



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ
ДЕПАРТМАН ЗА МАТЕМАТИКУ И
ИНФОРМАТИКУ



ФОТОПРОВОДЉИВОСТ

-семинарски рад-

Ментор:

проф. др Светлана Лукић-Петровић

Студент:

Катарина Лолић

Нови Сад,

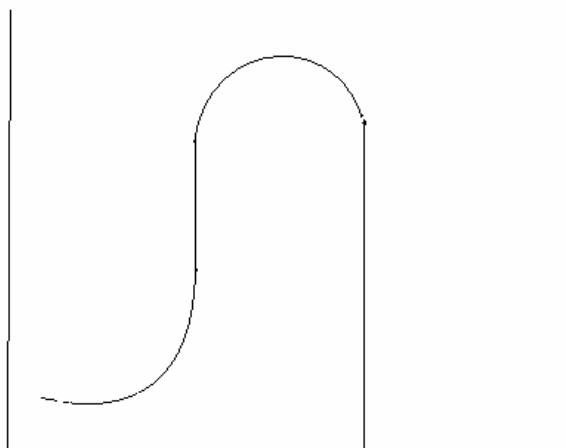
мај 2010.

УВОД

Најопштије говорећи, под *фотопроводљивошћу* се подразумевају промене проводних особина под дејством електромагнетног зрачења. Или, можемо рећи да фотопроводљивост представља повећање електричне проводности једног изолаторског кристала, проузроковано озрачавањем кристала. Већи део пионирског рада у овој области, извршили су Гуден, Пол и Роуз. Фотопроводни ефекат налази практичну примену код телевизијских камера, ИС детектора, светломера и, индиректно, код фотографског процеса.

ТИПОВИ ФОТОПРОВОДЉИВОСТИ

Са повећањем интензитета зрачења, експоненцијално расте број носилаца наелектрисања, те се на тај начин мења и проводљивост. Најчешће се оваква фотопроводност карактерише као *нормална*. Када се након неке достигнуте вредности струја сатурира и не расте са повећањем интензитета упадног зрачења, фотопроводљивост се назива *аномалном*. Ефекат повећања проводности под утицајем зрачења се назива *позитивном фотопроводношћу*. Код неких материјала се може запазити и ефекат смањивања проводности под утицајем електромагнетног зрачења. Ова појава се назива *негативна фотопроводљивост*. Облик зависности јачине електричне струје од таласне дужине упадне светлости код фотопроводника илустрован је на следећој слици (слика 1):



λ

Слика 1

Таласна дужина која одговара најмањој енергији потребној да се изазове екситација назива се црвеном границом. Елементи електронике који имају описане карактеристике називају се *фотоотпори*. Основни смисао њихове примене је да преко величине струје могу детектовати електромагнетно зрачење и карактерисати интензитет тог зрачења. Ово је од изузетне важности у спектроскопским мерењима. Најчешће се овај ефекат користи у серији каскадних појачавања што омогућује прецизно мерење и сасвим малих интензитета електромагнетних зрачења преко тзв. *фотомултипликатора*. По правилу се значајне струје код неког материјала постижу у релативно узаним интервалима таласних дужина. Зато је потребно имати више различитих детектора за разне области таласних дужина. Формирањем детектора са смешом материјала који имају осетљива подручја у разним областима таласних дужина, знатно се може проширити подручје детекције.

ФОТОПРОВОДЉИВОСТ

Непосредна последица осветљавања је повећање броја покретних носилаца наелектрисања у кристалу. Ако је енергија упадног фотона већа од енергијског процепа, тада ће сваки фотон – апсорбован у кристалу- произвести слободан пар електрон-шупљина. Фотон се апсорбује прелажењем једног електрона из валентне зоне у проводну зону. И шупљина у валентној зони и електрон у проводној зони могу допринети провођењу.

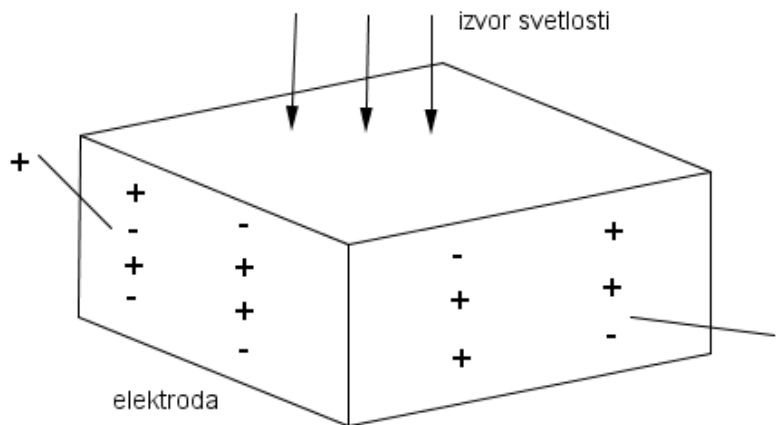
Шупљина и електрон ће се, евентуално, рекомбиновати један са другим, али они могу имати сасвим различите „историје“ пре рекомбиновања. Сваки од њих може провести различито дуго време локално захваћен клопком, нпр. код примеса и несавршености у кристалу. Ретко се дешава да шупљине и електрони дају упоредљиве доприносе фотопроводности датог узорка.

Концепција захватања клопкама је од централне важности за разумевање фотопроводног одзива кристала. Механизми атомских процеса, који се јављају код клопки, нису у свим случајевима сасвим познати; међутим, не можемо разјаснити експерименталне чињенице код фотопроводљивости а да се не позовемо на присуство клопки.

Ако је енергија упадног фотона испод прага за произвођење парова шупљина и електрона, фотон може бити у стању да изазове јонизацију донорских и акцепторских атома и да на овај начин произведе покретне електроне или шупљине- у сагласности са природом примесе.

МОДЕЛ ФОТОПРОВОДНИКА

Размотрићемо прво најједноставнији могући модел фотопрводника. Постоји неколико примера адекватности овог модела код стварних кристала, али како нема могућности да се установе услови примене на реалне кристале, проучићемо како да побољшамо овај модел. Овај модел претпоставља да су парови електрон – шушљина произведени униформно по целој запремини кристала путем озрачавања једним спољашњим извором светлости. Претпостављамо да се рекомбинација јавља услед директне анихилације електрона и шушљина. Претпостављамо, такође, да се електрони који напуштају кристал преко једне електроде замењују електронима који утичу кроз супротну электроду. Погодно је занемарити покретљивост шушљина у односу на покретљивост електрона. У многим фотопрводним супстанцијама, покретљивост шушљина може бити занемарена.



Слика 2

По овом моделу (слика 2) је брзина промене концентрације електрона n дата са

$$\frac{dn}{dt} = L - Anp = L - An^2 \quad (1),$$

користећи $n = p$. Овде је L број фотона апсорбованих по јединици запремине, у јединици времена. Члан Anp представља брзину директне рекомбинације и пропорционалан је производу концентрација шупљина и електрона. У стационарном стању је

$$\frac{dn}{dt} = 0,$$

тако да је стационарна концентрација електрона

$$n_0 = \left(\frac{L}{A}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2);$$

а одговарајућа проводност је

$$\sigma = n_0 q \mu = \left(\frac{L}{A}\right)^{\frac{1}{2}} q \mu \quad (3)$$

где је μ покретљивост електрона. Ова релација предвиђа да ће се, при датом напону, фотоструја мењати са L као $L^{0,5}$; стварни, запажени експоненти се крећу између 0,5 и 1,0, а и више.

Опадање концентрације носилаца, када се светлост нагло „искључи“, описано је са

$$\frac{dn}{dt} = -An^2 \quad (4),$$

која има решење

$$n = \frac{n_0}{1 + At n_0} \quad (5),$$

где је n_0 концентрација у $t = 0$, када је светлост угашена. Концентрација носилаца опадне на $0,5n_0$ за време

$$t_0 = \frac{1}{An_0} = (LA)^{-1/2} = n_0/L \quad (6).$$

Тако, елементарна теорија, предвиђа да време одзива t_0 треба да буде директно пропорционално фотопроводљивости при датој јачини светлости: осетљиви фотопроводници треба да имају велико време одзива. Предвиђено повезивање ових својстава се ретко потпуно остварује у пракси.

Дефинисаћемо осетљивост, или фактор приноса, G као однос броја носилаца који пролазе кроз узорак према броју фотона апсорбованих у узорку. Ако је дебљина узорка d а површина попречног пресека једнака јединици, тада потенцијал V производи флукс честица

$$I_N = \frac{n_0 q V}{d} = \frac{V_R}{(AL)^{\frac{1}{2}} d^2} (Ld) \quad (7)$$

што се добија коришћењем (2). Осетљивост

$$G = \frac{I_N}{Ld}$$

или

$$G = \frac{V_R}{(AL)^{\frac{1}{2}} d^2} \quad (8).$$

Време прелаза T_d носилаца - између електрода- је дато са

$$T_d = \frac{d}{v_R/d} = \frac{d^2}{v_R} \quad (9).$$

Време живота T_e електрона, пре него што се рекомбинује, је дато са t_0 у (6):

$$T_e = (LA)^{-\frac{1}{2}} \quad (10).$$

Фактор приноса (8) може бити изражен као

$$G = T_e/T_d \quad (11),$$

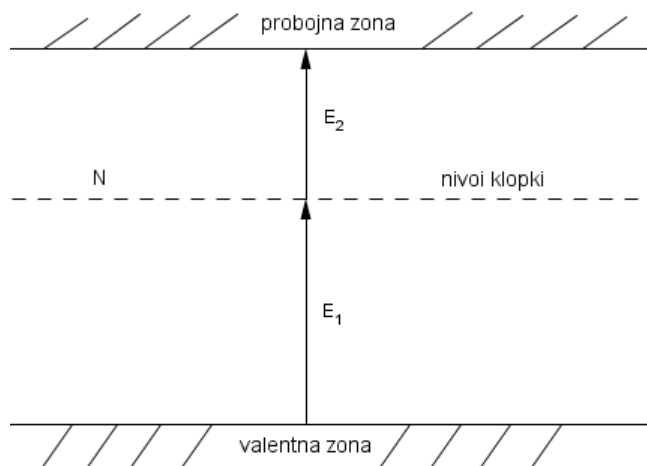
то јест, фактор приноса је једнак односу времена живота носилаца према времену прелаза носилаца између електрода. Овај израз за фактор приноса је сасвим генералан и није ограничен на посебан, овде размотрени метод. Међутим, ако се време живота T_e узме као да је једнако измереном времену одзива, онда су фактори приноса израчунати на основу (11) много већи од експериментално одређених - у неким случајевима за 10^8 пута. Неки нови механизам мора бити

придодат нашој представи процеса фотопровођења. За овај пропуштени механизам су одговорне клопке.

КЛОПКЕ

Клопка је атом или несавршеност у кристалу, способан да захвати електрон или шупљину. Захваћен носилац може бити поново емитован у неком каснијем тренутку. Погодно је размотрити моделе код којих су, у било ком тренутку, све шупљине захваћене клопкама, а да је од електрона, који су номинално у проводној зони, клопкама захваћен један део. Размотрићемо само врло просте моделе.

Постоје две врсте клопки, које се разликују по деловању. Једна врста делује, углавном, као рекомбинациони центри, који помажу електронима и шупљинама да се рекомбинују, па према томе учествују у успостављању топлотне равнотеже. Друга врста клопки углавном утиче на слободу кретања носилаца наелектрисања једог знака. Ова последња врста клопки је она коју ћемо размотрити.



Слика 3: модел за фотопроводност у присуству електронских клопки концентрације N

Размотрићемо прво један кристал са N нивоа електронских клопки по јединици запремине. Претпостављамо да је температура довољно ниска, у односу на одговарајуће јонизационе енергије, тако да концентрација топлотно побуђених носилаца може бити занемарена. Ради једноставности, усвојимо да је рекомбинациони коефицијент A исти за рекомбинацију електрон-шупљина као за захват електрон-клопка. Тада је

$$\frac{dn}{dt} = L - A(n + N) \quad (12)$$

где је n концентрација електрона у проводној зони. У (12) смо изоставили утицај топлотне јонизације носилаца из клопки-натраг у проводну зону. У стационарном стању је

$$n_0(n_0 + N) = \frac{L}{A} \quad (13).$$

Постоје два гранична случаја која треба размотрити. Тешко је добити кристале са концентрацијом клопки N много мањим од 10^{14} cm^{-3} . При малим интензитетима струја, концентрација носилаца n_0 може бити много мања од ове — нпр свега 10^8 или 10^{10} cm^{-3} . У граничном случају $n_0 \ll N$, имамо резултат

$$n_0 = L/A N \quad (14),$$

уместо израза (2). Фотоструја је сада директно пропорционална јачини светлости L . При великим јачинама светлости, са $n_0 \gg N$, „одзив“ је дат са

$$n_0 = (LA)^{1/2},$$

баш као што је раније утврђено при одсуству клопки. Експериментални резултати показују управо такву промену у одзиву на јачину светлости.

Опадање концентрације, после прекидања осветљавања, је дато решењем једначине (12), уз $L = 0$:

$$\log \frac{n+N}{n} - \log \frac{n_0+N}{n_0} = NA t \quad (15).$$

Ако је $N \gg n$, ово решење се своди на

$$n = n_0 \exp(-NA t),$$

па је тако време потребно да концентрација опадне на e^{-1} од своје почетне вредности једнако

$$t_0 = 1/NA \quad (16),$$

наспрот ранијем резултату (6)-у одсуству клопки. Присуство клопки редукује проводност и време одзива.

Овај модел се може побољшати узимањем у обзир јонизације захваћених носилаца, па се добија- као што је и запажено- време одзива много дуже времена живота носилаца.

УТИЦАЈ ПРОСТОРНОГ НАЕЛЕКТРИСАЊА

Када осветљивање није униформно по целом кристалу или када електроде не могу слободно доводити, односно одводити, носиоце наелектрисања у кристалу- успоставља се просторно наелектрисање, које може унеколико смањити фотострују. Претпоставимо да је на једну кристалну плочу, дебљине 1cm , преко електрода које нису у контакту са кристалом примењено 300V . Ово електрично поље је еквивалентно ономе које производи око $2 \cdot 10^8$ носилаца/ cm^2 , „одвучених“ на супротне површи ове плоче.

Пошто се наелектрисања накупе на површима кристала, струја ће престати да тече: електрично поље површинског наелектрисања поништава поље примењено преко електрода. Струја и времена, потребни да се произведе ово површинско наелектрисање- нису велики. Поларизациони ефекти су главна препрека у мерењима фотопроводљивости; због тога се често користе импулсни методи. Кристални бројач, који користи импулсе носилаца, је корисно средство у испитивању покретљивости и захватања клопкама у кристалима.

КРИСТАЛНИ БРОЈАЧ

Кристални бројач детектује појединачне јонизујуће честице помоћу импулса носилаца наелектрисања, произведених при проласку честице кроз кристалну плочу. Први практични кристални бројач је детектовао бета-зраке, који су пролазили кроз кристал сребро хлорида.

Механизам „бројања“ је једноставан: носиоци наелектрисања, произведени јонизујућом честицом, крећу се под утицајем примењеног електричног поља све док не стигну до електрода или буду захваћени клопкама. Резултујуће померање наелектрисања, паралелно електричном пољу, индукује сразмерно наелектрисање на електродама. Овај „сигнал“ са електрода се појачава.

Садржај:

- Увод.....2
- Типови фотопроводљивости.....2
- Фотопроводљивост.....4
- Модел фотопроводника5
- Клопке.....8
- Утицај просторног наелектрисања.....10
- Кристални бројач.....11
- Литература.....13

Литература:

- „Екпериментална физика кондензоване материје“, Драгослав М. Петровић, Светлана Р. Лукић, „Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет“, Нови Сад, 2000.године;
- „Увод у физику чврстог стања“, Charles Kittel, „Савремена администрација-издавачко -штампарско предузеће“, Београд, 1970. године