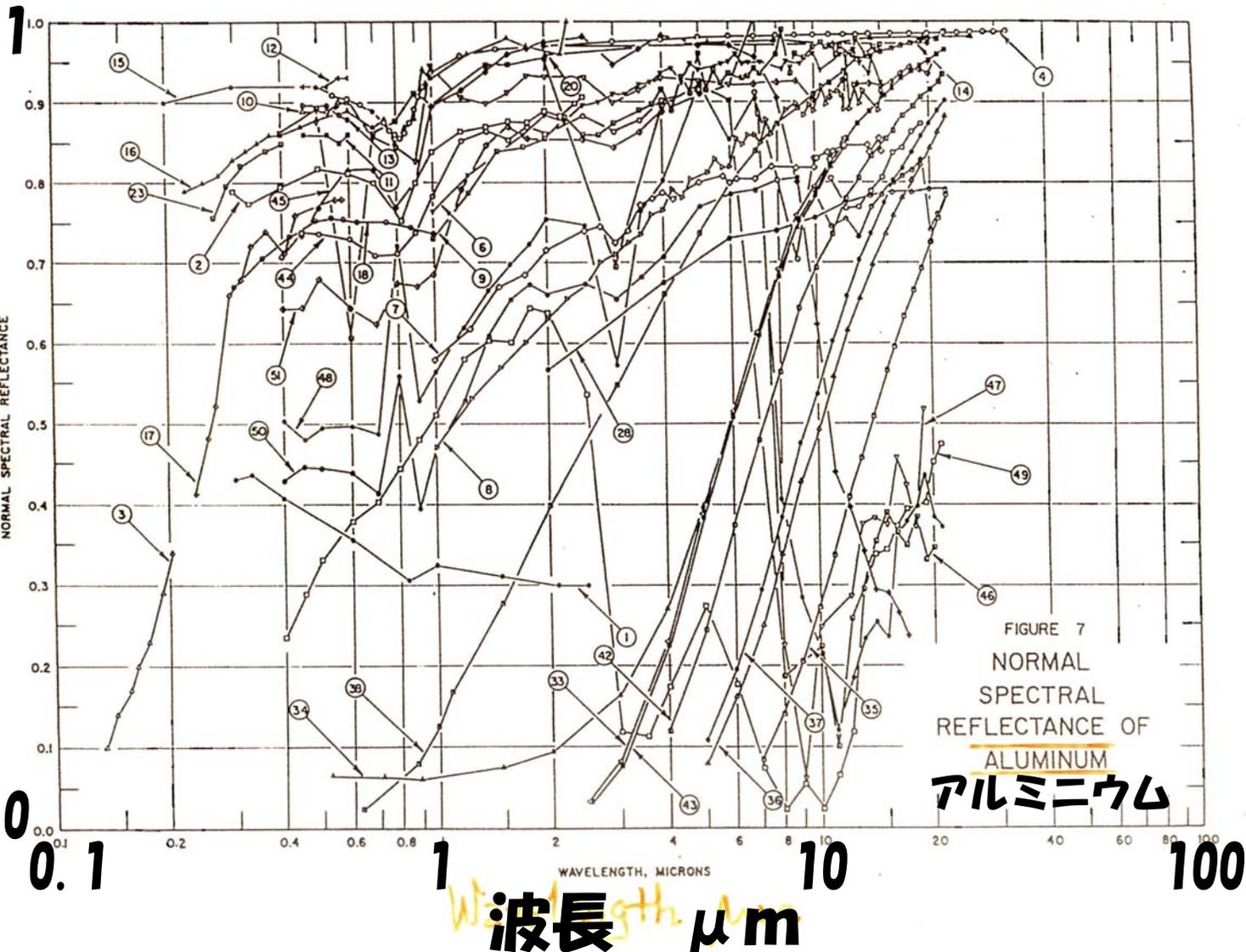


FIGURE 7
NORMAL
SPECTRAL
REFLECTANCE OF
ALUMINUM
アルミニウム

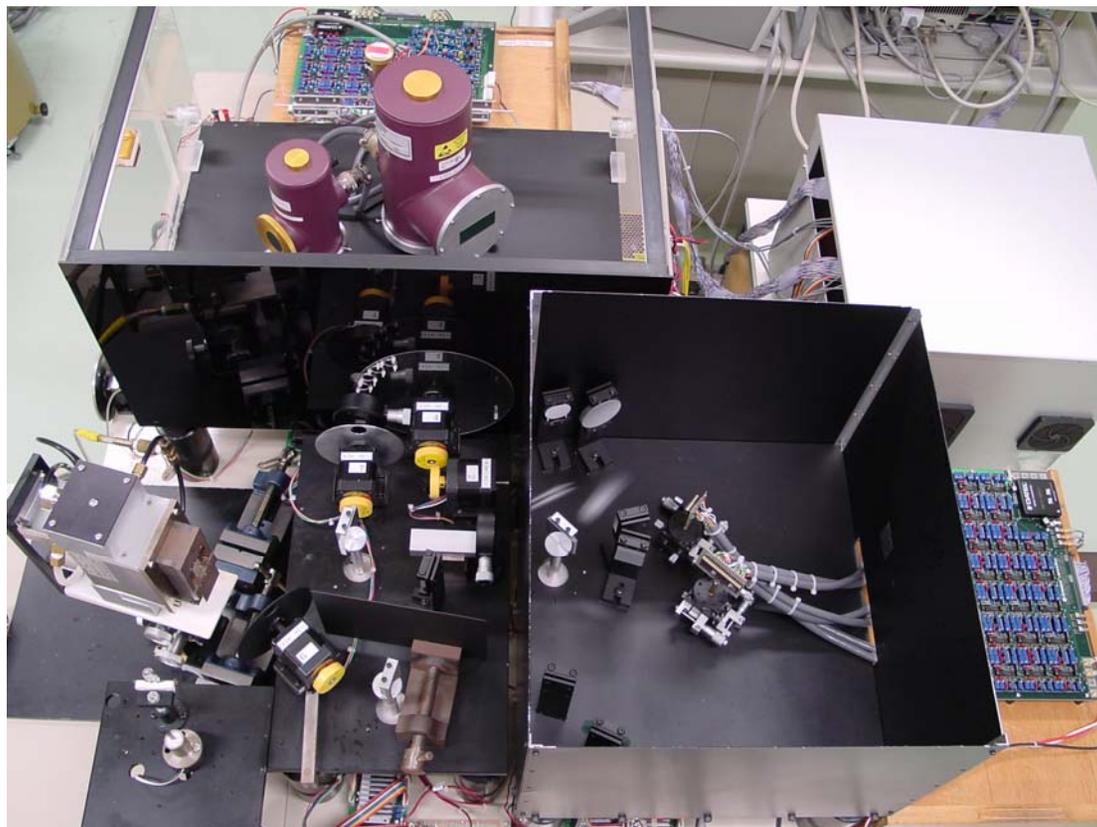
広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の開発・拡張

若林英信

-
1. ふく射伝熱評価
 2. 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の開発
 3. 表面の温度・ミクロ構造の熱ふく射スペクトル診断法
 4. 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の拡張
 5. Kirchoffの法則の実験的検証
-

【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*

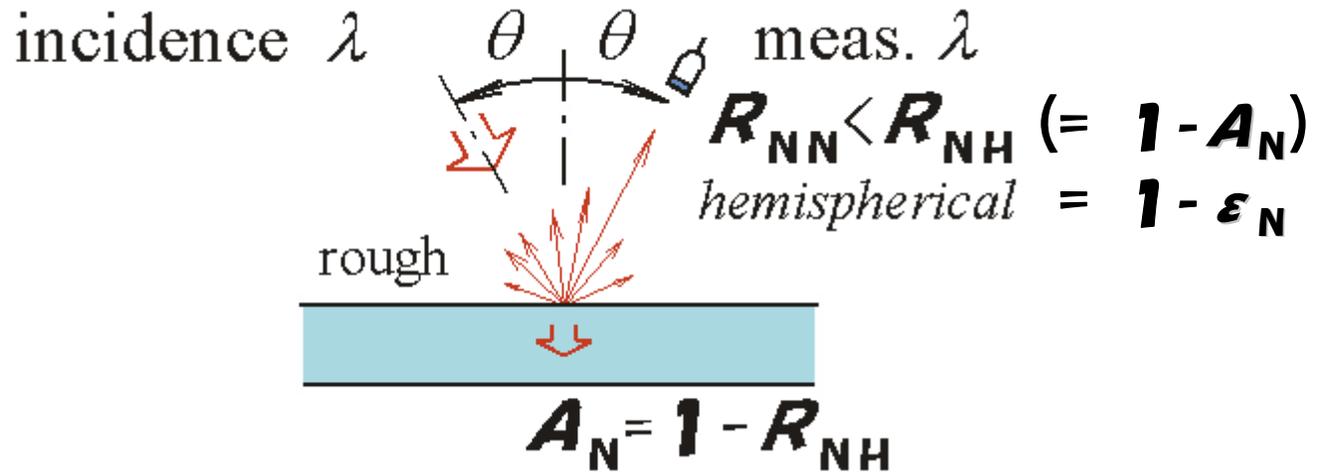
--- *real-time in-process surface diagnosis*

(c) 反射と放射

反射・放射同時測定

--- *absorption and emission of radiation*

--- *hemispherical reflection by surface microstructure*



- **Kirchhoff's law**

emittance and absorptance

$$\epsilon_N(\lambda) = A_N(\lambda) \quad \dots (1)$$

- **Energy balance**

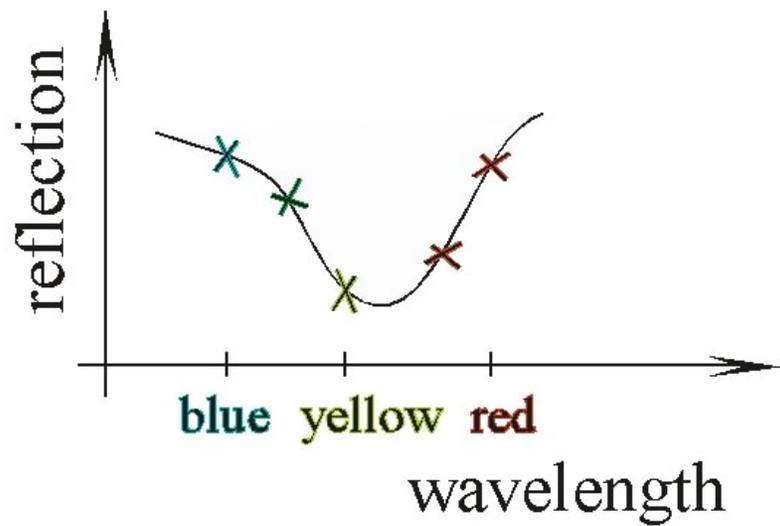
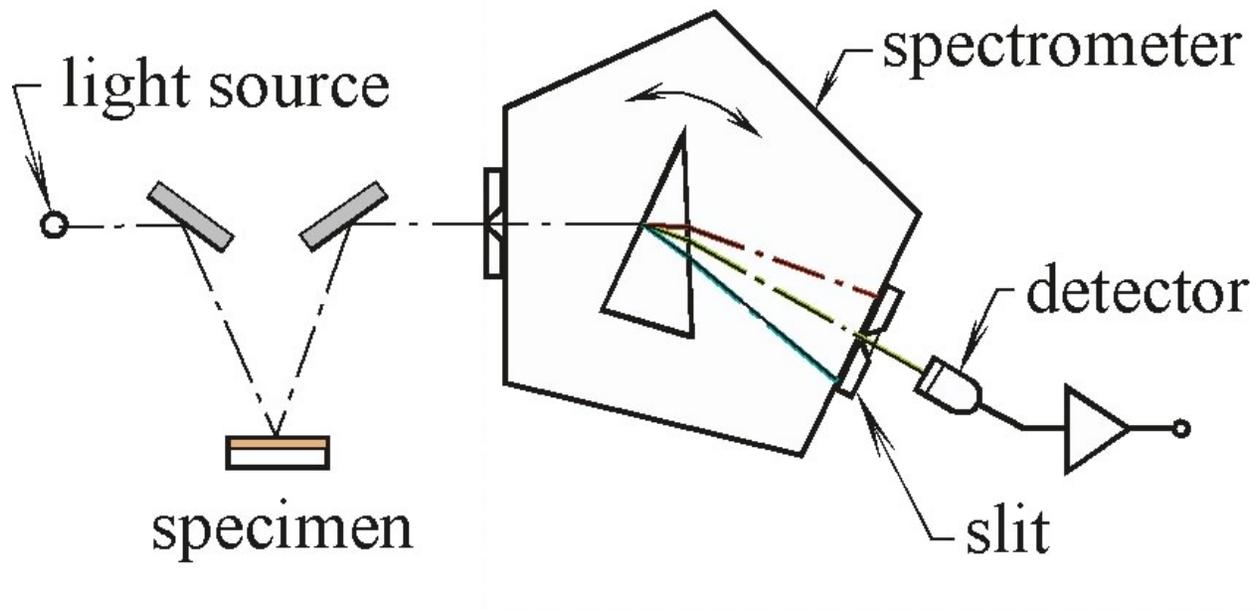
incidence, *reflectance* and absorptance

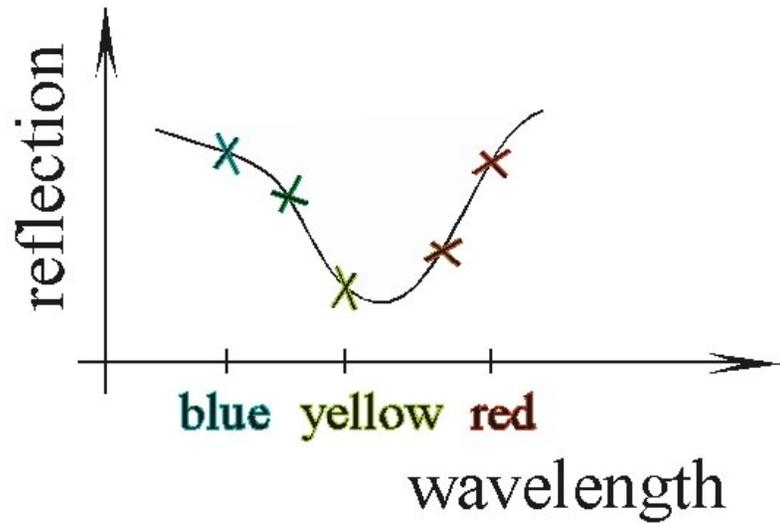
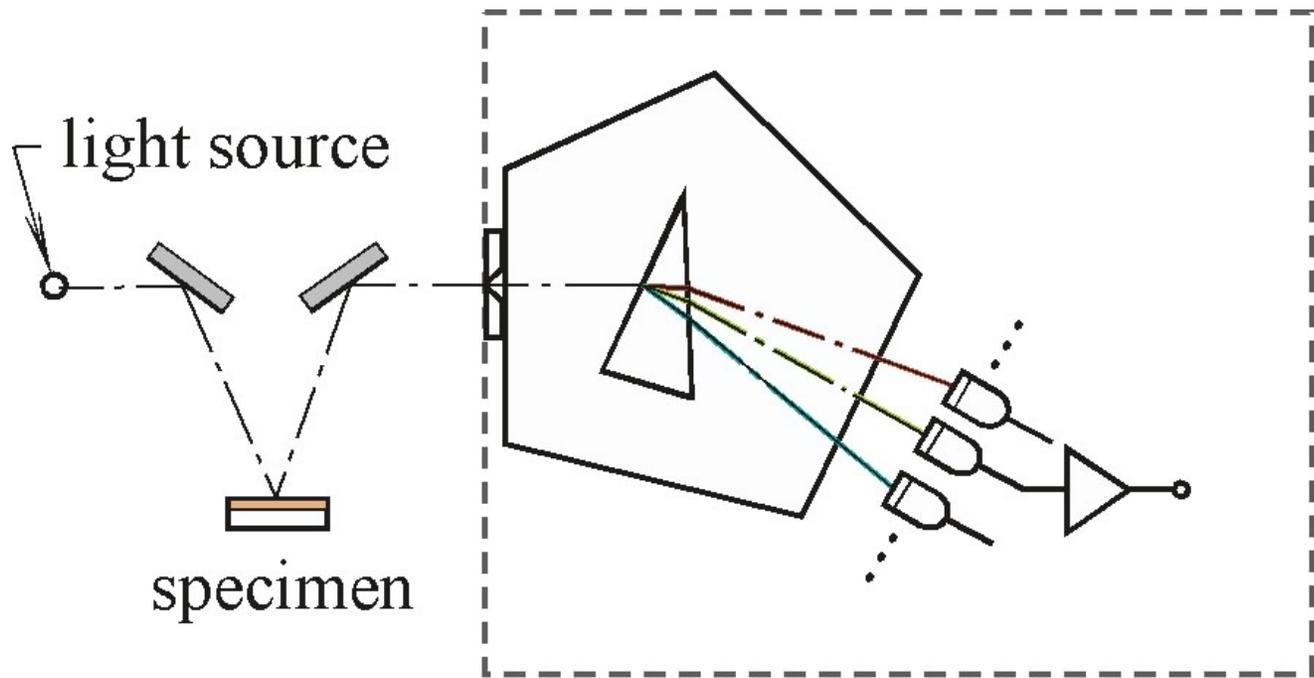
$$1 = R_{NH}(\lambda) + A_N(\lambda) \quad \dots (2)$$

- **from Eqs. (1) and (2)**

emittance and *reflectance*

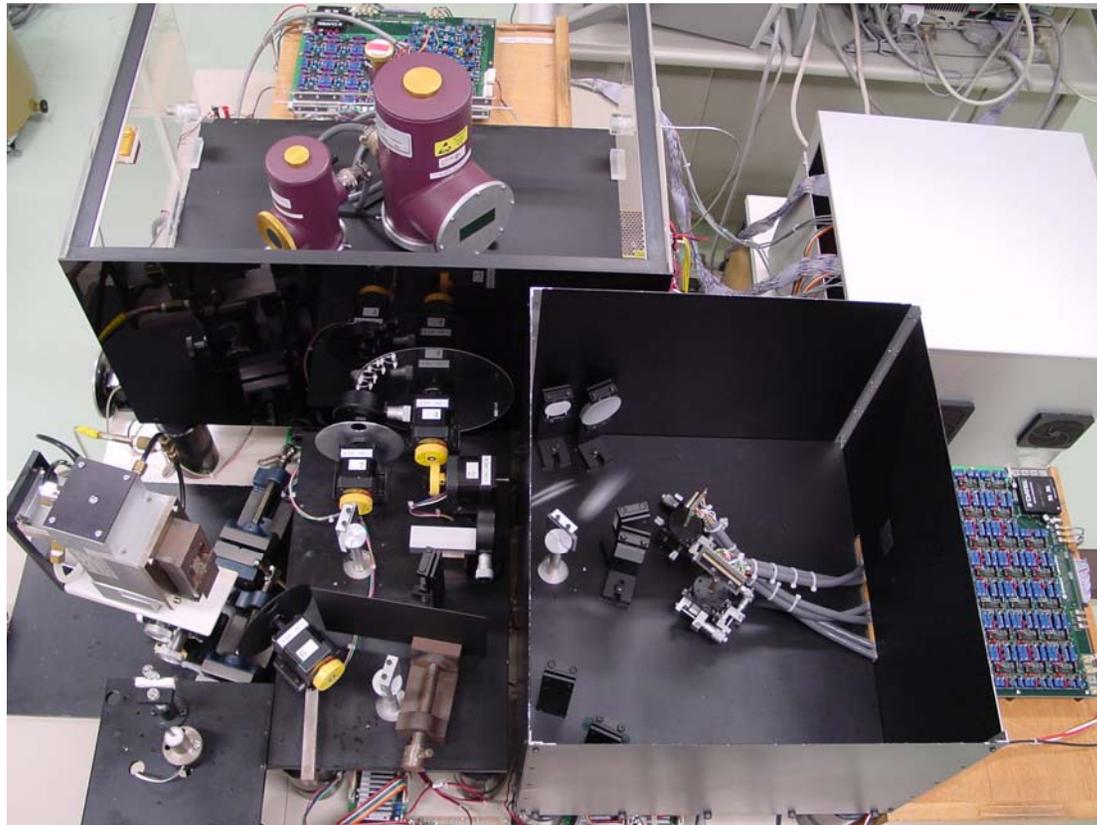
$$\epsilon_N(\lambda) + R_{NH}(\lambda) = 1 \quad \dots (3)$$

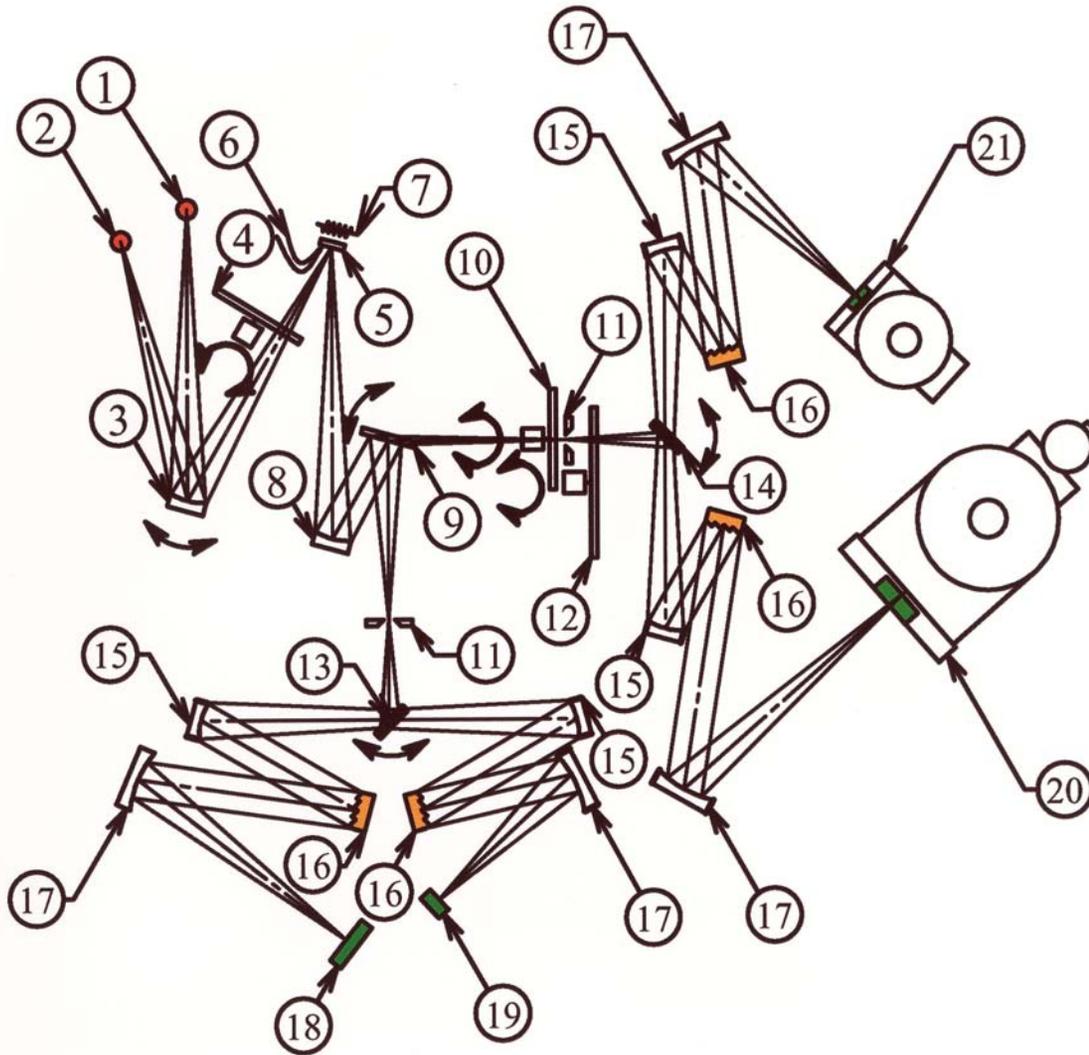




Spectrophotometer

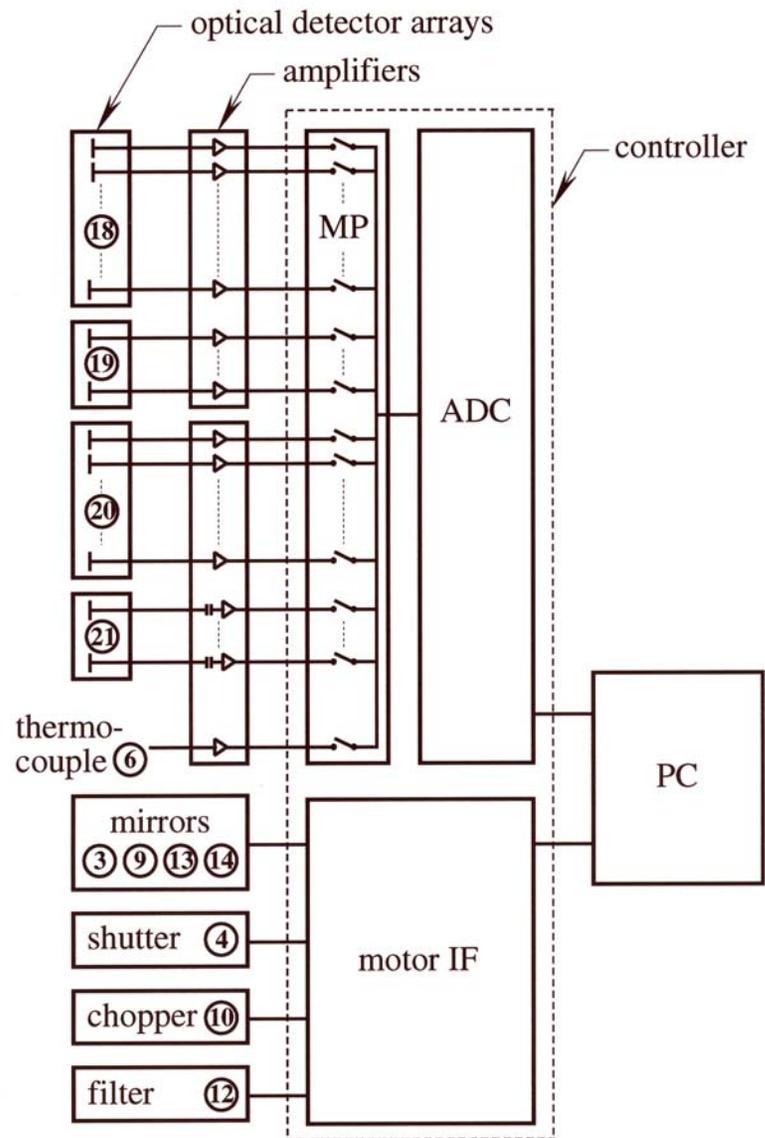
wavelength : 0.30 - 11 μm at 93 points
cycle time : 2 s
spectra : reflection, emission R_{NN} ϵ_N
optics, sensors: 4 gratings, 7 motors, 99 detectors



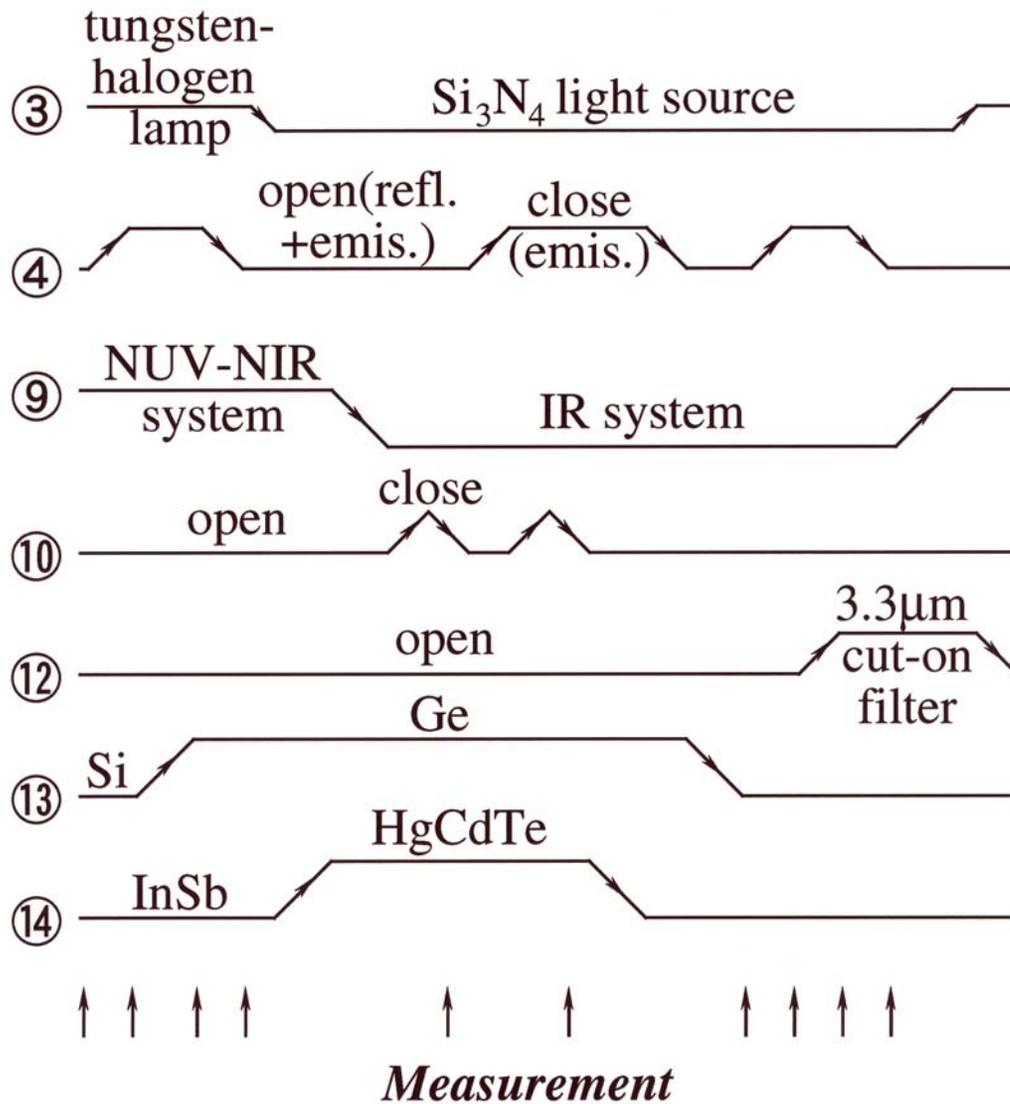


1. tungsten-halogen lamp
2. Si_3N_4 light source
3. rotary concave mirror
4. shutter disk
5. specimen
6. K-thermocouple
7. heater
8. concave mirror
9. rotary plane mirror
10. chopper
11. entrance slit
12. filter disk
13. rotary plane mirror 1
14. rotary plane mirror 2
15. collimator
16. diffraction grating
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×H4.4	W0.8×H1.0	W1.0×H1.0	W1.0×H1.0	
element spacing	mm	0.1	0.2	0.25	0.3	
number of elements		35	16	32	16	



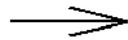
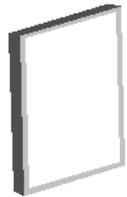
ADC : analog-digital converter
 motor IF: motor interface
 MP : multiplexer
 PC : personal computer



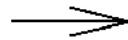
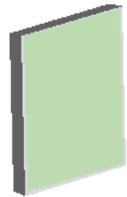
Experimental :

*high temperature oxidation of a metal surface
microstructure fabrication processes for IC, MEMS, ...*

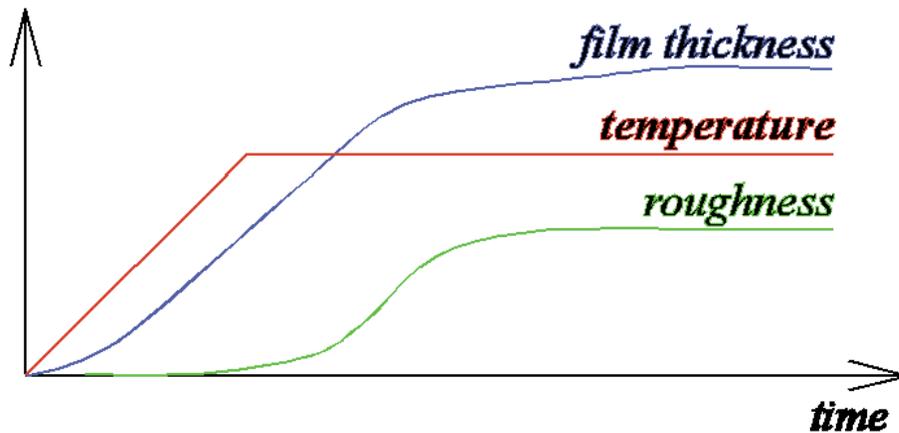
clean optically
smooth surface



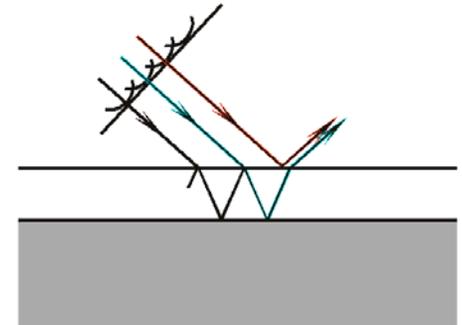
oxidized
rough surface



*high-temperature
air-oxidation*

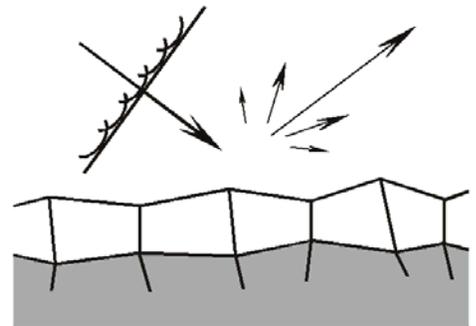


air
film
metal



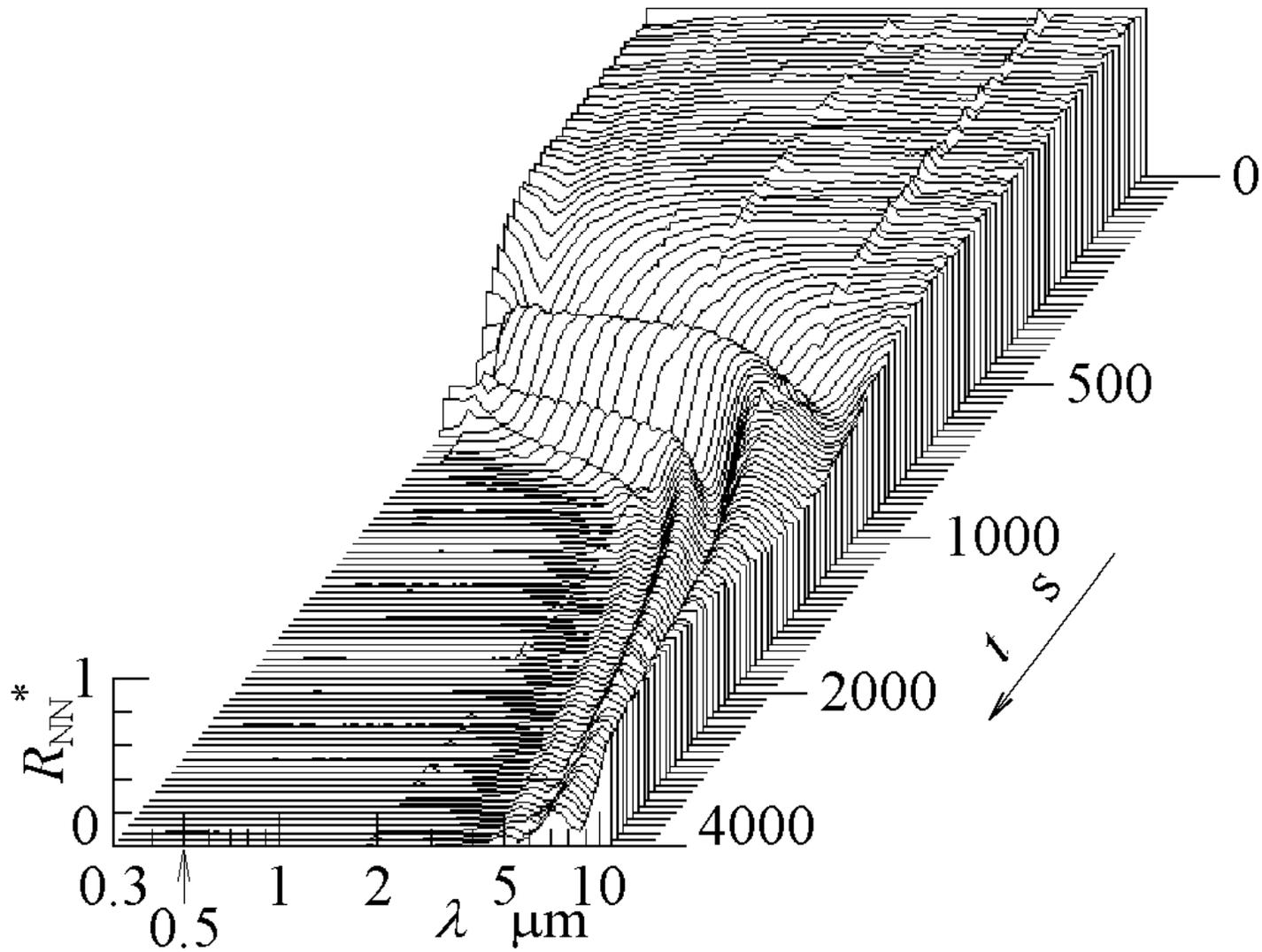
film interference

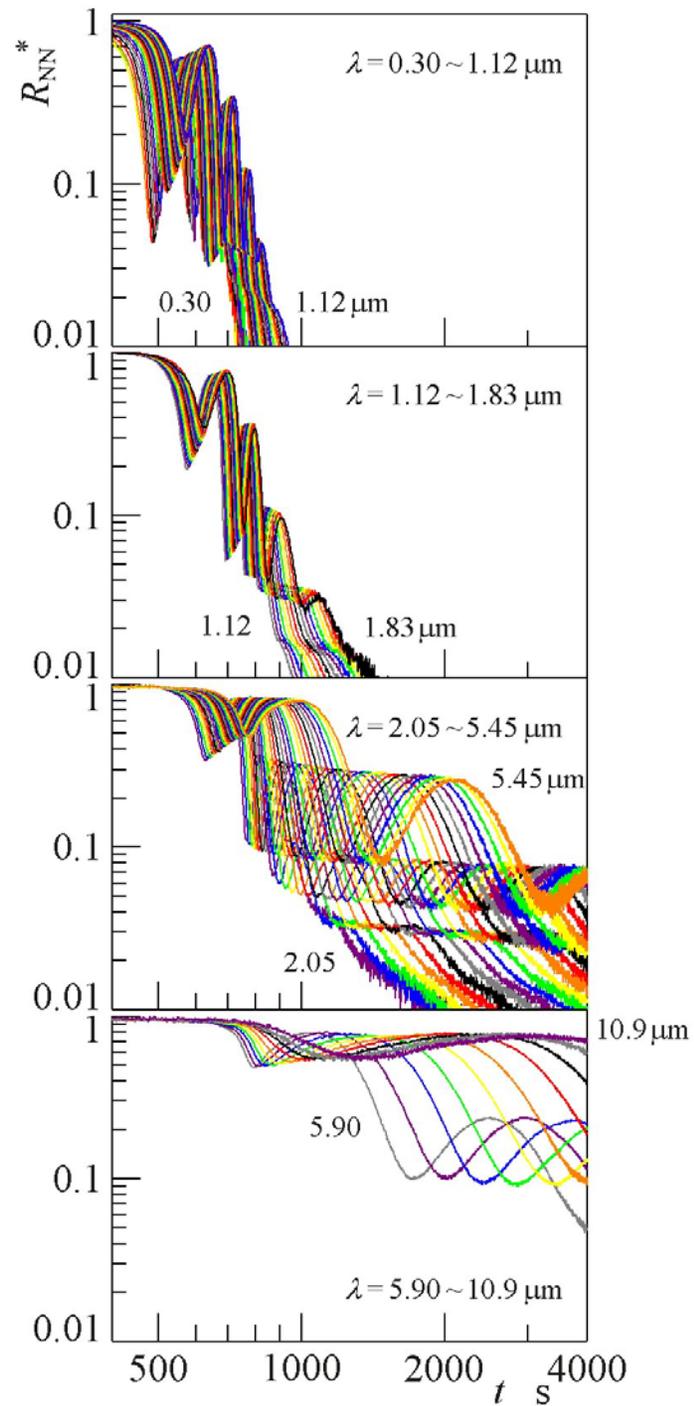
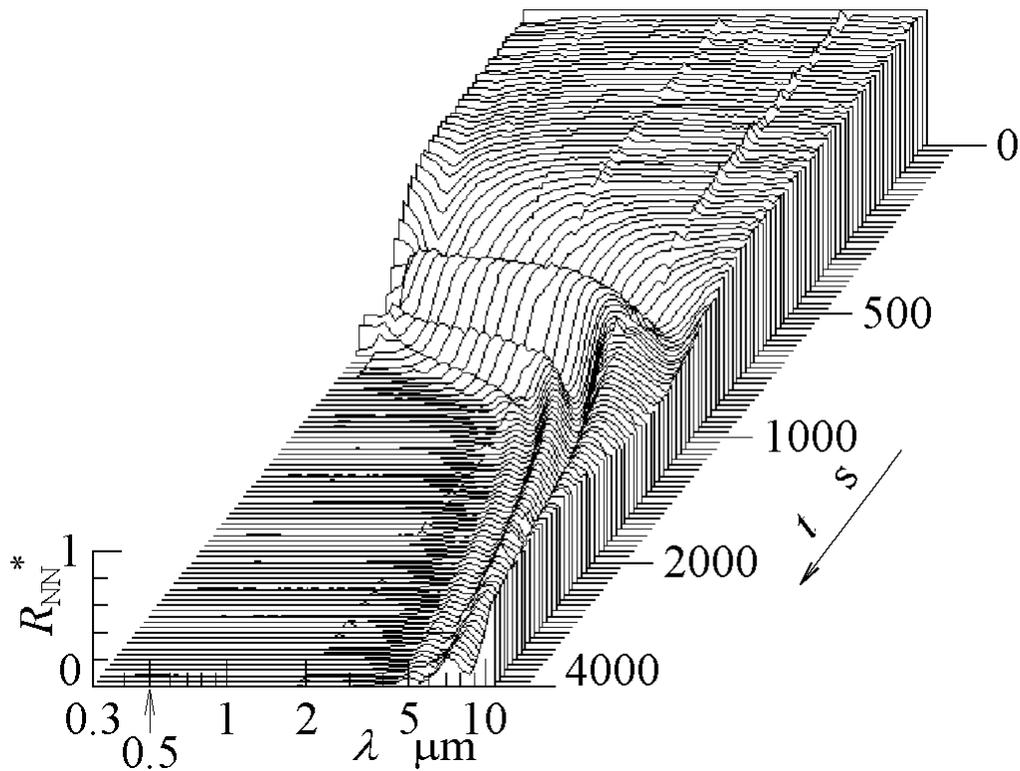
air
film
metal



*crystal grain growth
diffraction*

ニッケル (初期状態=光学鏡面)



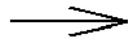
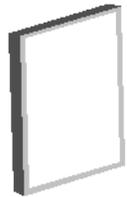


- (1) 山谷 ... ふく射の干渉 ... 被膜の成長
 (2) 減少 ... ふく射の回折 ... あらさの増大

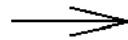
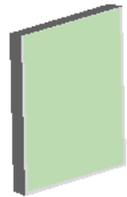
Experimental :

*high temperature oxidation of a metal surface
microstructure fabrication processes for IC, MEMS, ...*

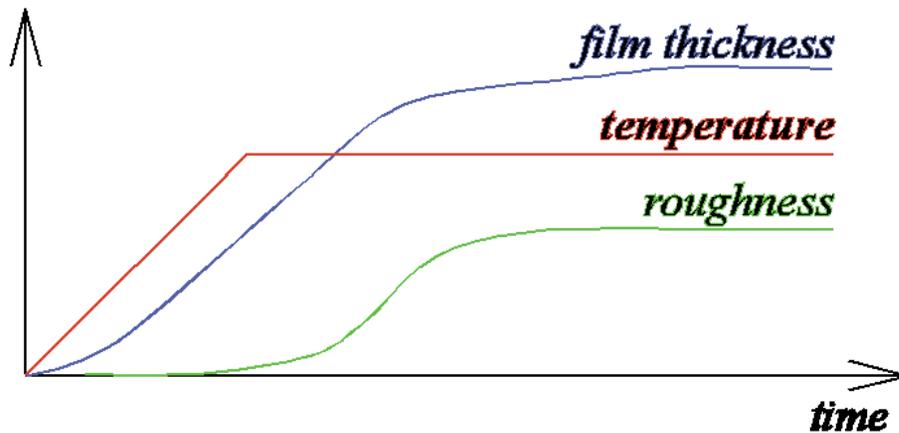
clean optically
smooth surface



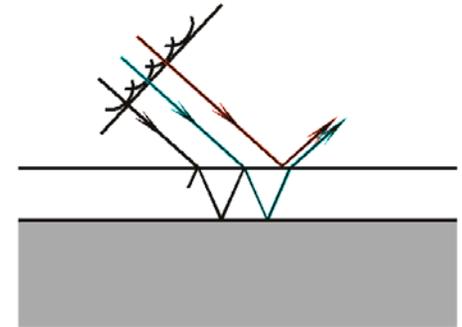
oxidized
rough surface



*high-temperature
air-oxidation*

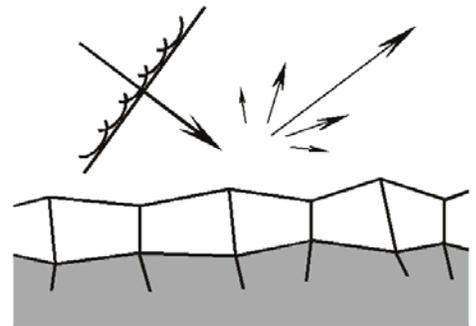


air
film
metal



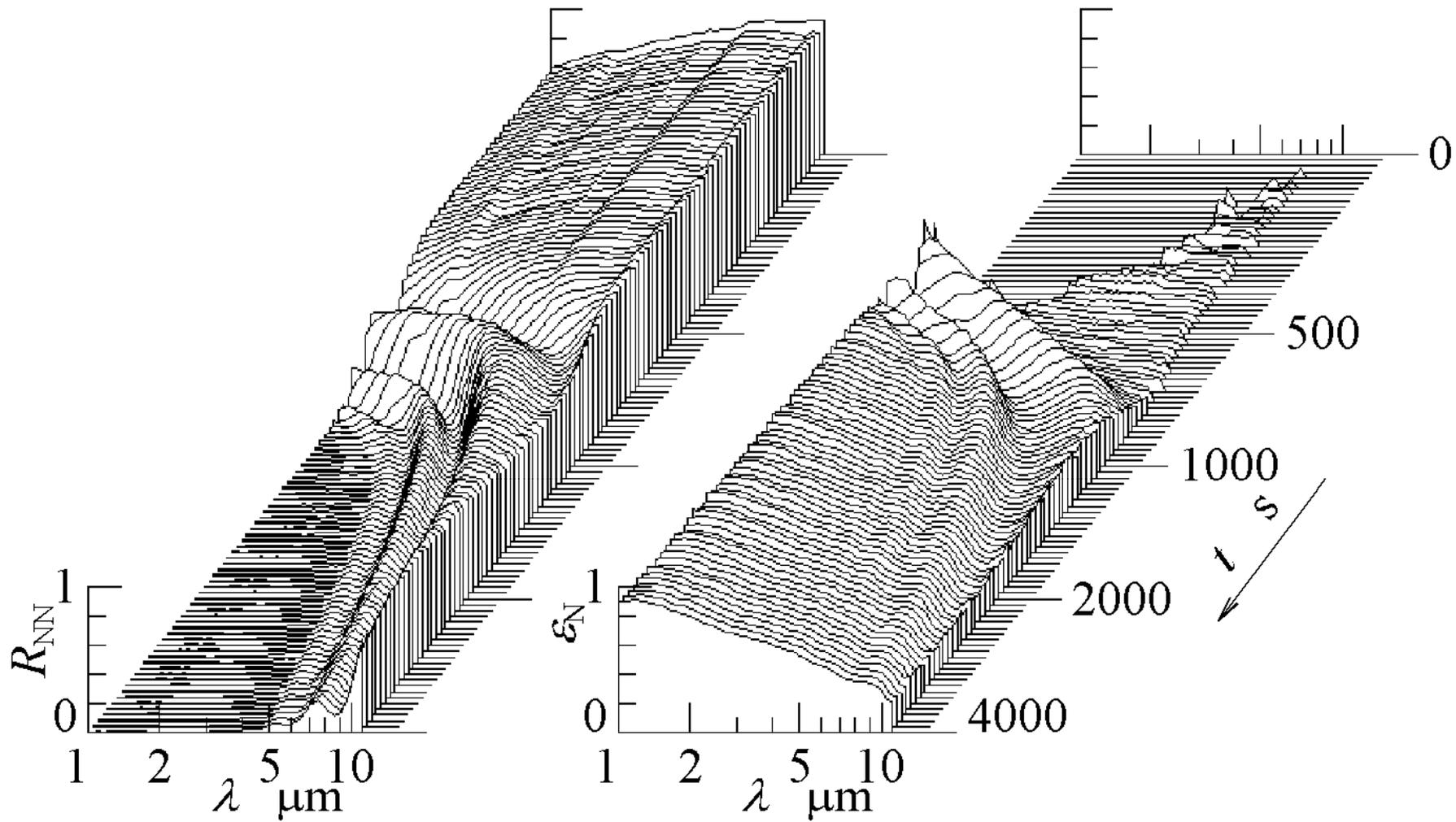
film interference

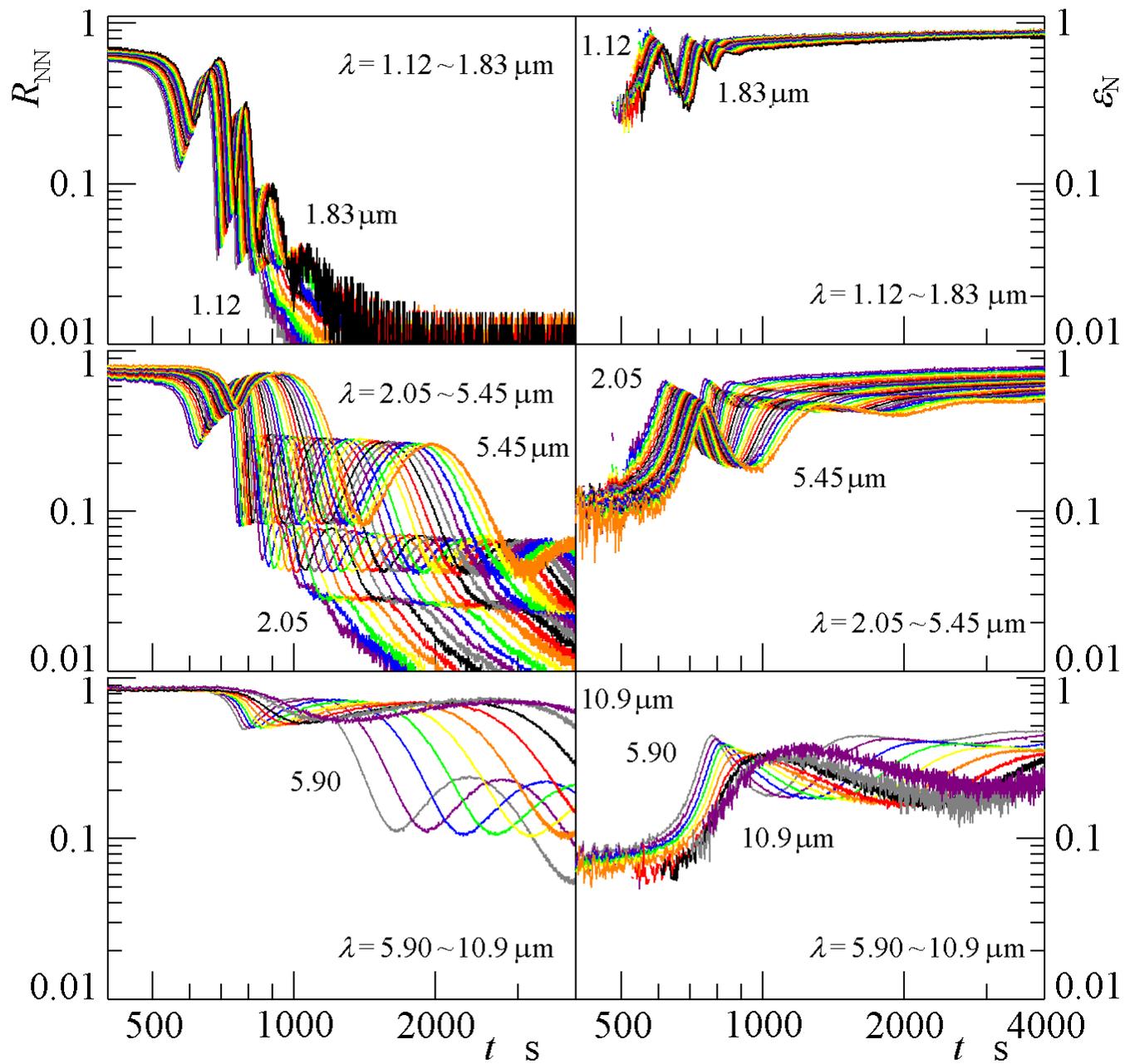
air
film
metal



*crystal grain growth
diffraction*

ニッケル (初期状態=光学鏡面)

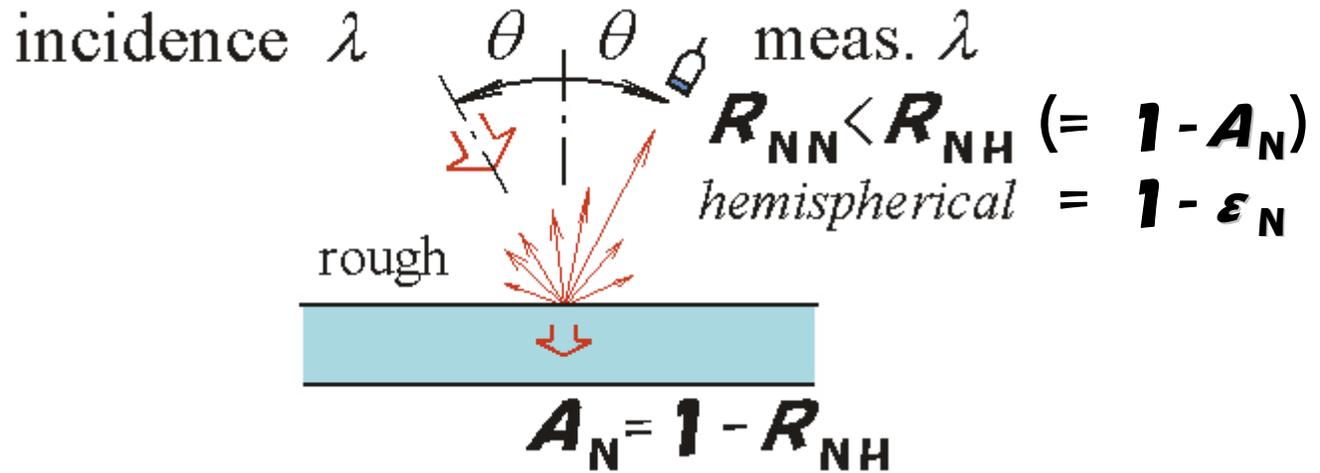




広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の開発・拡張

若林英信

-
1. ふく射伝熱評価
 2. 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の開発
 3. 表面の温度・ミクロ構造の熱ふく射スペクトル診断法
 4. 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の拡張
 5. Kirchoffの法則の実験的検証
-



- **Kirchhoff's law**

emittance and absorptance

$$\epsilon_N(\lambda) = A_N(\lambda) \quad \dots (1)$$

- **Energy balance**

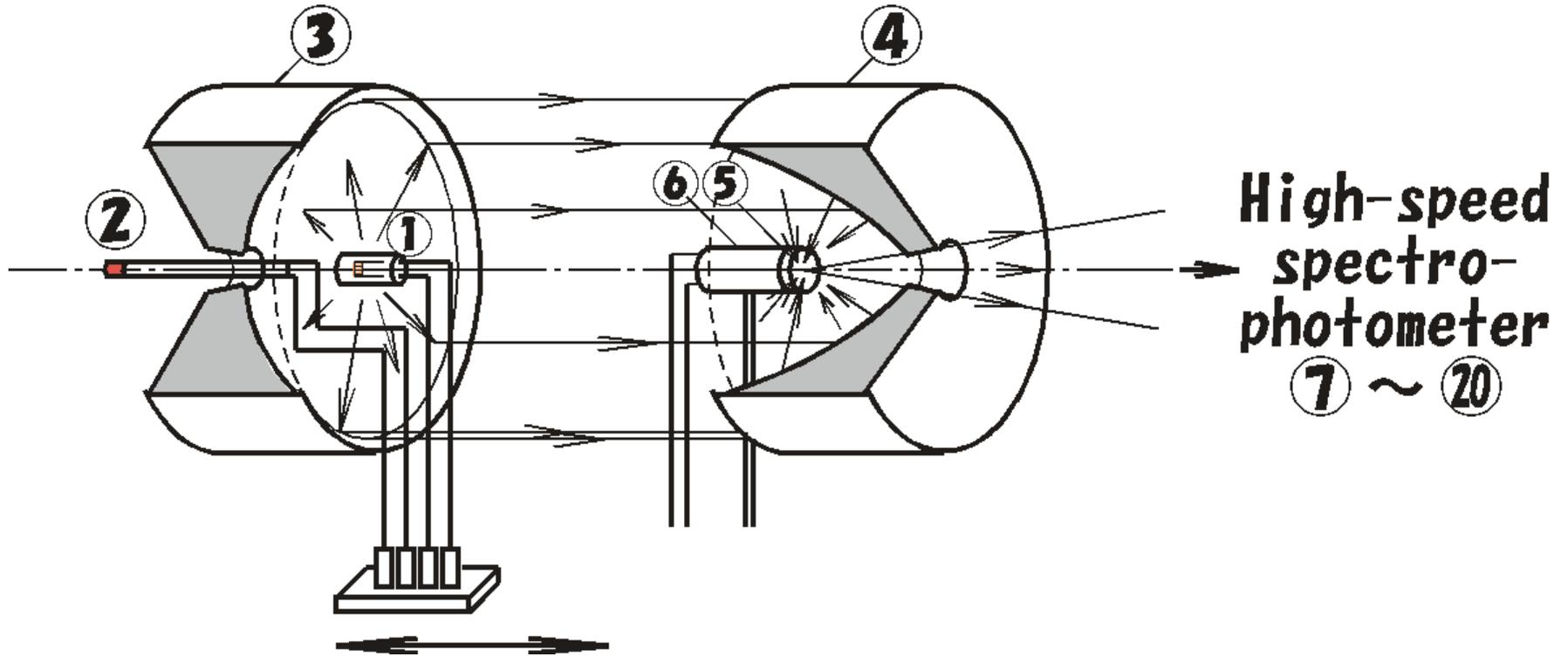
incidence, *reflectance* and absorptance

$$1 = R_{NH}(\lambda) + A_N(\lambda) \quad \dots (2)$$

- **from Eqs. (1) and (2)**

emittance and *reflectance*

$$\epsilon_N(\lambda) + R_{NH}(\lambda) = 1 \quad \dots (3)$$

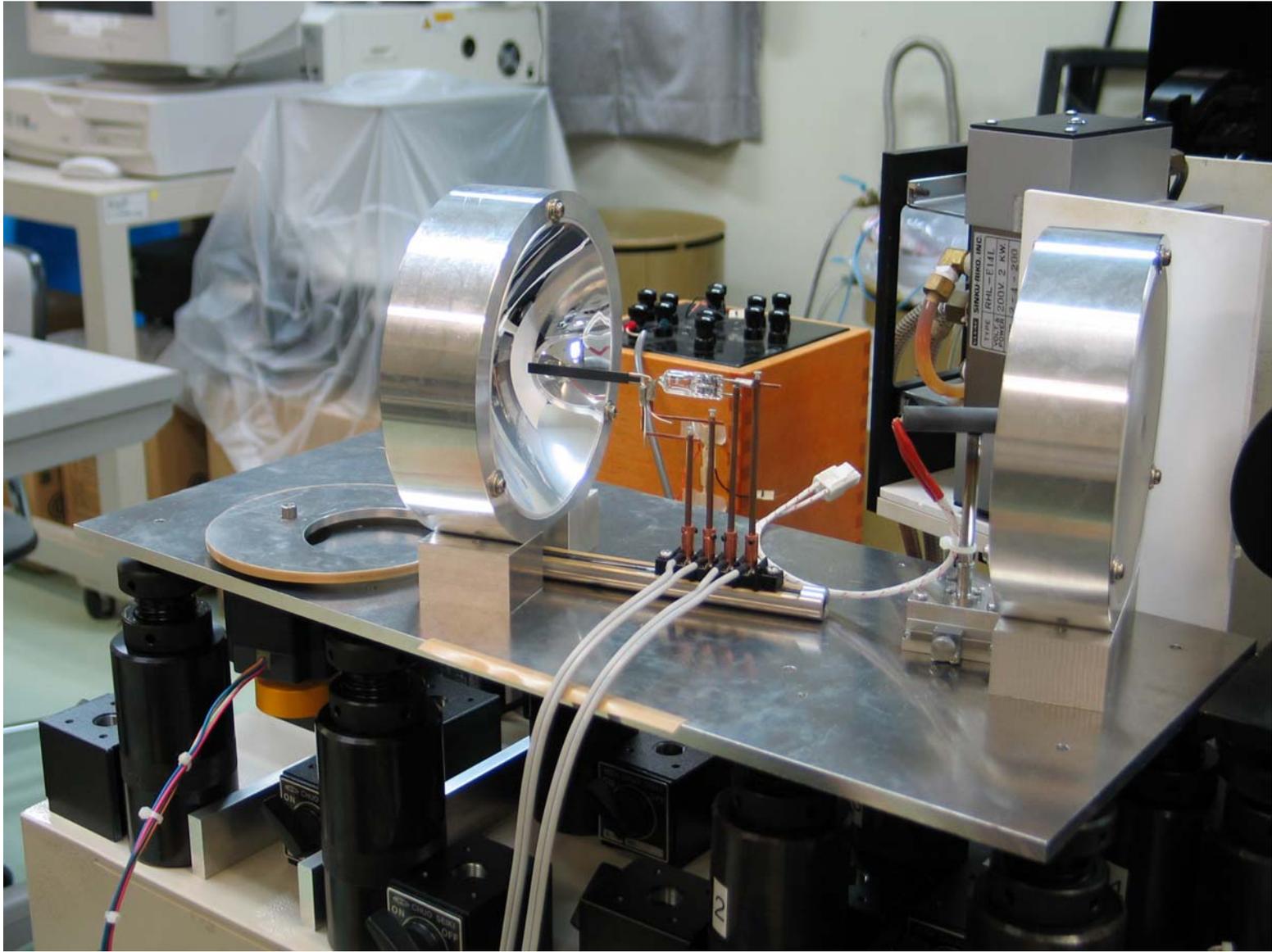


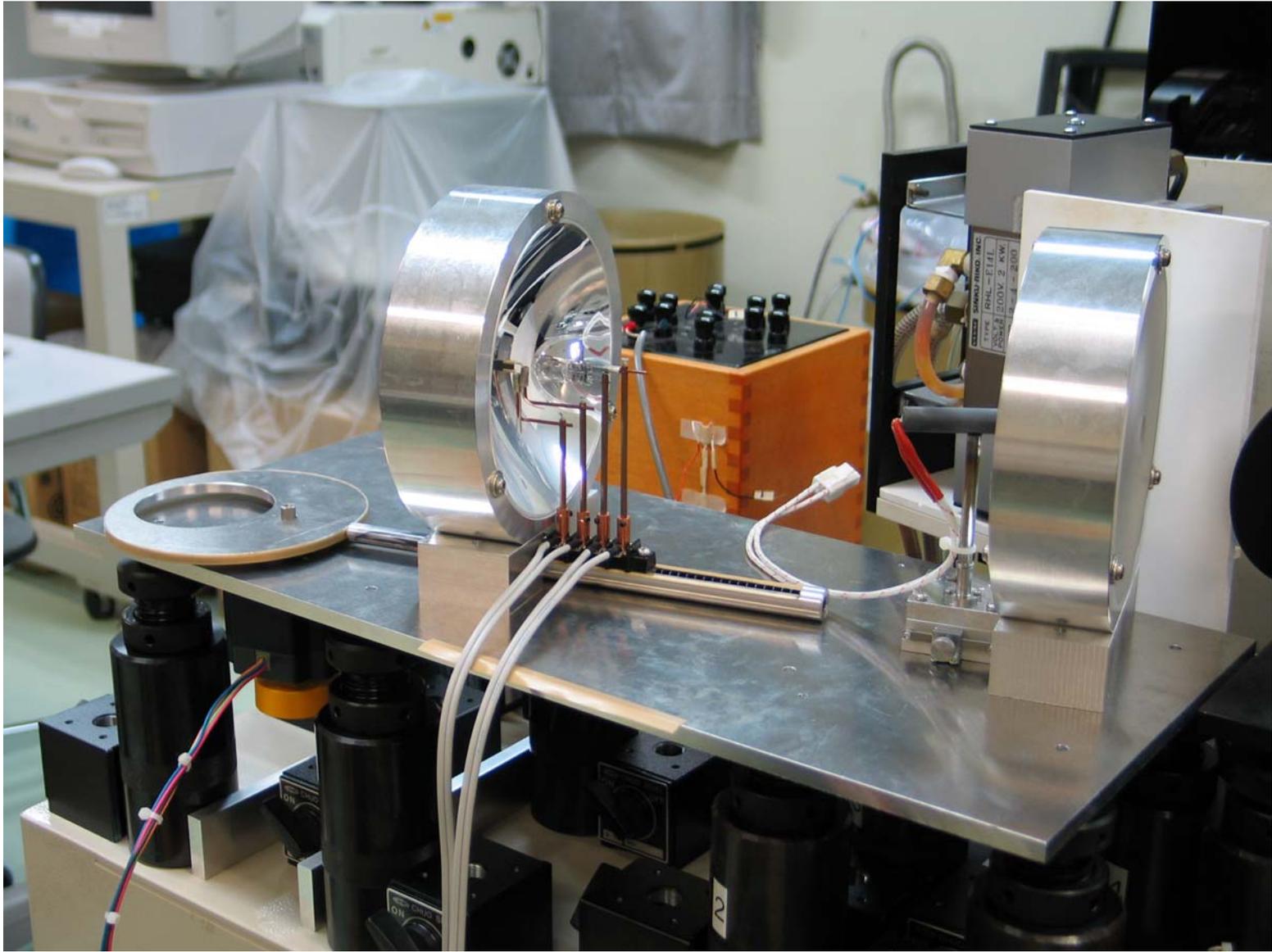
R_{HN} optics

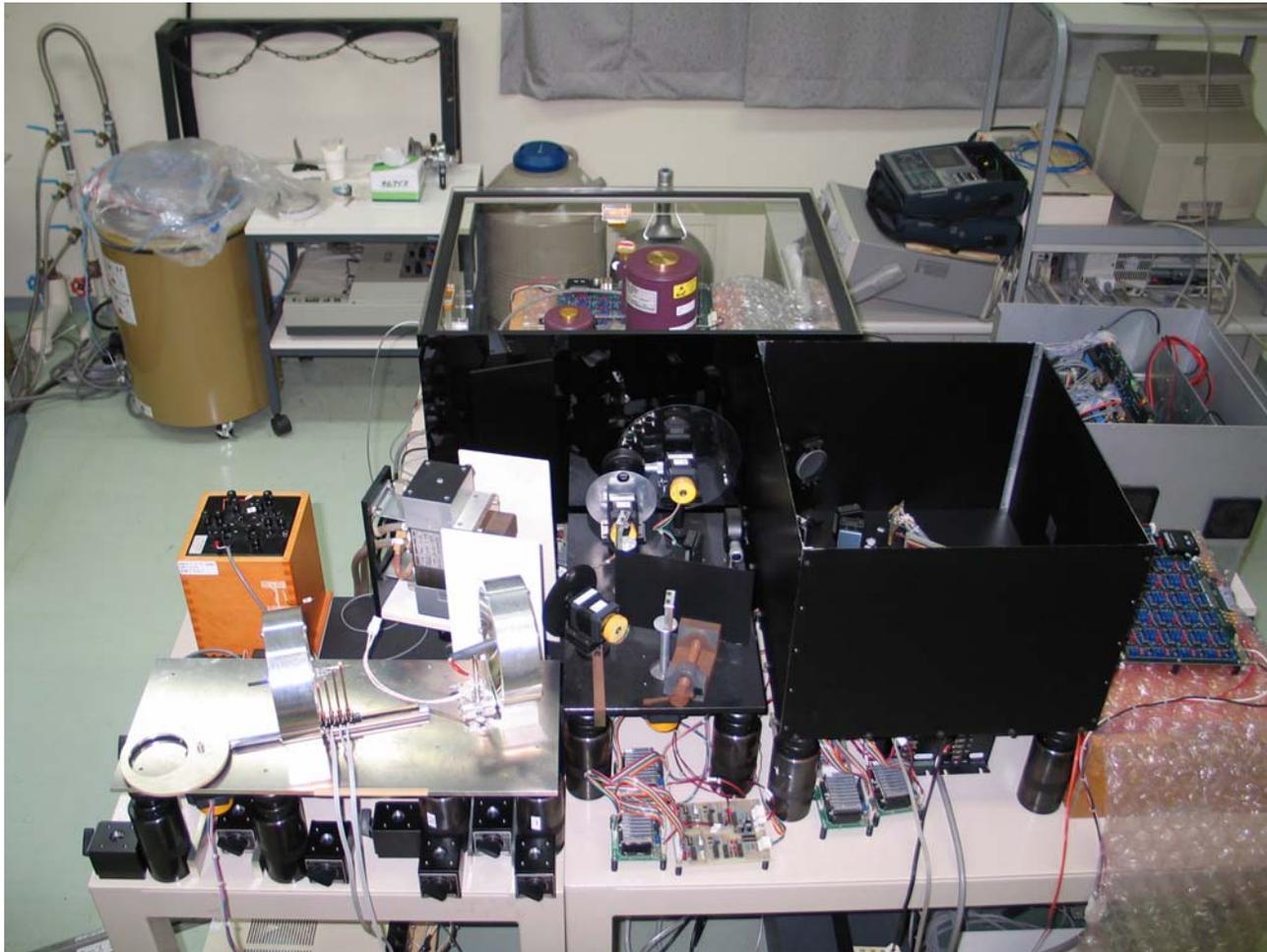
(reciprocity relation)

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

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



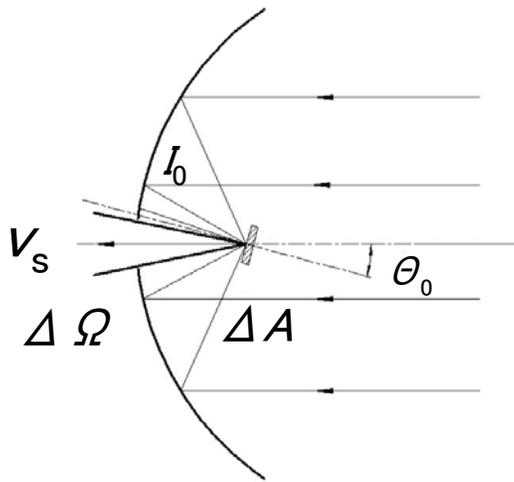




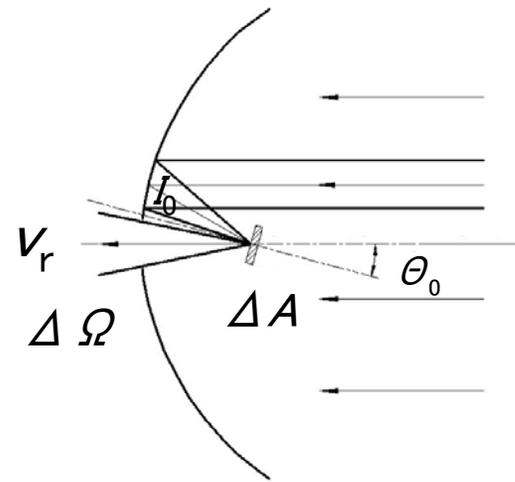
simultaneous measurement of spectra of
reflectance R_{NH} and emittance ϵ_N

半球等強度入射垂直反射率

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



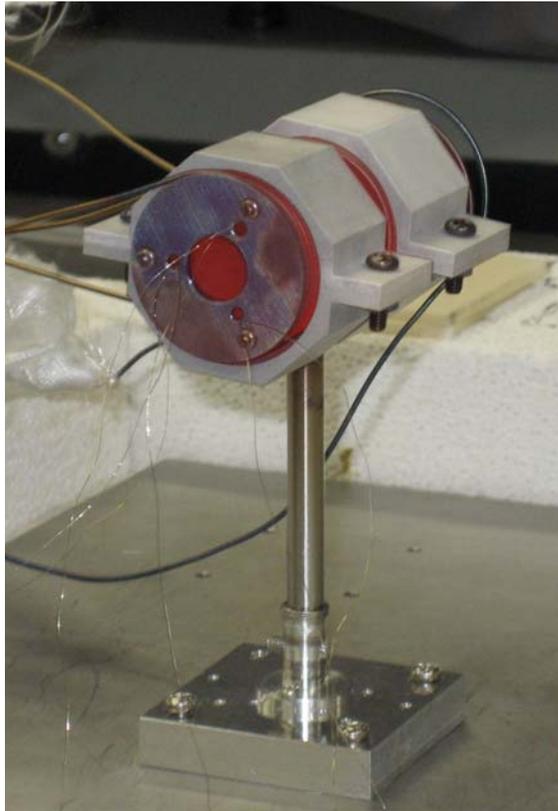
$$v_s = \alpha I_s \Delta A \cos \theta_0 \Delta \Omega$$



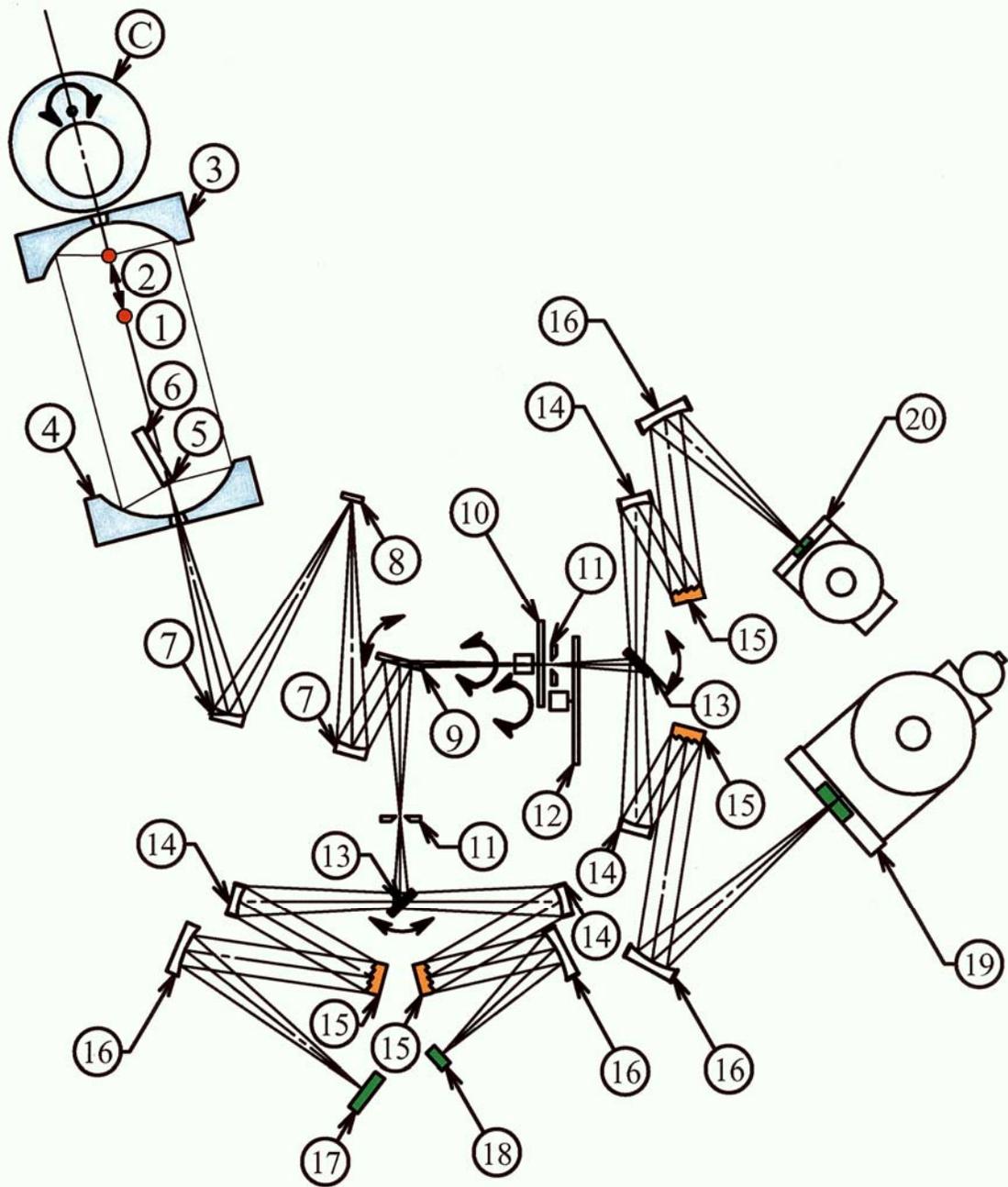
$$v_r = \alpha R(\theta_0) I_0 \Delta A \cos \theta_0 \Delta \Omega$$

$$R_{\text{HN}} \equiv \frac{I_s}{I_0} = \frac{v_s}{v_r}$$

small reference blackbody for measuring ϵ_N



- diameter & length: $\phi 20 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$
- diaphragm: $\phi 10 \text{ mm}$
- material: SUS304
- sheath heater: $\phi 1 \text{ mm}$
... 3 circuits: base, body & neck
- thermocouple: K $\phi 0.1 \text{ mm}$
... at base, body & neck
- calibration temperatures:
1000, 1050 and 1100 K
- apparent emittance: 0.99

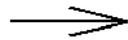


1. tungsten-halogen lamp
2. Si₃N₄ light source
3. paraboloidal mirror 1
4. paraboloidal mirror 2
5. specimen
6. heater
- C. cam mechanics
7. concave mirror
8. plane mirror
9. rotary plane mirror
10. chopper
11. entrance slit
12. filter disk
13. rotary plane mirror
14. collimator
15. diffraction grating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

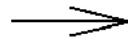
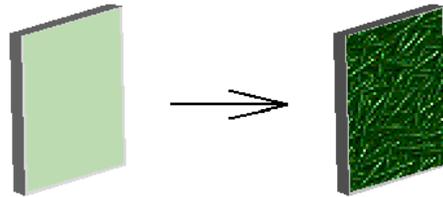
Experimental :

*high temperature oxidation of a metal surface
microstructure fabrication processes for IC, MEMS, ...*

clean optically
smooth surface



oxidized
rough surface

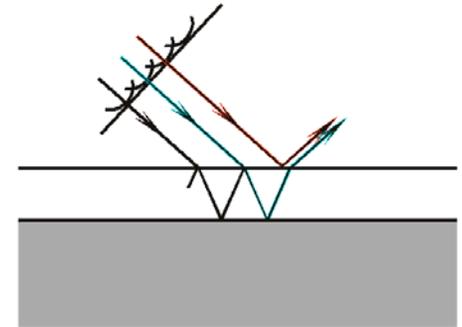


*high-temperature
air-oxidation*

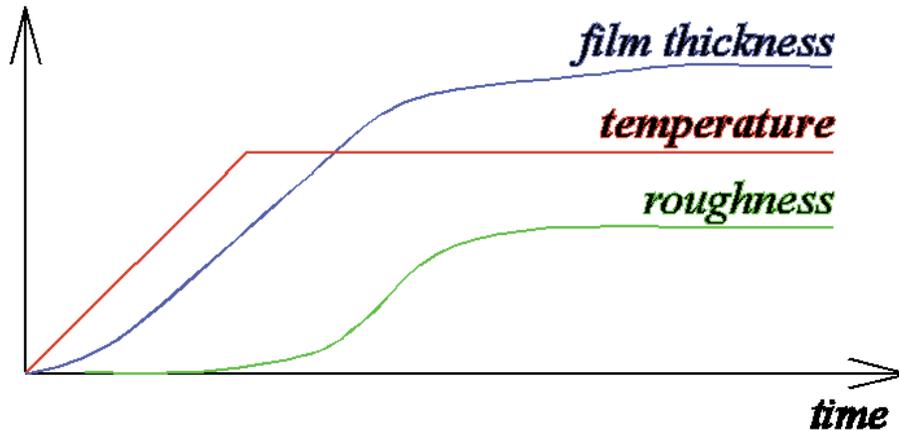
air

film

metal



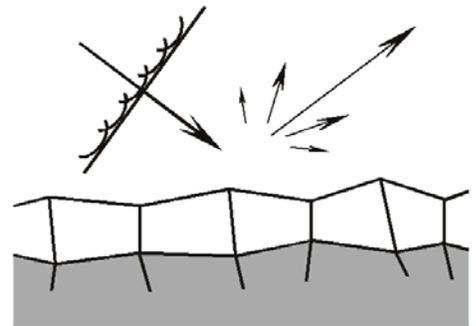
film interference



air

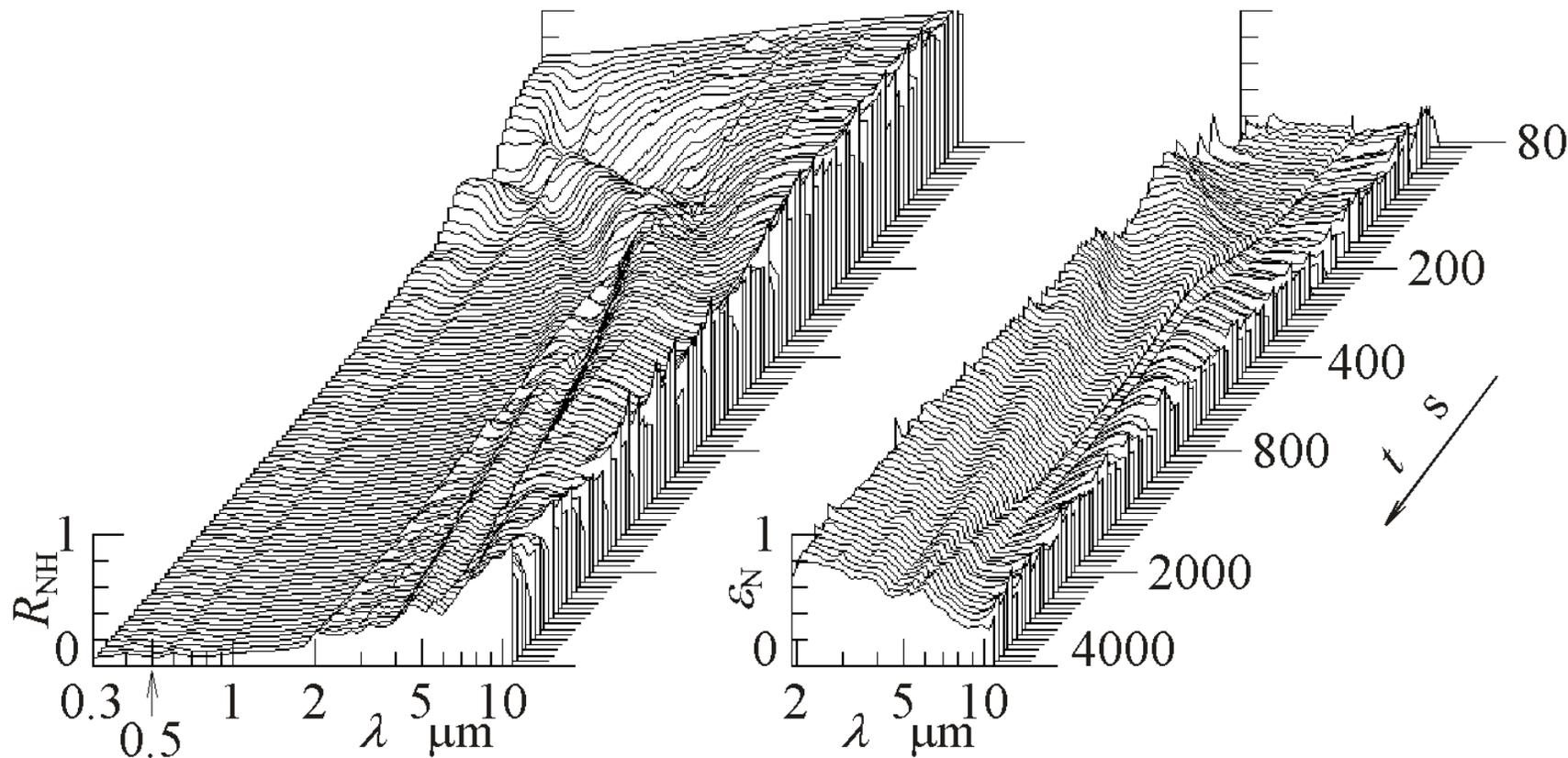
film

metal

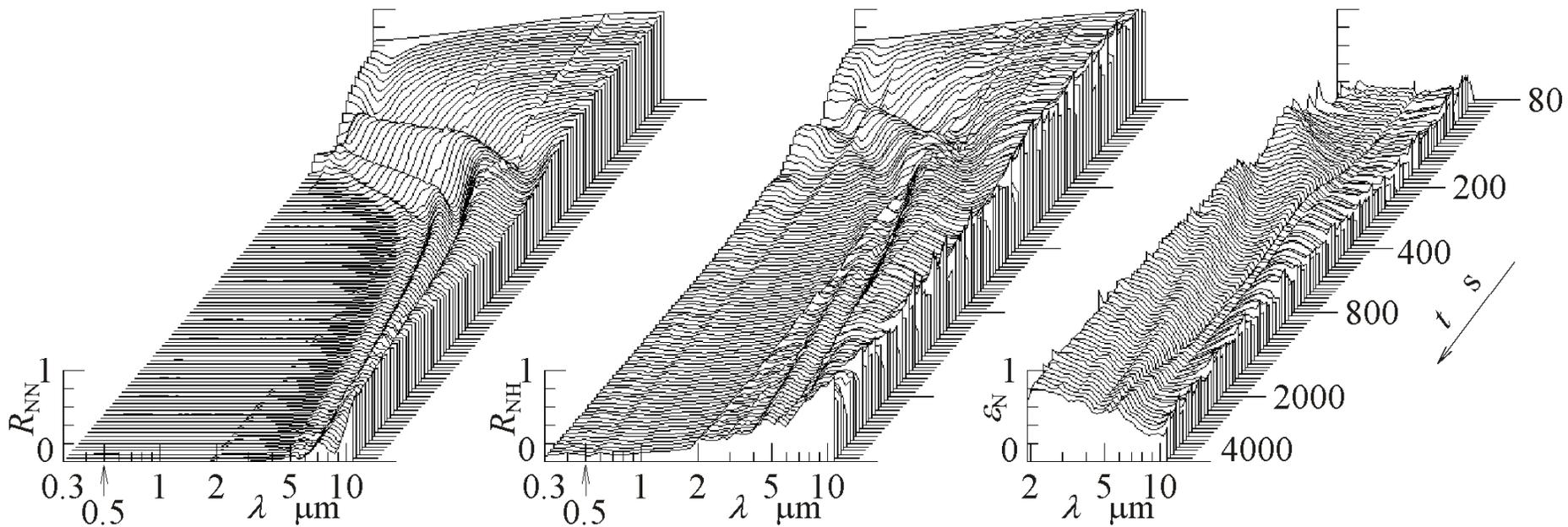


*crystal grain growth
diffraction*

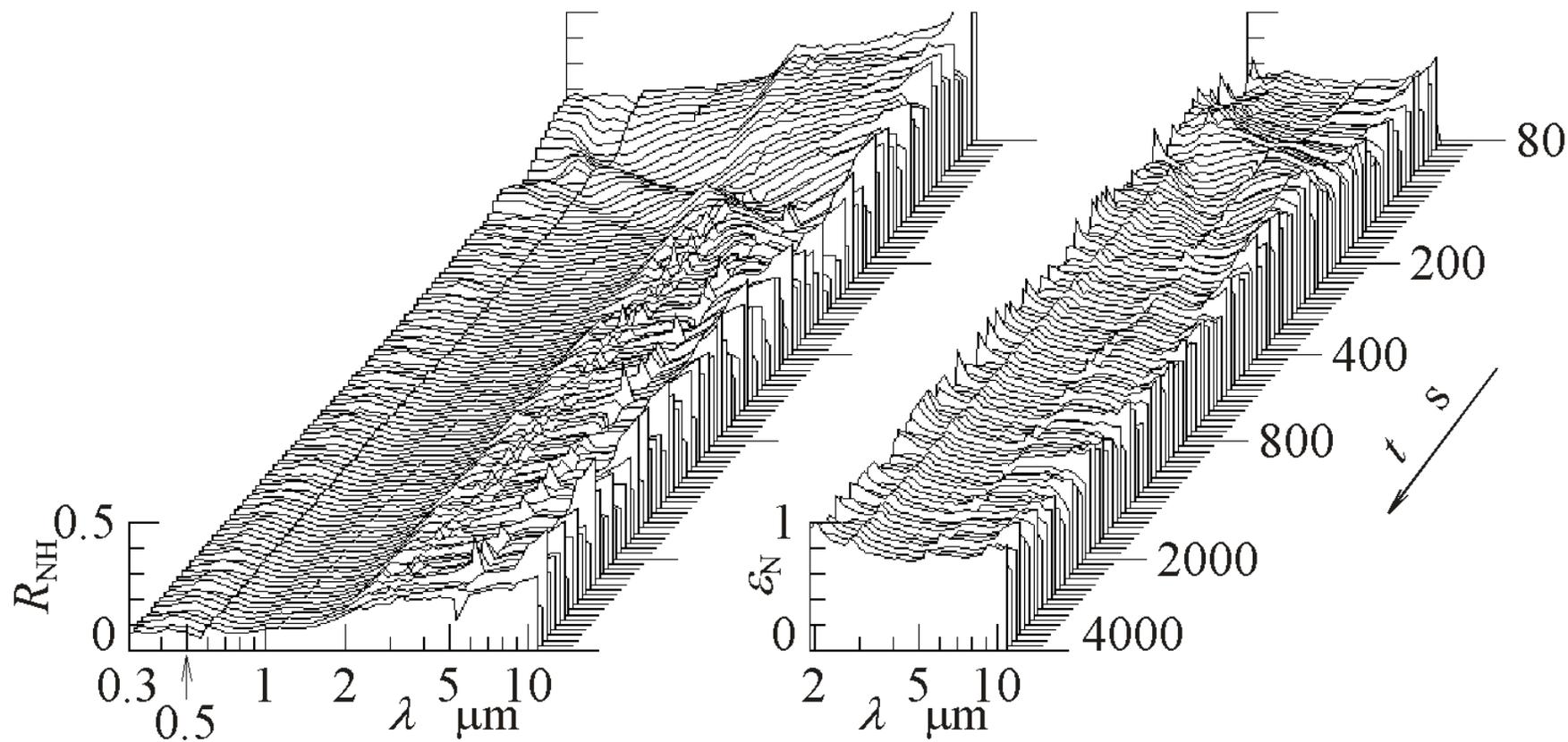
ニッケル (初期状態=光学鏡面)



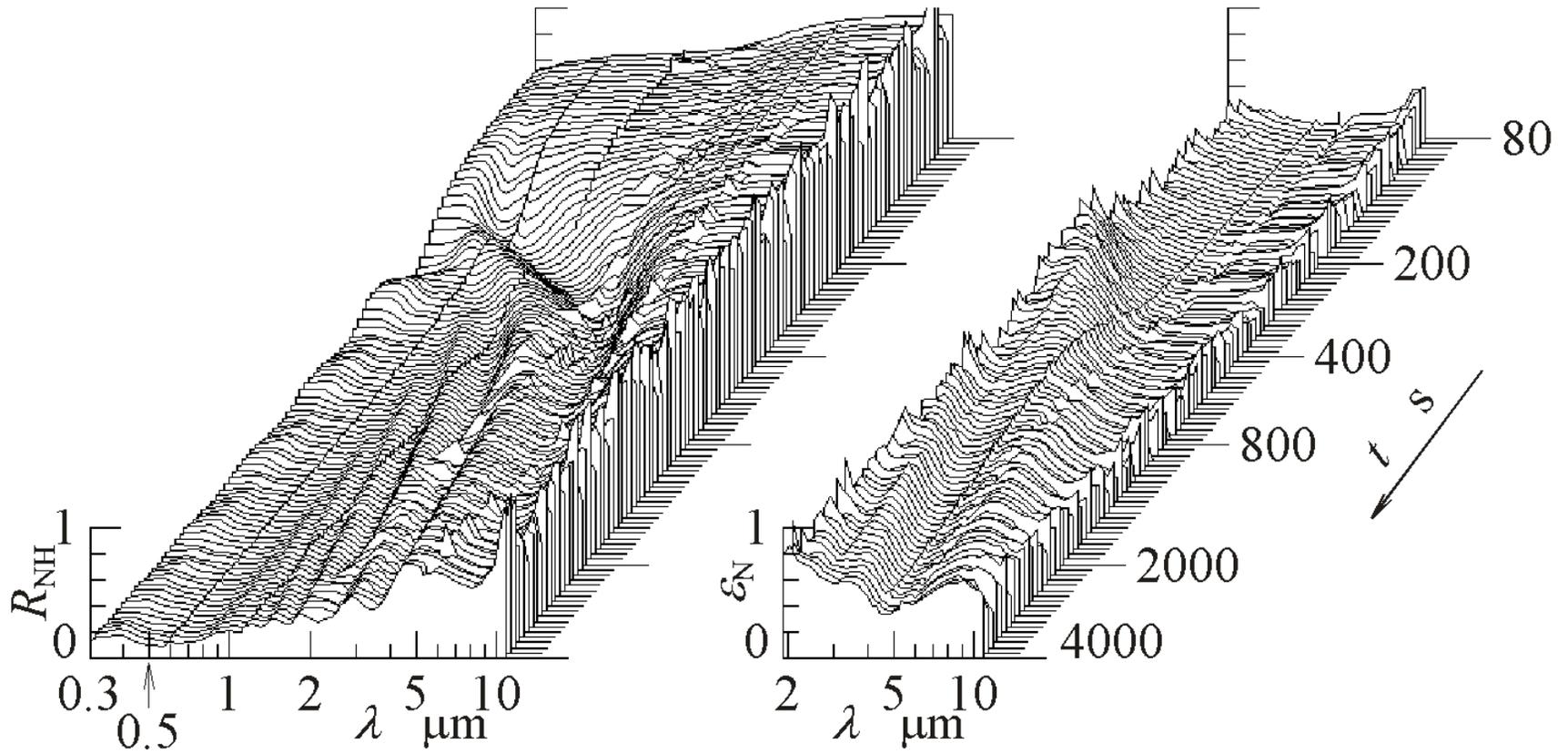
ニッケル (初期状態=光学鏡面)



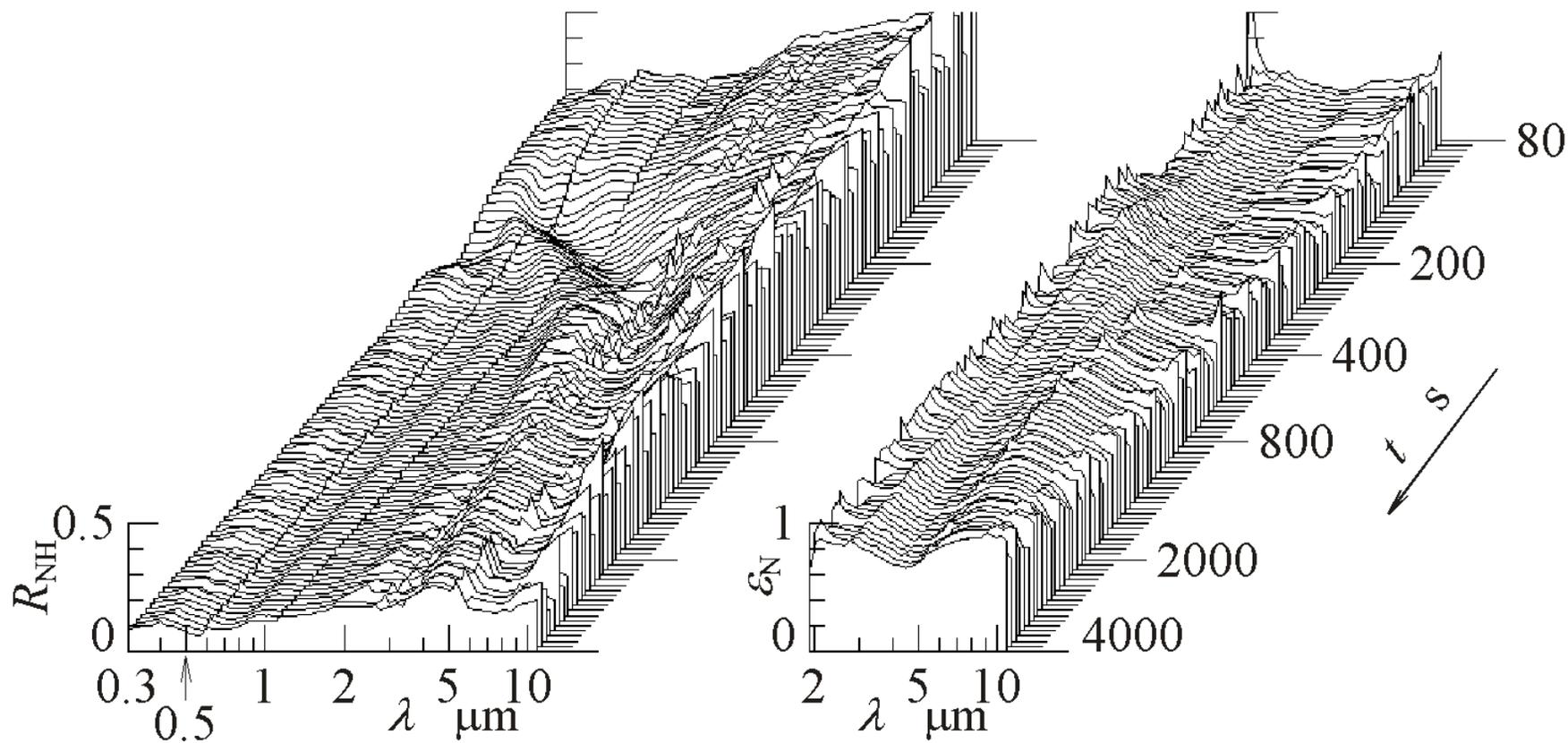
ニッケル (初期状態=あらい表面)



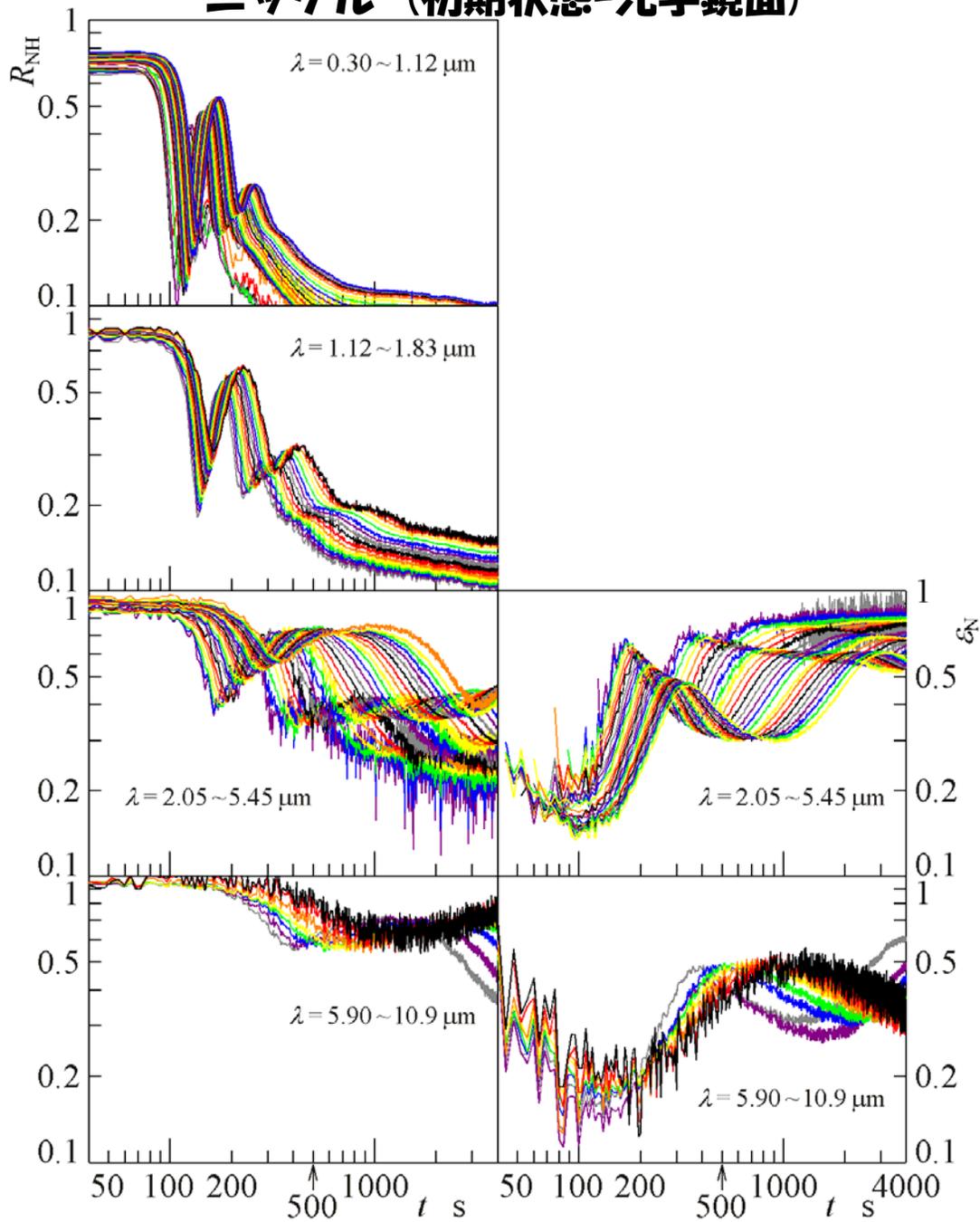
クロム (初期状態=光学鏡面)



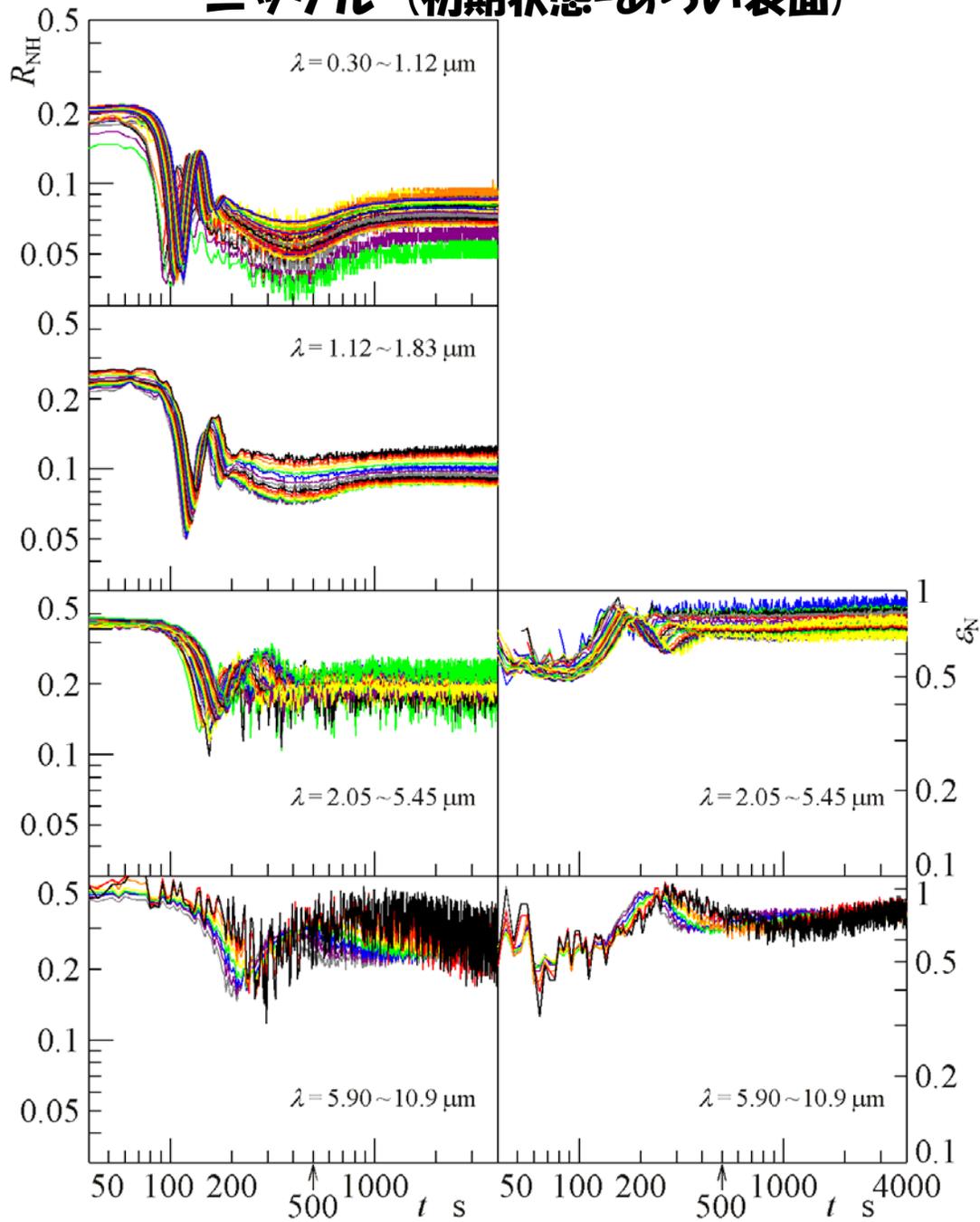
クロム (初期状態=あらい表面)



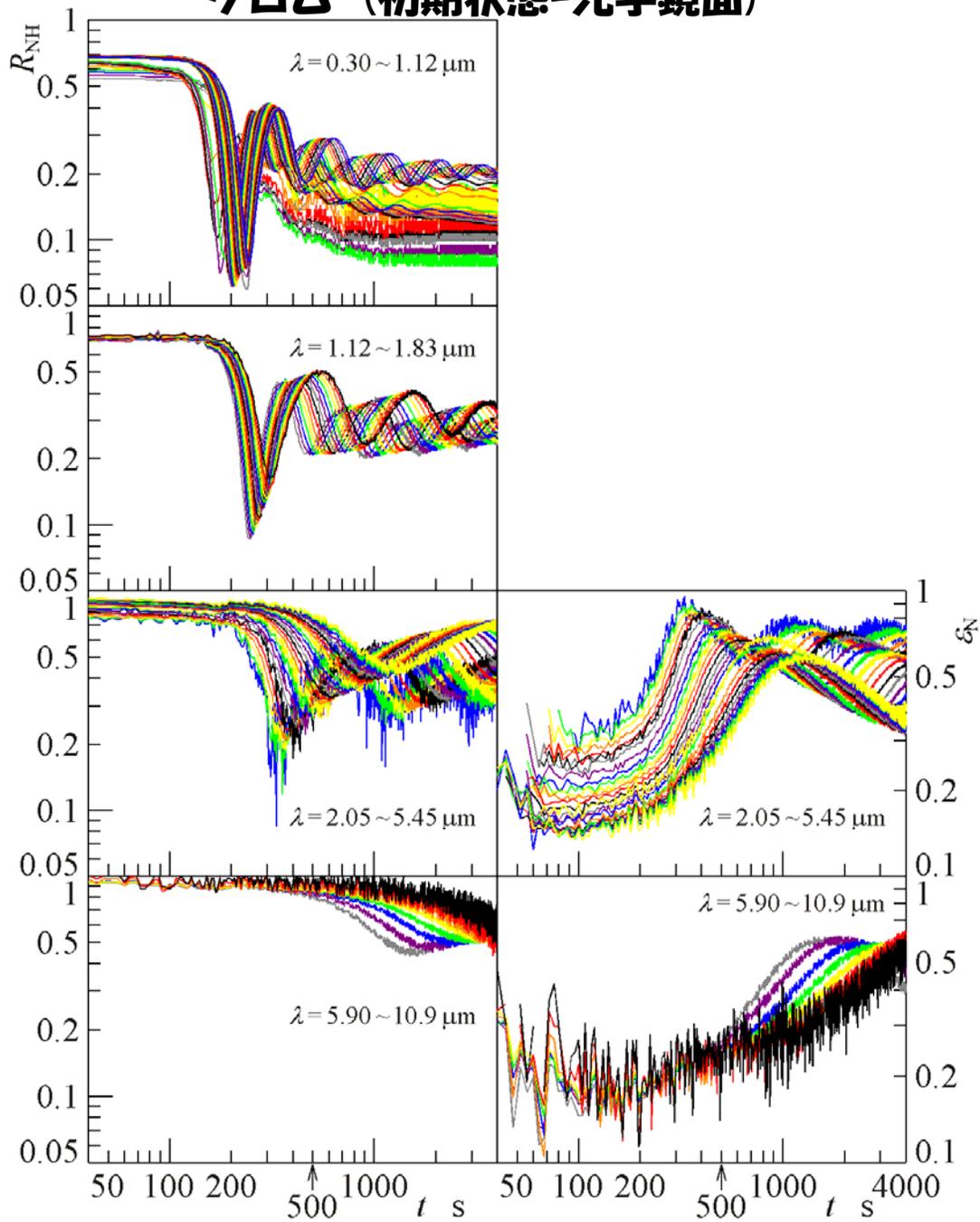
ニッケル (初期状態=光学鏡面)



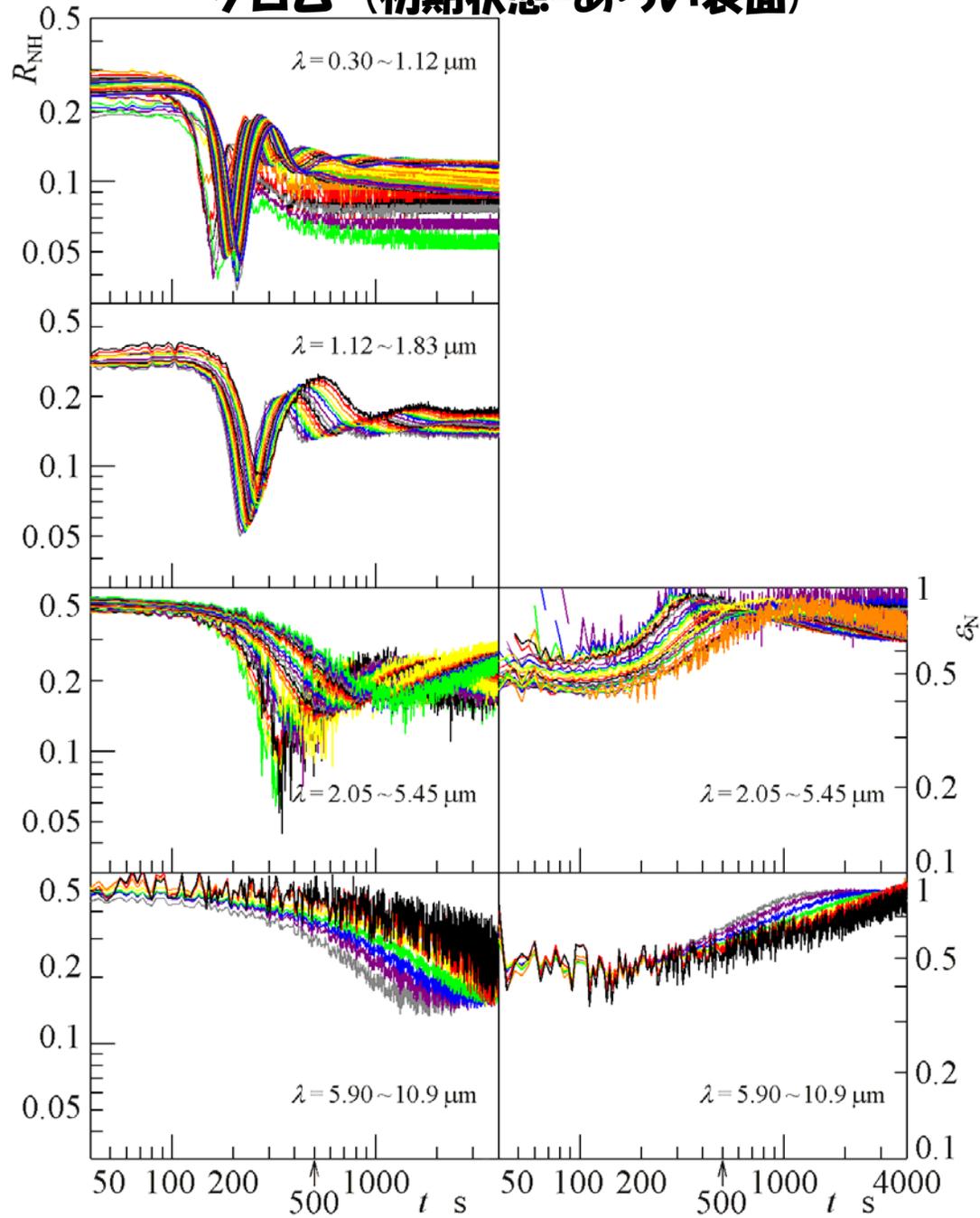
ニッケル (初期状態=あらい表面)



クロム (初期状態=光学鏡面)



クロム (初期状態=あらい表面)



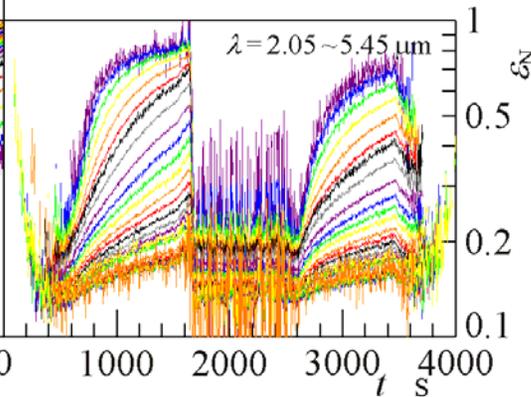
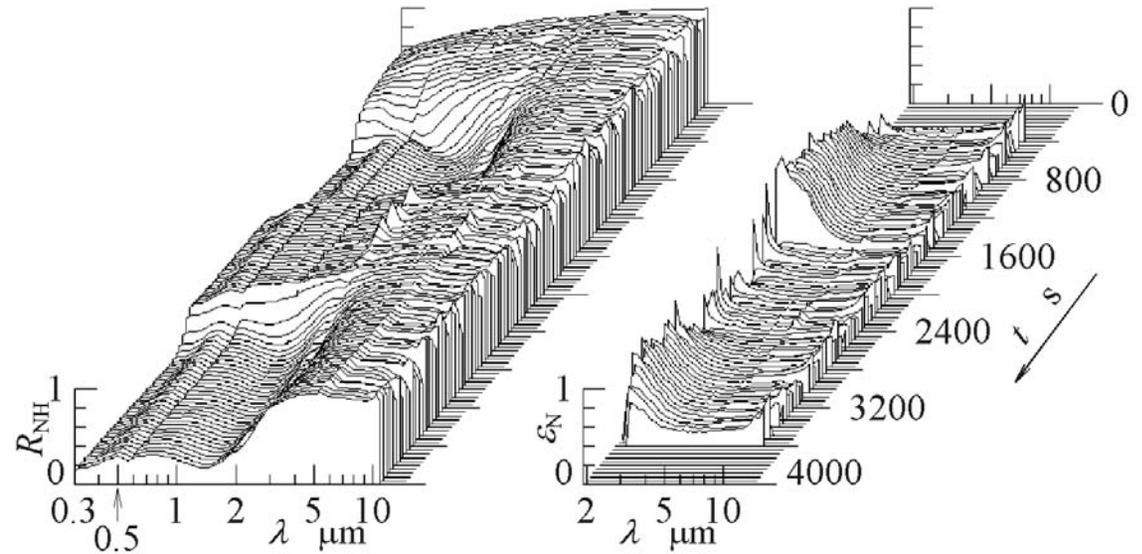
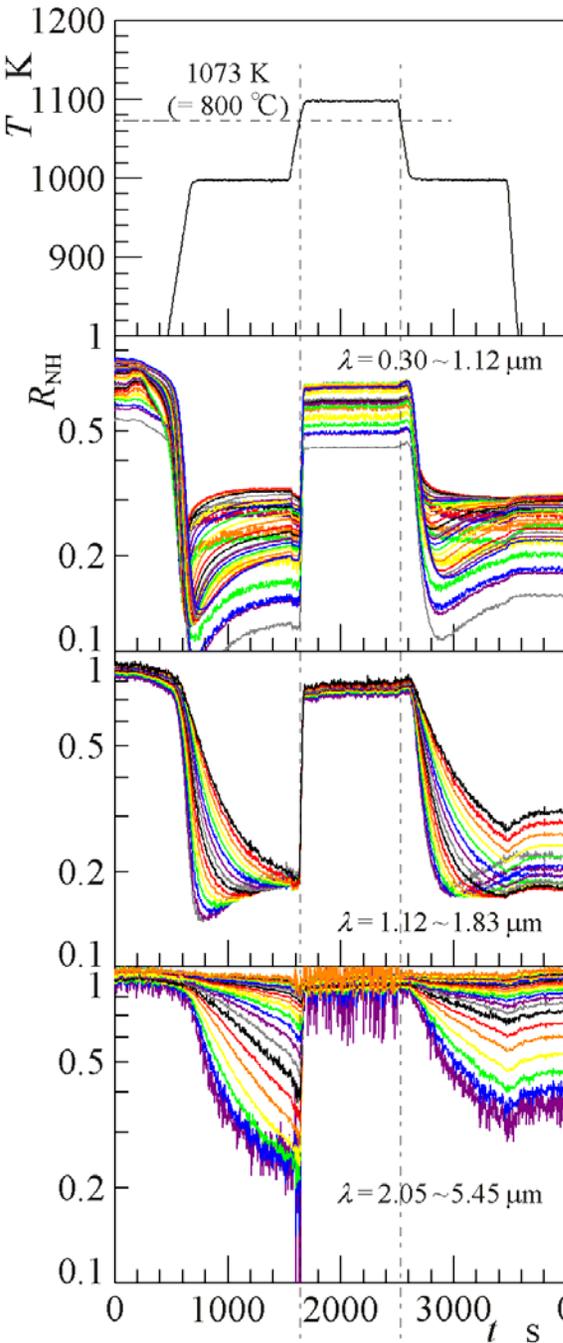
パラジウム (初期状態=光学鏡面)

※ temperature scanning:

300 K → 1000 K → 1100 K → 1000 K → 300 K

1073 K (=800°C) 1073 K (=800°C)

oxidation reduction oxidation



広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の開発・拡張

若林英信

-
1. ふく射伝熱評価
 2. 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の開発
 3. 表面の温度・ミクロ構造の熱ふく射スペクトル診断法
 4. 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の拡張
 5. Kirchoffの法則の実験的検証
-