

Laboratoř předmětu Termografie a termodiagnostika

Měření teploty spektrofotometrem

Vypracoval:	Martin Vejvar
Datum měření:	2.10.2018
Datum odevzdání:	13.10.2018
Asistent:	Ing. Přemysl Fitl, Ph.D

1 Zadání

1. Seznámení s přístrojovou technikou a programovými prostředky.
 - (a) UV/VIS/NIR spektrofotometr Ocean Optics HR2000+
 - (b) Program Spectrasuite
 - (c) Černé těleso PEGASUS R
2. Stanovte přenosovou funkci spektrofotometrického systému (kolimační optika + optické vlákno + spektrometr HR2000+). Pro stanovení přenosové funkce použijte vysokoteplotní černé těleso ISOTECH PEGASUS R 970. Pro výpočet použijte naměřenou spektrální charakteristiku černého tělesa při teplotě 1100 °C.
3. Naměřte spektrální charakteristiku wolframového vlákna žárovky při vybrané hodnotě příkonu (W). Do grafu vynesete naměřené spektrální charakteristiky přepočítané pomocí stanovené přenosové funkce. Při využití Planckova a Wienova zákona vypočtete teplotu vlákna při daných hodnotách příkonu.

2 Postup

V práci bylo postupováno dle návodu pro laboratorní úlohu, který se nachází na stránkách UFMT pod následujícím odkazem:

<https://ufmt.vscht.cz/index.php/cs/component/phocadownload/category/21-n444030-termografie-a-termodiagnostika?download=547:navod-tsp-v1>

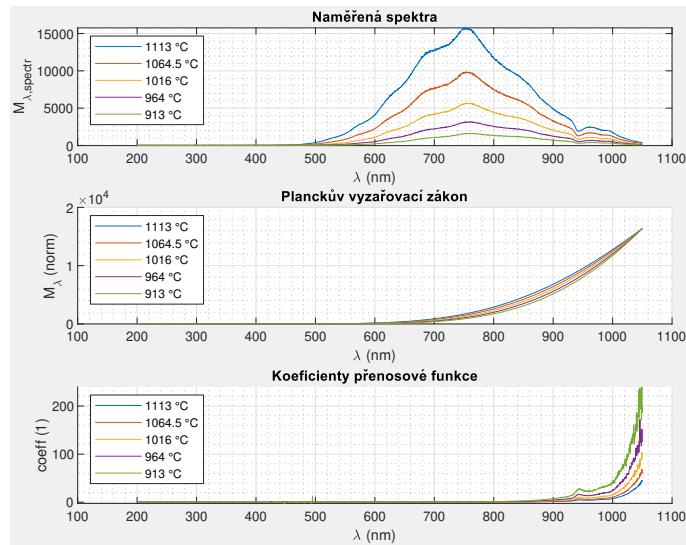
3 Vypracování

3.2 Přenosová funkce spektrofotometrického systému

Černé těleso ISOTECH PEGASUS R 970 s Inconelovou vložkou bylo po cca 200 stupňových inkrementech zahřáto na teplotu 1100 °C. Zatímco se černé těleso zahřívalo, byl zprovozněn spektrofotometr Ocean Optics HR2000+ a propojen se softwarem Spectrasuite od firmy Ocean Optics. Pro kalibraci výstupu jednotlivých pixelů CCD snímáče spektrometru byl při zakrytí kolimační optiky spektrometru krytkou získán obraz temného spektra a software nastaven do režimu odečítání temného spektra z aktuálního signálu.

Po ustálení teploty černého tělesa na 1100 °C bylo záření z dutiny Inconelové vložky optickým vláknem dovedeno na SMA konektor spektrometru a získané spektrum snímáno v softwaru Spectrasuite. Integrační doba sběru dopadajících fotonů na CCD snímáče spektrometru byla nastavena tak, aby maximum spektra přibližně odpovídalo maximální možné hodnotě, kterou je detektor schopen zobrazovat. V případě spektrometru Ocean Optics HR2000+ je proud, který se kumuluje na pixelech CCD detektoru, převáděn na číselné hodnoty pomocí 14 bitového AD převodníku. Maximální zobrazovaná hodnota je tedy $2^{14} = 16384$. Následně byla spektra snímána ještě pro teploty 1050, 1000, 950 a 900 °C. Naměřená spektra jsou vyobrazena v horní části obrázku 1. Teploty, které

jsou vypsány v legendě grafu zároveň zahrnují korekci teploty zobrazované na panelu na skutečnou teplotu Inconelové vložky (graf korekce se nachází v návodu laboratorní úlohy).



Obrázek 1: Naměřená spektra (nahore), hodnoty normalizovaného Planckova vyzařovacího zákona při emisivitě $\varepsilon = 0,995$ (uprostřed) a koeficienty přenosové funkce (dole) při jednotlivých teplotách Inconelové vložky černého tělesa ISOTECH PEGASUS R.

Následně byla vytvořena jednoduchá funkce `plancks_law` v programu Matlab pro výpočet hodnot spektrální hustoty intenzity vyzařování šedého tělesa (M_λ) s danou emisivitou (ε) pro zadané hodnoty vlnové délky (λ) a teplotu (T) podle Planckova vyzařovacího zákona normalizovaných na rozsah $(0, 2^{14})$:

```
function M = plancks_law(lambdas, T, eta)
2   % lambdas (nm) ... pole hodnot vlnových délek pro které zákon vypočítat
   % T (K) ... teplota černého tělesa
4   % eta (1) ... spektrální emisivita šedého tělesa
   % M.max ... maximální hodnota spektrální hustoty před normalizací
6   % M.values ... normovaná hodnota spektrální hustoty na maximum 2^14

8   if nargin == 2
       eta = 1.0;
10  end

12  k = 1.38064852e-23; % Boltzmannova konstanta (J/K)
   h = 6.626070040e-34; % Planckova konstanta (Js)
14  c = 299792458;      % Rychlost světla ve vakuu (m/s)

16  % převod vlnových délek na metry
   lambdas = lambdas.*10^-9;

18  % spektrální hustota intenzity vyzařování pro jednotlivé vlnové délky
20  C1 = (8*pi*h*c^2)./(lambdas.^5);
   C2 = h*c./(k*T.*lambdas);
22  M0 = eta*C1.*(1./exp(C2)-1));

24  M.max = max(M0);

26  % normalizace na maximum 2^14 (14 bitový AD převodník)
   M.values = M0/M.max*2^14;
28
```

Grafické znázornění hodnot vypočítaných výše uvedenou funkcí pro emisivitu $\varepsilon = 0.995$ a teploty zkoumané při měření spekter černého tělesa se nachází v prostřední části obrázku 1.

Poté byly získány koeficienty přenosové funkce systému sloužící pro převod mezi hodnotami naměřenými optickým systémem se spektrometrem a Planckovým vyzařovacím zákonem vypočítaným

funkcí `plancks_law` pro jednotlivé vlnové délky následujícím vztahem:

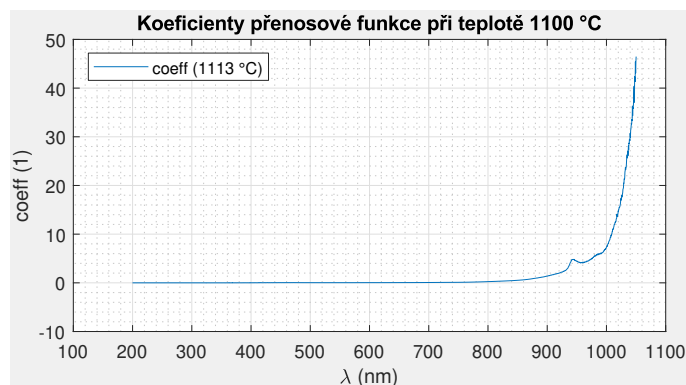
$$coeff(\lambda, T) = \frac{M_\lambda(\lambda, T, \varepsilon)}{Sp_\lambda(\lambda, T, \varepsilon)} \quad (1)$$

kde M_λ jsou normalizované hodnoty $(0, 2^{14})$ spektrální hustoty intenzity vyzařování vypočítané z funkce `plancks_law` a Sp_λ jsou hodnoty naměřeného spektra.

Posléze byly vytvořeny dvě funkce sloužící k převodu mezi M_λ a Sp_λ při poskytnutí koeficientů přenosové funkce `coeff`:

```
%% výpočet spektra vystupujícího ze spektrometru
2 function Sp = fit_spectrum(M_planck, eta, coeffs)
4     if nargin < 3
5         S = load('coeffs.mat');
6         coeffs = S.coeff{1};
7     end
8
9     if nargin < 2
10        eta = 1.0;
11    end
12
13    Sp = eta*(M_planck./ coeffs);
14 end
15
16 %% výpočet hodnot spektrální hustoty intenzity vyzařování ze zadaného spektra
17 function M_planck = fit_planck(M_spectr, eta, coeffs)
18
19     if nargin < 3
20         S = load('coeffs.mat');
21         coeffs = S.coeff{1};
22     end
23
24     if nargin < 2
25         eta = 1.0;
26     end
27
28     M_planck = (M_spectr.* coeffs)/eta;
29 end
30
```

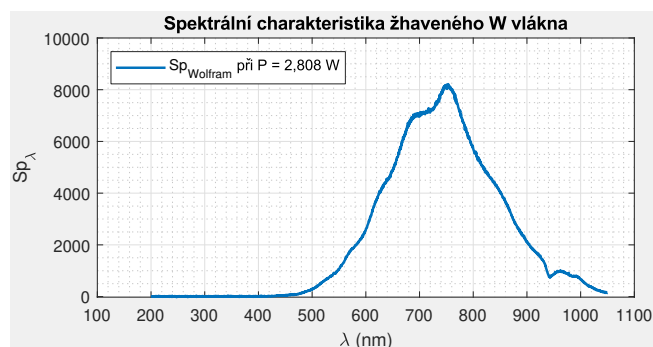
K dalším výpočtům byly využity koeficienty naměřené při teplotě 1113 °C ($coeff(\lambda, 1113)$), jejichž hodnoty jsou v grafu na obrázku 2 a uloženy v souboru `coeffs.mat`.



Obrázek 2: Koeficienty přenosové funkce při teplotě $T = 1113^\circ\text{C}$.

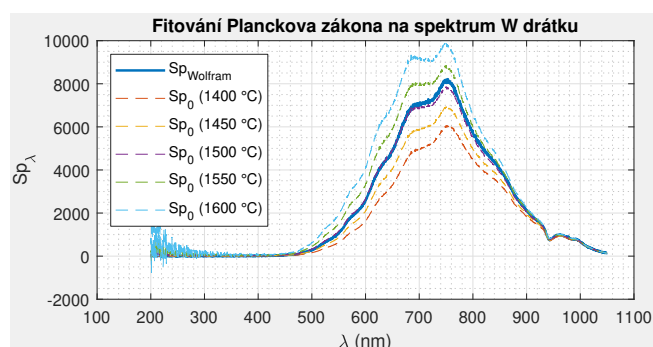
3.3 Výpočet teploty W vlákna ze spektrální charakteristiky

Optický systém spektrometru byl zaměřen na žhavenou část Wolframového vlákna připojeného k nastavitelnému zdroji napětí. Při nastavení příkonu na 2,808 W byla získána spektrální charakteristika vyzařování Wolframového vlákna (viz obrázek 3).



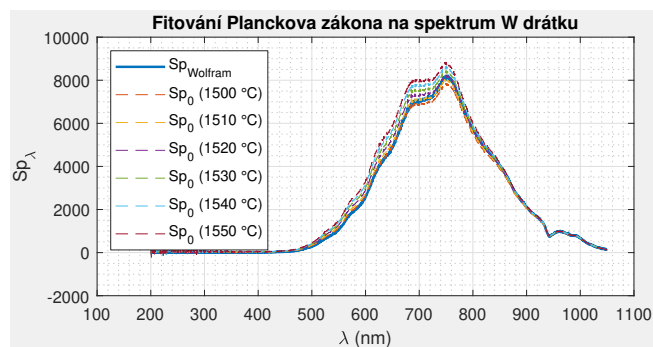
Obrázek 3: Spektrální charakteristika vyzařování žhaveného Wolframového vlákna při příkonu $P = 2,808 \text{ W}$

Následně bylo využitím funkce `plancks_law` vypočteno 5 řad spektrálních hustot intenzity vyzařování pro rozsah teplot $(1400, 1600)^\circ\text{C}$ s krokem 50°C . Tyto řady byly převedeny funkcí `fit_spectrum` na hodnoty ekvivalentní spektrální charakteristice naměřené optickým systémem při snímání objektu vyzařujícího s emisivitou 0,37, což je dle [1] spektrální emisivita Wolframového vlákna při teplotě 2300 K . Získané spektrální charakteristiky byly porovnány s naměřenou spektrální charakteristikou Wolframového vlákna (viz obr. 4).



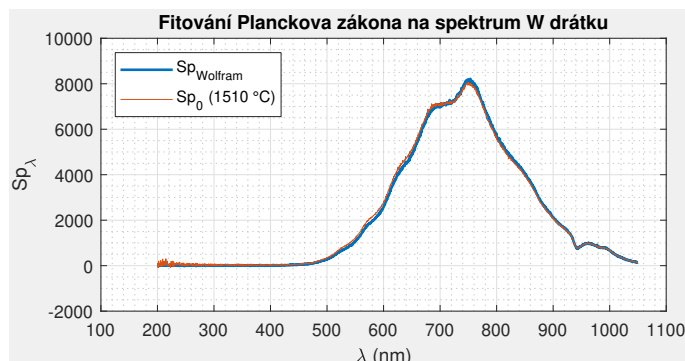
Obrázek 4: Porovnání spektrální charakteristiky vyzařování žhaveného Wolframového vlákna při příkonu $P = 2,808 \text{ W}$ se spektrálními charakteristikami vypočítanými funkcí `fit_spectrum` při teplotách $(1400 : 50 : 1600)^\circ\text{C}$.

Z obrázku 4 je zřejmé, že nejbližší naměřenému spektru se nachází vypočítané spektrum při teplotě 1500°C . Teplota W drátku se tedy nachází blízko hodnotě 1500°C . Aproximace byla dále zpřesněna opakováním procesu výpočtu a porovnání spektrálních charakteristik při teplotách v intervalu $(1500, 1550)$ s krokem 10 (viz obr. 5).



Obrázek 5: Porovnání spektrální charakteristiky vyzařování žhaveného Wolframového vlákna při příkonu $P = 2,808 \text{ W}$ se spektrálními charakteristikami vypočítanými funkcí `fit_spectrum` při teplotách $(1500 : 10 : 1550)^\circ\text{C}$.

Na obrázku 5 se k naměřenému spektru nejvíce přibližuje spektrum pro teplotu $1510\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lze tedy předpokládat, že teplota žhaveného W vlákna při příkonu $P = 2,808\text{ W}$ se bude pohybovat v okolí hodnoty $1510\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výsledné porovnání naměřené a vypočítané spektrální charakteristiky se nachází na obr. 6.



Obrázek 6: Porovnání spektrální charakteristiky vyzařování žhaveného Wolframového vlákna při příkonu $P = 2,808\text{ W}$ se spektrální charakteristikou vypočítanou funkcí `fit_spectrum` při teplotě $1510\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Hodnota $1510\text{ }^{\circ}\text{C}$ však nemusí odpovídat skutečné teplotě vlákna z následujících důvodů:

- Zvolená spektrální emisivita $0,37$ platí pro teplotu 2300 K , tedy cca $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Emisivita Wolframového vlákna pro teplotu $1510\text{ }^{\circ}\text{C}$ se může lišit.
- Na vstup optického vlákna snímajícího záření Wolframového drátku mohou dopadat fotony z jiných zdrojů záření, které se v laboratoři nacházejí (bylo minimalizováno zatemněním místnosti).
- Šum výstupních hodnot jednotlivých snímačů CCD detektoru. Ten by měl být minimalizován odečtením temného spektra čipu provedeného na začátku měření. Vlivem zahřívání detektoru při měření se však šum může zvyšovat a výsledky ovlivňovat.
- Zaokrouhlovací chyby způsobené výpočty s řádově se lišícími hodnotami.

4 Závěr

V laboratorní úloze byly naměřeny za pomoci spektrofotometru Ocean Optics HR2000+ spektrální charakteristiky vyzařování černého tělesa ISOTECH PEGASUS R 970 s Inconelovou vložkou při teplotách $1100, 1050, 1000, 950$ a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Spektrální charakteristika vyzařování černého tělesa při teplotě $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ byla využita pro výpočet koeficientů přenosové funkce, které slouží pro převod mezi hodnotami spektrální hustoty intenzity vyzařování šedého tělesa vypočítaného z Planckova vyzařovacího zákona a hodnotami spektrální charakteristiky získané ze spektrofotometru. Hodnoty koeficientů přenosové funkce dále sloužily pro nalezení teploty žhaveného Wolframového vlákna při napájecím příkonu $P = 2,808\text{ W}$ z naměřené spektrální charakteristiky jeho vyzařování. Vypočítané spektrum se nejvíce blížilo naměřené spektrální charakteristice při teplotě $1510\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hodnota však může být zatížena chybami jako je nesprávná volba spektrální emisivity Wolframového vlákna při dané teplotě, dopad fotonů z okolních zařízení na optickou cestu spektrometru, šum jednotlivých senzorů CCD detektoru nebo zaokrouhlovací chyby při výpočtech.

Odkazy

- [1] D. Allen, Robert, F. Glasier, Louis a L. Jordan, Paul. „Spectral Emissivity, Total Emissivity, and Thermal Conductivity of Molybdenum, Tantalum, and Tungsten above 2300K“. In: 31 (zář. 1960), s. 1382–1387.