

  
 Fakulta elektrotechnická      Katedra technologií a měření  
**KET/+MET**  
 10. přednáška  
**Etalonáž a měření elektrických veličin (I.)**  
 (pokračování)

10.      © Tůmová      1

## 16.2 Primární etalony el.veličin

- používají se etalony, jejichž hodnoty lze s vysokou přesností určit přímo z jejich konstrukčních parametrů
- označují se jako absolutní

- primární etalony el. napětí využívající **Josephsonův jev**
- primární etalony el. odporu využívající **kvantový Hallův jev**
- primární etalony kapacity realizované **na základě Thompson-Lampardova teorému**

10.      © Tůmová      2

### 16.2.1 Primární etalony el. napětí – Josephsonův jev

- r. 1962 Brian D. Josephson** (později Nobel.cena) teoreticky dokázal:
- kontaktem** tvořeným dvěma slabě vázanými supravodiči (mohou být např. oddělené izolační vrstvou silnou nm) **prochází ss  $I$** , aniž to má za následek vznik ss  $U$  mezi oběma supravodiči
- procházející proud nesmí překročit určitou kritickou hodnotu**

10.      © Tůmová      3

- po překročení této hodnoty proudu vznikne ss napětí** a zároveň začne procházet **st supraproud**, jehož kmitočet je

$$f = \frac{2e}{h} U$$

kde  $e$  ... náboj elektronu  
 $h$  ... Planckova konstanta

- od 1.1.1990** platí pro poměr  $2e/h$ , zvaný **Josephsonova konstanta**, konvenční hodnota

**$K_{J-90} = 483\,597,4 \text{ GHz/V}$  přesně**

10.      © Tůmová      4

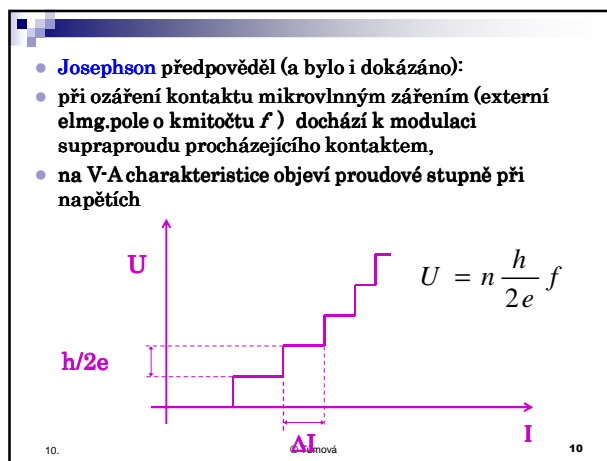
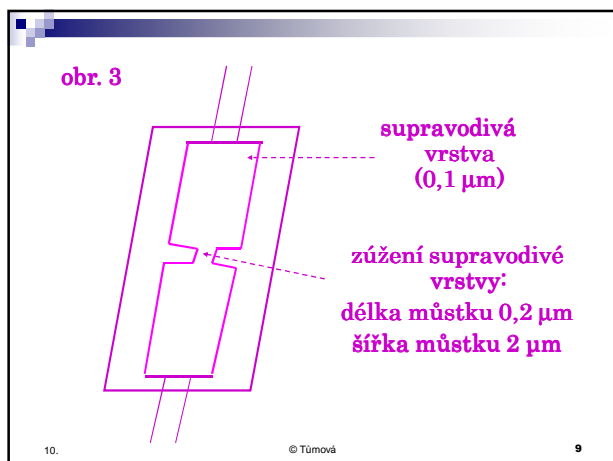
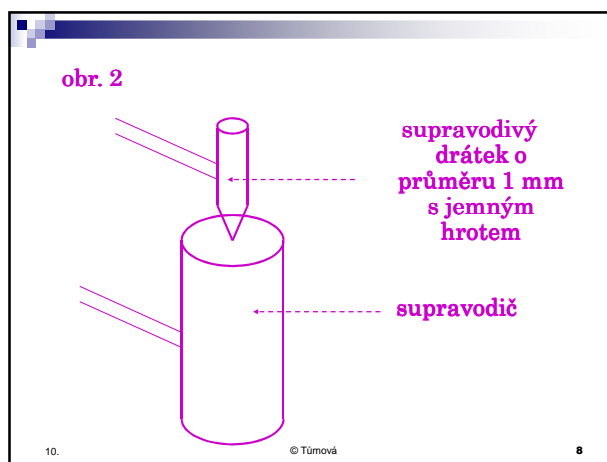
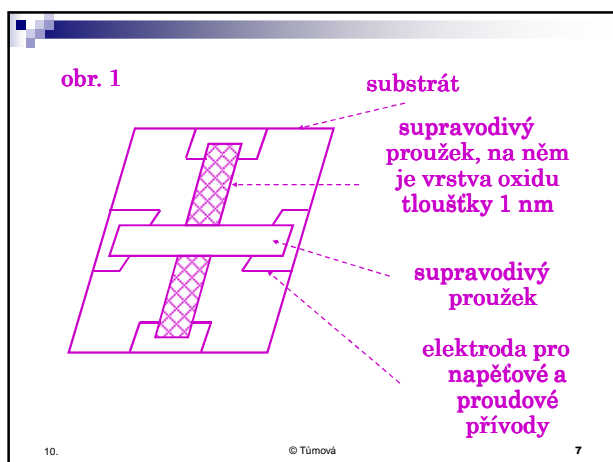
**uspořádání, která vykazují Josephsonův jev**

- Silná bariéra přechodu** mezi supravodiči: fáze párů jsou nezávislé
- Slabá bariéra přechodu**: páry začnou bariérou tunelovat
- Velmi nízká teplota – z některého kovu supravodič – vytvoří se tzv. Cooperovy páry (stejná vlnová frekvence a fáze – průchod kovovou mřížkou bez rozptylu)
- 3 základní jevy**:
- Ss J.jev**:
- ss  $I$**  pochází přes přechod bez vytvoření  $U$  na přechodu

10.      © Tůmová      5

- St. J.jev**:
- přivedením st  $U$  na přechod se vytvoří proudové oscilace, vznikne **převodník  $U - f$**
- Inverzní st. J.jev**:
- přivedením st  $I$  ( $I_{AC} \sin \omega t$ ) z externího elmg.pole na přechod se vytvoří ss  $U$  mezi supravodiči, vznikne **převodník  $f - U$**
- tunelový kontakt** – průchod proudu spočívá v tunelování elektronů (sdružených do Cooperových párů), viz obr. 1
- hrotový kontakt** – přítlak je nastaven mikrometrickým šroubem, viz obr. 2
- můstkový kontakt** – viz obr. 3

10.      © Tůmová      6



- **pozn.** ve směru  $I$  se „schody“ zkracují, ve směru  $U$  jsou konstantní
  - **šířka proudových stupňů** závisí na přiváděném mikrovlnném výkonu a na čísle stupně  $n$  (celé č.)
  - čím je  $n$  větší, tím je šířka stupně užší a je obtížnější udržet prac.bod na zvoleném stupni
  - **vyšší napětí** získáme řazením kontaktů do série
  - Kontakty tvoří **pole** (jediný zdroj pracovního proudu pro nastavení požadovaného napětí)
  - pole se vyrábějí litografickými technikami - mikrovlnné integrované obvody
10. © Tůmová 11

- **pozn.** : např. pro získání cca **12 V** je třeba **18 992 kontaktů**
  - **kmitočet  $f$**  musí být blízký rezonančnímu kmitočtu kontaktu
  - (tunelový spoj představuje rezonátor s rovnoběžnými odrazovými plochami) a bývá v řádu desítek GHz
  - Josephsonovy kontakty jsou **ideální převodník  $f \rightarrow U$**  s převodním činitelem rovným celistvému násobku poměru  **$h/2e$**
  - kmitočet  $f$  lze při využití kvantových etalonů kmitočtu měřit s nejistotou měření  $< 10^{-9}$  Hz
10. © Tůmová 12

### • Státní etalon ss elektrického napětí

- Od r. 1995 budován etalon na bázi Zenerových referencí
- Vyhlášen v r. 2000 o hodnotách 10, 1, a 1,018 V
- Nejistota  $u_C = \pm 5,0 \mu V$
- Nyní jako referenční etalony ss  $U$
- Od r. 2001 budován etalon na bázi Josephsonova jevu
- V r. 2013 vyhlášen jako státní etalon
- Porovnání napětí:
  - $(U_{CMI} - U_{BIML}) = +9,6 \text{ nV}$
- Nejistota  $u_C = 10,3 \text{ nV}$
- Pracovní teplota v kryogenní části = 4 K

10.

© Tůmová

13

## 16.2.2 Primární etalony el. odporu – kvantový Hallův jev

- r. 1980 Klaus von Klitzing –
- objevil, že Hallův jev lze pozorovat na tenkovrstvých polovodičových strukturách v silných mag. polích a při héliových (nizkých) teplotách
- využití v metrologii

10.

© Tůmová

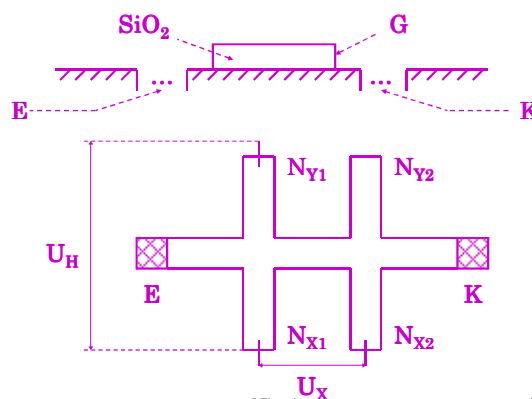
14

- struktury, které kvantový jev vykazují, lze použít jako **etalony odporu** s 4-vodičovým zapojením:
- jejich hodnoty nezávisí na rozměrech struktur ani na použitých materiálech,
- závisí jen na fyzikálních konstantách.
- Hallův jev je možné pozorovat na **MOSFET** (unipolární tranzistor s vodivým kanálem řízený polem)
- vyšetřování elektrických vlastností kanálu umožňují dva páry napěťových sond

10.

© Tůmová

15



10.

© Tůmová

16

- $U_H$  napětí mezi  $N_{Y1}$  a  $N_{X1}$ ,
- $U_X$  napětí mezi  $N_{X1}$  a  $N_{X2}$

- **Hallův odpor struktury  $R_H$**

$$R_H = \frac{U_H}{I}$$

- podélný odpor  $R_X$

$$R_X = \frac{U_X}{I}$$

kde  $I$  ... proud tvořený kanálem mezi E a K

10.

© Tůmová

17

- u křemíkových MOSFET tranzistorů při  $t < 0,5 \text{ K}$  a  $B > 10 \text{ T}$

lze dosáhnout bezeztrátového stavu  
 $U_X = 0$ ,  $R_X = 0$ , ale  $R_H$  nulový není!

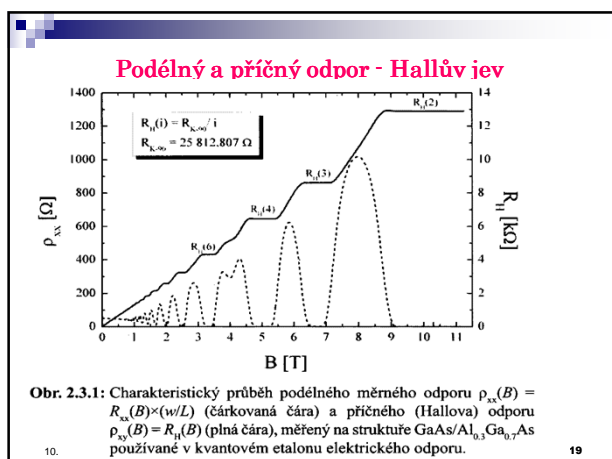
experimentálně bylo zjištěno, že  $R_H$  v tomto případě nabývá některou z hodnot:

- $R_H(1) = 25\,812,8 \Omega$
  - $R_H(2) = 12\,906,4 \Omega$
  - $R_H(3) = 8\,604,3 \Omega$
  - $R_H(4) = 6\,453,2 \Omega$
- $R_H(i) = R_H(1) / i$

10.

© Tůmová

18



- velmi přesná měření odporů prokázala, že platí
 
$$iR_H(i) = konst$$
 kde  $i = 1, 2, 3, \dots$
- uvedený součin = **von Klitzingova konstanta** a má hodnotu
 
$$R_K = iR_H(i) = \frac{h}{e^2}$$
 kde  $e$  ... náboj elektronu  
 $h$  ... Planckova konstanta

- od 1.1.1990 se používá **Klitzingova konstanta**

$$R_{K-90} = 25\,812,807\,\Omega$$
- **nevýhody MOSFETŮ:**  
neumožňují používat větší proudy a napětí,
- proto se pro využití tohoto jevu používají tzv. **heterostruktury** - řada výhod:
  - nepotřebují tak vysoké řídicí napětí,
  - hodnotu odporu  $R_x$  (která je úměrná  $mg$  poli) lze získat už při:  $T < 1,5\,K$  a  $B > 6\,T$

**uspořádání, která vykazují Hallův jev**

Obr. 2.3.2: Typický tvar struktur typu Hallova proužku. Proudové kontakty zaujímají celou šířku vodivého kanálu, 3 páry napěťových kontaktů podél hran jsou s kanálem spojeny tenkými krčky. Pozlacené kontaktové plošky slouží k přibodování přívodů a mají zaručit malé a stabilní kontaktní odpory. Tvar vzorku je definován selektivním chemickým odleptáním vrchních vrstev polovodičové struktury GaAs/AlGaAs, připravené moderními technikami epitaxního růstu (MBE nebo MOVPE).

- **Státní etalon ss elektrického odporu na bázi KHJ**
- Od r. 2003 budován etalon na bázi KHJ
- Vyhlášen v r. 2008 o hodnotách 1Ω, 100 Ω a 10kΩ
- Nejistota s  $k = 2$  (0,06 ppm; 0,03 ppm; 0,06 ppm)
- V r. 2008 vyhlášen jako státní etalon
- Sestava:
  - Měřicí systém s kryostatem se supravodivým magnetem s polovodičovou (kvantovou) strukturou a kryogenním proudovým komparátorem
  - Automatický poměrový odporový most a soubor klasických etalonů ss el.odporu stejných jmen.hodnot

### 16.2.3 Primární etalony kapacity – Thompson-Lampardův teorém

- cca do 60. let 20. století se jako **primární etalony el. impedance** používaly téměř výhradně etalony vlastních  $L$  nebo vzájemných  $M$  indukčností
- přednost etalonům vzájemné indukčnosti  $M$ , ale její přesné stanovení je velmi obtížné

- v r. 1955 objev Thompsonova-Lampardova teorému – nové možnosti v metrologii:
- na jeho základě lze realizovat kapacitní etalony, u nichž lze změnou aktivní délky elektrod dosáhnout přesně známých změn kapacity  $C$
- k výpočtu změn slouží pouze permitivita vakua a změna jediného rozměru - aktivní délky elektrod

Vztah pro kapacity (na jednotku délky) mezi protějšími elementy, umístěnými ve vakuu na obr. 2.2.1. platí i pro uspořádání na obr. 2.2.2

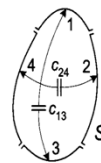
- měření vzdálenosti interferometrem

10.

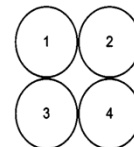
© Tůmová

25

$$\exp\left(-\frac{\pi}{\epsilon_0} c_{13}\right) + \exp\left(-\frac{\pi}{\epsilon_0} c_{24}\right) = 1. \quad (2.2.1)$$



Obr. 2.2.1: Příčný řez válcovým kondenzátorem

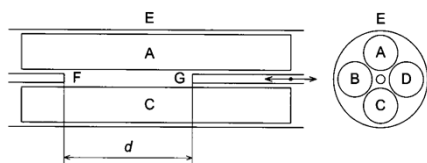


Obr. 2.2.2: Příčný řez křížovým kondenzátorem

10.

© Tůmová

26



Obr. 2.2.3: Etalon na bázi Thompsonova-Lampardova teorému

A, B, C, D ... hlavní elektrody ve tvaru kruhových válců  
F, G stínící elektrody (na stejném potenciálu jako stínící kryt)

Posouváním G elektrody se mění délka úseku  $d$ , kde nejsou elektrody odstíněny, tím se mění kapacity  $C(AC)$  popř.  $C(BD)$

10.

© Tůmová

27

## 16.3 Metrologický trojúhelník a kvantové etalony

- v současné době se využívá: Josephsonův jev pro napětí a kvantový Hallův jev pro odpor
- měřené veličiny jsou nezávislé na nestabilitě vnějších podmínek a parametrech vzorků
- jsou definovány pouze na základě fundament. konstant: hodnoty náboje elektronu  $e$  a Planckovy konstanty  $h$

10.

© Tůmová

28

- **Elektronový turniket**
- (součástka, která dovolí kontrolovaně propouštět jednotlivé elektrony) - umožní realizaci etalonu elektrického proudu  $I$  definovaného jako součin náboje elektronu  $e$  a frekvence propouštění  $f_p$

$$I = e \cdot f_p$$

- vznikne tak možnost realizace tří nezávislých veličin, které jsou svázány Ohmovým zákonem
- první, kdo upozornil na možnost realizace proudového etalonu řízeného frekvencí jedoelektronového tunelování - K. K. Likharev v r. 1988

10.

© Tůmová

29

- **metrologický trojúhelník** ukazuje, že existující etalony by se daly kombinovat s etalonem proudu pouze pomocí fundamentálních konstant

- ověření vzájemných vztahů vyžaduje dosáhnout realizaci etalonu proudu řádově stejné standardní odchylky jako u etalonů napětí a odporů

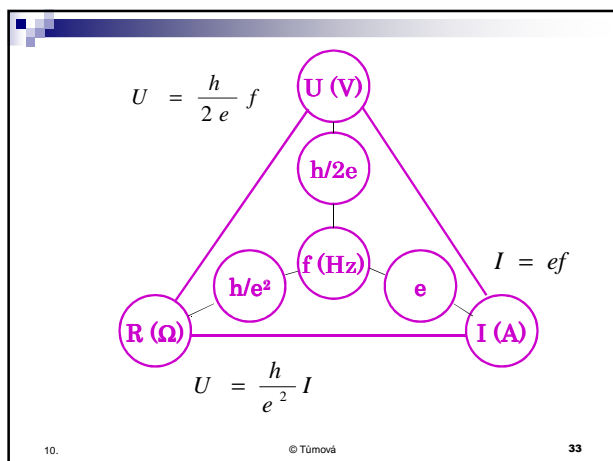
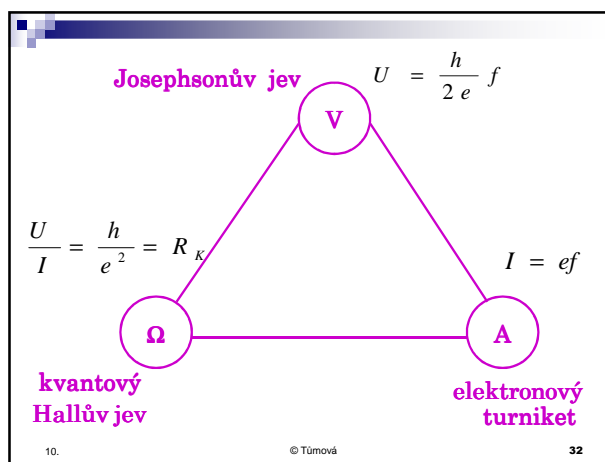
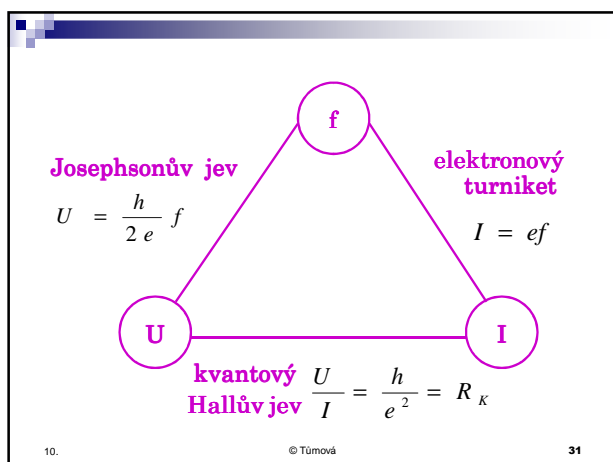
- Následující 3 trojúhelníky vyjadřují:

1. vztahy mezi  $U$ ,  $I$  a  $f$
2. vztahy mezi  $U$ ,  $I$  a  $R$
3. vztahy mezi veličinami a fundamentálními konstantami

10.

© Tůmová

30



## 16.4 Sekundární etalony

### 16.4.1 Etalony el. napětí

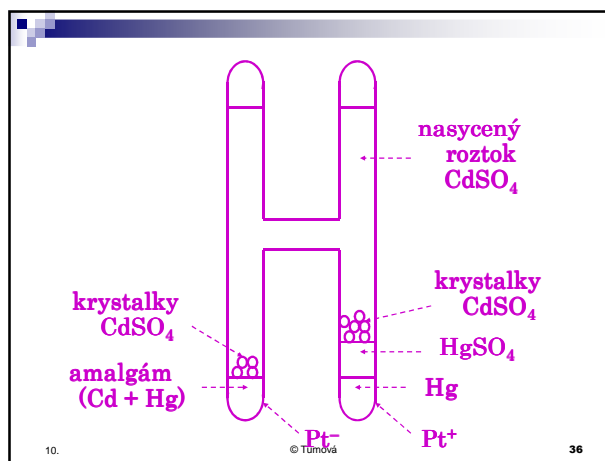
- sekundární etalony elektrického napětí - používají se elektrochemické články navržené E. Westonom v r. 1892
- **Westonův článek** se používá pro svou snadnou výrobitelnost a relativní časovou stálost
- Je snadno použitelný jako skupinový etalon

10. © Tůmová 34

### Westonův článek s nasyceným elektrolytem

- dlouhodobá stabilita napětí
- značný teplotní koeficient napětí:  $-4 \cdot 10^{-5} \text{ V/K}$
- (s rostoucí teplotou klesá napětí článku)
- nejvyšší povolená provozní teplota =  $40^\circ\text{C}$
- citlivý na otřesy při manipulaci: v současné době se vyrábí klopná provedení, ta lze bez nebezpečí přepravovat
- vnitřní odpor  $R_i = 500 - 1000 \Omega$  při  $t = 25^\circ\text{C}$
- průměrné napětí naprázdno při  $20^\circ\text{C}$   $U = 1,018\,66 \text{ V}$

10. © Tůmová 35



Westonův člunek s nenasyceným elektrolytem

- menší stabilita  $U(t)$
- napětí naprázdno různých nenasycených i nasycených článků mají zpravidla různou velikost v řádech  $\mu\text{V}$ ; jednotlivé články se mohou lišit až o 5 mV
- napětí nového etalonového článku se obvykle výrazně mění s časem (k jeho ustálení dochází až po uplynutí delší doby)
- menší teplotní koeficient:  $-1 \cdot 10^{-5} \text{ V/K}$  (hodnota závisí na teplotě a koncentraci elektrolytu, roste se stárnutím článku)
- méně citlivé na ořesy

10.

© Tůmová

37

- u nenasyceného článku je napětí asi o 0,05 % vyšší než u nasyceného článku
- vnitřní odpor  $R_i = 100 - 500 \Omega$  při  $t = 25^\circ\text{C}$
- napětí naprázdno nenasycených článků klesá trvale o 20 - 40 mV/rok, články s  $U < 1,01830 \text{ V}$  je vhodné vyřadit z užívání!
- zkratováním se článek ničí, pokud se nepoužívá, musí být odpojen!
- článek úplně zamrzá při  $t = -24^\circ\text{C}$  (napětí klesne cca na 1,007 V)

10.

© Tůmová

38

- Westonovy články
- 1. jsou citlivé na rozdíl teplot svých pólů
- 2. u článků je **hystereze**:
- např. při prudkém **ochlazení** článku
- jeho  $U$  nejprve nabude hodnoty podstatně vyšší, než je ustálená hodnota odpovídající nové teplotě,
- a pak se zvolna přiblíží k nové ustálené hodnotě, která je vyšší než původní
- Při prudkém **ohřátí** naopak....

10.

© Tůmová

39

- u **nenasycených článků** velikost **hystereze** i čas potřebný k ustálení napětí na nové hodnotě závisí na: jejich konstrukci, stáří, kyselosti elektrolytu a jeho koncentraci, čistotě použitých materiálů a velikosti teplotní změny
- **hystereze nasycených článků** je menší než u článků nenasycených

10.

© Tůmová

40

- v současné době jsou Westonovy články nahrazovány **polovodičovými napěťovými etalony** (větší hodnota trvalého odběrového proudu)
- používá se **referenční modul se Zenerovou diodou** nebo sadou Zenerových diod umístěný na čipu s diodou pro tepelnou kompenzaci, teplotním čidlem a topným elementem pro udržování konstanty čipu
- nejlepší stabilitu má výstupní napětí získané průměrováním ( $3 \cdot 10^{-5} \% / 30 \text{ dní}$ ,  $1 \cdot 10^{-4} / 1 \text{ rok}$ )

10.

© Tůmová

41

## Konec 10.přednášky

DĚKUJI  
ZA  
POZORNOST

10.

© Tůmová

42