

# **Laserová jiskra za atmosférického tlaku a její aplikace pro spínání proudů**

Bc. Tomáš Jurník

---

Diplomová práce  
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
Ústav elektroniky a měření

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Jurník**  
Osobní číslo: **A20574**  
Studijní program: **N1032A020003 Bezpečnostní technologie, systémy a management**  
Specializace: **Bezpečnostní technologie**  
Forma studia: **Kombinovaná**  
Téma práce: **Laserová jiskra za atmosférického tlaku a její aplikace pro spínání proudů**  
Téma práce anglicky: **Atmospheric Pressure Laser Spark and Its Application for Current Switching**

## Zásady pro vypracování

1. Popište způsoby spínání proudů v elektronických obvodech se zřetelem na aplikace v oblasti elektromagnetické kompatibility.
  2. Navrhněte experiment spínání proudů pomocí laserové jiskry za atmosférického tlaku ve vzduchu.
  3. Proveďte základní charakterizaci laserové jiskry měřením jejich rozměrů a doby života generovaného plazmatu v závislosti na výkonu použitého laseru.
  4. Na základě předchozích experimentálních prací navrhněte možné technické řešení spínacího prvku a ověřte jeho základní parametry.
  5. Získané výsledky vyhodnoťte ve vztahu k bezpečnostním aplikacím při generování elektromagnetických impulzů a navrhněte další možný vývoj v této oblasti.
-

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

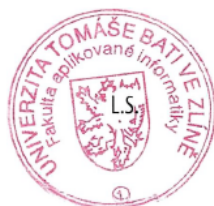
1. TITTERTON, D.H.: Military Laser Technology and Systems, Artech House Boston London 2015
2. MALÝ, P.: Optika Karolinum Praha 2008
3. LARSSON, A. at al.: Laser Triggering of Spark Gap Switches, IEEE Trans. on Plasma Science 42 (2014), 10, 2943-2947
4. BATALLER, A. at al.: Nanosecond high-power dense microplasma switch for visible light, Applied Physics Letters 105 (2014) 22351
5. PARKEVICH, E.V. at al.: Laser-triggered gas switch with subnanosecond jitter and breakdown delay tunable over 0.1-10 ns governed by the spark gap ignition angle, Plasma Sources Sci. Technol. 29 (2020) 05LT03 (5pp)
6. PAUL, C.R.: Introduction to electromagnetic compatibility 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey 2006

Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.**  
Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce: **3. prosince 2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **23. května 2022**

**doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D. v.r.**  
děkan



**Ing. Milan Navrátil, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 7. února 2022

**Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

**Prohlašuji,**

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 27.5.2022

Bc. Tomáš Jurník, v.r

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá možnostmi spínání vysokých proudů, a to zejména se zaměřením na možnosti spínání pomocí jiskřiště a laseru. Zmíněná metoda umožňuje generovat velice krátké impulzy, které jsou potřebné pro další aplikace v oblasti elektromagnetické kompatibility.

Klíčová slova: jiskřiště, elektromagnetická kompatibilita, laser, plazma, impulz

## **ABSTRACT**

This work deals with the possibilities of switching high currents, especially focusing on the possibilities of switching using a spark gap and laser. The mentioned method makes it possible to generate very short pulses, which are needed for other applications in the field of electromagnetic compatibility.

Keywords: spark gap, electromagnetic compatibility, laser, plasma, pulse

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu práce, panu docentovi RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc za získané poznatky a osobní zkušenosti z této oblasti vědy. Dále bych chtěl poděkovat mým kolegům, přátelům a rodině za neustálou podporu během studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 VYUŽITÍ PULZNÍHO ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE V OBLASTI ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY</b> .....	<b>12</b>
1.1 HISTORIE POUŽITÍ EMP .....	12
1.2 RUŠIVÉ SIGNÁLY A JEJICH ZDROJE ŠÍŘENÍ .....	12
1.2.1 Přírodní zdroje rušení .....	13
1.2.2 Umělé zdroje rušení .....	13
1.3 ROZDĚLENÍ DLE ČASOVÉHO PRŮBĚHU .....	14
1.3.1 Impulzní zdroje rušení.....	14
1.3.2 Spojité zdroje rušení.....	15
1.3.3 Kvazi-impulzní.....	15
1.4 ROZDĚLENÍ DLE KMITOČTU .....	15
1.4.1 Nízkofrekvenční rušení .....	15
1.4.2 Vysokofrekvenční .....	15
1.5 ROZDĚLENÍ DLE ŠÍŘKY PÁSMO.....	16
1.6 ELEKTROMAGNETICKÝ IMPULZ .....	16
1.6.1 Kmitočtová závislost pulzu .....	17
1.7 KLASIFIKACE ELEKTROMAGNETICKÝCH ZBRANÍ.....	18
1.8 ŠIROKOPÁSMOVÝ ELEKTROMAGNETICKÝ IMPULZ .....	19
1.9 ZPŮSOBY VYZAŘOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH IMPULZŮ .....	19
1.10 VLIV ELEKTROMAGNETICKÝCH PULZŮ NA ELEKTRONIKU .....	20
<b>2 VÝKONOVÉ POLOVODIČOVÉ SPÍNACÍ PRVKY</b> .....	<b>22</b>
2.1 P-N PŘECHOD .....	23
2.2 TYRISTOR.....	24
2.3 DIAK .....	26
2.4 TRIAK.....	27
2.5 TYRATRON .....	29
2.6 IGNITRON .....	30
<b>3 ELEKTRICKÉ VÝBOJE</b> .....	<b>32</b>
3.1 NESAMOSTATNÝ A SAMOSTATNÝ VÝBOJ V PLYNU .....	32
3.1.1 Elektrická vodivost plynů .....	34
3.2 SAMOSTATNÝ ELEKTRICKÝ VÝBOJ V PLYNU ZA ATMOSFÉRICKÉHO A SNÍŽENÉHO TLAKU.....	35
3.2.1 Jiskrový výboj .....	36

3.3	OBLOUKOVÝ VÝBOJ .....	38
3.4	KORONA.....	39
3.5	DOUTNAVÝ VÝBOJ .....	39
<b>4</b>	<b>PLAZMA.....</b>	<b>40</b>
4.1	DĚLENÍ PODLE TEPLoty .....	40
4.2	DĚLENÍ PODLE IONIZACE .....	41
4.3	DIAGNOSTIKA PLAZMATU .....	41
4.4	PLAZMA A ELEKTRICKÝ PROUD .....	42
<b>5</b>	<b>LASER.....</b>	<b>43</b>
5.1	HISTORIE LASERU .....	43
5.2	Spektrum viditelného světla.....	43
5.3	Základní dělení laseru zdroj .....	44
5.4	Fyzikální princip laseru .....	44
5.4.1	Inverze populace .....	44
5.4.2	Metastabilní hladina .....	44
5.4.3	Přechod na vyšší energetickou hladinu .....	45
5.4.4	Návrat na základní energetickou hladinu .....	45
5.5	Konstrukce laseru .....	45
5.6	Aktivní prostředí .....	46
5.7	Optický rezonátor.....	46
5.8	Excitace.....	47
5.8.1	Optické buzení .....	47
5.8.2	Buzení elektrickým proudem .....	47
5.8.3	Chemické buzení .....	47
<b>6</b>	<b>JISKŘIŠTĚ.....</b>	<b>48</b>
6.1	Technické požadavky na jiskřiště.....	49
6.2	Typy jiskřišť .....	49
6.3	Spínání pomocí laseru.....	51
6.3.1	Budoucnost laserových jiskřišť .....	52
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>SPÍNÁNÍ ELEKTRICKÉHO PROUDU POMOCÍ LASERU .....</b>	<b>54</b>
7.2	Návrh obvodu.....	55
7.3	Vybavení pro měření.....	56
7.3.1	Zdroj napětí Agilent E3630A.....	57
7.3.2	Laser INDI-HG-10S.....	57
7.3.3	Osciloskop Agilent DSO6104A.....	58
7.3.4	Fotopřijímač HSA-X-S-1G4-SI-FS .....	58
7.4	Postup měření laserové jiskry .....	59



7.5	POSTUP MĚŘENÍ MOŽNOSTÍ SPÍNÁNÍ PROUDŮ POMOCÍ JISKŘIŠTĚ .....	63
7.5.1	Úroveň napětí 5 V .....	67
7.5.2	Úroveň napětí 10 V .....	69
7.5.3	Úroveň napětí 15 V .....	71
7.5.4	Úroveň napětí 20 V .....	73
7.6	SHRNUTÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ .....	75
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>76</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>77</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>		<b>80</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>82</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>85</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>		<b>86</b>

## ÚVOD

Realizaci spínání vysokých proudů lze provést pomocí výkonové elektroniky, která ovšem má své mezní hodnoty provozních veličin. Ale z hlediska rychlosti spínání je pro specifické potřeby pomalá. U aplikací, které jsou závislé na délce pulzu nelze dosahovat jednotek řádů nanosekund, a proto je potřeba hledat jiné postupy spínání takto vysokých proudů.

Tímto řešením může být jiskřiště, které je s pomocí vnějšího zásahu možné spínat velmi rychle a lze tak dosáhnout požadovaných časových délek velmi silných elektromagnetických pulzů. Pro spínání je využito vlastností okolního vzduchu za atmosférického tlaku, který je působením laseru ionizován.

Tyto generované pulzy lze využít v celé řadě bezpečnostních řešení, která se zabývají elektromagnetickou kompatibilitou. V rámci kmitočtového spektra existují prostředky, které z hlediska bezpečnosti potřebujeme eliminovat a aplikace takových pulzů, které jsou vyzářeny do okolí nám tuto problematiku může vyřešit.

Cílem této diplomové práce je seznámit se s teorií a problematikou využití pulzního elektromagnetického pole v oblasti elektromagnetické kompatibility. Tato práce přináší náhled na možnosti spínání vysokých proudů a realizaci pomocí jiskřiště a laseru. Součástí práce je návrh a realizace samotného jiskřiště, ověření možnosti jeho spínání a záznam samotného pulzu a jeho výsledného kmitočtového spektra.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 VYUŽITÍ PULZNÍHO ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE V OBLASTI ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY

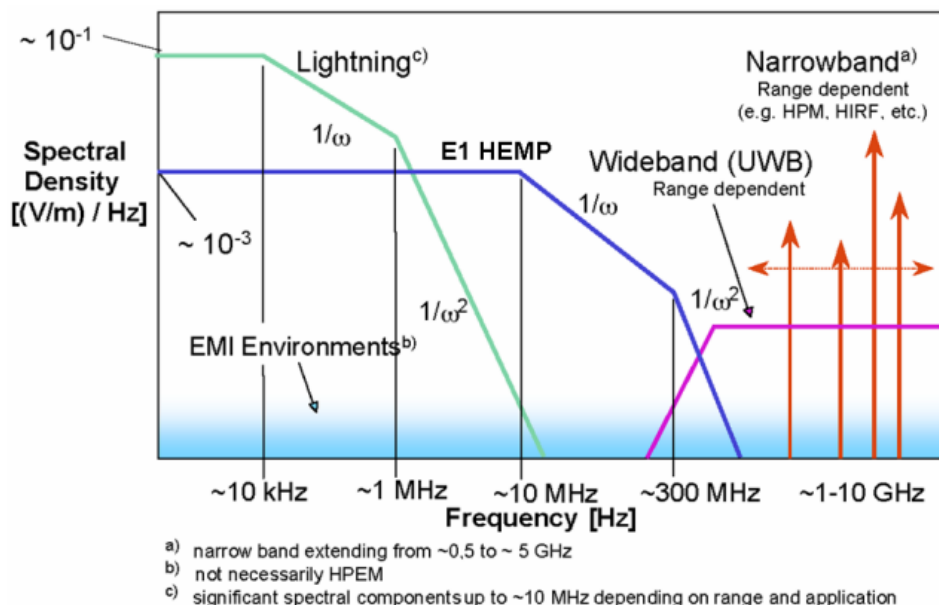
V dnešním světě jsou možnosti využití pulzních elektromagnetických zařízení velmi pestré. Od využití ve zdravotnictví po vojenské účely a řešení otázek bezpečnosti vůči elektronickým zařízením. Právě využití těchto pulzních zařízení, která generují velmi silná elektromagnetická pole v širokém kmitočtovém spektru jsou pro potřeby bezpečnosti velkým příslibem při řešení problematiky eliminace bezpilotních prostředků, elektronického boje a dalších oblastí cíleného rušení. [1,2,3]

## 1.1 Historie použití EMP

Nejlépe zdokumentovaným příkladem využití elektromagnetického impulzu je pokus u ostrova Johnston v jižním Pacifiku v roce 1962 během projekt Starfish Prime. Jednalo se o jadernou nálož o síle 1,4 megatuny, která byla odpálena ve výšce 400 km nad ostrovem. Tento impulz dokázal v Honolulu vyřadit i pouliční osvětlení a retranslační komunikační stanici, a to ve vzdálenosti 1100 km od epicentra výbuchu. [7]

## 1.2 Rušivé signály a jejich zdroje šíření

Všechny zdroje rušení lze rozdělit na základě jejich vzniku, projevu a dle vlastností samotných signálů do několika níže popsaných kategorií. [1,2,3]



Obr. 1 Zobrazení přibližného elektromagnetického spektra se zařazením různých typů rušení [4]

### 1.2.1 Přírodní zdroje rušení

Jedná se o zdroje rušení, které se vyskytují samovolně v přírodě důsledkem přírodních jevů, a nikoliv vnějším zásahem člověka a jeho činnosti. [1,2,3]

#### 1.2.1.1 Blesk

Neboli LEMP z anglického „Lightning electromagnetic pulse“, jedná se o krátkodobě náhlý elektrostatický výboj mezi dvěma objekty, jenž mají různý elektrický potenciál. V přírodě můžeme takový jev pozorovat jako blesk. Blesk je doprovázen silnou emisí světla a díky zahřátí okolního vzduchu dochází i k silnému zvukovému projevu, který je znám pod pojmem hrom. [1,2,3]

#### 1.2.1.2 Výron koronální hmoty

Neboli CME z anglického „Coronal mass ejection“ je jev, kdy se uvolní velké množství materiálu ze sluneční korony do okolního prostoru. Tato hmota se skládá zejména z plazmy, tedy skupiny protonů a elektronů. Pokud dojde k zasažení Země, pak je většina zachycena magnetickým polem. Částice, které projdou dále způsobují geomagnetické bouře, které mají vliv na jemnou elektroniku, navigaci a počítače. [1,2,3]

### 1.2.2 Umělé zdroje rušení


Jsou to všechny zdroje rušení, které jsou zapříčiněny vedlejší anebo cílenou činností člověka. Mohou vznikat jako nežádoucí vedlejší jev vyrobeného zařízení, případně jako cílené zdroje rušení, jenž mají za úkol ochromit infrastrukturu, případně zmást či vyřadit elektroniku v okolí jejich použití. [1,2,3]

#### 1.2.2.1 Jaderný elektromagnetický pulz

Neboli NEMP z anglického „Nuclear electromagnetic pulse“ je vedlejší projev jaderného výbuchu. Vznikající elektrická a magnetická pole dokáží poškodit nebo zničit elektrická zařízení v dosahu. Sílu takového impulzu ovlivňuje mnoho faktorů, asi nejdůležitější je výška, ve které taková bomba detonuje. Ten druh pulzu obsahuje optické (infra-červené, viditelné, ultrafialové) a ionizující (rentgenové a gama) záření. Jedná se o složitější multi-puls, který je rozdílný oproti jiným druhům elektromagnetických pulzů. Zmíněný multi-puls se popisuje třemi složkami, které definovala Mezinárodní elektrotechnická komise (IEC). Tyto tři složky se obecně značí E1, E2, E3. [4]

### 1.2.2.2 Nejaderný elektromagnetický pulz

Neboli NNEMP z anglického „Non-nuclear electromagnetic pulse“ jde o druh zbraně, která generuje elektromagnetické pulzy, které nejsou vedlejším jevem jaderného výbuchu. Může se jednat o kondenzátory s nízkou indukčností, které jsou vybíjeny do antény, která takto vyzařuje do okolí. Dále se jedná o mikrovlnné generátory a generátory s využitím komprese výbušného toku. Všechna tato zařízení jsou využívána především ve zbrojním průmyslu. Mohou být implementována na letadla, lodě, ale také do raket a munice. [5]

	$E_{\max}$ [kV/m]	$H_{\max}$ [A/m]	náběžná hrana [ns]	kmitočtové spektrum	dosah účinku
<b>LEMP</b>	10 ÷ 100	100 ÷ 1000	100 ÷ 10000	1 kHz ÷ 5 MHz	jednotky km
<b>NEMP</b>	30 ÷ 100	100 ÷ 1000	5 ÷ 8	0,1 ÷ 100 MHz	stovky až tisíce km

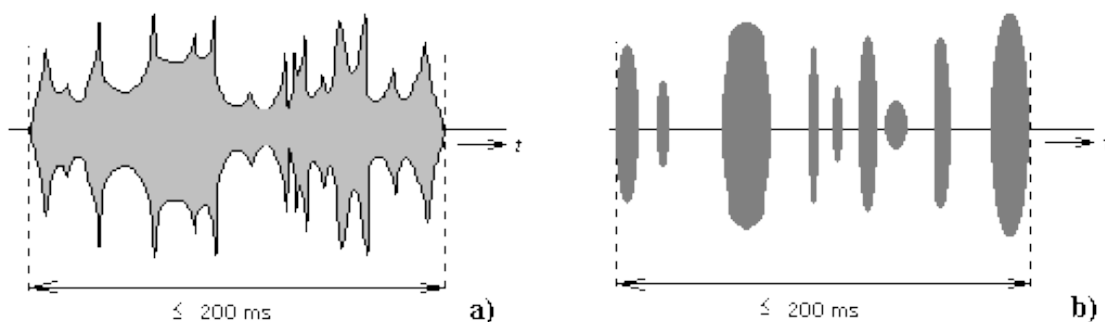
Obr. 2 Srovnání parametrů LEMP a NEMP [2]

## 1.3 Rozdělení dle časového průběhu

Každý rušivý signál interferenčního zdroje je vyzařován s jiným časovým průběhem. Impulzní signály jsou charakteristicky zobrazeny jako časová posloupnost pulzů nebo přechodových jevů. Naopak spojitě rušení působí kontinuálně. V případě kombinování těchto dvou druhů signálu dostaneme kvazi-impulzní interferenční zdroj signálu. [1,2,3]

### 1.3.1 Impulzní zdroje rušení

Jde o takové zdroje, u kterých se rušení projevuje jako posloupnost jednotlivých impulzů a přechodných jevů. Tyto jednotlivé impulzy jsou kratší než 200ms, případně jejich nepřerušené seskupení nepřesahuje tento časový úsek. [1,2,3]



Obr. 3 a) nepřerušená řada impulzů kratších než 200ms, b) seskupení jednotlivých impulzů kratších než 200ms [2]

### 1.3.2 Spojité zdroje rušení

Jedná s o opak impulzního zdroje rušení. Nepozorujeme zde posloupnost oddělených jevů, naopak je zde kontinuální působení rušení na dané zařízení. [1,2,3]

### 1.3.3 Kvazi-impulzní

Jde o kombinaci impulzního a spojitého rušení [1,2,3]

## 1.4 Rozdělení dle kmitočtu

Každý typ rušení lze dále dělit dle jeho kmitočtových parametrů působení ve spektru. Pro základní dělení máme kategorii nízkofrekvenční a vysokofrekvenční. [1,2,3]

### 1.4.1 Nízkofrekvenční rušení

Nízkofrekvenční rušení dělíme do těchto dvou kategorií:

- Energetické – (od 0 kHz do 2 kHz), dochází ke zkreslení napájecího napětí,
- Akustické - (od 2 kHz do 10 kHz), ovlivnění informační techniky (telefony, rozhlas).  
Jde o rušení, které je generováno téměř všemi energetickými zdroji. [1,2,3]

### 1.4.2 Vysokofrekvenční

Vysokofrekvenční nebo také radiové rušení dále řadíme od 10 kHz do 400 GHz. Zdrojem tohoto rušení jsou prakticky všechny interferenční zdroje, u nichž jejich rušivé signály spadají do těchto kmitočtových oblastí. [1,2,3]

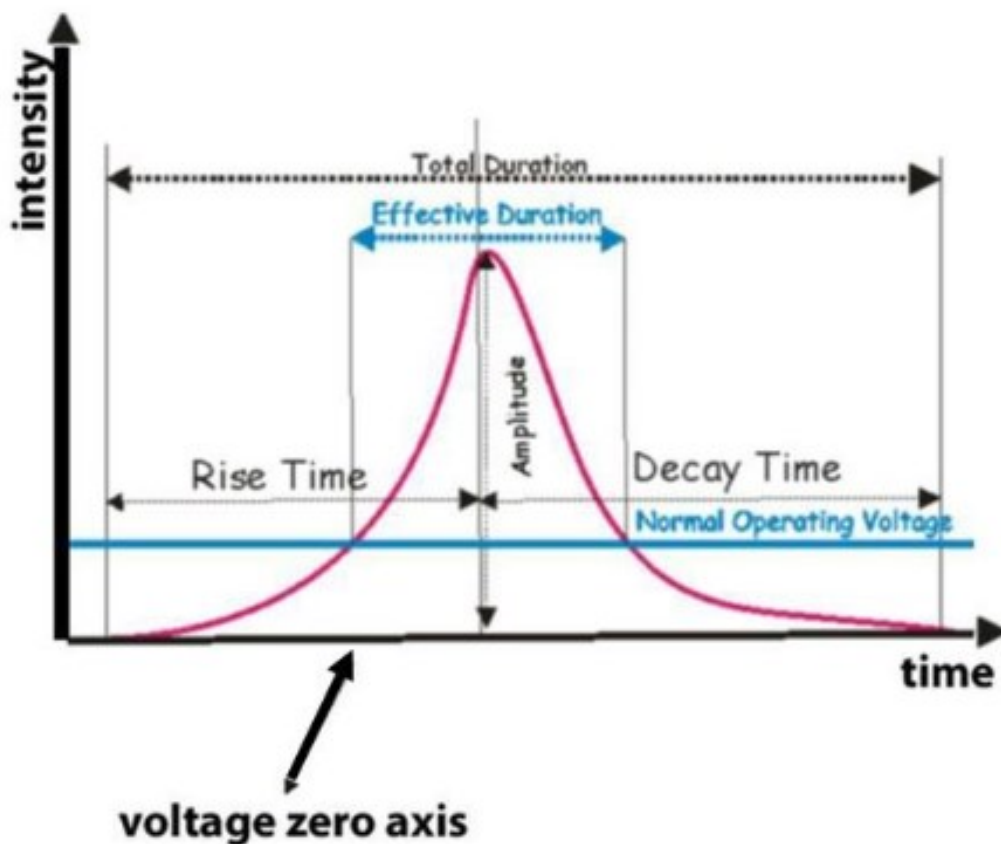
## 1.5 Rozdělení dle šířky pásma

Dle typu zdroje se do okolí mohou šířit úzkopásmové nebo širokopásmové rušivé signály. Do kategorie úzkopásmových zdrojů rušení řadíme zejména rozhlasové a televizní vysílače. Jako širokopásmové rušení zase uvádíme průmyslové signály a přírodní zdroje. [1,2,3]

## 1.6 Elektromagnetický impulz

Jde o vysoce intenzivní, širokopásmový, velmi krátko trvající výron elektromagnetické energie. Jako kladné či záporné „špičky“ se superponují na signály, které jsou pro nás užitečné. Pulzy vznikají během spínání vysokých napětí a jsou obecně charakterizovány dle následujících parametrů:

- Způsob přenosu energie (vyzařováním, elektricky, magneticky),
- Podle rozsahu kmitočtového spektra,
- Podle tvaru vlny (tvar, délka trvání, amplituda),[1,6]

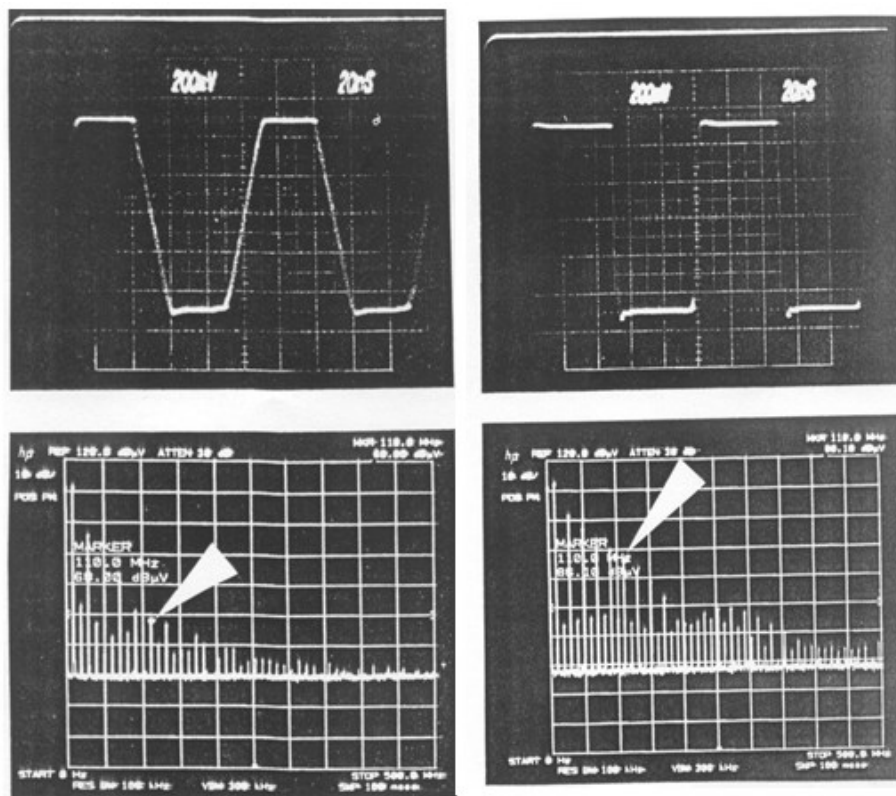


Obr. 4 Průběh elektromagnetického impulzu [6]

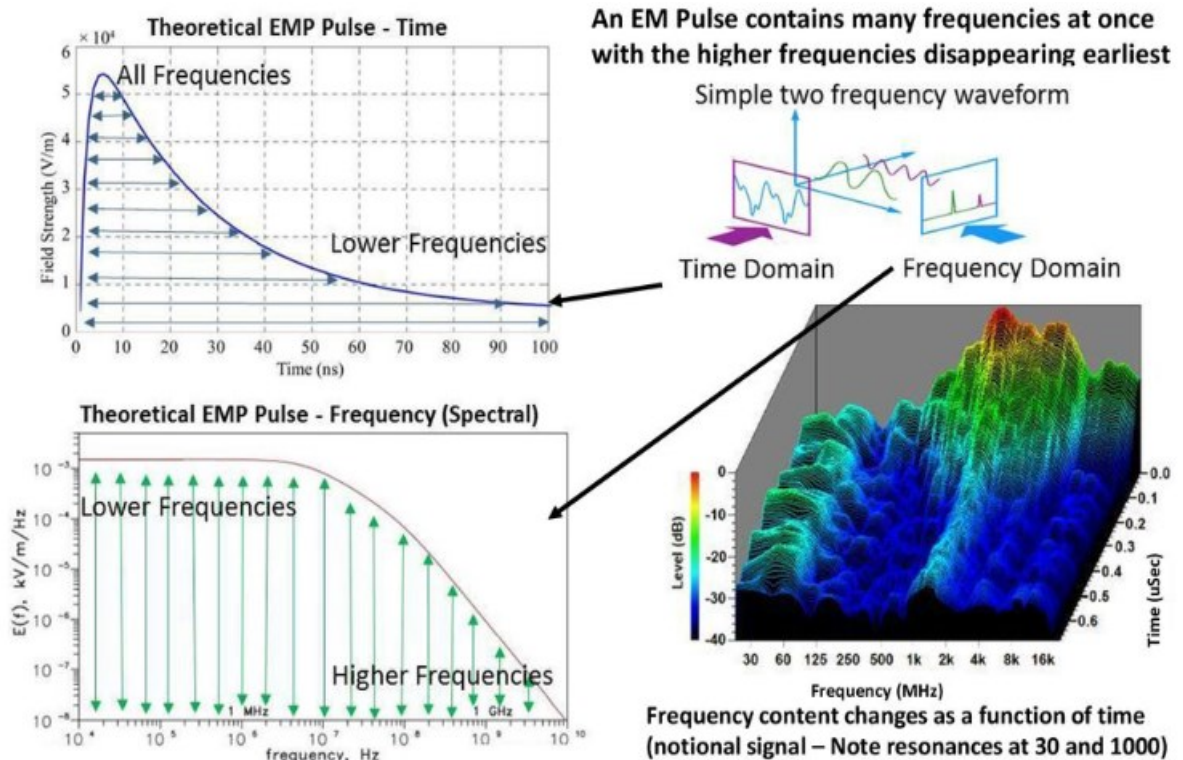


### 1.6.1 Kmitočtová závislost pulzu

Obsah vysokofrekvenčních složek spektra závisí na délce náběžné a sestupné hrany a stejně tak i úrovně, které jsou vyzařované v daném kmitočtovém rozsahu silně závisí na náběžných a sestupných hranách těchto pulzů. Impulzy, které mají krátké náběžné a sestupné hrany dosahují vyššího obsahu vysokofrekvenčních složek než impulzy, které mají hrany delší. Tím se výrobky s takovou charakteristikou krátkých hran pulzů stávají významným zdrojem širokopásmových interferencí do okolí. [1,2,3]



Obr. 5 Příklad vlivu náběžných a sestupných hran na výsledném vysokofrekvenčním výstupu



Obr. 6 Zobrazení závislost časové a frekvenční složky [6]

## 1.7 Klasifikace elektromagnetických zbraní

Elektromagnetické zbraně neboli DEW z anglického „Directed Energy Weapons“ využívají subatomárních částic nebo elektromagnetických vln k destrukci vybraného cíle. Tuto kategorii zbraní lze rozdělit do následujících skupin:

- Laserové zbraně (DEWL – Directed Energy Weapons Laser),
- Částicové zbraně (PBW – Particle Beam Weapons),
- Zbraně využívající radiové vlny stovky kHz až 1 GHz (DEWRF – Directed Energy Weapons – Radio Frequency),
- Zbraně využívající mikrovln 1 GHz až 300 GHz (DEWM – Directed Energy Weapons – Microwave), [8]

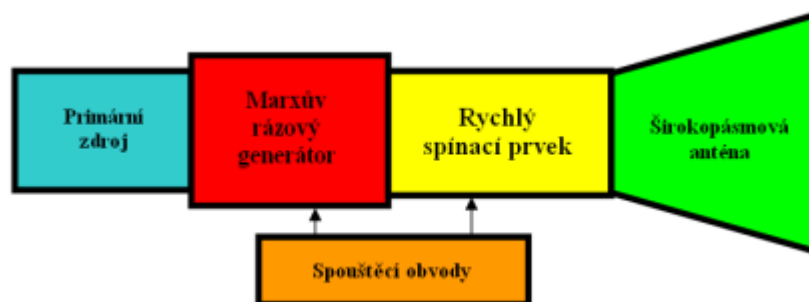
## 1.8 Širokopásmový elektromagnetický impulz

Elektromagnetický širokopásmový impulz neboli UWB z anglického „Ultra Wide Band“ lze pozorovat ve kmitočtovém spektru od stovek MHz do desítek GHz v závislosti na zdroji jeho generování. Generátory s dobou trvání větší, než 1 ns lze klasifikovat jako DEWRF a generátory s délkou trvání impulzu menší, než 1 ns za DEWM.

Jako výkonové prvky jsou využity speciální rychlé spínače, které umožňují v krátkém čase převádět energii ve formě impulzu z akumulátoru do zátěže, kterou tvoří širokopásmová anténa. [8]

K tomuto účelu se používají následující tři druhy spínačů a vypínačů:

- Speciální jiskřiště s krátkou dobou sepnutí,
- Laserem aktivované polovodičové spínače,
- Polovodičové vypínače pro rozpojování obvodů s indukčnostmi,



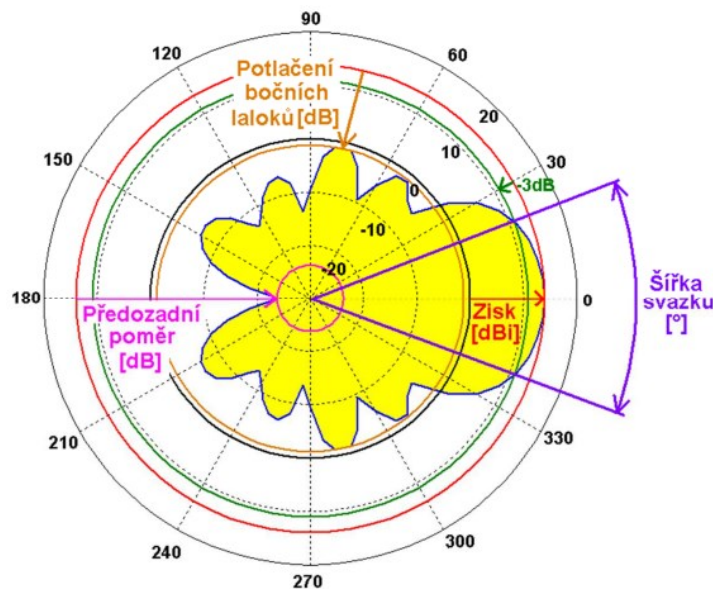
Obr. 7 Schéma širokopásmového řešení DEWM nebo DEWRF [8]

## 1.9 Způsoby vyzařování elektromagnetických impulzů

Pro vyzařování těchto širokopásmových impulzů se využívá speciálně navržených anténních systémů, které jsou schopny tyto velké výkony efektivně vyzářit do okolí. [9]

U každé antény nás zajímají tyto parametry:

- Charakteristická impedance – vyjádření vlivu dvou nepřizpůsobených obvodů,
- Zisk antény – poměr intenzity vyzařování dané antény v daném směru vůči referenční anténě,
- Vyzařovací charakteristika – grafické vyjádření směrových vlastností antény v prostorových souřadnicích,
- Směrnost antény – vlastnost vysílat elektromagnetické vlny s různou intenzitou se závislostí na směru,
- Činitel směrnosti – poměr výkonu, [9]



Obr. 8 Příklad vyzařovací charakteristiky antény [9]

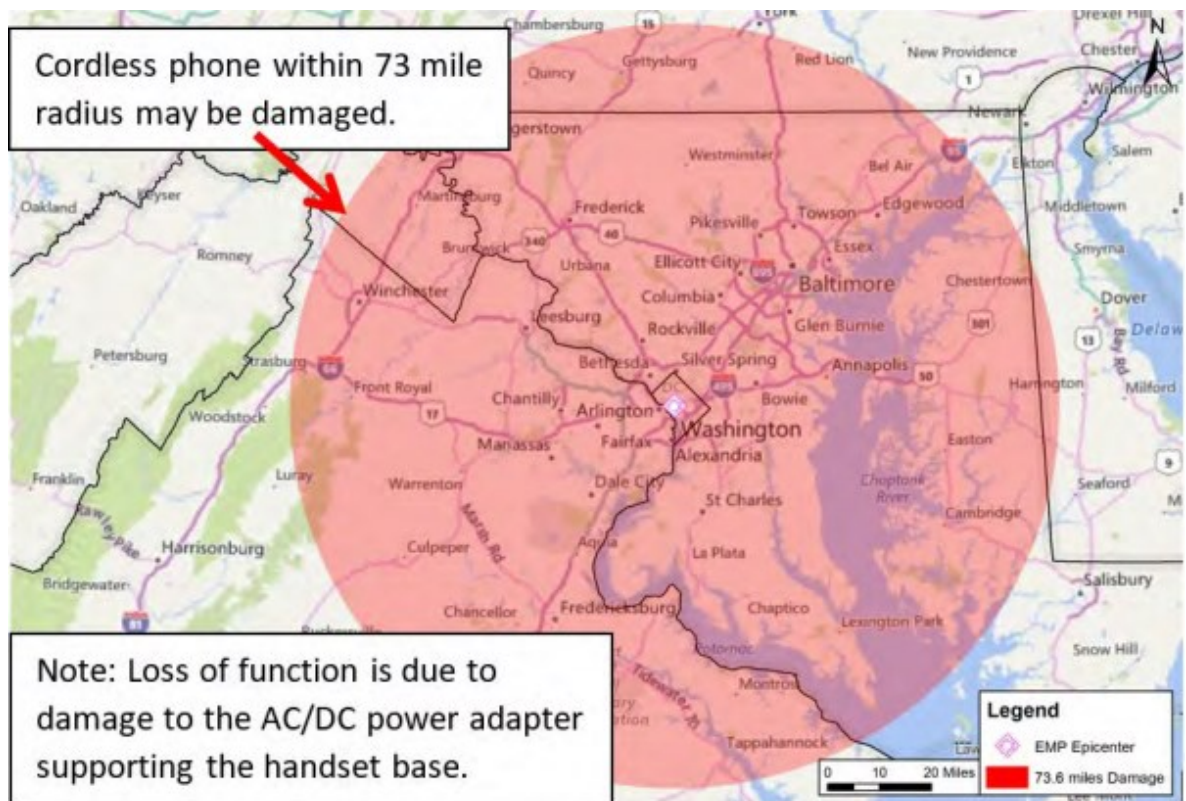
## 1.10 Vliv elektromagnetických pulzů na elektroniku

Elektromagnetický impulz vytváří šokový ráz elektrického proudu v každém obvodu všech zařízení. Ohrožena jsou zejména tato odvětví:

- Energetická síť – veškeré páteřní trasy a distributorská centra,
- Komunikační systémy – mobilní sítě, navigace, internetová síť,
- Zdravotnická zařízení – dodávky energií a chod všech potřebných zařízení,
- Doprava – letecká, automobilní a železniční,

Tento impulz přetíží a případně zničí některé součástky uvnitř obvodu a překročí tak jejich provozní parametry na které jsou konstruovány. Takové zasažené zařízení je tedy dočasně anebo trvale vyřazeno z provozu. Náchylné jsou především systémy, které obsahují anténu pro vysílání nebo příjem. Nelze jej dokonale odstínit a anténa tak představuje přímý vstup do zařízení pro tento impulz. Vyřazeny jsou proto především komunikační části, případně napájecí. [4]

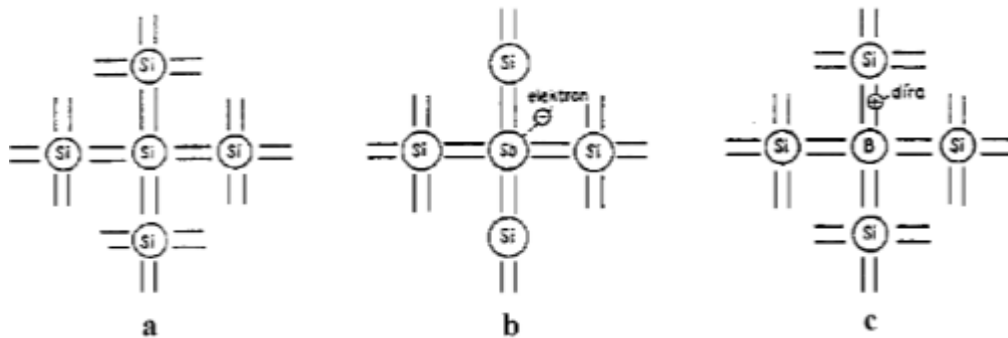
Ochrana před dopady je kvalitní stínění, případně navržení kvalitních vstupních obvodů těchto zařízení tak, aby byly schopné odolat vnějšímu působení těchto pulzů. Této problematice se věnuje vědecko-technická disciplína zvaná elektromagnetická kompatibilita se zaměřením na susceptibilitu. [4]



Obr. 9 Příklad dopadu použití EMP pulzu [4]

## 2 VÝKONOVÉ POLOVODIČOVÉ SPÍNACÍ PRVKY

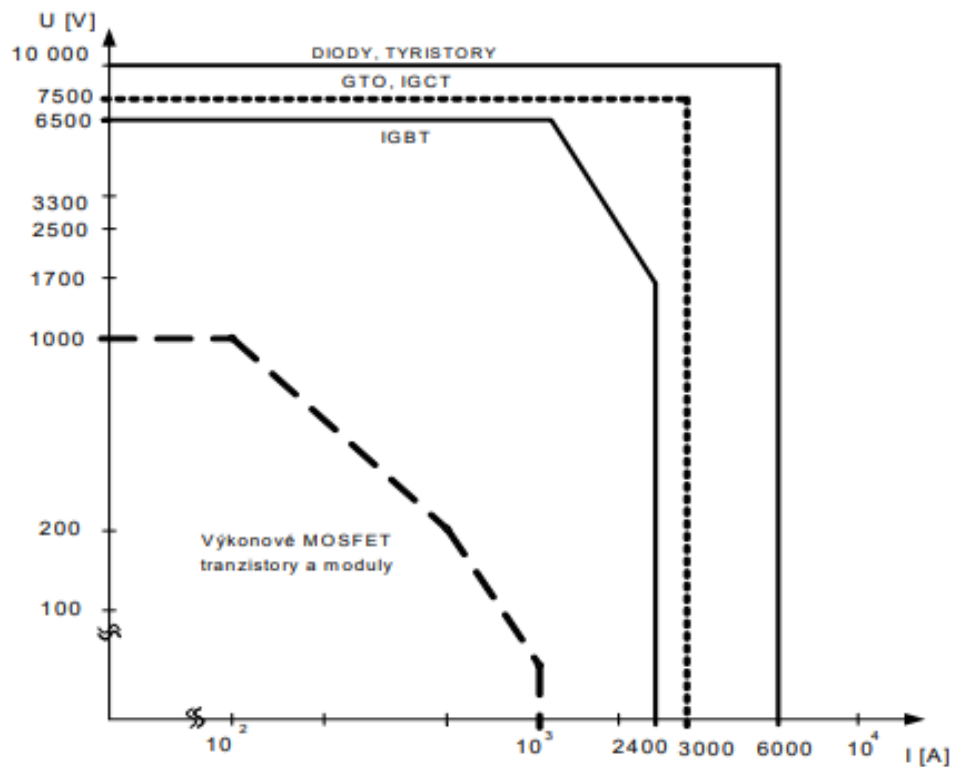
Vlastnosti a funkce polovodičových prvků jsou dány vlastnostmi látek, které se nazývají polovodiče. Základní rozdíl mezi vodičem, polovodičem a izolantem je v pevnosti vazby valenčních elektronů na jádra atomů. [10,11]



Obr. 10 Krystalická struktura křemíku (Si) [11]

Výkonové polovodičové spínací prvky se vyrábějí na bázi monokrystalu křemíku (Si). Ten má dobré parametry proudové zatížitelnosti a malou teplotní závislost. Teplota značně ovlivňuje volt-ampérovou charakteristiku, kde proud procházející součástkou je vyšší s vyšší teplotou a naopak.

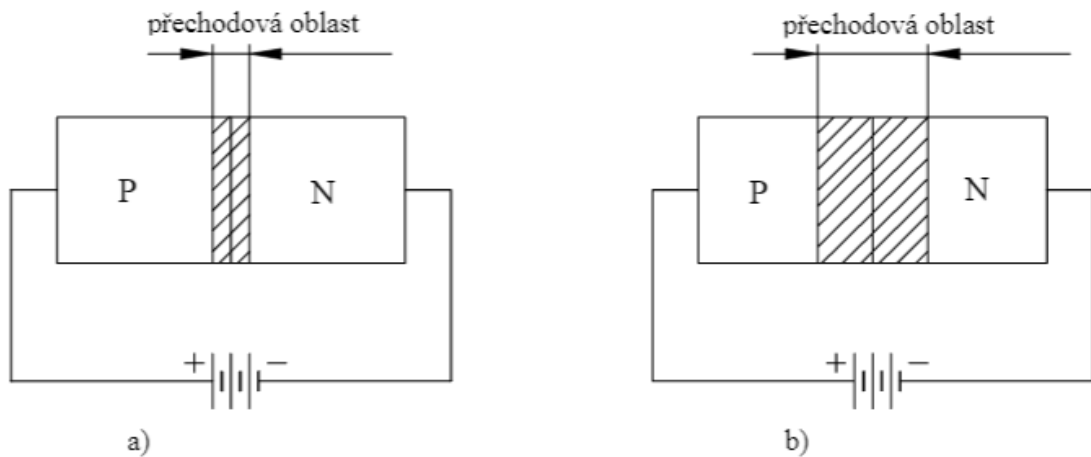
Křemík má nevodivou krystalickou strukturu, a proto jsou všechny valenční elektrony jednotlivých atomů navzájem pevně vázané kovalentní vazbou. V případě, že dojde k nahrazení jednoho z atomů křemíku atomem 5-mocného prvku, například fosfor (P), pak jeden z jeho pěti valenčních elektronů nevytváří vazbu se sousedními atomy křemíku a dochází k jeho pohybu v mezimřížkovém prostoru díky působení elektrického pole. Takto vzniká polovodič typu N. Vytvoření polovodiče typu P je dosaženo naopak nahrazením jednoho atomu křemíku za 3-mocný prvek, například bor (B). Tím je způsobeno, že ve valenčním pásmu chybí jeden elektron a je tak vytvořena díra. [10,11]



Obr. 11 Dosažitelné parametry výkonových polovodičových součástek [10]

## 2.1 P-N přechod

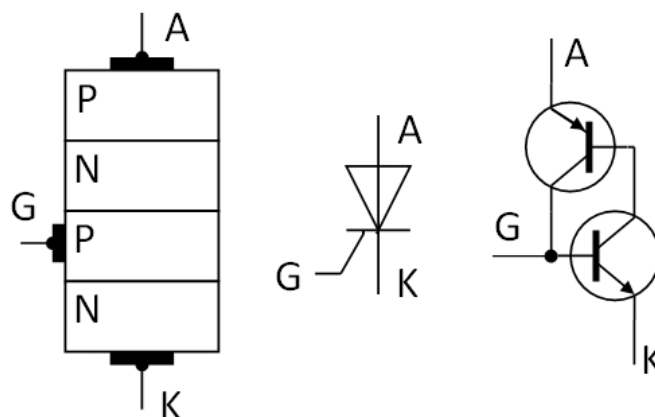
V případě, že na jedné straně destičky máme vrstvu křemíku obohacenou o jeden valenční elektron navíc a na straně druhé křemík s volnou dírou, pak nám vzniká na jejich rozhraní P-N přechod. Důsledkem působení difúzních sil se volné elektrony přesouvají do oblasti typu P. Díry naopak vznikají v oblasti typu N a v oblasti P-N přechodu se tak vytvoří přechodová oblast s potenciálovou bariérou. Tato oblast zabraňuje průtoku trvalého difuzního proudu. V případě připojení kladného napětí začne protékat přechodem P-N proud a mluvíme tak o propustném režimu. Pokud připojíme opačnou polaritu, pak proud neprotéká a bavíme se o závěrném režimu. [10,11]



Obr. 12 a) PN přechod v propustném směru b) PN přechod v závěrném směru [11]

## 2.2 Tyristor

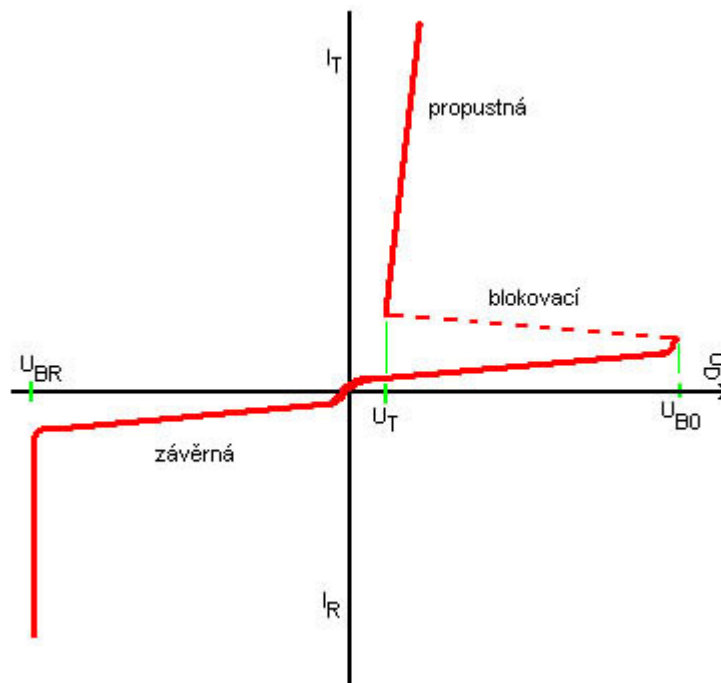
Je to čtyřvrstvá spínací polovodičová součástka. Používá se hlavně pro bezztrátovou regulaci výkonu elektromotorů u řízených usměrňovačů. Tyristor je tvořen třemi přechody P-N. Jeho krajní vrstva P je vyvedena na anodu A, krajní vrstva N náleží katodě K. Řídící elektroda G je přivedena na jeho vnitřní P nebo N, dle toho, o jaký typ tyristoru se jedná. V případě, že je řídicí elektroda na vnitřní vrstvě P, pak jde o typ PNP, pokud je na vrstvě N, jedná se o NPNP typ. Principem činnosti těchto součástek je tzv. tyristorový jev. Z hlediska funkčnosti lze čtyřvrstvou strukturu nahradit zapojením dvou tranzistorů se společným kolektorovým přechodem, kde při otevření  $T_1$  dochází k většímu otevření  $T_2$ . Řídící elektrodě tedy stačí přivést proudový impulz, který dostatečně vybudí tranzistor  $T_1$ . Následné otevření tyristoru probíhá lavinovitě. [10,11,12]



Obr. 13 Struktura tyristoru a jeho schématická značka [12]



Tyristory se vyrábí ve velkém výkonovém rozsahu a jsou schopné spínat velké proudy (až 5000 A) při vysokém napětí (až 12 000 V).



Obr. 14 Voltampérová charakteristika tyristoru [13]

Tyristor se chová jako usměrňovací dioda v případě, že připojíme vnější napětí v závěrném směru, kdy nevede proud. Nesmí dojít k překročení maximálního závěrného napětí. Pokud připojíme napětí v propustném směru, pak je v závěrném směru pouze jeden prostřední přechod a v případě, že je napětí  $U_D$  menší, než  $U_{(BO)}$ , pak se tyristor nachází v blokovácím stavu. Blokovácí část se vyznačuje vysokým odporem, řádově  $10^8 \Omega$  a jde o oblast charakteristiky v propustném směru. Na anodě je přivedeno vůči katodě kladné napětí  $U_{AK}$  a řídicí elektrodou neprotéká žádný proud. Jakmile do řídicí elektrody přivedeme proud  $I_G$ , pak se zvětší velikost blokovácího proudu a dojde ke zmenšení této blokovácí oblasti a tím i potřebné velikosti spínacího napětí. Tato spínací oblast je v místě ohybu charakteristiky v okolí spínacího napětí  $U_{BO}$ . Zde dochází k lavinovému průrazu tyristoru a jeho přepnutí do vodivého stavu. Propustná část charakteristiky zobrazuje vodivý stav tyristoru s velmi malým odporem a protékající proud je regulován vnější zátěží, která je připojena do obvodu. [12,13]

Tyristor se typicky spíná následujícími způsoby:

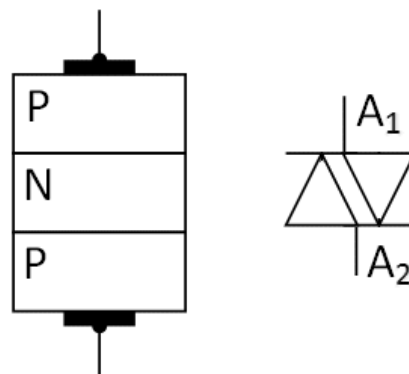
- Proudovým impulzem do řídicí elektrody
- Kapacitním proudem

Vypínání tyristoru se řeší připojením pomocného zdroje napětí v paralelním zapojení, polarita zdroje zajišťuje závěrnou polarizaci tyristoru a tím i jeho vypnutí. Jako nejčastější řešení tohoto pomocného zdroje se volí kondenzátor. [12,13]

### 2.3 Diak

Diak (DIAC – Diode Alternating Current Switch) je vícevrstvá součástka určená pro spínání, která není opatřena řídicí elektrodou. K sepnutí Diaku dochází překročením blokovacího napětí  $U_{SP1}$  nebo  $U_{SP2}$ , tedy oběma polaritami.

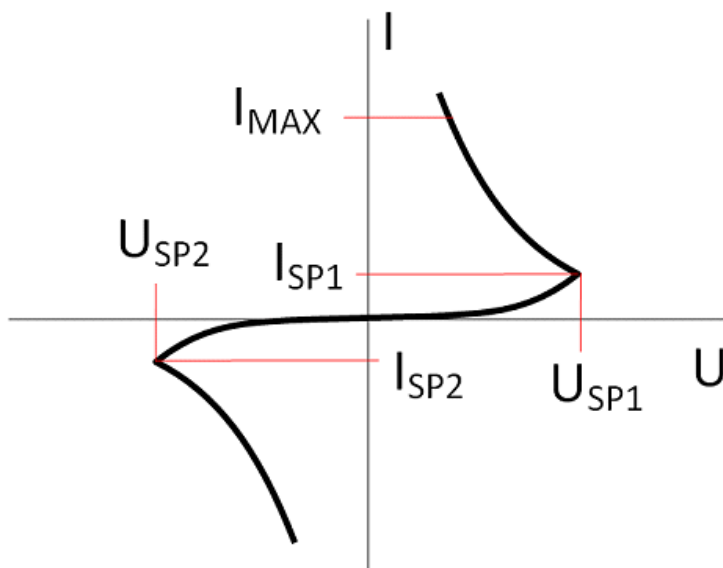
Struktura diaku je tvořena třemi nebo pěti vrstvami. Po přiložení napětí mezi anody  $A_1$  a  $A_2$  dochází vždy k tomu, že jeden z přechodů je dle polarity vždy závěrným a druhý propustným směrem.



Obr. 15 Struktura diaku a jeho schématická značka [12]

Dle obrázku (Obr. 16) můžeme vidět, že diak má symetrickou voltampérovou charakteristiku s oblastí záporného diferenciálního odporu.

Pokud se tedy zvýší dostatečně napětí  $U_{A1}$  a  $U_{A2}$ , aby došlo k překročení blokovacího napětí  $U_{SP}$ , pak se do té doby uzavřený přechod otevře a klesne napětí na jeho svorkách. Z důvodu značného úbytku při sepnutém stavu se nepoužívá pro trvalé spínání. Jeho výhodou je možnost sepnutí nebo vypnutí pomocí malé změny napájecího napětí. [10,11,12]



Obr. 16 Voltampérová charakteristika diaku [12]

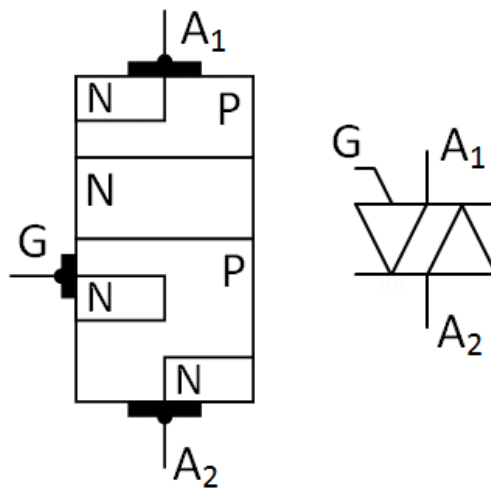
Používá se proto pro vytváření proudových impulzů ke spínání tyristorů, triaků, případně jako přepět'ová ochrana. Mezi hlavní parametry patří hodnota spínacího napětí  $U_{SP}$  a maximální proud  $I_{MAX}$ .

Proud procházející diakem by neměl překročit maximální povolenou hodnotu  $I_{MAX}$ , kterou definuje výrobce z důvodu tepelného poškození diaku.

- Spínací napětí  $U_{SP}$  dosahuje hodnot 20 až 40 V,
- Proud  $I_{max}$  je v řádech jednotek ampér, [10,11,12]

## 2.4 Triak

Jde o speciální provedení obousměrného tyristoru s účelem spínání obou polarit napětí. Je to pětivrstvá součástka PNPNP, resp. NPNPN se třemi vývody. Princip funkce této součástky si lze vysvětlit jako antiparalelní zapojení dvou čtyřvrstvých struktur. Triak je používán pro spínání a regulaci výkonu střídavých motorů, které jsou například ve vysavačích a vrtačkách. [10,11,12]

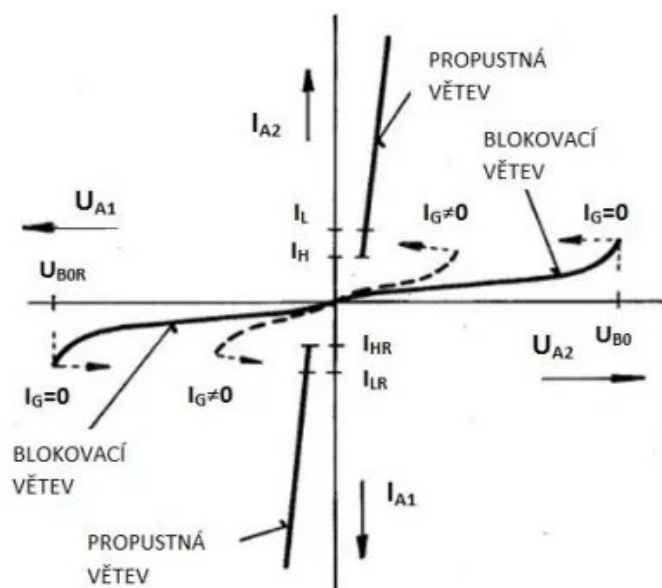


Obr. 17 Struktura triaku a jeho schématická značka [12]

Po připojení napětí s libovolnou polaritou dojde k rozdělení struktury na dva prvky, a to závěrně polovanou diodu a propustně polovaný diodový tranzistor. Následné vyvedení řídicí elektrody umožňuje vznik řídicího prvku.

VA charakteristika triaku je zobrazena na obrázku (Obr. 18).

Po přivedení řídicího signálu na svorky G a  $A_1$  dochází k sepnutí triaku s tím, že řídicí proud může dosahovat jak kladného, tak záporného náboje, a to při obou polaritách napětí mezi svorkami  $A_1, A_2$ . Tato vzájemná kombinace řídicího a anodového napětí poskytuje čtyři různé typy spínání. [12,13]



Obr. 18 Voltampérová charakteristika triaku [13]

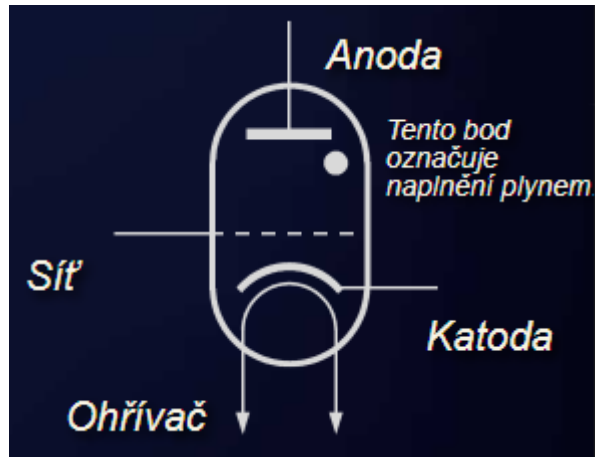
Mezi hlavní parametry triaku řadíme maximální napětí  $U_{RRM}$  (do 1000 V) a maximální proud  $I_F$  (desítky ampér).

Hlavní odlišení triaků oproti tyristorům je v dynamických parametrech. U obou spínacích prvků je zapínací proces charakterizován zapínací dobou a samotnou strmostí nárůstu propustného proudu. Triaky nemají udávanou vypínací dobu oproti tyristorům, jelikož se vypínací proces podstatně liší od procesu u tyristorů. Hlavní rozdíl je v tom, že triakem prochází proud obou polarit, a tak při každé polaritě prochází proud jinou částí této pětivrstvé struktury. V případě průchodu proudu kladné nebo záporné polarity dochází k tomu, že volné nosiče z vodivé části proniknou pomocí difúze do oblasti nevodivé. V této oblasti setrvávají po určitou dobu i po tom, co propustný proud klesl na minimum. Pokud byl tento pokles proudu dostatečně strmý a je přiloženo k triaku napětí opačné polarity, pak jsou tyto nosiče urychleny vzniklým elektrickým polem a sepnou součástku. Následně triak vede proud v opačném směru a dojde k jeho vypnutí. Znovuzapnutí triaku je následně podmíněno velikostí procházejícího proudu bezprostředně před komutací a také strmost nárůstu napětí  $du/dt$ . [12,13]

## 2.5 Tyratron

Jedná se o elektrickou výbojku, která je plněna inertním plynem do skleněné banky. Nejčastěji se používá plynů typu xenon, neon nebo rtuťové výpary. Pokud je Tyratron využit pro spínání vysokonapěťových aplikací nebo je potřeba dosažení velmi krátkých spínacích časů, pak je plněn vodíkem. [14]

Konstrukce sestává z jedné nebo dvou mřížek, kdy po přiložení kladného elektrického napětí na jednu z nich dojde k zapálení samostatného elektrického výboje mezi anodou a katodou. Dochází k přenosu velkých elektrických proudů. [14]

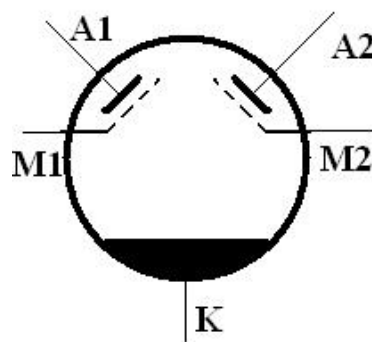


Obr. 19 Schématická značka tyratronu [14]

Tyratron se využívá pro spínání vysokoenergetických zařízení (radarová technika), jako usměrňovač nebo řídicí prvek pro proudové obvody. Tyristor je polovodičovou analogií tyratronu.

## 2.6 Ignitron

Jde o elektrickou výbojku jejíž základ tvoří ocelový kontejner, který obsahuje rtuťovou katodu. Součástí také obsahuje zapalovač v podobě malé elektrody, která se dotýká rtuťového obsahu v nádobě. Následné použití externího zdroje napětí na této zapalovací elektrodě spustí ignitron a vytvoří se vodivý oblouk v této zapalovací trubici. Tento oblouk trvá po celou dobu, kdy je na zapalovací elektrodu dodáváno externí napětí, nebo dokud neztratí příliš mnoho energie. [15]



Obr. 20 Schématická značka ignitronu [15]

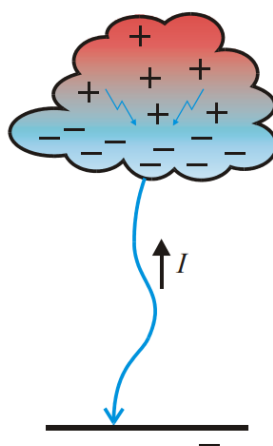
Z hlediska správné funkčnosti je potřeba dbát na zajištění dotyku zapalovací elektrody s hladinou rtuťové anody. Proto je potřeba zaručit stabilního umístění a svislé polohy pro bezproblémovou funkci ignitronu.

Použití této součástky je možné v celé řadě průmyslových odvětví: sváření, lokomotivy, elektromotory a transformátory.

V průběhu let byly ignitrony nahrazeny novějšími polovodičovými součástkami, ale i tak díky jejich přepracované konstrukci najdou zastání v aplikacích s pulzním výkonem. [15]

### 3 ELEKTRICKÉ VÝBOJE

Nejběžnějším elektrickým výbojem, který můžeme pozorovat v přírodě je blesk. Tento jiskrový výboj vzniká při bouřkách, kdy dochází k silné separaci kladných a záporných nábojů ve vzduchu nebo mraku. Kladně nabité částice mají tendenci stoupat vzhůru a záporně nabitě částice padají do středních a nižších vrstev. Následně může dojít ke vzniku blesku mezi dvěma mraky, mraky a zemí a mrakem a stratosférou. Jde o výboj, který dosahuje několika desítek tisíc ampér a teploty v řádech tisíců stupňů Celsia. [16,17]



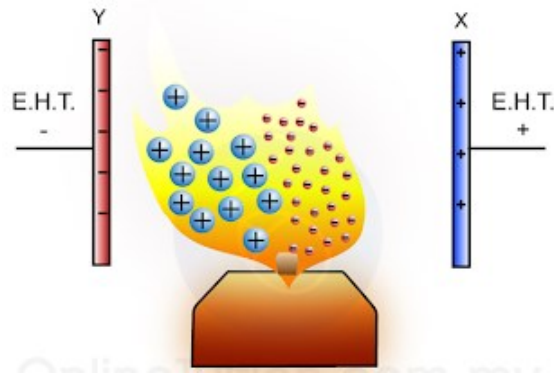
Obr. 21 Schematické znázornění přenosu náboje v mraku během bleskového výboje [16]

#### 3.1 Nesamostatný a samostatný výboj v plynu

Okolní vzduch je za běžných okolností dobrým izolantem, to dokazují i experimenty z elektrostatiky, kde výchylka např. na elektroskopu zůstává delší dobu stálá.

Plyny lze ovšem ionizovat, tedy rozštěpit jeho molekuly na elektrony a kladné ionty. Toho můžeme dosáhnout i při jednoduchém experimentu, kdy použijeme běžnou svíčku, kterou vložíme mezi dvě rovnoběžné kovové desky, které jsou připojeny ke zdroji vysokého napětí. Následně lze pozorovat vychýlení plamene směrem k záporně nabitě kovové desce. [16,17]

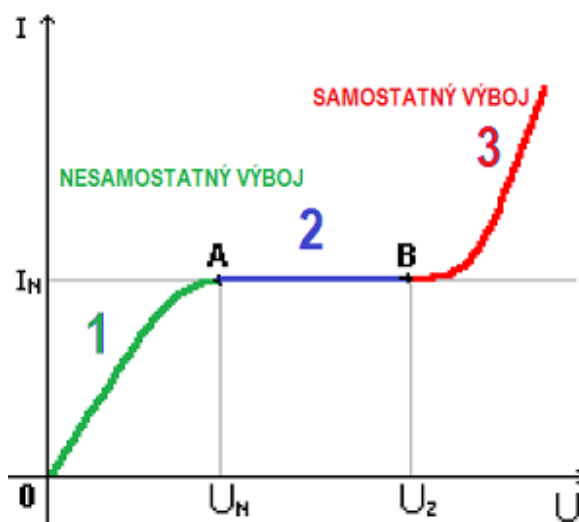




Obr. 22 Experimentální pokus ionizace plamene svíčky [18]

Jako ionizátor považujeme zdroj, který dodává potřebnou energii k rozštěpení molekul atomů, může se jednat o plamen, radioaktivní nebo rentgenové záření. Elektron, který vznikne ionizací se může spojit s neutrální molekulou a vytvořit tak záporný iont. Zároveň uvnitř plynu probíhá i opačný jev, kterému říkáme rekombinace. Pokud se takový ionizovaný plyn nachází v elektrickém poli mezi dvěma elektrodami, pak vzniká elektrický proud. Ten má charakter uspořádaných kladných iontů, které se pohybují k záporně nabitě katodě, a naopak záporně nabitých iontů pohybujících se k nabitě anodě. Všechny ionty, které dorazí na tyto elektrody ztratí svůj náboj a stávají se neutrálními atomy. Takový elektrický proud, který je udržován jen po dobu působení ionizátoru se nazývá nesamostatný výboj. Je to z toho důvodu, že ve chvíli, kdy přestane ionizátor působit dojde k převládnutí rekombinace na úkor ionizace a elektrický proud zanikne. Pro měření elektrických vlastností ionizovaného plynu se používá ionizační komora. Konstrukce se skládá z deskového kondenzátoru v kovovém krytu s okénkem, kterým proniká ionizující záření do prostoru mezi deskami. Díky této komoře lze sestavit voltampérovou charakteristiku výboje. V případě malého napětí zanikne většina iontů rekombinací ještě dříve, než dorazí na elektrody. Během této fáze je počet elektronů, který předá svůj náboj elektrodám přímo úměrný napětí a platí tak Ohmův zákon. Díky rostoucímu napětí se pohyb elektronů zrychluje a při napětí  $U_n$  již převládá většina nestačí rekombinovat a doletí tak k elektrodám. Ionizační komorou prochází nasycený proud, na který změny rostoucího napětí nemají vliv a neplatí tak v tuto fázi Ohmův zákon. Další zvýšení proudu nastává až za předpokladu překročení zápalného napětí  $U_z$ . Příčinou růstu proudu je ionizace nárazem – ionty a elektrony, které vznikly při ionizaci narážejí důsledkem pohybu na neutrální molekuly v okolí a tím jim předávají svou kinetickou energii získanou urychleným elektrickým polem. Pokud jsou urychleny dostatečně, pak díky jejich kinetické energii jsou schopny po nárazu

ionizovat zasaženou molekulu. Dochází tak k lavinovému efektu a nárůstu iontů, který umožňuje samostatný výboj, který je nezávislý na vnějším izolátoru. [16,17,18]



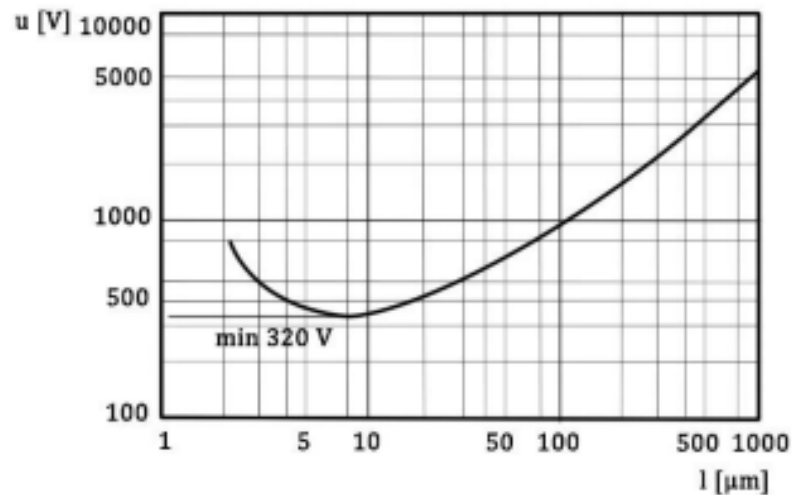
Obr. 23 Voltampérová charakteristika výboje [19]

U samostatného výboje se mohou uplatnit i elektrony, které jsou uvolněné z elektrod dopadem iontů. Tomuto ději říkáme sekundární emise. Další způsoby, jak může dojít k uvolnění elektronů z elektrody jsou:

- Tepelná emise – dostatečné rozežhání elektrody,
- Fotoemise – při dopadu ultrafialového záření,
- Tunelový jev – vytržení elektronů pomocí silného elektrického pole v blízkosti anody, [16,17,19]

### 3.1.1 Elektrická vodivost plynů

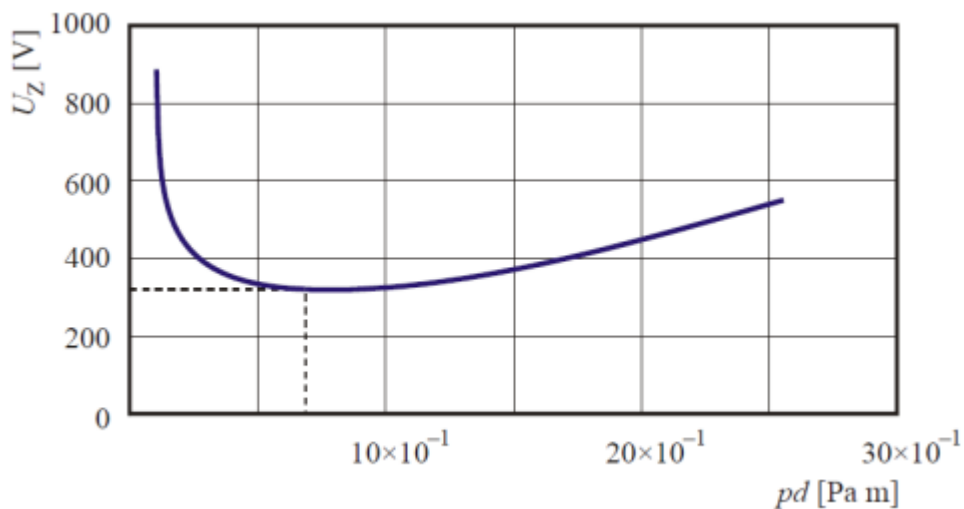
Plyny jsou považovány za velmi dobré izolanty v případě, že na ně nepůsobí velmi silné elektrické pole. V elektrických zařízeních je jako dielektrikum nejvíce využíváno vzduchu. Obrázek (Obr. 24) zobrazuje závislost průrazného napětí vůči vzdálenosti vzduchové mezery při tlaku 101 kPa v homogenním elektrickém poli.



Obr. 24 Elektrická pevnost vzduchu při tlaku 101 kPa [16]

Z obrázku (Obr. 24) lze snadno vyvodit, že pro přeskok mezi elektrodami, které jsou vzdálené 1 mm od sebe je potřeba přibližně napětí o velikosti 1–3 kV.

Velikost průrazného napětí je dána dle Paschenova zákona, který udává závislost napětí na součinu tlaku a vzdálenosti těchto elektrod. [16]



Obr. 25 Paschenova křivka pro vzduch [16]

### 3.2 Samostatný elektrický výboj v plynu za atmosférického a sníženého tlaku

Pro vznik elektrického výboje za atmosférického a sníženého tlaku je potřeba dosažení velkého napětí mezi elektrodami a ionizace okolního prostoru. Pro snížený tlak platí, že ionty dosahují větší energie důsledkem zředěného plynu a delších drah jejich pohybu. [16,17]

Níže jsou popsány typy výbojů, které vznikají za těchto atmosférických podmínek:

### 3.2.1 Jiskrový výboj

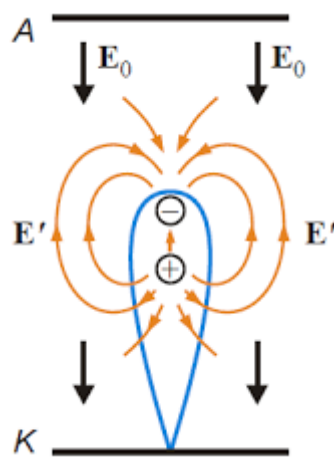
Jiskra oproti doutnavému výboji přenáší velké proudy v řádech kA÷MA v menším průřezu  $\sim \text{mm}^2$ . Od oblouku se zase liší kratší dobou trvání tohoto výboje a to kolem  $10^{-7} \div 10^{-3}$  s. Jiskrový výboj může mít dva typy zdroje, umělý a přírodní. Mezi přírodní zdroje například patří sluneční erupce a blesk. Umělé zdroje jsou ku příkladu rentgenové záření nebo svíčka pro spalovací motor. Jiskrový výboj má podobu úzkého, vlnícího se a rozvětveného výbojového kanálu, kterým projde řada krátkodobých proudových impulzů. Zároveň je doprovází intenzivní světelné a akustické projevy. K výboji dochází nejčastěji za atmosférického tlaku, nicméně lze jej realizovat i za tlaku vysokého nebo ve vakuu. [16,17]

Jednotlivé životní etapy jiskrového výboje lze rozdělit do těchto vývojových fází:

- Lavina,
- Strimer,
- Lider,
- Zpětná vlna,
- Jiskrový kanál,
- Rozpad,

#### 3.2.1.1 Lavina

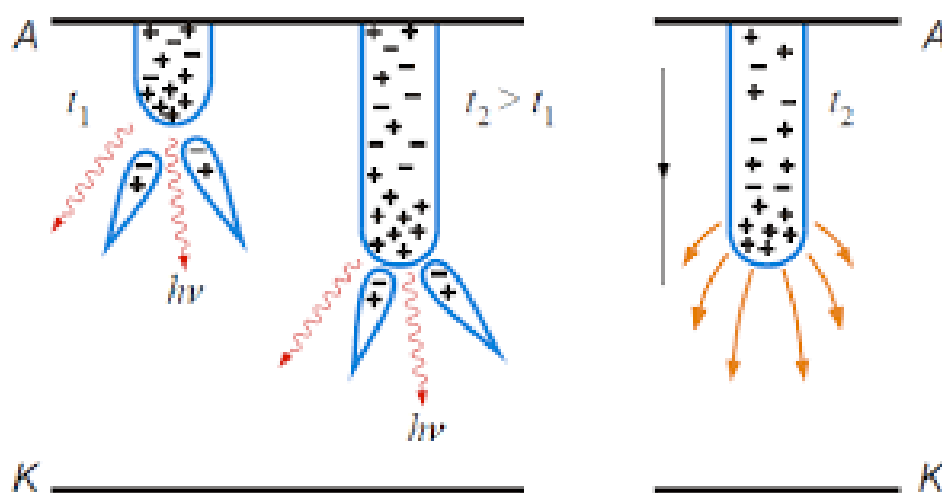
Elektronová lavina je první fází vývoje jiskry. Skládá se z rychlých elektronů nesoucích záporný náboj na začátku této laviny a pomalých kladných iontů na jejím chvostu. Vnější pole  $E_0$  je dostatečně silné pro urychlení elektronů na ionizační energie. Každý z elektronů vytváří během jeho urychlování větší počet iontů a tím se splňuje podmínka pro lavinový nárůst pohyblivých elektronů na začátku laviny, která se šíří k anodě. Díky dipolovému charakteru laviny se v čele a na chvostu laviny tvoří elektrické pole s dvojnásobnou intenzitou jeho původní hodnoty, a to usnadňuje nárůst těchto pohyblivých elektronů. [16,17]



Obr. 26 Schématické zobrazení laviny a dipólového elektrického pole [16]

### 3.2.1.2 Strimer

Výše popsaná lavina má několik možných vývojových alternativ. Pokud by se čelo rozšířilo na základě odpuzování shodných nábojů, pak poklesne hustota energie uvnitř laviny a ta následkem toho zhasne. Další možností je, že se připojí k jiné existující lavině, nebo se začne protahovat a spojí se s lavinami, které jsou na čele a na zádi a vytvoří tak dlouhý kanálek, který se nazývá strimer. Příklady šíření anodového a katodového strimeru na obrázku (Obr. 27). Největší pravděpodobnost rozvoje má strimer na anodě. V důsledku nerovností na povrchu elektrod dochází k velkým nehomogenitám elektrického pole. [16,17]

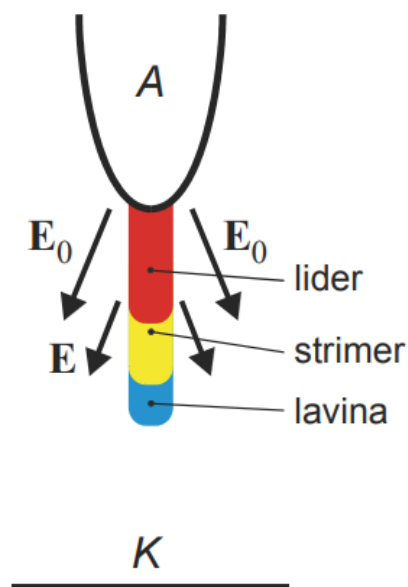


Obr. 27 Schématické zobrazení šíření strimerového kanálu [16]

Při relativně malých vzdálenostech elektrod mluvíme o transformaci pouze v případě, že lavina dosáhne anody.

### 3.2.1.3 *Liderový mechanismus*

Lider vzniká v případě delších průbojových drah strimeru. Jde o vodivější kanál s malou změnou potenciálu. Návaznost lideru na elektrodu je bez přechodového odporu. Na čele lideru se šíří strimer. [16,17]



Obr. 28 Schématické znázornění lideru [16]

Průměr lideru je kolem 1 cm (strimer 1 mm) a protékající proud dosahuje stovek ampérů při  $E \approx 10^4$  V/m. [16]

## 3.3 Obloukový výboj

Vzniká mezi dvěma uhlíkovými nebo kovovými elektrodami, ke kterým je přivedeno napětí z externího zdroje větší, než 50 V. Následné spojení elektrod způsobuje zahřívání okolí a ionizaci vzduchu. Po odpojení těchto dvou elektrod (přibližně milimetry) dochází k obloukovému výboji vlivem okolní ionizace. Takovým obvodem prochází velké elektrické proudy a teplota elektrod, okolí a plazmatu se zvyšuje na několik tisíc kelvinů. Příklady využití obloukového výboje lze pozorovat:

- V průmyslu – během sváření,
- Osvětlení – výbojové trubice a zářivky, [16,17]

### 3.4 Korona

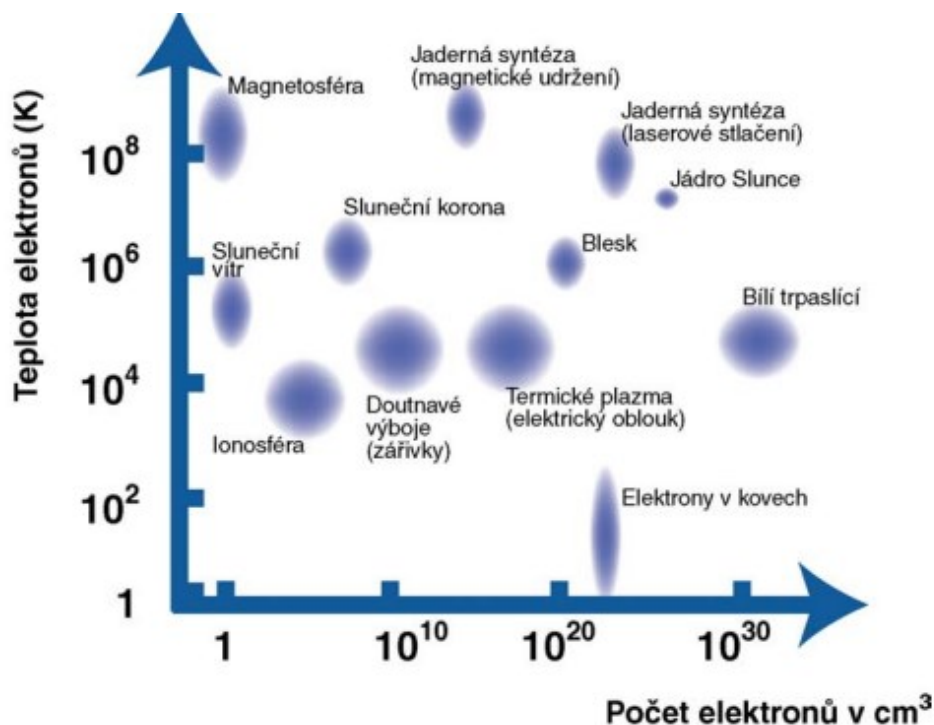
Jde o trsovitý výboj, jenž vzniká v nehomogenním elektrickém poli, který se tvoří kolem drátů, hrotů a hran s vysokým potenciálem. Vzniká v případě, že intenzita elektrického pole je dostatečná pro spuštění lavinové ionizace v nejbližším okolí těchto předmětů. Při koruně dochází ke ztrátám na vedení velmi vysokého napětí. V praxi tento jev můžeme pozorovat v silných atmosférických polích před bouřkou, na stožárech lodí a útesech. Je také znám jako Eliášovy ohně. [16,17]

### 3.5 Doutnavý výboj

Jde o samostatný typ elektrického výboje, který vytváří nízkoteplotní a nerovnovážnou plazmu. Využití můžeme nacházet u osvětlovací techniky, povrchové úpravy a analýze materiálů. Pro jeho vznik je potřeba výbojové trubice, která je vyplněna zředěným plynem, kde jsou umístěny dvě elektrody. Díky nízkému tlaku je zápalné napětí poměrně nízké, typicky 100 až 1000 V. [16,17]

## 4 PLAZMA

Plazma je ionizovaný plyn, který se skládá z iontů a elektronů. Obsahuje také neutrální atomy a molekuly, jenž vznikají vytržením elektronu z elektronového obalu, nebo roztržením molekul. Jako plazmu označujeme ionizovaný plyn, který vykazuje kolektivní chování a kvazineutralitu. Jde také o čtvrté skupenství hmoty, tvoří až 99 % našeho vesmíru. Ve světě kolem nás lze formy plazmy pozorovat jako polární záři, blesky a u elektrického oblouku. Ve vesmíru je stavebním kamenem mnoha hvězd, mlhovin, komet a slunečních větrů. První poznatky o tomto skupenství pochází z 19. století a první pokusy se datují do dvacátých let 20. století. [20]



Obr. 29 Příklady výskytu plazmatické formy podle koncentrace a teploty elektronů [20]

### 4.1 Dělení podle teploty

Rozlišujeme 2 druhy plazmatu podle teploty, a to nízkoteplotní a vysokoteplotní. Nízkoteplotní plazma se vyskytuje například u zářivek, výbojek a elektrických oblouků. Vysokoteplotní plazma dosahuje teplot  $10^6$  K a vyskytuje se ve hvězdách a u experimentů s řízenou termonukleární syntézou. [20,21,22]



## 4.2 Dělení podle ionizace

Tento parametr vyjadřuje poměr počtu ionizovaných částic vůči celkovému počtu částic. Jde o jeden z nejdůležitějších parametrů, který určuje i chování plazmy. Je značně ovlivněn teplotou a určuje se podle Sahovy rovnice. Rozlišujeme tedy ionizaci:

- Slabou,
- Silnou,

U slabě ionizované plazmy je koncentrace nabitých částic velmi malá oproti množství neutrálních molekul. Naopak u silně ionizované plazmy je koncentrace nabitých částic v majoritním podílu vůči neutrálním molekulám.

Dodávat a ionizovat částice lze těmito způsoby:

- Ionizace molekulou,
- Ionizace pozitivním iontem,
- Ionizace fotonem,
- Termická ionizace, [20,21,22]

## 4.3 Diagnostika plazmatu

Diagnostické metody se dělí do dvou skupin, a to na aktivní (kontaktní) a pasivní (bezkontaktní). Hlavní rozdíl je v metodě sběru dat, tedy zda je do plazmy vložena měřicí sonda, případně zda jsou data sbírána v okolí plazmy a nezasahují tak přímo do ní. Zároveň by měla být snaha o co nejmenší narušení dějů uvnitř plazmy kontaktní metodou. Díky tomuto měření jsme schopni získat data o tlaku, intenzitě elektrického pole, driftové rychlosti částic atp. [20,21,22,23]



Obr. 30 Výbojová trubice se sondami [23]

#### 4.4 Plazma a elektrický proud

Plazma je vodivá, jelikož obsahuje volné elektrické náboje. Její koeficient tepelné vodivosti a dynamická viskozita ionizovaného plynu se mění na základě koncentrace vodivých částic. Na plazmu působí i silné magnetické pole. Vodivost plazmy a elektromagnetické síly mohou zajistit, že hustota záporných a kladných nábojů se vyrovná. Tomuto vyrovnání říkáme kvazineutralita. Dle hustoty elektrického proudu se plazma nachází ve třech formách:

- Temný náboj,
- Doutnavý náboj,
- Obloukový výboj,

Během průchodu elektrického proudu plazmatem dochází k tzv. pinch efektu, což je jev, kdy dochází ke stlačení v kolmém směru. Elektrický proud obvykle následuje indukční čáry magnetického pole. Ty mají zhroucený tvar, který je způsoben superpozicí vnějšího magnetického pole s magnetickým polem elektrického proudu. [21,24]

## 5 LASER

Z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation v překladu zesilování světla stimulovanou emisí záření.

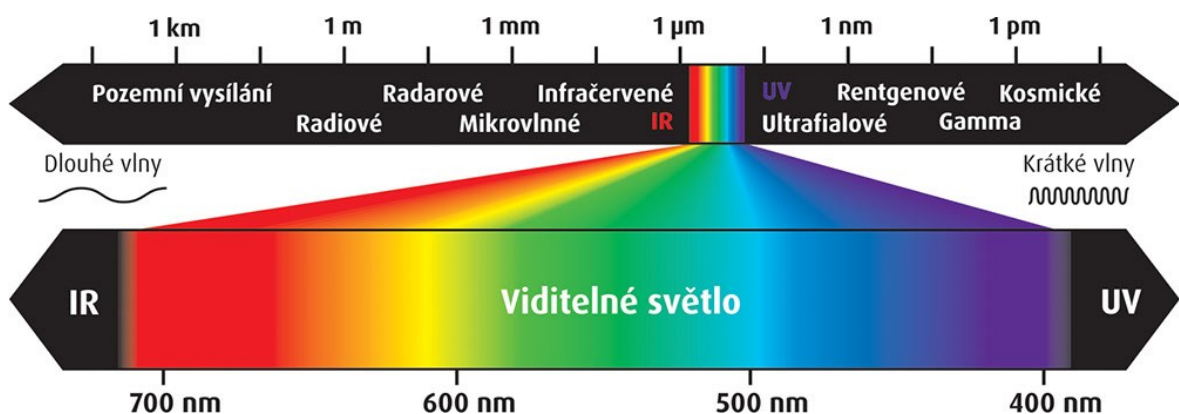
Jde o optický zdroj elektromagnetického záření, které je schopno zesílit světelné vlnění a vyzářit tak úzký svazek paprsku, který je vysoce koherentní a monochromatický. Tento jev nastává po interakci fotonu s atomem. Tuto energii je možné soustředit ve velice krátkém čase, může jít až o femtosekundy. [25]

### 5.1 Historie laseru

Albert Einstein popsal již v roce 1917 první princip laseru, ten ovšem vznikl až v roce 1960. Předchůdcem laseru byl maser sestavený fyzikem Charlesem Townesem, což bylo zařízení pracující na stejném principu, ovšem generovalo mikrovlnné záření. V roce 1960 Theodore H. Maiman předvedl první funkční laser s krystalem rubínu, který ovšem pracoval pouze v pulsním režimu. O zdokonalení se zasloužili sovětští fyzici Nikolaj Basov a Alexandr Prochorov, kteří použili více než dvě energetické hladiny. V roce 1964 obdrželi Charles Townes, Nikolaj Basov a Alexandr Prochorov Nobelovu cenu za fyziku v oblasti kvantové elektroniky. [25]

### 5.2 Spektrum viditelného světla

Lidské oko je citlivé na velmi malou část vlnového spektra. Je to konkrétně vlnění o vlnové délce 760 nm až 390 nm. Obsahuje spektrální barvy a každá z barev má svůj interval vlnových délek. Nejdelší vlnovou délku má barva červená, nejkratší naopak fialová. Další sousední oblasti spektra se nazývají infračervené záření, které cítí naše receptory na pokožce a ultrafialové záření, které můžeme pozorovat vlivem opálení pokožky. [26]



Obr. 31 Zařazení viditelného světla v elektromagnetickém spektru [29]

### 5.3 Základní dělení laseru zdroj

Vlnové délky záření – infračervené, ultrafialové, rentgenové a viditelné pásmo,

Aktivního prostředí – plynové, kapalinové, pevnolátkové, polovodičové a plazmatické,

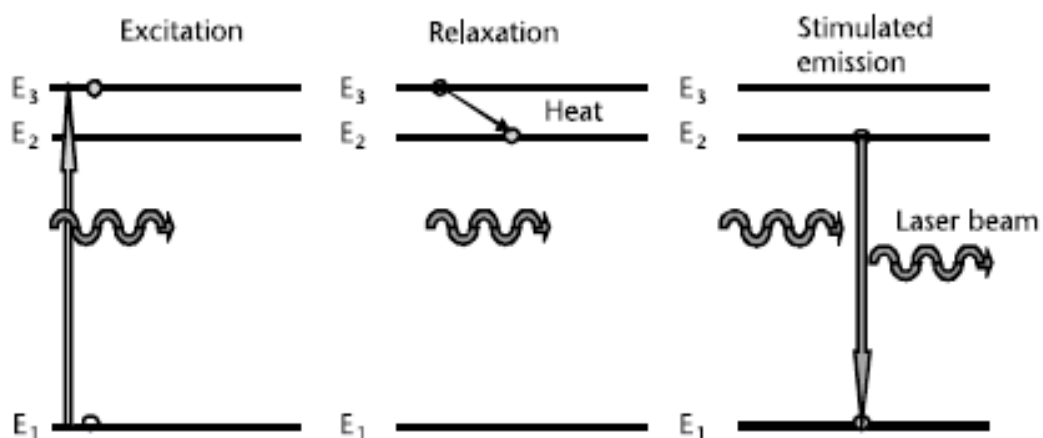
Délky generovaného impulzu – kontinuální a pulzní

Energetických hladin na kvantovém přechodu – elektronové, jaderné, molekulární, atp,

Podle použití – průmysl, zdravotnictví, holografie a ostatní, [25]

### 5.4 Fyzikální princip laseru

Jde vlastně o optický zesilovač, který využívá stimulování emise fotonů elektromagnetického záření. Princip funkce laseru spočívá ve využití zákonů kvantové mechaniky a termodynamiky. Základní část laseru je aktivní prostředí, které je buzeno (opticky, elektricky apod.). Buzení vyjadřuje schopnost dodávat do laseru z vnějšího zdroje energii, která je následně díky stimulované emisi vyzářena laserovým svazkem do okolí. K dosažení této funkce je potřeba využít optického rezonátoru. [25]



Obr. 32 Proces stimulované emise [25]

#### 5.4.1 Inverze populace

Stav, kdy se nachází více elektronů na metastabilní hladině než na hladině základní. [25]

#### 5.4.2 Metastabilní hladina

Aktivní prostředí daného laseru musí obsahovat metastabilní hladinu. Tato hladina je potřebná pro dostatečné setrvání elektronu po delší dobu, aby se zajistila interakce s dalším

fotonem. Vlastnostmi musí být hladina opticky homogenní a průzračná. Musí být také tepelně odolná, chemicky stabilní a proces výroby by měl být jednoduchý. [25]

### 5.4.3 Přechod na vyšší energetickou hladinu

Při přechodu z nižší energetické hladiny na vyšší mluvíme o absorpci, kdy foton zaniká. Aktivní prostředí má snahu setrvávat ve stavu termodynamické rovnováhy. Právě díky buzení je tento stav narušen a aktivní prostředí je převedeno z nižší energetické hladiny do vyšší – tento jev se nazývá inverze populace. [25]

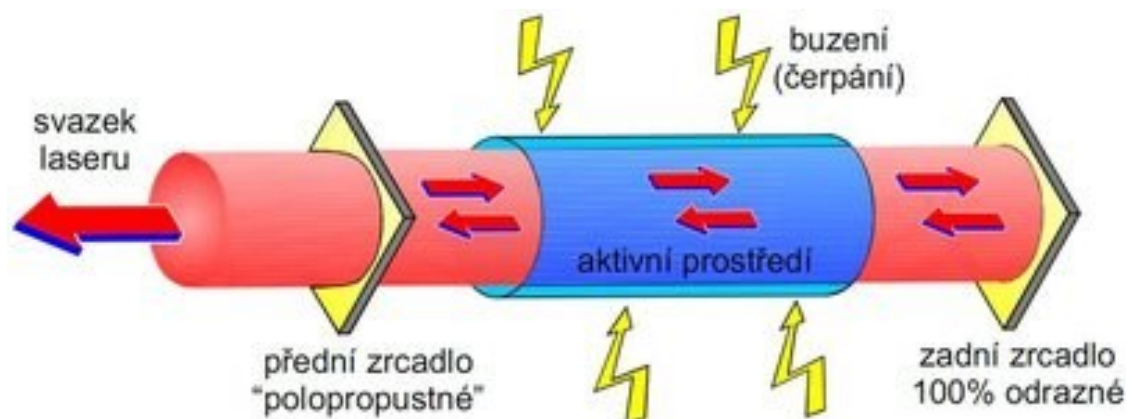
### 5.4.4 Návrat na základní energetickou hladinu

Při přechodu z vyšší energetické hladiny do nižší je tímto prostředím vyzářen foton. U indukované emise je tento přechod vyvolán dodaným vnějším fotonem, který během interakce zachovává svou existenci a novému vyzářenému fotonu „předává“ svoje vlastnosti. Tyto fotony tak mají stejnou trajektorii, vlnovou délku, směr, fázi, a proto díky jejich spojení vytváří jednu vlnu, která má dvojnásobnou amplitudu a dvojnásobnou energii. [25]

## 5.5 Konstrukce laseru

Každý laser se skládá z těchto částí:

- Aktivní prostředí,
- Optický rezonátor,
- Zdroj energie (excitace),



Obr. 33 Obecné schéma laseru [28]

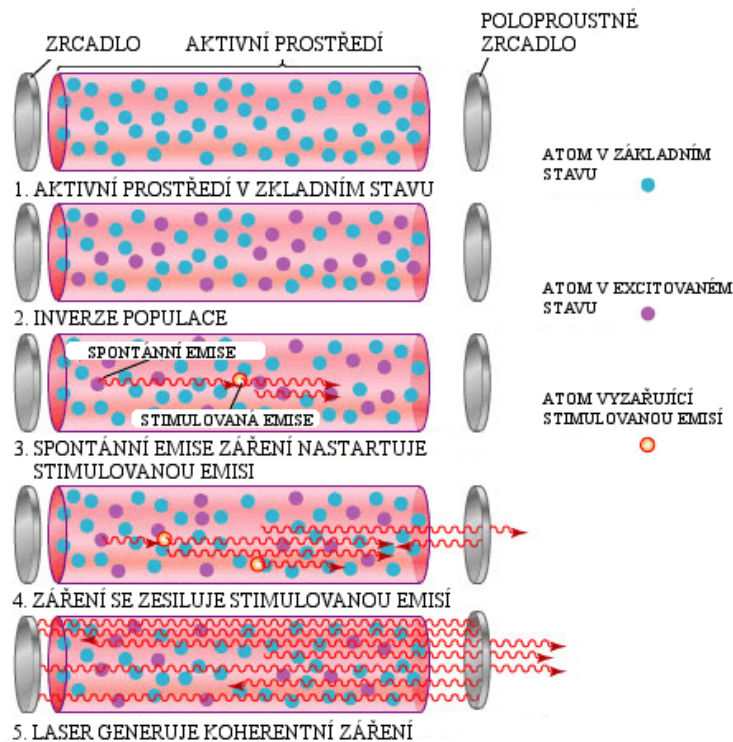
## 5.6 Aktivní prostředí

Jako aktivní prostředí si lze představit jakoukoliv pevnou látku s příměsí, kapalinu anebo směsí plynů. Důležitým faktorem ovšem je, aby aktivní prostředí mělo oddělené kvantové energetické hladiny elektronů, které se mohou nacházet v základním stavu s nižší energií anebo v excitovaném stavu s vyšší energií. Tento element může být nejčastěji atom, ale i chemická vazba anebo vibrační stav molekuly. Nejčastěji používaná aktivní prostředí:

- Plyn, případně směsice plynů,
- Polovodič s P-N přechodem,
- Monokrystal,
- Polovodičové multivrstvy, [25]

## 5.7 Optický rezonátor

Jde o optickou dutinu, která je vymezena dvojicí zrcadel, z nichž je jedno plně odrazné a druhé částečně propustné. V případě laserů, které mají dostatečně velký zisk v aktivním prostředí rezonátor nepotřebují. Pracují v režimu tzv. zesílené spontánní emise, tedy k získání potřebné intenzity jim stačí pouze jeden průchod. [25,28]



Obr. 34 Zobrazení dějů v aktivním prostředí [28]

## 5.8 Excitace

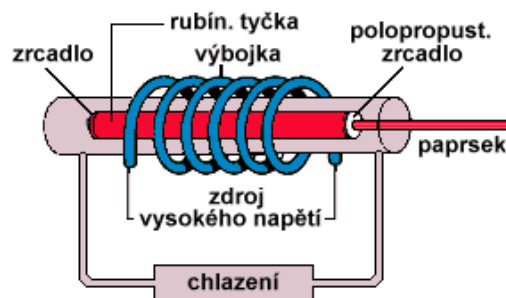
Excitace neboli buzení je proces, kdy je do aktivního prostředí dodávána energie

Rozdělujeme tyto tři základní typy buzení:

- Optické,
- Elektrickým proudem,
- Chemické buzení, [25]

### 5.8.1 Optické buzení

Dodává se formou světelného záblesku. V případě rubínového laseru je rubínová tyčinka vložena do spirálové výbojky. Následný záblesk výbojky umožní přechod atomů v aktivním prostředí na vyšší hladinu. Následný návrat do jejich základního stavu emituje část této energie ve formě laserového paprsku. Využívá se především u pevnolátkových a kapalinových laserů. [28,29]



Obr. 35 Příklad struktury optického buzení [29]

### 5.8.2 Buzení elektrickým proudem

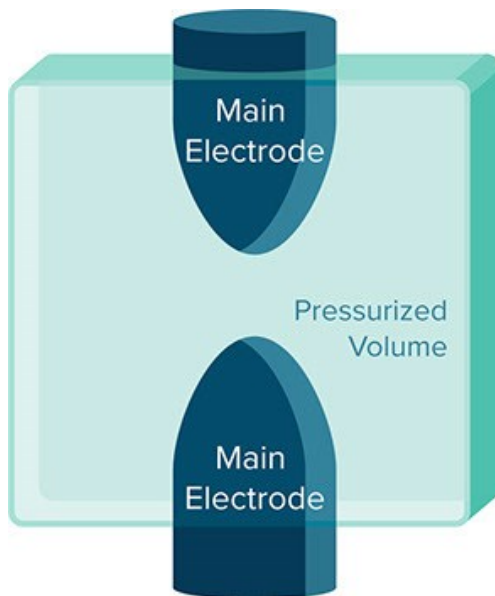
Stejně jako u optického buzení je využito elektrického výboje, který se ovšem provádí uvnitř plynové náplně laseru. Tyto lasery pracují v kontinuálním provozu a výkon lze regulovat pomocí změny objemu plynu anebo jeho průtokem. [28,29]

### 5.8.3 Chemické buzení

Využití exotermických chemických reakcí. Jde o reakci dvou plynů, například vodíku a fluoru. Jiné typy laseru získávají energii díky disociaci (štěpení) molekul jodu ultrafialovým zářením. [28,29]

## 6 JISKŘIŠTĚ

Jiskřiště pracuje na principu elektrického výboje v plynném prostředí. Je to nelineární prvek, který je napětově závislý. Jiskřiště je zkonstruováno pomocí dvou elektrod, které jsou odděleny plynnou mezerou. Tento plyn se chová jako elektrický odpor, který nedovoluje přeskoku elektrické jiskry. Takové jiskřiště je tedy rozpojené a mezi oběma elektrodami naměříme vysokou impedanci, která se blíží nekonečnu. [30,31,34]



Obr. 36 Obecné znázornění jiskřiště se dvěma elektrodami [30]

Jakmile potenciální rozdíl napětí mezi elektrodami jiskřiště přesáhne průrazné napětí ionizovaného plynu, dojde k vytvoření elektrického výboje.

Skokově se změní impedance mezi elektrodami, která se bude blížit nule. Hodnota napětí se následně sníží na tzv. obloukové napětí. Doba setrvání tohoto stavu je závislá na hodnotě tekoucího proudu, dokud proud neklesne pod tzv. kritickou hodnotu. Následně dojde vlivem nestabilního režimu obloukového výboje k jeho zhasnutí. Opět začne růst impedance mezi oběma elektrodami a dochází k obnově nevodivého stavu. Podle konstrukce je jiskřiště schopné opakovaně zvládat impulzní proudy v řádech kA. [31,34]



## 6.1 Technické požadavky na jiskřiště

Technické požadavky se týkají samotného typu a konstrukce jiskřiště, jeho využití, způsobu zapalování, ale také i zhášení. Mezi další faktory řadíme i cenu jiskřiště, jeho spolehlivost, opakovatelnost použití, dobu zpoždění a velikost přeskokového napětí.

Cena jiskřiště je úzce spjata s technickým provedením samotného zapalování. To může být řešeno například pomocí laseru. Ten je cenově velmi nákladný z důvodu komplikovanosti jeho použití a konstrukce, ale dosahuje lepších parametrů samotného spínání.

Spolehlivost jiskřiště je dána zejména složitostí jeho skladby a podmínkami ve kterých je využíváno. Obecně nejspolehlivější jsou elektricky zapalovaná kulová jiskřiště, a to díky jejich jednoduchosti a geometrii.

Velikost přeskokového napětí, která je potřebná k vytvoření elektrického výboje mezi elektrodami je závislá na vzdálenosti těchto elektrod a šířce vzduchové mezery. Čím větší je tato vzdálenost, tím roste i velikost tohoto napětí potřebného k přeskoku. Zároveň také na samotném průměru elektrod. [30,31,34]

## 6.2 Typy jiskřišť

Jiskřiště lze dělit do několika kategorií, a to na základě mechanického provedení, použitého média uvnitř jiskřiště, počtu elektrod a typu spínacího prvku jiskřiště.

### 6.2.1.1 Dělení podle mechanického provedení

- Kulové jiskřiště – jedná se o nejčastější provedení, v závislosti na vzdálenosti elektrod a jejich průměru se určuje potřebné zapalovací napětí,
- Rotační jiskřiště – analogické provedení rotujícího komutátoru vůči páru stojících elektrod. Pomocí regulace otáček se mění kmitočet tlumených zákmitů,
- Trubkové – způsob provedení je pomocí vodiče, který je umístěn do kovové trubky,

Dále můžeme jiskřiště dělit i z pohledu hermetického provedení na:

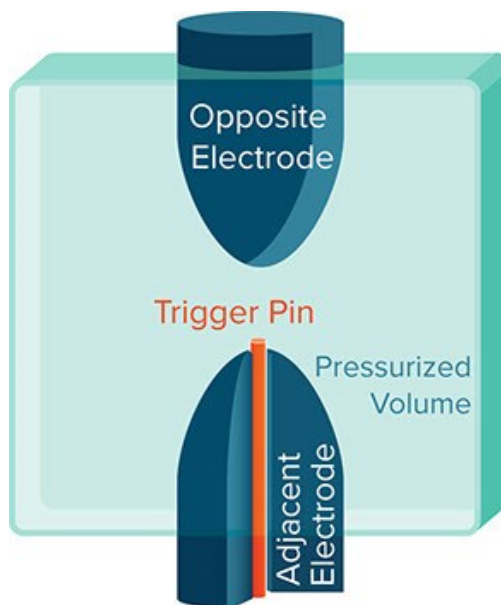
- Otevřená – lze použít jiný plyn a regulovat tlak uvnitř jiskřiště,
- Uzavřená – nelze regulovat tlak a typ média uvnitř jiskřiště, [30,31,34]

### 6.2.1.2 Dělení podle použitého média, tlaku a teploty

V případě otevřených typů jiskřišť tvoří médium okolní vzduch. V případě uzavřených typů lze prostor vyplnit plynem, který zlepšuje parametry potřebné k průrazu napětí. Může se jednat o dusík ( $N_2$ ) a fluorid sírový ( $SF_6$ ). Důležitým faktorem je také tlak a teplota uvnitř jiskřiště a možnost jejich regulace. [34]

### 6.2.1.3 Dělení podle počtu a typu elektrod

Jiskřiště jsou nejčastěji realizována pomocí dvou, nebo tří elektrod. V případě použití tří elektrod je možnost umístění třetí elektrody do jedné z hlavních, nebo ji umístit samostatně. Příklad řešení třetí spouštěcí elektrody je zobrazen na obrázku (Obr. 37). [30,31,37]



Obr. 37 Obecné znázornění jiskřiště se třemi elektrodami [30]

Samotné elektrody se vyrábí z těchto materiálů:

- Korozivzdorná ocel,
- Grafit,
- Měď,
- Wolfram,
- kombinace těchto kovů, [35]

Účelem je dosažení co nejlepších vlastností:

- Vodivost,
- Odolnost proti opalování vysokými proudy,

#### **6.2.1.4 Dělení podle způsobu spínání**

Každé jiskřiště lze spínat pomocí dvou způsobů:

- Pasivní – samovolně dodáním dostatečné úrovně napětí pro dosažení průrazu mezi elektrodami,
- Elektrické – elektricky zapalované pomocí třetí elektrody,
- Ionizací – ionizace okolního prostředí, [30]

Ionizace okolního prostředí se dále dělí na:

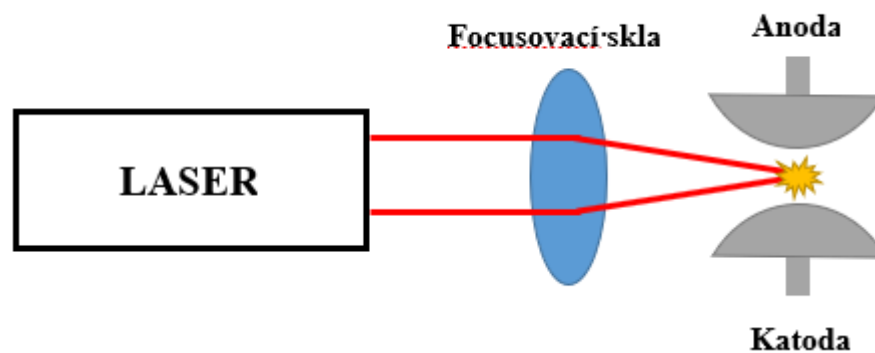
- Ionizaci pomocí laseru,
- Ionizaci pomocí UV záření (zářivka, jiskřiště se třemi elektrodami), [30,35]

### **6.3 Spínání pomocí laseru**

V případě řešení spínání pomocí laseru je takové jiskřiště složeno ze dvou elektrod a soustavy optických čoček, které směřují laserový paprsek do prostoru elektrod. Výhodou laserového řešení je také malá hodnota zpoždění a velmi krátká doba pulzu a tím i jeho strmost.

Charakteristika průrazu je vždy ovlivněna okolním atmosférickým tlakem a typem použitého média v samotném jiskřišti, dále také tvarem, materiálem a povrchovou úpravou použitých elektrod.

Pro tyto účely je nejrozšířenější použití infračerveného Nd:YAG laseru, který dosahuje energie paprsku v jednotkách stovek mJ. Taková úroveň energie umožňuje snadné překročení potřebné intenzity, která je nutná pro spuštění tunelové ionizace atomů a molekul. Toho je dosaženo soustředěním laserového pulzu do středu samotného jiskřiště. Zapálení jiskřiště je způsobeno multifotonovou ionizací, která generuje volné elektrony, jenž pomáhají snížit potřebnou úroveň průrazného napětí. [32,36]



Obr. 38 Znáornění možnosti spínání pomocí laseru

Hlavní parametry, které uzpůsobují laser jako vhodné řešení pro spínání jsou:

- Spolehlivost,
- Jednoduchá údržba,
- Dálkové řízení,
- Repetitivnost a vlastnosti pulzu,

Mezi negativa lze zařadit tyto parametry:

- Pořizovací cena,
- Požadavky na chlazení, [30]

### 6.3.1 Budoucnost laserových jiskříšť

Vývoj laserů a technologií, které je využívají lze pozorovat ve všech oblastech dnešního světa. Díky tomu i jako vedlejší produkt budou pro možnosti spínání laserových jiskříšť dostupné lepší typy laserů s daleko lepšími parametry pulzů. Postupné zmenšování, pořizovací cena, náročnost chlazení a napájecí nároky jsou každým rokem lepší pro možnosti různých aplikací a implementace takových systémů. Typickým příkladem mohou být vláknové lasery, které využívají optické vlákno pro přenos paprsku. Mezi jeho hlavní výhody patří lepší chlazení, nízký příkon, životnost a spolehlivost. [32,33,38]

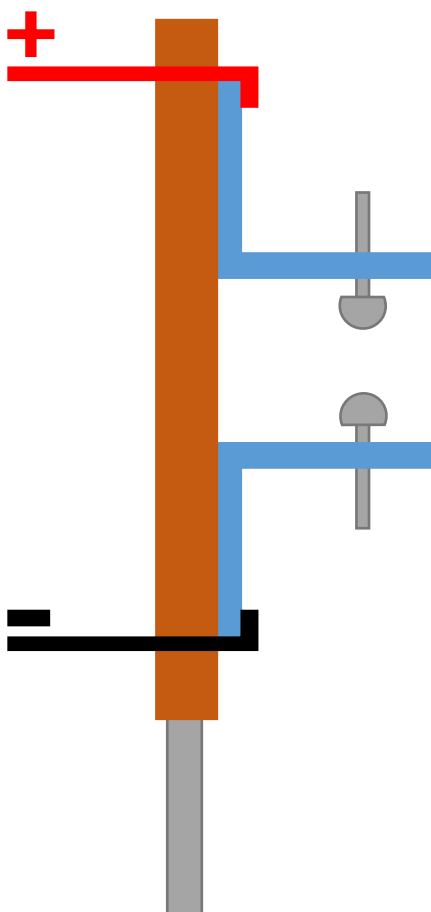
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 7 SPÍNÁNÍ ELEKTRICKÉHO PROUDU POMOCÍ LASERU

Pro tento pokus bude potřeba navrhnout a zkonstruovat základní typ dvou elektrodového jiskřiště. Navržen bude také nabíjený RC obvod, který bude dodávat na elektrody nízké napětí, které by mělo být spínáno pomocí nansekundového laseru.

### 7.1 Návrh jiskřiště

Jiskřiště je sestaveno z nevodivé základny, která je vyrobena ze dřeva. Na tuto základnu jsou pomocí šroubků upevněny dva hliníkové profily tvaru L. Do těchto profilů je nalysovaná matice typu M6, která slouží k našroubování elektrod a jejich regulaci rozestupu mezi nimi. Jako elektrody jsou zvoleny 2 vratové šrouby s válcovou hlavou, které mají pozinkovou úpravu povrchu. Na jednu z elektrod je přiveden kladný a na druhou záporný potenciál napájecím drátem o průměru 2,5 mm.



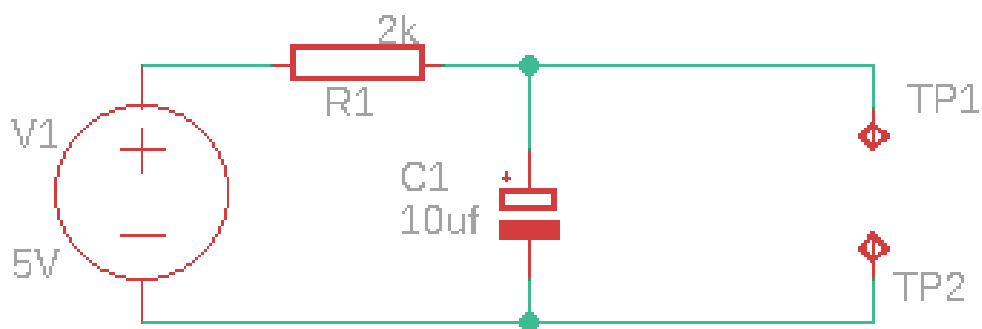
Obr. 39 Grafické znázornění konstrukce použitého jiskřiště



Obr. 40 Použité pozinkované elektrody

## 7.2 Návrh obvodu

Obvod se skládá z klasického RC článku na kuprexidové destičce, ke kterému je připojen regulovatelný zdroj napětí. Kondenzátor se po přivedení napětí začne nabíjet, doba nabíjení je závislá na velikosti předřadného rezistoru R a kapacitě kondenzátoru C. Nabíjecí proud po počátečním skoku na  $I_{Cmax}$  postupně klesá k hodnotě 0.



Obr. 41 Schéma navrženého RC obvodu

Použité hodnoty jednotlivých součástek:

- $R = 2000 \Omega$
- $C = 10 \text{ uF} / 450 \text{ V}$  po převedení =  $0.00001 \text{ F}$

Počáteční nabíjecí proud se vypočítá pomocí vzorce:

$$I_{c \max} = \frac{U_0}{R} \quad [\text{A}; \text{V}, \Omega] \quad (1)$$

Nabíjecí proud pro jednotlivé napěťové úrovně je zobrazen v tabulce (Tab.1)

Napětí zdroje [V]	5	10	15	20
Nabíjecí proud [A]	0,0025	0,005	0,0075	0,01

Tab. 1 Zaznamenané hodnoty nabíjecího proudu

Časová konstanta nabíjení kondenzátoru je vyjádřena tímto vzorcem:

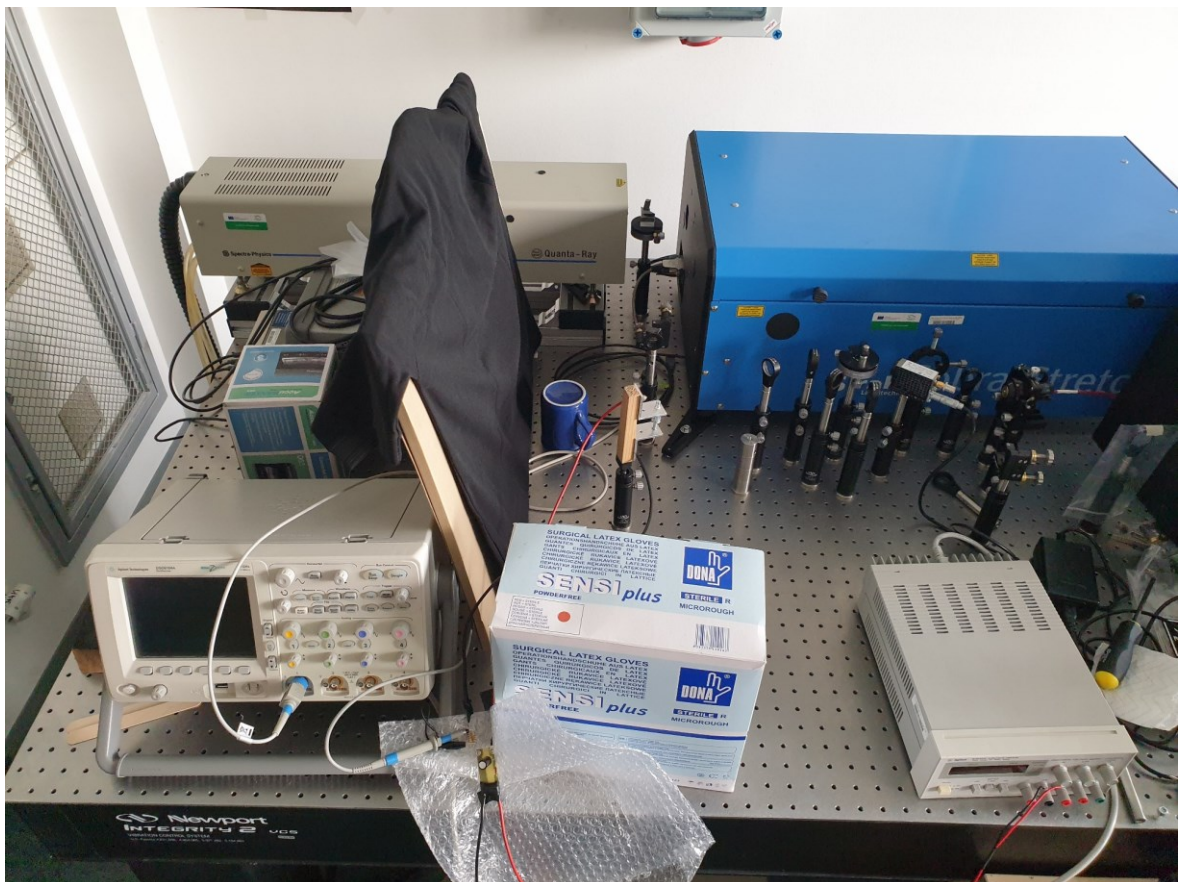
$$\tau = R * C \quad [s; \Omega, F] \quad (2)$$

Výpočet přibližné doby nabíjení po dosazení do vzorce (2):

$$\tau = 2000 * 0,00001$$

Přibližná doba nabíjení kondenzátoru je 0,02 s

### 7.3 Vybavení pro měření



Obr. 42 Zobrazení skutečného měřícího pracoviště



### 7.3.1 Zdroj napětí Agilent E3630A

Zdroj Agilent E3630A byl použit pro napájení RC obvodu, a to ve čtyřech napěťových úrovních: 5 V, 10 V, 15 V, 20 V.



Obr. 43 Zdroj napětí Agilent E3630A

### 7.3.2 Laser INDI-HG-10S

Jde o vodou chlazený laser od firmy Quanta-Ray z řady INDI. Tento laser využívá aktivního prostředí Nd:YAG, což je izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu ( $Y_3Al_5O_{12}$ ) dopovaný ionty neodymu ( $Nd^{3+}$ ).



Obr. 44 Laser INDI-HG-10S

Laser má opakovací frekvenci pulzu 10 Hz. Energie pulzu byla nastavena na 80 a 100 mJ o vlnové délce 532 nm. Délka pulzu je výrobcem udávána od 6-9 ns.

### 7.3.3 Osciloskop Agilent DSO6104A

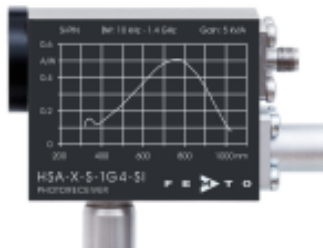
Jedná se o 4 kanálový osciloskop s šířkou pásma 1 GHz a vzorkovací frekvencí 4 GSa/s.



Obr. 45 Osciloskop Agilent DSO6104A

### 7.3.4 Fotopřijímač HSA-X-S-1G4-SI-FS

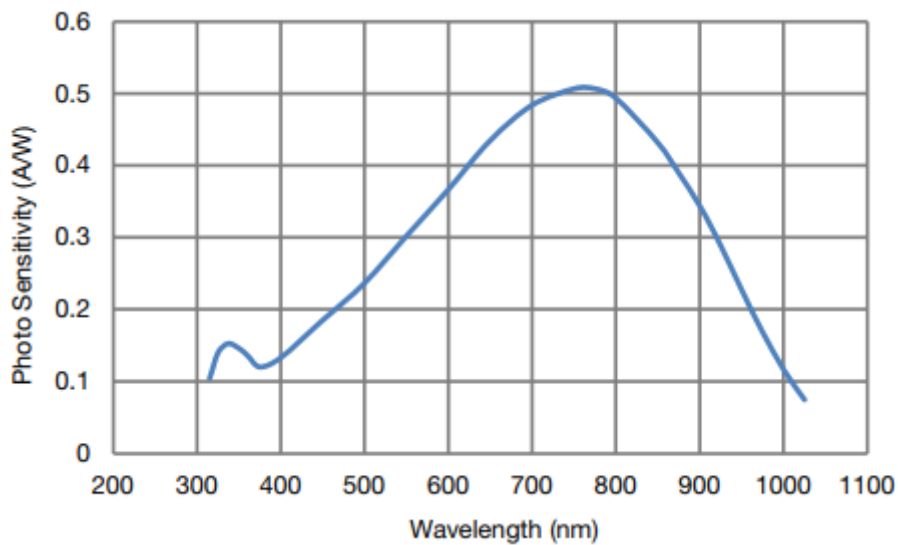
Jde o velmi rychlý fotopřijímač HSA-X-S-1G4-SI-FS od firmy FEMTO, který je schopen pomocí foto diody zaznamenávat velmi rychlé pulzy.



Obr. 46 Fotopřijímač HSA-X-S-1G4-SI-FS

Klíčové parametry:

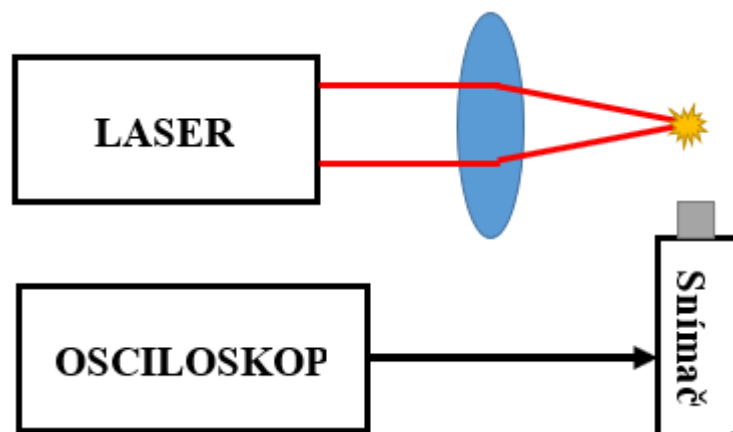
- Šířka pásma - 10 kHz až 1,4 GHz
- Transimpedanční zesilovač –  $5,0 \cdot 10^3$  V/A
- Spektrální rozsah – 320 až 1000 nm



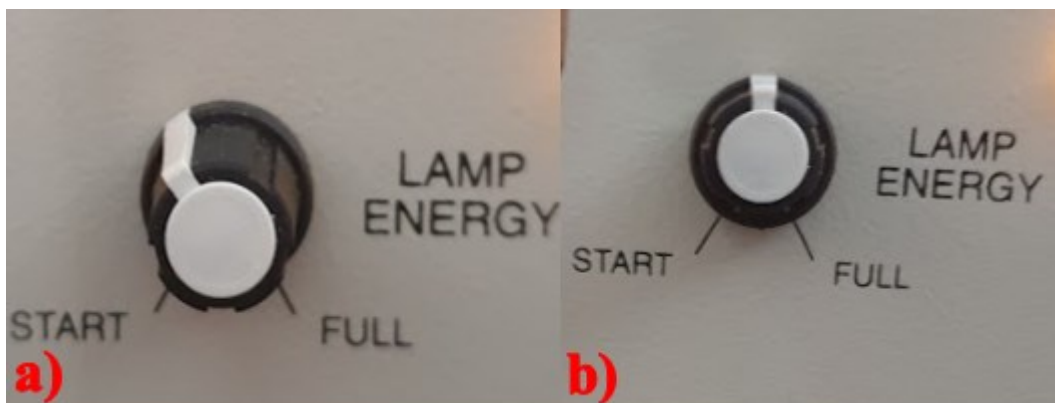
Obr. 47 Zobrazení fotocitlivosti přijímače v závislosti na vlnové délce

#### 7.4 Postup měření laserové jiskry

V první části měření bylo pracoviště zapojeno dle obrázku (Obr. 48) s cílem nasnímat časový průběh samotné jiskry laseru. Laser byl provozován v režimu dvou úrovní výkonu. K tomu sloužil otočný potenciometr, který reguloval jeho výstupní výkon (Obr. 49). Byly zvoleny dvě pozice, které odpovídají rozložení čísel 11 (80 mJ) a 12 (100 mJ) na hodinách.

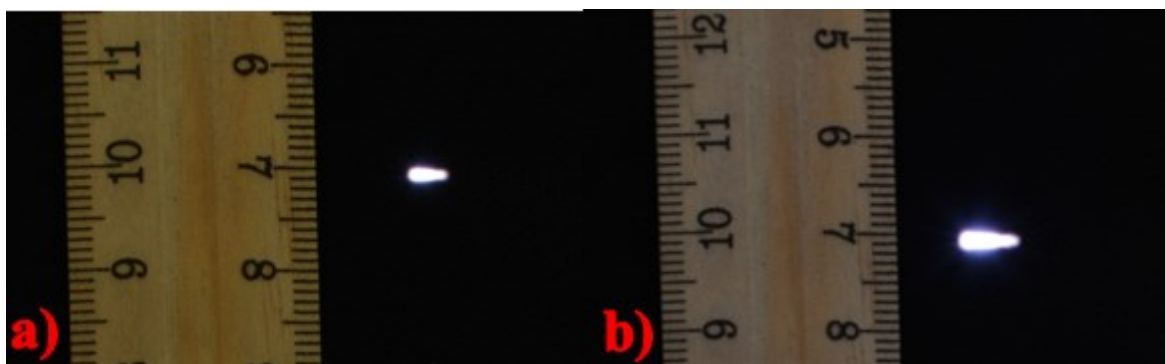


Obr. 48 Zjednodušené schéma zapojení pro měření průběhu laserové jiskry



Obr. 49 Regulátor výstupního výkonu laseru a) 80 mJ b) 100 mJ

Laserová jiskra byla také zaznamenána fotoaparátorem Nikon D5200, který byl nastaven na prioritu času s délkou expozice 1/2sec. Ze snímků (Obr. 50) jsou patrné ionizované oblasti okolního vzduchu a typický dohořívající chvost plazmatické části jiskry. Větší výkon laseru byl schopen ionizovat větší oblast a také prodlužoval délku trvání pulzu a jeho samotného dohořívání (zániku). Tato ionizovaná oblast umožní po implementaci jiskřiště snížit potřebné průrazné napětí mezi elektrodami.

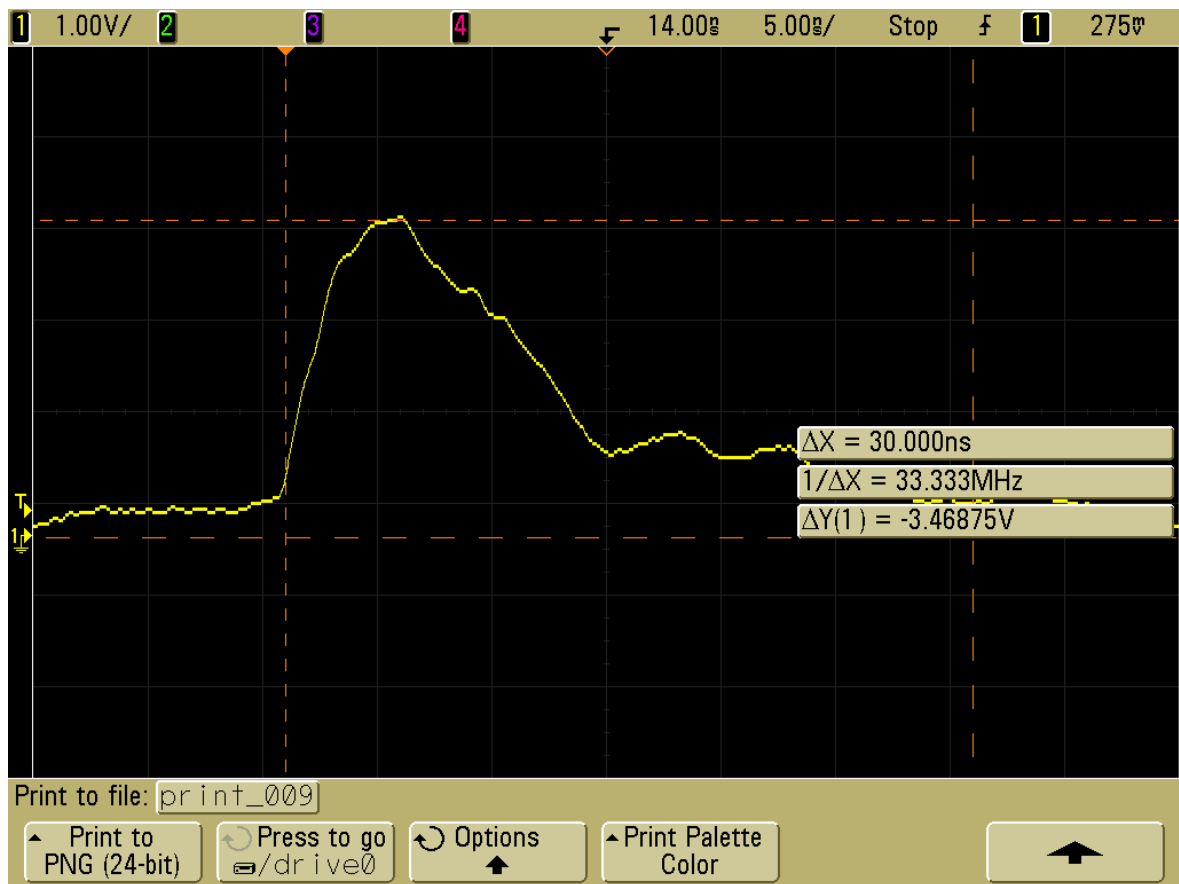


Obr. 50 Snímky laserové jiskry a) 80 mJ a b) 100 mJ

Jiskra zaniká důsledkem působení několika vnějších a vnitřních faktorů. Za prvé je to absence pokračujícího ionizování prostředí, které by dodávalo potřebnou energii pro rozštěpení molekul atomu. Začíná docházet k rekombinaci iontů, kdy se opačně nabité ionty, případně kladné ionty a elektrony spojí v neutrální molekuly plynu. Na oblast ionizované plazmy působí také okolní teplota, která postupně ochlazuje tuto jiskru.

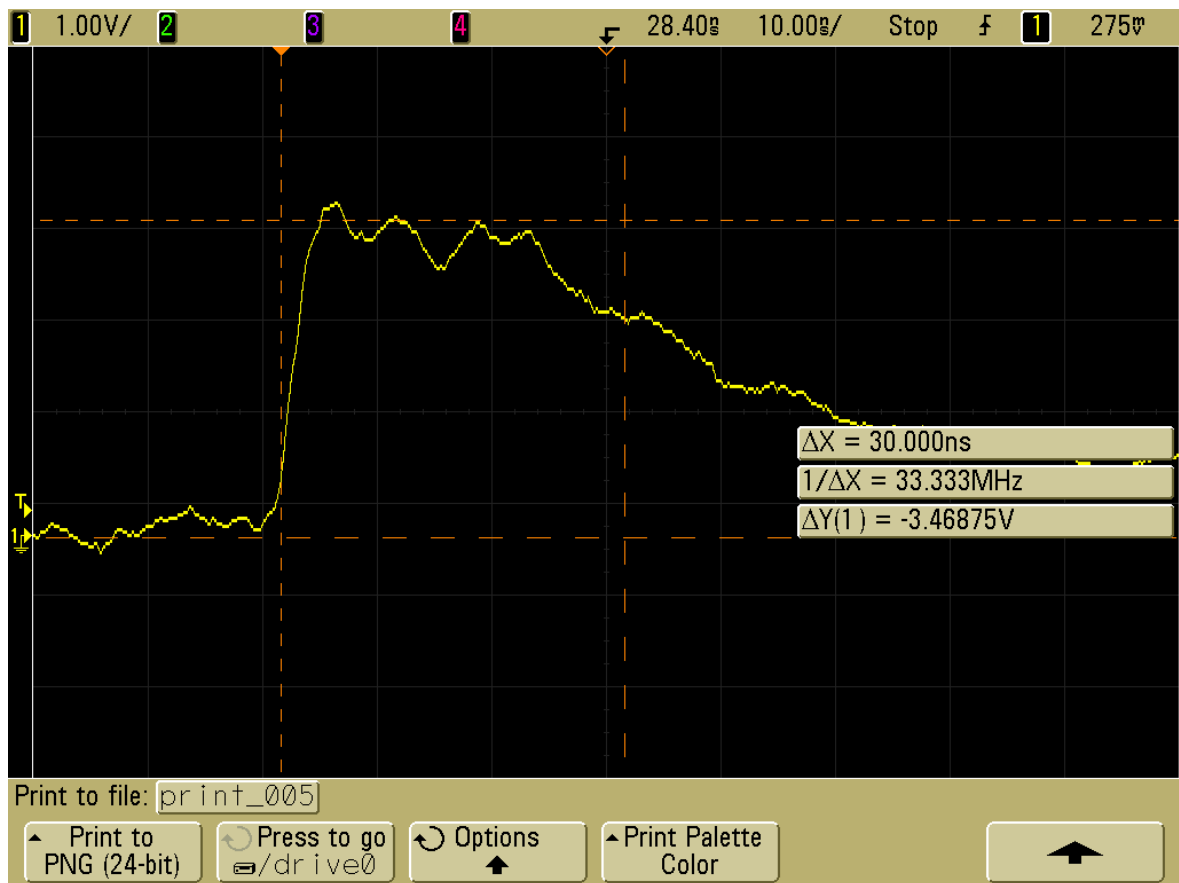
Na obrázku (Obr. 51) a (Obr. 52) je vidět časový průběh měřeného napěťového signálu zaznamenaný pomocí sondy osciloskopu. Na snímcích je vidět rozdíl výkonového nastavení laseru, který způsoboval následující rozdíly:

- časové prodloužení délky trvání samotného pulzu,
- časové prodloužení délky trvání zhášení plazmy pulzu,



Obr. 51 Průběh jiskry pro laser s menším výkonem (80 mJ)

Pro nižší výkon laseru se celková doba trvání pulzu pohybuje kolem 5 ns. Náběžná hrana je přibližně 4 ns. Doba, po kterou zaniká plazma je 25 ns. Amplitudové maximum je 3,4 V.



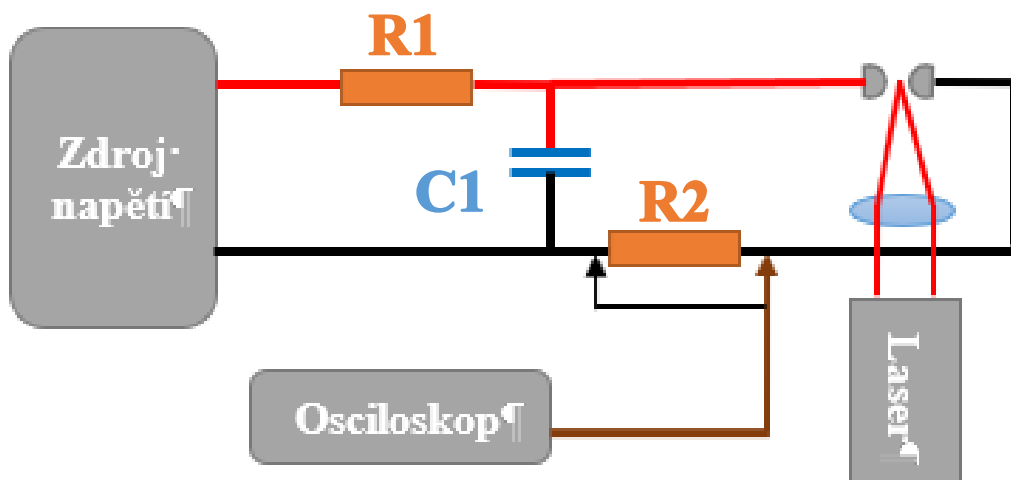
Obr. 52 Průběh jiskry pro laser s vyšším výkonem (100 mJ)

Pro vyšší výkon laseru se celková doba trvání pulzu pohybuje kolem 9 ns. Náběžná hrana je kolem 6 ns. Doba, po kterou zaniká plazma je tak 50 ns. Amplitudové maximum je mírně vyšší, přibližně 3,7 V.

Je tedy patrné výrazné prodloužení délky trvání pulzu a zejména doby, kdy dochází k jeho zhášení. Strmost náběžné hrany je v souladu s parametry, které udává výrobce laseru.

## 7.5 Postup měření možností spínání proudů pomocí jiskřiště

Pro tento pokus bylo pracoviště zapojeno dle schématu na obrázku (Obr. 53). Součástky R1 a C1 jsou připájeny na kuprexidové destičce, která je zobrazena na obrázku (Obr. 54). Rezistor R2 byl vložen jako zátěž o velikosti  $50\ \Omega$ , na které bude pomocí sondy osciloskopu měřen průběh napěťového signálu pulzu. Pomocí vodičů byla na vstupu destička připojena ke zdroji regulovaného napětí, výstup byl propojen s destičkami na jiskřišti u elektrod

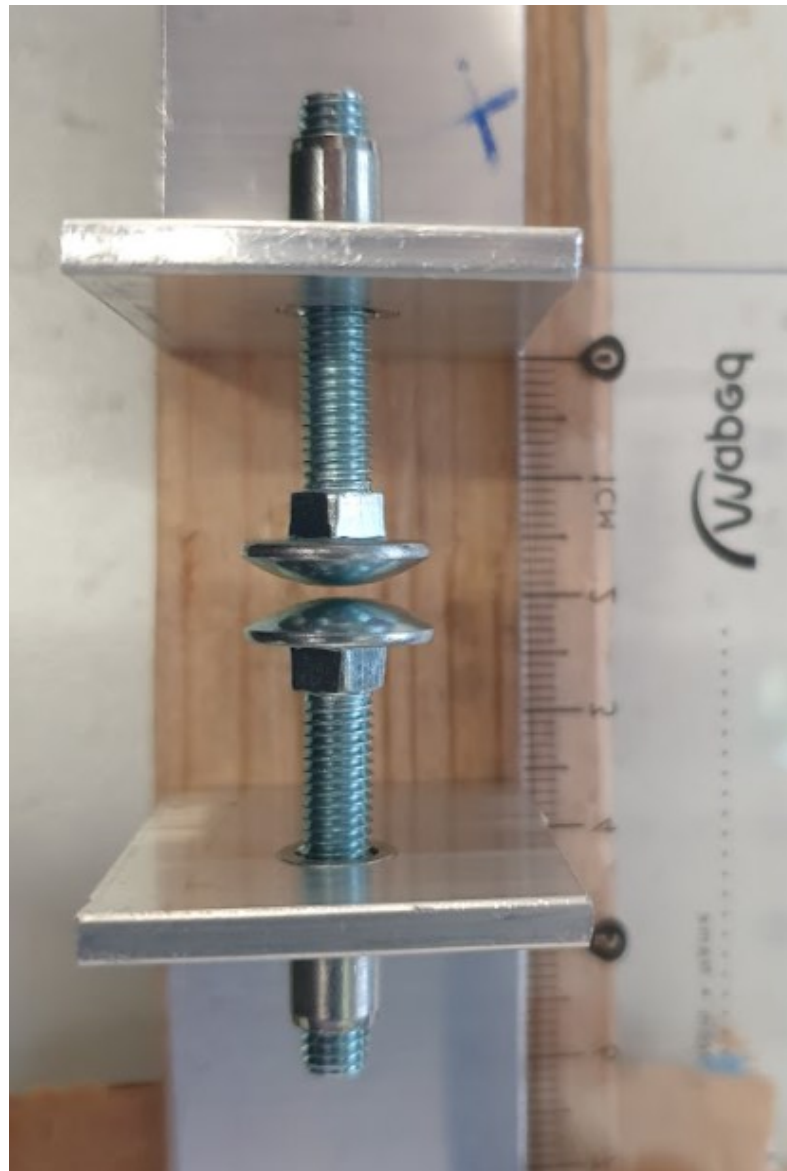


Obr. 53 Zjednodušené schéma pro měření spínání jiskřiště



Obr. 54 Destička s RC obvodem a sondou osciloskopu

Následně bylo vloženo jiskřiště do oblasti výskytu laserové jiskry s mezerou mezi elektrodami 1 mm. Nastavená mezera zobrazená na obrázku (Obr. 55) o velikosti 1 mm představuje dostatečnou vzdálenost pro zamezení samovolného vzniku elektrického oblouku mezi elektrodami. Napětí potřebné pro tento samovolný přeskok by se muselo pohybovat v řádech kilo voltů.

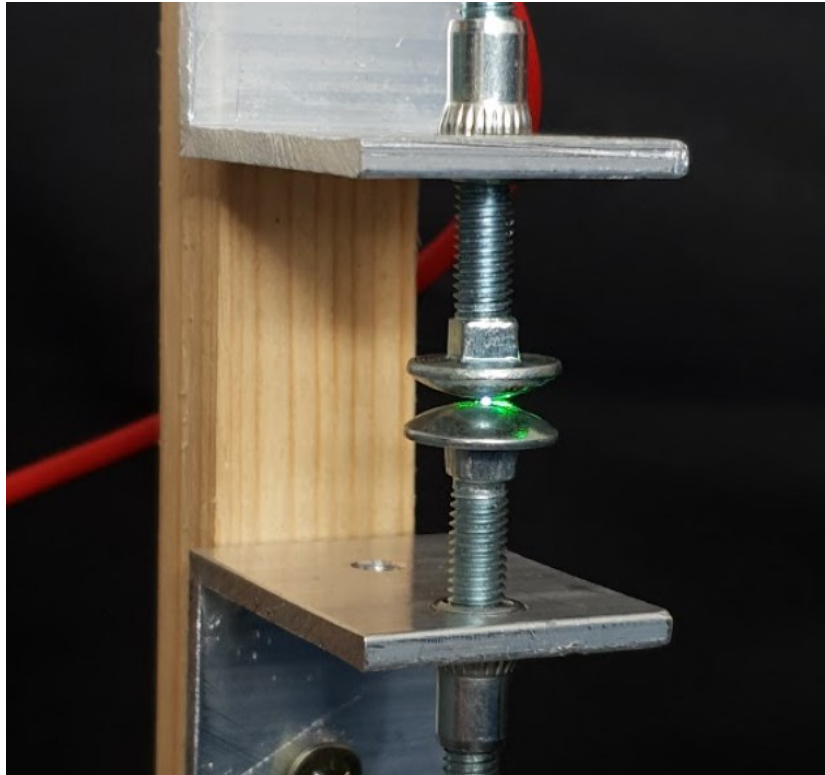


Obr. 55 Mezera 1 mm mezi elektrodami

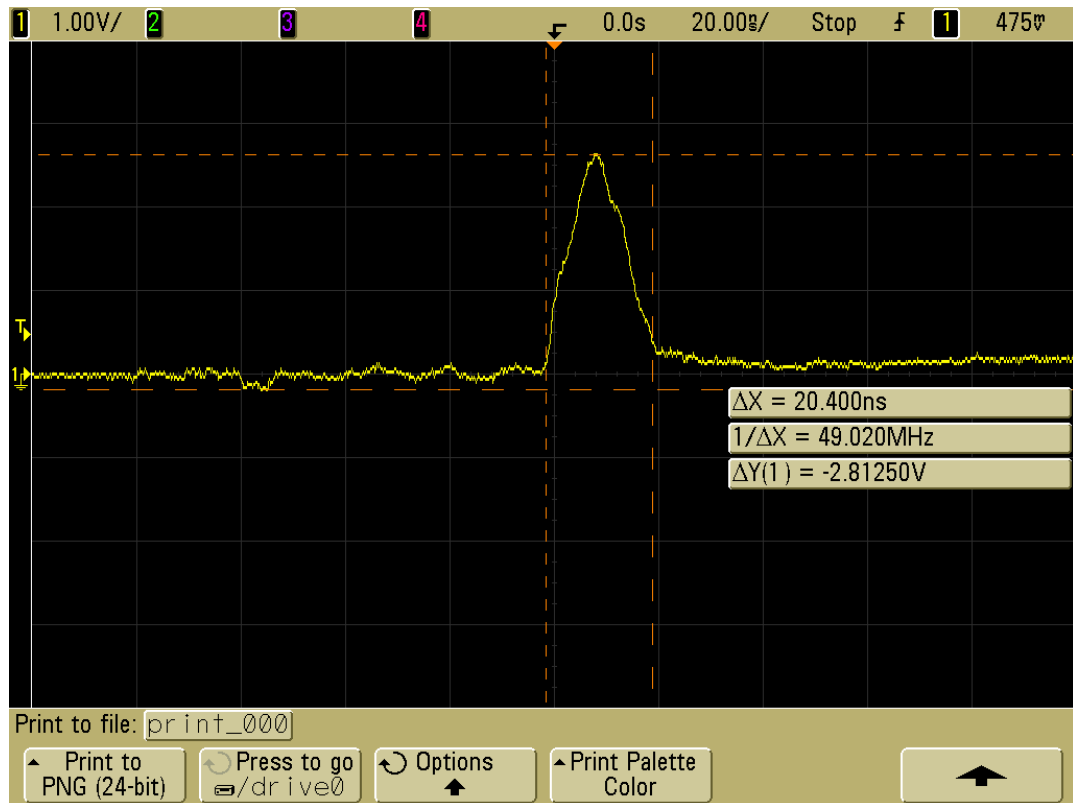
Touto mezerou bylo dosaženo, že k přeskoku může dojít pouze v případě kontrolované aplikace vnějšího vlivu na vzduchovou mezeru mezi elektrodami. Toto je zobrazeno na



obrázku (Obr. 56), kde je vidět vzniklou laserovou jiskru a následný průběh, který byl měřen na rezistoru R2 pomocí sondy.



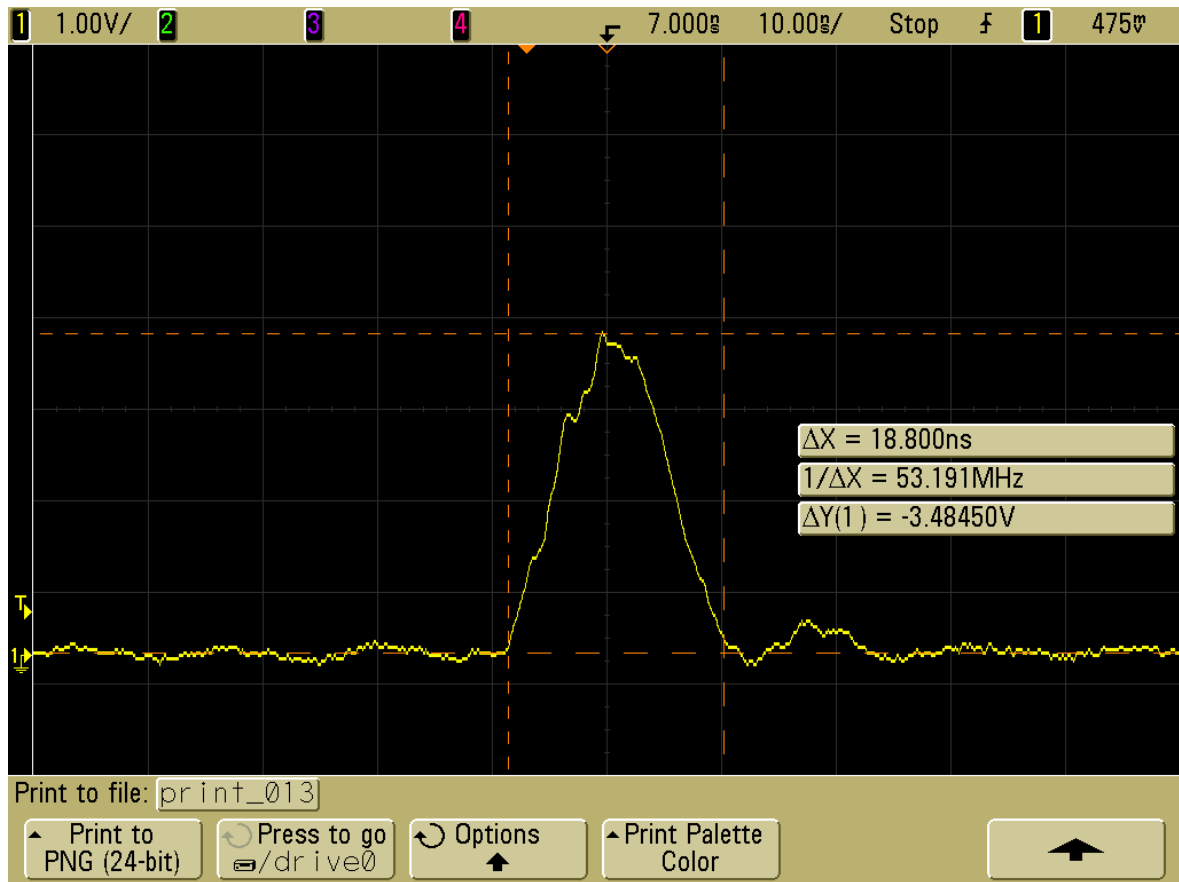
Obr. 56 Laserová jiskra mezi elektrodami



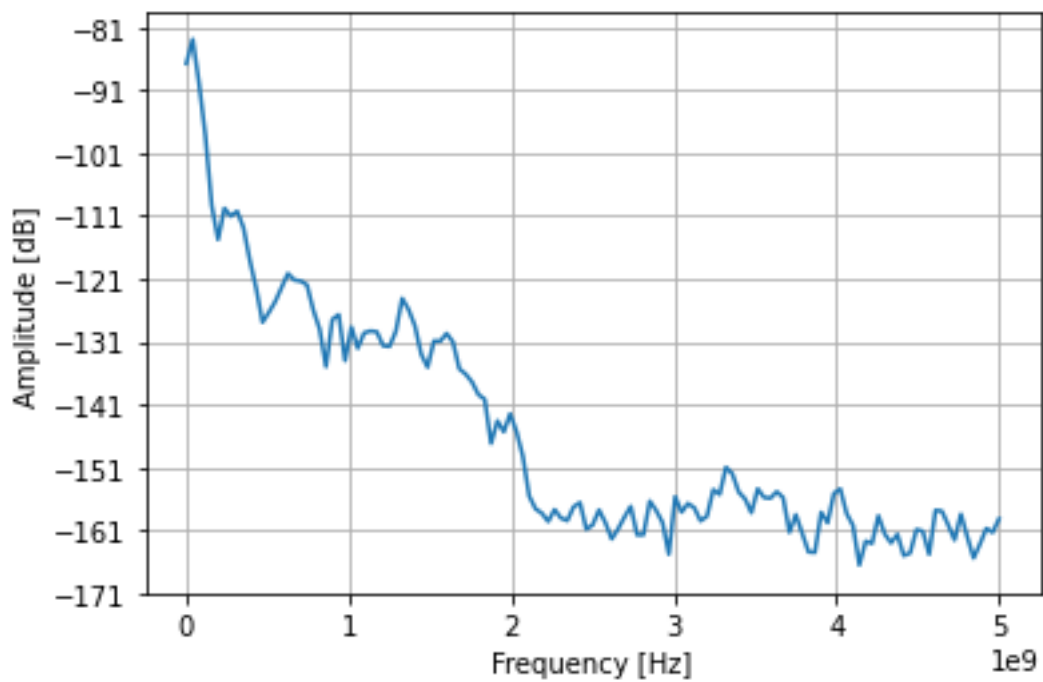
Obr. 57 Průběh zkušební měřeného pulzu

Tímto bylo ověřeno, že dochází k cílenému spínání elektrického proudu uvnitř jiskřiště. Další postup byl naměřit jednotlivé pulzy na  $50\ \Omega$  zátěži pomocí osciloskopu pro různé napěťové hodnoty kondenzátoru, které jsou popsány v kapitole 7.2 při dvou výkonových úrovních laseru. Tyto hodnoty byly uloženy jak ve formě png obrázků, tak csv dat, která budou převedena Fourierovou transformací na kmitočtové spektrum.

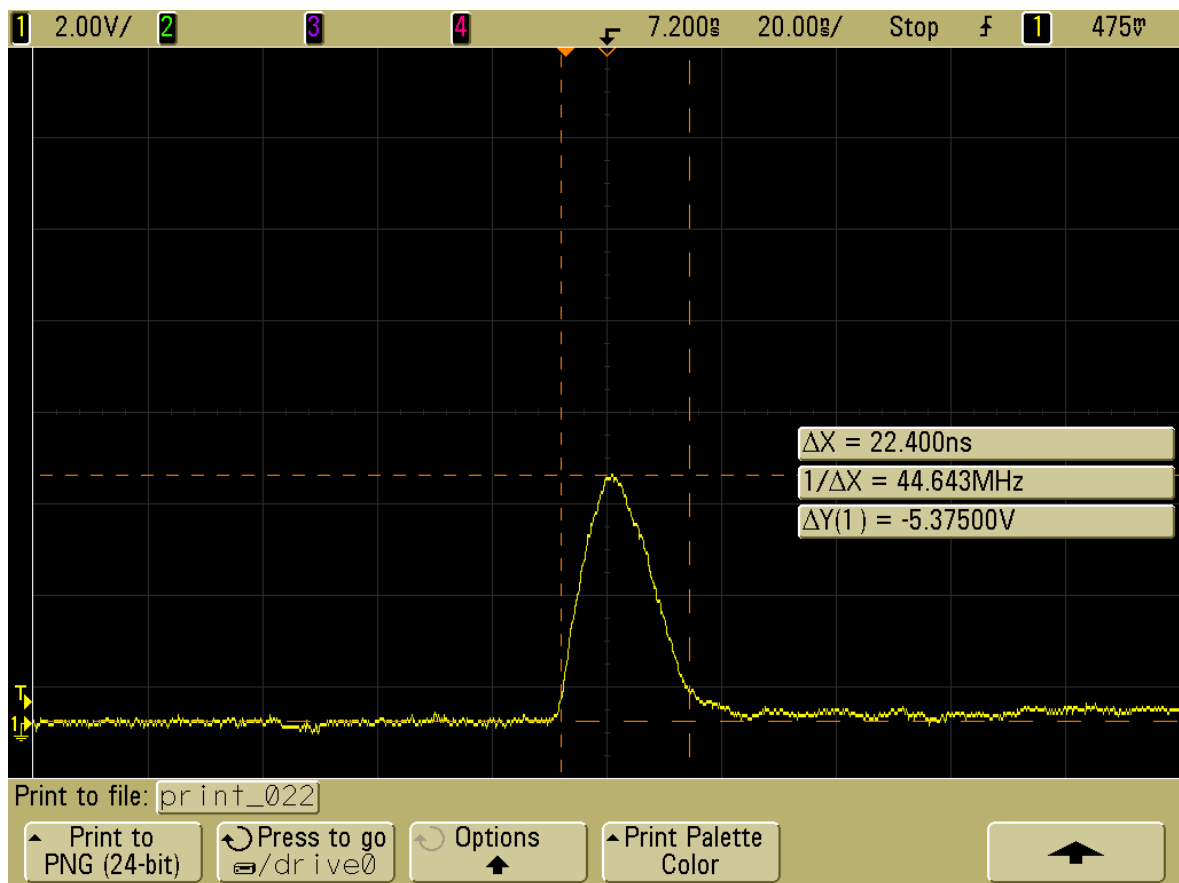
## 7.5.1 Úroveň napětí 5 V



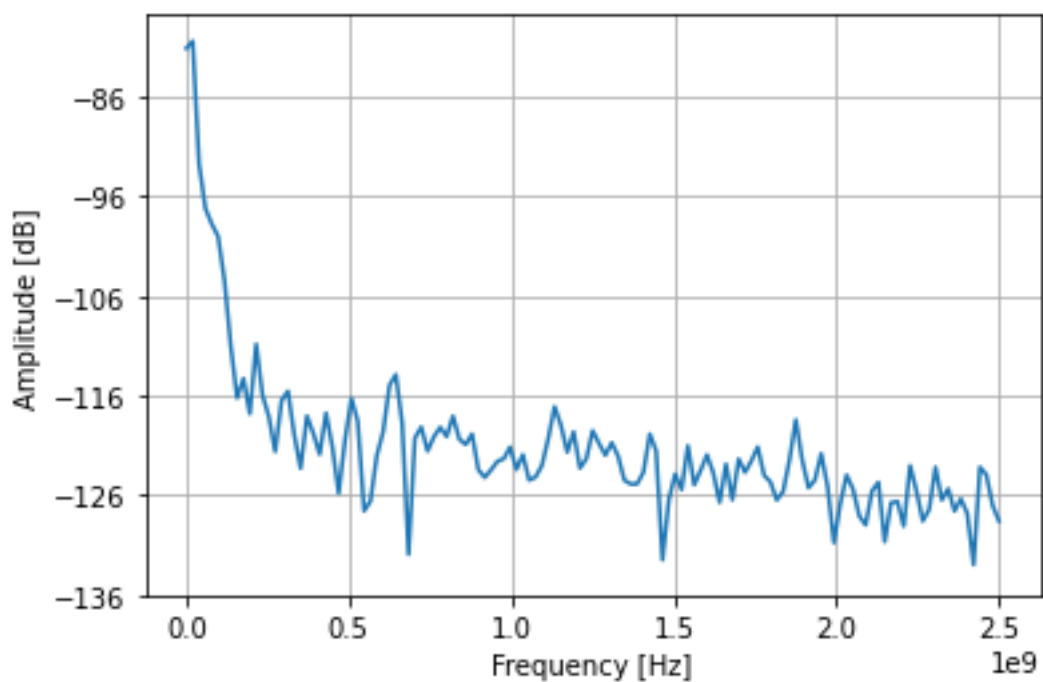
Obr. 58 Napájení 5 V, laser 80 mJ, doba trvání nástupné hrany 7 ns, doba pulzu 18.8 ns, napěťová úroveň 3.48 V



Obr. 59 Kmitočtové spektrum, napájení 5 V, laser 80 mJ

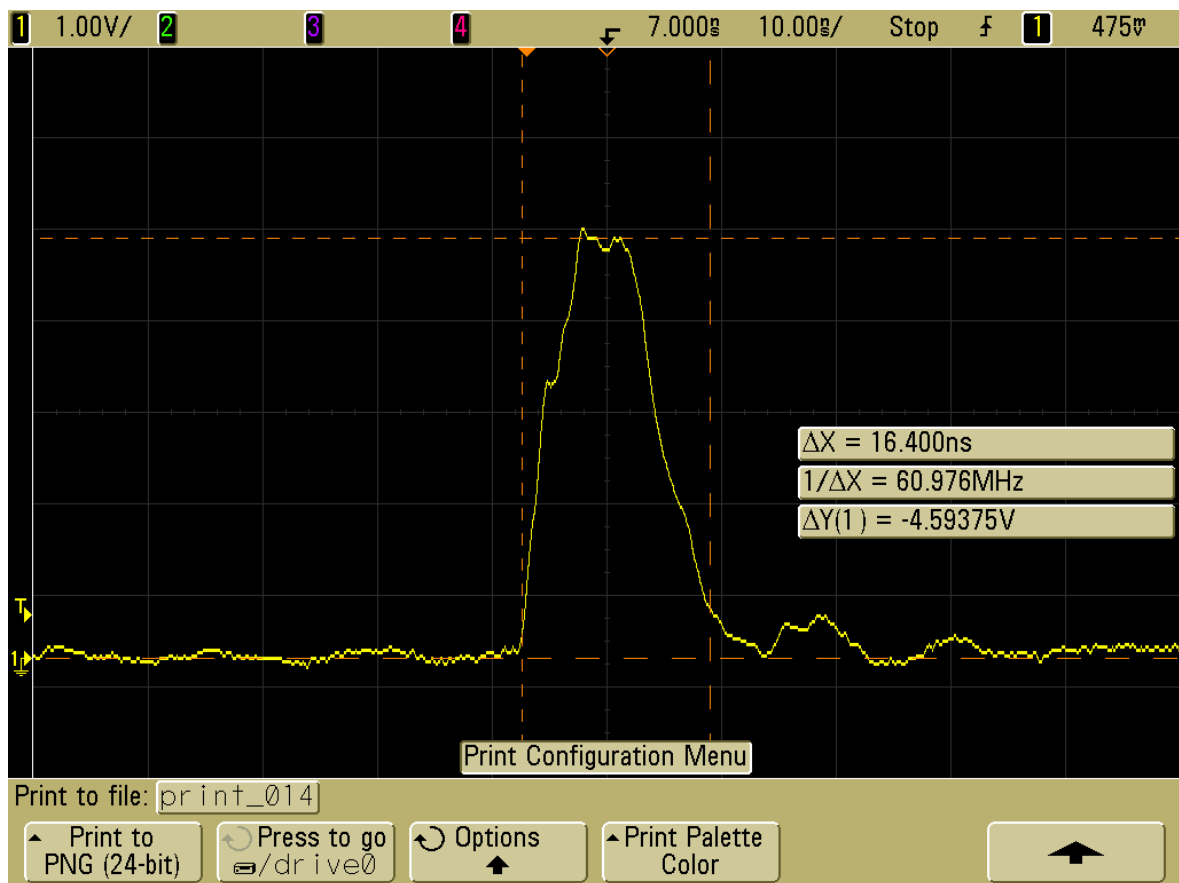


Obr. 60 Napájení 5 V, laser 100 mJ, doba trvání nástupné hrany 9 ns, doba pulzu 22.4 ns, napěťová úroveň 5.37 V

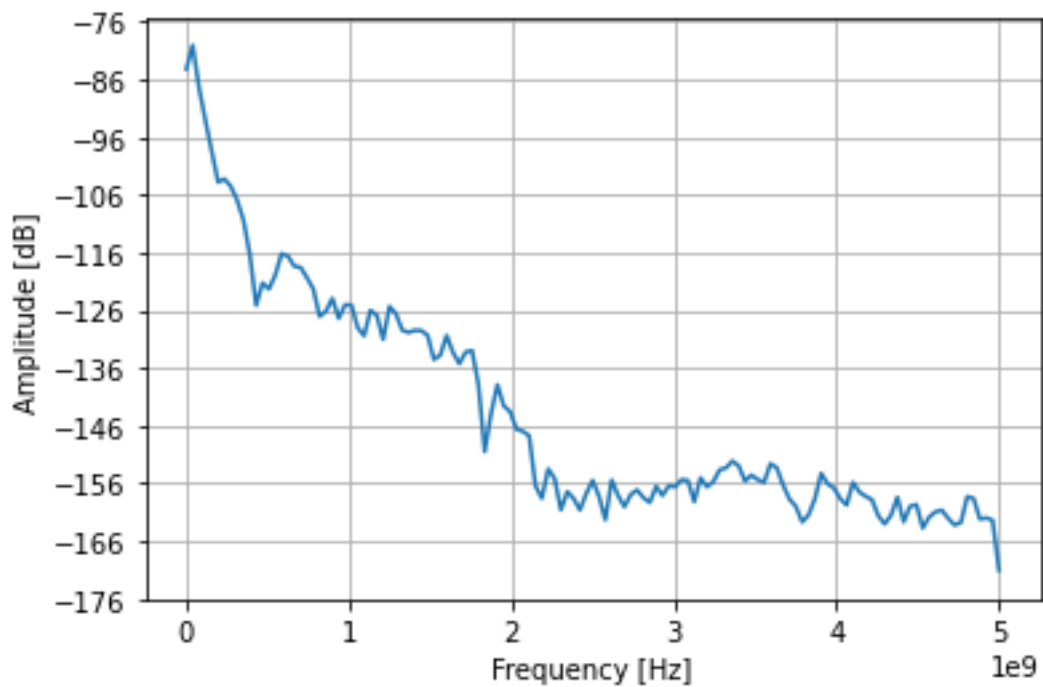


Obr. 61 Kmitočtové spektrum, napájení 5 V, laser 100 mJ

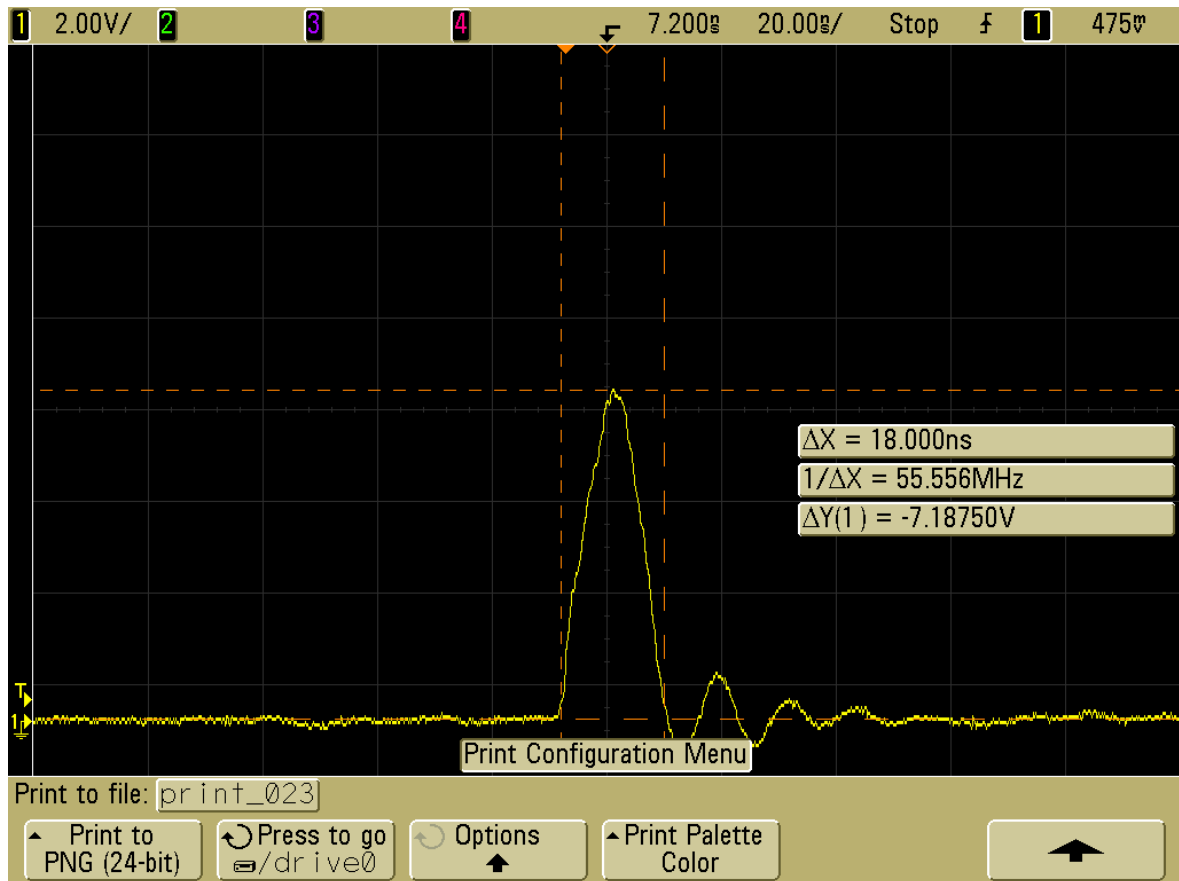
## 7.5.2 Úroveň napětí 10 V



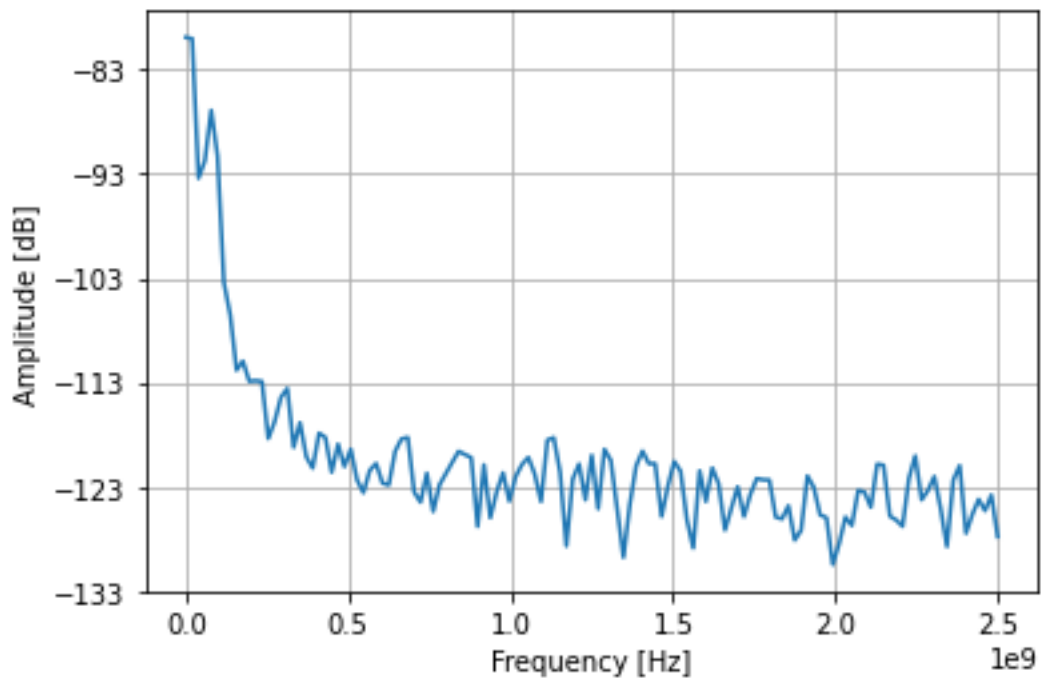
Obr. 62 Napájení 10 V, laser 80 mJ, doba trvání nástupné hrany 6 ns, doba pulzu 16.4 ns, napětíová úroveň 4.59 V



Obr. 63 Kmitočtové spektrum, napájení 10 V, laser 80 mJ

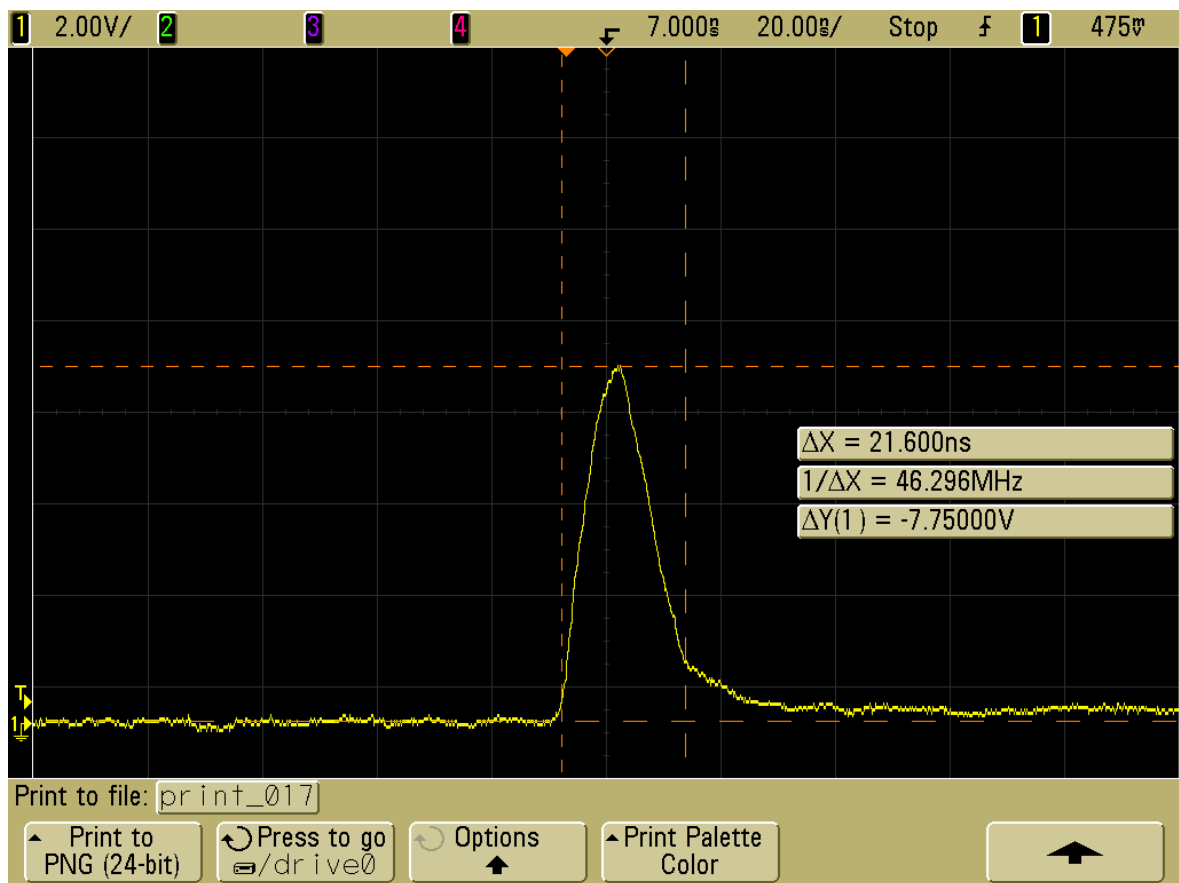


Obr. 64 Napájení 10 V, laser 100 mJ, doba trvání nástupné hrany 8 ns, doba pulzu 18 ns, napěťová úroveň 7.18 V

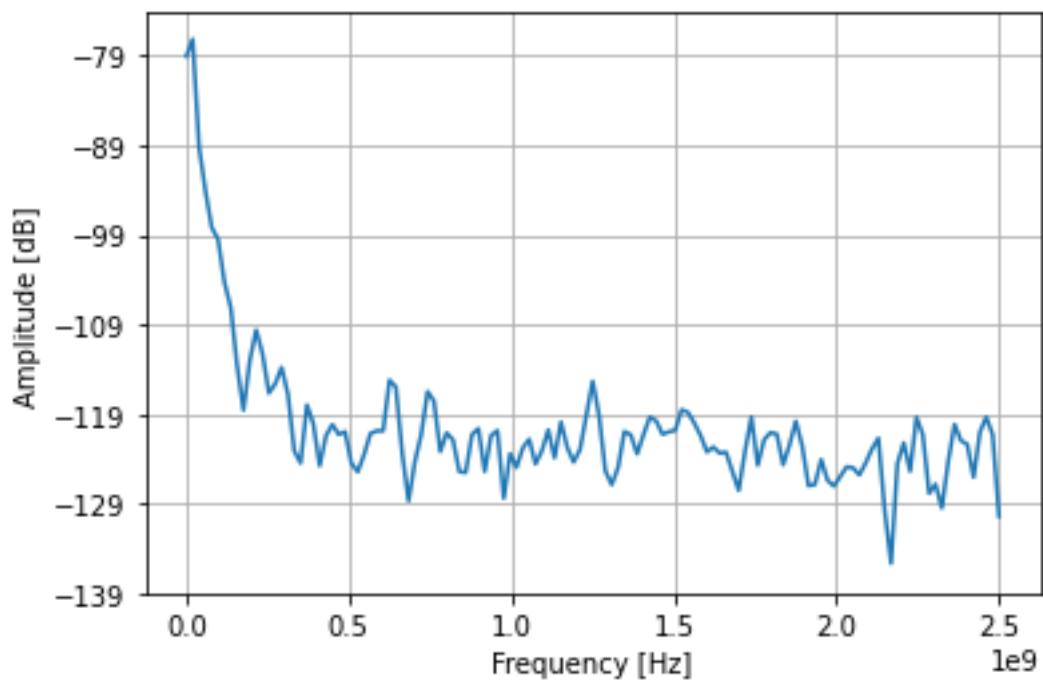


Obr. 65 Kmitočtové spektrum, napájení 10 V, laser 100 mJ

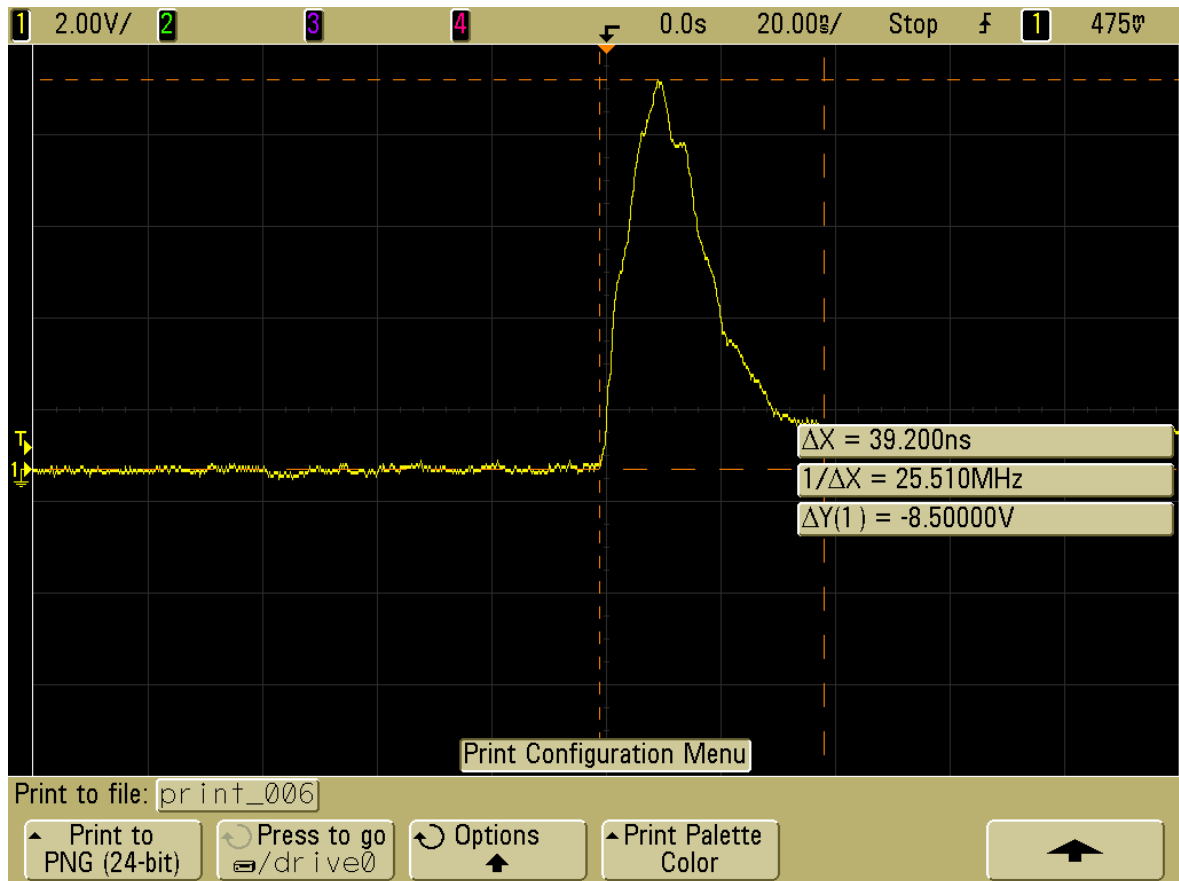
## 7.5.3 Úroveň napětí 15 V



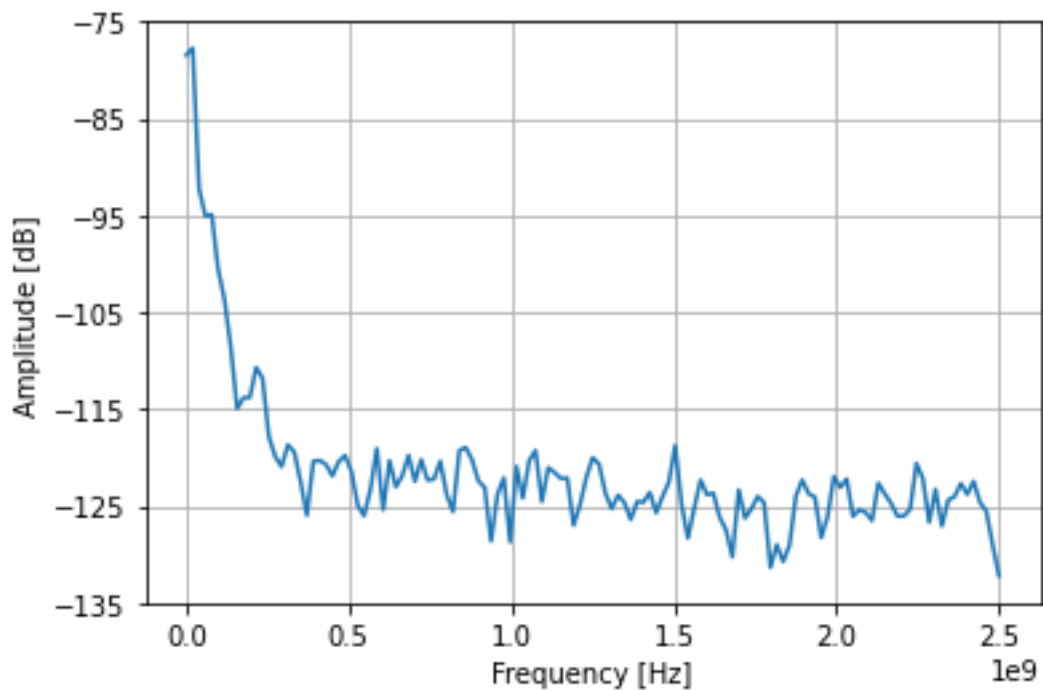
Obr. 66 Napájení 15 V, laser 80 mJ, doba trvání nástupné hrany 8 ns, doba pulzu 21.6 ns, napěťová úroveň 7.75 V



Obr. 67 Kmitočtové spektrum, napájení 15 V, laser 80 mJ



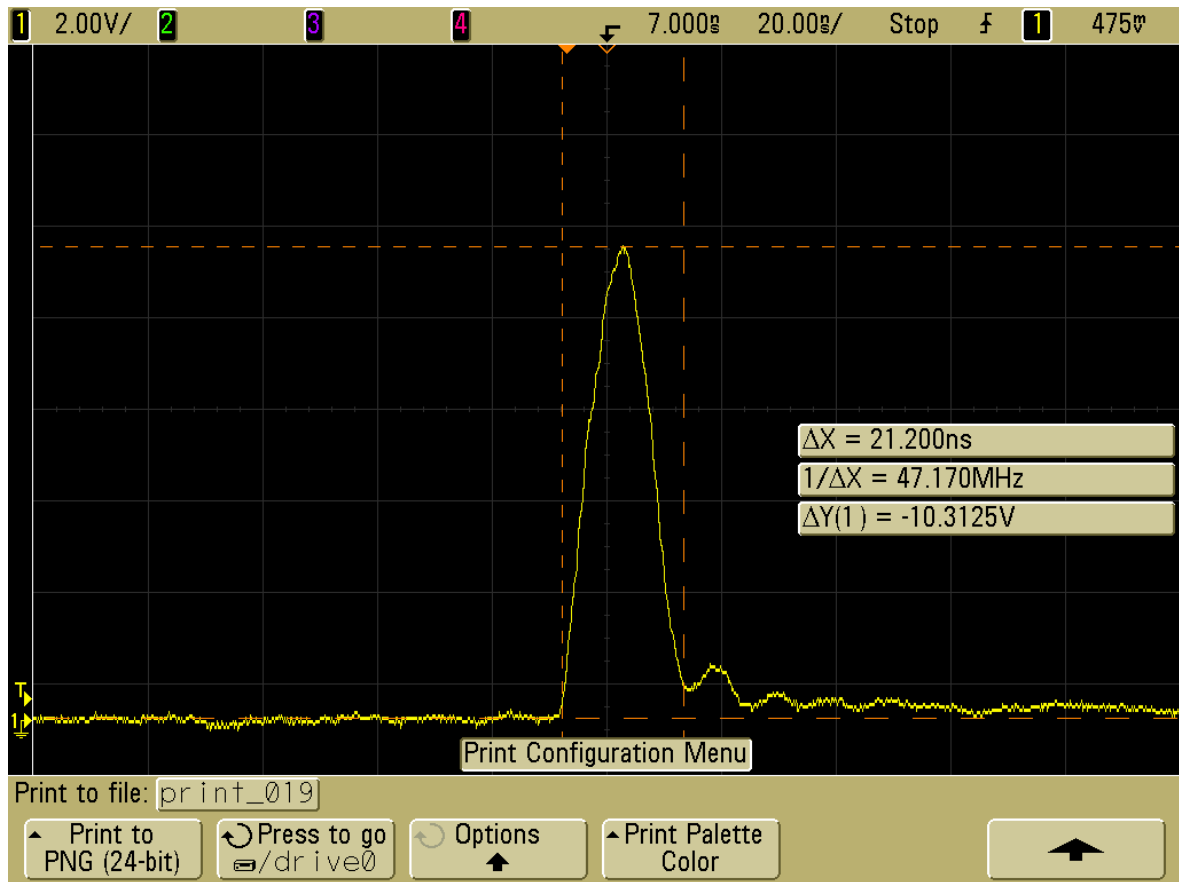
Obr. 68 Napájení 15 V, laser 100 mJ, doba trvání nástupné hrany 8 ns, doba pulzu 25 ns, napěťová úroveň 8.5 V



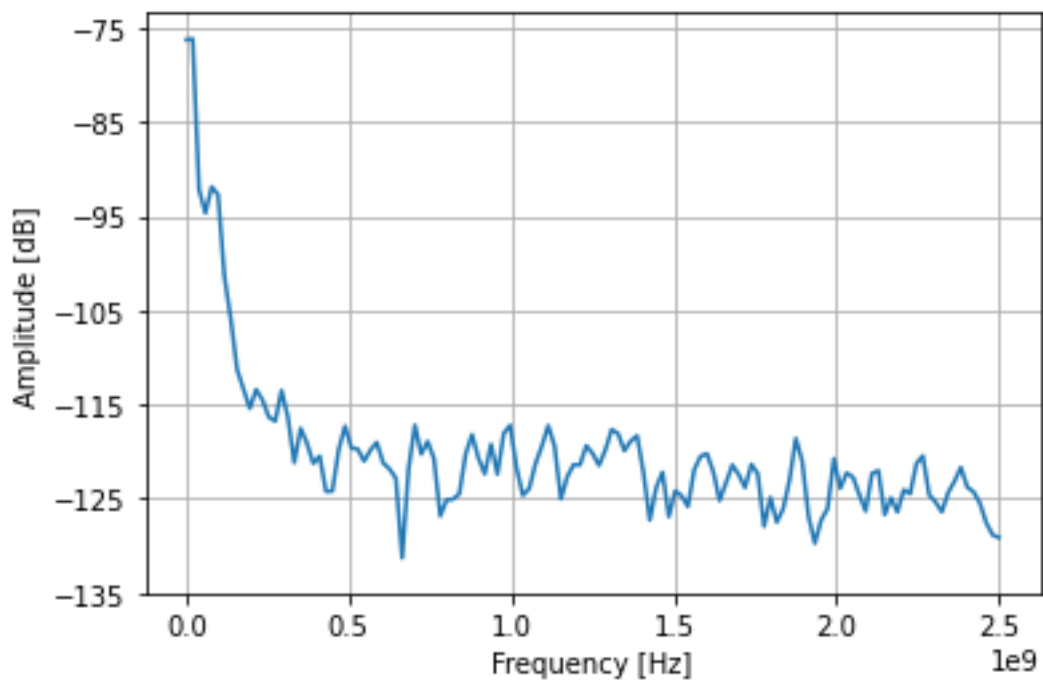
Obr. 69 Kmitočtové spektrum, napájení 15 V, laser 100 mJ



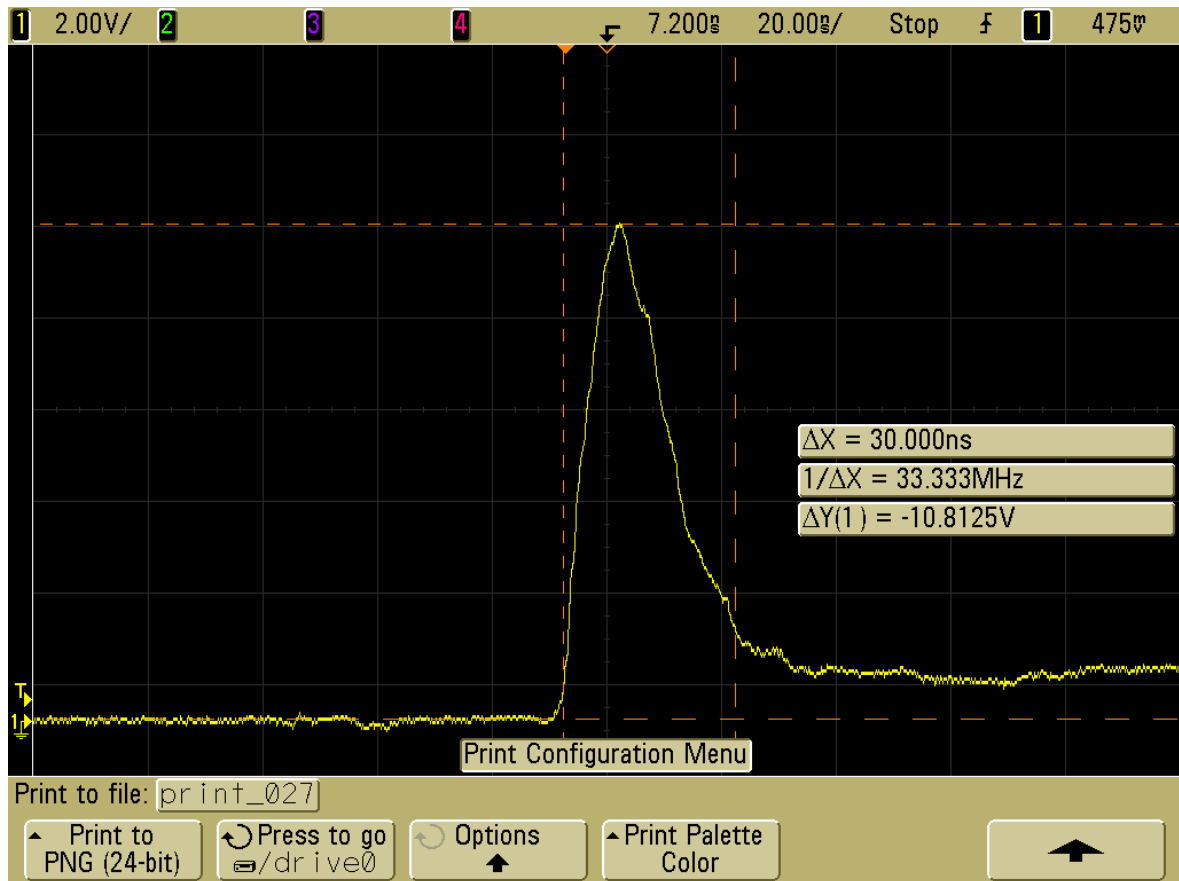
## 7.5.4 Úroveň napětí 20 V



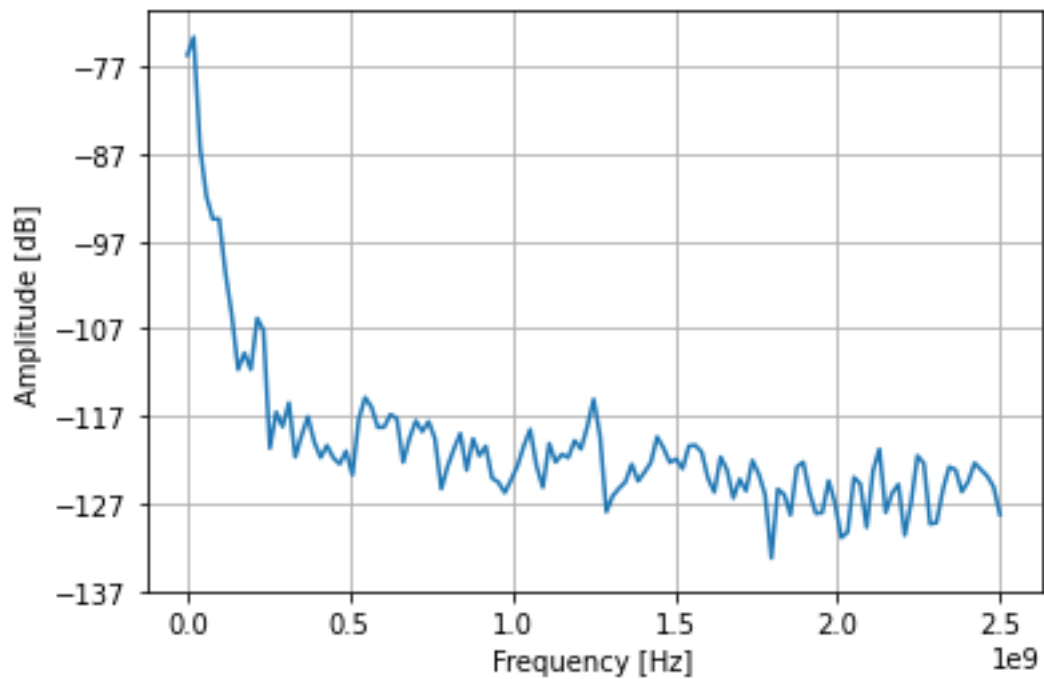
Obr. 70 Napájení 20 V, laser 80 mJ, doba trvání nástupné hrany 10 ns, doba pulzu 21.2 ns, napěťová úroveň 10.3 V



Obr. 71 Kmitočtové spektrum, napájení 20 V, laser 80 mJ



Obr. 72 Napájení 20 V, laser 100 mJ, doba trvání nástupné hrany 10 ns, doba pulzu 30 ns, napěťová úroveň 10.81 V



Obr. 73 Kmitočtové spektrum, napájení 20 V, laser 100 mJ

## 7.6 Shrnutí naměřených výsledků

Ze snímků, které zobrazují časový průběh pulzu je vidět společný faktor nárůstu délky trvání pulzu a jeho amplitudy v závislosti na výkonu laseru. To je zejména způsobeno výše popsaným jevem, kdy vyšší výkon dokáže ionizovat větší oblast na vyšší teplotu a následné dohořívání vzniklé plazmy tak trvá delší dobu, než se oblast navrátí do neutrálního stavu. Tento jev je nežádoucí, jelikož prodlužující doba pulzu má značný vliv na výsledném kmitočtovém spektru pulzu. Ten je zejména ovlivněn nástupnou hranou samotného pulzu, ale částečně i jeho celkovou délkou. Na obrázcích (Obr. 59) a (Obr. 63) je vidět, že bylo dosaženo nejlepších výsledků, co se týče výstupního kmitočtového spektra. Tato hranice je kolem 200 MHz na výstupu. Zbylé pokusy po přepočtení vykazují výrazně nižší kmitočtové spektrum, které dosahuje maximálně 30 MHz. To může být způsobeno právě prodlouženou délkou trvání nástupné hrany a celkovou délkou trvání pulzu.

Další zlepšení se dá dosáhnout konstrukčními změnami na jiskřišti, ale také lepší volbou použitých materiálů, plynů a technologií, které se podílejí na celém procesu spínání. Uzavřeným typem jiskřiště, umožníme regulaci tlaku a také použití vhodnějšího média, než je přítomné složení atmosférických plynů v okolí. Snížený tlak a použití dusíku by přispělo k lepším vlastnostem, které by snižovaly potřebné průrazné napětí mezi elektrodami. Samotné elektrody lze nahradit například slitinou mědi a wolframu a také využít různé tvary těchto elektrod. Jednou z možností, jak zlepšit časovou složku pulzu je využití ještě rychlejšího typu laseru, který by byl schopen generovat femtosekundové pulzy. Také vhodnější součástky RC obvodu, které budou mít lepší parametry týkající se například vlastní indukčnosti atd.

Na druhou stranu mohou všechna tato zlepšení opět umocňovat problém s délkou času dohořívání plazmy. Tento jev je potřeba eliminovat v co nejkratším možném čase. K tomu může pomoci konstrukce systému, který bude takové místo „ofukovat“ a zhaset tak vzniklý plazmatický výron.

Všechna tato zlepšení by měla mít za následek posunutí generovaného kmitočtového spektra v rozmezí od desítek MHz do jednotek GHz a jeho vyzáření pomocí UWB antény do okolí.

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo najít a realizovat možnosti spínání vysokých proudů a generování vysokofrekvenčních pulzů, které by měly dopad z hlediska elektromagnetické kompatibility na elektronická zařízení. Jako řešení pro spínání těchto vysokých proudů bylo zvoleno jiskřiště s laserem, které oproti polovodičovým součástkám naskýtá možnosti lepších parametrů, a to zejména s ohledem na rychlost samotného spínání.

Takto generované široké kmitočtové spektrum o vysokém výkonu může být přínosné z hlediska bezpečnosti a obraně proti nejrůznějším druhům bezpilotních prostředků, navigací systému a dalších hrozeb, které lze považovat za hrozbu pro osoby či objekty. Pomocí těchto elektromagnetických pulzů se naskýtá vhodné řešení eliminace či dočasného vyřazení z provozu těchto prostředků.

Tato práce v teoretické části nastínila samotné možnosti pro spínání těchto vysokých proudů. V praktické části této práce došlo k návrhu, realizaci a samotném ověření teorie spínání uvnitř jiskřiště za pomoci laseru. Zároveň byl pomocí osciloskopu zaznamenán samotný elektromagnetický impulz, který byl převeden do kmitočtového spektra.

Lze konstatovat, že dané řešení principiálně fungovalo. Ovšem pro řešení z hlediska eliminace různých hrozeb bude potřeba dosahovat ještě vyšších kmitočtů, na kterých pracují dnešní bezpilotní prostředky a další systémy.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] PAUL, Clayton R. *Introduction to electromagnetic compatibility*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 9780471755005.
- [2] DŘÍNOVSKÝ, Jiří. Elektromagnetická kompatibilita: přednášky. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2010. ISBN 978-80-214-4202-3.
- [3] SVAČINA, Jiří. Elektromagnetická kompatibilita: principy a poznámky. Brno: Vysoké učení technické, 2001. Připojujeme se k Evropské unii. ISBN 80-214-1873-7.
- [4] Electromagnetic Pulse (EMP) Protection and Resilience Guidelines for Critical Infrastructure and Equipment [online]. 2019, 133 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: [https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/19\\_0307\\_CISA\\_EMP-Protection-Resilience-Guidelines.pdf](https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/19_0307_CISA_EMP-Protection-Resilience-Guidelines.pdf)
- [5] KOPP, Carlo. The Electromagnetic Bomb - a Weapon of Electrical Mass Destruction [online]. 42 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/ASPJ/journals/Chronicles/apjemp.pdf>
- [6] Electromagnetic pulse (EMP) [online]. 14 [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/17851190/>
- [7] Starfish Prime: The nuclear test that introduced the world to EMPs | SOFREP. | Military Grade Content [online]. Copyright © 2019 The Crate Club Group. All Rights Reserved. [cit. 10.02.2020]. Dostupné z: <https://sofrep.com/news/starfish-primenuclear-test-introduced-world-emps/>
- [8] DRAŽAN, Libor. Elektromagnetické zbraně, hrozba pro industriální společnost [online]. 2013, 6 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://trilobit.fai.utb.cz/Data/Articles/PDF/1f7137a8-af34-4739-ad94-086ef73781b8.pdf>
- [9] OK2KOJ, Radioklub. *ANTÉNY A NAPÁJEČE* [online]. 2016/2017, 40 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: [https://www.radio.feec.vutbr.cz/ok2koj/kurz/06\\_anteny\\_a\\_napajece.pdf](https://www.radio.feec.vutbr.cz/ok2koj/kurz/06_anteny_a_napajece.pdf)
- [10] CHLEBIŠ, Petr. *VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA I* [online]. 2007, 76 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/VE1/Polovodicove%20soucastky.pdf>
- [11] KONEČNÁ, Eva a Aleš RICHTER. *VÝKONOVÉ POLOVODIČOVÉ PRVKY: Učební text* [online]. 2000, 17 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10446516-Vykonove-polovodicove-prvky.html>
- [12] Spínací polovodičové několikvrstvé součástky [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <http://old.spsemoh.cz/vyuka/zel/vicevrstve.htm#tyristor>

- [13] KOUTNÝ, Jaroslav a Ivo VLK. *Elektronika I učebnice*. VYTVOŘENO V RÁMCI PROJEKTU: DIGITÁLNÍ ŠKOLA: ICT VE VÝUCE TECHNICKÝCH PŘEDMĚTŮ, REG. Č. CZ.1.07/1.1.04/01.0137, Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola elektrotechnická, Olomouc 2009
- [14] Radartutorial: Tyratron [online]. 1 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/08.transmitters/tx07.cz.html>
- [15] VOSTRÝ, Štěpán a Gustav TAUŠ. *Elektrotechnika: Pro 2. a 3. ročník učebních oborů elektrotechnických*. Československo, 1977.
- [16] KUBEŠ, Pavel. *Impulsní silnoproudé výboje a jejich diagnostika: Studijní text pro doktorské studium*. Aldebaran [online]. 2004 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/studium/vyboje.pdf>
- [17] KRACÍK, Jiří, Jaromír TOBIÁŠ a Josef Bartoloměj SLAVÍK. *Elektrické výboje: určeno vývojovým pracovníkům, výpočtářům, konstruktérům a posluchačům elektrotechnických škol*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964. Malá elektrotechnická knihovna.
- [18] A Candle Flame In An Electric Field [online]. 1 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <http://spmphysics.onlinetuition.com.my/2013/08/a-candle-flame-in-electric-field.html>
- [19] Samostatný a nesamostatný výboj v plynu - zápis do sešitu [online]. 1 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/fyzika007/elektrina-a-magnetismus/elektricky-proud-v-kapalinach-a-plynech/samostatny-a-nesamostatny-vyboj-v-plynu---zapis-do-sesitu>
- [20] AUBRECHT, Vladimír. *TECHNICKÉ APLIKACE PLAZMATU: Současný stav, trendy vývoje a výuka* [online]. 25 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/vutium/spisy?action=ukazka&id=804&publikace\\_id=564](https://www.vut.cz/vutium/spisy?action=ukazka&id=804&publikace_id=564)
- [21] E V Parkevich et al 2020 Plasma Sources Sci. Technol. 29 05LT03
- [22] Bataller A, Koulakis J, Pree S, Putterman S. Nanosecond high-power dense microplasma switch for visible light Applied Physics Letters. 105. DOI: 10.1063/1.4902914
- [23] Diagnostika plazmatu [online]. 1 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/s4r/plazma/?p=2>
- [24] PLAZMA – 4. SKUPENSTVÍ LÁTKY [online]. 35 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: [https://www.kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/AFY/AFY\\_v2.pdf](https://www.kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/AFY/AFY_v2.pdf)
- [25] TITTERTON, David H. *Military Laser Technology and Systems*. London: Artech House Publishers, April 22, 2015. ISBN 1608077780.
- [26] MALÝ, Petr. *Optika*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Karolinum, 2013. ISBN 9788024622460.

- [27] Pavel Polynkin , "Multi-pulse scheme for laser-guided electrical breakdown of air", Appl. Phys. Lett. 111, 161102 (2017) <https://doi.org/10.1063/1.4985265>
- [28] KOŘÁN, Pavel. SERIÁL NA TÉMA LASERY - ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ [online]. 2013, 1 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [29] *Jak funguje laser: Princip laseru* [online]. 1 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
- [30] TRIGGERED SPARK GAP DESIGN: HOW DOES A TRIGGERED SPARK GAP WORK? [online]. 1 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://hofstragroup.com/triggered-spark-gap-design.html>
- [31] A. Larsson, D. Yap, J. Au and T. E. Carlsson, "Laser Triggering of Spark Gap Switches," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 42, no. 10, pp. 2943-2947, Oct. 2014, doi: 10.1109/TPS.2013.2297161.
- [32] A. Galvanauskas, "High power fiber lasers," Opt. Photon. News, vol. 15, no. 7, pp. 42-47, Jul. 2004.
- [33] Princip vláknového - FIBER LASERU [online]. 1 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
- [34] Y. Chen, J. Dickens, J. Walter and M. Kristiansen, "Jitter and recovery rate of a triggered spark gap with high pressure gas mixtures," 2009 IEEE Pulsed Power Conference, 2009, pp. 244-249, doi: 10.1109/PPC.2009.5386309.
- [35] DONALDSON, Anthony Lyle. ELECTRODE EROSION MEASUREMENTS IN A HIGH ENERGY SPARK GAP [online]. 55 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://ttu-ir.tdl.org/bitstream/handle/2346/13596/31295002846490.pdf?sequence=1>
- [36] Sinton, Rowan & Herel, R. & Enright, W. & Bodger, Patrick. (2011). Design and construction of a triggered spark gap for long distance exploding wire experiments. 1 - 3.
- [37] ARSIC, N.; OSMOKROVIC, P.; KOSTIC, D. Numerical and experimental design of vacuum three-electrode spark gap for synthetic test circuits. University of Priština, Faculty of Electrical Engineering
- [38] HARILAL, S.S., B.E. BRUMFIELD a M.C. PHILLIPS. Lifecycle of laser-produced air sparks [online]. Washington USA [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://aip.scitation.org/doi/am-pdf/10.1063/1.4922076>. Pacific Northwest National Laboratory, P.O.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

A	ampér – jednotka elektrického proudu
CME	Coronal mass ejection – výron koronální hmoty
csv	comma-separated values – typ souborového formátu
DEW	Directed energy weapons – zbraň se směřovanou energií
DEWL	Directed energy weapons laser – Laserová zbraň se směřovanou energií
DEWM	Directed energy weapons – mikrovlnné zbraně se směřovanou energií
DEWRF	Directed energy weapons radio frequency – radiovlnné zbraně se směřovanou energií
EMP	Elektromagnetický impulz
F	farad – jednotka elektrické kapacity
GHz	gigahertz – jednotka frekvence
Hz	hertz – jednotka frekvence
IEC	International Electrotechnical Commission – Mezinárodní elektrotechnická komise
kA	kiloampér – jednotka elektrického proudu
kHz	kilohertz – jednotka frekvence
km	kilometr – jednotka vzdálenosti
kPa	kilopascal – jednotka tlaku
kV	kilovolt – jednotka elektrického napětí
mJ	milijoule – jednotka energie
mm	milimetr – jednotka vzdálenosti
NEMP	Nuclear electromagnetic pulse – Jaderný elektromagnetický pulz
nm	nanometr – jednotka vzdálenosti
NNEMP	Non-nuclear electromagnetic pulse – Nejaderný elektromagnetický pulz
ns	nanosekunda – jednotka času
PBW	Particle beam weapons – částicové zbraně



png	portable network graphics – typ grafického formátu
UV	ultraviolet – ultrafialové záření
UWB	Ultra-Wideband – ultra širokopásmové
V	volt – jednotka elektrického napětí

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Zobrazení přibližného elektromagnetického spektra se zařazením různých typů rušení [4].....	12
Obr. 2 Srovnání parametrů LEMP a NEMP [2] .....	14
Obr. 3 a) nepřerušovaná řada impulzů kratších než 200ms, b) seskupení jednotlivých impulzů kratších než 200ms [2].....	14
Obr. 4 Průběh elektromagnetického impulzu [6].....	16
Obr. 5 Příklad vlivu nástupných a sestupných hran na výsledném vysokofrekvenčním výstupu.....	17
Obr. 6 Zobrazení závislost časové a frekvenční složky [6] .....	18
Obr. 7 Schéma širokopásmového řešení DEWM nebo DEWRF [8].....	19
Obr. 8 Příklad vyzařovací charakteristiky antény [9] .....	20
Obr. 9 Příklad dopadu použití EMP pulzu [4] .....	21
Obr. 10 Krystalická struktura křemíku (Si) [11].....	22
Obr. 11 Dosažitelné parametry výkonových polovodičových součástek [10] .....	23
Obr. 12 a) PN přechod v propustném směru b) PN přechod v závěrném směru [11] .....	24
Obr. 13 Struktura tyristoru a jeho schématická značka [12].....	24
Obr. 14 Voltampérová charakteristika tyristoru [13].....	25
Obr. 15 Struktura diaku a jeho schématická značka [12] .....	26
Obr. 16 Voltampérová charakteristika diaku [12] .....	27
Obr. 17 Struktura triaku a jeho schématická značka [12].....	28
Obr. 18 Voltampérová charakteristika triaku [13].....	28
Obr. 19 Schématická značka tyatronu [14] .....	30
Obr. 20 Schématická značka ignitronu [15] .....	30
Obr. 21 Schematické znázornění přenosu náboje v mraku během bleskového výboje [16]32	
Obr. 22 Experimentální pokus ionizace plamene svíčky [18].....	33
Obr. 23 Voltampérová charakteristika výboje [19] .....	34
Obr. 24 Elektrická pevnost vzduchu při tlaku 101 kPA [16].....	35
Obr. 25 Paschenova křivka pro vzduch [16].....	35
Obr. 26 Schématické zobrazení laviny a dipólového elektrického pole [16] .....	37
Obr. 27 Schématické zobrazení šíření strimerového kanálu [16].....	37
Obr. 28 Schématické znázornění lideru [16] .....	38
Obr. 29 Příklady výskytu plazmatické formy podle koncentrace a teploty elektronů [20] .	40
Obr. 30 Výbojová trubice se sondami [23].....	42
Obr. 31 Zařazení viditelného světla v elektromagnetickém spektru [29].....	43
Obr. 32 Proces stimulované emise [25] .....	44

Obr. 33	Obecné schéma laseru [28].....	45
Obr. 34	Zobrazení dějů v aktivním prostředí [28].....	46
Obr. 35	Příklad struktury optického buzení [29].....	47
Obr. 36	Obecné znázornění jiskřiště se dvěma elektrodami [30].....	48
Obr. 37	Obecné znázornění jiskřiště se třemi elektrodami [30].....	50
Obr. 38	Znázornění možnosti spínání pomocí laseru.....	52
Obr. 39	Grafické znázornění konstrukce použitého jiskřiště.....	54
Obr. 40	Použité pozinkované elektrody.....	55
Obr. 41	Schéma navrženého RC obvodu.....	55
Obr. 42	Zobrazení skutečného měřicího pracoviště.....	56
Obr. 43	Zdroj napětí Agilent E3630A.....	57
Obr. 44	Laser INDI-HG-10S.....	57
Obr. 45	Osciloskop Agilent DSO6104A.....	58
Obr. 46	Fotopřijímač HSA-X-S-1G4-SI-FS.....	58
Obr. 47	Zobrazení fotocitlivosti přijímače v závislosti na vlnové délce.....	59
Obr. 48	Zjednodušené schéma zapojení pro měření průběhu laserové jiskry.....	59
Obr. 49	Regulátor výstupního výkonu laseru a) 80 mJ b) 100 mJ.....	60
Obr. 50	Snímky laserové jiskry a) 80 mJ a b) 100 mJ.....	60
Obr. 51	Průběh jiskry pro laser s menším výkonem (80 mJ).....	61
Obr. 52	Průběh jiskry pro laser s vyšším výkonem (100 mJ).....	62
Obr. 53	Zjednodušené schéma pro měření spínání jiskřiště.....	63
Obr. 54	Destička s RC obvodem a sondou osciloskopu.....	63
Obr. 55	Mezera 1 mm mezi elektrodami.....	64
Obr. 56	Laserová jiskra mezi elektrodami.....	65
Obr. 57	Průběh zkušebního měřeného pulzu.....	66
Obr. 58	Napájení 5 V, laser 80 mJ, doba trvání nástupné hrany 7 ns, doba pulzu 18.8 ns, napěťová úroveň 3.48 V.....	67
Obr. 59	Kmitočtové spektrum, napájení 5 V, laser 80 mJ.....	67
Obr. 60	Napájení 5 V, laser 100 mJ, doba trvání nástupné hrany 9 ns, doba pulzu 22.4 ns, napěťová úroveň 5.37 V.....	68
Obr. 61	Kmitočtové spektrum, napájení 5 V, laser 100 mJ.....	68
Obr. 62	Napájení 10 V, laser 80 mJ, doba trvání nástupné hrany 6 ns, doba pulzu 16.4 ns, napěťová úroveň 4.59 V.....	69
Obr. 63	Kmitočtové spektrum, napájení 10 V, laser 80 mJ.....	69
Obr. 64	Napájení 10 V, laser 100 mJ, doba trvání nástupné hrany 8 ns, doba pulzu 18 ns, napěťová úroveň 7.18 V.....	70

Obr. 65 Kmitočtové spektrum, napájení 10 V, laser 100 mJ.....	70
Obr. 66 Napájení 15 V, laser 80 mJ, doba trvání nástupné hrany 8 ns, doba pulzu 21.6 ns, napěťová úroveň 7.75 V .....	71
Obr. 67 Kmitočtové spektrum, napájení 15 V, laser 80 mJ.....	71
Obr. 68 Napájení 15 V, laser 100 mJ, doba trvání nástupné hrany 8 ns, doba pulzu 25 ns, napěťová úroveň 8.5 V .....	72
Obr. 69 Kmitočtové spektrum, napájení 15 V, laser 100 mJ.....	72
Obr. 70 Napájení 20 V, laser 80 mJ, doba trvání nástupné hrany 10 ns, doba pulzu 21.2 ns, napěťová úroveň 10.3 V .....	73
Obr. 71 Kmitočtové spektrum, napájení 20 V, laser 80 mJ.....	73
Obr. 72 Napájení 20 V, laser 100 mJ, doba trvání nástupné hrany 10 ns, doba pulzu 30 ns, napěťová úroveň 10.81 V .....	74
Obr. 73 Kmitočtové spektrum, napájení 20 V, laser 100 mJ.....	74

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Zaznamenané hodnoty nabíjecího proudu .....	56
--	----

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Název přílohy

## **PŘÍLOHA P I: NÁZEV PŘÍLOHY**