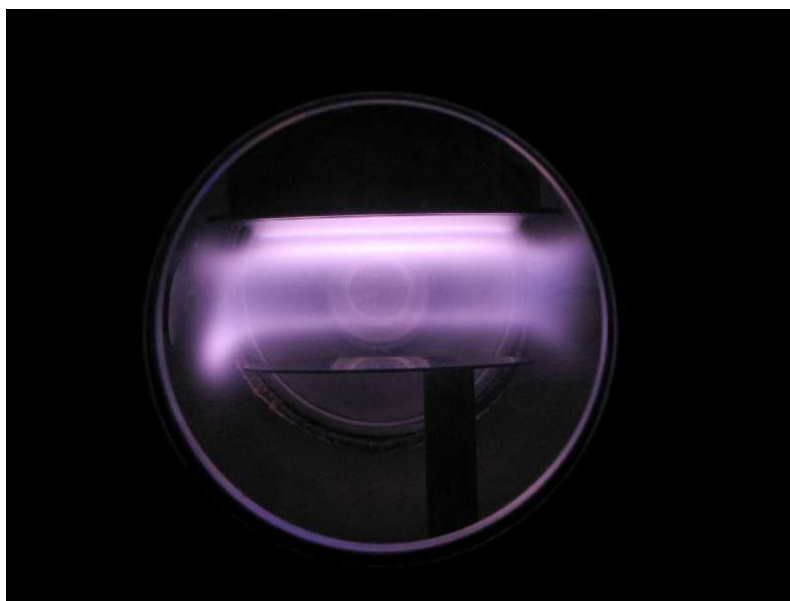

Studium ohřevu kapacitně vázaného výboje pomocí intenzifikované CCD kamery

Úkol

Pomocí ICCD kamery zjistěte, které mechanismy ohřevu elektronů hrají dominantní roli v nízkotlakém kapacitně vázaném výboji iniciovaném ve vodíku.



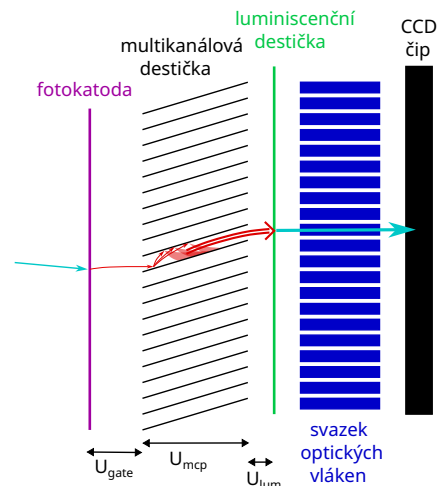
Fotografie kapacitně vázaného výboje zapáleného ve vodíku za tlaku 120 Pa. Ve vnitřní části mezi-elektrodového prostoru září (zejména na svých okrajích) vlastní plazma. Mezi vlastním plazmatem a elektrodami vidíme stěnové vrstvy. Stěnová vrstva u spodní elektrody je spořádaně temná a zřetelně ji vidíme. Uvnitř stěnové vrstvy u horní elektrody se ale nachází intenzivně svítící rovina. Kde se tam bere? Pochybuji, že bychom na tuto otázku zvládli správně odpovědět, pokud bychom neměli k dispozici ICCD kameru...

Intenzifikovaná CCD kamera

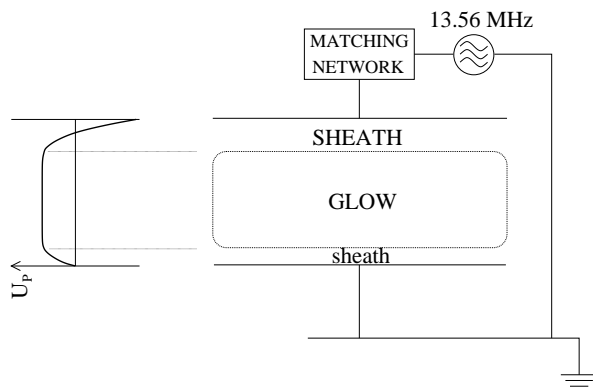
Intenzifikovaná CCD kamera (ICCD kamera) obsahuje na rozdíl od prosté CCD kamery navíc zesilovač, který kromě zesílení obrazu (neseného v tu chvíli elektrony) umožňuje i rychlé hradlování – přepínání mezi stavy, kdy kamera snímá a kdy nesnímá obraz. ICCD kamera tedy obsahuje několik základních částí (viz obr. 1):

- Fotokatoda. Konvertuje obraz nesený fotony na obraz nesený elektrony. Materiál, ze kterého je vyrobena, určuje, na jaké vlnové délky světla bude kamera citlivá. Typ fotokatody proto určuje spektrální závislost citlivosti ICCD kamery.
- Zesilovač tvořený tzv. multikanálovou destičkou (*multichannel plate*). Jde o (často křemennou) asi 1 mm tlustou destičku provrtanou mnoha úzkými rovnoběžnými kanálky, z nichž každý má průměr okolo $10\ \mu\text{m}$. Tyto kanálky jsou zevnitř pokryty tenkou vrstvou materiálu s nízkou výstupní prací, který má vysokou schopnost sekundární emise elektronů. Protože na mikrokanálovou destičku je přiloženo napětí (přibližně 1 kV), slouží zmíněná vrstva v každém kanálku zároveň jako napěťový dělič. Trefí-li se tedy elektron uvolněný z fotokatody do kanálku, vyrazí z jeho stěny několik nových elektronů, které jsou v silném elektrickém poli vtahovány hlouběji do kanálku a urychlovány tak, aby při dalším nárazu na stěnu opět vyrazily nové elektrony. Kanálkem se tak šíří lavina elektronů a každý kanálek vlastně funguje jako miniaturní fotonásobič. Soustava mnoha paralelních kanálků pak umožňuje zesilovat celý obraz. Aby primární elektron nemohl kanálkem proletět bez nárazu na stěnu, nebývají kanálky kolmé na rovinu destičky, ale bývají ukloněné o přibližně 10° .
- Fluorescenční obrazovka, která konvertuje již zesílený obraz nesený elektrony zpět na světlo. Toto světlo je následně svazkem optických vláken nesené na vlastní
- CCD čip, který již standardně převádí obraz do digitální podoby.

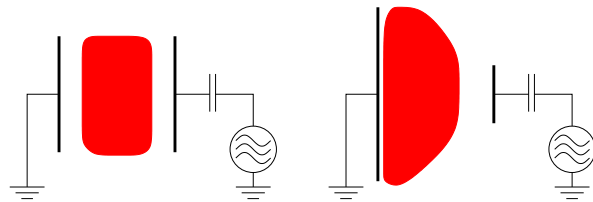
Výhodou zesilovače je přirozeně zesílení obrazu, jedna multikanálová destička mívá zisk $10^3 - 10^4$. Možná ještě větší výhodou je skutečnost, že mezi fotokatodu a čelní stranu multikanálové destičky je přivedeno relativně nízké napětí ($\sim 200\ \text{V}$), které je možno rychle přepínat a řídit tím, zda elektrony emitované z fotokatody dorazí na multikanálovou destičku a přispějí k tvorbě obrazu. ICCD kameru tak můžeme otevírat i na velmi krátké doby ($\sim 1\ \text{ns}$), což umožňuje realizaci měření s vysokým časovým rozlišením. Při integrační době v řádu nanosekund může být samozřejmě snímáný obraz příliš slabý a zcela ztracený v šumu. ICCD kamery umožňují tento problém vyřešit, pokud jsme schopni studovaný děj opakovat. Kameru můžeme externě synchronizovat s opakovaným jevem, zesilovač pokaždé otevřít právě jen na studovaný časový interval a na CCD čipu akumulovat signál z mnoha opakovaných dějů a tím řádově zvýšit poměr signálu ku šumu.



Obrázek 1: Schéma zesílení obrazu v ICCD kamere. Napětí U_{gate} je přiloženo mezi fotokatodu a multikanálovou destičku – toto napětí se nejčastěji používá k rychlému hradlování kamery. U_{mcp} symbolizuje napětí na multikanálové destičce a U_{lum} napětí urychlující elektrony před dopadem na luminiscenční desku.



Obrázek 2: Základní schéma kapacitně vázaného výboje. Vlastní plazma (bulk plasma, glow) je od každé elektrody odděleno stěnovou vrstvou (sheath) – oblastí s kladným prostorovým nábojem iontů a s prudkým spádem elektrického potenciálu.



Obrázek 3: Srovnání situace v geometricky symetrickém a nesymetrickém reaktoru, tedy v reaktoru se stejně nebo různě velkými elektrodami.

Kapacitně vázaný výboj

Základní charakteristika

Kapacitně vázané výboje patří mezi vysokofrekvenční výboje, pro které je typické, že frekvence vnějšího elektrického pole je sice výrazně nižší, než plazmová frekvence elektronů, zato je ale vyšší, než plazmová frekvence iontů. Elektronů tedy stíhají reagovat na vnější pole a jsou vnějším vf. polem účinně urychlovány, zatímco málo pohyblivé ionty na vf. pole příliš nereagují a ve vlastním plazmatu jsou téměř nehybné.

V kapacitně vázaných výbojích má intenzita elektrického pole dominantní složku kolmou na povrch elektrod (podobně, jako je tomu v kondenzátoru). Toto pole zpočátku vytáhne část elektronů z plazmatu na elektrody, což vede k navýšení potenciálu plazmatu a vzniku potenciálových bariér mezi plazmatem a elektrodami, tzv. stěnových vrstev prostorového náboje. Stěnové vrstvy obsahují kladné ionty a jen málo elektronů, jsou tedy kladně nabitě, čímž odstiňují záporný náboj elektrod. Elektrické pole ve stěnových vrstvách odpuzuje elektrony od elektrod a udržuje je tak v plazmatu. Zároveň ale přitahuje kladné ionty směrem k elektrodám. Protože pole stěnových vrstev má nejen vysokofrekvenční, ale i silnou stejnosměrnou složku, dokáže ionty značně urychlit, což za nízkého tlaku vede k bombardu elektrod energetickými ionty.

Výbojový prostor se nám tak dělí na dva typy oblastí (viz obr. 2). První oblastí je vlastní makroskopicky neutrální plazma charakterizované relativně vysokou koncentrací elektronů, tedy vysokou vodivostí a také slabým elektrickým polem. Druhý typ oblastí reprezentují stěnové vrstvy s kladným prostorovým nábojem a silným vysokofrekvenčním i stejnosměrným elektrickým polem, které nepouští elektrony pryč z vlastního plazmatu. Díky vf. složce napětí na každé stěnové vrstvě platí, že tloušťka stěnové vrstvy rychle osciluje, což ji odlišuje od katodové vrstvy stejnosměrného doutnavého výboje.

Nesymetrie výboje

Podívejme se na situaci, kdy jedna z elektrod je větší než druhá. Typicky hraje roli větší elektrody zemněná elektroda, protože k její ploše často přispívají i ostatní zemněné části reaktoru. Díky kontinuitě proudu musí oběma stěnovými vrstvami téct stejně velký vf. proud, což znamená, že stěnovou vrstvou u menší elektrody poteče vf. proud s vyšší plošnou hustotou. Protože vf. složka proudu stěnovou vrstvou je realizována vf. oscilacemi tloušťky stěnové vrstvy, vede vyšší proudová hustota k větší amplitudě kmitů tloušťky stěnové vrstvy. Stěnová vrstva u menší elek-

trody tedy bude tlustší, bude na ní proto vyšší napětí a uvnitř ní bude silnější elektrické pole ve srovnání se situací ve stěnové vrstvě umístěné u větší elektrody. Můžeme proto očekávat, že mechanismy ohřevu elektronů související s polem stěnové vrstvy budou výraznější u/ve stěnové vrstvě lokalizované právě u plošně menší elektrody.

Mechanismy ohřevu elektronů

Ohřev elektronů v elektrickém poli lze vždy popsat skalárním součinem hustoty proudu elektronů a intenzity elektrického pole ($\vec{j} \cdot \vec{E}$). Protože se ale tyto veličiny v různých místech a okamžicích výboje chovají značně rozdílně, je užitečné rozdělit si ohřev elektronů na čtyři níže popsané mechanismy. Tyto mechanismy se budou uplatňovat buď uvnitř vlastního plazmatu, kde je sice vysoká koncentrace elektronů, ale kde je slabé elektrické pole, nebo uvnitř stěnové vrstvy, kde sice je silné elektrické pole, ale nízká koncentrace elektronů, které bychom mohli ohřívat, nebo na rozhraní stěnové vrstvy a vlastního plazmatu.

Elektrické pole samozřejmě dodává energii přímou cestou také iontům. Většina iontů v nízkotlakém plazmatu ovšem předá získanou energii pevnému povrchu, na který jsou ionty z plazmatu taženy. To je sice důležité pro případné depozice tenkých vrstev nebo leptání, ionty ale nejsou schopny účinně předat svoji kinetickou energii elektronům, proto se ohřevu iontů v této úloze nebudeme věnovat.

Následující text stručně představí čtyři hlavní mechanismy ohřevu elektronů v kapacitně vázaných výbojích. Protože se tyto mechanismy liší v tom, kdy a kde ve výboji nejvíc působí, můžeme je rozlišit a studovat právě pomocí ICCD kamery.

Ohmický (srážkový) ohřev

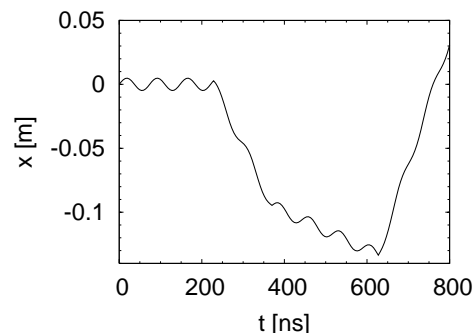
Ve vf. elektrickém poli ve vakuu by byl elektron půl periody urychlován, po změně orientace vnějšího pole by ale byl zpomalován a v průměru by tak jeho energie nerostla. V řídkém plynu ale elektron může občas náhle změnit směr rychlosti při srážce s molekulou plynu. Může se tak stát, že místo zpomalení v následující půlperiodě bude elektrickým polem opět urychlen a jeho střední energie tak vzroste. Srážky elektronů s neutrály proto (možná překvapivě) vedou k ohřevu elektronů. Tento proces se uplatňuje zejména uvnitř vlastního plazmatu, kde se nachází většina elektronů. Matematicky můžeme srážkový ohřev elektronů vyjádřit s pomocí vztahu pro vf. vodivost plazmatu

$$\sigma = \frac{ne^2}{m(\nu^2 + \omega^2)}(\nu - i\omega) + i\omega\varepsilon_0, \quad (1)$$

kde n je koncentrace elektronů, m jejich hmotnost a ν srážková frekvence elektronu pro přenos hybnosti při kolizi s neutrální částicí. ω je úhlová frekvence elektrického pole. První člen na pravé straně rovnice (1) popisuje proud nesený elektrony v plazmatu, zatímco druhý člen popisuje Maxwellův posuvný proud.

Pomocí reálné části vodivosti plazmatu získáme za podmínky $\nu \ll \omega$ vztah pro střední elektronům dodávaný výkon

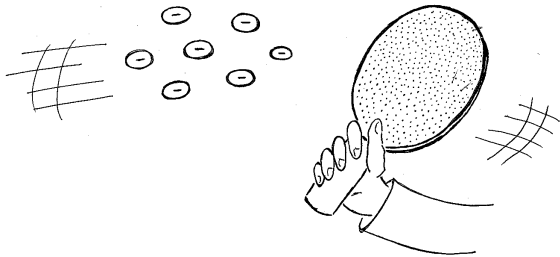
$$P_{ohm} \approx \frac{2e^2}{m\omega^2} \int_V n \nu E_1^2 dV, \quad (2)$$



Obrázek 4: Trajektorie elektronu v harmonickém elektrickém poli a její změny způsobené otočením rychlosti při srážkách.

kde E_1 je amplituda intenzity elektického pole a V označuje objem plazmatu, přes který výkon integrujeme. Vidíme, že výkon dodávaný elektronům ve vysokofrekvenčním poli vlastního plazmatu je přímo úměrný srážkové frekvenci elektronu, nazýváme jej i proto srážkový ohřev.

Stochastický ohřev



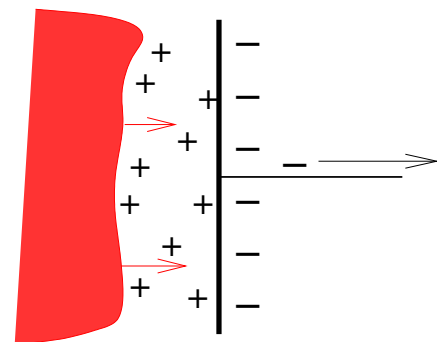
K jinému mechanismu ohřevu může docházet na hranici vlastního plazmatu a stěnové vrstvy. Elektronů vyletujících z plazmatu se střetávají se silným polem vrstvy, které jich na prostou většinu odrazí zpět. Stěnová vrstva vysokofrekvenčních výbojů ale není statická a její tloušťka se rychle mění. Elektronů dopadajících na právě expandující stěnovou vrstvu, tedy na „stěnu“ pohybující se proti nim, se odrážejí s vyšší rychlostí, než jakou měly při dopadu

na vrstvu. Naopak elektronů dopadajících na kolabující stěnovou vrstvu se odrážejí s rychlostí (a energií) sníženou. Během té poloviny periody výboje, kdy stěnová vrstva jde elektronům vstříc, na stěnovou vrstvu přirozeně dopadne více elektronů, než během té fáze výboje, kdy se stěnová vrstva zmenšuje a před elektronů „utíká“. V průměru tak pohyb stěnové vrstvy při expanzi elektronů dodá více energie, než kolik energie jim vezme při smršťování. Tento proces se nazývá stochastický ohřev.

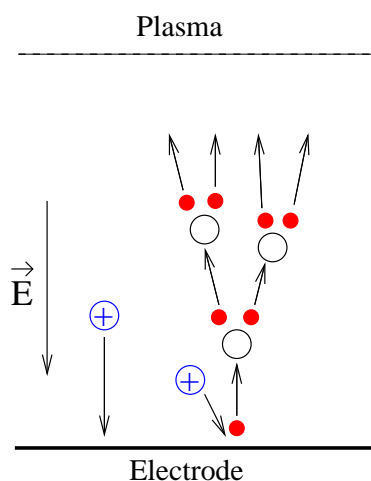
Protože stěnová vrstva někdy expanduje rychlostí vyšší, než jaká je tepelná rychlost elektronů, dojde při expanzi vrstvy ke společnému urychlení prakticky všech elektronů, které se dostaly do prostoru uvolněného stěnovou vrstvou během předchozích fází výboje. Plazmatem pak proletí svazek elektronů s kinetickou energií, která odpovídá rychlosti expanze stěnové vrstvy. Za dostatečně nízkého tlaku může tento svazek doletět až ke stěnové vrstvě u protější elektrody, od které se může odrazit a při vhodném načasování od ní může také získat energii prostřednictvím stochastického ohřevu.

Obrácení pole

Zajímavá situace nastane, když je během smršťování stěnové vrstvy náboj z elektrody odváděn tak rychle, že se plazma nestíhá dostatečně rychle k elektrodě posouvat. Jinak řečeno, stěnová vrstva je v této chvíli širší a její kladný náboj je větší, než co by odpovídalo momentálnímu zápornému náboji elektrody. Celkový náboj elektrody a stěnové vrstvy proto na chvíli není nulový, ale kladný, což vede ke vtahování elektronů z plazmatu do okrajových částí stěnové vrstvy. Toto pole dokáže urychlit elektronů i na ionizační energii a může proto přispět k ohřevu a udržení plazmatu. Protože elektrické pole orientované tak, že elektronů přitahuje k elektrodě, je ve vř. plazmatu relativně vzácné, nazývá se tento jev obrácení pole.



Obrázek 5: Vtahování elektronů do stěnové vrstvy při obrácení pole.

γ -ohřev

Obrázek 6: Elektronová lavina ve stěnové vrstvě.

K ohřevu elektronů v nejsilnějším elektrickém poli stěnové vrstvy může dojít, pokud se nám podaří vytvořit volný elektron v hloubce stěnové vrstvy. Nejběžnějším jevem, který k tomuto účelu může posloužit, je potenciálová emise elektronu z elektrody vyvolaná dopadem kladného iontu. Kladný iont je potenciálová jáma, do které těsně před nárazem iontu na elektrodu spadne elektron pocházející z elektrody. Uvolněná energie se občas (v typicky necelém jednom procentu případů) využije právě na emisi jiného elektronu z elektrody.

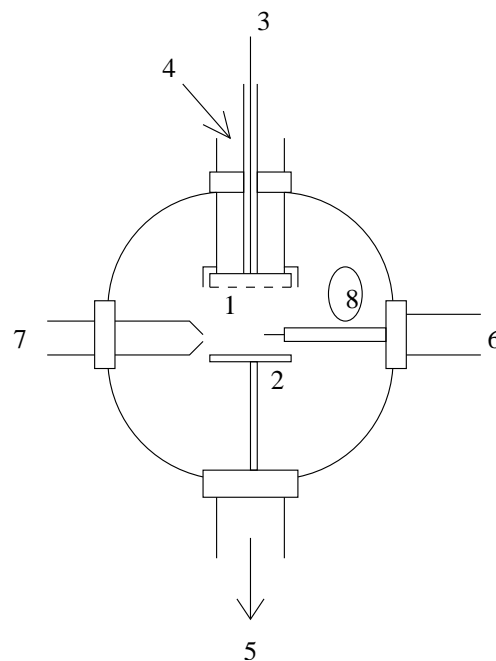
Tento volný elektron je elektrickým polem tlačěn skrz celou stěnovou vrstvu, ve které může získat velikou energii. Navíc, pokud je tlak plynu dostatečně velký, se elektron může ještě ve stěnové vrstvě několikrát srazit s molekulami plynu, ionizovat je a vytvořit tak další volné elektrony, které jsou také urychlovány silným polem stěnové vrstvy a mohou také ionizovat. Za vyšších tlaků tak vzniká ionizační lavina, podobně jako v katódové vrstvě stejnosměrného výboje. Takováto lavina může být důležitým zdrojem volných elektronů i energie pro plazma.

Aparatura

V této úloze budeme sledovat nízkotlaký kapacitně vázaný výboj iniciovaný ve vodíku. Jak je vidět na schématu aparatury (obr. 7), výboj je zapalován v kulové vakuové aparatuře mezi dvěma elektrodami umístěnými nad sebou v nastavitelné vzdálenosti několik cm. Elektrody jsou kruhové s průměrem 8 cm. Na horní elektrodu je přivedeno napětí s frekvencí 13,56 MHz, dolní elektroda je zemněna. Spolu s dolní elektrodou je zemněn i celý vakuový reaktor, takže k efektivní ploše zemněné elektrody přispívají i kovové stěny aparatury, což vede k asymetrii výboje. Napětí přiváděné na horní elektrodu lze měřit osciloskopem.

Výboj budeme zapalovat za tlaku jednotek až desítek Pa. Aparatura je čerpaná turbomolekulární vývěvou, která je předčerpávaná membránovou vývěvou. Napouštění vodíku do aparatury je řízeno průtokoměrem.

Výboj lze sledovat oknem umístěným z boku aparatury (viz fotku na titulní stránce návodu). ICCD kamera bude umístěna na stativu před tímto oknem. Kameru je možné s výbojem synchronizovat pomocí TTL signálu posílaného do kamery z generátoru vf. napětí. Protože výboj je spolehlivě periodický, můžeme při měření akumulovat signál pocházející z mnoha různých period výboje. Pomocí software kamery je možné nastavit zejména tyto parametry měření:



Obrázek 7: Schéma aparatury. 1 – buzená elektroda, 2 – zemněná elektroda, 3 – přívod vf. napětí, 4 – přívod plynu, 5 – odvod plynu k vývěvě, 6 – Langmuirova sonda, 7 – hmotnostní spektrometr, 8 – křemenné okénko pro měření spekter.

- Zpoždění měření kamery vůči synchronizačnímu signálu. Nastavením této veličiny určíme, kterou časovou fází výboje budeme aktuálně měřit.
- Délku časového intervalu, po který bude zesilovač kamery zapnutý. Tímto parametrem určujeme časové rozlišení měření.
- Počet otevření kamery na jeden snímek. Tímto číslem určíme počet akumulací signálu na CCD čipu, tedy kolikrát bude kamera signál sbírat, než jej odešle do počítače.
- Průměrování snímku. Obrázky je možné naměřit vícekrát a průměrovat až v počítači. Nevýhodou této softwarové akumulace oproti akumulaci na čipu kamery je opakované vyčítání CCD čipu do počítače, což je proces, který generuje poměrně značný šum.
- Napětí na zesilovači. Tato veličina určuje zisk zesilovače.

Když naměříme více obrázků výboje s postupně rostoucím zpožděním kamery vůči synchronizačnímu signálu, můžeme získat zpomalený film, který nám ukáže časoprostorový vývoj záření výboje v rámci periody. Takovýto film může názorně ukázat procesy probíhající ve výboji a odhalit mechanismy ohřevu elektronů v plazmatu.



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



Národní
plán
obnovy

MS
MT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY