

# Obsah

<b>I</b>	<b>Rešerše</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	<b>Laserový systém PALS</b>	<b>3</b>
1.1	Popis systému . . . . .	3
1.2	Jodový zesilovač . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Měření časoprostorového rozložení záření</b>	<b>7</b>
2.1	Přehled výsledků měření na jiných pracovištích . . . . .	7
2.1.1	ISKRA-4 . . . . .	7
2.1.2	PERUN . . . . .	8
2.2	Časoprostorová diagnostika pomocí streak kamery . . . . .	9
<b>II</b>	<b>Měření</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Návrh experimentu</b>	<b>12</b>
3.1	Optický přenos . . . . .	12
3.2	Spouštění kamery a snížení intenzity svazku . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Výsledky měření a analýza dat</b>	<b>15</b>

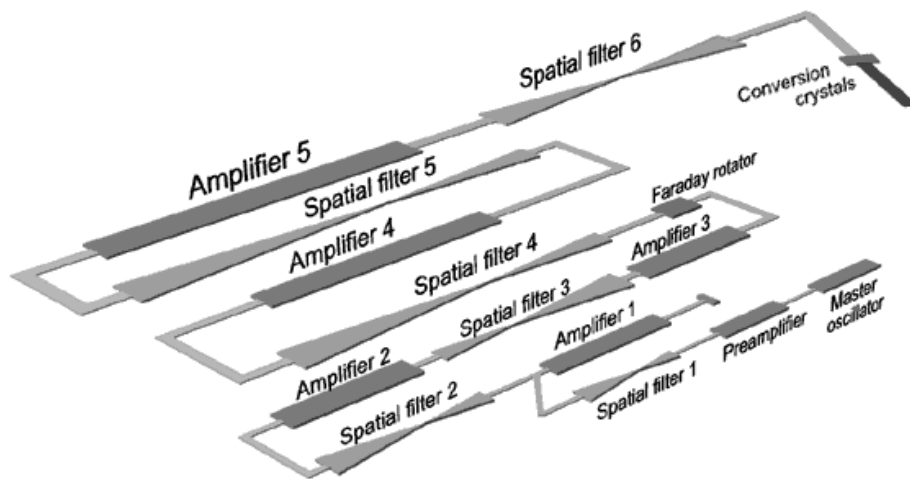
Část I  
Rešerše

# Kapitola 1

## Laserový systém PALS

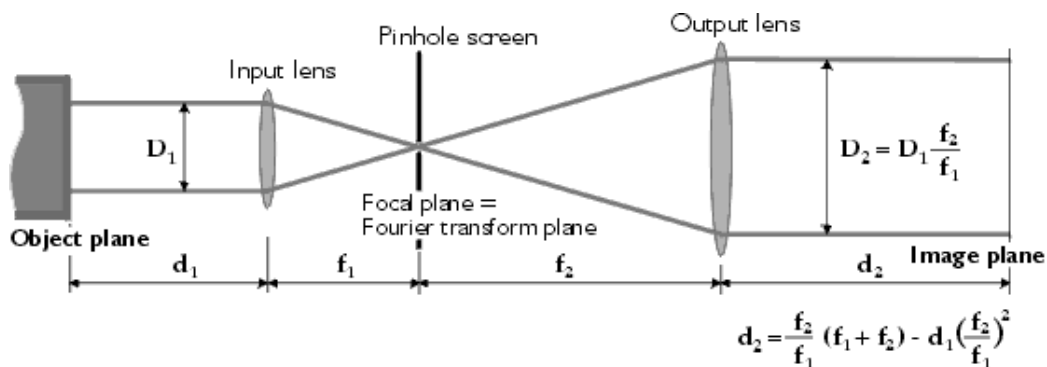
### 1.1 Popis systému

System PALS, hlavní experimentální zařízení společného pracoviště Ústavu fyziky plazmatu a Fyzikálního ústavu Akademie věd ČR, je tvořen jednosvazkovým vysokovýkonovým jodovým fotodisociačním laserem, založeným na tzv. master oscillator-power amplifier architektuře. [4] Počáteční pulsy jsou generovány akusticko-optickou synchronizací módů v oscilátoru; počáteční průměr svazku je 2 mm.



Obrázek 1.1: Schéma systému PALS [9]

Systémem Pockelsových cel je vybrán jeden puls, v předzesilovači zesílen na energii cca 10 mJ, a následně zaveden do řetězce pěti zesilovačů. Zesilovač A1 je dvouprůchodový, zesilovače A2 - A5 pak jednopřechodové. Na oscilátorovém stole se rovněž nachází jiskříšťa, které spouští Pockelsovy cely PC3, PC4 a PC5, izolující zesilovače od šumu - spontánní emise zesilovačů. Ke stejnému účelu slouží saturovatelný absorbér umístěný za zesilovačem A1. Průměry zesilovačů jsou voleny tak, aby se předešlo poškození optiky v důsledku překročení prahové hustoty výkonu. Postupně narůstají až na průměr 29 cm posledního zesilovače. Před prostorovým filtrem SF5 je část svazku (200 J, průměr 14,8 cm) oddělena a po průchodu zpoždovací linkou může být využita jako pomocný svazek a zavedena do interakční komory nezávisle na hlavním svazku. Svazek zformovaný posledním prostorovým filtrem SF6 je nasměrován na vstupní plochu frekvenčně-konverzního krystalu DKDP a odtud zaveden do interakční komory. Krystal se využívá ke konverzi základní frekvence na třetí harmonickou, účinnost konverze je maximálně 60%.



Obrázek 1.2: Prostorový filtr [9]

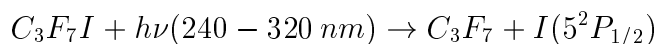
Mezi jednotlivými zesilovači jsou umístěny prostorové filtry (v podstatě teleskop s malou aperturou ve společném ohnisku čoček - viz obrázek 1.2) které mají trojí účel. Rozšiřují svazek na průměr následujícího zesilovače, zobrazují profil rozložení intenzity svazku na rovinu následujícího zesilovače (image relaying) a vyhlazují svazek filtrací lokálních modulací intenzity (spatial filtering). Ve svém ohnisku vytvoří vstupní čočka difrakční obrazec, který

je Fourierovou transformací rozložení amplitudy intenzity elektrického pole ze vstupní roviny (object plane). Tento difrakční obrazec představuje prostorové frekvenční spektrum vstupní roviny, kde jednotlivé frekvence jsou úměrné vzdálenosti od optické osy filtru. To znamená, že nežádoucí vyšší prostorové harmonické jsou odstraněny při průchodu aperturou (velikost apertury je cca  $100 \mu\text{m}$ .)

Systém je schopen poskytovat až 1 kJ energie na základní vlnové délce  $1,315 \mu\text{m}$  v pulsech o délce cca 400 ps, při běžných výstřelech se hodnota energie pohybuje okolo 800 J. (Podle sdělení ing. Králikové.)

## 1.2 Jodový zesilovač

Kyveta zesilovače je plněna směsí perfluoralkyljodidu  $C_3F_7I$  a argonu Ar, který slouží jako nárazníkový (buffer) plyn. K excitaci aktivního prostředí dochází díky fotodisociaci molekuly perfluoralkyljodidu v důsledku působení UV záření, generovaného xenonovými výbojkami:

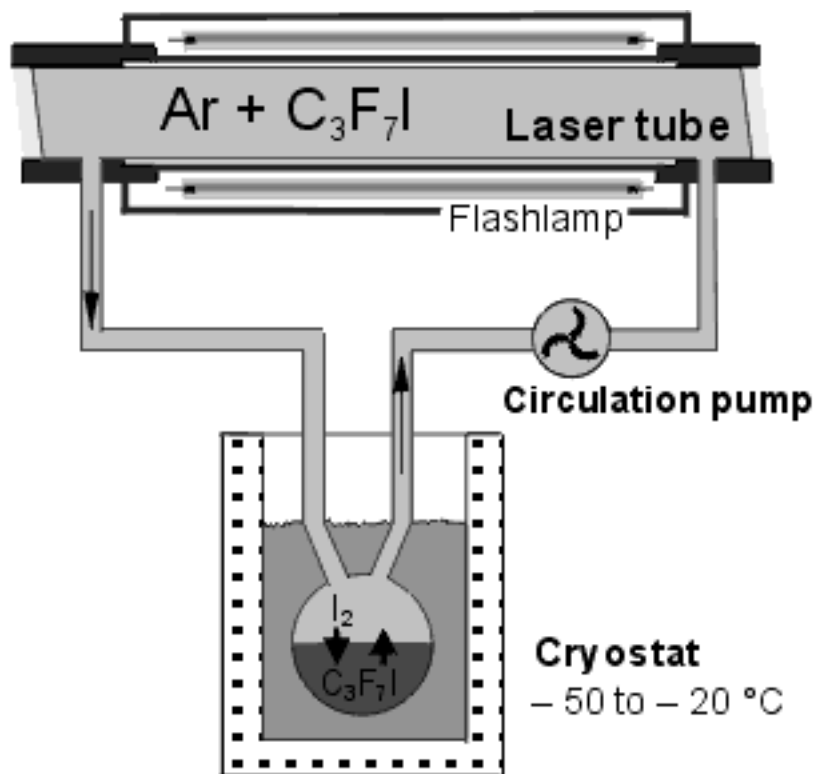


Laserová akce potom probíhá při kvantových přechodech mezi stavy  $^2P_{1/2}$  a  $^2P_{3/2}$ . Protože parciální tlaky alkyljodidu a argonu jsou u každého stupně zesilovací kaskády jiné, musí být každý zesilovač vybaven vlastní čerpací a plnicí jednotkou. Maximální tlak aktivního média je 0,6 MPa, na základě toho je nutné zvolit odpovídající tloušťku vstupního a výstupního okna, aby nedošlo k jejich deformaci.

Geometrie zesilovače je v principu stejná jako geometrie oscilátoru. Jedná se o válcovou křemennou kyvetu obklopenou lineárními výbojkami obsahujícími xenon. Okolo výbojek jsou umístěny kovové reflektory jejichž povrch je matován. To zlepšuje homogenitu osvětlení, ale rovněž snižuje účinnost buzení, a to přibližně o 10%. Typické napětí na výbojkách se pohybuje mezi 20-40 kV.

Zesilovače jsou sestaveny z modulů, přičemž poslední zesilovač A5 se například skládá z osmi modulů přibližně 1 m dlouhých, z nichž každý zahrnuje

12 výbojek. Vstupní a výstupní okna jsou pokryta antireflexní vrstvou, což klade další podmínky na maximální hustotu výkonu.



Obrázek 1.3: Jodový zesilovač [9]

# Kapitola 2

## Měření časoprostorového rozložení záření

### 2.1 Přehled výsledků měření na jiných pracovištích

#### 2.1.1 ISKRA-4

Voronich a kolektiv [6] uvádějí následující možné důvody pro časoprostorovou nehomogenitu pulsu : 1) nehomogenita se tvoří v oscilátoru a je přítomna již na vstupu do systému zesilovačů, nebo 2) oscilátor sice vytvoří dostatečně homogenní prostoročasovou strukturu pulsu (dále PSP), ale tato je zkreslována v průběhu procesu zesilování. Zkreslení PSP může mít příčinu v deformaci profilu pulsu při šíření v podmínkách hluboké saturace. Byly podniknuty experimenty se třemi různými typy oscilátorů a ukázalo se, že nehomogenní PSP se objevuje nezávisle na použitém druhu oscilátoru. Dá se tedy říci, že tento jev se objevuje až v průběhu zesilování a souvisí s nerovnoměrným rozložením inverze populace a lokální amplitudou pulsu. Se záměrem určit vliv těchto jevů a jejich příspěvek k vývoji zkreslení PSP byl sestaven dvoudimenzionální model šíření jednoho pulsu systémem zesilovačů. Šíření záření je počítáno integrací parabolické rovnice pole v osově-symetrickém přiblížení.

Interakce pulsu s aktivním médiem je popsána využitím poloklasického přístupu; počítá se s hyperjemnou strukturou iodového atomu, mírou relaxace základního stavu a konečnou dobou příčné relaxace  $T_2$ . Rozložení hustoty inverze populace bylo stanoveno co možná v nejlepší shodě s daty získanými v průběhu experimentů, tedy s minimem v oblasti kolem osy. Výpočty byly provedeny pro tři různá rozložení intenzity vstupního signálu :

a) Gaussovský svazek

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{r}{0.15}\right)^2}$$

b) Gaussovský svazek

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{r}{0.35}\right)^2} e^{-\left(\frac{r}{0.4}\right)^{15}}$$

c) Gaussovský svazek

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{r}{0.4}\right)^{15}}$$

V případě Gaussovského rozložení intenzity je intenzita vstupního paprsku na okrajích značně nižší než ve středu a proto i zkreslení PSP je značné - centrální část svazku předbíhá okraje o cca 0,8 ns, čímž se délka celého pulsu zvětšuje na 0,65 ns. V případě rozložení super-Gaussovského popsaném rovnicí c) výpočty ukazují, že nerovnoměrné rozložení inverze je určujícím faktorem pro tvorbu PSP na konci zesilovače. Z modelu vyplývá, že více homogenní PSP může být získána lepším zobrazením svazku na zesilovač a selekcí vhodného rozložení intenzity záření na vstupu do zesilovače.

### 2.1.2 PERUN

Obdobné měření bylo provedeno na laserovém systému PERUN [2]. Byl použit dvoudimenzionální model KASKAD 16 vzvinutý v ruském nukleárním centru v Arzamas-16. Z důvodu časové náročnosti některých měření byly některé parametry systému určeny na základě původního jednodimenzionálního modelu pro výpočet parametrů laserového zesilovacího řetězce a ověřeny



srovnáním s daty získanými experimentálně. Po zavedení těchto hodnot do modelu KASKAD 16 byla jeho správnost verifikována porovnáním vypočítaných a skutečně naměřených hodnot a shledána vyhovující. Prostorovočasová struktura pulsu byla měřena při variaci dvou hlavních parametrů - rozdělení vstupních amplitud a průběhu inverze jednotlivých zesilovačů. Průběh inverze je v zásadě určen geometrií osvětlovacího systému zesilovačů a parciálním tlakem aktivního média  $C_3F_7I$ . Protože změna geometrie by byla složitým technickým problémem a změna parciálního tlaku narážela na omezení daná jinými fyzikálními důvody, měněn byl druhý parametr - vstupní amplitudy zesilovačů. Kritickým místem s největší nelinearitou se ukázal být začátek řetězce mezi zesilovači A1 a A2. Byla tedy změněna geometrie optické vazby mezi těmito zesilovači tak, aby do zesilovače A2 byla zavedena jen střední část výstupu z A1, která měla malou variaci amplitudy. Došlo sice ke ztrátě části energie pulsu, ale výpočty se prokázalo, že ztráty se v dalších stupních zesilovacího řetězce téměř vyrovnají a zlepšení PSP je podstatné.

## 2.2 Časoprostorová diagnostika pomocí streak kamery

Streak kamera je zařízení, které se používá k zachycení časového průběhu světelných pulsů (viz obr.2.1)

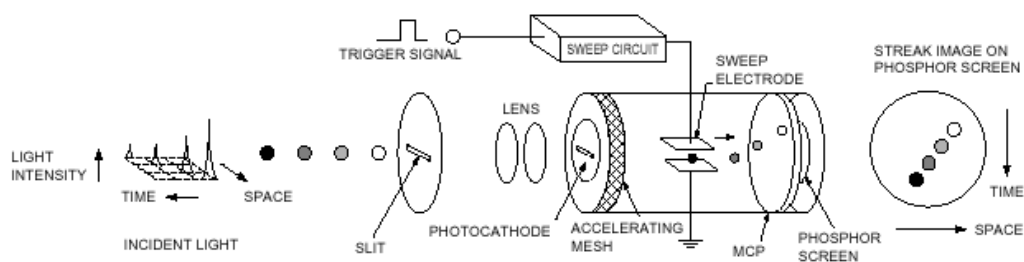


Fig.1 Operating Principle of the Streak Tube

Obrázek 2.1: Princip činnosti streak kamery [11]

Světlo dopadající na vstupní štěrbinu vytvoří ve fotokatodě určité množství elektronů, které odpovídá intenzitě pulsu. Elektronové nosiče poté prochází rozmítací trubicí mezi dvěma elektrodami, na které je přivedeno lineárně klesající napětí. To znamená, že elektrony procházející později jsou vychýleny méně, než dřívější - viz obr.2.2. Rozmítnuté elektrony dále procházejí zesilovačem (MCP - microchannel plate) a dopadají na fosforovou destičku kde jsou konvertovány na fotony. Na výsledném obrázku (zachyceném např. LCD kamerou) tedy osa Y odpovídá časovému a osa X prostorovému rozložení záření. Pro účely tohoto měření byla použita infračervená streak kamera Hamamatsu C7700 High Dynamic Range Streak Camera a CCD kamera C4880-21 s rozlišením 512 x 512 bodů.

C7700 má v nejrychlejším režimu rozmítání časové rozlišení lepší než 5 ps a je ji možno používat v režimech od 0,5 ns do 500 ns.

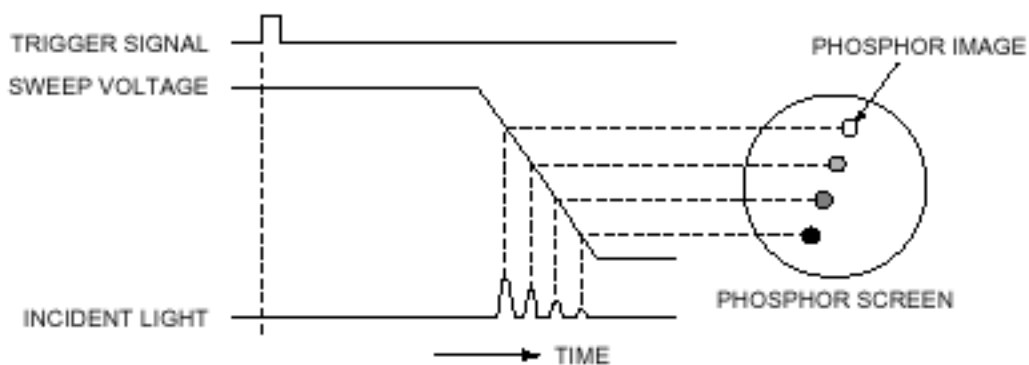


Fig. 2 Operation Timing (at time of sweep)

Obrázek 2.2: Zobrazení vstupního signálu [11]

Část II

Měření

# Kapitola 3

## Návrh experimentu

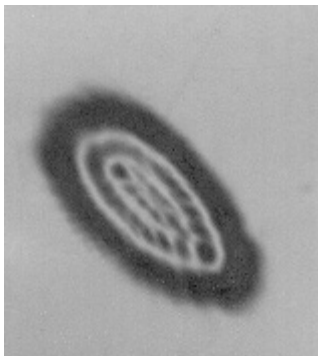
### 3.1 Optický přenos

Streak kamera je spouštěna elektronicky diodou, na kterou dopadá část svazku určená pro diagnostiku. Zpoždění mezi přivedením spouštěcího signálu do kamery a spuštěním rozmítání je při režimu rozmítání 2 ns (tento režim byl použit pro měření) přibližně rovno 18,8 ns [9]. Ve skutečnosti se jedná o dobu až 29,6 ns, je totiž také nutno uvážit dobu, kterou bude potřebovat signál, přenášený z diody do kamery kabelem, na překonání vzdálenosti tyto dělicí. Této době při rychlosti světla  $c \doteq 3 \cdot 10^8$  m/s odpovídá dráha 889 cm, kterou tvoří zpožďovací linka umístěná před měřicí klecí.

Linka sestává z děliče svazku a zrcadel, před děličem je umístěn filtr, který se automaticky posouvá do pozice v případě použití zesilovače A5 a brání tak poškození vstupní optiky kamery.

Uvnitř klece svazek prochází dvěma děliči, které vyvádějí jeho části pro další diagnostiku (např. měření energie). Za děliči se nachází čočka ( $f=2$  m), která fokusuje svazek na vstupní šterbinu kamery, a soustava filtrů. Při počátečních testovacích výstřelech bylo zjištěno, že obraz svazku zachycený na ožehovém papíru, který byl umístěn na vstupu streak kamery, je silně promodulován a zkreslen (viz obr.3.1).

Tento jev byl způsoben nevhodně zvolenou vzdáleností kamera-fokusační



Obrázek 3.1: Zkreslený obraz svazku

čočka. Za zrcadlem, které je umístěno za prostorovým filtrem č.6 a odráží svazek do interakční komory, je sestaven teleskop, tvořený spojkou a rozptylkou. Při počátečních výstřelech se zobrazovaná oblast nacházela *uvnitř* tohoto teleskopu. Jelikož vzdálenost kamera-rozptylka teleskopu je 44,3 m, z čočkové rovnice

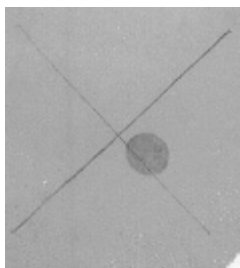
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a'} + \frac{1}{a}$$

$f$ ...ohnisková vzdálenost čočky

$a$ ...vzdálenost kamera-čočka

$a'$ ...vzdálenost kamera-zobrazovaná oblast

okamžitě dostáváme, že maximální přípustná vzdálenost kamery od čočky je cca 2,09 m. Zvolena byla vzdálenost 2,16 m, což odpovídá zobrazované oblasti 27 m od kamery a příčnému zvětšení svazku 0,08. Rozdíl v kvalitě svazku na vstupu kamery je zřejmý.



Obrázek 3.2: Obraz svazku po úpravě nastavení

## 3.2 Spouštění kamery a snížení intenzity svazku

Bylo zjištěno, že při výstřelech se zesilovačem A3 kamera spíná později. Pravděpodobným důvodem je fakt, že při nižší intenzitě svazku je náběžná hrana méně strmá a signál ze spouštěcí diody dosahuje prahové hodnoty pro spuštění (5 V) až téměř po průchodu svazku kamerou. Takto zaznamenaný obraz se tedy posunuje mimo snímací plochu CCD chipu. Byly učiněny pokusy zkrátit propojovací kabel mezi diodou a kamerou a přidat zpožďovací jednotku Hamamatsu, ale její vlastní zpoždění dané konstrukcí se ukázalo jako příliš velké a tedy nevyhovující (cca 3 ns). Zkracování délky kabelu na hodnotu, která by toto kompenzovala nebylo možné. Z tohoto důvodu jsou naměřená data pouze z výstřelů se stupni A4 a A5. Případné změny konfigurace zpožďovací linky byly zamítnuty jako neadekvátní případným výsledkům.

Oslabení intenzity svazku se provádí soustavou filtrů, umístěných mezi fokusační čočkou a streak kamerou. Konkrétní hodnoty transmise použitých filtrů jsou !!!!!, což odpovídá výsledné transmisi !!!!!.

# Kapitola 4

## Výsledky měření a analýza dat

Získaná data jsou v modifikovaném formátu TIFF, který kromě obrazu obsahuje i informace o použitém režimu a nastavení kamery. Obraz je v rozlišení 512 x 512 a barevné hloubce 256 barev; jsou použity tzv. falešné barvy, odpovídající intenzitě svazku (od tmavě modré po červenou). Obraz je orientován odshora dolů, tzn. přední část svazku se nachází v horní části obrazu (viz obrázek 4.1) .



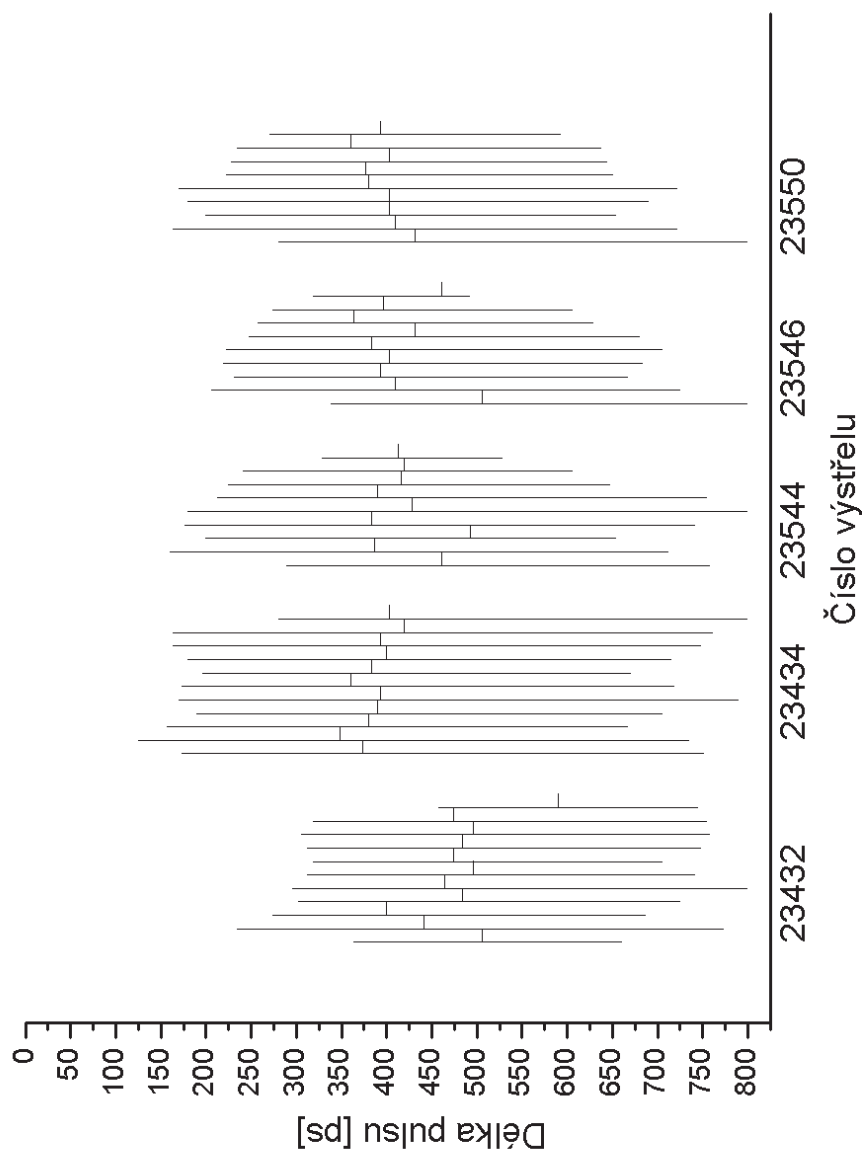
Obrázek 4.1: Obraz zaznamenaný streak kamerou (výřez)

Pro analýzu byl použit volně šiřitelný program UTHSCSA ImageTool, vyvinutý na University of Texas Health Science Center v San Antoniu, Texas a dostupný na internetu na anonymním ftp serveru <ftp://maxrad6.uthscsa.edu><sup>1</sup> Pro účely zpracování byl obraz zaznamenaný streak kamerou nejprve převeden z falešných barev do stupnice šedi. Z čárového profilu intenzit, sejmutého ve směru osy x (tzn. napříč svazku), byly určeny okraje zachyceného obrazu a souřadnice, ve kterých byly snímány profily podélné. Pro každý obraz bylo sejmuto okolo deseti profilů - ve středu obrazu a v rozestupu 10 bodů na každou stranu. Jako kritérium oddělení signálu od šumu pozadí byla stanovena hodnota  $1/10$  maxima, což je pro 8 bitovou hloubku stupnice šedi a maximum 255 cca 25. Pro každý profil byly zaznamenány tři hodnoty - počátek, konec a maximum intenzity. Pro převod polohy bodu z obrazových pixelů na pikosekundy byl použit vztah  $1 \text{ px} = 3,228963 \text{ ps}$ . Jsou-li rozměry CCD prvku  $512 \times 512$ , jednoduchým násobením zjistíme, že nastavenému režimu snímání 2 ns ve skutečnosti odpovídá pouze přibližně 1,65 ns, což se však zcela shoduje se skutečnou hodnotou uvedenou v [9]. Na tomto místě je však třeba uvést, že polohy maxima intenzity jsou přibližné a míra neurčitosti polohy obzvláště ve středu svazku silně kolísá. Na přesnost měření měla vliv také přirozená neurčitost celého procesu záznamu; tj. intenzita signálu fluktovala s každým výstřelem (byť ne významně) a v případě zejména slabého signálu bylo problematické oddělit obraz od pozadí.

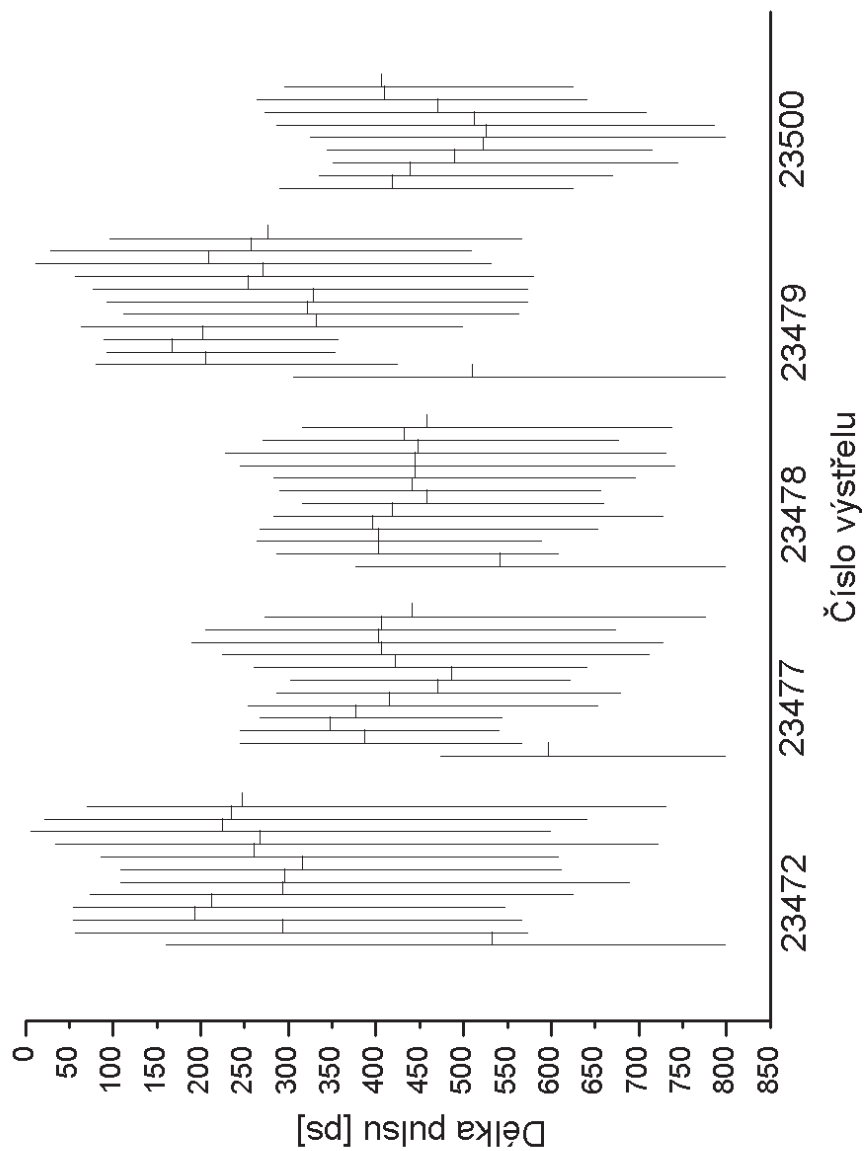
---

<sup>1</sup>Analysis performed using the free UTHSCSA ImageTool program (developed at the University of Texas Health Science Center at San Antonio, Texas and available from the Internet by anonymous FTP from <ftp://maxrad6.uthscsa.edu>)





Obrázek 4.2: Zaznamenané výstřely se stupněm A4



Obrázek 4.3: Zaznamenané výstřely se stupněm A5

# Literatura

- [1] BREDERLOV,G.,FILL,E.,WITTE,K.J. *The High-Power Iodine Laser*. Berlin: Springer-Verlag, 1983. ISBN 3-540-11792-X
- [2] KRÁLIKOVÁ,B. *Optimalizace prostoro-časového rozdělení záření jódového laseru*. Závěrečná zpráva (výsledky prací na grantovém projektu), přírůstkové číslo: 5096, registrační číslo: A1010527. Grantová agentura Akademie věd ČR,1997.
- [3] RUS,B. et al. New high-power laser facility PALS-prospects for laser-plasma research, *Laser and Particle Beams*, 1999, roč.17, č.2, s.179-194
- [4] JUNGWIRTH,K. et al. The Prague Asterix Laser System, *Physics of Plasmas*, 2001, roč.4, č.5, s.2495-2501
- [5] BAUMHACKER,H. et al. The Asterix IV Iodine Laser: Performance and Applications, Fourth International Workshop on Iodine Lasers and Applications Proceedings, SPIE vol.2767, 1996
- [6] VORONICH,I.N.,EROSHENKO,V.A.,ZARETSKII,A.I.,KIRILLOV,G.A., KOCHEMASOV,G.G.,MERUKLOV,S.G.,MURUGOV,V.M.,OKUTIN,G.P., RUKAVISHNIKOV,N.N.,RYADOV,A.V.,SOKOLOVSKII,S.V., SUKHAREV,S.A. Formation of space-time structure of subnanosecond light pulse in the ISKRA-4 multicascade laser device *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Seriya Fizicheskaya* , roč.54, č.10 , s.2016-23 , 1990 Překlad v : *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR, Physical Series* , roč.54, č.10 , s.130-6 , 1990

- [7] *Instruction manual for the streak camera C7700*, Hamamatsu Photonics K.K.
- [8] *High Performance Digital Temporal Analyzer*, User Manual, Hamamatsu Photonics K.K.
- [9] *Instruction manual for the streak camera C7700*, Test Report, Hamamatsu Photonics K.K.
- [10] RUS,B.,ROHLENA,K.,SKÁLOVÁ,V.,ULLSCHMIED,J. *Prague Asterix Laser System* [online].1999, poslední revize 30.5.2002 [cit.11.6.2002].  
Dostupné z: <http://www.pals.cas.cz/pal>
- [11] Hamamatsu corporation *Systems:Streak Camera Operating Principles*.2001, [cit.11.6.2002].Dostupné z <http://usa.hamamatsu.com>