

MĚŘENÍ PLANCKOVY KONSTANTY

Pomůcky:

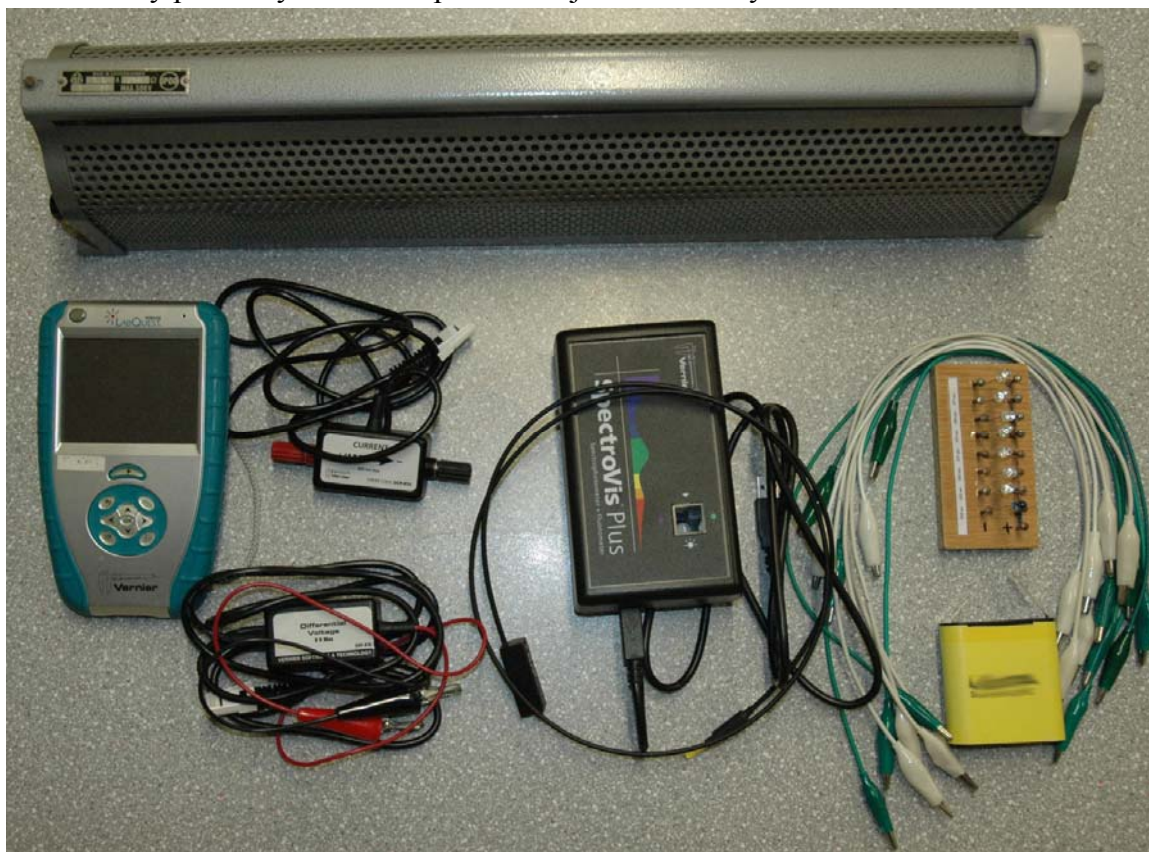
voltmetr DVP-BTA, ampérmetr DCP-BTA, spektrometr SpectroVis Plus s optickým vláknem SpectroVis Optical Fiber, několik různých LED, zdroj napětí, reostat, spojovací vodiče, LabQuest, program LoggerPro, program Mathematica (resp. Microsoft Excel či jiný tabulkový procesor)

Postup:

Planckova konstanta je zásadní konstantou pro popis světa, zejména se uplatňuje ve fyzice popisující zákony mikrosvěta. Ač je její hodnota ve srovnání s hodnotami fyzikálních veličin, s nimiž se běžně setkáváme, velmi malá, je možné tuto hodnotu proměřit makroskopickým experimentem.

Při experimentu použijeme různé druhy LED (tj. LED vyzařující elektromagnetické záření různých vlnových délek). Pro experiment je vhodné použít takové LED, které vyzařují (téměř) monofrekvenční světlo. Použití např. bílé svítící LED není vhodné; důvod bude vysvětlen dále v textu.

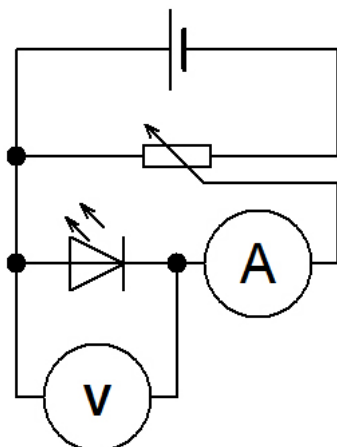
Všechny pomůcky nutné k experimentu jsou zobrazeny na obr. 1.



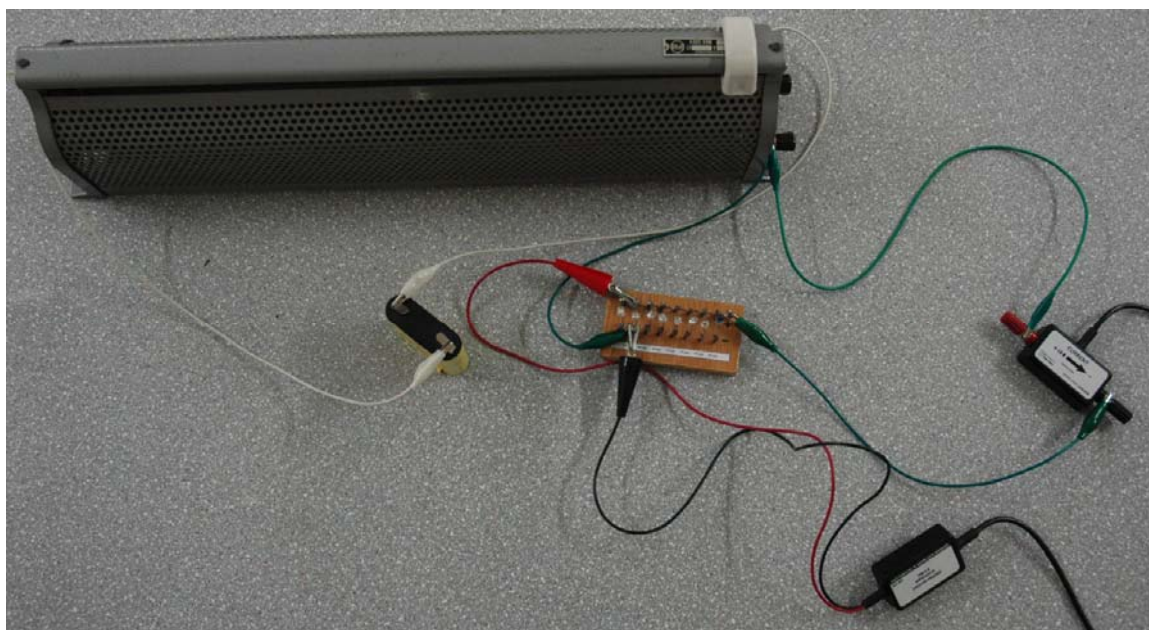
obr. 1

Nejdříve proměříme prahová napětí použitých LED. Můžeme s pomocí ampérmetru a voltmetru proměřit voltampérovou charakteristiku, nebo pouhým pohledem na rozsvěčující se LED určit hodnotu prahového napětí dané LED. Pro oba způsoby měření je vhodné připojit LED ke zdroji napětí přes potenciometr (viz schéma na obr. 2 a skutečný obvod na obr. 3). Jako zdroj napětí postačuje plně nabitá plochá baterie; není-li baterie nová, je vhodné spojit dvě do série. Vyšší napětí baterie způsobí vyšší elektrický proud, který poteče obvodem (a

tedy i LED); tím potlačíme šum senzorů. Ampérmetr i voltmetr jsou připojeny k LabQuestu (resp. k počítači se spuštěným programem LoggerPro).



obr. 2



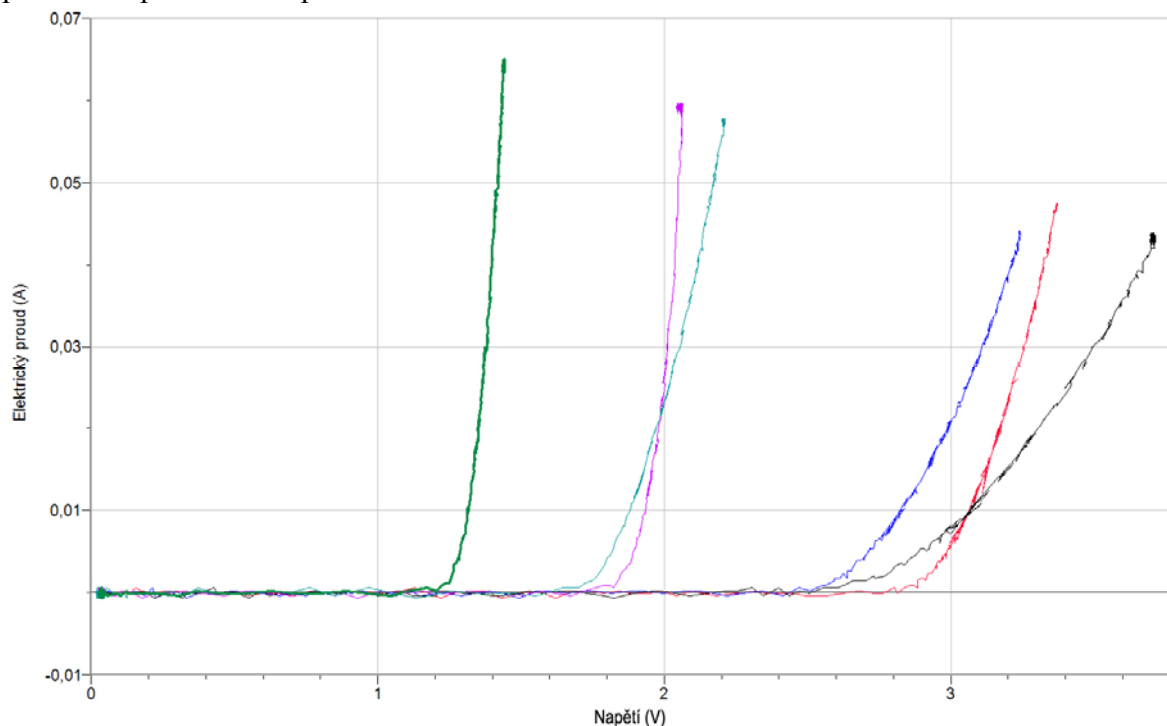
obr. 3

Jezdec reostatu nastavíme tak, aby na LED bylo nulové napětí. Senzory voltmetr a ampérmetr připojíme k LabQuestu nebo k počítači se spuštěným programem LoggerPro a nastavíme dobu měření na několik sekund. Dobu měření volíme podle toho, zda experiment budeme provádět sami nebo zda budeme mít pomocníka. Jezdcem reostatu přejedeme z jedné strany reostatu na druhou plynulým pohybem za necelých 5 sekund. V případě, že pracujeme sami, je nutné mít časovou rezervu na přesun od měřicího zařízení k sestavenému obvodu. Spustíme tedy měření a jezdcem plynule přejedeme z jednoho konce reostatu na druhý.

Po skončení měření s první LED vrátíme jezdec reostatu do výchozí polohy a přidáme do zobrazovaného grafu další (v programu LoggerPro pomocí klávesové zkratky Ctrl - L). Zapojíme další LED a měření zopakujeme. Voltampérové charakteristiky naměřené během experimentu jsou zobrazeny na obr. 4.

Z těchto charakteristik by bylo možné odečíst prahová napětí jednotlivých LED použitých v experimentu. Je ale také další možnost, která se na první pohled může zdát méně přesná, a to prahové napětí určit pohledem na rozsvěčující se LED a odečíst ho z připojeného voltmetru. Stačí začít opakovat experiment, který vedl k proměřené voltampérových charakteristik. V tomto případě ovšem nespouštíme měření v LabQuestu, ale pouze odečítáme

údaj z voltmetru. Jezdcem v reostatu v obvodu, jehož schéma je na obr. 2, pomalu přejíždíme směrem ke druhému konci reostatu. V okamžiku, kdy se začne LED rozsvěcet (je nutné se dívat ve směru osy LED), odečteme hodnotu prahového napětí U_p . V případě, že použijeme infračervenou LED, je nutné rozsvěcování sledovat např. přes displej mobilního telefonu se spuštěnou aplikací fotoaparát.



obr. 4

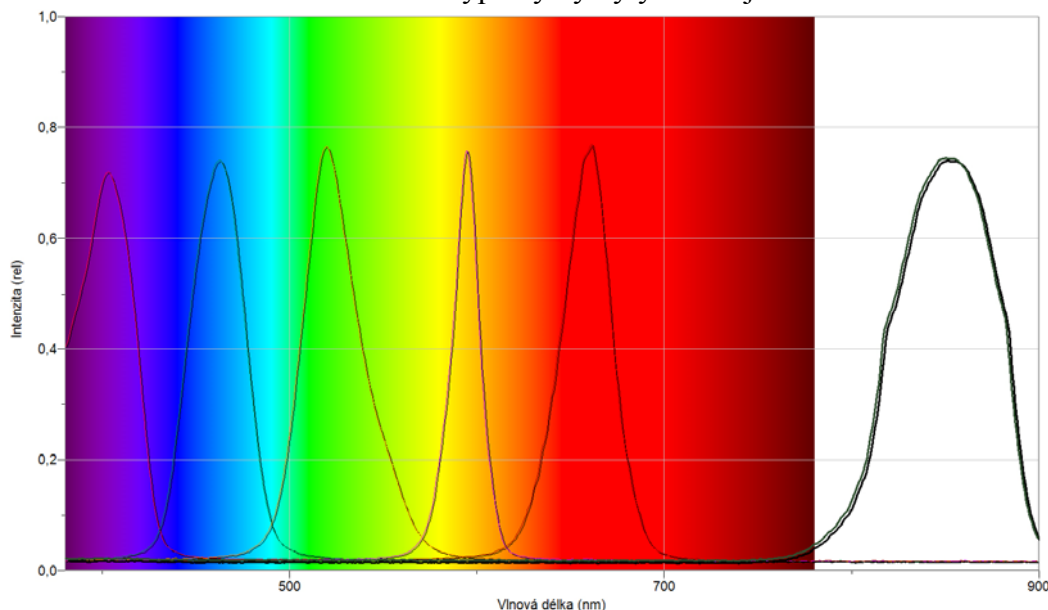
Barva LED	$\frac{U_p}{V}$	$\frac{\lambda}{\text{nm}}$
fialová	2,75	403,6
modrá	2,37	463,0
zelená	2,10	519,9
oranžová	1,72	594,9
červená	1,59	661,4
infračervená	1,25	850,5

tab. 1

Pomocí spektrometru a optického vlákna proměříme spektrum jednotlivých LED. Cílem je určit vlnovou délku elektromagnetického záření, které vyzařuje daná LED s nejvyšší intenzitou. Spektroskop připojíme LabQuestu (resp. k počítači), připojíme optické vlákno tak, aby se světlo do něj dopadající přenášelo do spektroskopu. Před spuštěním měření je třeba změnit jednotky, v nichž bude měření udáno. V programu LoggerPro lze tuto změnu provést v menu programu: *Experiment - Změnit jednotky - Spektroskop - Intenzita*. Na displeji LabQuestu vyvoláme příslušné menu dotykem displeje na základní obrazovce v místě, kde je zobrazen údaj spektrometru. Spustíme měření a optické vlákno držíme ve směru osy rozsvícené LED. S optickým vláknem je třeba mírně pohybovat tak, aby maximum zobrazené charakteristiky zůstalo zobrazeno na obrazovce. Pokud je charakteristika zobrazena rozumně na celé obrazovce, ukončíme měření. Pomocí volby *Analýza - Statistika* (resp. pomocí příslušné ikony v programu) odečteme vlnovou délku λ , pro kterou má zobrazená křivka své maximum. Tuto vlnovou délku spolu s prahovými napětími použitých LED zaznamenáme do

tabulky (viz tab. 1). Přidáme další měření a proměříme další použité LED. Spektra použitých LED jsou zobrazena na obr. 5.

V případě, že by byly použity LED vyzařující elektromagnetické záření více vlnových délek (např. bílá LED), objevila by se v grafu závislosti intenzity elektromagnetického záření na jeho vlnové délce dvě maxima. Další výpočty by byly složitější.



obr. 5

Nyní můžeme údaje vypsané v tab. 1 zpracovat. V tomto textu jsou použité výsledky získané z programu Mathematica, stejně tak je možné naměřené údaje zpracovat i v jiných programech nebo tabulkových procesorech.

Před dalším zpracováním je nutné si uvědomit, jak světlo v LED vzniká a jaká data tedy můžeme z dalšího zpracování získat. Světlo v LED vzniká při rekombinaci páru elektron - díra; uvolněná energie se mění na světelnou energii fotonů dané vlnové délky. Energie fotonu je dána vztahem

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}, \quad (1)$$

kde f je frekvence daného fotonu, λ jeho vlnová délka, h Planckova konstanta a c velikost rychlosti světla ve vakuu. Na tuto energii se přemění elektrická energie elektronu, který při daném napětí U_p projde přechodem PN dané LED. Pro tuto energii přitom platí vztah

$$E_e = Q \cdot U_p, \quad (2)$$

kde Q je náboj elektronu.

Vzhledem k tomu, že elektrická energie popsaná vztahem (2) se mění na světelnou energii danou vztahem (1), platí:

$$Q \cdot U_p = h \cdot f \left(= h \cdot \frac{c}{\lambda} \right). \quad (3)$$

Ze vztahu (3) lze vyjádřit některé charakteristiky, které by měla naměřená data (viz tab. 1) splňovat. Lze například vyjádřit závislost prahového napětí U_p LED na vlnové délce λ elektromagnetického záření, při níž je intenzita tohoto záření největší (tj. vlnová délka, která odpovídá „barvě světla“ vyzařovaného danou LED). Ze vztahu (3) pro napětí U_p dostáváme vztah

$$U_p = \frac{h \cdot c}{Q} \cdot \frac{1}{\lambda}. \quad (4)$$

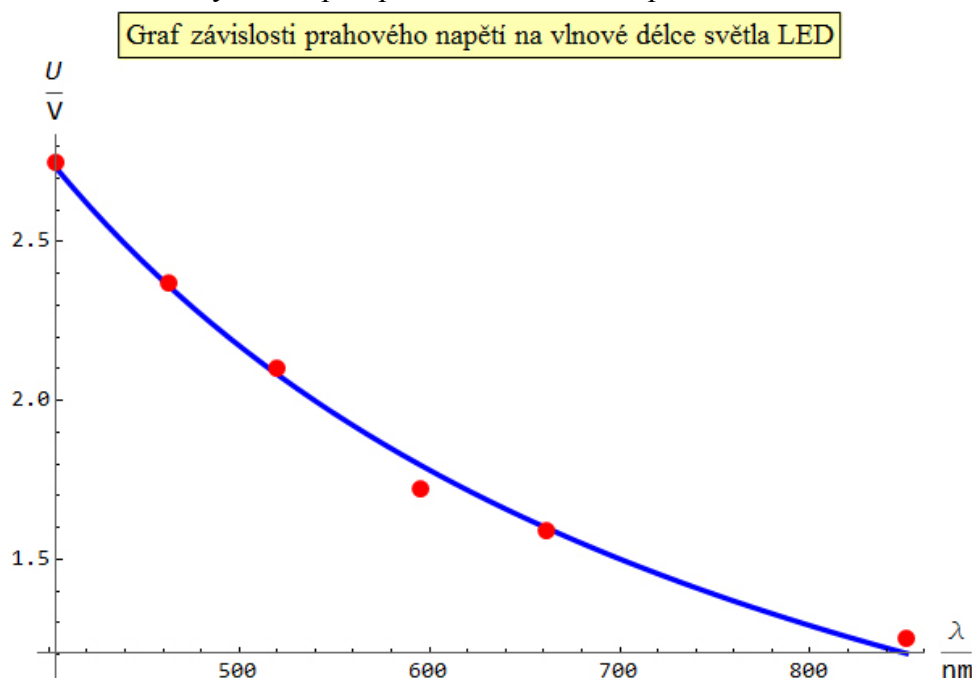
Vzhledem k tomu, že h , c i Q jsou konstanty, dostáváme předpis nepřímé úměrnosti s koeficientem $K = \frac{h \cdot c}{Q} \doteq \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ V} \cdot \text{m}$. Po vyčíslení tedy dostáváme

$$K \doteq 1,24 \cdot 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{m}. \quad (5)$$

Zobrazíme-li naměřená data (viz tab. 1) do grafu, získáme graf závislosti prahového napětí na vlnové délce (viz obr. 6). Funkce, kterou lze naměřenými daty proložit má (na základě výpočtu v programu Mathematica) předpis

$$\{U\} = -0,18 + \frac{1,17 \cdot 10^{-6}}{\{\lambda\}}. \quad (6)$$

Porovnáme-li konstantu nepřímé úměrnosti ze vztahu (6) s hodnotou konstanty (5), zjišťujeme řádovou shodu obou konstant. Absolutní člen ve vztahu (6) popisuje posun grafu funkce; teoreticky by měl být nulový, ale jisté nepřesnosti při měření vznikly. Absolutní člen je oproti druhému členu řádově desetkrát menší. Při dosazování vlnové délky ve stovkách nanometrů bude mít druhý člen v předpisu funkce hodnotu přibližně 2 V.



obr. 6

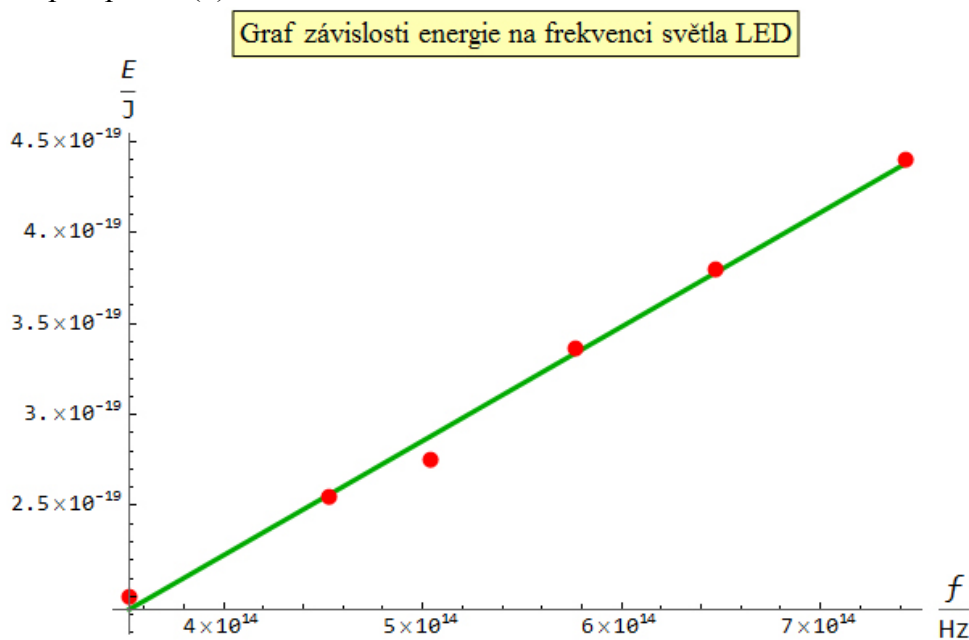
Vztah (1) popisuje lineární závislost energie fotonu na jeho frekvenci. Konstantou úměrnosti přitom je Planckova konstanta. Na základě naměřené vlnové délky lze vypočítat frekvenci fotonu f . Energii fotonu lze určit na základě vztahu (2) ze znalosti prahového napětí U_p . Vyneseme-li takto získané údaje do grafu závislosti energie fotonu (viz úvahy o rovnosti energií výše) na frekvenci fotonu, získáme graf zobrazený na obr. 7. Zobrazené body lze proložit úsečkou (tj. závislost energie na frekvenci fotonu je lineární) a příslušná lineární funkce má (na základě výpočtů v programu Mathematica) předpis

$$\{E\} = -2,83 \cdot 10^{-20} + 6,28 \cdot 10^{-34} \cdot \{f\}. \quad (7)$$

Směrnice této lineární funkce je rovna $k = 6,28 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; hodnota Planckovy konstanty přitom je $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Chyba, které jsme se při určování hodnoty Planckovy konstanty dopustili, tedy je $\frac{h-k}{h} \cdot 100\% = \frac{0,35}{6,63} \cdot 100\% \doteq 5,3\%$.

Na závěr ještě jedno připomenutí: do výpočtů, které byly provedeny v programu Mathematica, vstupovaly pouze konstanty Q (náboj elektronu) a c (velikost rychlosti světla ve

vakuu): pomocí konstanty Q byla s využitím vztahu (2) určena energie, kterou bude mít vyzářený foton, a pomocí konstanty c byla na základě naměřené vlnové délky (při níž je intenzita elektromagnetického záření LED maximální) určena frekvence záření, aby bylo možné sestavit graf zobrazený na obr. 7. Hodnota Planckovy konstanty vyšla jako směrnice funkce dané předpisem (7).



obr. 7

Z naměřených dat by bylo možné sestavit více grafických závislostí (např. závislost energie fotonu na jeho vlnové délce, ...). Všechny předpisy funkcí, kterými lze dané závislosti nahradit, přitom obsahují konstanty s řádově správnými hodnotami.

Literatura:

- [1] Encyklopedie fyziky - Usměrnující dioda [online]. [citováno 28. 12. 2016]. Dostupné z WWW: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/273>
- [2] Encyklopedie fyziky - LED [online]. [citováno 28. 12. 2016]. Dostupné z WWW: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/276>
- [3] Encyklopedie fyziky - Planckova kvantová hypotéza [online]. [citováno 28. 12. 2016]. Dostupné z WWW: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/721>