

# Rétegsztruktúrák vizsgálata és a VLSI

DR. GYULAI JÓZSEF

Központi Fizikai Kutató Intézet

Budapesti Műszaki Egyetem Atomfizikai Tanszék



## ÖSSZEFOGLALÁS

A nagy bonyolultságú integrált áramkörök megjelenése az anyagtudományok, anyagvizsgálatok területén új feladatok megoldását jelenti. Fontossá válik a felületek — határrétegek pontos leírása, az anyagsugárzás (elektron, ion, foton) kölcsönhatás alapján a rendszer eredeti állapotára való visszakövetés, mélységfüggő atomösszetételek, ul. felületeken kialakított monorétegek mennyiségi meghatározása. Az anyagtudomány és az ipari fejlesztés elengedhetetlen együttműködésének jó példaként bemutatja SOS-struktúrák minőségének tudatos befolyásolását.

A mikroelektronika következő évei rendkívül izgalmasoknak ígérkeznek: most jut el a világ az ultimumhoz a „klasszikus” elektronika terén. Most derül ki, hogy melyek azok az elvi korlátok, amelyek megszabják annak az elektronikának a határait, amelynél még lokalizálhatók az aktív és — sokszor — a passzív elemek is, akár csak az elektroncsöves elektronikában. Most vonul be az elektronikai technológiába a valóban atomi szintű anyagépítést lehetővé tevő anyagtudomány.

Egy kis kitérőként talán engedessék meg kifejtésem, mit is értek én anyagtudományon, anyagmérnökségen, illetve technológián.

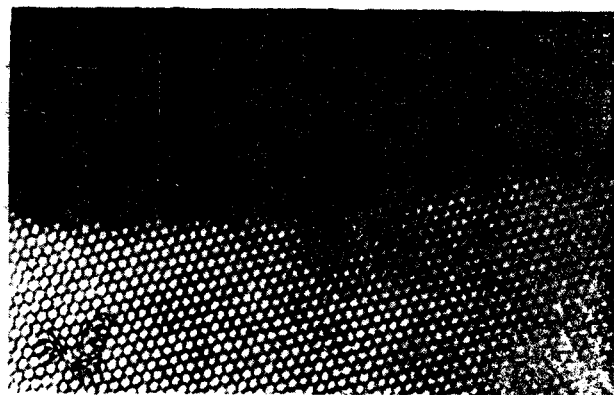
A szaktudományok, illetve a tárgyak szempontjából alaptudományok (szilárdtestfizika, -kémia, metallurgia stb.) rendkívüli haladást értek el az utóbbi időkben. Ennek két fő oka az anyagvizsgálati módszerek tökéletesedése, illetve a számítástechnika bevonulása a szaktudományokba. Ezek tették lehetővé egy sor jelenségnek ma már „kváziegzakt” megértését, leírását. Ezen azt értem, hogy ma már olyan pontossággal lehet a jelenségeket leíró modellek matematikai formuláit megoldani, hogy valamennyi lényeges körülmény figyelembe vehető. (A technológiák sok-sok lépését szimuláló programok sikere a bizonyíték erre.)

Az anyagtudomány („materials science”) elsősorban a probléma megközelítésében tér el az említett szaktudományoktól: az azok által felfedezett és kváziegzaktul leírt jelenségeket (például diffúzió, segregáció, fáziskiválás, epitaxiás kristályosodás) mint a mikrovilágban működő „szerszámokat” arra használja, hogy a kívánt tulajdonságokat mutató, ha kell atomi szinten rendezett szerkezeteket létrehozza.

Ebben a koncepcióban a technológia az a „drill”, amely reprodukálhatóan megszabja, korlátok közé szorítja ezeknek a „szerszámoknak” működési körét, tartományát, idejét.

Ma már egyre több ponton világos a mikroelektronikai eszközök működése és a szerkezetük közötti korreláció. A legimpozánsabb talán az a nemrég kiderült összefüggés, amely a tranzistorok működésében (hátrányos) szerepet játszó felületi állapotok és a szilícium-szilícium-dioxid határreteg atomisztikus szerkeze között fennáll (1. ábra): a felületi állapotok a határreteg atomos lépcsőitől, azaz az ilyen hibáktól származnak, ezeknek a hibáknak az elektromos viselkedésben megnyilvánuló hatásai. Ma már a MOS-tranzisztor kapuelektrodájától, a Schottky-gáttól, ohmos kontaktustól atomosan rendezett határreteget várunk.

Az anyagvizsgálati módszereknek bizony, rendkívüli követelményekkel kell szembenéznük.



1. ábra. Az atomsorokat is megmutató rácsfelbontású transzmissziós elektronmikroszkópos kép a Si-SiO<sub>2</sub> határfelület egy hibás pontjáról (2)

## DR. GYULAI JÓZSEF.

1955-ben a Szegedi Tudományegyetemen végzett. 1956 óta foglalkozik félvezetőkkel, korábban Cds, CdSe, Se, majd Ge, Si felületi jelenségeivel, később GaP, GaAsP fotoelektromos viselkedését kutatta. Kandidátusi fokozatot is e témából szerzett. 1969 óta az implantáció és a félvezető technológiák, valamint a Rutherford ionvisszaszórással végzett felületanalitika a fő témája. Az ő irányításával létesültek a KFKI ilyen laboratóriumai, és az ott folyó kutatások nagy részét ő irányítja. Ő javasolta és menedzselte az EÖTVÖS űrtechnológiai programot.

1979-ben szerezte meg a

tudományok doktora fokozatot. Vendégprofesszorként összesen több, mint három évet töltött a California Institute of Technology-n, a Cornell Egyetemen és a párizsi École Normale Supérieure-ön. Mintegy 140 tudományos dolgozata van, több idegen nyelvű monográfia-fejezetet publikált, tiznél több technológiai szabadalomban részes. „Counsilor”-ja a Bohmische Physical Societynek, dolgozik EPS, ill. IUUSTA bizottságokban, több konferencia, iskola, könyvsorozat szervező bizottsági tagja. A Budapesti Műszaki Egyetemen Atomfizika Tanszékén részfoglalkozású egyetemi tanár. 1984-ben, munkatárcaival, Akadémiai Díjjal tüntették ki.

1. A „VLSI anyagtudomány” néhány stratégiai kérdése:

E stratégiákat most úgy rendszerezzük, hogy érződjék az anyagvizsgálatokkal való kapcsolatuk.

Felület-határreteg konverzió.

A mikroelektronika planáris építkezési stratégiájából az következik, hogy a felületek csak mint a következő lépésben határreteggé való képződmények érdekesekek (1). A funkcionális részekről távoli határretegektől már többnyire csak a passzíválást, védelmet várjuk.

A miniatürizálás és a viszonylagos szerkezet érzéketlenség.

A méretek VLSI, sőt: ULSI (Ultra Large Scale Integration) szintű csökkentése egy érdekes következménnyel jár. Ha egy tranzisztor méretei nagyságrendben a 10–100 nm tartományba esnek, akkor egy implantációs küszöb feszültség beállítás mintegy tíz bór atomnak a csatornába juttatását jelenti. Ilyenkor az általuk létrehozott elektromos tér egyáltalán nem tekinthető folyamatosnak, hanem lokálisan befolyásolja a töltéshordozók mozgékonyosságát. A vezetés olyasmí, mint egy autóverseny a cseppkőbarlangban (2. ábra). A kis méretek miatt egyre nagyobb esélye van annak, hogy az elektronok nem is ütköznek (ballisztikus vezetés). Ekkor a kristályrácsnak már „csak” annyi a szerepe, mint az elektroncső üvegfalának, azaz a vákuumedénynek: kifeszíti azt a teret, ahol a jelenségek lejátszódnak.

Az építkezési stratégia alternatívái.

A technológiai higiéné gyengéit úgy lehet hatástalanítani — és ez a megszokott a mai elektronikai technológiában — hogy igyekszünk szeparálni a funkcionális határreteget (pn-átmenet, szilícium-szilícium-oxid határreteg, Schottky barrier, kontaktus) az épülő től (3). Azaz egy rétegepítő módszerrel (pl. CVD) leválasztott réteg „épült” határfelületét hőkezeléssel odébb mozdítjuk, hogy a felület esetleges szennyezé-

sei olyan térrészekbe inkorporálódjanak, ahol hátrányos hatásaik kevésbé mutatkoznak meg (3. ábra). Ilyen például a termikus oxid növekedésének végén a nemesgázban végzett hőkezelés, amikor is a diffundáló oxigén koncentrációja fokozatosan lecsökken és az utolsó atomi oxidrétegek kialakulnak — nagy felületen szinte lépcsőmentesen.

E stratégiának mostanában alakul alternatívája: az UHV technika fejlődésével elegendő egyetlen atom-sornyi és felület menti mozgási szabadságot adni az érkező atomoknak, hogy hibamentes szerkezet épülhessen — ez a molekulasugaras epitaxia (MBE). Ennek energikusabb változatai, amit például az Ion Cluster Deposition már átvezet egy új, általánosabb stratégiai elvhez.

A termikus egyensúly alternatívái

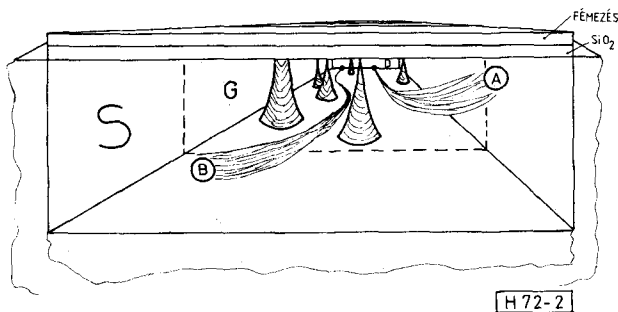
Egy heterogén rétegszerkezet, ahol különféle anyagok, eltérő fázisok vannak, sosem lehet valódi egyensúlyban, de a technológiának legklasszikusabb módszerei (termikus diffúzió stb.) az épülő rendszert közelítik ehhez az állapothoz. Ennek fő előnye, hogy az üzem közben fellépő anyagmozgások nagyságrendekkel kisebbek, azaz az eszköz alig öregszik. Ha pontosan gondolkodunk, egy kemencéből való kivétel mindig jelent bizonyos „befagyasztást”, azaz a kialakuló állapot némileg metastabil.

Manapság alapvető jelentőségűvé nőttek azok a módszerek (elsősorban az ionimplantáció), amelyek úgynevezett metastabil állapotokhoz vezetnek. Ezeknél az ionos, lézeres, elektronbesugárzásos eljárásoknál lényegében arról van szó, hogy az irányított, lokális energiaközlést követően (annak energiasűrűségétől függően) szilárd- vagy folyadékfázisú reakciók indulnak meg, amelyek addig játszódnak, amíg az anyag hővezető képessége (és a szilícium kitűnő hővezető!) révén lehül a gerjesztett térfogat. Szilícium esetén pl. 15 m/s — igen: tizenöt méter másodpercenként — az a dermedési sebesség, amely felett a szilícium már csak amorf állapotba tud „rendeződni”. (Ma kb. 60 m/s a rekord kis behatolási mélységű pikoszekundumos lézerimpulzussal melegítve). Ma „sokszorosán” egymásba alakuló metastabil állapotok is használható rendszerek lehetnek pl. ionimplantált adalék-eloszlás lézeres hőkezelése után.

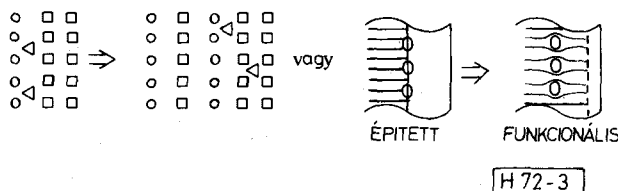
A termikus egyensúly előnyeinek elvesztését az így létrehozható, korábban elképzelhetetlen szerkezetek új funkciói kárpótolják. Például az antimon adalék emitter célokra azért nem volt használható, mert egyensúlyi szilárd oldékonysága mindössze  $4 \times 10^{19}$  atom/cm<sup>3</sup> (egy atom ezrelék alatt szilíciumban).

A metastabil állapotok stratégiája itt először implantációval belekényszerít nagy mennyiségű antimont a szilíciumba, majd lézeres hőkezeléssel rácspontra viszi, „aktiválja” őket és 100%-os elektromos aktivítást ér el az atomszázalék koncentráció-tartományban. Ha azonban ezt a réteget kemencében felmelegítjük, a metastabil állapot összeomlik — és a végállapot azonos azzal, mintha lézert nem használtunk volna, azaz a rendszer öregedésével számolni kell. Ennek első kimutatása hazai eredmény (4) (4. ábra).

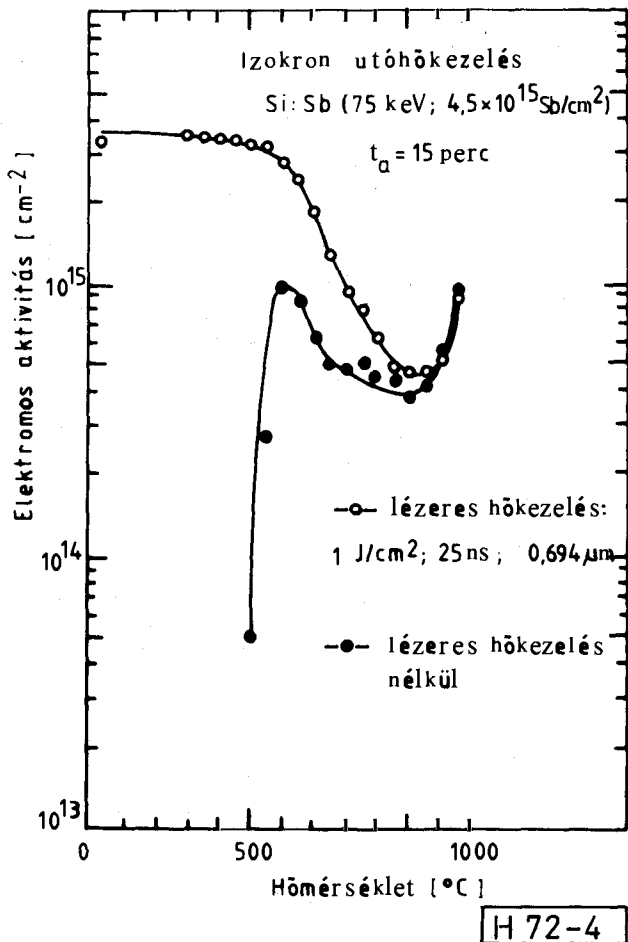
Az előzőekből látszik, hogy az analitikai vizsgálati módszereknek nehéz feladataik vannak: atomisztikus rendtől való apró eltéréseket kell igazolni, korrelációba hozni a technológia gyengéivel. Ilyen helyzet-



2. ábra. Fantáziakép egy VLSI MOS tranzisztor gate elektródája alatti elektronvezetésről. Látható, hogy a mindössze néhány implantált bóratomot tartalmazó tértöltési rétegben szinte akadálytalanul repülnek a töltéshordozók



3. ábra. Sematikus rajz épülő és a végső, funkcionális felület eltávolításáról például hőkezeléssel



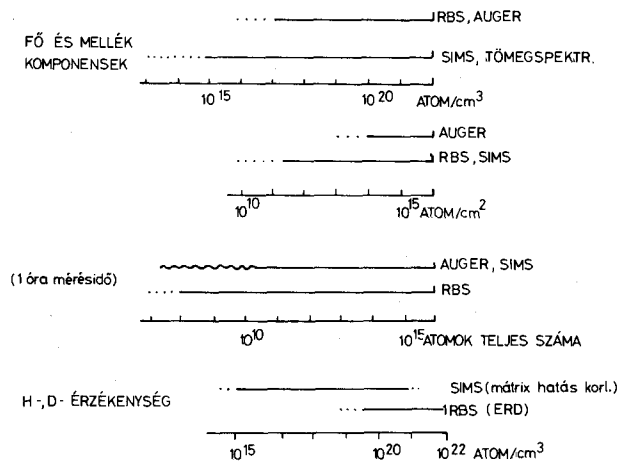
4. ábra. Egy lézeres hőkezeléssel tökéletesen elektromosan aktivált implantált metastabil szerkezetének összeomlása hőkezeléssel 900° táján a vezetőképesség ugyanakkora, mint a lézerral nem kezelt, csak kemencében aktivált rétegé (4)

ben szokott az ipari haladás nagyszámú megoldásokat alkalmazni. Ma ez a mikroelektronikában azt jelenti, hogy olyan mértékben reprodukálható technológiai körülményeket teremt, ahol a keletkező termékek olyan mértékben „klónjai” egymásnak, hogy a funkcionális mérés a fő analitikai eszköz. Ez a teljes automatizáció, robotizáció. Az egyre komplexebb eszközöknél, például az egy Si-szeleten kialakított teljes számítógépnél még egy stratégiai módosulás szükséges:

**A szeletjavítás.** Egy, az előzőekben is említett komplexitású áramkör olyan értéket képvisel, hogy egyszerű „go-no go” tesztekkel nem szabad minősíteni: a 100%-os kihozatal a követelmény. Ezt pedig csak úgy lehet elérni, ha javítjuk a szelet esetleges hibáit lézerral, ionsugárral, elektronokkal, lokális rétegleválasztásokkal (pl. lézeres CVD-vel). Itt az analitika ma még ritkán jelent indikációt — inkább a vizuális (pásztázó elektronmikroszkóp) ellenőrzés mutat rá a hibákra. De végül is egy nemdestruktív mikroanalízis szerepe is jelentős lenne. (Sajnos, például a legdirektebb módszer a transzmissziós elektronmikroszkópia destruktív.)

## 2. A mérés és know how ellentmondása, a mérések igényei

A bonyolult áramkörök tesztelhetőségére itt nem térünk ki. Van a gyártásközi, illetve minősítő mérések



5. ábra. A legfontosabb felületanalitikai módszerek érzékenységeinek összehasonlítása. A feladattól függ, hogy melyik módszert célszerű választani.

és a piaci követelményeknek is egy ellentmondása. Ebben a dinamikus szakmában az elsőség és a know how birtoklása még jelentősebb, mint más területen. A know how lényegét azzal az aforizmával is kifejezhetjük, hogy az azt a tudást tartalmazza, hogy mit, mikor és hol *nem* kell mérni (csak a körülményeket közben tartani). Mivel a szilíciumot, vegyszereket mindenki nagyjából azonos áron vásárolja, extraprofitot csak olyan tényezőkkel szerezhet, mint a mérésen megtakarított összeg. A lemaradás ilyen úton is szedi a vámat.

Az áramkörök elektromos és funkcionális mérései a legjelentősebbek — de csak az úgynevezett mérőórák bonyolult rendszerén végrehajtott mérések kiértékelése vezethet egy-egy technológiai lépés konkrét hibájának felismeréséhez. Egyetlen tranzistor elektromos kiértékelése csak implicit információkat szolgáltat legtöbbször.

Ezért van analitikai eljárásoknak létjogosultsága annak ellenére, hogy azok csak modellhelyzeteket tudnak kiértékelni — ezeket viszont direkt eredménnyel.

Ma már egy csokorra való olyan módszer áll rendelkezésre, amely egy-egy kölcsönhatás végtermékéből (legyen az elektron, ion, foton) visszakövetkeztet a vizsgált rendszer eredeti állapotára. A legelterjedtebbek és legfontosabbak az elektronmikroszkópok, amelyek direkt képet adnak a felületről, ill. metszetkészítés után a valamivel mélyebb rétegekről is.

Széles körben alkalmazzák a szekunder ion tömegspektrometriát (SIMS), Auger spektroszkópiát (AES) vagy a Rutherford visszaszórást (RBS).

Hogy melyik módszert válasszuk, az az adott problémától függ. Az „érzékenység” fogalma ugyanis eléggé ambivalens. Ha egy kis koncentrációban elszórt adalék profilja érdekel, azaz egy olyan grafikont szeretnénk készíteni, amely a mélység függvényében atom/cm<sup>3</sup> egységekben mért koncentrációt mutat be, a SIMS-nek aligha lesz versenytársa (bár kvantitatív vá tenni azt a mérést nem mindig sikerül).

Ha egy könnyű anyagra (pl. grafit) adszorbeált kis mennyiségű („szubmonoréteg”) bevonat kvantitatív

meghatározása érdekel atom/cm<sup>2</sup> egységekben, RBS-szel a monoréteg százezred részét is gyakran meg lehet kvantitatíve mérni. Ezeket mutatjuk be az 5. ábrán.

Vagy, ha egyetlen mérésből és gyorsan mélységfüggő atomösszetételt, valamint szerkezeti információt akarunk roncsolásmentesen szerezni, ismét az RBS-t választjuk.

### 3. Hazai lehetőségek

Hazánkban sok módszer áll rendelkezésre, de szinte valamennyi technikailag megújítandó állapotban. Szépen segítették a hazai ipart és néhány kutatóhely nemzetközileg is elimert eredményeket ért el.

Az e témában rendezett HTE-szimpózium egyik előadása ismertette a mélynívó spektroszkópiát és a méréshez hazailag megvalósított berendezést.

Itt egy olyan, elsősorban a RBS-módszer alkalmazásával elért eredményt mutatok be, amelyet a szerző a J. W. Mayer (Cornell University) csoportjai érték el a szilícium zafíron struktúra (SOS) minőségének nagyságrenddel való megjavításában.

A szilícium jól nő epitaxiásan a zafíron, de a szoba-hőmérsékletre való lehűtés óriási feszültségteret eredményez a határrétegben. A korábbi, úgynevezett „tökéletes adalékolás”-nak nevezett módszerünk (5,1) egy változatát — amelyet inverz epitaxiának nevezhetünk — alkalmaztuk a Si-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> szendvicsre: szilíciumionokat implantáltunk a szilícium csatornáinak irányával párhuzamosan azért, hogy a szilícium réteg felszíne jó kristály maradjon, de a határréteg amorfizálódjék. Ezt követően most nem a zafir felől, hanem a felületi jó kristály felől lenövesztettük a szilíciumot a határrétegig. Ezt meg lehetett tenni mintegy 600°-on. Így az amúgy is kisebb feszültségteret kis vastagságra szorítottuk (6). Ezzel a módszerrel készítik ma a korábbiaknál nagyságrenddel kisebb visszáramot mutató integrált áramköröket a SOS szendvicsben (7).

Egy *elvi kérdés* kívánok ezzel kapcsolatban leszögezni: ezt a példaként citált eredményt sosem lehetett volna elérni „az iparnak végzett bér munka, bér-mérés” koncepcióban. Itt az ipari fejlesztőkkel kongeni-

ális anyagtudósoknak és az anyagtudóssal kongeniális ipari fejlesztőknek közös érdekeltségben kellett lennie.

Az elektronikai iparnak végül is kétféle vizsgálati igénye van: a napi termelés kritikus pontjainak ellenőrzése (helyben), ill. a K + F munka, amely helyileg lehet távolabb, de érdekeltségben kötelezően közeli: ismerni kell egymás problémáit, egymás know how-ját olyan mélységig, hogy az ipar jól tudjon kérdezni és az anyagtudós úgy tudjon válaszolni, hogy arra is kitérjen, amit nem is kérdeztek.

Végül néhány szó az utánpótlásról. Napjainkban egy új veszély jelentkezik. Mivel pl. a programírás sokkal rövidebb úton vezet sikerélményhez — és ezt ma minden fórum, végül is helyesen, támogatja —, a technikai érdeklődésű fiatalok alig vonzódnak az anyagtudományhoz, technológiához. Pedig a modelleket meg is kell csinálni, nem elég gépen lejátszani az életet! Létre kell hozni azokat a mozgatókat, amelyek az anyagtudomány, technológia felé való közeledésre ösztönzik az egyemetek végző ifjúságot. Ma ugyanis gond a káderutánpótlás.

### IRODALOM

- [1] J. Gyulai: az „Ion implantation: Science and technology”-ban, ed. J. F. Ziegler, Academic Press, New York, 1984. 139–210. o.
- [2] M. Pasemann—O. P. Pchelyakov: J. Cryst Growth 58, 288 (1982).
- [3] J. W. Mayer—J. Gyulai: az „Applied Atomic Collision Physics”-ben, ed. S. Datz, Academic Press, New York, 1983, Vol. IV, 545–575. o.
- [4] P. Révész—G. Farkas—J. Gyulai: Rad. Effects 47, 149 (1980).
- [5] L. Csepregi—E. F. Kennedy—T. J. Gallagher—J. W. Mayer—T. W. Sigmon: J. Appl. Phys. 48, 4234 (1977).
- [6] S. S. Lau—S. Matteson—J. W. Mayer—P. Revesz—J. Gyulai—J. Roth—T. W. Sigmon—T. R. Cass: Appl. Phys. Letters 34, 76 (1979).
- [7] J. Golecki—G. Kinoshita—B. M. Paine: Nucl. Instr. Meth. 182/183, 675 (1981).