

Mikrovlnná technika

Časť 1:

Zdroje mikrovlnných signálov

Vysokovýkonové vysokofrekvenčné systémy

Daniel Valúch

Dept. AB, Radio-Frequency group

CERN, Geneva, Switzerland

daniel.valuch@cern.ch

Obsah prednášky – prvá časť

Zdroje mikrovlnných signálov






- Polovodičové zdroje a zosilňovače
- Triódy, tetródy
- Elektrónky s postupnou vlnou
- Klystróny , karcinotróny, magnetróny

Vysokovýkonové vysokofrekvenčné systémy

- Koaxiálne a vlnovodné vedenia pre multi-megawattové systémy
- Výkonové feritové komponenty

Zdroje mikrovlnných signálov

Základné rozdelenie

- Polovodičové 
- Impulzné 
- Oscilátory 
- Úzkopásmové 
- Pevné 
- Elektrónky
- S kontinuálnou vlnou
- Zosilňovače
- Širokopásmové
- Preladiteľné

Zdroje mikrovlnných signálov – polovodiče

- Frekvenčný rozsah jednotky GHz až jednotky THz
- Kontinuálne výkony mW až W, impulzné jednotky kW
- Materiály napríklad GaAs, GaN, SiC

- V princípe všetky polovodičové generátory mikrovlnných signálov pracujú s vysokými intenzitami elektrického poľa na hranici prierazu štruktúry.
- Využíva sa oblasť negatívneho odporu na VA-charakteristike
- Diódy produkujú prúdové impulzy v mikrovlnnej oblasti

- Vybavené vhodným externým rezonátorom predstavujú mikrovlnný oscilátor s definovateľnou frekvenciou

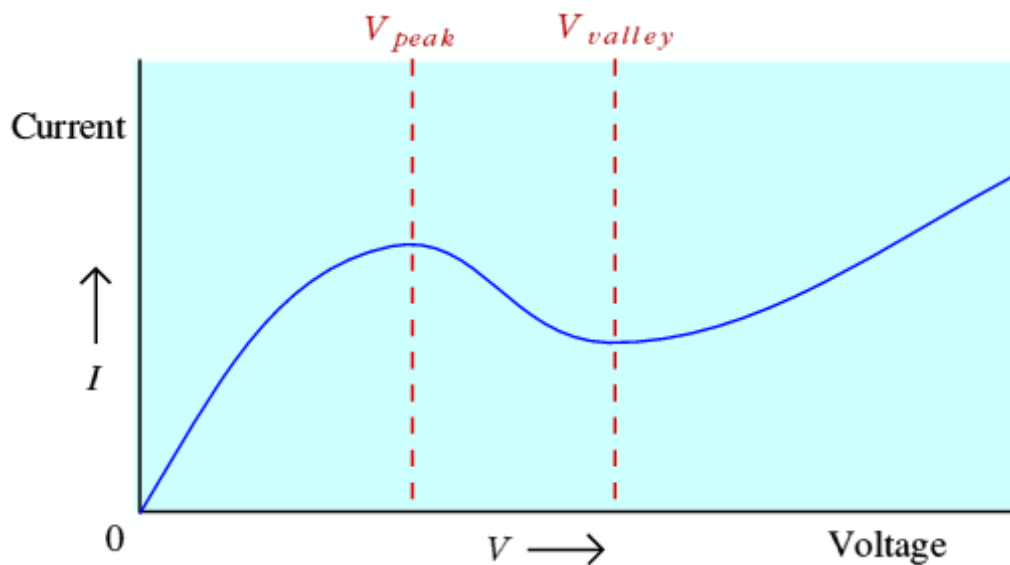
Zdroje mikrovlnných signálov – polovodiče

Diódy používané ako mikrovlnné oscilátory:

- Gunnove diódy
- Tunelové diódy
- IMPATT – IMPact Avalanche Transit Time diode
- BARITT – Barrier Injection Transit Time diode
- TRAPATT – Trapped Plasma Avalanche-Triggered Transit diode
- DOVATT – Double-Velocity Avalanche Transit-Time diode
- QWITT – Quantum Well Injection Transit Time diode
- TUNETT –
- Read diode

Zdroje mikrovlnných signálov – Gunnova dióda

- Vynájdená v roku 1963 J. Gunn-om, ktorý pozoroval mikrovlnnú nestabilitu prúdu GaAs kryštálom (Cyril Hilsum-Ridley-Watkins efekt)
- Využíva sa oblasť negatívneho odporu na VA-charakteristike
- Gunnova dióda je zdroj impulzného vysokofrekvenčného prúdu nie presne definovanej frekvencie, preto sa vždy vkladá do mikrovlnného rezonátora (vlnovodný, koaxiálny, dielektrický, YIG...)
- Ladenie frekvencie podľa typu použitého rezonátora (mechanické, elektrické)



Gunn diode

From Wikipedia, the free encyclopedia

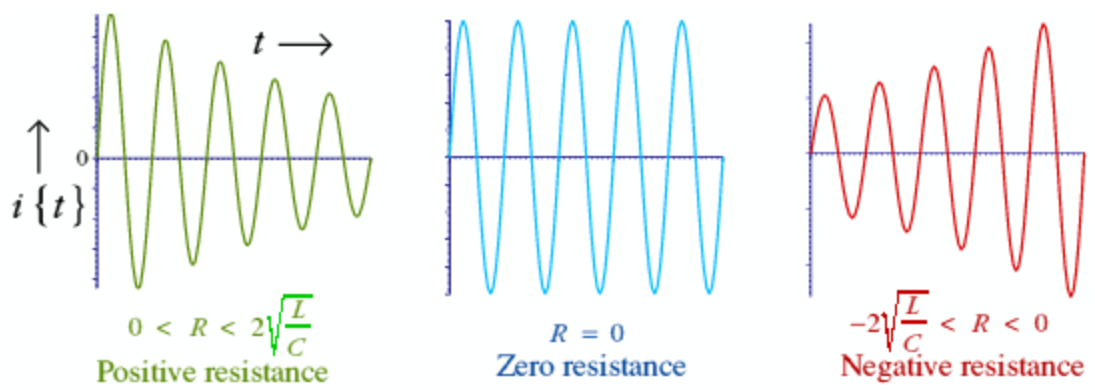
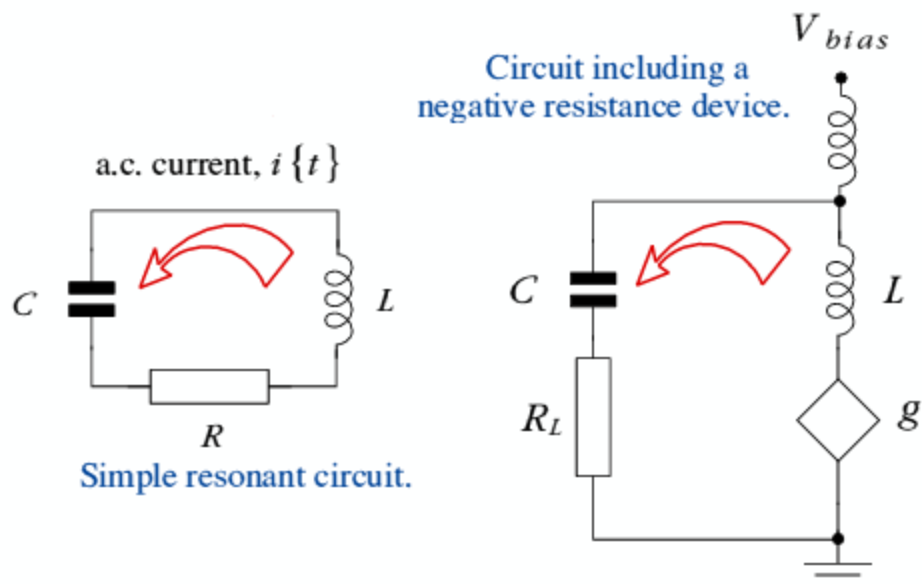
A Gunn diode, also known as a transferred electron device (TED), is a form of diode used in high-frequency electronics. It is somewhat unusual in that it consists only of N-doped semiconductor material, whereas most diodes consist of both P and N-doped regions. In the Gunn diode, three regions exist: two of them are heavily N-doped on each terminal, with a thin layer of lightly doped material in between. When a voltage is applied to the device, the electrical gradient will be largest across the thin middle layer. Eventually, this layer starts to conduct, reducing the gradient across it, preventing further conduction. In practice, this means a Gunn diode has a region of negative differential resistance.

The negative differential resistance, combined with the timing properties of the intermediate layer, allows construction of an RF relaxation oscillator simply by applying a suitable direct current through the device. The oscillation frequency is determined partly by the properties of the thin middle layer, but can be adjusted by external factors. Gunn diodes are therefore used to build oscillators in the 10 GHz and higher (THz) frequency range, where a resonant cavity is usually added to control frequency. The resonator can be based on a waveguide, coaxial cavity, YIG resonator, etc. Tuning is done mechanically, by adjusting the parameters of the resonator, or in case of YIG resonators by electric current.

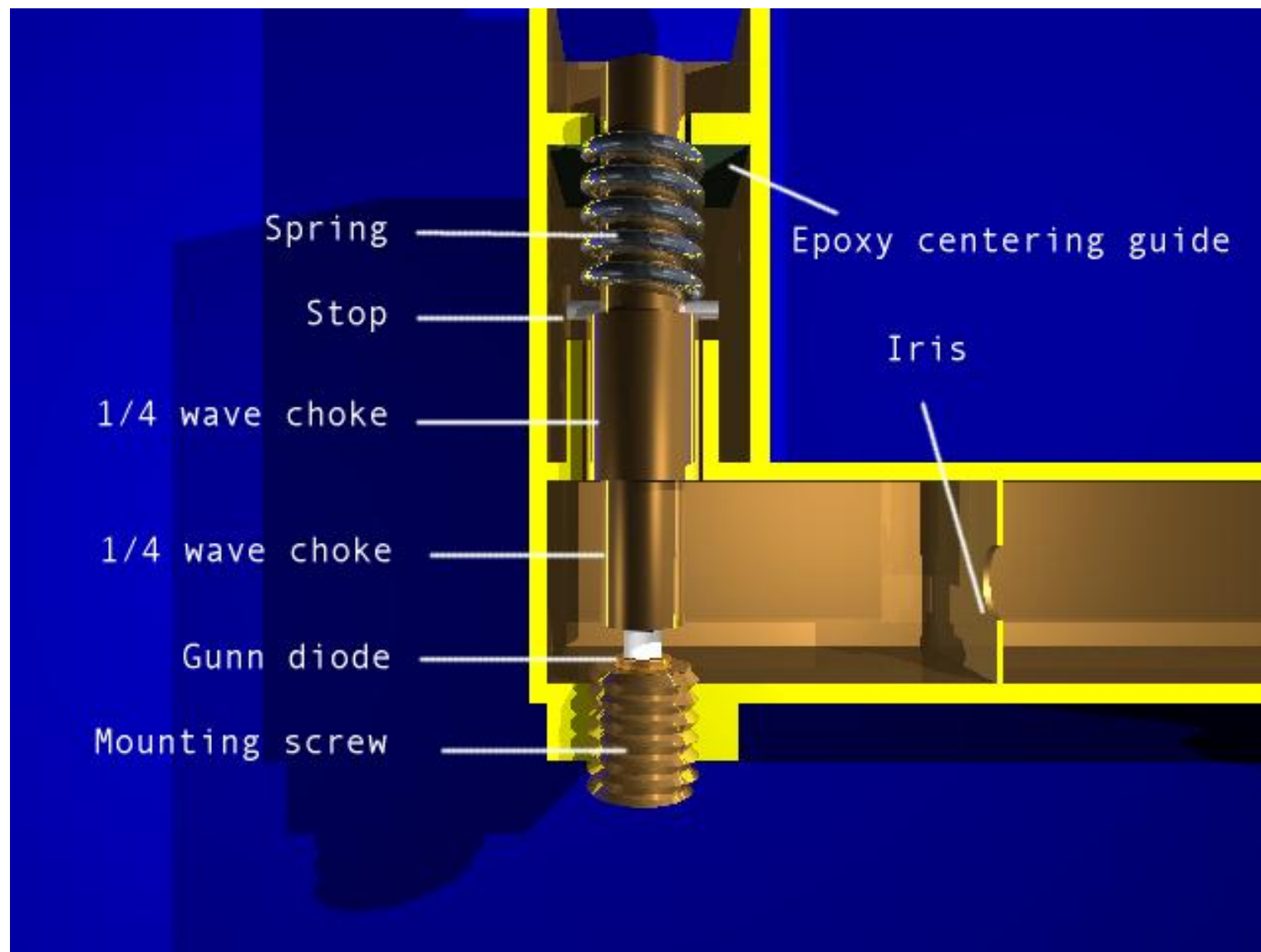
Gallium arsenide Gunn diodes are made for frequencies up to 200 GHz, gallium nitride materials can reach up to 3 terahertz.

The Gunn diode is named for the physicist J.B. Gunn who, in 1963, produced the first device based upon the theoretical calculations of Cyril Hilsum.

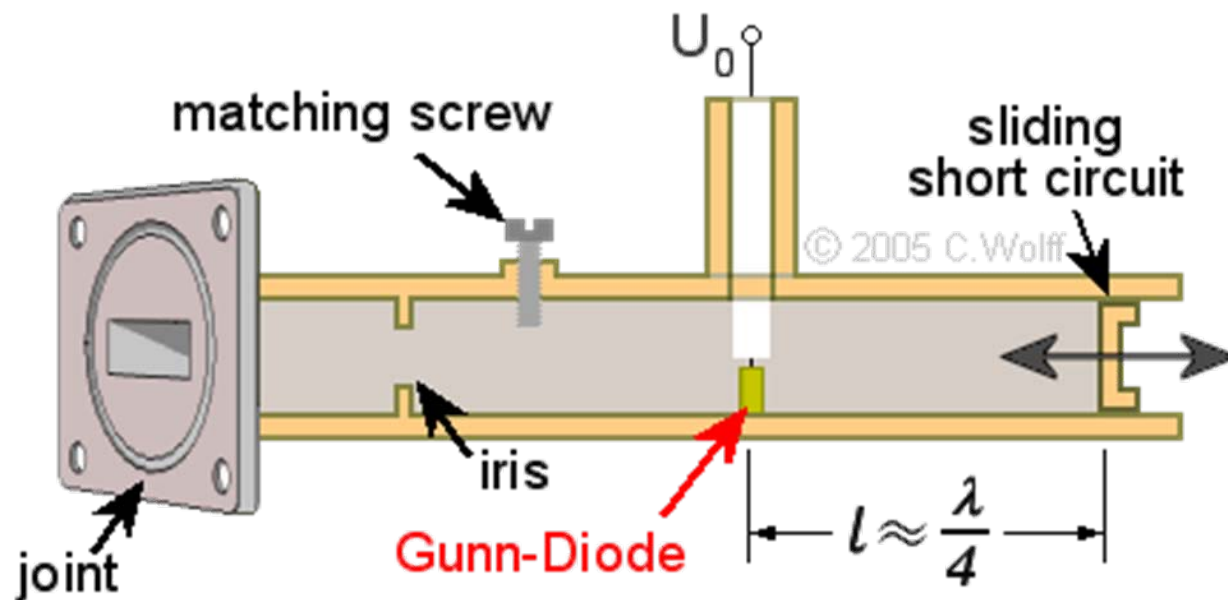
Zdroje mikrovlnných signálov – Gunnova dióda



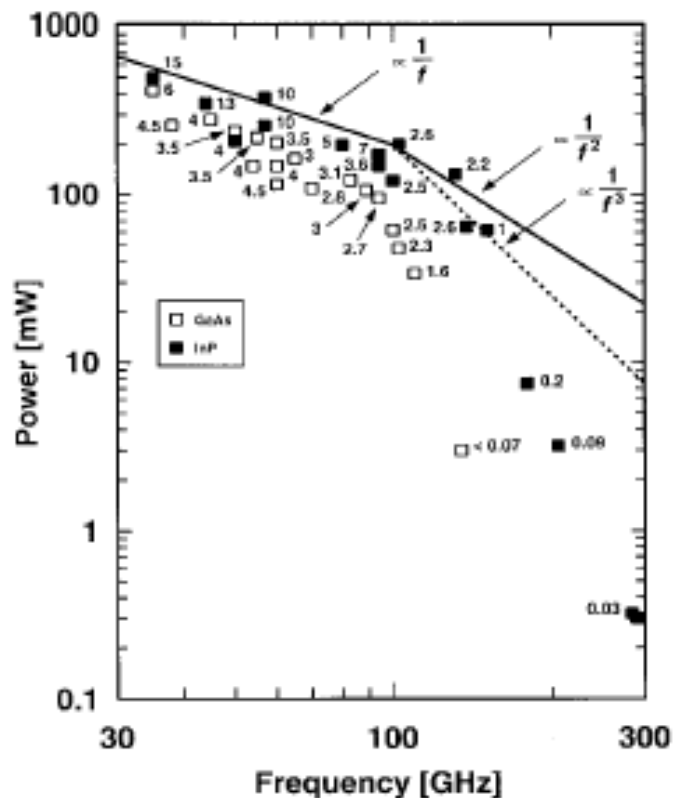
Zdroje mikrovlnných signálov – Gunnova dióda



Zdroje mikrovlnných signálov – Gunnova dióda



Zdroje mikrovlnných signálov – Gunnova dióda



Picture: Gayatri Eadara: GaN GUNN DIODE OSCILLATORS



Publikované výsledky (2005) „state-of-the-art“ GaAs a InP Gunnových diód pracujúcich v kontinuálnom móde. Frekvenčný rozsah 30-400 GHz. Číslo vedľa značky ukazuje účinnosť prevodu DC->RF v percentách.

Zdroje mikrovlnných signálov – IMPATT dióda

- **IMPact Avalanche Transit Time diode**
- Skupina diód využívajúca kvantové javy na hranici prierazu
- Frekvencie typicky stovky GHz
- V porovnaní s ostatnými polovodičmi poskytuje pomerne vysoké výkony
- K funkcii potrebuje externý ladený rezonátor
- Vyžaduje vyššie záverné napätie (100V)
- Nedostatok vysoký fázový šum (lavínové procesy v blízkosti prierazu)

IMPATT diode

From Wikipedia, the free encyclopedia

An IMPATT diode (IMPact ionization Avalanche Transit-Time) is a form of high power diode used in high-frequency electronics and microwave devices. They are typically made with silicon carbide owing to their high breakdown fields.

They operate at frequencies between about 3 and 100 GHz or more. A main advantage is their high power capability. These diodes are used in a variety of applications from low power radar systems to alarms. A major drawback of using IMPATT diodes is the high level of phase noise they generate. This results from the statistical nature of the avalanche process. Nevertheless these diodes make excellent microwave generators for many applications.

Device structure

The IMPATT diode family includes many different junctions and metal semiconductor devices. The first IMPATT oscillation was obtained from a simple silicon p-n junction diode biased into a reverse avalanche break down and mounted in a microwave cavity. Because of the strong dependence of the ionization coefficient on the electric field, most of the electron-hole pairs are generated in the high field region. The generated electron immediately moves into the region, while the generated holes drift across the p region. The time required for the hole to reach the contact constitutes the transit time delay.

The original proposal for a microwave device of the IMPATT type was made by Read and involved a structure. The Read diode consists of two regions as illustrated in figure. (i) The Avalanche region (p_1 – region with relatively high doping and high field, E_1), in which avalanche multiplication occurs and (ii) the drift region (p_2 – region with essentially intrinsic doping and constant field, E_2), in which the generated holes drift towards the - contact. Of course, a similar device can be built with the configuration, in which electrons generated from the avalanche multiplication drift through the intrinsic region.

A fabricated IMPATT diode generally is mounted in a micro wave package. The diode is mounted with its high – field region close to the Copper heat sink so that the heat generated at the junction can be conducted away readily. Similar microwave packages are used to house other microwave devices.

Principle of operation

At breakdown, the n – region is punched through and forms the avalanche region of the diode. The high resistivity i – region is the drift zone through which the avalanche generated electrons move toward the anode.

Now consider a dc bias V_B , just short of that required to cause breakdown, applied to the diode in the figure. Let an ac voltage of sufficiently large magnitude be superimposed on the dc bias, such that during the positive cycle of the ac voltage, the diode is driven deep into the avalanche breakdown. At $t=0$, the ac voltage is zero, and only a small pre-breakdown current flows through the diode. As t increases, the voltage goes above the breakdown voltage and secondary electron-hole pairs are produced by impact ionization. As long as the field in the avalanche region is maintain above the breakdown field E_c , the electron-hole concentration grow exponentially with t . Similarly this concentration decay exponentially with time when the field is reduced below at the negative swing of the ac voltage. The holes generated in the avalanche region disappear in the $p+$ region and are collected by the cathode. The electrons are injected into the i – zone where they drift toward the $n+$ region. Then, the field in the avalanche region reaches its maximum value and the population of the electron-hole pairs starts building up. At this time, the ionization coefficients have their maximum values. Although follow the electric field instantaneously the generated electron concentration does not because it also depends on the number of electron-hole pairs already present in the avalanche region. Hence, the electron concentration at will have a small value. Even after the field has passed its maximum value, the electron-hole concentration continues to grow because the secondary carrier generation rate still remains above its average value. For this reason, the electron concentration in the avalanche region attains its maximum value at t_1 , when the field has dropped to its average value. Thus, it is clear that the avalanche region introduces a 90° phase shift between the ac signal and the electron concentration in this region.

With a further increase in t , the ac voltage becomes negative, and the field in the avalanche region drops below its critical value. The electrons in the avalanche region are then injected into the drift zone which induces a current in the external circuit which has a phase opposite to that of the ac voltage. The ac field, therefore, absorbs energy from the drifting electrons as they are decelerated by the decreasing field. It is clear that an ideal phase shift between the diode current and the ac signal is achieved if the thickness of the drift zone is such that the bunch of electron is collected at the $n+$ - anode at when the ac voltage goes to zero. This condition is achieved by making the length of the drift region equal to the wavelength of the signal. This situation produces an additional phase shift of 90° between the ac voltage and the diode current. The waveforms of the ac voltage, they injected electron charge, and the current induced in the external circuit.

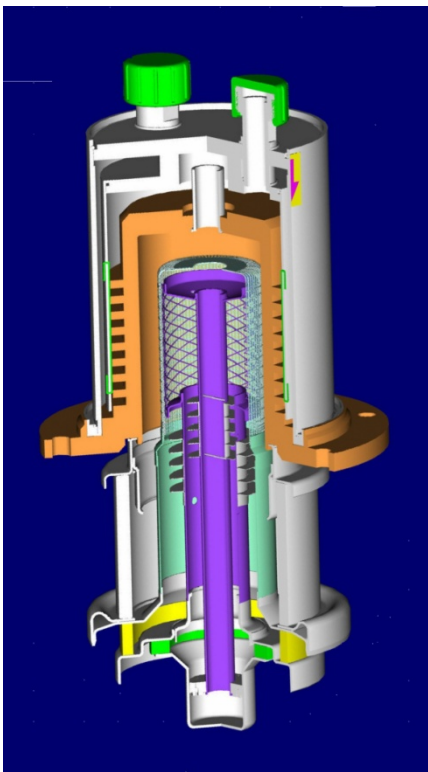
Zdroje mikrovlnných signálov – elektrónky

- Elektrónky s mriežkou (gridded tubes)
 - Trióda, tetróda, diakróda, klystróda (IOT)
- Klystróny
 - Elektrónky s rýchlostnou moduláciou elektrónového zväzku
 - Klystrón, reflexný klystrón
- Elektrónky s postupnou vlnou (travelling wave tubes, permaktrón)
 - So špirálovou štruktúrou, s viazanými dutinami
- Elektrónky s prekríženým poľom (crossed-field tubes)
 - Magnetrón, karcinotrón
- Elektrónky s rýchlou vlnou (fast wave tubes)
 - Peniotron, Gyrotron, Ubitron

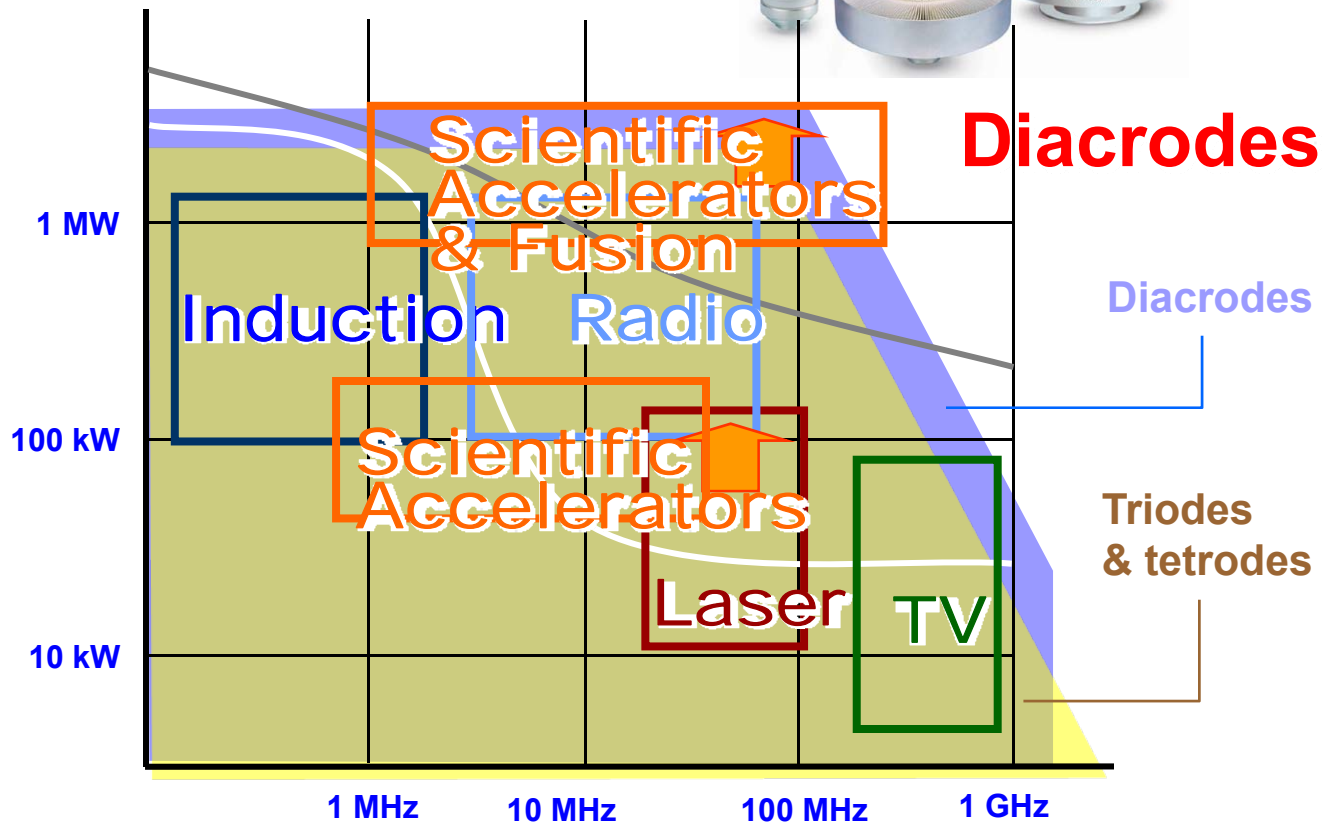
A. S. Gilmour, Jr.: Microwave tubes. Artech House 1986. ISBN 0-89006-181-5

Electron device evolution – Triodes & Tetrodes

Zdroj: Michel Caplot – New generations of RF amplifiers: from gridded tubes to dual technology solutions. CWRFO8 workshop, CERN, Geneva 2008



Triodes & Tetrodes



Zdroje mikrovlnných signálov – tetródy



Zdroje mikrovlnných signálov – tetródy

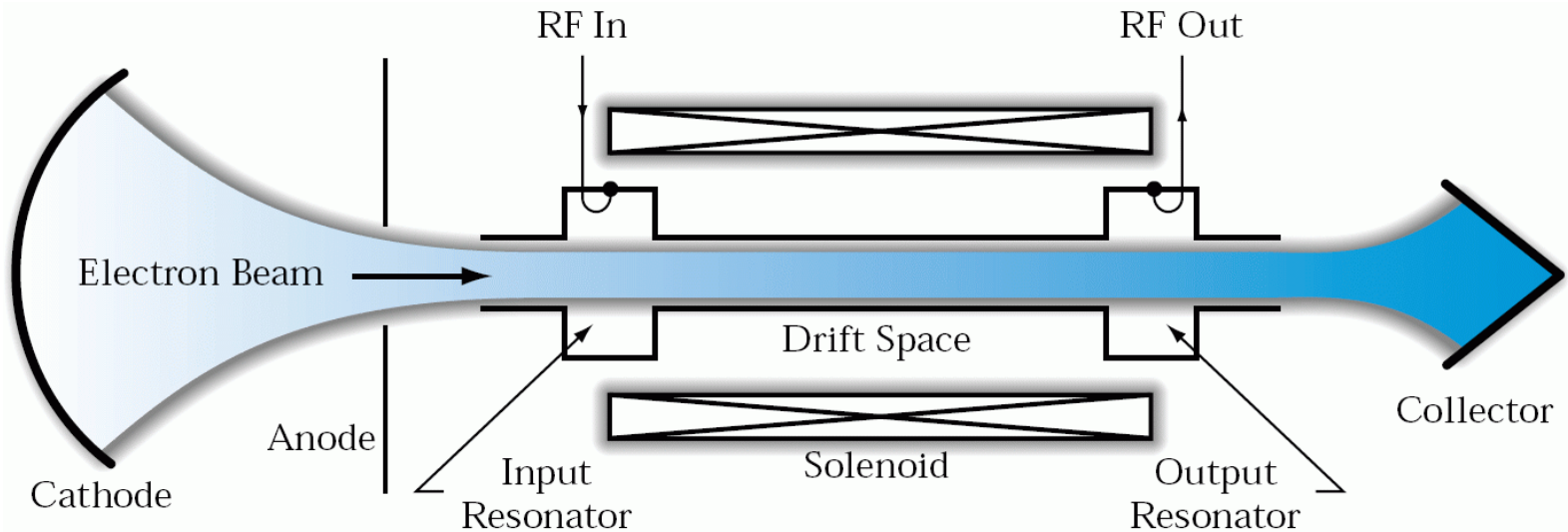


Zdroje mikrovlnných signálov – tetródy

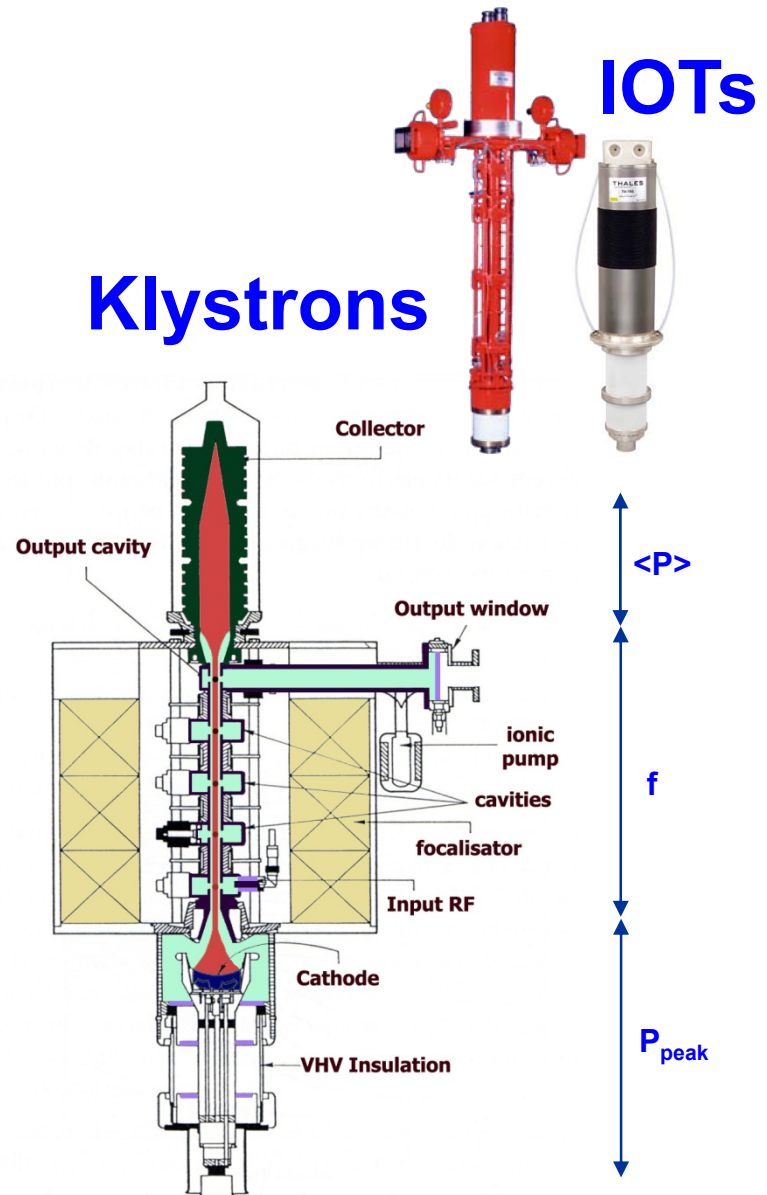
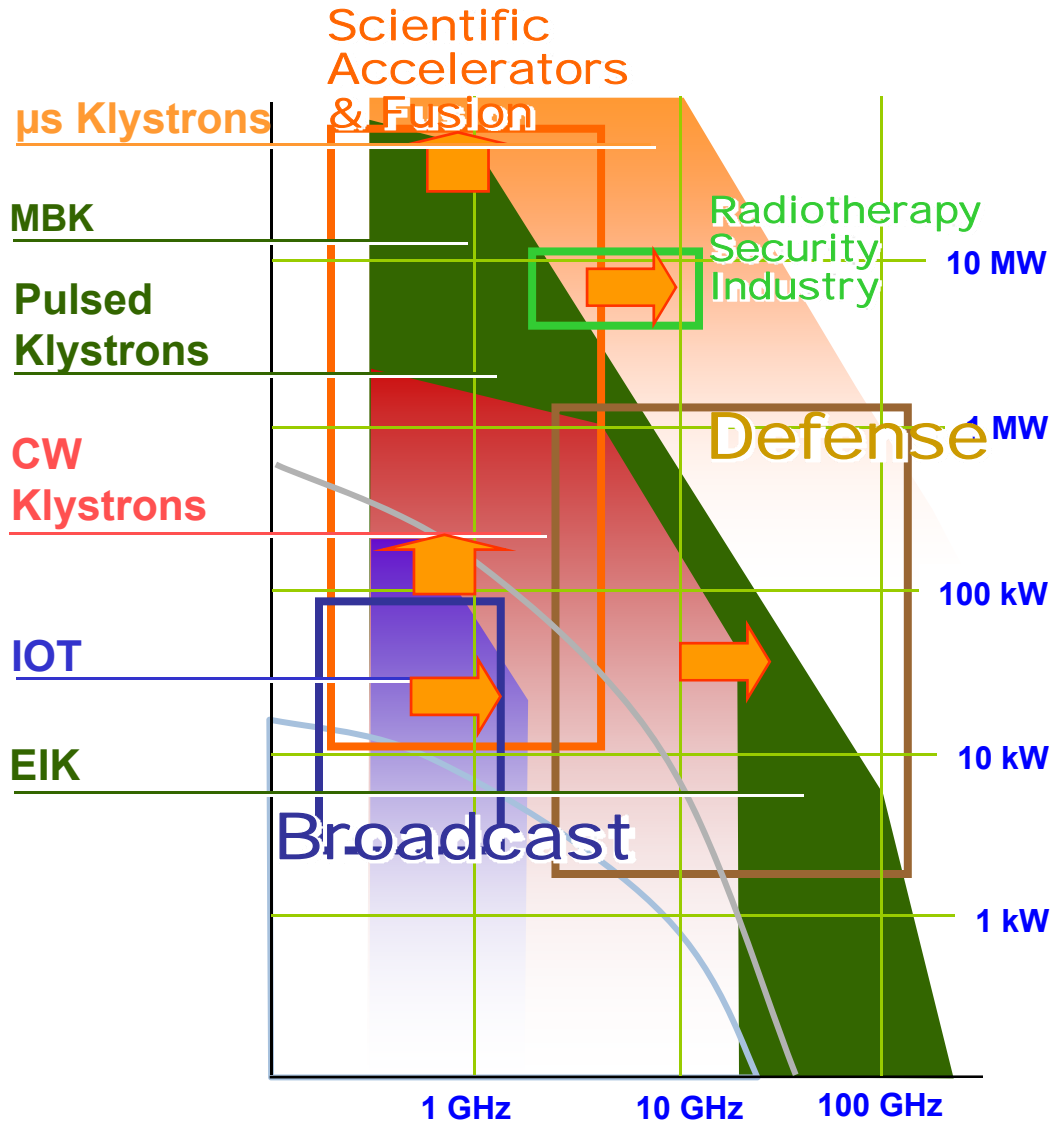


Zdroje mikrovlnných signálov – klystrón

- Elektrónka, ktorá využíva princíp rýchlostnej modulácie elektrónového zväzku
- Vyvinutá druhej polovici 30-tych rokov 20. storočia
- Výkony kontinuálne: jednotky kW až jednotky MW, impulzné: stovky MW
- Frekvencie: stovky MHz až desiatky GHz

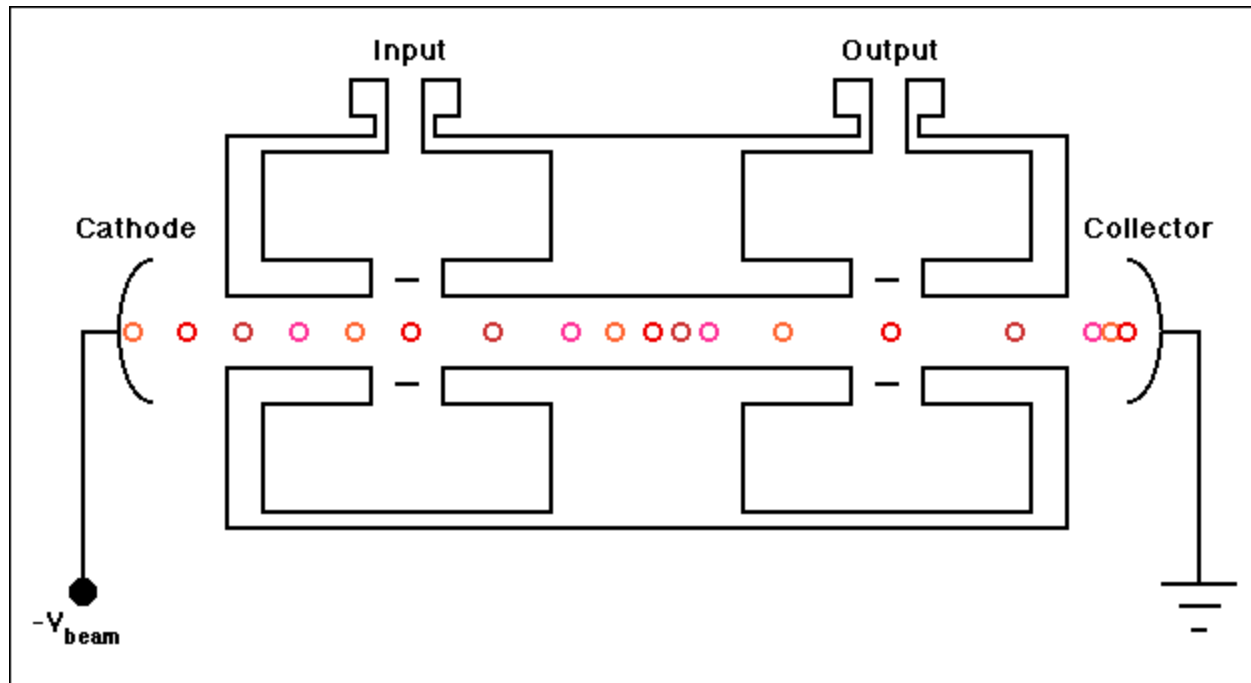


Electron device evolution - Klystrons & IOTs



Zdroj: Michel Caplot – New generations of RF amplifiers: from gridded tubes to dual technology solutions. CWR08 workshop, CERN, Geneva 2008

Zdroje mikrovlnných signálov – klystrón



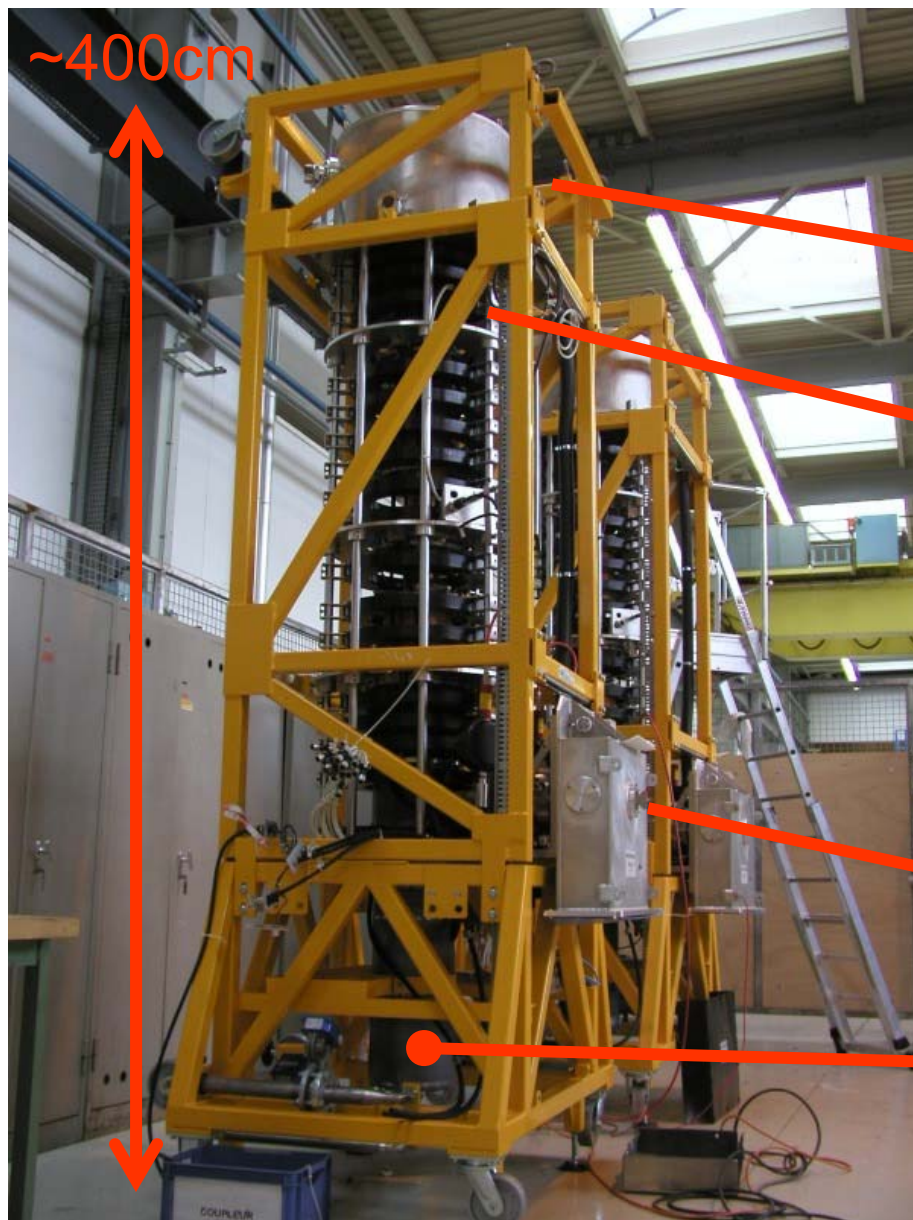
Zdroje mikrovlnných signálov – klystrón

- Rezonančné dutiny
 - Interné: dutiny sú nedeliteľnou súčasťou štruktúry elektrónky. Sú vystavené plnému vákuu a sú v priamom kontakte s elektrónovým zväzkom. Najčastejšie výkonové klystróny s úzkym frekvenčným pásmom.
 - Externé: vákuová časť obsahuje keramické „okná“ transparentné pre VF signál, kde sa z vonku nasadia externé rezonančné dutiny. Široký rozsah ladenia frekvencie, menej výkonné klystróny pre univerzálne aplikácie (TV vysielacie)
- Počet rezonančných dutín určuje šírku pásma, zisk, účinnosť, skupinové oneskorenie klystrónu
 - Bežné klystróny majú 2 až 7 dutín
 - Viac dutín, vyššie Q: vysoký zisk, účinnosť, skupinové oneskorenie. Malá šírka pásma
 - Menej dutín, nižšie Q, vhodné ladenie: veľká šírka pásma, nízke skupinové oneskorenie, malý zisk

Zdroje mikrovlnných signálov – klystrón

- Fázový šum klystrónu
 - Zvlnenie napájacieho napätia spôsobuje moduláciu intenzity elektrónového zväzku -> amplitúdová modulácia
 - Zvlnenie napájacieho napätia taktiež moduluje rýchlosť elektrónového zväzku -> fázová modulácia
 - Príklad 400MHz/300kW klystróny pre LHC: 1% zvlnenie napájacieho napätia spôsobuje cca. 30kW AM a 8° PM
- Aplikácie klystrónov
 - Nízke výkony (~1kW): satelitné komunikácie, TV vysielacie
 - Stredné výkony (~100kW): priemysel, radary
 - Vysoké výkony (~1MW): urýchľovače častíc, jadrová fúzia

Zdroje mikrovlnných signálov – klystrón



300kW/400MHz klystrón pre urýchľovač LHC

Katóda

Vstupná rezonančná dutina

Výstupná dutina a výstupný vlnovod

Kolektor

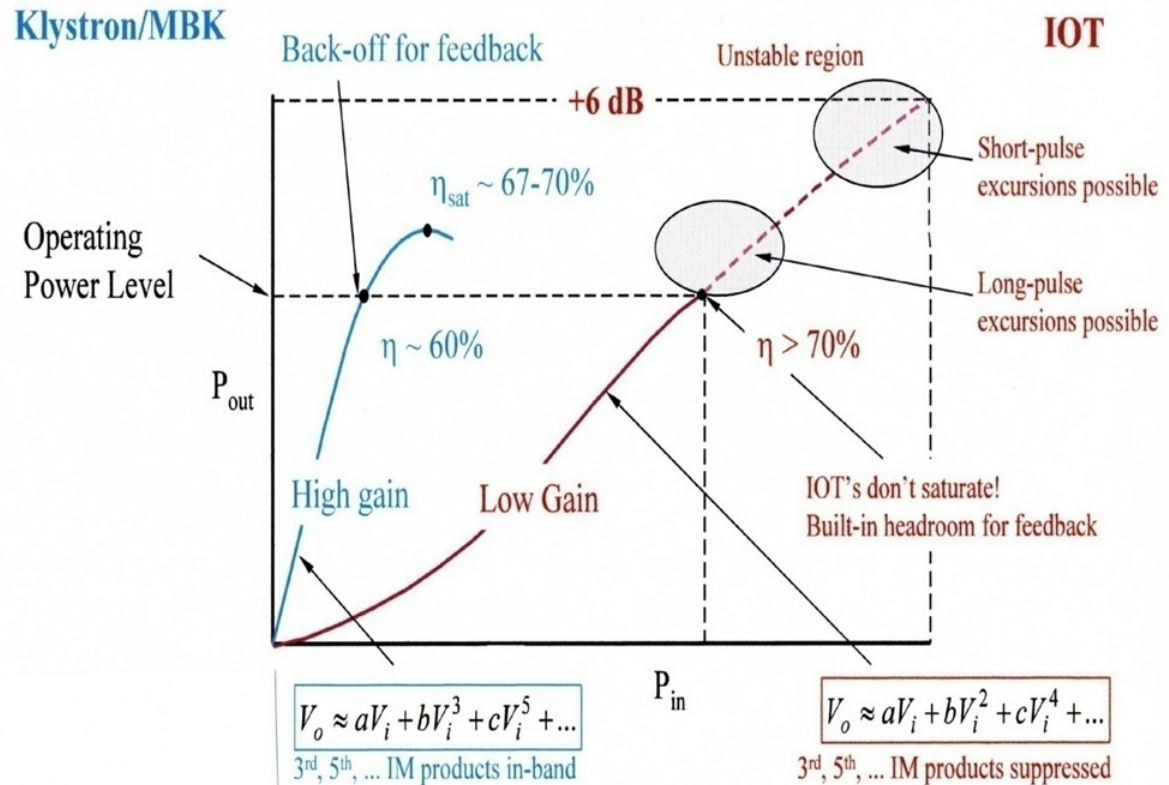
IOTs have operational advantages...

- Efficiency
- Absence of saturation
- Pulse-able via RF
- Small size
- High linearity

...and they are less expensive!

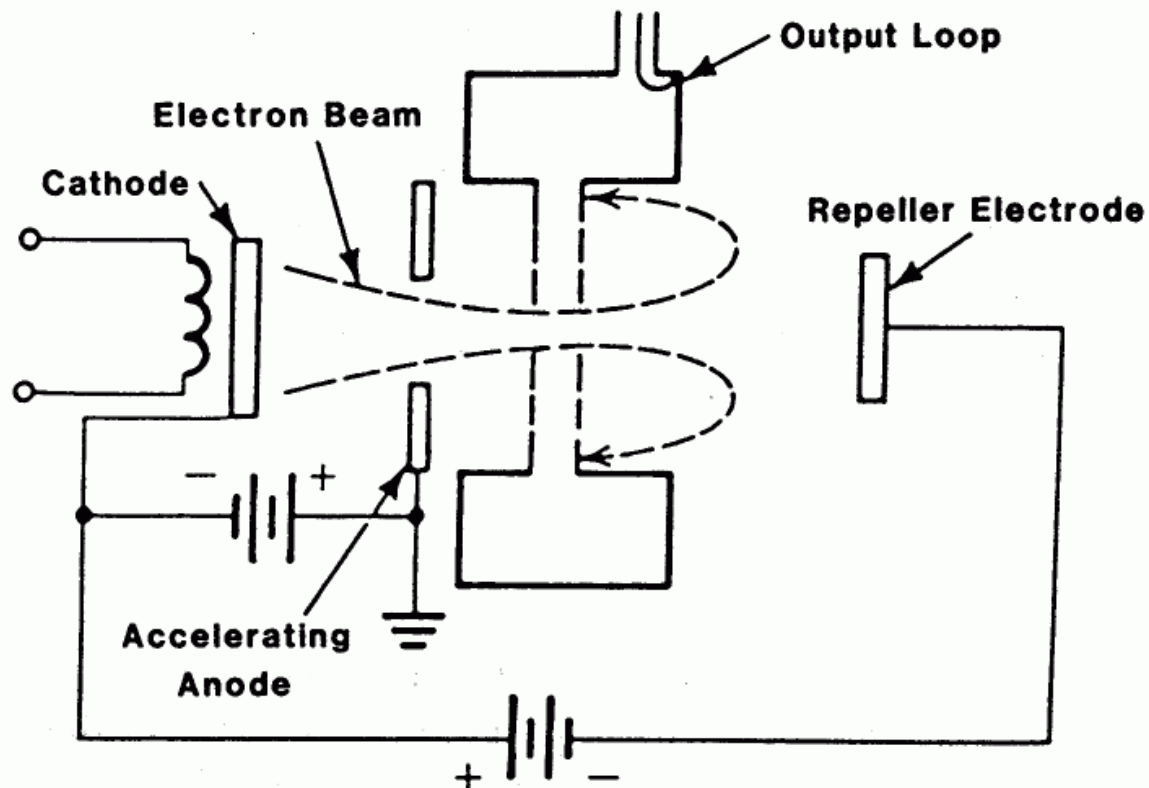
Disadvantage:

- Low gain (± 22 dB)



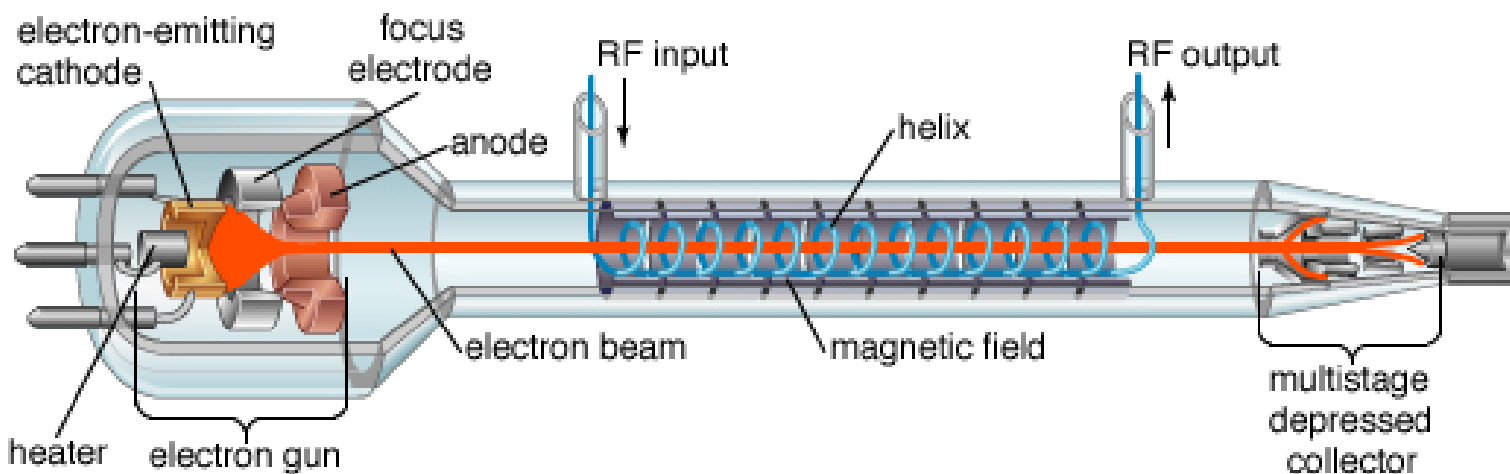
Zdroje mikrovlnných signálov – reflexný klystrón

- Reflexný klystrón má len jednu dutinu a je to oscilátor, nie zosilňovač
- Nízky výkon (typicky do 1W)
- Frekvenčný rozsah až do stoviek GHz



Zdroje mikrovlnných signálov – TWT

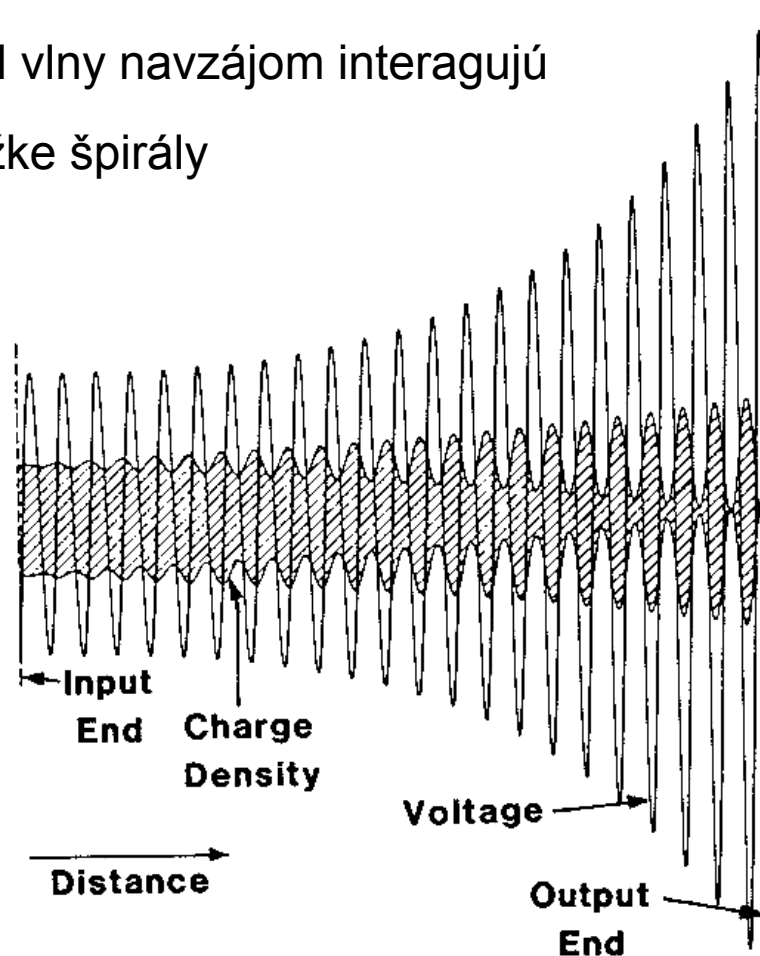
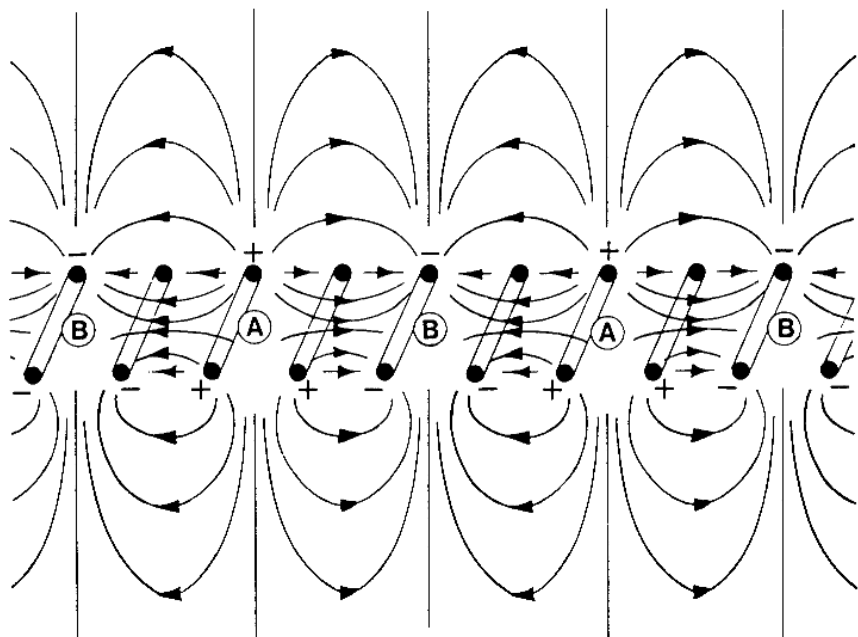
- Zosilňovacia elektrónka vyvinutá v roku 1942 (**T**ravelling **W**ave **T**ube)
- Výkony kontinuálne: jednotky kW až stovky kW, impulzné: desiatky MW
- Frekvencie: jednotky GHz až stovky GHz



© 2004 Encyclopædia Britannica, Inc.

Zdroje mikrovlnných signálov – TWT

- Elektronový zväzok moduluje pomalá ELM vlna letiaca paralelne s ním
- Pomalá vlna sa získa buď špirálou, alebo sústavou viazaných rezonančných dutín
- Ak je rýchlosť zväzku blízka rýchlosti ELM vlny navzájom interagujú
- Elektronový zväzok interaguje po celej dĺžke špirály



Zdroje mikrovlnných signálov – TWT

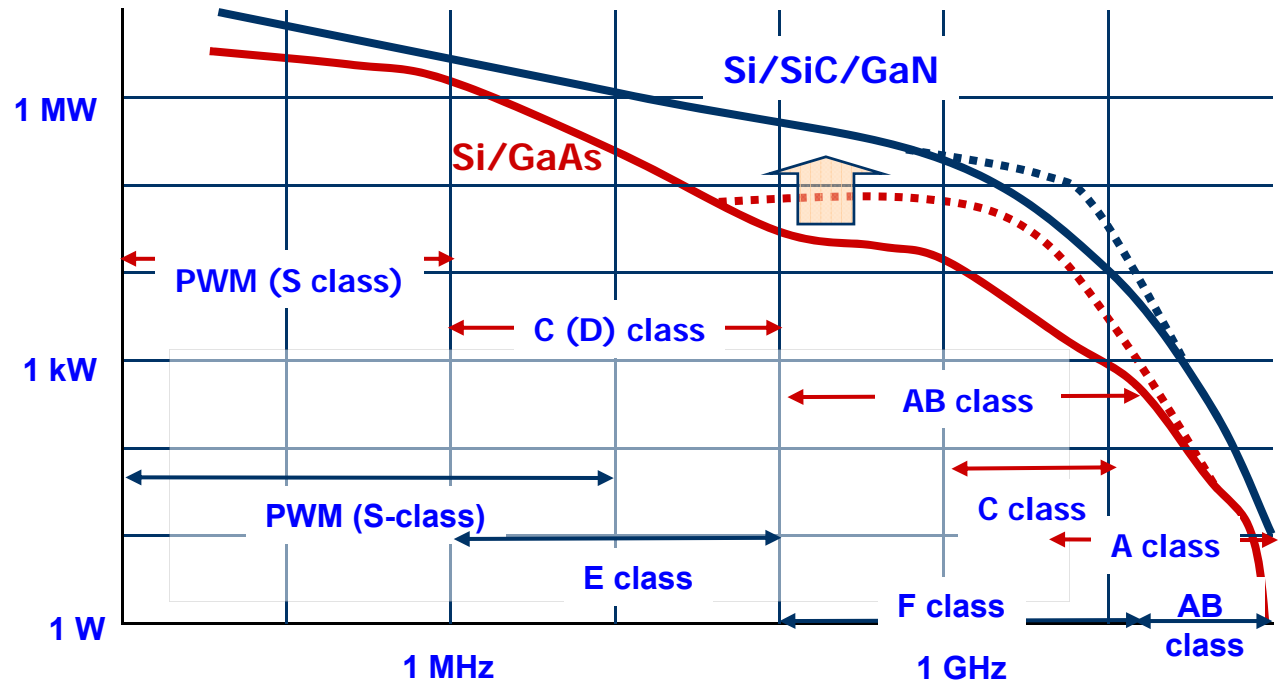
- Pri napájacom napätí 10kV letí elektrónový zväzok rýchlosťou cca. 0,1 c
- Rezonančné dutiny limitujú šírku pásma
- TWT so špirálou
 - Takmer neobmedzená šírka pásma (reálne zhruba 1 oktáva), ale nízky zisk
- TWT s dutinami majú vyšší zisk, ale šírku pásma len 10-20%
 - Vysoké výkony (jednotky MW)
- Pridaním reflektoru je možné získať oscilátor (Backward Wave Oscillator)
- Využitie
 - Mikrovlnné zosilňovače
 - Vysielače, radary
 - Satelitné komunikácie
 - Vedecké prístroje používajúce „exotické“ signály

Zdroje mikrovlnných signálov – polovodičové zosilňovače

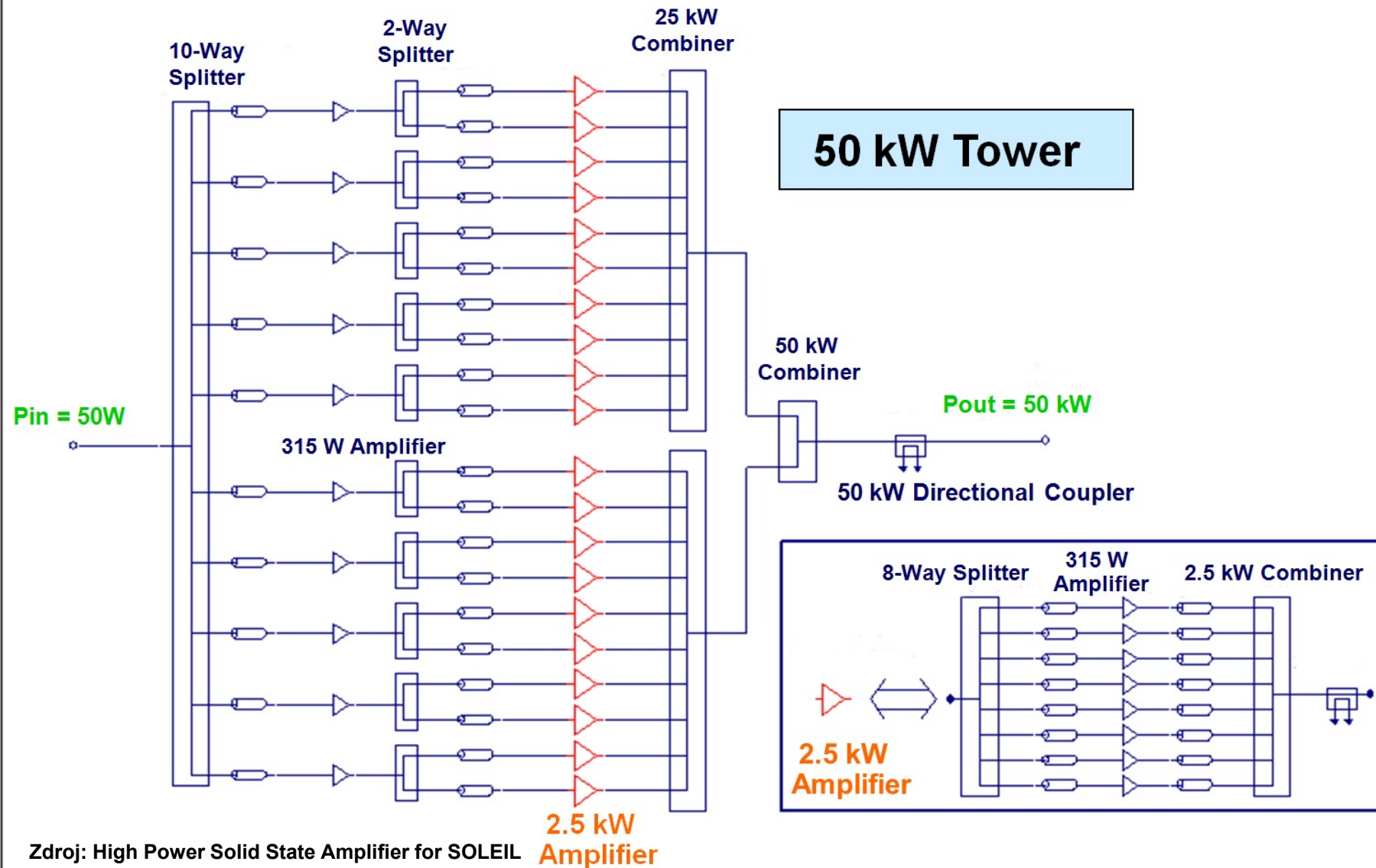
- Parametre polovodičových prvkov sa neustále zdokonaľujú a už začínajú byť zaujímavé pre zosilňovače vyšších výkonov
- Typická architektúra polovodičového zosilňovača
 - Masívna paralelná kombinácia modulov nižšieho výkonu
- Výhody
 - Zosilňovač je postavený z relatívne dostupných prvkov
 - Zlyhanie jedného prvku nemá dopad na činnosť celku
- Problémy
 - Zložitosť, rozmery, potenciálne veľké skupinové oneskorenie
 - Straty v zlučovačoch výkonu
 - Štatistika !!!

Electron device evolution – Solid State Devices

Solid State amplifiers



200 kW (4 x 50 kW)

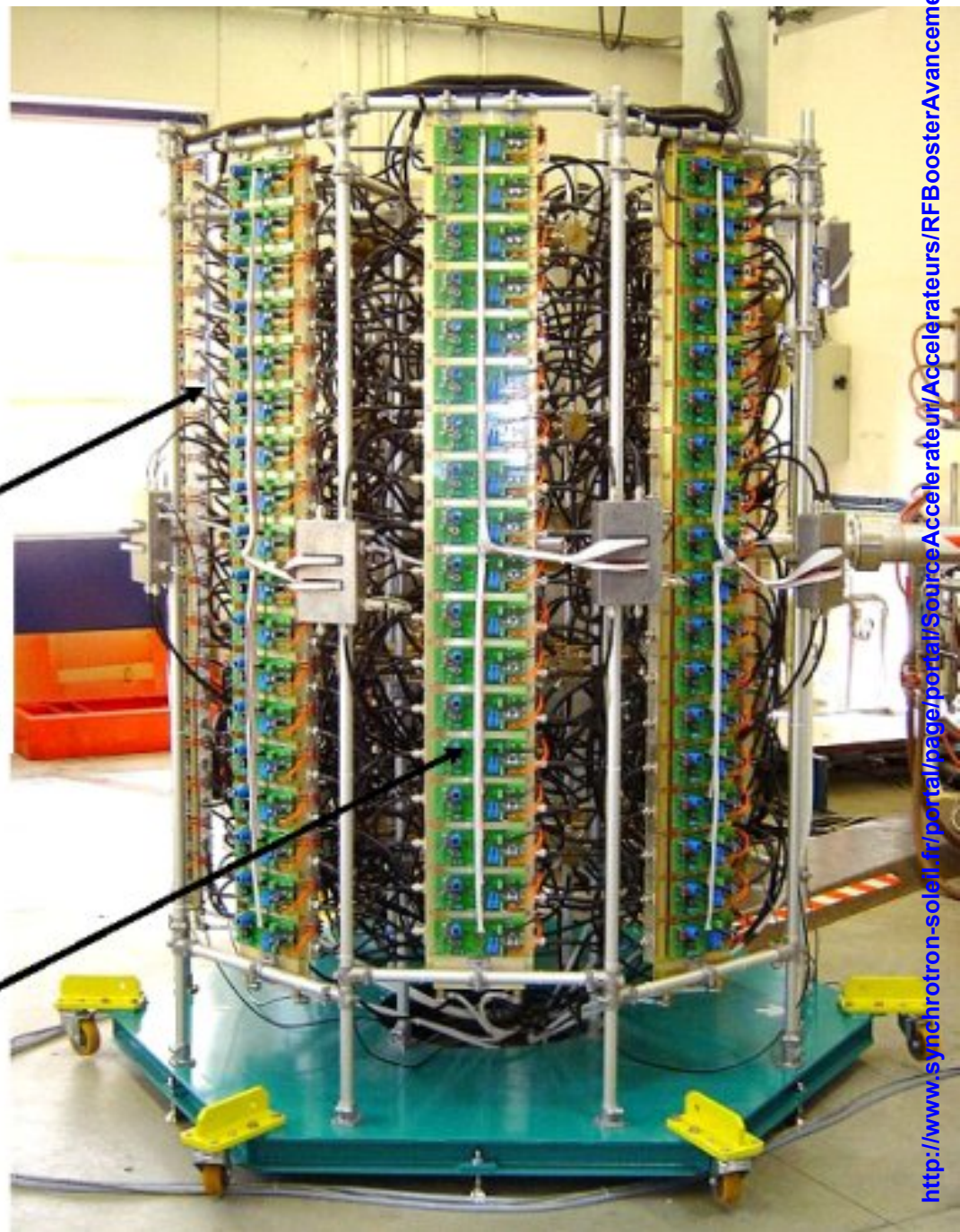


Jeden 50 kW modul
polovodičového zosilňovača
250 kW/352MHz
(Soleil, Francúzsko)

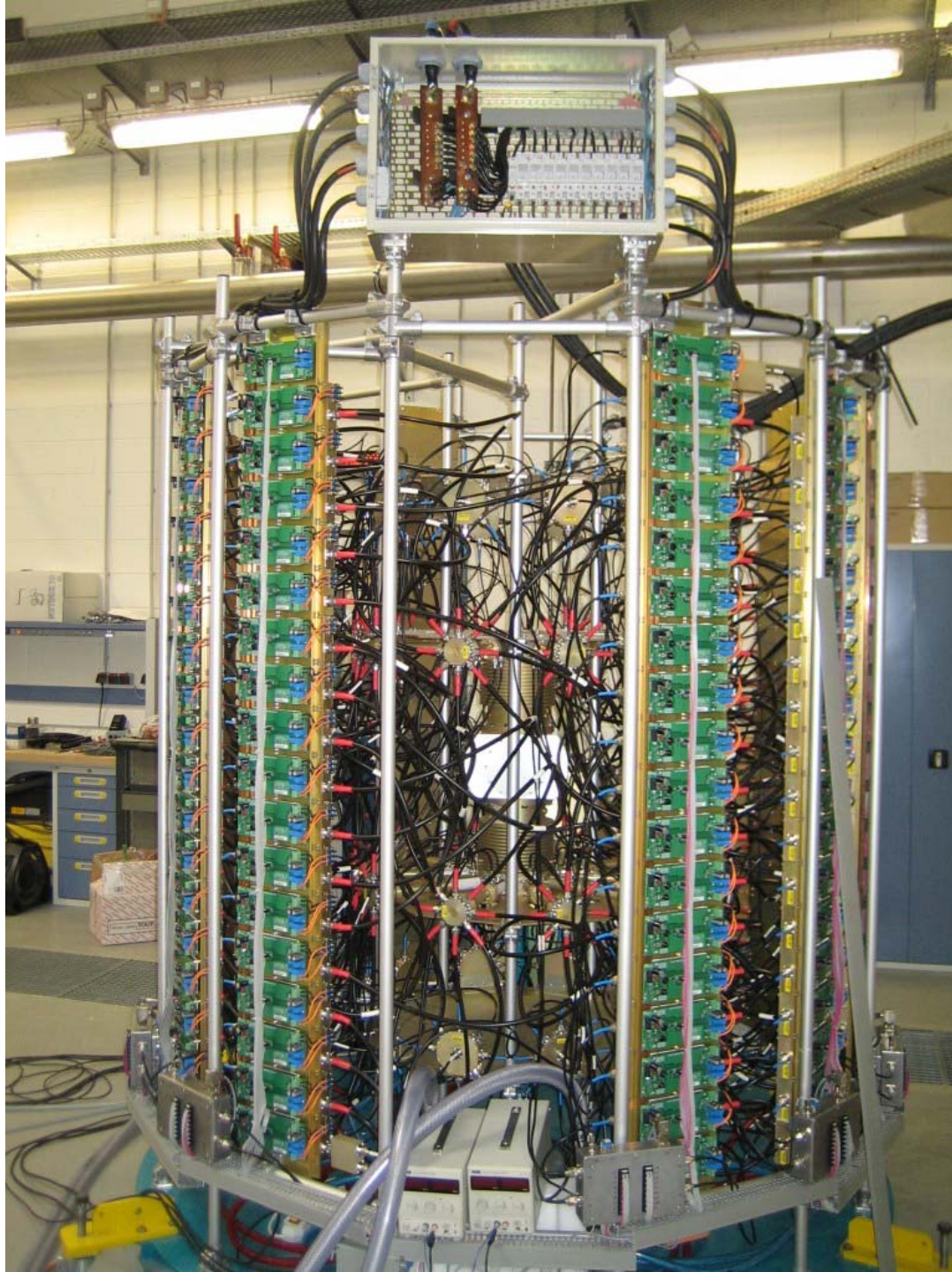
330 W amplifier module

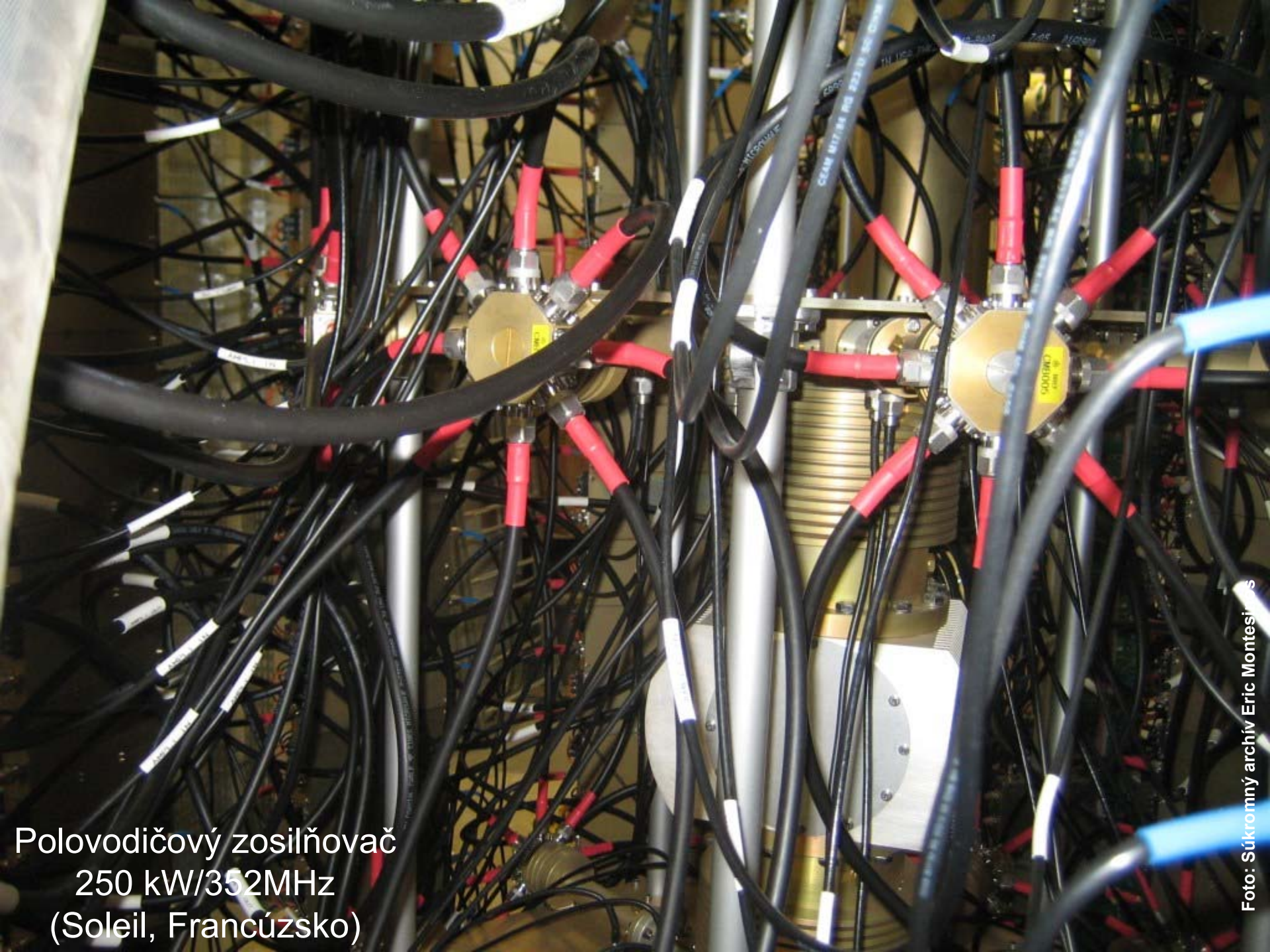


600 W, 300 Vdc / 30 Vdc converter



Jeden 50 kW modul
polovodičového zosilňovača
250 kW/352MHz
(Soleil, Francúzsko)





Polovodičový zosilňovač
250 kW/352MHz
(Soleil, Francúzsko)

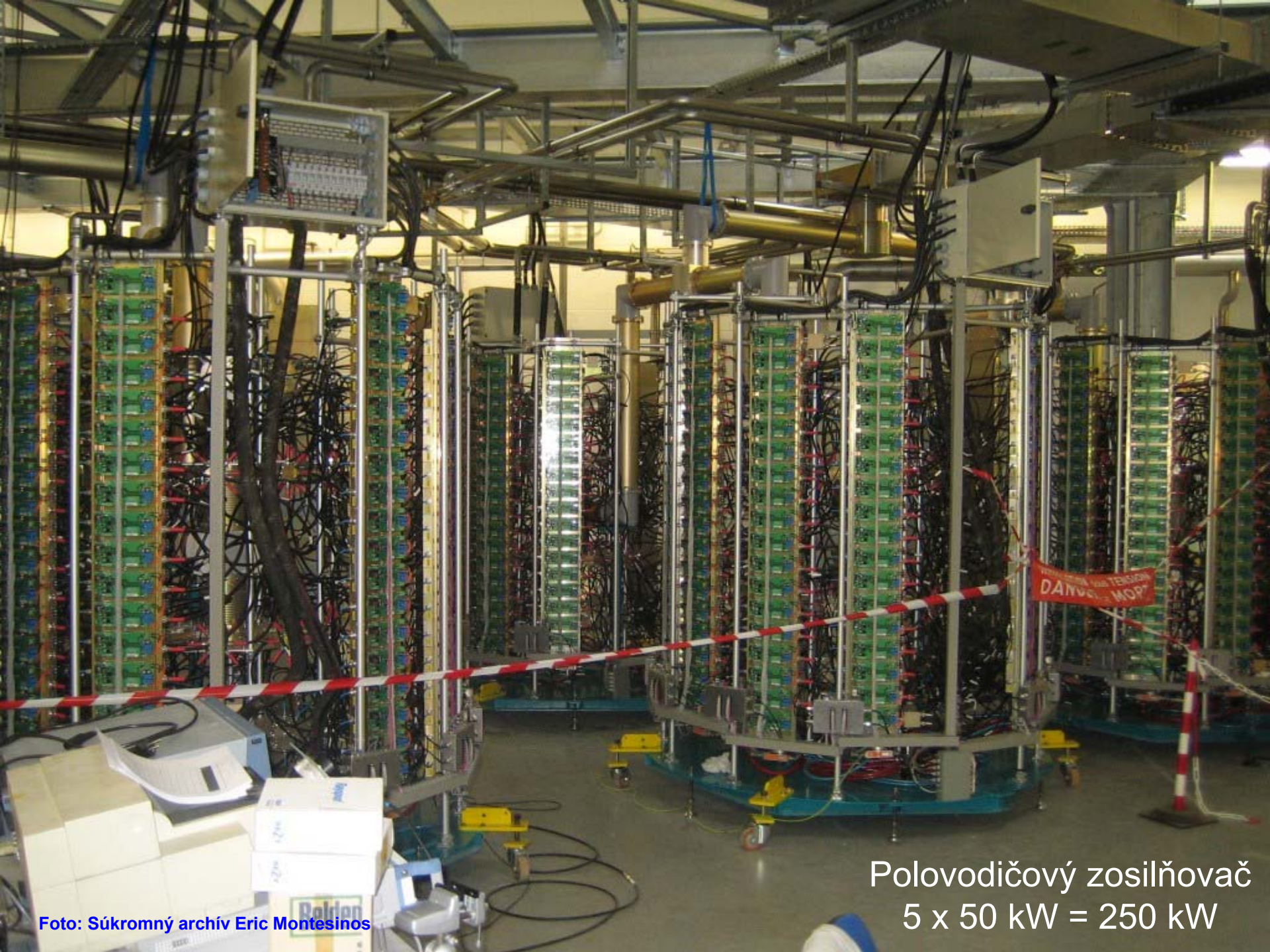


Foto: Súkromný archív Eric Montesinos

Polovodičový zosilňovač
 $5 \times 50 \text{ kW} = 250 \text{ kW}$

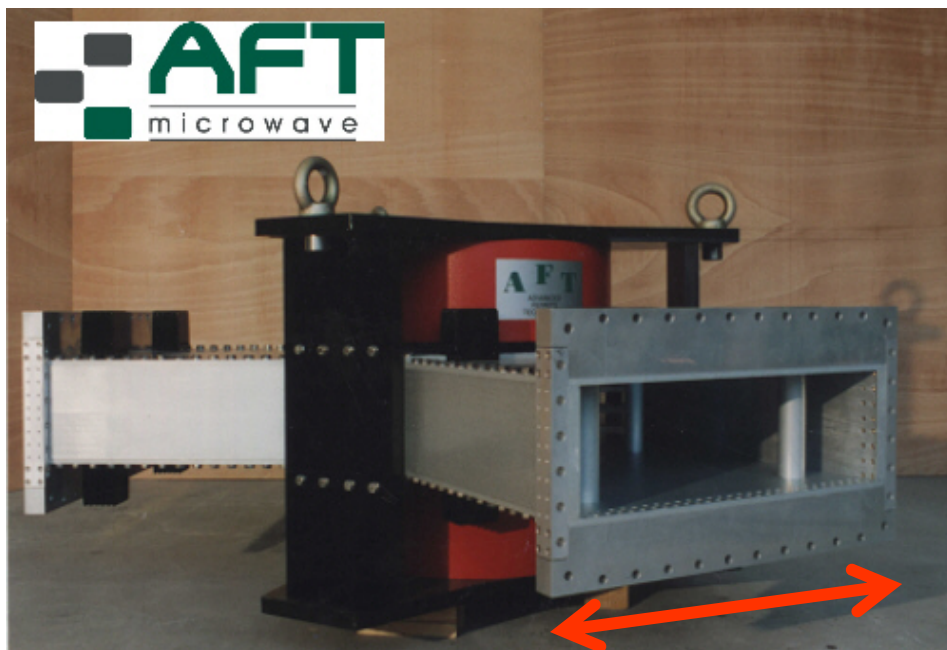
Vysokovýkonové vysokofrekvenčné systémy

- Niektoré vedecké experimenty vyžadujú extrémne vysoké hodnoty elektromagnetických polí (napr. 150MV/m v CLIC)
- Typické aplikácie:
 - Urýchľovače častíc
 - Plazma, Jadrová fúzia
 - Armáda
- Koaxiálne a vlnovodné vedenia
- Výkonové feritové komponenty
- Výkonové zosilňovače

Vysokovýkonové vysokofrekvenčné systémy

- Základné problémy: vysoké intenzity elm polí, Ohmické straty, skin efekt, výkonová hustota
- Vysoké intenzity polí - príklad vlnovod WR2300 pri 1MW/352MHz:
 - $a=58,4\text{cm}$; $b=28,4\text{cm}$, amplitúda napätia módu TE₁₀ cca. 32kV
- Ohmické straty - príklad vlnovod WR2300 pri 1MW/352MHz:
 - útlm $\alpha = 1,2 \text{ mdB/m}$, straty cca. 300W na meter dĺžky
- Skin efekt - príklad konektor pre 50Ohm koaxiálne vedenie 1MW/200MHz
 - prúd cca. 150A v 10 μm povrchovej vrstve materiálu konektora
- Vysoká výkonová hustota – príklad 100kW vlnovodný atenuátor dĺžky 60cm, vlnovod WR2300
 - Stratový výkon cca. 15W/cm² vo ferite (veľmi zlý vodič tepla)

Vysokovýkonové vysokofrekvenčné systémy



Cirkulátor
352MHz
1,2MW kont. vlna
vlnovod WR2300

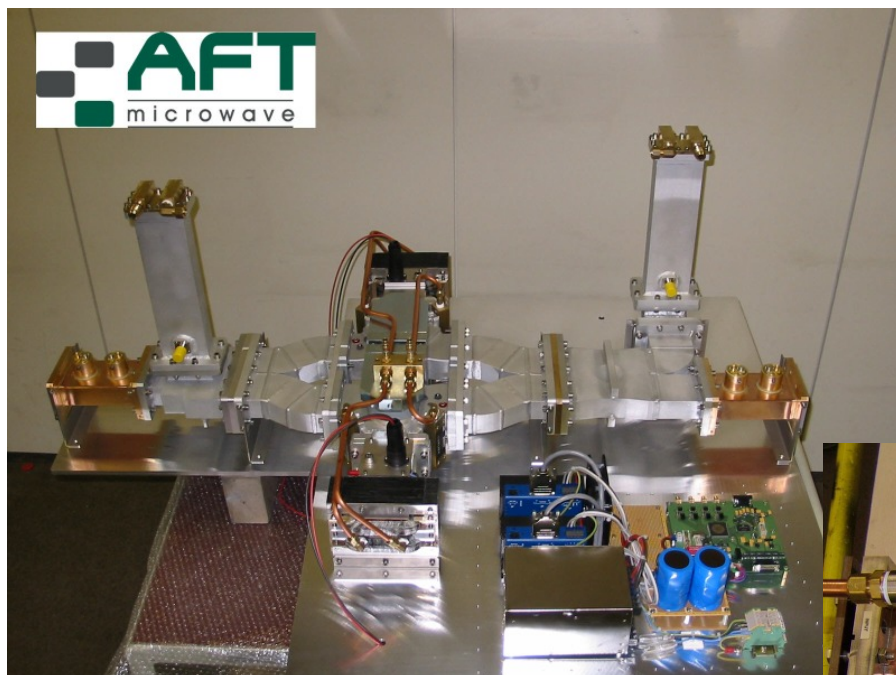
~65cm



Cirkulátor
2998MHz
3MW špičkový výkon
3kW RMS výkon

~8cm

Vysokovýkonové vysokofrekvenčné systémy



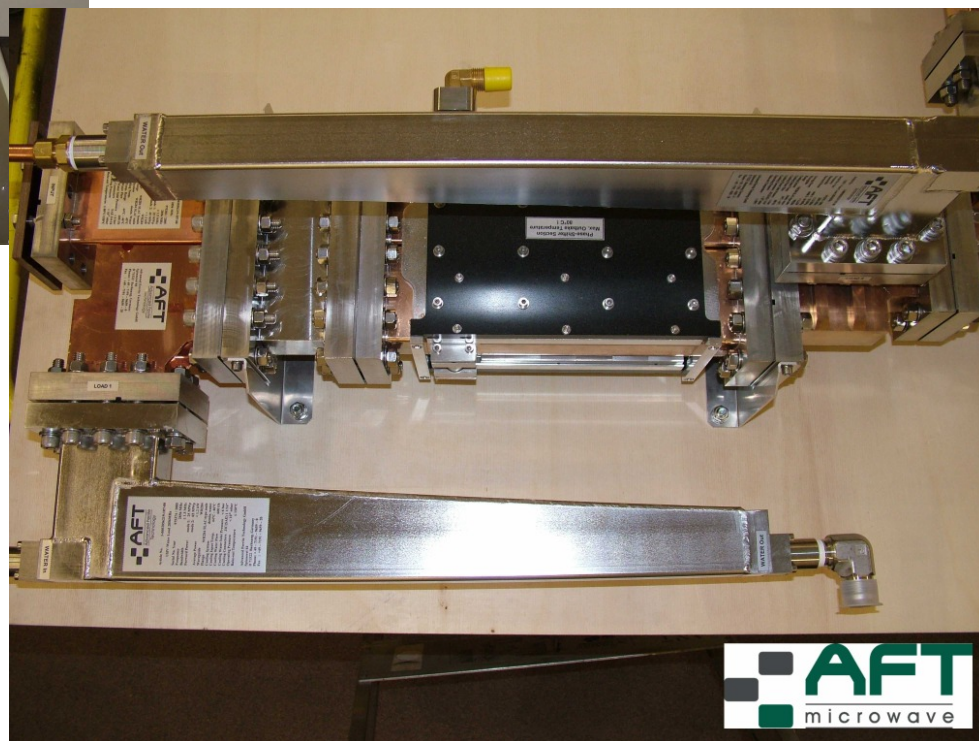
**Feritový vektorový modulátor
(amplitúda/fáza)**

2998MHz

3MW špičkový výkon

3kW RMS výkon

4-Portový izolátor
2856MHz
65MW špičkový výkon



Vysokovýkonové vysokofrekvenčné systémy

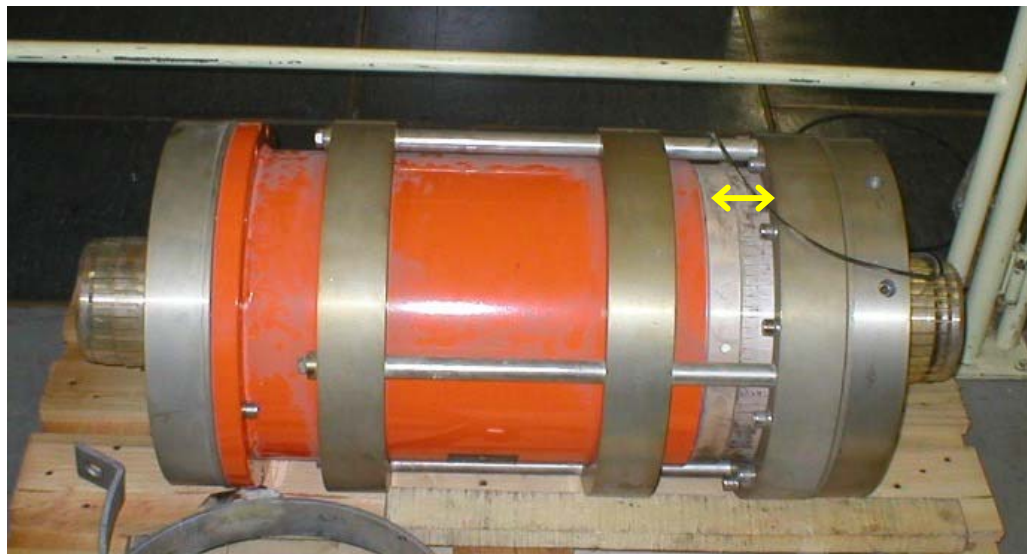


**Feritová, vodou
chladená zát'az'
300kW/400MHz**
Vlnovod WR2300,
polovičná výška, 4 sekcie



Koaxiálny „jumper“ (CERN SPS)

Vysokovýkonové vysokofrekvenčné systémy



Kompenzátor tepelnej expanzie výkonového koaxiálneho vedenia

Koaxiálny prepínač 2x2



Vysokovýkonové vysokofrekvenčné systémy

