

## M Ü H A Z İ R Ə - 12 - 13

### NANOTEKNOLOGİYALARIN TƏDBİQ SAHƏLƏRİ.

#### NANOELEKTRONİKA:

##### nanoobyektlər əsasında işləyən elektron qurğuları.

Hazırkı dövrdə nanotexnologiyaların tətbiq sahələri dedikdə, fikrimizə bir çox elm sahələrinin gəlməsinə baxmayaraq, bunlar içərisində informatika sahəsində, biologiya sahəsində və tibb sahəsindəki nailiyyətləri xüsusi qeyd etmək lazımdır.

Bu müəhazirəmizdə biz nanotexnologiyaların əsas tətbiq sahəsi olan nanoelektronikadan söhbət açacağıq.

*Nanoelektronika elektron inteqral sxemlərinin yaradılmasında fiziki və texnoloji əsasın hazırlanması ilə məşğul olan müasir elektronikanın bir bölməsidir.*

Nanoelektronikanın hazırkı dövrdə qarşısında duran əsas məsələlər

- 1) ölçüləri 100 nm-dən kiçik olan elementlərdən miniatür yeni elektron qurğularının hazırlanması;
- 2) bunun üçün üsul və texnologiyaların yaradılması;
- 3) və sonda bütün bunların inteqral sxemlər şəklində birləşdirilməsindən ibarətdir.

Nanoelektronika sahəsində çalışan mütəxəssislər qarşılarına qoyduqları məsələləri həll etmək üçün mexanika, materialşünaslıq, fizika, kimya, biologiya və tibb sahəsində əldə edilən son nailiyyətlərdən lazımınca bəhrələnməlidirlər. İlk müəhazirələrimizdə qeyd etdiyimiz kimi, nanotexnologiyaların tədqiq sahəsindən asılı olmayaraq, bu texnologiyalar bütün təbiət elmlərini bir araya gətirir və hər bir istiqamətdə qarşıya qoyulan məqsədə çatmaq üçün, bu nailiyyətlər birgə tətbiq edilməlidir.

Müasir elektronikanın qarşısında duran əsas məqsəd isə elektron qurğularının ölçü və kütlələrinin kiçildilməsindən ibarətdir. Yaxın tariximizə nəzər salsaq görərik ki, bu məqsədə müəyyən dərəcədə çatılmışdır. Belə ki, elektrotexniki komponentlərdən elektron lampalarına, lampalardan tranzistorlara, tranzistorlardan inteqral sxemlərə ardıcıl texnoloji keçid müasir mobil telefonların, cib kompüterlərinin, şəxsi tibbi aparatların və müasir insanın həyatında istifadə edilə bilən daha bir sıra qurğuların yaradılmasına güclü təkan vermişdi.

1965-ci ildə İntel kompaniyasının təsisçilərindən biri olan Qordon Mur maraqlı bir kəşf etdi. O gördü ki, inteqral sxemlərin elementlərinin tez-tez kiçildilməsi, sonradan onun adını daşıyan Mur qanununa tabe olur, yəni inteqral sxemdə elektron komponentlərinin yerləşmə (yığılma) sıxlığı təqribən hər 1,5-2 ilə 2 dəfə artır ki, bu da öz növbəsində, hesablama gücünün və məhsuldarlığın 2 dəfə artımına gətirib çıxarır. Bu qanun, İntel kompaniyası tərəfindən istehsal olunan bütün məhsullarda özünü tam doğruldu.

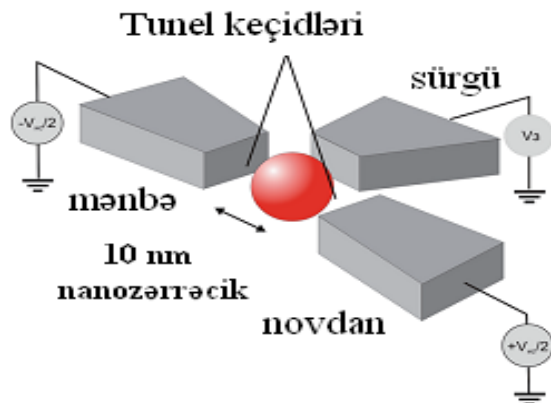
Lakin bu qanuna uyğunluq sonsuzluğa qədər davam edə bilməz, yəni müasir mikrosxemlərin əsasını təşkil edən elementlərin ölçüləri müəyyən həddə qədər

kiçildilə bilər. Onda belə bir sual verə bilərsiniz: “Hansı ölçülərə qədər kişilmə mümkündür?”. Bu sualın cavabı da artıq fiziklərə məlumdur. Bu gün müasir texnika nəzəri olaraq informasiyanı bir elektron vasitəsilə saxlamağa və ötürməyə yaxındır. Bu o deməkdir ki, inteqral sxemlərin elementlərinin ölçüləri bir neçə atom layı tərtibindən kiçik ola bilməz. Bu ölçülərdə bilir ki, artıq klassik fizika qanunları öz mahiyyətini itirir və bu cür elementlər kvant mexanikası qanunlarına tabe olur. Ona görə də nanotexnoloji nailiyyətlərin əsasını sırf kvant mexaniki hesablamalar təşkil edir. Əvvəlcə həq hansı bir məqsədə çatmaq üçün kvant mexaniki hesablamalar aparılır; bunun mümkünlüyü nəzəri sübut edildikdən sonra isə texnologiyaların yaradılması istiqamətində araşdırmalara start verilir.

### Nanoobyektlər əsasında işləyən elektron qurğuları

Elektronikada nanoobyektlərdən – nanozərrəciklərdən, kvant nöqtələrindən, karbon nanoborularından və s. istifadə edilməsi inteqral mikrosxemlərdən inteqral nanosxemlərə keçməyə imkan verdi. Bu deyilənlərə əyani misal olaraq **birelektronlu tranzistoru** göstərmək olar.

1986-cı ildə sovet fizikləri K.K.Lixaçov və D.V.Averin tərəfindən kulon blokadası effekti əsaslı birelektronlu tranzistorun yaradılması ideyası irəli sürülür. Kulon blokadası effekti kvant nöqtəsindən elektronun keçməsinin qarşısının alınması deməkdir, yəni elektronla kvant nöqtəsi arasında yaranan kontaktda elektronların itələnməsi baş verir. Kulon blokadası elektronun nöqtədən “uçmasını” və ora yeni elektronların “düşməsinə” qoymur. Kulon blokadasını aşmaq üçün potensial çəpərin hündürlüyünü azaltmaq və elektronların enerjisini artırmaq lazımdır.



***Birelektronlu  
tranzistorun  
sxematik  
görünüşü***

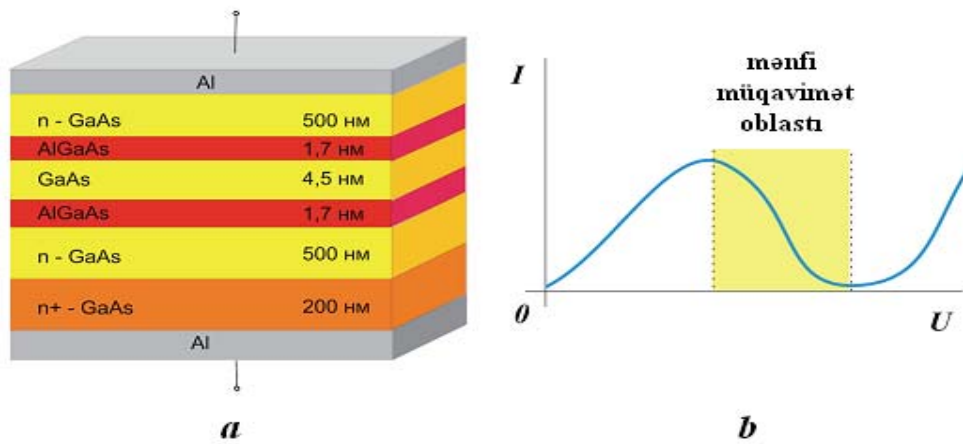
Sahə yarımkeçirici tranzistorlar kimi, birelektronlu tranzistor da 3 elektrodan – mənəbdən, sürgüdən və novdan ibarətdir. Elektrodlar arası oblasta əlavə olaraq metal, və ya yarımkeçirici “nanoadacıq” – nanozərrəcik, və ya nanoklaster elə yerləşdirilir ki, o elektrodlardan dielektrik layı ilə izolə olunmasına baxmayaraq, müəyyən şərtlər daxilində orada elektronun hərəkəti mümkün olur. Mənəbə ilə nov arasında gərginlik verdikdə, onlardan cərəyan keçmir. Çünki bu zaman nanozərrəcik elektronların hərəkətinin qarşısını almış olur. Cərəyanın keçməsi üçün tənzimləyici elektrod olan sürgüdə potensial o həddə qədər artırılır

ki, bu qiymətdə elektronların “blokadası” yarılr və dövrdə elektrik cərəyanı, elektronların bir-bir hərəkət etməsi hesabına, porsiyalarla axır.

Beləliklə aydın olur ki, sürgüdə potensialı tənzimləməklə elektronları bir-bir çəpərdən keçirmək mümkündür. Bu zaman nanozərrəciklərdə elektronların sayı 10-dan çox olmamalıdır (say 10-dan az olduqda, nəticələr daha yaxşı olur). Buna isə 10 nm ölçü tərtibli kvant quruluşlarında nail olmaq olar.

Nanoobyektlər əsasında yaradılmış digər elektron qurğus isə **rezonans-tunel diodu**dur.

Rezonans-tunelləşmə hadisəsinin nəzəri izahı ilk dəfə 1958-ci ildə yapon tədqiqatçısı L.Esaki tərəfindən verilmişdir. Lakin təcrübi yolla rezonans-tunel diodları və tranzistorları XX əsrin 90-cı illərində yarandı. Rezonans-tunel diodu mürəkkəb dövrü quruluşa malik nanometr tərtibli qurğudur.



Rezonans-tunel diodunun quruluşu (a) və onun volt-ampere xarakteristikası (b)

Rezonans-tunel diodunun iş prinsipi, yəni, rezonans-tunel diodundan keçən cərəyanın qiyməti verilən gərginliyin qiymətindən birbaşa asılıdır. Belə ki, əgər verilən gərginlik kiçikdirsə və potensial çəpərdən keçən elektronların enerjisi diskret səviyyənin enerjisindən azdırsa, onda axan cərəyanın qiyməti də kiçik olacaq (bax qrafikə). Elektronların enerjisi diskret səviyyənin enerjisinə bərabər olduqda, cərəyan özünün maksimal qiymətini alacaq. Daha yüksək gərginliklərdə, yəni elektronların enerjisi diskret səviyyənin enerjisindən çox olduqda isə, cərəyan da azalacaq. Şəkildən görüldüyü kimi, rezonans-tunel diodunun volt-ampere xarakteristikasında maksimumlar və mənfi differensial müqavimətli hissələr vardır. Bu isə çox səviyyəli məntiqi elementlərin, yaddaş elementlərinin və yüksək tezlikli generatorların yaradılması üçün vacib şərtidir.

Rezonans-tunel dioduna tənzimləyici elektrod əlavə etməklə, onu rezonans-tunel tranzistoruna çevirmək olar.

### Nanokompüterlər

Nanotexnologiyaların digər tətbiq sahəsi nanokompüterlərin yaradılması ilə bağlıdır. Hazırkı dövrdə nanokompüterlərin yaradılması, informasiyanın müxtəlif cür ötürülməsindən asılı olaraq, bir neçə istiqamətdə aparılıq: kvant məntiqi əsaslı,

klassik məntiqi əsaslı, genetik, molekulyar-bioloji və molekulyar-mexaniki. Bu cür kompüterlərə V nəsil kompüterlər, və ya kvant kompüterləri də deyirlər. Belə hesab edilir ki, kvant kompüterlərinin iş prinsipi kvant-mexaniki effektlərdən və kvant alqoritmlərini realizə edə bilən hesablayıcı qurğudan ibarət olacaq, yəni bu kompüterlər kvant məntiqi əsasında işləyəcək.

Süni intellekt əsasında kompüter yaradılması ideyasına ilk dəfə 1980-ci ildə start verilmiş və bunu həyata keçirmək üçün Yaponiya dövləti tərəfindən təqribən 500 milyon dollar xərclənmişdi. Lakin bu proqram çox kiçik zaman ərzində iflasa uğramışdır.

1997-ci ildə Cənubi Kaliforniya universitetinin professoru Leonard Adleman göstərir ki, içərisində DNT molekulu olan kiçik qurğu vasitəsilə adi kompüterlərdə olduğu kimi, klassik kombinasiya məsələlərini həll etmək mümkündür. Bu üsul DNT-metod adlandırılmış və müəyyən olunmuşdur ki, onunla məlum biokimyəvi reaksiyalar apardıqda, qısa zaman kəsiyində bütün mümkün həll variantlarını tapmaq olar. Bunun üçün lazım olan məlumatı kodlaşdıran DNT-molekulunu müəyyən etmək lazımdır. Lakin bu üsulun da öz çətinlikləri var; bunlardan biri ardıcıl olaraq uzun reaksiyaların aparılması ilə, digəri isə kompüterin öz kütləsindən qat-qat çox DNT molekulunun lazım olması ilə bağlıdır (təqribən Yer kütləsi qədər). Lakin buna baxmayaraq, 2004-cü ilin aprel ayının 28-də bir qrup alim tərəfindən hüceyrə səviyyəsində şiş hüceyrələrini müəyyən edən və onları məhv etmək üçün xüsusi dərman preparatlarını buraxmaq qabiliyyətinə malik DNT-kompüter yaradılmışdır.

Nanokompüterlərin yaradılması istiqamətində tədqiqat işləri hal-hazırda geniş vüsət alıb. Artıq nanoprosessorun əsasını təşkil edən nanotranzistorlar yaradılmışdır. Yəqin ki, yaxın gələcəkdə nanokompüterlər də yaranacaq.

### **Kvant optoelektronikası**

**Optoelektronika** fizika və texnikanın bir bölməsi olub, optik şüalanmanı elektrik cərəyanına və əksinə çevirən sahədir.

İnsan tərəfindən qəbul olunan informasiyanın 90%-dən çox hissəsini görmə optik informasiya təşkil edir. Hər gün küçədə işıqforlarla və reklam ekranları ilə qarşılaşırıq, konsert və diskotekalarda lazer şounun şahidi oluruq, evdə kompüterin, televizorun və mobil telefonların ekranına baxırıq və heç birimiz ağılımıza belə gətirmirik ki, bütün qeyd etdiklərimizin əsasını nanotexnologiyalar təşkil edir və onların iş prinsipi nanoobyektlərin bir sıra xassələri ilə bağlıdır.

Optoelektronik qurğuların tətbiq sahəsi genişdir:

- ✓ **fotoqəbuledicilər**; işığı elektrik cərəyanına çevirir. Işığın təsiri altında müqavimətin dəyişmə prinsipi ilə işləyən fotoqəbuledici **fotorezistor** adlanır.
- ✓ **ışıqburaxan qurğular**; cərəyanı işıq şüasına çevirir. Məsələn, elektrolüminessent indikatorları, yarımkeçirici işıq diodları və lazerlər.
- ✓ **optocütlər – cüt işıqburaxan qurğu**; elektrik dövrəsini izolyasiya etmək üçün istifadə olunur. Bunlara misal olaraq “cərəyan-ışıq-cərəyan” çeviricilərini göstərmək olar.

- ✓ **optoelektron integral sxemlər** integral mikrosxemlər olub, optik düyünlər ilə komponentlər arasında optik əlaqə yaradır.

Nanotexnoloji nailiyyətlərdən istifadə edən ən geniş yayılmış qurğulardan biri də **p-n** keçidi əsasında işləyən diodlar və lazerlərdir. Bu qurğuların hazırlanması **p-n** keçidləri əsasında koherent və qeyri-koherent (koherent olmayan) şüalanma mənbələrinin yaradılması ilə bağlıdır.

Bilirik ki, koherent dalğalar (latınca *coharent* - əlaqədə olmaq deməkdir) işıq dalğalarının qərarlaşmış rəqslərinə deyilir. Tezlikləri və dalğa uzunluqları eyni olan işıq dalğaları koherentdir.

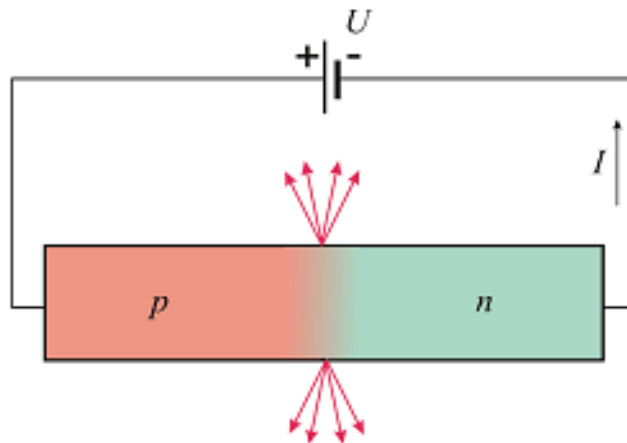
İşıq diodlarını qeyri-koherent, lazerləri isə koherent işıq mənbələrinə misal göstərmək olar.

### İşıq diodları

Homogen (eyni materialdan ibarət) **p-n** keçidinin, yəni homokeçidlər əsasında yaradılmış işıq diodlarının iş prinsipini nəzərdən keçirək.

Qeyd etdiyimiz kimi, p-n keçidi o zaman homokeçid olur ki, burada p- və n- oblastları eyni materialdan ibarət olsunlar. p- və n- oblastları müxtəlif materialdan olduqda isə, belə keçid heterokeçid adlanır.

İşıq dalğaları, cərəyan yalnız düz istiqamətdə axdıqda şüalanırlar. Bu halda elektronlar n-oblastından, deşiklər isə p-oblastından p-n keçid oblastına düşürlər.



Homokeçid əsaslı y/keç. işıqburaxan diodun quruluş sxemi

Məlumdur ki, hərəkətdə olan elektronun enerjisi kimyəvi rabitədə olan elektronun enerjisindən çox olduğu üçün, elektron və deşik toqquşduqda işıq kvantı şəklində enerji ayrılır (bax şəklə). Aydınır ki, parlaqlıq dərəcəsi işıq diodundan axan cərəyanla mütənasibdir.

İlk yaşıl işıq diodları fosfid qalliumdan GaP, göy işıq diodları isə silisium karbiddən SiC düzəldilmişdir. Lakin bu materiallar aşağı intensivlikli şüalar buraxdıqları və tez qızdıqları üçün, onlardan praktikada istifadə edilməsini çətinləşdirirdi. Mendeleev cədvəlinin III qrup elementlərindən nitridlərin xassələrinin tədqiqi göstərdi ki, bunlar işıq diodları üçün ən perspektivli materiallar ola bilərlər. Çünki onlar spektrin bütün görünən oblastında və ultrabənövşəyi oblastda (240 nm-dən 621 nm-ə kimi) şüalanmaq qabiliyyətinə malikdirlər. XX

əsrin 70-ci illərində IBM kompaniyasının bir qrup əməkdaşı tərəfindən GaN epitaksial layları əsasında bənövşəyi və mavi diodlar yaradılır. Lakin bu diodlar da tez qızdıqları üçün, onlardan da praktikada istifadə etmək qeyri-mümkün oldu. Nanotexnologiyaların inkişafı ilə epitaksiya prosesinin təkmilləşdirilməsi hesabına digər materialardan ibarət altlıq üzərində 20-100 nm qalınlıqlı layların yaradılması, yeni nəsil diodların yaradılmasına geniş imkanlar açdı. Bu cür quruluşlar sonralar heteroquruluşlar adlandırıldı. 1989-cu ildə Ş.Nakamura ilk dəfə olaraq GaN əsaslı heteroquruluş alır. Məhz bundan sonra GaInN-GaAlN heteroquruluşlu işıq diodları yaradılır.

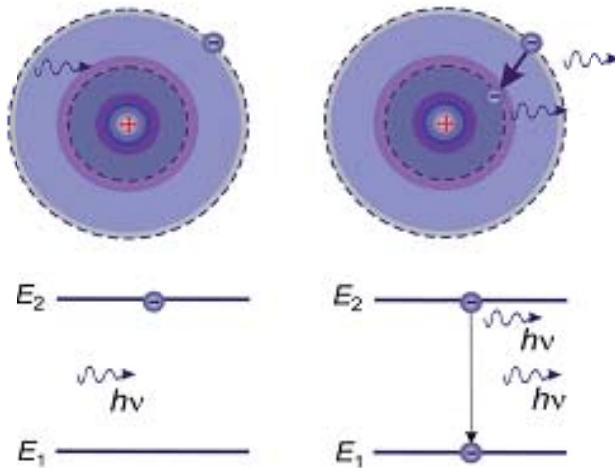
Homokeçiddən fərqli olaraq, heteroquruluşun p- və n-oblastını möhkəm lehimləmək olur. ***Lehimləmə - yarımkeçiriciyə, keçiriciliyin p və ya n tip olmasını müəyyən edən qarışıqın əlavə edilməsi deməkdir.*** Möhkəm lehimləmədə bu oblastların müqaviməti hiss olunacaq dərəcədə azalır. Ona görə də, homokeçiddən fərqli olaraq, cərəyan axanda daha az istilik ayrılır və işıq diodu qızdır. Bundan başqa, bu işıq diodlarında elektron və deşiklərin konsentrasiyası da çox olduğu üçün, onların parlaqlığı da daha çox olur.

### Lazerlər

Koherent işıq mənbələrinə misal olaraq lazerləri göstərmək olar. Lazer ingiliscə ***Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*** sözlərinin baş hərfləri olub, hərfi tərcümədə məcburi şüalanma ilə işığın gücləndirilməsi deməkdir, yəni məcburi şüalanmadan istifadə edərək koherent işıq seli yaradan qurğuya lazer deyilir. Lazerlər qararlaşmış dalğalar şüalandırır (eyni tezlikli, eyni dalğa uzunluqlu). Yarımkeçirici lazer ən kompakt, ekonomik hesab olunur. Məhz bu səbəbdən ondan CD- və ya DVD-pleyerlərdə, lazer printerlərdə, və həmçinin, kompüterlərdə istifadə olunur. Telefon, internet, optik, və ya digər kabel rabitələri yarımkeçirici lazerlər hesabına sıçrayışla inkişaf etmişdir. Son 40 il ərzində yarımkeçirici lazerlər müxtəlif inkişaf mərhələlərindən keçərək, geniş tətbiq sahəsinə malik olmuşlar.

Yarımkeçirici lazerlərin iş prinsipinin fiziki əsasını induksiyanmış şüalanma təşkil edir. Bu hadisənin qısa şərhə belədir: Bilirik ki, atom bir haldan digərinə keçdikdə yaranan şüalanma spontan şüalanma adlanır. Müxtəlif atomların spontan şüalanması qeyri-koherent baş verir, çünki hər bir atomda baş verən şüalanma bir-birindən asılı olmadan başlayıb-qurtarır.

1916-cı ildə A.Eynşteyn demişdir ki, elektronun üst enerji səviyyəsindən aşağı enerji səviyyəsinə foton şüalanması ilə keçməsi, tezliyi məxsusi keçid tezliyinə bərabər xarici elektromaqnit sahəsinin təsiri ilə baş verir. Məhz bu cür şüalanma məcburi, və ya induksiyanmış şüalanma adlanır. Bu zaman həyəcanlanmış atomun fotonla qarşılıqlı təsiri nəticəsində enerji və hərəkət istiqaməti eyni olan foton-əkilər yaranır.



**Məcburi şüalanmanın  
sxematik təsviri:  
 $E_2$  - həyəcanlanmış  
elektronun enerjisi,  
 $E_1$  - həyəcanlanmamış  
elektronun enerjisidir və  
 $E_2 - E_1 = h\nu$**

Heteroquruluş əsaslı yarımkəçirici lazerin iş prinsipini nəzərdən keçirək: p-n keçidindən düz istiqamətdə cərəyan buraxıldıqda iki bir-birinə rəqib proses gedir. Bir tərəfdən elektron və dəşik p-n heterokeçidə düşdükdə işıq kvantı şüalanır, digər tərəfdən isə həyəcanlanmamış elektronlar işıq kvantlarını udaraq, şüalanma intensivliyini və şüalanma gücünü aşağı salır. Cərəyanı artırmaqla şüalanma prosesi udulma prosesinə güc gəlir (yəni onu üstələyir) və nəticədə **invers məskunluq** halı yaranır.

***Yükdaşıyıcıların – elektronların yarısından çoxu həyəcanlanmış səviyyədə olan hala invers məskunluq halı deyilir.***

Bu halda fotonların qarşısına çıxan elektronların əksəriyyəti həyəcanlanmış olur. Ona görə də fotonların induksiyanmış şüalanma halı, udulma ilə müqayisədə, daha çox baş verir.

İşığın invers məskunluq səviyyəli mühitlərdən keçərək güclənməsinin təcrübi kəşfi 1951-ci ildə rus fizikləri V.A.Fabrikant, M.M.Vudinski və F.A.Butayev tərəfindən edilmişdir.

Tədqiqatlar nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, heteroquruluşlar əsaslı lazerlərdən istifadə edilməsi cərəyanın azalmasına, yəni minimal qiymət almasına səbəb olur. Heterokeçidlərdən istifadə etməklə minimal cərəyanın və aktiv oblastın ölçülərinin azalmasını isə ilk dəfə J.İ.Alferov kəşf etmiş və ilk heterolazer yaratmışdır. Bu cür quruluşda “artıq”(əlavə) yükdaşıyıcılar hər iki tərəfdən potensial çəpərlərlə (GaN) məhdudlaşdırılan aktiv oblastın (InGaN kvant çuxurlarının) daxilində cəmlənmiş olur ki, bu da onların ətraf oblastlarda yayılmasının qarşısını alır.