

Elektrina v kapalném dusíku

MILOŠ ROTTER

Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta, Praha

Cílem tohoto příspěvku je upozornit na některé elektrické jevy, které lze demonstrovat s použitím kapalného dusíku.

Ještě jednou var a Leidenfrostův jev

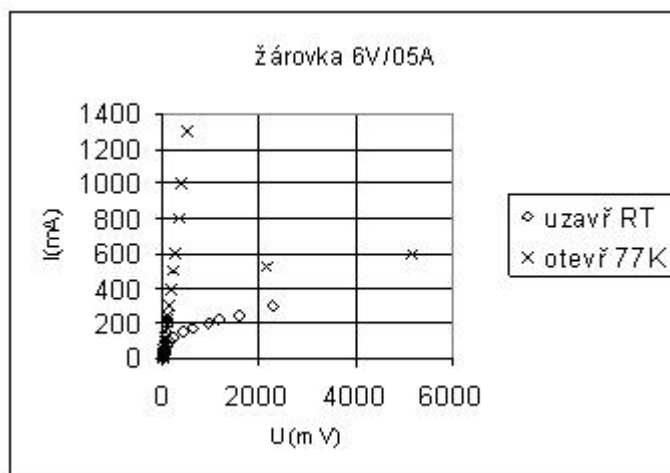
S izolačními vlastnostmi vrstvičky par obklopující kapku kapalného dusíku jsme se seznámili již při předchozích demonstracích [1]. Tento jev nazvaný po Johannu Gottlobu Leidenfrostovi (1715 – 1794) se významně projevuje i v technické praxi tam, kde se kapalinou chladí silně ohřívána tělesa.

V kapalném dusíku můžeme demonstrovat průběh varu kapaliny v závislosti na příkonu dodávaném proudem do tenkého odporového vlákna. Ve skleněné nestříbřené dewarově nádobě můžeme pozorovat, jak s rostoucím proudem nejprve vlákno obklopí řetěz bublinek, které se odtrhávají a stoupají k hladině (bublinový var). Při vyšším příkonu se bublinky spojí a vytvoří jakousi trubici, která obklopí vlákno (blánový var). Při dalším zvýšení příkonu je vlákno parami dusíku izolováno od kapaliny, na různých místech se ohřívá na vysokou teplotu až do žlutočerveného žáru a posléze se na některém slabém místě přetaví. V naší demonstraci jsme použili vlákno z konstantanu o průměru $d = 0,04$ mm (plocha průřezu $S = 1,26 \cdot 10^{-3}$ mm²). V délce $l = 35$ mm má vlákno v kapalném dusíku odpor $R = 13$ Ω. K výrazné tvorbě bublin dochází při proudu asi $I = 300$ mA, což odpovídá proudové hustotě asi $i = 240$ A/mm². Příkon vlákna přitom činí asi $P = 1,2$ W a vzhledem k malému obsahu plochy vlákna přechází do kapalného dusíku tepelný výkon s hustotou $\sigma = 0,27$ W/mm². Blánový var nastupuje při proudu vyšším než $I = 500$ mA ($i = 400$ A/mm²), $P = 3,3$ W, $\sigma = 0,75$ W/mm², vlákno je v důsledku Leidenfrostova jevu izolováno od chladicího účinku kapaliny a při proudu nad $I = 800$ mA ($i = 640$ A/mm²) se rozsvěcuje do žlutočerveného žáru. Příkon dosahuje téměř $P = 9$ W a vlákno vyzařuje tepelnou energii s plošnou hustotou $\sigma = 2$ W/mm², jinak $\sigma = 2$ MW/m² !

Jak rozsvítit poškozenou žárovku

Odporové vlákno svítící v kapalném dusíku můžeme velmi pěkně předvést pomocí malé přístrojové žárovky, jejíž skleněnou baňku jsme broušením otevřeli. Vlákno otevřené žárovky by na vzduchu shořelo. Je-li však tato žárovka ponořena do kapalného dusíku a napájena z proudové zdroje, způsobuje zvýšený var kapaliny a posléze v oblasti blánového varu se její vlákno rozzáří v parách dusíku žlutým světlem. Charakteristika normální uzavřené žárovky má pro malé proudy lineární průběh, kdy malý příkon nezvyšuje ještě teplotu vlákna a jeho odpor se proto nemění. Při vyšších prouděch se vlákno zahřívá, jeho odpor roste a žárovkou teče menší proud, než by odpovídal počátečnímu odporu. Závislost proudu na napětí otevřené žárovky ponořené v kapalném dusíku je strmější (vlákno má menší odpor) a zůstává lineární do vel-

kých proudů. Poté se projeví Leidenfrostův jev, vlákno se ohřívá a jeho odpor roste, proud výrazně poklesne a s rostoucím napětím opět vzrůstá, žárovka svítí a proud se blíží k hodnotám uzavřené žárovky za pokojové teploty, viz obr.1.



obr.1

Pomocí kapalného dusíku můžeme ukázat, jak závisí elektrický odpor čistého kovu na teplotě. Jako vzorek čistého kovu s dobře měřitelným odporem nám poslouží wolframové vlákno malé žárovky z předchozí demonstrace. Odpor čistého kovu mezi pokojovou teplotou a teplotou kapalného dusíku je přibližně přímo úměrný teplotě, při ochlazení poklesne tedy asi čtyřikrát. Pokles odporu při pomalém přibližování žárovky k hladině kapalného dusíku se pozoruje nejlépe ohmmetrem nebo milivoltmetrem při napájení žárovky malým konstantním proudem několika miliampérů..

Odpor polovodiče s klesající teplotou roste v podstatě exponenciálně v souvislosti s klesající pravděpodobností excitace nositelů náboje do vodivostního pásu. Jako vzorek polovodiče dobře poslouží běžně dostupný termistor, např. K164NE470. Do série s termistorem zapojíme svítící diodu a napětí zdroje nastavíme za pokojové teploty tak, aby proud asi $I = 10 \text{ mA}$ zřetelně rozsvítil diodu. Při postupném ochlazování termistoru jeho odpor roste, proud klesá a dioda přestává svítit.

Chování přechodů PN polovodičů při ochlazení kapalným dusíkem

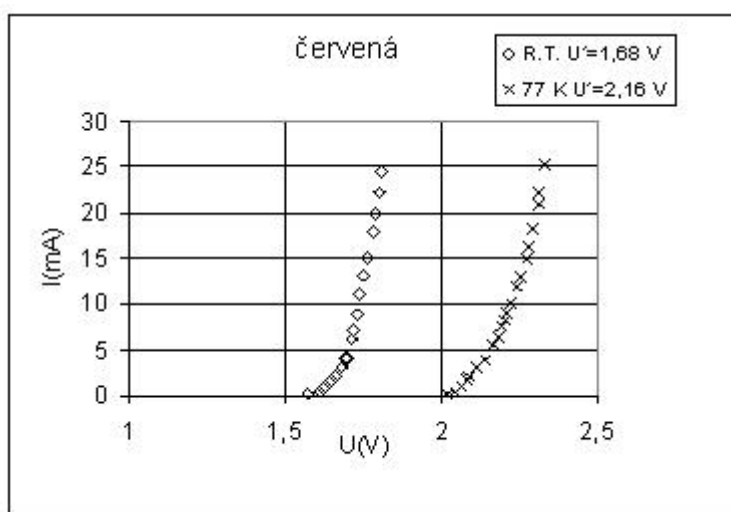
V polovodičích se pomocí vhodných příměsí vytvářejí oblasti, v nichž se náhle mění typ vodivosti. Polovodič s majoritní děrovou vodivostí (typ P) přechází do polovodiče s majoritní elektronovou vodivostí (typ N). Vzniká tak oblast nepohyblivého prostoro-ového náboje s elektrickým polem, které brání pohybu volných elektronů a děr. Při-ložení vnějšího elektrického napětí s kladným pólem k oblasti P a záporným k oblasti N se snižuje vzniklá elektrická bariéra přechodu PN a polovodičem začne téct proud. Při opačné polaritě přiloženého napětí se bariéra prohlubuje a přechodem PN proud neprotéká, nepřekročí-li přiložené napětí hodnotu průrazného napětí. Této vlastnosti se využívá ke konstrukci polovodičových diod, jimiž se usměrňuje nebo detekuje střídavý proud.

Napájíme-li diodu malým konstantním proudem v propustném směru, zpravidla $U_F = 10 \mu\text{A}$, napětí na diodě roste prakticky lineárně s klesající teplotou od 350 K do 50 K. Tento jev souvisí s teplotní závislostí šířky zakázaného pásu polovodiče. Proto se křemíkové diody nebo diody ze slitiny GaAs používají jako teploměry v této oblasti teplot. Dobře poslouží libovolná miniaturní křemíková detekční dioda zapouzdřená ve skle, například řady KA200 nebo třeba BAV 21, na niž tuto vlastnost demonstrujeme. Při teplotě 0 °C naměříme na diodě napětí $U = 0,45 \text{ V}$, v kapalném dusíku $U = 0,984 \text{ V}$, což odpovídá střední teplotní závislosti napětí $dU/dT = - 2,72 \text{ mV/K}$. K napájení používáme buď elektronicky řízený zdroj konstantního proudu nebo jednodušeji zdroj konstantního napětí s velkým odporem v sérii.

Jak svítí ochlazené elektroluminiscenční diody

V posledních letech se velice rozvíjí výroba a použití LED, tedy svítících nebo též elektroluminiscenčních diod [2]. Využívá se v nich zářivé rekombinace nosičů náboje vybuzených přes zakázaný pás polovodiče. Volí se takové polovodiče, jejichž energetická šířka E_g zakázaného pásu odpovídá vlnové délce λ světla ve viditelné, případně infračervené nebo ultrafialové oblasti. Rovnost $hc/\lambda = E_g$ neplatí vždy přesně, poněvadž se při zářivé rekombinaci uplatní i složitější nepřímé energetické přechody. Svítící diody se vyrábějí v řadě barev, nejběžnější jsou infračervené, červené, žluté, zelené, modré, bílé a ultrafialové. Zajímalo nás, jak se budou svítící diody chovat při ochlazení v kapalném dusíku. Proměřovali jsme volt-ampérové charakteristiky v propustném směru a sledovali změny v barvě a intenzitě světla diod. Použili jsme diody různých výrobců připravené ze slitin řady Ga-As-P-In-Al.

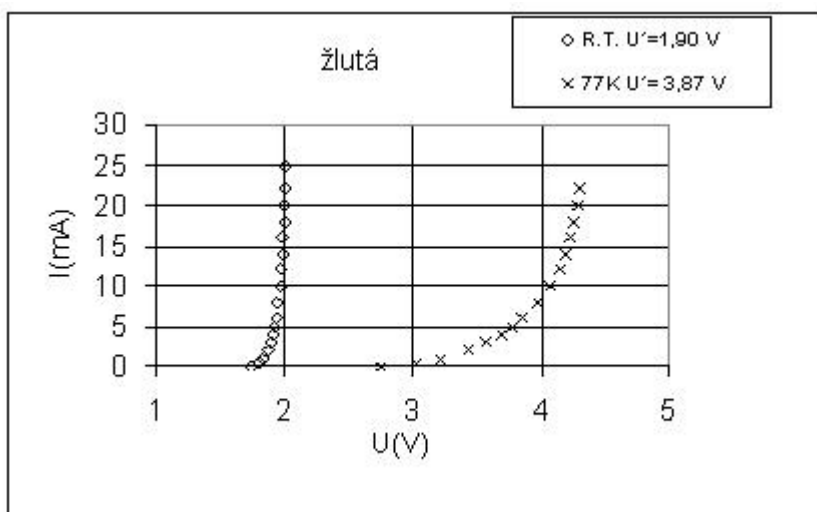
Charakteristika infračervené diody se při ochlazení posunula do vyšších napětí. Zatímco prahové napětí lineární oblasti charakteristiky je za pokojové teploty $U^* = 1,13 \text{ V}$ (odpovídá $\lambda = 1094 \text{ nm}$), v kapalném dusíku jsme naměřili $U^* = 1,45 \text{ V}$ ($\lambda = 852 \text{ nm}$). Podle výrobce září dioda v oblasti $\lambda = 940 \text{ nm}$, žádnou složku ve viditelném světle jsme nepozorovali ani při ochlazení v kapalném dusíku.



obr.2

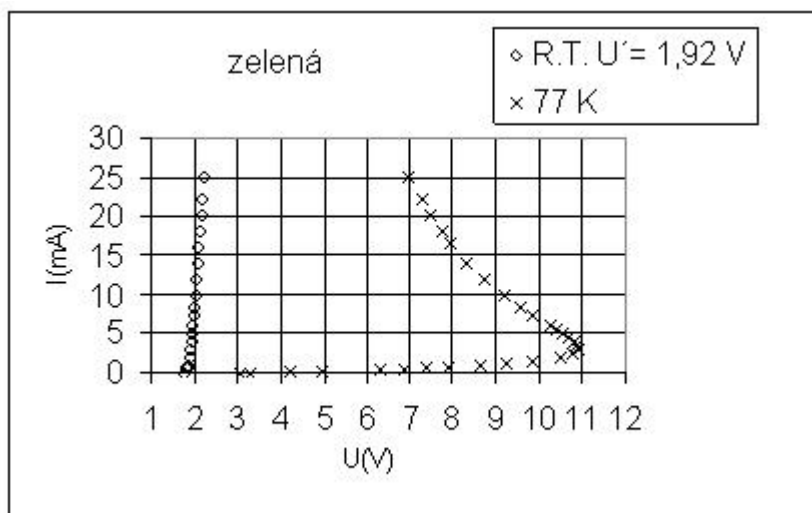
Červená dioda při chlazení v kapalném dusíku září intenzivněji s nezměněnou barvou. Charakteristika se při ochlazení posune do vyšších napětí. Prahové napětí odečtené při pokojové teplotě $U^* = 1,68 \text{ V}$ ($\lambda = 736 \text{ nm}$) se při 77 K zvýší na $U^* = 2,16 \text{ V}$ ($\lambda = 572 \text{ nm}$). Podle výrobce dioda vyrobená z GaP svítí v oblasti $\lambda = 640 \text{ nm}$, viz obr. 2.

Na žluté diodě jsme za pokojové teploty naměřili $U^* = 1,89 \text{ V}$ ($\lambda = 654 \text{ nm}$), v kapalném dusíku $U^* = 3,32 \text{ V}$ ($\lambda = 372 \text{ nm}$). Výrobce udává složení materiálu diody AlInGaP a $\lambda = 592 \text{ nm}$, viz obr.3. Jak se při demonstraci můžete přesvědčit, v kapalném dusíku žlutá dioda září zeleným světlem, jak bychom mohli podle posunu charakteristiky očekávat.



obr.3

Na charakteristice zelené diody jsme za pokojové teploty naměřili $U^* = 1,92 \text{ V}$ ($\lambda = 645 \text{ nm}$). V kapalném dusíku však nebylo možné odečíst prahové napětí a charakteristika vykazovala oblast záporného dynamického odporu, přičemž napětí zpočátku rostlo až k $U = 11 \text{ V}$, viz obr. 4. Domníváme se, že tato neobvyklá charakteristika, kterou jsme pozorovali i na některých žlutých diodách, je vyvolána tím, že neměříme pouze napětí na přechodu p-n, nýbrž také na sériovém odporu polovodiče diody, který při 77 K silně vzrostl. Průchodem proudem se však materiál diody vnitřně ohřívá, poněvadž je plastem, do něhož je zalitý, od kapalného dusíku tepelně izolován a naměřené napětí s rostoucím proudem klesá. Tvar charakteristiky bezpochyby závisí na konstrukci diody. Překvapením je však změna barvy diody. V kapalném dusíku zelená dioda září žlutým světlem, tedy s delší vlnovou délkou v rozporu se změnou charakteristiky. Souvisí to zřejmě se složitějším charakterem nepřímých přechodů.



obr.4

Modrá dioda barvu světla při ochlazení v kapalném dusíku nemění. Bílé svítící diody jsou zpravidla konstruovány na základě modrých nebo ultrafialových diod překrytých vrstvou, která vybuzenou fluorescencí dává bílé světlo. V kapalném dusíku se charakter jejich světla nemění.

Světlo ultrafialové diody je dobře viditelné, protože její světelná charakteristika zasahuje do viditelné oblasti spektra a nezdá se, že by se jeho charakter při ochlazení změnil. Ozáříme-li však diodou fluoreskující materiál, například kuličku ze skla barveného uranovou solí, zjistíme, že ochlazená dioda již fluorescenci nevybudí. Vlnová délka jejího světla se tedy zřejmě prodloužila více do viditelné oblasti spektra. Práhové napětí odečtené z charakteristik při pokojové teplotě činí $U^* = 3,15 \text{ V}$ ($\lambda = 393 \text{ nm}$), přičemž výrobce udává $\lambda = 395 \text{ nm}$. Při teplotě 77 K lze odhadnout $U^* = 4,47 \text{ V}$ ($\lambda = 277 \text{ nm}$), což neodpovídá pozorované změně charakteru světla diody.

Je zřejmé, že k pochopení procesů, k nimž dochází při zářivé rekombinace v elektroluminiscenčních diodách, by bylo třeba provést systematictější studium a získat samotné čipy diod bez tepelně izolujícího plastového obalu.

Za inspiraci k uvedeným demonstracím vděčím Michaele Blažkové a Zdeňku Polákovi.

Literatura

- [1] Rotter M.: *Hrátky s kapalným dusíkem - dodatek*. In: Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 10. Ed.: Dvořák L. Prometheus Praha 2006. s. 170-174.
- [2] Mišek J., Kučera L., Kortán J.: *Polovodičové zdroje optického záření*. SNTL Praha, 1988.