

FELÜLETI PLAZMONOK ÉS KÖZELI TÉR MIKROSKÓPIA

Kroó Norbert

az MTA rendes tagja, az MTA főtitkára – kroo@office.mta.hu

A termelési technológiák jelentős hányadának ellenőrzése vizuális úton történik. Klasszikus esetekben ez egyszerű megfigyelésen, például a mérőeszközök leolvasásán alapul. A méretek csökkenésével azonban ez az egyszerű módszer már nem elegendő, ezért a minősítés alapvető eszközevé az optikai mikroszkóp vált. Az integrált áramkörti eszközök első generációjánál például ez még jól működött, de az egyes áramkörti elemek méreteinek folyamatos csökkenése e mikroszkópok felbontóképességének határait is túllépte. Úgyes technikai trükkökkel sikerült olyan optikai eszközöket létrehozni, amelyekkel a felbontóképesség határait (ezek az alkalmazott fény hullámhosszának nagyságrendjébe esnek) sikerült valamelyest kitolni, de mára már gyakorlatilag ezek a tartalékok is kimerültek.

A méretcsökkenés azonban folytatódik. A kutatás a nanométeres méretek tartományát ostromolja, mind a „szerkezeti” anyagok, mind az elektronikus alkatrészek területén. Molekuláris méretű motorokban és tranzistorokban gondolkodunk, és a nanométeres tartományban mozgó méretű szemcsékkel módosítjuk az anyagok tulajdonságait. Természetes az igény arra, hogy legyen olyan „mikroszkópunk”, amelynek felbontóképessége ezen mérettartományba esik. Erre van lehetőség. Ennek egyik módja az, hogy olyan sugarakat (elektromágneses sugárzás, elektronok, neutronok, protonok, stb.) használunk, amelyek hullámhossza

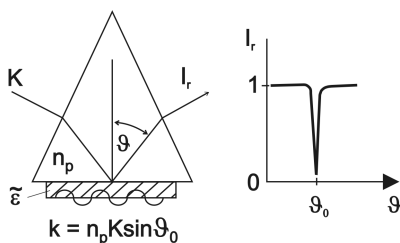
ebbe a tartományba esik (például a röntgensugárzáson alapuló vagy a nagyfeszültségű elektronmikroszkópok). Ezek alkalmazása azonban igen drága, speciális laboratóriumokat igényel, néha pedig még ezek sem segítenek. A másik módszer ugyanúgy látható fényvel működik, mint a klasszikus mikroszkópok, de olyan megoldást alkalmaz, amelynél nem érvényes az a korlátozó feltevés, amely a felbontást a hullámhossz nagyságrendjében limitálja. Ez az úgynevezett közeli tér mikroszkópia.

Vizsgáljunk egy olyan felületet, amely igen finom szerkezetű felületi egyenetlenséggel jellemezhető. A vizsgálat látható fényvel történik, és az egyenetlenségek mérete jóval kisebb a fény hullámhosszánál. A jelenség a Maxwell-egyenletekkel írható le – a felületen fellépő elektromágneses térnek két komponense van: egy térben terjedő és egy a felülethez kötött, attól távolodva exponenciálisan csökkenő térerősségű rész. Ez utóbbit evaneszcens térnek nevezzük. A klasszikus mikroszkópok az első komponenst használják ki. A térben terjedő (szórt) fényt a vizsgált tárgytól távol, a „távoli térben” gyűjtik össze, és így alkotnak képet. E módszer felbontóképességének szab határt a fény hullámhossza.

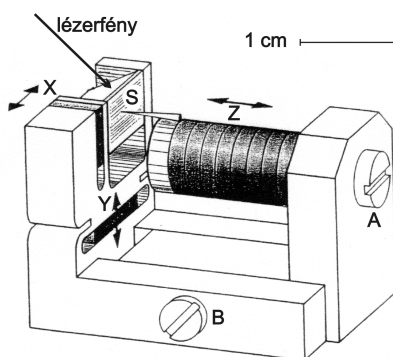
Az evaneszcens tér jelenléte a közeli tér mikroszkópia alapja. Ha ebbe a vizsgált felülethez közeli, az optikában „közeli térnek” nevezett tartományba egy, az alkalmazott fény hullámhosszához képest kisméretű

szondát helyezünk, ezen a közeli tér „szóródik”, amit viszont már a távoli térben is detektálhatunk a hagyományos módszerekkel. Ez a szórt fény azonban megőrzi az evaneszcens tér felületi struktúráját, amely finomabb a hullámhossznál, vagyis a hullámhossz már nem korlátozza a „mikroszkóp” felbontóképességét. Ha ugyanis a szondát a felület mentén mozgatjuk, letapogathatjuk annak szerkezetét, és képet alkothatunk.

Az evaneszcens tér létrehozásának – fémfelületek esetén – az egyik tipikus módja az ún. felületi plazmonok gerjesztése lézertény segítségével. Ezek a fémfelületen lévő vezetési elektronok kollektív mozgásához kapcsolódó elektronsűrűség-hullámok, melyek energiája megegyezik a gerjesztő fény fotonjainak energiájával, impulzusuk azonban nagyobb a fotonok impulzusánál, ezért direkt módon nem csatolódnak egymáshoz. Ha azonban a gerjesztő fényt egy, az egységénél nagyobb törésmutatójú közegben, például üvegen keresztül csatoljuk a (vékony) fémrétegbe, megfelelő szögben becsatolva a fényt, elérhető, hogy a fény impulzusának a felülettel párhuzamos komponense megegyezik az azonos energiájú felületi plazmon



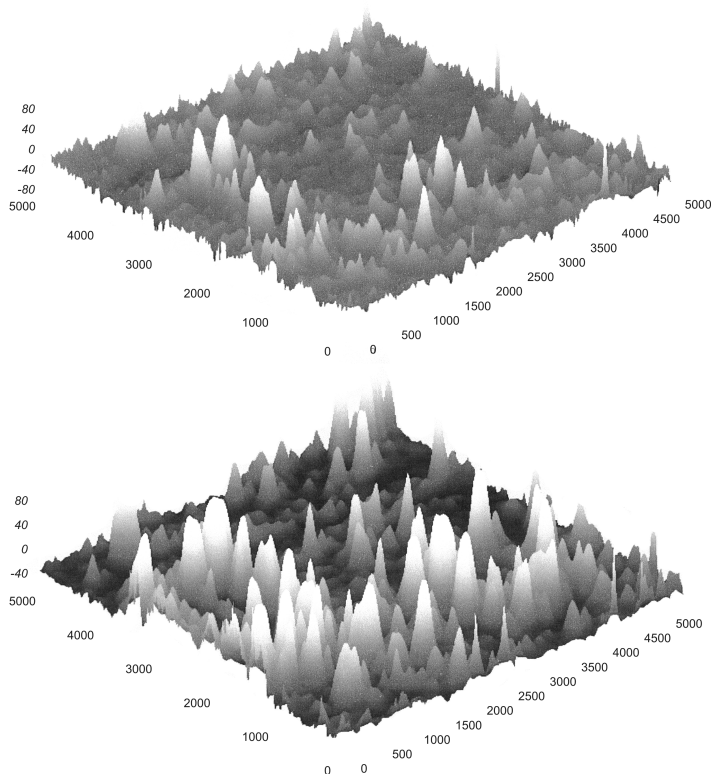
1. ábra • a) Felületi plazmonok gerjesztése a (komplex) dielektromos állandójú vékony fémrétegben $n_p > 1$ törésmutatójú ϵ üvegprizmán keresztül. Alkalmass ϑ_0 szög esetén a fény K impulzusának a plazmonokkal párhuzamos komponense megegyezik ezek k impulzusával. Ekkor a b) ábra szerint a visszavert (teljes visszaverődés) fény intenzitása minimummal rendelkezik, mivel rezonancia jellegű plazmon-gerjesztés következt be. $\epsilon_0 \sim 1$ a levegő dielektromos állandója.



2. ábra • Közeli tér pásztázó alagútmikroszkóp sematikus elrendezése. A lézertény az S felületen gerjeszt felületi plazmonokat. Ezek közeli terét tapogatja le a Z irányban mozgatható (piezokerámiára kapcsolt feszültséggel) fémtű. A pásztázás a minta X, Y irányú mozgatásával történik, ugyancsak piezokerámiákra kapcsolt feszültséggel.

impulzusával. Ilyenkor rezonancia jellegű erős csatolás, vagyis nagy hatásfokú felületi plazmon-gerjesztés jön létre. (1. ábra) Tehát a foton-felületi plazmon-csatolás engedelmeskedik az energia- és impulzusmegmaradás törvényének.

A felületi plazmonok evaneszcens terébe helyezzük be azt a szondát, amely letapogatva az evaneszcens teret, képet alkot a felületről. Ez a kép természetesen nem adja vissza a felület topológiáját, ezt azonban szimultán külön is megmérhetjük. Erre alkalmasá tehető egy pásztázó alagútmikroszkóp, amelyben egy fémtű pásztázza végig a felületet úgy, hogy a tűnek a felülettől mért távolságát állandónak tartjuk. Ezt úgy érhetjük el, hogy a tűt egy piezokerámia rúdra erősítjük, és az erre kapcsolt feszültséget úgy változtatjuk, hogy az alagútmikroszkópon folyó áram állandó legyen. Ekkor a feszültségváltozás arányos a felület domborzatával. A pásztázó tű kirajzolja ezt a felületet, de egyúttal a közeli tér erősségének képét is. Ez pedig a felületnek a domborzattól eltérő, a felület fizikai állapotára jellemző képét jelenti, de a felület hőterképe is meghatároz-



3. ábra • Egy vékony aranyrétegen létrehozott (tükör) felületi plazmonok evanescens terében felvett közeli tér mikroszkóp kép (a), illetve egy egyidejűleg felvett „hőmérsékleti” térkép (b).

ható, lényegében csak a tű geometriája által korlátozott felbontással. Ez optimális esetben akár 1 nm körüli érték is lehet. A mikroszkóp elvi vázlatát a 2. ábrán lehet áttekinteni.

Ennek a mikroszkóp elrendezésnek egyszerűségén túl az is nagy előnye, hogy a lézertér által létrehozott evanescens tér alagút-áramot gerjeszt, amelyet a mikroszkóp fel-erősít, tehát erősítőként is működik. Ezenkívül a tű anyagának változtatásával különböző felületi tulajdonságok – amelyek a felület (lokális) kilépési munkájához, termoelektromos tulajdonságaihoz, stb. kötődnek – szelektíven jeleníthetők meg. (3. ábra)

Más módszerek is léteznek evanescens tér létrehozására, például olyanok is, amelyek nem fém felület esetén is alkalmazhatók. Szondaként egy kihegyezett fényveze-

tő szál vége is szolgálhat. A szonda által szórt evanescens teréből eredő fény egy részét a fényvezető szál összegyűjti, és ez a távoli térben detektálható.

A leírtakon kívül is több variánsuk létezik a közeli tér mikroszkópoknak, amelyek a nanotechnológia alapvető fontosságú mérő- vagy minőségellenőrző eszközeivé, speciális esetekben pedig a technológiák fontos részeivé válhatnak.

Ehhez azonban egy sor olyan technikai problémát kell megoldanunk, amelyek akárcsak érintőleges tárgyalására ez a rövid ismertető nem adhat lehetőséget.

Kulcsszavak: mikroszkópia, evanescens tér, foton-felületi plazmon csatolás, pásztázó alagútmikroszkóp