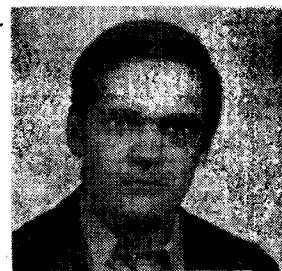


Mikrohullámú félvezető eszközök optikai vezérlésének alapjai. I.

DR. GOTTWALD PÉTER

Budapesti Műszaki Egyetem,
Elektronikus Eszközök Tanszék



ÖSSZEFOGLALÁS

Az optikai technológia alkalmazása a mikrohullámú jelek feldolgozásában olyan új módszer, melynek segítségével a mikrohullámú technikában számos feladat — pl. oszcillátorok injektálása, visszahatásmentes vezérlések, ps-os kapcsolástechnika — előnyösebben oldható meg, mint a hagyományos módszerekkel. A cikk általában a félvezető alapú mikrohullámú eszközök fényérzékenysége okaival foglalkozik, ezen belül részletesen tárgyalja a MESFET és a HEMT eszközök optikai vezérlésének alapjait. A kutatási témát az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság támogatja.

1. Bevezetés

A mikrohullámú jelek optikai úton történő befolyásolása, előállítás a mikrohullámú elektronika legmodernebb irányzatai közé tartozik. Bár a kezdeti felismerések a 70-es évek végéről származnak, e technika rohamos fejlődése a legutóbbi évek nagy eredménye.

A témakör jelentőségét felismerve és támaszkodva a GaAs alapú mikrohullámú félvezető eszközök hazai fejlesztésében meglévő eredményekre [1], [2], az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság megbízásából és támogatásával kutatómunka indult a Budapesti Műszaki Egyetem Mikrohullámú Híradástechnika Tanszékének irányításával. Ennek keretében néhány cikk megjelentetésével szeretnénk áttekintő képet adni e perspektivikus szakterületről.

Bevezető áttekintésképpen — a teljesség igénye nélkül — az optikai és mikrohullámú kölcsönhatásban rejlő néhány érdekes lehetőségről ejtünk szót. Ilyen lehetőség pl. a mikrohullámú jelek optikai úton történő előállítására az optikai keverés. Ekkor két, kismértékben eltérő frekvenciájú lézer fény keverésével állítanak elő igen magas frekvenciájú mikrohullámú rezgést. A mikrohullámú frekvencia stabilizálását a lézertény frekvenciájának elektromos úton történő szabályozása teszi lehetővé, amelyet egy fáziszárt hurok hibajele végez.

A legtöbb alkalmazás alapja, hogy a félvezető anyagok elektromos és optikai paraméterei a megvilágítással befolyásolhatók. Félvezető rétegekben optikai úton gerjesztett töltéshordozókkal pl. ps-os sebességű elektronikus kapcsolók készíthetők. Ezekkel nagyteljesítményű mikrohullámú „burst” jelek is előállíthatók.

Igen gyakori, hogy a beeső fénnel a mikrohullámú félvezetőeszközök ill. monolitikus integrált áramköri elemek elektromos paramétereit befolyásolják. Passzív elemeknél pl. a csatolási

DR. GOTTWALD
PÉTER

Dr. Gottwald Péter 1966-ban szerzett villamosmérnöki oklevelet a Budapesti Műszaki Egyetemen, ahol azóta is dolgozik. Az Elektronikus Eszközök Tanszék oktatójaként a mikrohullámú aktív eszközök elméletével, technológiájával és oktatásával foglalkozik. Számos nagyfrekvenciás mérés-technikai problémát oldott meg ipari megbízásra a

félvezető eszközök fejlesztésével kapcsolatban.

1978. óta műszaki doktor. Szakmai ismereteit több külföldi tanulmányút keretében gazdagította. 1983. óta munkatársa az MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézetének is, ahol a GaAs mikrohullámú eszközök fejlesztésén dolgozik. OMF B és OTKA kutatásokban is részt vesz. Szerzője a Mikrohullámú félvezetők c. névű kiadvány sakkönyvnek és a Mikrohullámú Kézikönyv egy fejezetének.

tényezők és a fázistolások megváltozása használható ki, míg az aktív eszközök klasszikus képviselőinél (pl. MESFET ill. HEMT) a komplex erősítés megváltozása révén a velük épített oszcillátorok frekvenciája (és esetleg amplitúdója) befolyásolható. A futási idő eszközöknél [3] (pl. IMPATT, TRAPATT, BARITT) befolyásolható az eszközben futó töltéscsomag injektálásának időpontja, így ez esetben is az oszcilláció frekvenciájának változtatására van lehetőség. Az aktív eszközökre felsorolt eddigi hasznosításokat oszcillátorok direkt optikai injektálásának nevezük. Az ilyen megoldásnak igen nagy előnye, hogy a vezérlés parazita áramköri elemek keletkezésével is együttjáró áramköri elemek alkalmazása nélkül és mindemellett visszahatásmentesen valósítható meg. Több félvezetőeszközben a fényfluxussal arányos forrásáram (fotoáram), vagy a fluxus logaritmusával arányos üresjárású feszültség (foto-feszültség) keletkezik. Ezen ún. fotodetektorokban számos esetben az érzékenységet fokozó más fizikai jelenségek (pl. lavinaszorozódás) is lejátszódnak. Megemlítjük, hogy a fotodetektorok által szolgáltatott áram vagy feszültség az általános elmélet szerint (Kurokawa, Proc. IEEE, 1973.) alkalmas oszcillátorok közvetett optikai injektálására. Ilyen esetben a fotodetektort az injektálandó aktív eszköz közelében helyezik el, esetleg azzal monolitikus integrált áramköri egységet képezve. A mm-es hullámsávban működő és dielektromos rezonátorral megvalósított oszcillátorok (DRO-k) optikai injektálására olyan módszert alakítottak ki, amelyben a rezonátor egyik határfelületére kis vezetőképességű félvezető réteget visznek fel. Ennek megvilágításával a réteg vezetőképessége jelentősen megnő és ezzel befolyásolja a dielektromos rezonátor rezonanciafrekvenciáját.

Beérkezett: 1988. VI. 1. (t)

Az egyes eszközök tárgyalása előtt már itt kiemeljük, hogy a mikrohullámú félvezetőeszközök geometriai méretei nagyon alkalmasak az optikai vezérlés megvalósítására, hiszen a felületmenti lineáris méretek néhány μm és nagyságrendileg $100 \mu\text{m}$ közé esnek. A megvilágításhoz szükséges néhányszor $10 \mu\text{m}$ átmérőjű fényfolt akár optikai vetítéssel, fényszállal vagy integrált optikai tápvonallal is megoldható. Fényforrásként jól használhatók a heteroátmenetes félvezető lézerek, amelyek $700\text{--}800 \text{ nm}$ körüli hullámhossz mellett $2\text{--}10 \text{ mW}$ fénytelsítményt szolgáltatnak. (A szükséges optikai teljesítménysűrűség $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ nagyságrendű.)

Fontos, hogy az eszközök optikailag árnyékoló kontaktusai között a szabad félvezető felület gyakran a hullámhossz nagyságrendjébe eső szélességű rések mentén látszik, amelyen a fényelhajlás miatt a fény jól bejut az eszköz aktív térfogatába. Tekintve, hogy a fényerjesztésre érzékeny rétegek általában μm alattiak, ugyanakkor a felület alatt sekélyen fekszenek, a fény a teljes aktív területhez jól eljut.

2. A GaAs MESFET optikai vezérlésének alapjai

A GaAs MESFET Schottky vezérlőelektródával ellátott térvezérlésű tranzisztor, amely Mead első kísérlete óta (1966) már a mikrohullámú félvezető elektronika egyik legfontosabb eszközévé vált.

Alkalmazása kiszajú erősítőkből, logikai áramkörökben, mikrohullámú oszcillátorokban egyaránt széleskörben elterjedt. Az elméletével kapcsolatos kérdéseket és a bőséges nemzetközi irodalmat két hazai forrásmunka [3] [4] is tárgyalja.

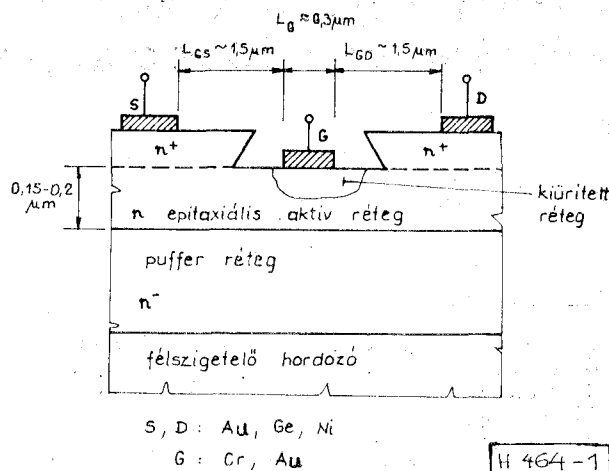
A mai modern konstrukciókban a vezérlőelektróda közel esik a $0,1 \mu\text{m}$ -hoz, a maximális oszcillációs frekvencia pedig már 50 GHz felett van. A legjobb zajtényező értékek 1 dB körüliek, és logikai áramkörökben a működési ciklushoz tartozó energia néhányszor 10 fJ körül van. A teljesítménytranzisztorokkal elért kimenőtelsítmény speciális konstrukcióval ma már $40\text{--}50 \text{ W}$ -ot is elér.

A gyors működés alapja a szubmikrométeres GaAs csatornában nagy térerősségek mellett (néhányszor 10 kV/cm) lejátszódó nemegyensúlyi elektrontranszport, amely az aktív csatornaszakaszban ps nagyságú tranzit időt eredményez. (Azonos méretek és térerősségek mellett Si MESFET-ben e tranzit idők $3\text{--}4$ -szer nagyobbra adódnak, míg az InP-ből készült tranzisztorokban még a GaAs-hez képest is rövidebbek a csatornáthaladási idők.)

Bár az InP MESFET-ek intenzív fejlesztés alatt állnak, mind az alapanyag, mind az eszköztechnológia vonatkozásában meglévő technológia nehézségek miatt ma még széleskörűbb a GaAs MESFET-ek alkalmazása.

Az 1. ábrán egy modern GaAs konstrukció metszete látható, amelyben a vezérlő elektróda (G) egy marással készített árokban süllyesztve helyezkedik el („recesszált gate”).

A félszigetelő hordozó és a csatornát alkotó aktív réteg között egy epitaxiálisan növesztett,



1. ábra. GaAs MESFET konstrukciója és tipikus méretei

mérsékelt adalékolt ún. puffer réteg van, amelynek szerepe az aktív csatornaszakasz lehető hibamentes kristályszerkezetének biztosítása. Az aktív réteget fedő n^+ kontaktusréteg a parazita csatornaszakaszok ellenállásait csökkenti és segíti az ohmos kontaktusok kialakítását.

A szubmikronos GaAs MESFET pontos karakterisztika egyenletei nem adhatók meg zárt alakban, mivel a számítások csak két- (esetleg három-) dimenziós numerikus analízissel végezhetőek el. Az analízisben szokásos módon a folytonossági és a Poisson egyenletet kell szimultán megoldani a nemstacionárius és nagyenergiájú elektrontranszportot leíró mozgásegyenletek figyelembevételével.

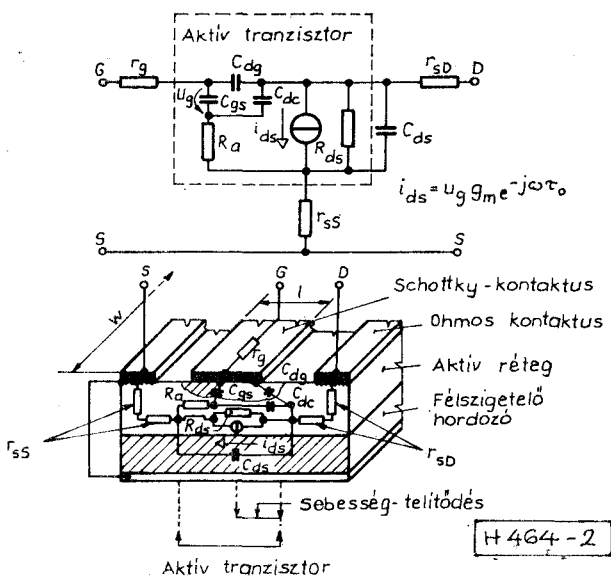
A kvalitatív viszonyok tárgyalásához vannak elegendő pontosságú analitikus modellek, amelyek Shurtól [5], [6] származnak. Az optikai vezérlésű kvantitatív számításánál az irodalom általában ezeket az összefüggéseket alkalmazza.

A 2. ábrán a MESFET koncentrált paraméteres helyettesítő képe látható. Ebben kulcsszerepe van a C_{gs} és C_{gd} kapacitásoknak, amelyek a Schottky vezérlőelektróda alatti kiürített rétegben tárolt töltés feszültségfüggését modellezik. E kapacitások munkapontfüggőek, és rajtuk keresztül az eszköz mikrohullámú paraméterei (S-görbéi) is munkapontfüggővé válnak. (Kisebb mértékben természetesen a helyettesítőkép többi elemén keresztül is létrejön munkapontfüggés.)

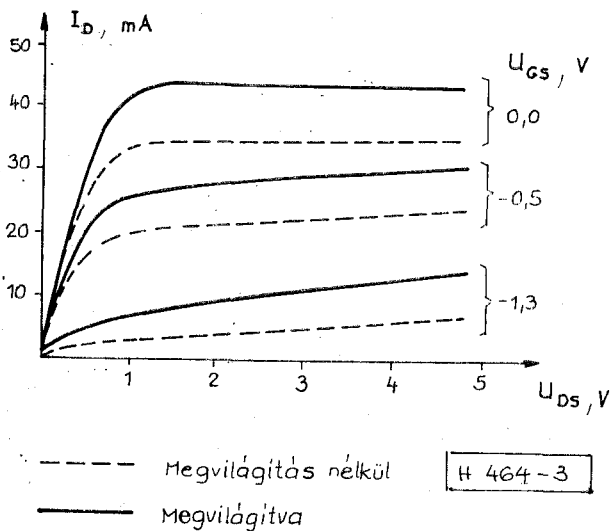
Számos megfigyelés, mérés mutatja, hogy a GaAs MESFET egyenáramú és nagyfrekvenciás paraméterei az eszközre eső megvilágítással befolyásolhatók [7]... [13].

A kimenő karakterisztika tipikus változása pl. a 3. ábrán látható. Megfigyelhető, hogy a kimenő áram a megvilágítás hatására megnövekszik oly módon, mintha a vezérlőelektróda feszültségét kismértékben pozitív irányba toltuk volna el.

Kimutatható, hogy az áramnövekedés jelentős része a vezérlőelektródaként működő Schottky átmenetre eső feszültség tényleges megváltozásából ered, amelyet az átmeneten fellépő fotofeszültség idéz elő. A megvilágítás hatására a fotofeszültség nagyságának megfelelően csökken a csatorna



2. ábra. A GaAs MESFET kisjelű helyettesítő képe. A helyettesítő kép és a MESFET szerkezete közötti kapcsolat



3. ábra. A MESFET kimenő karakterisztika serege megvilágítás mellett és anélkül [9]

U_p kiürülési (pinch off) feszültsége is, amely viszont egyben jól mérhető eszközparaméter is.

Graffeuil és munkatársai [7] mérték a kiürülési feszültség változását a beeső fényintenzitás függvényében, és a kvantitatív elméletnek megfelelően logaritmikus összefüggést tapasztaltak.

Shur elmélete alapján [5], [6] számítva a meredekség relatív változását a megvilágítás függvényében, erre szintén logaritmikus összefüggés adódik. A [7] alatt publikált mérési eredményeket a 4. ábrán mutatjuk be.

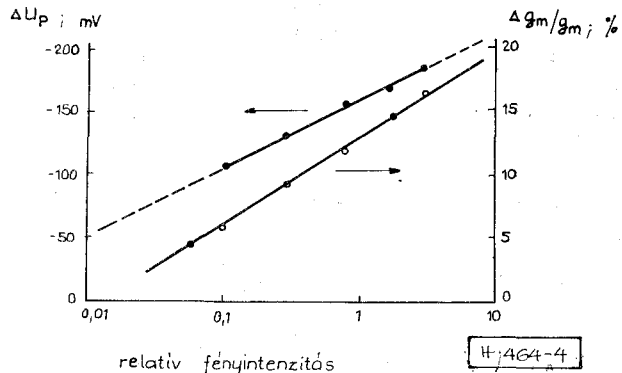
Visszatérve a kimenő karakterisztikán látható áramnövekedésre, amelyet a megvilágítás okozott, a fotofeszültség mellett ebben szerepe van a fotokonduktív hatásnak is. Ez nem más, mint az aktív csatornában a fény által generált töltéshordozók miatt adódó többlet vezetőképesség.

Vezérlőelektróda nélküli strukturákon végzett mérések alapján Graffeuil és munkatársai [7]

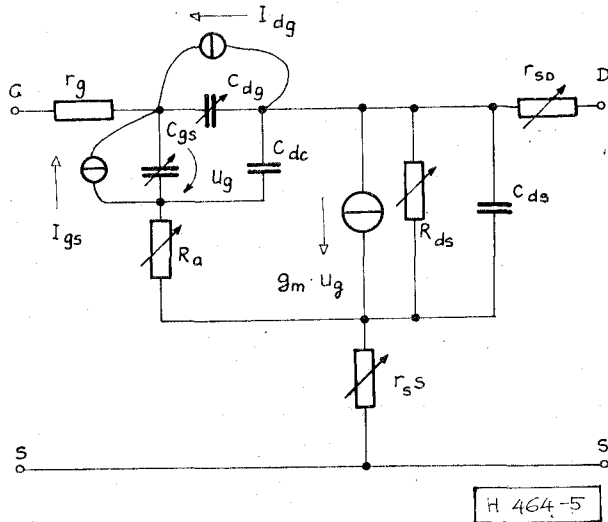
arra a következtetésre jutottak, hogy a fotokonduktív hatás az áramnövekedésben csak csekély mértékben vesz részt. Gammel és Ballantyne [8] viszont végigpásztázták egy MESFET felületét egy 1,1 μm -es átmérőjűre fókuszált lezérfényvel, és kimutatták, hogy a vezérlőelektróda és a nyelő közötti (gate-drain: G-D) rész érzékenysége különösen nagy. Mivel az alkalmazott He-Ne lézer fényére a GaAs-beli abszorpció hossz nagyjából azonos a csatorna vastagságával (0,25 μm), így a fénygerjesztés túlnyomórészt a csatornában és nem az alatta fekvő félzigetelő hordozóban jött létre.

Ilyen körülmények között a G-D szakasz nagy érzékenysége azzal magyarázható, hogy az itt uralkodó nagy térerősségű zónában gerjesztett elektronok nagy sebességgel futnak a nyelő (drain: D) felé, míg a lassan mozgó lyukak jelentős pozitív tértöltést alkotva a G alatti aktív csatornaszakasz [3] felé mozognak, és benne növelik a térerősséget. A növekvő térerősség miatt pedig az aktív csatornaszakasz növekvő elektronáramot szállít a nyelő (D) felé.

Lényegesen csekélyebb, de elvileg nem elhanyagolható hatás adódik abból, hogy a MESEET



4. ábra. A kiürülési feszültség (U_p) és a meredekség (g_m) tipikus változása a relatív fényintenzitás függvényében [7] (U_p : kiürülési feszültség, g_m : meredekség)



5. ábra. MESFET helyettesítő képe a fotovezérelt elemekkel

parazita csatornaszakaszaiban is fellép a fotokonduktív hatás. Ebből a szempontból a G-S közötti parazita csatornaellenállás megvilágítás okozta csökkenésének van jelentősége, mert ez a parazita ellenállás egyébként az áramot és a meredekséget csökkentő belső visszacsatolást okoz.

A MESFET helyettesítőképében a fotokonduktív hatások az ellenállásértékek megvilágításfüggésével vehetők figyelembe. A vezérlőelektróda áramkörében ébredő fotoáramot (vagy üresjárási körülmények között az átmeneten fellépő fotofeszültséget) az átmenet-kapacitásokkal párhuzamosan kapcsolódó fényvezérelt áramforrásokkal vehetjük figyelembe.

Az így kiegészített helyettesítőkép az 5. ábrán látható. A helyettesítőképben a C_{gs} és a C_{gd} kapacitások az átmenetre eső feszültség függvényei, viszont ezt a feszültséget a fotofeszültség módosítja.

A fotoáramok miatt a vezérlőelektróda és a csatorna közötti átmeneten keletkező fotofeszültség annál nagyobb, minél nagyobb a vezérlőelektróda-hoz kapcsolódó külső áramkör impedanciája.

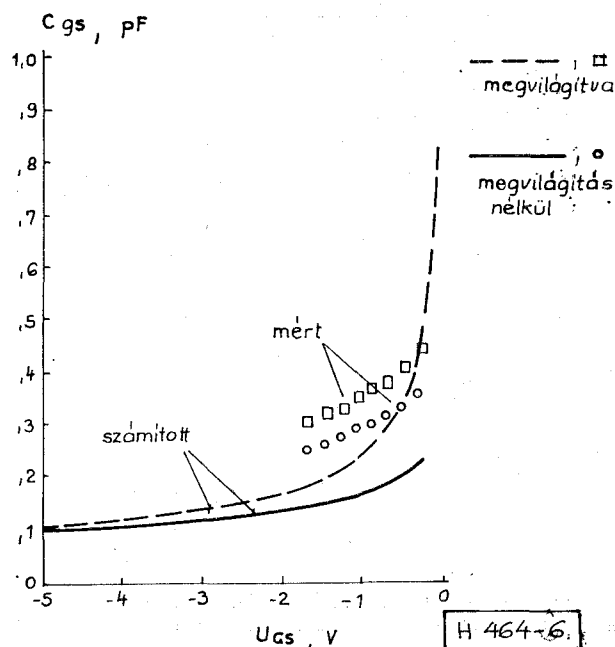
Ez a magyarázata a Salles [10] által mért S paraméter görbék (1. táblázat) nagyobb megvilágításfüggésének, ha a vezérlőelektróda áramkörében nagyobb R_G impedancia van.

Simons és Bhasin [11] mért és számított értékek alapján hasonlítják össze a C_{gs} kapacitás függését az U_{gs} feszültségtől megvilágítás mellett és anélkül. Az eredmények a 6. ábrán láthatók.

Az alkalmazásokkal összefüggésben megemlítjük, hogy a MESFET oszcillátorok fénytel történő frekvenciamodulációja akkor a leghatékonyabb, ha az oszcillátor frekvenciáját meghatározó egyik reaktáns elem lényegében a MESFET bemenő kapacitása [12], [13].

Az eddig részletezett hatások a GaAs-ben a sávtól-sávig történő fénygerjesztés hatására álltak elő, és jellemzőjük, hogy a gerjesztést az eszköz olyan sebességgel követi, mint ahogyan az a normál működés közben az elektromos jelekkel szemben is bekövetkezik.

A tapasztalatok azt mutatják, hogy a MESFET-ben a fénygerjesztést sokkal lassabban követő foto-



6. ábra. C_{gs} függése a megvilágítástól [11]. A számításhoz felhasznált adatok:

- az aktív réteg vastagsága: $0,3 \mu\text{m}$; adalékolása: 10^{17}cm^{-3} ; mozgékonyág: $5300 \text{cm}^2/\text{Vs}$
- a vezérlő elektróda hossza: $1 \mu\text{m}$; szélessége: $500 \mu\text{m}$; potenciálgátja: $0,8 \text{V}$

elektromos jelenségek is fellépnek, melyek az aktív csatorna és a pufferréteg közötti átmenet elektromos állapotának fény okozta változásaival hozhatók kapcsolatba. A jelenséget az irodalom „back-gate”-effektusnak, a csatorna hátoldali vezérlésének nevezi.

MESFET-ben az aktív réteg olyan vékony, hogy a besugárzott fény jelentős része eléri a pufferréteg határát, és itt lyuk-elektron párokat gerjeszt.

A csatorna és a pufferréteg által alkotott $n^+ - n^-$ átmenetben a töltéskonzentráció változását egyensúlyozó elektromos tér keletkezik, amelynek forrása a csatorna alján keletkező részlegesen kiürült réteg.

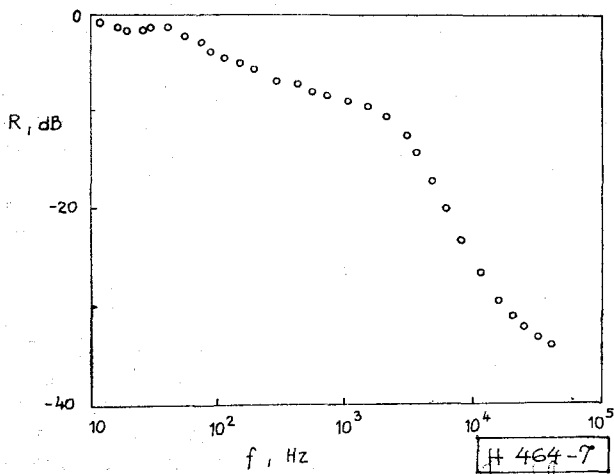
Ha ebben az átmenetben a fény lyuk-elektron párokat generál, az elektronokat a térerősség a csatornába, a lyukakat pedig a nagyellenállású hordozó felé sodorja. Mivel a fotoáram csak a nagyellenállású hordozón keresztül haladva képes a forráson (S) és a csatornán keresztül záródni, az átmeneten fotofeszültség lép fel, amely csökkenti az átmenet csatorna felőli oldalán a kiürülés mértékét. Ez a hatás a csatorna áramának megnövekedésével jár.

A megvilágítás megszűntével az átmenetben felhalmozódott fotogerjesztett töltés csak az átmenet által képviselt kapacitással (pF nagyságrend) és a hordozó ellenállásával (megvilágítás mellett $100 \text{k}\Omega$ nagyságrend) számítható időállandó szerint képes kisülni és ezzel visszaállítani a csatorna megvilágítás előtti állapotát. (A rekombinációt a fotogerjesztett töltések nagy élettartama miatt nem kell figyelembe vennünk [14]).

1. táblázat

MESFET S paramétereinek változása a megvilágítás hatására, ha a vezérlőelektróda áramkörében kicsi vagy nagy impedancia van

f GHz	$R_G=1\text{k}\Omega$		$R_G=1\text{M}\Omega$					
	sötétben	megvilágítva	sötétben	megvilágítva				
	ABS	Fázis	ABS	Fázis	ABS	Fázis	ABS	Fázis
2	2,37	133	2,37	133	2,34	133	2,60	132
3	2,19	117	2,19	117	2,16	116	2,40	115
4	2,26	110	2,26	110	2,32	100	2,57	97
5	2,24	83	2,24	83	2,21	81	2,43	78
6	2,07	66	2,07	65	2,11	67	2,29	64
7	1,80	54	1,80	54	1,80	54	1,97	51
8	1,48	29	1,48	29	1,48	28	1,64	25
U_G	-1 V		-0,98 V		-1 V		-0,23 V	
I_D	38 mA		46 mA		39 mA		69 mA	
I_G	-4 μA		-9,7 μA		-4,0 μA		-4,7 μA	



7. ábra. A csatorna és a pufferréteg közötti átmenet relatív fényérzékenységének frekvenciamenete [15] alapján

Papaionannou és Forrest [15] mérései alapján mutatunk példát a 7. ábrán a csatorna és a pufferréteg közötti átmenet fényérzékenységének frekvenciamenetére.

A „back-gate” effektushoz hasonló lassú fényelektromos válasz a tiltott sáv által meghatározottnál kisebb fotoenergiák mellett is ($\lambda < 870$ nm) kiváltható. Ennek fizikai oka az, hogy a GaAs tiltott sávján belül gyakran és jelentős térfogatsűrűségben fordulnak elő megengedett energiaállapotok, melyeket amiatt, hogy ezek energianívói a sávhatároktól távol esnek, mély nívóknak (deep-level-nek) nevezünk.

A mély nívók nem teljesen betöltöttek, így azok elektronok befogására és emittálására képesek. A mély nívók és a sávok közötti elektronforgalmat a tiltott sávnál kisebb energiátávolság miatt már kisebb energiájú ($\lambda > 870$ nm) fotonokkal is befolyásolhatjuk.

(A mély nívók jelenléte a kristályszerkezet hibáival, idegen atomok jelenlétével, ezek esetleges „komplexeivel” magyarázható. A nem elhanyagolható térfogatsűrűség összefügg azzal, hogy a GaAs az egykomponensű félvezető anyagokkal szemben kristályhibák képződésére sokkal érzékenyebb, bonyolultabb félvezető anyag.)

MESFET-ben a pufferréteg és a félszigetelő hordozó határán van nagy valószínűsége a mélynívókat okozó kristályszerkezeti eltéréseknek.

Mivel a mély nívók gerjesztéséhez szükséges nagyobb hullámhosszúságú fényre a GaAs réteg átlátszó, a besugárzott fény könnyen eljuthat az eszköz mély nívókban gazdag mélyebben ($3\text{--}5$ μm) fekvő részeibe.

Mint azt mérések és kvantitatív vizsgálatok egyaránt mutatják, a mélynívókkal összefüggő fényérzékenység frekvenciamenetében az adott nívó befogási és emissziós állandójával összefüggő töréshelyre adódik [15].

A gyakorlatban előforduló sokféle mélynívó miatt a fényérzékenység frekvenciamenetében a MHz-től a GHz-ig terjedő frekvenciasávban több egymást követő töréspont mutatható ki.

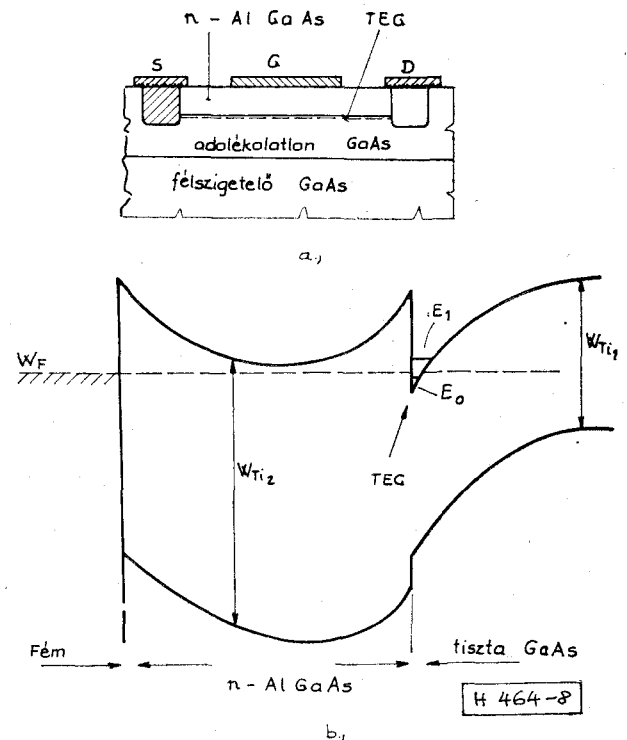
3. A HEMT tranzisztor optikai vezérlése

A HEMT (High Electron Mobility Transistor) a ma ismert leggyorsabb tervezérlésű tranzisztor. Benne a forrás (S) és a nyelő (D) közötti vezetősínt egy heteroátmenet mentén eloszló két-dimenziós elektrongáz (TEG) alkotja. Az elektrongáz felületegységre eső koncentrációja a heteroátmenet felett fekvő Schottky vezérlő elektródával vezérelhető.

HEMT tranzisztorokkal épített DRO-k (dielektromos rezonátorral működő oszcillátor) 100 GHz felett néhányszor 10 μW kimenő teljesítményt szolgáltatnak, erősítő üzemben pedig a zajtényező 60 GHz frekvenciáig 3 dB alatt marad. Digitális áramkörökben a működési ciklushoz tartozó energia 10 fJ nagyságrendjébe esik. A nagy működési sebesség abból ered, hogy erősen lehűtve (pl. 77 K-re) a heteroátmenetet, az elektrongázban mozgó elektronok mozgékonyasága több $100\,000$ cm^2/Vs értéket is elérhet.

A HEMT-ben alkalmazott heteroátmenet az $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ átmenet ($x = 0,2 \dots 0,3$), amelyben már a 70-es évek végén megfigyeltek nagy elektronmozgékonyaságot. (Az $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_x/\text{GaAs}$ heteroátmenet rácsilleszkedése jobb, mint $0,1\%$, az $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ tiltott sáv szélessége pedig kényelmesen beállítható az Al mól-arányával. Ha pl. $x = 0,2$, a tiltott sáv szélessége $1,65$ eV körüli érték.)

A HEMT szerkezetre vonatkozó egyik legkorábbi publikáció Morkoc-tól származik (IEEE Trans. on El. Dev., 1978), majd őt követték Mimura (Jap. J. of Appl. Phys., 1980), és Delagebeaudeuf (Electronics Lett., 1980).



8. ábra. a) a HEMT vázlatos szerkezete; b) Az $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ rendszer sávdigramja

A szerkezeti felépítés lényegét a 8. ábrán, a heteroátmenet környezetében és az n-GaAs-ben kialakuló sávdiaagramot pedig a 8. b ábrán rajzoltuk meg.

A heteroátmenet GaAs felőli határán kialakuló energiaminimumban (kvantum-völgy-ben) feltüntettük az elektrongázra vonatkozó két diszkrét energiaértéket. Ez a kvantáltság azért alakul ki, mert az elektronok hullámfüggvényei az átmenetre merőleges irányban egy nagyon rövid szakaszra (≈ 10 nm) lokalizálódnak.

A TEG-ben az elektronok mozgékonyasága azért nagy, mert az átmenet GaAs-felőli oldala (ahol a TEG kialakul) adalékolatlan, a termikus rácszórás pedig az erős hűtéssel lehet kiküszöbölni.

Az AlGaAs-ben lévő donortonok potenciálterének „áthatalása” a heteroátmenet GaAs felőli oldalára a TEG elektronjainak szóródását okozná, és ezzel csökkentené a mozgékonyaságukat. E nemkívánatos hatás is kiküszöbölhető azáltal, hogy az n-AlGaAs és a GaAs réteg közé egy vékony (pl. 5 nm vastagságú) adalékolatlan AlGaAs réteget növesztenek.

A TEG töltéskonzentrációját az AlGaAs-ben fekvő Schottky elektródával vezérelni lehet [16], [17].

A vázolt HEMT szerkezetenél számos bonyolultabb megoldást is kifejlesztettek, amelyekben elsősorban a mély nívók által okozott zavaró hatások [18], [19] kiküszöbölésére törekedtek. E megoldásokat itt most nem részletezzük, csupán a fizikai probléma lényegét érintjük, tekintve, hogy ez a HEMT fényérzékenységgel kapcsolatban áll.

Megfigyelések azt mutatták, hogy a HEMT működésében fénybehatás nélkül, erős lehűtés mellett zavarok keletkeznek [18], [20], [21], amelyek az AlGaAs-ben keletkező mélynívók betöltöttségi viszonyaival kapcsolatosak. Ezek ugyanis lehűtve elektronokat fognak be, negatív tértöltést alkotnak és rendszerint erősen csökkentik a TEG koncentrációját. A megvilágítás hatására fénygerjesztés útján a mélynívók a befogott elektronokat visszaemittálják, és a működés zavarmentessé válik.

A mély nívók közül az ún. DX centrum a legzavaróbb, amely egy donor típusú nívó és nem más, mint egy Ga rácshelyre beépült Si atom, amely egy As vakanciával alkot komplexet.

A Si-ot az AlGaAs-ben donor adalékként alkalmazzák, mert amfotér jellege a Ge-nál lényegesen enyhébb, a felületi szegregációs hajlama pedig a Sn-nál sokkal kisebb.

A DX centrumok képződése összefügg az Al és a Ga mól-arányával, és sajnos épp olyan mól-arány mellett (Al% 20%) kezd erősen növekedni a DX centrumok sűrűsége, amely mellett a TEG elektron-dinamikai viszonyai is a legkedvezőbbek.

A mélynívók által okozott fényérzékenység igen drasztikus. Alkalmas lehet HEMT tranzistorokkal épített erősítő és oszcillátor áramkörök ki és bekapcsolására, de semmiképpen nem alkalmazható finomabb és nagysebességű vezérlés megvalósítására. (Ez többek között azért van, mert a mélynívók véges befogási és emissziós

állandói korlátozzák a gyors működést. A jelenséget a szakirodalom persistent photoconductivity: PPC néven tárgyalja [18].)

Megfigyelések szerint a HEMT struktúra mutat a mikrohullámú jelek processzálására is alkalmas fényérzékenységet [11], [22], [23], bár ennek mechanizmusát tételesen még az irodalom nem rendszerezte. Tekintve, hogy a AlGaAs-ben a nagyobb tiltott sáv szélessége miatt a sávok közötti direkt töltéshordozó gerjesztés csak rövidebb hullámhosszúságú (pl. $\lambda < 750$ nm) fényvel valósítható meg, a 800 nm körüli hullámhosszúságú lézer fény csak csekély veszteséggel éri el a TEG-et magába foglaló GaAs réteget. Az itt uralkodó nagy térerősség ($\approx 10^5$ V/cm) a generálódott elektronokat a TEG felé, a lyukakat pedig a GaAs réteg belseje felé hajtja. (Feltételezhető, hogy a lyukak árama a TEG alatti mélyebb rétegen áthaladva végülis a forrás (S) felé záródik.)

A megvilágítás hatására változás következik be az eszköz töltéselrendeződésében és ez az elektromos paraméterek (munkaponti áram és pl. a töltéselrendeződést modellező kapacitások) megváltozásával jár.

Az irodalomban fellelhető legújabb mérési eredmények Simons-tól származnak [23]. Ezek azt mutatják, hogy a fénygerjesztés növeli a munkaponti áramot, csekély mértékben (≈ 2 mS) változtatja a meredekséget és így az S_{21} paraméter abszolút értékét, de nincs jelentős hatással az S_{21} paraméter fázismentére.

4. Összefoglalás

A mikrohullámú félvezető eszközök fényérzékenysége a jelfeldolgozásban új módszerek alkalmazását tette lehetővé.

A témakör kapcsán megemlítettünk néhány alkalmazási lehetőséget, majd a MESFET és a HEMT fényérzékenysége okaival foglalkoztunk. Az eszközműködés alapvető ismertetése után láttuk, hogy a paraméterek megváltozását az optikai úton gerjesztett töltéshordozók okozzák foto-áramok ill. foto-feszültség valamint vezéremoduláció létrehozásával. A sáv-tól-sávig történő gerjesztés az eszköz határfrekvenciájával megegyező sebességű, a mélynívók gerjesztése viszont csak lassú optikai vezérlést tesz lehetővé. Megmutattuk, hogy a megvilágítás hatására a kisjelű helyettesítőkép elemei illetve az S paraméterek értékei megváltoznak. A HEMT fényérzékenységgel kapcsolatban kitértünk a DX centrumok hatására.

5. Köszönetnyilvánítás

A témakör feldolgozásához az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság nyújt támogatást. Ezért, valamint számos hasznos beszélgetésért dr. Frigyes Istvánnak tartozom köszönettel.

IRODALOM

- [1] Az MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézete Közleményei. Finommechanika-Mikrotechnika, 25. évf. 1986. 2—3 szám, február—március.

- [2] Az MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézeté Köziemé-
nyei. Finommechanika-Mikrotechnika, 26. évf
1987. 6—7 szám, június—július.
- [3] Dr. *Gottwald Péter*: Mikrohullámú félvezetőesz-
közök Műszaki Könyvkiadó, 1985. Budapest.
- [4] *Sze, S. M.*: Félvezető eszközök fizikája. Műszaki
Könyvkiadó, Budapest, (megjelenés alatt) Ki-
egészítő rész: F.1.1.
Gottwald P.: A mikron alatti csatornahossz problé-
mái és hatása a MESFET működésére.
- [5] *Shur, M. S.*: Analytical Model of GaAs MESFET's.
IEEE Trans. on El. Dev. 1978. June, Vol. ED-25.,
pp. 612—618.
- [6] *Shur, M. S.*—*Eastman, L. F.*: Current-voltage
characteristics, small-signal parameters, switching
times and power-delay products of GaAs MESFET's
IEEE MTT's Int. Microwave Symp. Dig., 1978.
pp. 150—152.
- [7] *Graffeuil, J. et al.*: Light-Induced Effects in GaAs
F. E. T. s. El. Lett., 1979. July, Vol. 15, No. 14.,
pp. 439—441.
- [8] *Gammel, J. C.*—*Ballantyne, J. M.*: Comments on
„High Speed Photoresponse Mechanism of GaAs-
MESFET”. Jap. Journal of Appl. Phys., 1980.
May. Vol. 19., pp. L273—L275.
- [9] *Forrest, J. R.*—*Salles, A. A.*: Optics Control
Microwaves. Microwave Syst. News, 1981. June,
pp. 112—122.
- [10] *Salles, A. A.*: Optical Control of GaAs MESFET's
IEEE Trans. on MTT., 1983. Oct., Vol. MTT-31.,
pp. 812—820.
- [11] *Simons, R. M.*—*Bhasin, K. B.*: Analysis of Opti-
cally Controlled Microwave/Millimeter-Wave De-
vice Structures. IEEE Trans. on MTT., 1986.
Dec., Vol. MTT-34., pp. 1349—1355.
- [12] *Sun, H. J. et al.*: Photoeffects in Common-Source
and Common- Drain Microwave GaAs MESFET
Oscillators. Sol. State El., 1981. Oct., Vol. 24.,
pp. 935—940.
- [13] *Sun, H. J. et al.*: DC and pulse-light illuminated
optical responses of microwave GaAs-MESFET
oscillators. IEE Proc., 1984. Febr., Vol. 131.,
Pt. I, pp. 31—37.
- [14] *Sheinkman, M. K.*—*Shin, A. Y.*: Long term re-
laxation and residual conductivity of semicon-
ductors (review). Sov. Phys. Semicond., 1976.
Vol. 10. pp. 128—143.
- [15] *Papaioannou, J. G.*—*Forrest, J. R.*: On the Photo-
response of GaAs MESFET's: Backgating and
Deep Traps Effect. IEEE Trans. on El. Dev.,
1986. March, Vol. ED-33., pp. 373—378.
- [16] *Delagebeaudeuf, D.*—*Linh, N. T.*: Charge Control
of the Heterojunction Two-Dimensional Electron
Gas for MESFET application. IEEE Trans. on
El. Dev., 1981. July, Vol. ED-28., pp. 790—795.
- [17] Dr. *Valkó I. Péter*: Új tranzisztorok. Híradás-
technika. 36. évf. 1985., 9. szám, szeptember
385—393 old.
- [18] *Nathan, M. I.*: Persistent Photoconductivity in
AlGaAs/GaAs Modulation Doped Layers and
Field-Effect Transistors: A Review. Sol. State El.,
1986. Febr., Vol. 29., pp. 167—172.
- [19] *Heuken, M. et al.*: Deep Level Analysis in Heteros-
tructure Field-Effect Transistors by Means of the
Photo-FET Method. IEEE Trans. on El. Dev.,
1986. May. Vol. ED-33., pp. 693—697.
- [20] *Chi, J. Y. et al.*: Effect of Traps on Low-Tempera-
ture High Electron Mobility Transistor Charac-
teristics. IEEE El. Dev. Lett., 1984. Sept., Vol.
EDL-5., pp. 381—384.
- [21] *Dhar, S. et al.*: A Detailed Investigation of the
DX Center and Other Trap Levels in GaAs-Al_xGa_{1-x}
As Modulation-Doped Heterostructures Grown by
Molecular-Beam Epitaxy. IEEE Trans. on El.
Dev., 1986. May, Vol. ED-33., pp. 698—706.
- [22] *Simons, R. M.*—*Bhasin, K. B.*: Microwave Per-
formance of an Optically Controlled AlGaAs/GaAs
High Electron Mobility Transistor and GaAs
MESFET. IEEE MTT's Int. Microwave Symp.
Dig., 1987. pp. 815—818.
- [23] *Simons, R. M.*: Microwave Performance of an Op-
tically Controlled AlGaAs/GaAs High Electron
Mobility Transistor and GaAs MESFET. IEEE
Trans. on MTT., 1987. Dec., Vol MTT-35. pp.
1444—1454.

21-GYEL ÖN IS NYER!

MECMAN 21 ÉVES SVÉD-MAGYAR KOOPERÁCIÓ

FINOMSZERELVÉNYGYÁR EGER