

*FÉLVEZETŐ VÉKONYRÉTEGEK ÉS  
PONTLÁNCOK KÖLCSÖNHATÁSA  
ELEKTROMÁGNESES MEZŐVEL*

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Szerző:  
Serényi Tamás

Témavezető: Dr. Benedict Mihály

Szegedi Tudományegyetem,  
Elméleti Fizikai Tanszék  
2006



## **Tudományos előzmények és célkitűzések**

Fénnyel kölcsönható kétállapotú atomok viselkedése a mágneses rezonancia jelenségekkel analóg módon tárgyalható. A dinamikát az optikai Bloch-egyenletek írják le [1]. Az atom rezonanciájának megfelelő, az anyag relaxációs idejénél rövidebb időbeli lefolyású fényjel hatására az atom inverziója időben periodikusan változik, azaz bekövetkezik a Rabi-oszcilláció jelensége. Ezt a jelenséget a kvantuminformatikában a kvantumbitek, mint kétállapotú rendszerek manipulálására lehet használni.

Rövid fényimpulzusok esetén azonban a Bloch-egyenletek kapcsán használt hagyományos közelítések (lassan változó burkoló közelítés, forgó hullámú közelítés) érvényüket veszítik [2]. A teljesebb leírást atomi rendszereken kezdték vizsgálni, [3], viszont olyan fontos anyagok, mint a félvezetők esetén az elmélet a szokásos közelítésekkel élt a legutóbbi időkig [4]. Célunk ezért félvezető anyagok viselkedésének leírása ilyen ultrarövid impulzusokkal való kölcsönhatás során. Mivel a félvezető technológiában széles körben elterjedt GaAs félvezető kristály, így modell számításainkhoz ezen anyag adatait használjuk. Két frekvenciatartományban is érdekesnek ígérkezik a feladat vizsgálata, az egyik az infravörösben található polariton rezonancia közelében, a másik pedig a sávátmenetet is előidéző látható tartományban.

*Célul tűzzük ki a GaAs félvezető vékonyrétegek polariton rezonanciájához ( $\lambda_0=37,31 \mu\text{m}$ ) közeli központi hullámhosszú néhány optikai ciklus hosszúságú fényjel terjedésének elméleti vizsgálatát. A tranziens jelenségek hatását szeretnénk kimutatni a visszavert és a transzmittált jelek időbeli lefutásának vizsgálata során.*

Rövid impulzusok terjedése során további érdekes jelenségek megjelenését várhatjuk, ha elérjük a lassan változó burkoló közelítés határát. Hughes [3] magasabb spektrális komponensek megjelenését jósolta. A GaAs félvezető réteg 1,42 eV szélességű sávját rezonanciához közeli ultrarövid fényimpulzussal gerjesztették a transzmittált jelet vizsgálták Mücke és mások [5]. Azt tapasztalták, hogy a transzmittált jel harmadik harmonikusa valóban felhasad. Ezt a felhasadást a lassan változó burkoló közelítés keretében nem lehet megmagyarázni. A kísérleti csoport a jelenség leírására egy egyszerű modellt használt. *Célunk a félvezető Bloch-egyenletek alapján a terjedési jelenségeket is figyelembe vevő pontosabb elméleti leírást adni, majd az eredményeket a kísérleti eredményekkel összevetni.*

A kísérleti technika előrehaladásával, félvezető felületeken sikerült létrehozni úgynevezett kvantumpontokat, amelyek elektronszerkezete az atomok vonalas spektrumához hasonlít, emiatt ezeket mesterséges atomoknak is szokás nevezni. Ezek többé-kevésbé rendezett struktúrákban is kialakíthatók, és az egyes pontok két különböző elektron állapota is tekinthető egy kvantumbit reprezentációjának. Vannak elképzelések, hogy ilyen típusú struktúrák is alkalmasak lehetnek kvantuminformatikai eszközök fizikai megvalósítására [6]. Ehhez az egyes pontok, (atomok) összefonódott állapotait kell létrehozni.

Az összefonódott állapotok léte a kvantummechanika egyik legkülönösebb, klasszikus megfelelő nélküli jelensége. Egyik legkorábban tárgyalt következménye a kvantumrendszerek nemlokalitására rámutató EPR-paradoxon [7]. A kvantumtitkosítás és a kvantuminformatika hatékonyságának alapját az összefonódott állapotok adják [8]. Fontos kérdés, hogy milyen módon lehet

összefonódott állapotot előállítani. A részecske rendszerekben a környezet hatására az összefonódottság eltűnik, bekövetkezik a dekoherencia [8].

Az összefonódottság kvantitatív jellemzése máig nem teljesen megoldott feladat. Részecske párokra vonatkozóan Wootters [9, 10] talált egy gyorsan számolható módszert, ami kevert állapotok esetén is működik.

Nehezebb a feladat, ha részecske rendszerek többrészi összefonódottságát vizsgáljuk. Kétállapotú atomok tiszta állapotú rendszerének többrészi összefonódottságát Meyer és Wallach [11] tárgyalta.

Kevert állapotú rendszerek többrészi összefonódottságának leírására tanúoperátorokat szokás használni, de a kimerítő kvantitatív jellemzés még nem megoldott.

*Célul tűztük ki kétállapotú atomok láncán a dekoherencia valamint az összefonódottság időbeli változásának vizsgálatát.*

## ***Vizsgálati módszerek***

Fényimpulzusok közegbeli terjedése szórásproblémaként kezelhető. A Maxwell-egyenletekből levezetett integrál-egyenletet a negyedrendű Simpson-formula segítségével diszkretizáltuk, míg a közegből származó elektromos polarizációt leíró differenciálegyenleteket a Hamming-féle negyedrendű prediktor-korrektor módszer segítségével vettük figyelembe. A csatolt integrodifferenciál-egyenlet rendszert numerikusan oldottuk meg. Számításaink során sem a forgó hullámú közelítést, sem a lassan változó burkoló közelítést nem alkalmaztuk.

A félvezető vékonyréteg polariton rezonanciájának tulajdonságait az irodalomból ismert módon vettük figyelembe [12].

A félvezető látható tartományba eső rezonanciájának tárgyalásához, a félvezető Bloch-egyenletek makroszkopikus alakjának levezetésénél a [13] munkában közölt módszert követtük, de a forgó hullámú közelítés nélkül. A harmadik harmonikus felhasadásának vizsgálatánál egy szokásos gyors Fourier-transzformációs rutint használtunk.

A dipólcsatolt kétállapotú atomok láncának vizsgálatánál a redukált sűrűségoperátor időfüggését leíró szuperradiáns mesteregyenletet abszolút nulla hőmérsékleten, a Born-Markov közelítés keretén belül tekintettük [14]. A differenciálegyenlet rendszert negyedrendű Runge-Kutta módszerrel numerikusan oldottuk meg.

A lánc atom párjainak összefonódottságát a Wootters-féle módszerrel [9,10] határoztuk meg. A lánc többrészi összefonódottságának jellemzésére pedig alkalmasan bevezetett tanú operátorokat használtunk. A tanúoperátor egy adott állapotra vonatkozó várható értékének előjele alapján elégséges feltételt tudunk megfogalmazni az állapot szeperálható volta.

## ***Új tudományos eredmények***

1. A rövid impulzusok terjedését és a közeggel való kölcsönhatását, mint szórásjelenséget tárgyaltuk a Maxwell-egyenletekből levezetett integrál-egyenletek segítségével a lassan változó burkoló és a forgóhullámú közelítés nélkül. Szétválasztottuk a közeg rezonáns és nem rezonáns válaszát, és így figyelembe vettük a háttér polarizációt. Később a módszert a [5] munka kísérleti összeállításának megfelelően módosítottuk, és figyelembe vettük a mintára párologtatott antireflektáns réteget.

2. A fenti eljárást alkalmaztuk a GaAs félvezető polariton modelljére. Kimutattuk, hogy GaAs félvezető vékonyréteg  $37,31 \mu\text{m}$ -es polariton rezonanciájánál néhány optikai ciklus hosszúságú jel visszaverődésének és áthaladásának leírásánál a tranziensek nem hagyhatók figyelmen kívül. Ilyen rövid jeleknél nem alkalmazható a lassan változó burkoló közelítés. Modellszámításaink eredményét összevetettük a tranziensek elhagyásán alapuló Fresnel-formulás leírással, és jelentős különbséget kaptunk.

3. Forgóhullámú közelítés nélkül tárgyaltuk a félvezető anyagok vezetési és valencia sávjában lévő töltéshordozók és a külső gerjesztő fény dinamikáját leíró csatolt differenciál-egyenlet rendszert, a félvezető Bloch-egyenleteket.

4. GaAs félvezető vékonyrétegen áthaladó, látható tartományba eső ultrarövid fényimpulzus terjedése során megjelenő magasabb spektrális komponensek harmadik harmonikusban megjelenő hatásának elméleti vizsgálatát adtuk. A számítások során kapott eredmények jó egyezésben vannak az [5] munkában korábban közölt mérési adatokkal.

5. Elektromágneses mező által csatolt kétállapotú atomok (pontok) lineáris láncának viselkedését tanulmányoztuk. Az elektromágneses mező módusai, mint környezet az eredetileg összefonódott kezdőállapot összefonódottságának eltűnését okozza. A folyamat karakterisztikus ideje függ az atomok távolságától, valamint a kezdőállapottól is. Kimutattuk, hogy ez az idő meglehetősen hosszú az úgynevezett szubradiáns kezdőállapotok esetén. A vizsgálatot megfelelően választott tanú operátorok segítségével végeztük.

6. Kimutattuk, hogy ha az atomok távolsága kisebb, mint a rezonáns hullámhossz, akkor a környezet hatása kisebb, mint a dipól-dipól kölcsönhatás erőssége, így az eredetileg szeparálható állapotból induló láncban összefonódottság léphet föl.



## ***Irodalomjegyzék***

- [1] F. BLOCH, *Phys. Rev.* **70**, 460 (1946)
- [2] L. W. CASPERSON, *Phys. Rev. A.* **57**, 609 (1998)
- [3] S. HUGHES, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 3363 (1998)
- [4] H. HAUG et al. *Quantum Theory of the Optical and Electronic Properties of Semiconductors* (2004)
- [5] O. MÜCKE et al. *Phys. Rev. Lett.* **87**, 057401 (2001)
- [6] P. M. PETROFF et al. *Physics Today* **54** (5), 46 (2001)
- [7] A. EINSTEIN et al. *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935)
- [8] M. A. NIELSEN et al. *Quantum Computation and Quantum Information* (2000)
- [9] S. HILL et al. *Phys. Rev. Lett.* **78**, 5022-5025 (1997)
- [10] W. K. WOOTTERS. *Phys. Rev. Lett.* **80**, 2245 (1998)
- [11] D. A. MEYER et al. *J. Math. Phys.* **43**, 4273 (2002)
- [12] A. С. ДАВЫДОВ, *Теория Твердого Тела* (1976)
- [13] C. M. BOWDEN et al. *Phys. Rev. A* **51**, 4132 (1995)
- [14] M. G. BENEDICT et. al. *Superradiance* (1996)

## **A dolgozat alapjául szolgáló tudományos közlemények jegyzéke:**

C. Benedek, M.G. Benedict, T. Serényi  
*J Opt Soc Am B* **18** 1949-1955 (2001)

T. Serényi, C. Benedek, M.G. Benedict  
*Fortschr Phys* **51** 226-229 (2003)

M.G. Benedict, P. Földi, A. Czirják, T. Serényi  
*J Opt B: Quantum Semiclass Opt* **6** S3-S6 (2004)

P. Földi, M.G. Benedict, T. Serényi, A. Czirják  
*Fluctuation and Noise Letters* **4** L511 (2004)

## **Konferencia kiadványok:**

Benedek C., Benedict M., Serényi T.  
*Kvantumelektronika 2000* P30 poszter

T. Serényi, C. Benedek  
*EPS 12* (2002) poszter

Serényi T., Földi P., Czirják A., Benedict M.  
*Kvantumelektronika 2003* P33, poszter