**Температурно-електрична нестійкість (ТЕН) у напівпровідникових**

**монокристалах CdSb**

Нелінійність вольт-амперної характеристики (ВАХ) є характерною рисою не тільки багатьох напівпровідникових приладів, у яких є р-п-переходи, а й багатьох напівпровідників [1]. В останньому випадку, якщо виключити особливості, пов’язані з контактними явищами, вона частіше всього обумовлена ефектами сильних полів. Адже в сильних полях спостерігається залежність рухливості від величини поля аж до насичення швидкості, від'ємна диференціальна рухливість (ефект Ганна), ударна йонізація і пробій. Проте і в слабких електричних полях можливі прояви нелінійності ВАХ [2].

Значний інтерес мають дослідження нелінійних ВАХ не тільки в приладах, а й у матеріалах, оскільки вони мають як прикладне значення, так і дають можливість пояснити з фізичної точки зору причини прояву нелінійності. Крім того, на нелінійність ВАХ сильно впливають різноманітні зовнішні дії: магнітне поле, механічна деформація, освітлення, зміна температури та ін.

У матеріалах напівпровідників від’ємна диференціальна провідність обумовлює доменну електричну нестійкість N-типу [3] або ВАХ S-типу. Причиною нелінійності ВАХ можуть бути як польові ефекти [4], так і теплова дія струму [5]. Проте можливим є механізм термопольової йонізації домішкового центра, тобто комбінований тип термічної й польової йонізації [6]. Існують прямий і каскадний механізми термопольової йонізації з основного стану рівня через перший збуджений рівень у зону провідності. Залежність ймовірності йонізації домішкового центра в напівпровідникові від напруженості прикладеного електричного поля змінює його ВАХ так, що стають помітними відхилення від закону Ома.

Цікавим є механізм прояву S-подібності ВАХ у сильнолегованих і одночасно компенсованих напівпровідниках [7]. При низьких температурах і великих ступенях компенсації (вище 75 %) електрони перебувають в ізольованих краплях, і електро-провідність такого матеріалу дуже низька. Електричне поле “гріє” електронну підсистему і різко збільшує заселеність станів з великою рухливістю. Це і призводить до появи від’ємного диференціального опору. Таке явище аналогічне до теплового пробою. Але в цьому випадку нагрівається тільки електронна підсистема, а температура решітки залишається незмінною. Тому досліджуване явище можна назвати тепловим пробоєм електронних крапель. Якщо ж ступінь компенсації матеріалу менша 75 %, ВАХ не матиме S-подібного характеру, оскільки енергія активації виникає тільки при великих ступенях компенсації. Слід додати також, що в цьому випадку критичне електричне поле сильно збільшується з ростом ступеня компенсації.

Не тільки тепловий пробій або комбінована термопольова йонізація призводять до виникнення ділянок ВАХ з від’ємною диференціальною провідністю (ВДП). В електронному германії з домішками міді або золота спостерігається явище збільшення коефіцієнта захоплення гарячих носіїв на від’ємно заряджені домішкові центри. Це явище ефективно проявляється в умовах світлової генерації носіїв [3] і обумовлює ділянку ВАХ з ВДП.

Дискретні метастабільні стани (високоомний і низькоомний) спостерігаються як у моноатомних, так і складних напівпровідникових сполуках [8]. Під дією електричного поля стехіометричні ниткоподібні монокристали Sb2S3 перемикаються з високоомного у низькоомний стан. Експеримент доводить, що названий ефект викликаний зміною напівпровідникової провідності на металічну і пов’язаний з нагріванням кристала в момент дії електричного поля. Кристали зі стабільного низькоомного стану у високоомний стан повертаються під впливом сильного високочастотного або надвисокочастотного полів або нагрівання.

У складних напівпровідникових монокристалах селеніду цинку, сульфіду кадмію, селеніду кадмію та ін. в умовах ТЕН експериментально зафіксовані коливання струму [9, 10]. В області азотних температур в монокристалах селеніду кадмію отримано залежності періоду коливань від освітленості зразка, прикладеної напруги, температури зразка, а також температурні залежності амплітуди коливань. Коливання існують тільки в певній області температур і освітленостей. Їх причиною є виникнення осцилюючої в часі, але нерухомої області сильного електричного поля й підвищеної температури. Підвищення температури, звичайно, в середній частині кристала, в результаті джоулевого нагріву обумовлює ефект температурного гасіння фотопровідності. Якщо інтенсивність цього процесу достатньо велика, то у зразка виникає область сильного електричного поля. Тоді ВАХ такого зразка має ділянку з ВДП. У згаданій області електричне поле і температура періодично змінюються, викликаючи в колі коливання струму. Сама ж нестійкість обумовлена виникненням нерівноважного розподілу електронів внаслідок оптичної перезарядки рівнів із наступним спонтанним переходом у стан рівноваги.

Проте і в моноатомних напівпровідниках з глибокими рівнями також спостерігаються низькочастотні коливання струму в умовах ТЕН [11-13]. У сильно компенсованих зразках (р-Sі з домішками марганцю) динаміка ТЕН стає значно складнішою [14] аж до переходу до динамічного хаосу і автоколивної бістабільності. Перехід від регулярних автоколивань фотоструму до хаотичних здійснюється через ланцюжок біфуркацій подвоєння періоду коливань. Автоколивання струму, крім того, проявляють властивість гістерезису.

У сильнокомпенсованому напівпровідникові в умовах електронно-діркової плазми можливе збудження електричної нестійкості типу рекомбінаційних хвиль [15]. При сильних рівнях інжекції виникає суттєво відмінна від типу рекомбінаційних хвиль градієнтно-концентраційна нестійкість. Режим нестійкості типу рекомбінаційних хвиль є нічим іншим, як режимом хвиль просторової перезарядки глибоких рівнів [16], яка може бути обумовлена дією температури, освітлення чи електричного поля.

Від’ємний опір зразка сам по собі ще недостатній чинник для появи коливань. Однак коливання потрібних частот можуть виникати, якщо в кристалі є два різні типи центрів захоплення [17].

Завдяки огляду вищенаведених літературних даних, можна твердити, що необхідною умовою виникнення температурно-електричної нестійкості в напівпровідниках є наявність у їхній забороненій зоні глибоких енергетичних рівнів. Йонізація цих рівнів різними способами (освітленням, електричним полем, температурними змінами або комбінованим чином) дає можливість отримати S-подібну ВАХ напівпровідника і низькочастотні коливання струму як у низькопровідному, так і високопровідному станах. Тому, очевидно, будь-який зовнішній вплив на зміну положення енергетичного рівня в забороненій зоні повинен суттєвим чином відбитися на характері поведінки ВАХ. Hас цікавив вплив одновісних пружних деформацій (ОПД) на ВАХ монокристалів антимоніду кадмію.

Використані монокристали антимоніду кадмію з домішкою телуру, яка в забороненій зоні дає рівень Ес  - 0,12 еВ, досліджувались у трьох кріогенних середовищах (рідкий азот Т=77К, рідкий аргон Т=87К і рідкий кисень Т=90К) в умовах впливу освітлення і ОПД. На рис. 1 подано статичні ВАХ монокристалів СdSb з різним вмістом легуючої домішки телуру. Як видно, збільшення концентрації легуючої домішки обумовлює ріст напруги перемикання. Навпаки, підвищення температури середовища від Т=77 К до Т=90К різко зменшує напругу перемикання (рис.2).

Крім того, зафіксовано сильну залежність порогової напруги перемикання від інтенсивності світлового потоку. Зі збільшенням інтенсивності світлового потоку струм зростає, а напруга перемикання зменшується.

**Рис 2.** *Вольтамперні характеристики зразка CdSb + 0,05 % Тe в різних кріогенних рідинах: 1 – рідкому азоті Т = 77 К, 2 – рідкому аргоні Т = 87 К, 3 – рідкому кисні Т= 90 К*

**Рис 1.** *Залежність виду статичних ВАХ від концентрації домішки в монокристалах CdSb: 1- 0,5% Те; 2- 0,05% Те; 3- 0,005% Те*

Цікавою особливістю впливу світлового потоку на ВАХ є те, що у високоомному стані залежність фотоструму від інтенсивності освітлення має лінійний характер, а після стрибка струму – нелінійний. Висока фоточутливість зразків спостерігається в спектральній області довжин хвиль 1 – 3 мкм з максимумом при 2,04 мкм.

Ми досліджували вплив ОПД до тисків 1000 кгс/см2 на ВАХ антимоніду кадмію вздовж головних кристалографічних напрямків [а00], [0в0] і [00с] в області азотних температур.

Експерименти довели, що такі тиски в усіх вище названих випадках практично не впливають на параметри температурно-електричної нестійкості. Це означає, що така дія не змінює величини енергетичної щілини між рівнем Ес - 0,12 еВ і дном зони провідності монокристала СdSb. Тому цілком правомірно в даному випадку зробити висновок про надзвичайно сильний генетичний зв’язок названого енергетичного рівня із зоною провідності. Такому характерові реакції рівня на вплив ОПД сприяє також і той факт, що нижча ступінь симетрії орторомбічної решітки CdSb у порівнянні зі структурами кубічної сингонії дозволяє значно сильніше проявитися об’ємній компоненті деформації. А остання, яка завжди присутня при ОПД, однаково діє як на рух рівня, так і на рух зони. Іншими словами, об’ємна деформація менш ефективно впливає на зміну положення енергетичних рівнів у матеріалах, ніж ОПД [18].

Отже, в монокристалах CdSb з домішкою телуру на ефект перемикання із високоомного стану у низькоомний впливати одновісною пружною деформацією неможливо.

##### Література

1. *Зеегер К. Физика полупроводников. М.: Мир, 1977, 616 с.*
2. *Аитов Р.Д., Ржевкин К.С., Ткачев С.А. // ФТП, 1991, 25, в.5, с.904-907.*
3. *Курова И.А., Врана М., БерндтП. // ФТП, 1968, 2, в.12, с.1838-1841.*
4. *Врана М., Курова И.А. // ФТП, 1969, 3, в.12, с.1774 -1780.*
5. *Доскоч В.П., Панкевич З.В., Раренко И.М. и др. // Изв.вузов. Физика. 1989, в.4, с.108-109.*
6. *Чебан А.Г., Катана П.К. // ФТТ, 7, в.9, с.2735-2739.*
7. *Шкловский Б.И., Шур М.С., Ефрос А.Л. // ФТП, 1971, 5, в.10, с.1938.*
8. *Аудзионис А.И., Григас И.П., Карпус А.С. // ФТТ, 1970, 12, в.1, с.146.*
9. *Калашников С.Г., Падо Г.С., Пустовойт В.И. и др. // ФТП, 1969, 3, с.1028-1035.*
10. *Калашников С.Г., Пустовойт В.И., Падо Г.С. // ФТП, 1970, 4, в.7, с.1255-1261.*
11. *Бахадырханов М.К., Камилов Т.С. // ФТП, 1976, 10, в.4, с.760 -761.*
12. *Бахадырханов М.К., Закриллаев И.Ф. // ФТП, 1984, 18, в.12, с.2220-2221.*
13. *Бахадырханов М.К., Аскаров Ш.И., Нигманходжаев С.С. // ФТП, 1987, 21, в.7, с.1315-1317.*
14. *Голик Л.Л., Гутман М. М., Паксеев В.Е. и др. // ФТП, 1987, 21, в.8, с.1400-1403.*
15. *Карпова И.В., Сыровегин С.М. // ФТП, 1982, 16, в.9, с.1601-1605.*
16. *Чистохин А.В. // ФТП, 1992, 26, в.9, с.1529-1535.*
17. *Курова И.А., Калашников С.Г. // ФТТ, 1963, 5, в.11, с.3224-3230.*
18. *Бир Г.Л., Пикус Г.Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. – М.: Наука, 1972. – 584 с.*