

Gyors (AXUV) bolométerek alkalmazása a plazmadiagnosztikában

Veres Gábor, Tál Balázs

MTA KFKI Részecske és Magfizikai Kutató Intézet
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós u. 29-33, Tel: +361 392 2222,

Ebben a cikkben áttekintést adunk a plazmadiagnosztikában, azon belül is a tokamakok plazmájának diagnosztikájában az utóbbi években egyre elterjedtebb és népszerűbb gyors (AXUV) bolométerek felhasználásáról, valamint előnyeiről és hátrányairól a „hagyományos” bolométerekkel szemben.

Bevezetés

Bolométereknek az elektromágneses sugárzás teljesítményének detektálására használatos eszközöket nevezünk. A szó szoros értelmében vett bolométerek nem léteznek, mert nem lehet olyan detektort építeni, amely ugyanolyan hatásokkal detektálja a rádióhullámokat és a gamma-sugarakat. Azonban a fúziós plazmák sugárzása egy viszonylag széles, de mégis korlátos frekvenciatartományra terjed ki, amely a látható fénytől (körülbelül 1 eV) a kemény röntgen tartományig terjed (50keV) [1]. Ilyen széles spektrumban körülbelül állandó hatásfokú detektorok pedig léteznek, ezért a plazma lesugárzott teljesítményének mérése megoldható. A „hagyományos” bolométerek azon az elven működnek, hogy elnyelt energia hatására az azt abszorbeáló anyag – vagy a vele hőkapcsolatban lévő valamilyen másodlagos anyag – tulajdonsága megváltozik, és ez a változás arányos az elnyelt energiával, illetve a detektort érő teljesítménnyel. A legelterjedtebb fólia bolométerek [2] esetében sugárzás hatására megnő az abszorber hőmérséklete, amelyet egy nagyon érzékeny ellenállás-hőmérővel lehet mérni. Éppen ez a működési elv az, ami a „hagyományos” bolométerek legnagyobb hátrányát jelenti: ahhoz, hogy az anyag hőtulajdonságai megváltozzanak, az abszorber véges hőkapacitása miatt jelentős időre, a mai korszerű műszerek esetében is néhány századmásodpercre van szükség. Ez az időskála azonban túl hosszú sok a mai tokamakoknál észlelt instabilitás (pl. ELM-ek [3, 4], diszrupciók [5]) kellően pontos diagnosztizálásához. Ezen instabilitásoknak a növekedési rátája tíz mikroszekundum nagyságrendű, tehát pontos karakterizálásukhoz ilyen időskálán működő mérőberendezésre van szükség. A fólia bolométerek másik nagy hátránya, hogy nem csak bolométerek, azaz nemcsak a beérkező elektromágneses sugárzás energiáját mérik, hanem a sugárzási energia és a plazmából kirepülő és őket elérő részecskék (ilyen

részecskék általában semlegesek) mozgási energiájának összegét.

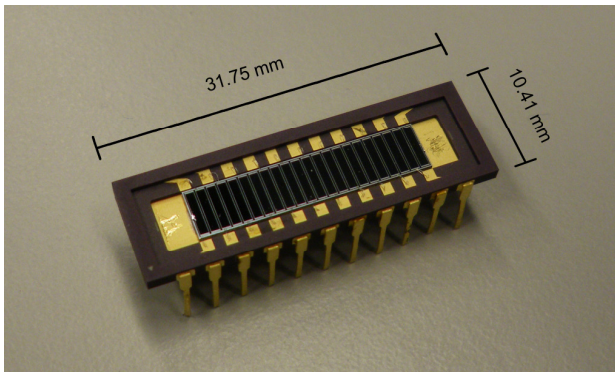
A gyors bolométerek, azaz az AXUV diódák [6] (egy 20 diódából álló AXUV detektorsor látható az 1. ábrán) működési elve azonos a nukleáris mérés technikában alkalmazott félvezető detektorokéval [7], azonban tulajdonságaik úgy lettek kialakítva, hogy a plazma által sugárzott elektromágneses spektrumra legyen nagy a hatásfokuk, és ne a gamma-sugárzás spektrális tartományára.

Az AXUV mozaikszó az Absolute X-ray UltraViolet kifejezés kezdőbetűiből származik. Az X-ray és az UltraViolet szavak a detektálható spektrális tartományra utalnak, míg az Absolute szó arra, hogy a diódáknak ismert az érzékenyséjük egy adott frekvencián, azaz abszolút kalibrálva vannak. A fólia bolométerek érzékenysége szintén mérhető és számolható, de az függni fog az abszorber hőkapacitásától, illetve a termikus kontaktréteg paramétereitől is, amelyeket a gyártás során lehet beállítani. Az AXUV detektorok érzékenysége pedig a p-n átmenet jellemzője, azaz a gyártási paraméterek változtatásával csak kismértékben lehet változtatni.

Az AXUV detektorok legnagyobb előnye a hagyományos bolométerekkel szemben, hogy akár mikroszekundumos időfelbontást is el lehet velük érni, továbbá az alacsony energiás semleges részecskékre nem érzékenyek [8]. A nagy energiájú semleges részecskék detektorba való becsapódása pedig megfelelő geometriai kialakítással elkerülhető.

Azonban a kísérleti fizikában is mindennek ára van. Az AXUV diódák esetében ez a mechanikai sérülékenység, az öregedés effektusa, illetve a beeső fény frekvenciájától függő érzékenység.

A mechanikai sérülések elkerülése érdekében a detektorok elhelyezését kellő gondossággal kell végezni.



1. ábra: Fénykép egy 20 diódából álló detektorsorról.

Az öregedés effektusa azt jelenti, hogy a diódák érzékenysége a használat során csökken, azaz a detektálható sugárzás hatására károsodnak is. Ez döntően a belépő ablak-n típusú félvezető határfelületen lejátszódó jelenségek miatt történik [9]. Ezért már léteznek sugárzással szemben ellenállóbb diódák (UVG, SXUV típusúak), amelyeknek belépő ablaka nem közönséges SiO_2 , és emiatt sokkal kisebb bennük a sugárkárosodás mértéke. Azonban ezek spektrális érzékenysége a belépő ablak eltérő abszorpciós tulajdonságai miatt eltér az AXUV diódákétól, és ennek hatására plazmadiagnosztikai bolométerként való alkalmazásuk sokkal problémásabb. Ezen kívül minden félvezető detektor sajátossága, hogy neutronsugárzás hatására súlyosan károsul. Ezért neutronok detektálására nem is alkalmaznak félvezető detektorokat, de nagy neutronfluxusú környezetben sem lehet őket alkalmazni fotonok detektálására. Az ITER-be [10], amelyben a diagnosztikához alkalmas helyeken a neutronfluxus akár 10^{17} n/(m²s) is lehet [11], nem is terveznek beépíteni ilyen detektorokat.

A legsúlyosabb probléma az AXUV diódák használata során az, hogy a beeső fény frekvenciájától függ az érzékenységük, ezért a lesugárzott teljesítményt csak akkor lehetne pontosan meghatározni, ha ismernénk a detektort ért sugárzás spektrumát is. Ehhez vagy minden pontban ismerni kéne a plazma sugárzásának spektrális eloszlását, vagy mérni kellene a detektált sugárzás spektrumát is. Ez utóbbit spektrométerrel meg lehetne oldani: minden AXUV dióda mellé fel kellene szerelni egy spektrométert is (és ekkor már AXUV diódára sem lenne szükség). Spektrométerekből azonban általában csak néhány darabot szoktak telepíteni egy tokamakra a nehéz elhelyezhetőség és a horrorbilis költségek miatt, míg AXUV diódából akár több százat is. A lesugárzott teljesítményt pedig egy becsült spektrális átlag segítségével lehet meghatározni a dióda-jelekből, azonban ezen becslés hibája jelentős lehet.

Az AXUV diódák működési elve

Az 1. ábrán egy 20 diódából álló detektorsor fényképe látható.

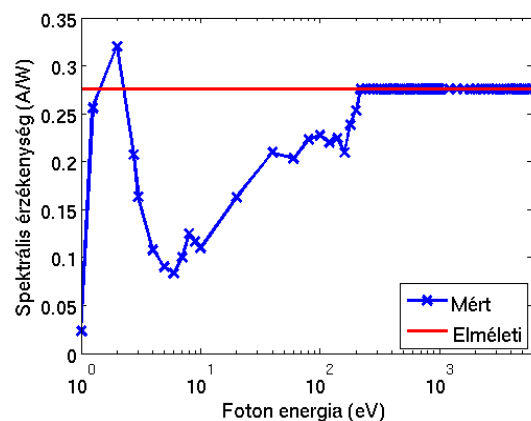
Mint már a bevezetőben is említettük, hogy az AXUV diódák működési elve megegyezik a nukleáris félvezető detektorokéval. Azon speciális tulajdonságuk, hogy más spektrális tartományban érzékenyek, három dologra vezetendő vissza:

- a diódák olyan vékonyak, hogy a gamma-sugárzás majdhogynem gyengítetlenül áthatol rajtuk,
- a belépő ablakuk olyan vékony (3-7 nm), hogy a látható fény is át tud hatolni rajta úgy, hogy intenzitása csak kismértékben gyengül,
- a speciális gyártástechnológiának köszönhetően nincs felületi holtrétegük, ahol a sugárzás hatására létrejövő elektron-lyuk párok rekombinálni tudnának, így közelítőleg 100 százalékos kigyűjtési hatásokuk van.

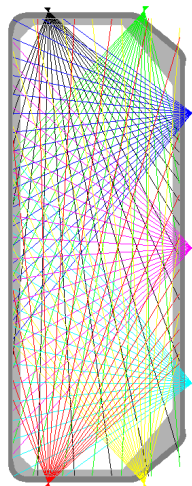
Belépő ablakra minden félvezető detektor esetében szükség van, ugyanis ez gátolja meg a környezet molekuláinak érintkezését a félvezető rétegekkel. Közvetlen érintkezés hatására ezen molekulák bediffundálnának az érzékeny térfogatba, elszennyeznék és használhatatlanná tennék a detektort. Sajnos a belépő ablakban a látható és UV tartomány fotonjai abszorbeálódnak, ráadásul az abszorpció függ a beeső fény frekvenciájától, így az érzékenység is fog függni, ez az AXUV diódák legfőbb problémája.

Ugyan az érzékenység csak egy keskeny tartományban tér el a konstanstól (pongyolán fogalmazva lyukas), azonban a mai tokamakoknál a lesugárzott teljesítmény igen jelentős hányada, akár mintegy 70 százaléka is ebbe a tartományba eshet. Ugyanis ide tartozik a hidrogén Lyman- α vonala (a határreteg-plazmában a hidrogén jelentős része nem ionizált, és erősen sugároz), valamint a néhányszor ionizált szén-ionok legerősebben sugárzó vonalai (a szén a gyakran széntéglával burkolt berendezések faláról jut a plazmába). Ennek hatására az 1/3,63 A/W-os érzékenységgel számolt lesugárzott teljesítmény akár 50-80 százalékkal is eltérhet a valódi értéktől.

Az orosz T-10 tokamakban a fólia bolométerek által mért értékektől való eltéréseket szisztematikusan vizsgálták a különböző plazmakonfigurációk esetében [12]. Szintén vizsgálat tárgyává tették a diódák öregedésének folyamatát és érzékenységük változását a szennyező, elsősorban szénrétegek hatására. (A grafit a mai tokamakok belső berendezésének alkotó eleme, ezért szén szükségképpen minden tokamakban jelen van.)



2. ábra: Az AXUV diódák spektrális válaszfüggvénye, kék: az AXUV dióda mért spektrális válaszfüggvénye, piros: az egy lyuk-elektron pár keltéséhez szükséges energiából számolt elméleti érték



3. ábra: Az AXUV bolométer kamerák látóirányainak elrendezése a tokamak egy poloidális keresztmetszetében

A DIII-D amerikai tokamakon az érzékenységet diszrupciók áramkioltási szakaszában mérték, és az állandósult állapotú plazmakisülések jelentős szórású átlagos értékénél 30%-kal alacsonyabb, kis szórású értéket kaptak [13].

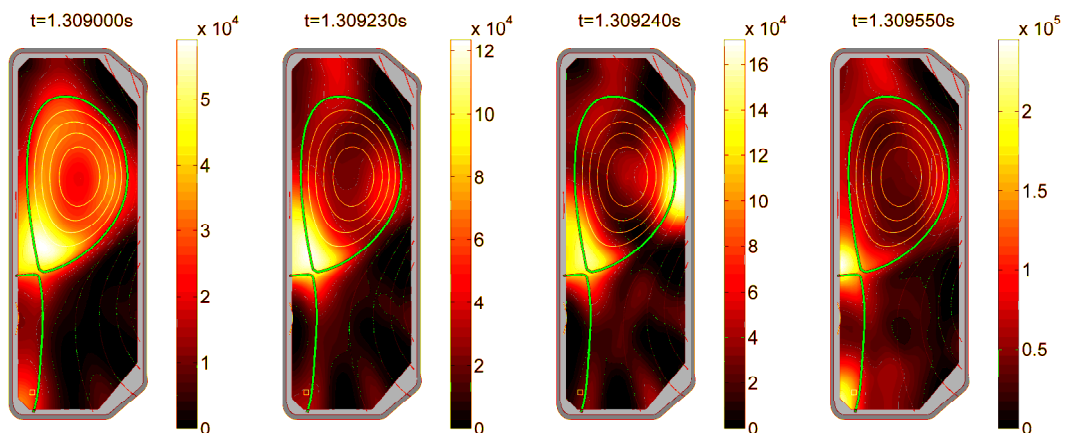
AXUV diódák alkalmazása a TCV tokamakon

A plazmák sugárzásának és sugárzási profiljának mérése sok azonos tulajdonságú detektor segítségével lehetséges, ha megfelelően vannak elrendezve. Számos ilyen elrendezés létezik, egyik a vonalintegrált mérés technika, amelynek adatait tomográfiai módszerekkel [1][14] lehet kiértékelni. A TCV tokamak egy a Lausanne-i Műszaki Egyetem Plazmafizikai Intézetében (CRPP) működő közepes méretű tokamak [15]. A CRPP rendelkezik egy ilyen detektorrendszerrel, melyben kameraként 20-20 AXUV detektor található, azaz összesen 140 látóirány mentén méri a plazma sugárzását egy vertikális (poloidális) metszetben [16]. A látóirányok elrendezését a 3. ábra szemlélteti.

Az AXUV diódák mikroszekundum körüli időfelbontása elegendő egy sajátos plazmafizikai instabilitás, az ELM

vizsgálatához [4]. Ez akkor lép fel, amikor a plazma magas összetartású állapotban (H-módban) van, melynek jellemzője, hogy a plazma szélén megjelenik egy transzportgát, amelynek hatására a plazma hőmérséklete, sűrűsége a plazma szélén egy kis térbeli tartományban nagyon meredeken emelkedik. Ezt a tartományt nevezzük pedesztálnak. Az ELM-ek (Edge Localized Mode) a plazma olyan instabilitásai, amelyek ezen pedesztált periodikusan összeomlasztják. Egységes elméleti leírásuk még nincs, az aktuális tárgyalásuk alapja a magnetohidrodinamika. Elméletük kidolgozásához jelenleg még a kvalitatív mérések is sokat segítenek. 1-2 milliszekundumos hosszuk számos periódusra bontható, és az egyes periódusokban is összetett struktúrákat lehet észlelni. Kezdetben nagyon gyorsan nőnek, 10 mikroszekundumos növekedési rátájúak is lehet. Körülbelül 10-100 Hz frekvenciával, de szabálytalan módon ismétlődnek. Minden H-módban üzemelő tokamakra jellemzőek. Azért óriási a jelentőségük, mert a plazmában felgyülemlött szennyezőket eltávolítják a plazmából. (Szemléletes, bár a valóságot nem feltétlenül tükröző képük szerint nem mások, mint az összetartott plazmából kidobódó kis plazmacsomagocskák.) Azonban az ELM-ek során a plazma hőtranszportja és sugárzása jelentősen megnő. Egy tokamak első falának és divertorának hőtűrőképessége pedig még aktív hűtés mellett is korlátozza az ezen elemekre érkező maximálisan megengedhető hőteljesítményt. Ezért az ITER működésének egyik legkritikusabb pontja az ELM-ek alatt a divertorlemezekre vezetett hő mennyisége (ezt infrakamerákkal lehet mérni [18]), illetve a plazma által a divertorban lesugárzott teljesítmény, amelynek nagy része szintén a divertorlemezeket fűti. Ezen paramétereket a mai tokamakokon végzett mérésekből [19] lehet becsülni.

A TCV-n található AXUV detektorrendszer segítségével meghatároztuk az egy ELM alatt a plazma által sugárzás formájában elvesztett energia térbeli eloszlásának időbeli fejlődését [17]. Korábban, a hagyományos bolométerek segítségével ez az időfelbontás nem volt lehetséges. A 4. ábrán láthatjuk ezen eloszlás időbeli változását.



4. ábra: A plazma sugárzási profiljának időbeli változása az ELM esemény alatt

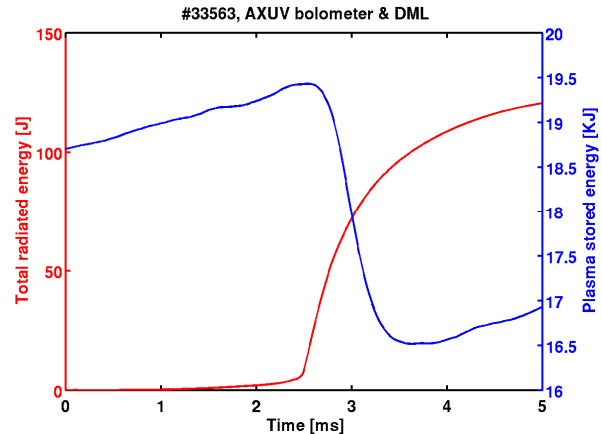
A 4. ábrán az első kép – 1.309 sec – közvetlenül az ELM kezdete előtti időpontban mutatja a sugárzás eloszlását. Látható, hogy az ELM a poloidális mágneses térkomponens null-pontjának, azaz az X-pontnak a közelében kezdődik, vagy legalábbis itt változik meg legkorábban a plazma sugárzása. Ezután a külső félsíknál növekszik meg a sugárzás, majd (az ELM ciklus végén) a divertorlábaknál. Az ábrák alapján megállapítható, hogy habár a teljesítmény számítása az AXUV kamerák segítségével nagyon pontosan, a folyamatok dinamikájának kvalitatív értelmezésében jelentős segítséget tud nyújtani a detektorrendszer.

A visszaállított sugárzáseloszlás plazma térfogatára vett integrálásával a plazma teljes kisugárzott teljesítményét próbáltuk becsülni. Az 5. ábra szemlélteti az imént bemutatott ELM esemény során a TCV tokamakban sugárzás formájában elvesztett energia (bal oldali tengely), és a teljes tárolt energia csökkenésének (jobb oldali tengely) időfüggését.

Az ábráról leolvasható, hogy a plazma teljes energiavesztésének – mintegy 3 kJ – csak körülbelül 4 százaléka származik sugárzásból. Bár ez elsőre meglehetősen alacsonynak tűnik, a III-as típusú ELM-eknél más tokamakokon is tapasztaltak már hasonlóan kis értéket. Itt is szeretnénk megjegyezni, hogy ez valószínűleg a lesugárzott teljesítmény alábecslése, mert amikor a plazma kapcsolatba lép a fallal a külső félsíkon, illetve a divertorlábakon, a plazma lokálisan lehűl és szennyezők áramlanak bele, így a sugárzás spektrumának jelentősebb része eshet a 3-30 eV-os „lyukas” tartományba.

A későbbiekben az ELM-ek alatt bekövetkező teljes sugárzási energiavesztés AXUV detektorokkal mért értékét ellenőrzésképpen össze szeretnénk hasonlítani a bolométerek által detektált sugárzásértékkel. (Speciális kiértéke-

lési módszer alkalmazásával a néhány ezredmásodperc hosszú ELM-ek teljes lesugárzott teljesítménye század-másodperces időállandójú bolométerekkel megkapható [20] [21], azonban a térbeli eloszlás részletes időfejlődése nem.)



5. ábra: Az ELM esemény során sugárzás formájában elvesztett energia (piros, bal oldali tengely), és a teljes tárolt energia csökkenésének (kék, jobb oldali tengely) időfüggése.

Összefoglalás

Az AXUV diódák jól alkalmazhatóak a plazmákban lejátszódó gyors folyamatok vizsgálatára mindaddig, amíg csak kvalitatív információkra vagyunk kíváncsiak a kibocsátott sugárzás eloszlásával kapcsolatban. Jelenleg azonban nem létezik olyan diagnosztikai módszer, amely a plazma sugárzási teljesítményeloszlását hasonló időbeli és térbeli felbontással, számszerűleg pontosabban meg tudná határozni.

Irodalomjegyzék

- [1] Ingesson, LC and Alper, B. and Peterson, BJ and Vallet, J.: Tomography Diagnostics: Bolometry and Soft-X-Ray Detection (2008), *Fusion Science and Technology*, 53, 2, 528
- [2] Mast, KF and Vallet, JC and Andelfinger, C. and Betzler, P. and Kraus, H. and Schramm, G.: A low noise highly integrated bolometer array for absolute measurement of VUV and soft x radiation (1991), *Review of Scientific Instruments*, 62, 744
- [3] Zohm, H.: Edge localized modes (ELMs) (1996), *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 38, 2, 105
- [4] Snyder, PB and Wilson, HR and Ferron, JR and Lao, LL and Leonard, AW and Osborne, TH and Turnbull, AD and Mossessian, D. and Murakami, M. and Xu, XQ: Edge localized modes and the pedestal: A model based on coupled peeling–ballooning modes (2002), *Physics of Plasmas*, 9, 2037
- [5] Wesson, JA and Gill, RD and Hugon, M. and Schuller, FC and Snipes, JA and Ward, DJ and Bartlett, DV and Campbell, DJ and Duperrex, PA and Edwards, AW and others: Disruption in JET (1989), *Nuclear Fusion*, 29, 4, 641
- [6] <http://www.ird-inc.com/>
- [7] Bódizs Dénes: *Atommagasugárzások mérés technikái* (2006), Typotex kiadó
- [8] Boivin, RL and Goetz, JA and Marmor, ES and Rice, JE and Terry, JL: High resolution bolometry on the Alcator C-Mod tokamak (invited) 1999, *Review of Scientific Instruments*, 70, 260
- [9] Korde, R. and Geist, J.: Quantum efficiency stability of silicon photodiodes (1987), *Applied Optics*, 26, 24, 5284
- [10] *Progress in the ITER Physics Basis* (2007), *Nuclear Fusion*, 47, 6 (special issue)
- [11] Costley, AE and Campbell, DJ and Kasai, S. and Young, KE and Zaveriaev, V.: ITER R&D: auxiliary systems: plasma diagnostics (2001), *Fusion Engineering and Design*, 55, 2-3, 331

-
- [12] C. Schlatter: *Radiation loss studies on T-10 tokamak using AXUV-detectors* 2003, *Master Thesis*
- [13] Gray, DS and Luckhardt, SC and Chousal, L. and Gunner, G. and Kellman, AG and Whyte, DG: *Time resolved radiated power during tokamak disruptions and spectral averaging of AXUV photodiode response in DIII-D* 2004, *Review of Scientific Instruments*, 75, 376
- [14] Anton, M. and Weisen, H. and Dutch, MJ and von der Linden, W. and Buhlmann, F. and Chavan, R. and Marletaz, B. and Marmillod, P. and Paris, P.: *X-ray tomography on the TCV tokamak* (1996), *Plasma Phys. Control. Fusion*, 38, 1849
- [15] TP Goodman and SM Ahmed and S. Alberti and Y. Andrebe and C. Angioni and K. Appert and G. Arnoux and R. Behn and P. Blanchard and P. Bosshard: *An overview of results from the TCV tokamak* (2003), *Nuclear Fusion*, 43, 12, 1619
- [16] Degeling, AW and Weisen, H. and Zabolotsky, A. and Duval, BP and Pitts, RA and Wischmeier, M. and Lavanchy, P. and Marmillod, P. and Pochon, G.: *AXUV bolometer and Lyman- α camera systems on the TCV tokamak* (2004), *Review of Scientific Instruments*, 75, 4139
- [17] Veres, G. and Pitts, RA and Bencze, A. and Márki, J. and Tál, B. and Tye, R.: *Fast radiation dynamics during ELMs on TCV* (2009), 390-391, 835
- [18] Marki, J and Pitts, RA and Horacek J and Tshakaya D and The TCV Team: *ELM induced divertor heat loads on TCV* (2009), 390-391, 801
- [19] Pitts, RA and Arnoux, G. and Beurskens, M. and Eich, T. and Fundamenski, W. and Huber, A. and Loarte, A. and Marki, J. and Stamp, MF and Andrew, P. and others: *The impact of large ELMs on JET* (2009), *Journal of Nuclear Materials*, 390-391, 755
- [20] Fuchs, JC and Eich, T. and Herrmann, A. and Mast, KF: *Radiation distribution and energy balance during type-I ELMs in ASDEX Upgrade* (2005), *Journal of Nuclear Materials*, 337, 756
- [21] Huber, A. and Pitts, RA and Loarte, A. and Philipps, V. and Andrew, P. and Brezinsek, S. and Coad, JP and Eich, T. and Fuchs, JC and Fundamenski, W. and others: *Plasma radiation distribution and radiation loads onto the vessel during transient events in JET* (2009), *Journal of Nuclear Materials*, 390-391, 830