

Képkalkotás és spektroszkópia THz-es sugárzással: a Csillagásztól az orvosi alkalmazásokig

Hebling János, Almási Gábor PTE Kísérleti Fizika Tanszék

Bevezetés

A tárgyak alakjáról és szerkezetéről általában képkalkotás segítségével szerzünk információt. Leggyakrabban mindennapi látásunk során szemünket használjuk képkalkotásra, konkrétan leképezésre. A leképezéshez valamilyen, a tárgyról kiinduló sugárzásra van szükség. A látás során ez a sugárzás a fény, ami elektromágneses hullám. Más sugárzások is használhatóak leképezésre vagy általánosabban, képkalkotásra. Például az elektronmikroszkópban elektronok nyalábját használják.

Az elektromágneses hullámot jellemezhetjük a hullámhosszával vagy frekvenciájával (ami a hullámhossztól független fénysebesség és a hullámhossz hányadosával egyenlő). A különböző hullámhosszú elektromágneses sugárzásra az 1. ábrán feltüntetett különböző elnevezéseket szokás használni. A rádióhullámok hullámhossza akár 1 km is lehet, míg a gyógyászatban használt röntgensugárzás hullámhossza rövidebb, mint 1 angström, vagyis az 1 mm tízmilliomod része. E két hullámhossz tizenhárom nagyságrendnyi különbségéhez képest érezhetjük, hogy az emberi szemmel látható egyoktávnyi tartomány, a fény mennyire kis részt képvisel a teljes elektromágneses spektrumban.

Először Wilhelm Conrad Röntgen alkalmazott a látható fénytől eltérő elektromágneses hullámot - a róla elnevezett röntgensugárzást - képkalkotásra. Amióta elkészítette első röntgenfelvételét, eltelt egy évszázad, és ezalatt a röntgenkészülékek számos tudományág, köztük az orvostudomány nélkülözhetetlen eszközeivé váltak. Időközben megszületett az MRI, a mágneses rezonancián alapuló képkalkotás is, ami az elektromágneses hullámok spektrumának egy másik részén elhelyezkedő rádióhullámokat használja elem-specifikus képkalkotásra.

Az elektromágneses hullámoknak egy, a rádióhullámok és a látható fény tartománya között elhelyezkedő részét a legutóbbi időkig nem használták képkalkotásra. Csak 1995-ben jelent meg az a dolgozat, amely elsőként mutatott be e tartományra, a 0,1-10 THz frekvenciájú tartományra eső ún. terahertzes vagy T-sugárzás alkalmazásával készített képet. A késésnek az volt az oka, hogy e tartományban korábban nem álltak rendelkezésre intenzív "fény"-források, olyanok, mint a látható tartományban a lézerek, a mikrohullámok területén pedig a különböző elektrotechnikai eszközök, például a klisztron. Mára a helyzet jelentősen megváltozott. Noha még csak két évtized telt el az első ultrarövid terahertzes (THz-es) impulzus előállítására (Auston et al., 1984) óta, mára nemcsak a THz-es impulzusok és folytonos THz-es hullámok előállítására szolgáló eszközök fejlődtek sokat, hanem a THz-es hullámok detektálására szolgáló eszközök is. Így lehetséges az, hogy a hőmérsékleti sugárzás detektálásával még külső forrás nélkül is lehet például egy kézzel képet készíteni, ráadásul úgy, hogy az több mint 1 cm vastag papírréteg mögött helyezkedik el (lásd a 2. ábrát).

A THz-es sugárzásnak a képkalkotás mellett a spektroszkópia a másik fontos felhasználási területe. Mindkét tevékenység a ma még nagyon új, de rohamosan fejlődő és rendkívül perspektivikus terahertzes tudomány és technika része. E dolgozat célja, hogy a THz-es sugárzás tulajdonságainak és néhány alkalmazási példának a bemutatásával felkeltse a különböző tudományterületeken dolgozó magyarországi kutatók érdeklődését azon új lehetőség iránt, amit a terahertzes technika felhasználása jelenthet kutatásaikban. Úgy érezzük, erre feltétlenül szükség van, hiszen ez a technika nagyon gyorsan és látványosan fejlődik, ezzel foglalkozó cégek jönnek létre világszerte, ugyanakkor nincs tudomásunk arról, hogy Magyarországon rajtunk kívül mások is fejlesztenék vagy használnák ezt a technikát.

A magyarországi lézerfizikai kutatásokat bemutató számban azért van helye e dolgozatnak, mert mint látni fogjuk, a THz-es sugárzás előállításának több hatásos módja is lézerek alkalmazásán alapul. Az egyik módszer ultrarövid lézerimpulzusok segítségével állít elő szélessávú, mindössze egy időbeli periódust tartalmazó THz-es elektromágneses jelet. A dolgozat végén e módszert ismertetjük; hatásosságát a PTE Kísérleti Fizika Tsz. oktatói által végzett kutatások eredményeként nagyságrendekkel sikerült növelni (Hebling et al., 2002; Stepanov et al., 2005).

A terahertzes tudomány lehetőségeinek és korlátainak bővebb, színes képekkel is gazdagon illusztrált leírása megtalálható az Amerikai Energiahivatal honlapján (<http://www.sc.doe.gov/bes/reports/abstracts.html#THz>) Workshop on Opportunities in THz Science címmel.

A THz-es sugárzás tulajdonságai (a különböző anyagok THz-es sugárzással szembeni viselkedése)

A THz-es sugárzás 0,1-10 THz frekvenciatartományának 3-0,03 mm hullámhossz, 10-0,1 ps periódusidő, 4,8-480 K hőmérséklet és 0,41-41 meV energiatartomány felel meg. A hullámhossz a hagyományos képalkotás esetén alsó határt szab a feloldható méretre. Bár közeltér-mikroszkópiával ennél a határnál kisebb struktúrák is feloldhatóak, és THz-es sugarakkal a közeltér-mikroszkópia egyszerűen, egy vezető tű segítségével megvalósítható, a THz-es képalkotás vélhetően mégis a 10 mm-nél nagyobb tárgyak vizsgálatára fog korlátozódni. THz-es sugarakat alkalmazó, de egyébként hagyományos (nem közeltér-) képalkotó eljárások esetén a látható tartományhoz képest hosszú hullámhossz miatt a szórt sugárzás gyakorlatilag elhanyagolható.

A THz-es hullámcsomagok vagy impulzusok legrövidebb időtartama (mint minden hullám esetén) az átlagos periódusidőnél nem lehet rövidebb. Az ebből következő időbeli feloldás THz-es impulzusok gyors folyamatok vizsgálatára történő felhasználásánál tehát 10-0,1 ps lehet. Ez a feloldás elektromos eszközökkel nem érhető el. Ugyanakkor a THz-es sugárzásnak a látható fényhez képest hosszú periódusideje és néhány speciális előállítási és detektálási módszer (lásd később) alkalmazása lehetővé teszi a THz-es impulzusokban az elektromos térerősség időbeli lefutásának mérését. (Látható fényimpulzusoknál ez nem lehetséges, csak az intenzitás időbeli lefutása mérhető.¹) Az elektromos térerősség közvetlen mérésével pl. egyidejűleg meghatározható az abszorpció és törésmutató, valamint a hullámhossznál pontosabban mérhető tárgyak távolsága.

A THz-es spektroszkópia széleskörűen alkalmazható anyagok azonosítására, mivel a THz-es sugárzás két nagyságrend szélességű tartományában szinte minden anyagnak vannak olyan jellegzetes abszorpciós sávjai, amelyek "ujjlenyomatként" használhatóak az azonosításukra. Ugyanakkor e széles tartományon belül sok anyag esetén van olyan sáv, amelynél kicsi az abszorpció; az anyag átlátszó. Alkalmazások szempontjából fontos, hogy csomagolóanyagok (műanyag, papír), ill. a ruhanemű esetén vannak ilyen sávok.

A THz-es sugárzás fotonjainak alacsony energiája azt eredményezi, hogy a THz-es sugárzás nem ionizáló sugárzás. Ez orvosi és biológiai képalkotó alkalmazásokban nagy előny a röntgensugárzással szemben.

Alkalmazási területek

Ebben a fejezetben néhány (már megvalósult vagy lehetséges) alkalmazási példával kívánjuk érzékeltetni a ma még csak gyerekcipőben járó THz-es tudomány által nyújtott lehetőségeket.

A THz-es képalkotás két legfontosabb alkalmazási területe a biztonságtechnika és a gyógyítás lehet. Például a repülőtéren pogy-gyászátvilágító röntgenberendezéseket felválthatják THz-es készülékek. Ezek előnye, hogy a megfelelő "ujjlenyomat"-sávot használva segítségükkel könnyebben felismerhetőek a fémet nem tartalmazó plasztik robbanószerek. Hasonlóan borítékba helyezett kábítószereket vagy például a lépfenebaktérium spóráit is azonosítani lehet a boríték felbontása nélkül, meg lehet ezeket különböztetni más anyagoktól. Homokba helyezett aknák észrevehetőek THz-es fényképezéssel. Spektrálisan bontott THz-es képalkotással ellenőrizni lehet becsomagolt gyógyszereket.

A THz-es képalkotás orvosi diagnosztikai alkalmazására mutat egy példát a 3. ábra, amelyen egy fogról látható fényvel, illetve THz-es sugárzással készült kép szerepel. A fog belsejében elkezdődött a szuvasodás, de a fogzománc még ép. Ezért a szuvasodás csak a THz-es képen látható. Az orvosi alkalmazásokat korlátozza, hogy a víz erősen abszorbeálja a THz-es sugárzást. Ezért emberi lágyszövetbe csak kb. 1 cm mélységig lehet "belátni". Ez nem okoz korlátozást a bőr betegségeinek felismerésében. Demonstrálták például, hogy THz-es leképezéssel rákos bőrszövet eloszlását meg lehet határozni a bőrfelszíntől különböző mélységben. Jelenleg kb. 4 percig tart egy féltenyérynyi felület 0,1 mm feloldású THz-es fényképezése egy hullámhosszon. Ez az idő a THz-es technika gyors fejlődésének köszönhetően várhatóan jelentősen rövidülni fog. Az orvosi alkalmazásokat kiszolgáló eszközök fejlesztésében szembetűnő a korábbi képalkotási technológiákat kiszolgáló világcégek aktivitása. A Nikon és a Hitachi mellett megjelentek új, kifejezetten a terahertzes tartományra eszközöket fejlesztő cégek, mint a TeraView vagy a Picometrix. A csillagászat is profitálhat a THz-es képalkotó technika fejlődéséből. A Világegyetem hőmérsékleti háttérsugárzása irányszerinti eloszlásának ismerete elősegítheti a keletkezésének pontosabb megértését. A THz-es sugárzás - a látható fényvel ellentétben - viszonylag akadálytalanul halad át a légkörön, ez az előny kihasználható távérzékelési alkalmazásokban. Az Európai Űrügynökség StarTiger projektjében passzív THz-es megfigyelést alkalmazva vizsgálják a globális meteorológiai változásokat.

Mivel a kisebb molekulák rotációs átmenetei a THz-es tartományra esnek, ezek az anyagok THz-es technikával kimutathatóak például az atmoszférában vagy a világűrben. Időbontott THz-es spektroszkópiával

vizsgálták például molekulák rotációs átmeneteit lángokban, valamint fémhalidok alagúteffektussal történő inverzióját.

Nagy atomszámú molekulák esetén - ideértve a biológiailag fontos molekulákat - a másodlagos struktúra változásai játszódhatnak le a THz-es sugárzásnak megfelelő időskálán. Emiatt várhatóan fontos szerepe lesz a THz-es tudománynak, például a proteinek struktúrájának és dinamikájának vizsgálatában. Már jelenleg is lehetséges sok aminosav megkülönböztetése a THz-es spektrumuk alapján, igaz, elsősorban kristályos állapotban. Néhány dolgozatban demonstrálták, hogy lehetséges egyes és dupla szálú DNS-szekvenciák detektálása. A közeljövőben megvalósíthatónak látszik THz-es technikán alapuló jelölő nélküli (label-free) DNS-szenzorok kifejlesztése. Távlabbi célkitűzés a fehérje-fehérje kölcsönhatások mint sejtaktivitások jelölő nélküli mérése élő sejtekben.

Rendezett kémiai és biológiai struktúrák (önszervező struktúrák, Langmuir-Blodgett-filmek, membránok) esetén egy fotógerjesztést eredő polarizációváltozás követhet, ami THz-es impulzus kibocsátásával jár. Az MTA-SZBK Biofizikai Intézete és a stuttgarti Max Planck Intézet kutatóival közösen sikeres kísérleteket végeztünk fotosztetikus reakciócentrumok által így kibocsátott THz-es sugárzás detektálására. E kísérletek folytatásaként meg kívánjuk határozni egy ultrarövid fényimpulzus hatására kibocsátott THz-es sugárzás elektromos terének időbeli lefutását, így módon nyomon követhetjük a reakciócentrumban lejátszódó gyors töltésmozgást.

A modern technika félvezető alapú elektronikai eszközökre épül. Ezeknek az eszközöknek a működését befolyásoló, esetleg korlátozó folyamatok vizsgálatára különösen alkalmasak a THz-es impulzusok, hiszen például a fononok (rácsrezgések) vagy a különböző spin állapotok (mágneses momentum) energiája a THz-es tartományban megfelelő. Egyesek szerint egy új technika, a spintronika fogja az elektronikát felváltani vagy legalábbis kiegészíteni. A spintronikában az információt nem az elektromos töltések áramlása (elektromos áram), hanem spin állapotok áramlása hordozza. A THz-es technika nemcsak spin állapotok meghatározására, de azok manipulálására, megváltoztatására is alkalmas lehet. Ezt kvantumkontrollnak nevezhetjük. Kvantumkontroll segítségével kémiai reakciókat vagy biológiai folyamatokat is befolyásolhatunk, irányíthatunk. Mindezen esetekben a megfelelő időbeli lefutású THz-es impulzusoknak döntő szerepük lehet.

A THz-es impulzusok több alkalmazása esetén (például kvantumkontroll, nanomágnesek forgatása, egyidejű képzés nagy felületekről, nemlineáris optika, THz-ESR berendezés) nagy energiájú impulzusokra van szükség, olyanokra, amelyekkel 0,001-1 MV/cm elektromos térerősség érhető el.

Előállítás

Kétségtelenül az olyan nagyberendezések, mint a szinkrotron és a szabadelektron lézerek szolgáltatják a legintenzívebb THz-es sugárzást (Knippels et al., 1999), és ezek a berendezések fedik le a legszélesebb spektrumot is. Ugyanakkor az ezekhez való hozzáférés korlátozott, ami a széles körű alkalmazásokat gátolja. A THz-es kutatások rohamos fejlődése következtében szerencsére megjelentek különböző elven működő asztali források is. THz-es sugárzás keltése félvezetőkben - a korábban a mikrohullámú tartományon alkalmazott - Gunn dióddal lehetséges (Karpowicz et al., 2005). Ezekkel közvetlenül 150 GHz frekvenciájú rezgéseket tudtak előállítani, így második felharmonikusuk elérte a 300 GHz-et. Ennél magasabb frekvenciájú THz-es sugárzás generálható egy újabban kifejlesztett speciális félvezető eszközzel, az ún. kvantum-kaskád lézerrel (Barbieri et al., 2004). Ez keskeny sávzélességű sugárzást bocsát ki egy rögzített frekvencián. Az elérhető teljesítmény akár 1 W is lehet, hátránya ugyanakkor, hogy alacsony hőmérsékleten (<100 K) működik.

Több THz-előállítási módszert is kifejlesztettek, amelyekhez szükség van lézertényre. Ezek közé tartozik a fotóvezető kapcsoló (Budiarto et al., 1996), amelyekkel elérhető közel 1 mJ THz-es energia, azonban a szélessávú spektrum maximuma 0,5 THz-re korlátozódik. Látható lézertényből nemlineáris optikai módszerrel is lehet THz-es sugárzást előállítani, ha elérhető, hogy a nemlineáris kristályban a látható és THz-es sugárzás sebessége megegyezzen (sebességillesztés). Két félvezető lézerténynek különböző frekvenciájaként tipikusan keskenysávú THz-es sugárzás állítható elő. Ultrarövid lézertényimpulzusokból nemlineáris optikai folyamattal (Nahata et al., 1996) sebességillesztés esetén hatásosan állítható elő csak egy periódust tartalmazó THz-es impulzus (optikai egyenirányítás).

Detektálás

A THz-es sugárzások detektálhatóak a távoli infravörös sugárzásnál használt eszközökkel; bolométerrel és Golay-cellával. Ezek érzékeny eszközök, de hátrányuk a nehézkes kezelhetőség. A bolométert tipikusan 4 K hőmérsékleten lehet használni, a Golay-cella pedig nagyon érzékeny a mechanikai behatásokra. Mindkét

eszköz igen lassú. Újabban kényelmesen használható félvezető alapú eszközöket is fejlesztenek erre a hullámhossztartományra, sőt megjelentek ezek térbeli felbontást lehetővé tevő változatai is. A THz-es impulzusok jellemzésének nagyon fontos eszköze az elektrooptikai mintavételezés (Nahata et al., 1996), amelynek működése azon alapul, hogy nemlineáris optikai kristályon áthaladó látható fény polarizációs állapotát megváltoztatja a vele egy időben átküldött THz-es sugárzás.

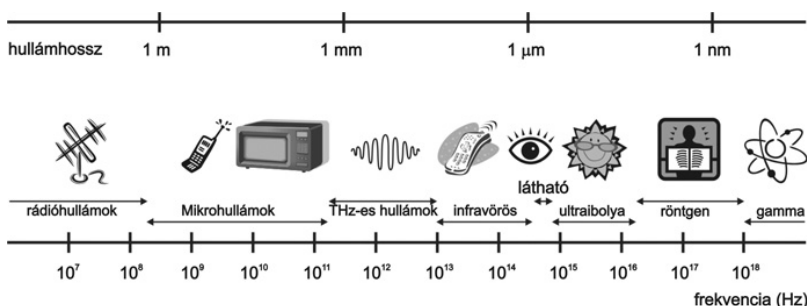
Nagyenergiájú THz forrás

THz-es impulzusok keltése ultrarövid lézerpulzusok optikai egyenirányításával csak akkor hatásos, ha sebességillesztés valósul meg. Ezért korábban olyan kristályokat (ZnTe, GaAs) használtak, amelyeknél a hatásosságot szintén befolyásoló nemlineáris optikai együttható nem volt optimális. A sokkal nagyobb nemlinearitású lítiumniobát esetén több mint kétszeres faktor van a THz-es sugárzás és az azt keltő látható lézertény sebessége között. E probléma megoldására nemrégiben új módszert javasoltunk (Hebling et al., 2002), amely lehetővé teszi nagy energiájú és ezért (a roncsolódást elkerülendő) szükségképpen nagy keresztmetszetű lézernyalábok alkalmazását, és ezen keresztül nagy energiájú THz-es impulzusok előállítását. Ennek lényege, hogy a keltő és THz-es impulzusfront tartós együtt haladását a keltő lézer impulzusfrontjának megdöntésével biztosítjuk (lásd a 4. ábra jobb oldalán). Ez együtt jár azzal, hogy a THz-es impulzus a keltő impulzustól különböző irányban halad. Korábban a lítiumniobáthoz hasonló kristályok esetén teljesült ugyan a sebességillesztés a Cserenkov-típusú geometria alkalmazásával (lásd a 4. ábra bal oldala), de extrém kis nyalábméretre volt szükség (Auston et al., 1984). Ez pedig azzal járt, hogy a gerjesztő energia, ennek következtében a THz-es impulzus energia is erősen korlátozott volt.

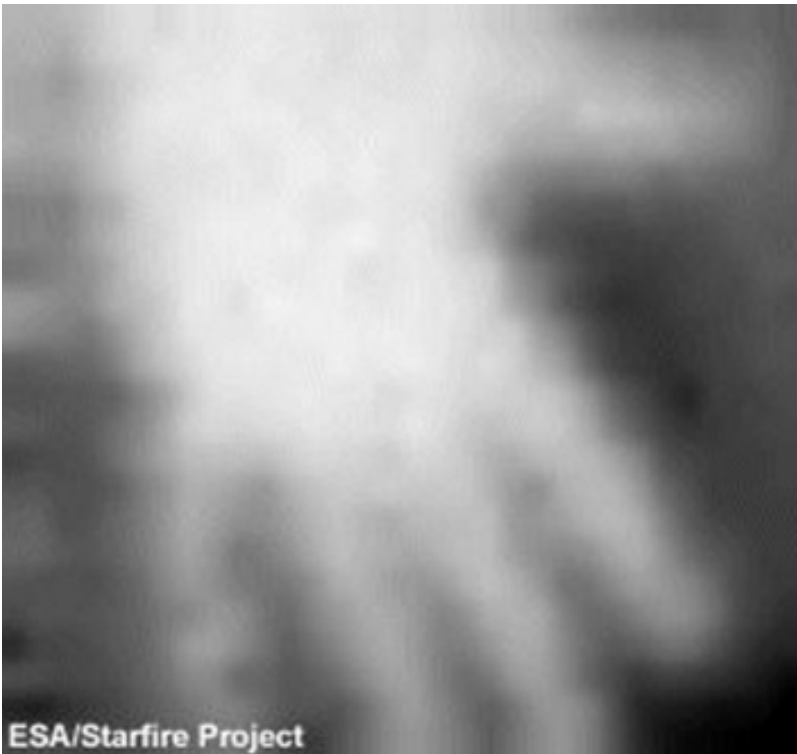
A döntött impulzusfrontú elrendezéssel nemrégiben 250 nJ energiájú, egy periódusú THz-es impulzusokat sikerült előállítanunk (Stepanov et al., 2005). A döntött impulzusfrontú elrendezés hatásosságát jelzi, hogy azonos gerjesztő forrást és ZnTe kristályt használva csak ezerszer kisebb energiájú impulzust tudtak előállítani. A térerősség csúcserőteke esetünkben meghaladja az 1 MV/cm értéket (fókuszálás nélkül is). Ez a térerősség lehetővé teszi mindazokat az alkalmazásokat, amelyeket az Alkalmazási területek című fejezet utolsó bekezdésében felsoroltunk.

IRODALOM

- Auston, D. H. - Cheung, J. A. - Valdmanis, J. A. - Kleinman, D. A. (1984): Physical Review Letters.. 53, 1555-1558.
- Barbieri, S. - Alton, J. - Beere, H. E. - Fowler, J. - Linfield, E. H. - Ritchie, D. A. (2004): Applied Physics Letters. 85, 1674-1676.
- Budiarto, E. - Margolies, J. - Jeong, S. - Son, J. (1996): IEEE J. Quantum Electron. 32, 1839-1846.
- Hebling J. - Almási G. - Kozma I. Z. - Kuhl J. (2002): Optics Express 10, 1161-1166..
- Karpowicz, N. - Zhong, H. - Zhang, C. - Lin, K.-I. - Hwang, J.-S. - Xu, J. - Zhang, X.-C. (2005): Applied Physics Letters. 86, 054105.
- Knippels, G. M. H. - Yan, X. - MacLeod, A. M. - Gillespie, W. A. - Yasumoto, M. - Oepts, D. - van der Meer, A. F. G. (1999): Physical Review Letters. 83, 1578-1581..
- Nahata, A. - Weling, A. S. - Heinz, T. F. (1996): Applied Physics Letters. 69, 2321-2323.
- Stepanov, A. G.-Kuhl, J.-Kozma I. Z.-Riedle, E.-Almási G.-Hebling J.(2005) Optics Express 13, 5762-68



1. ábra * Az elektromágneses spektrum



2. ábra * 1,5 cm vastag papírréteg mögött elhelyezkedő kéz THz-es sugárzással készített képe

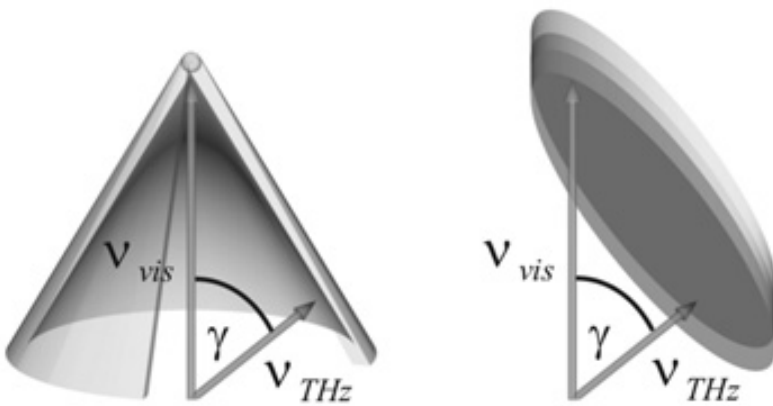
Látható fényvel készített kép

THz-es kép



szuvasodás

3. ábra * Szuvas fogról látható fényvel és THz-es sugárzással készített kép



4. ábra * THz-es sugárzásnak erősen fókuszált (balra) illetve döntött frontú (jobbra) fényimpulzus segítségével történő keltésének sematikus rajza