Справка за основните научни приноси

на гл. ас. д-р Зелма Моис Леви

Завършила съм средното си образование в 33-та политехническа гимназия, гр. София през 1973 г. От 1973 до 1978 г. бях редовна студентка във Физическия факултет на Софийския университет „Св. Климент Охридски". Дипломирах се през 1978 г. с придобита квалификация физик със специализация физика на твърдото тяло. От 1978 до 1989 г. работих като физик в Завод за електронни преобразователни елементи, София. От 01.02.1989 г. работя в Института по физика на твърдото тяло. От 1989 до 1992 г. бях в лаборатория „Израстване на кристали", а от 1992 г. досега – в лаборатория „Фотоелектрични и оптични явления в широкозонни полупроводници". От 2003 г. съм главен асистент. От 2003 до 2006 г. бях зачислена като докторант на самостоятелна подготовка с научен консултант доц. д-р Диана Нешева. През 2006 г. защитих дисертация получаване на образователната и научна степен доктор на тема „Получаване и свойства на тънки слоеве, съдържащи нанокристален CdSe".

Участие във финансирани договори:

- Аморфни слоеве и многослойни структури, включващи халкогенидни материали с ниска размерност – **МОН**, 1995-1999 г.
- Дефектни състояния във фотопроводници с различна размерност - **МОН**, НСНИ, № Ф1306, 2003-2007 г.
- Оптоелектронни свойства на полупроводникови тънки слоеве за приложения като газови сензори", **NATO CLG проект 98065**, партньор University Abertay Dundee, Scotland, 2004-2006 г.

Участие в договори за обмяна на учени:

- Оптично и фотоелектрично характеризиране на тънки хомогенни и наноструктурирани слоеве на базата на ZnSe, Белград, Сърбия, 2010-2012 г.
- Наноструктурирани тънкослойни полупроводници за приложение като сензори и памети, Белград, Сърбия, 2007-2009 г.
- Раманово разсейване и фотолуминесценция от полупроводникови наночастици, Белград, Сърбия, 2004-2006.

Участие в конференции:

- Международна школа по физика на кондензираната материя (ISCMP), Варна, 1992 г., доклад **"**Investigations on the anisotropic photochromic effect in BSO:Mn crystals".
- Международна школа по физика на кондензираната материя (ISCMP), Варна, 1994 г.
- Международна школа по физика на кондензираната материя (ISCMP), Варна, 1996 г., доклад "Thin films of SiO_x doped with CdSe nanocrystals".

- Международна школа по физика на кондензираната материя (ISCMP), Варна, 2000 г., доклади:
  1. “Annealing-induced changes in the structure and distribution of CdSe nanocrystals in SiO_x thin films” и
  2. “CdSe nanocluster layers buried in amorphous GeS_2 thin films”.
- Международна школа по физика на кондензираната материя (ISCMP), Варна, 2004 г., доклад “Effects of thermal annealing and long-term ageing on electronic defects in CdSe thin films”.
- Международна школа по физика на кондензираната материя (ISCMP), Варна, 2006 г., доклади:
  1.“Influence of thermal annealing on the memory effect in MIS structures containing crystalline Si nanoparticles” и
  2.“Potential gas sensor applications of semiconductor thin films based on changes in photoresponse”.
- Международна школа по физика на кондензираната материя (ISCMP), Варна, 2008 г., доклад „Structural characterization and photoluminescence of ZnSe nanolayers“
- Международна школа по физика на кондензираната материя (ISCMP), 2010 г., доклад „Composition and structure of $Zn_xCd_{1-x}Se$ single layers prepared by thermal evaporation of ZnSe and CdSe“.
- Симпозиум “Nanoscience &Nanotechnology”, 2001 г., доклад “Silicon nanoparticle growth in thermal SiO_x thin films”.
- Европейски конгрес по електронна микроскопия EUREM 12, Бърно, 2000 г., доклад “CdSe nanoparticle layers buried in SiO_x thin films”
- Симпозиум “Nanoscience &Nanotechnology:Nanostructured materials application and innovation transfer”, 2003 г., доклад “Photobleaching in GeS_2 thin films doped with CdSe nanocrystals”.
- Симпозиум “Nanoscience &Nanotechnology”, 2006 г. доклад “Optical properties of ZnSe/SiO_x multilayers”.
- Конференция на MRS, 2008 г., доклад „Raman scattering from ZnSe nanolayers“
- Европейска школа по елипсометрия NANOELLI, 2009 г., доклад „Characterization of ZnSe nanolayers by spectroscopic ellipsometry“.
- Международна школа VEIT, 2007 г., доклад “MOS structures containing silicon nanoparticles for memory device applications”.
- Конференция NSTI Nanotech, 2007 г., доклад “MOS structures containing amorphous silicon nanoparticles for application in memory devices”.
- Международна конференция по микроелектроника (MIEL), 2008 г., доклад “Memory effect in MOS structures containing amorphous or crystalline silicon nanoparticles”.
- Балканска конференция по физика на кондензираната материя, Мугла, Турция, 2008 г., доклад “Transport of photoexcited charge carriers via metal-insulator-semiconductor structures containing Si nanoparticles”
- Балканска конференция по физика, 2009 г., доклад „Optical properties of $Zn_xCd_{1-x}Se$ single layers prepared by thermal vacuum evaporation”.

Основни научни резултати и приноси в публикациите

на гл. ас. д-р Зелма Моис Леви

I. Оксидни кристали

Посредством оптични, електрични и фотоелектрични измервания са изследвани уловки и рекомбинационни центрове в чисти и легирани кристали със структура на силенита $Bi_{12}MO_{20}$ (M=Si, Ti).

При кристали $Bi_{12}SiO_{20}$, легирани с желязо, е наблюдавано нарастване на тъмновата проводимост с 4 порядъка, което е съпроводено от намаляване на фотопроводимостта. Предложени са механизми на вграждане на желязото и е направено заключение, че от практична гледна точка най-интересно е легирането с ниска концентрация на желязо (0.36 mol%), при която кристалите са с ниска електрична проводимост и висока фотопроводимост [3]. С комбинирано измерване на оптично пропускане и отражение и с прилагане на метода на константния фототок са получени спектри на подзонно поглъщане на чисти и легирани кристали от $Bi_{12}MO_{20}$ [4,5]. Въз основа на получените резултати е предположено, че поглъщането в областта на „рамото" в кристалите $Bi_{12}SiO_{20}$ се дължи на дефект от вида [Bi^{3+}, разположен в Si^{4+} позиция], който е компенсиран с електрони и преди осветяване е отрицателно зареден. Направено е предположение и за начините на вграждане на легиращите примеси – Mn, V, Fe, Co и Ni. Наблюдавано е по-силно „подзонно" поглъщане при кристалите $Bi_{12}TiO_{20}$, което е свързано със споменатата по-голяма дефектност на тези кристали и е установено, че легирането с преходни метали намалява поглъщането, т.е. намалява плътността на собствените дефекти в тях [4].

За изследване на приложимостта на чисти и легирани кристали $Bi_{12}SiO_{20}$ за запис на холограми със светлина с дължина на вълната 633 nm са измерени спектри на оптично поглъщане и оптична активност. Показано е, че в легираните с Cr и Mn кристали могат да бъдат записани холограми с висока дифракционна ефективност (10-15%) [31]. Спектрите на поглъщане и зависимостта на пропускането от поляризацията показват наличие на оптична анизотропия при кристали $Bi_{12}SiO_{20}$, легирани с Mn, която е свързана с позициите в кристалната решетка, които Mn йони заемат [35].

Изследвано е влиянието на стехиометрията на кристалите върху параметрите на протонно-обменени вълноводи в $LiTaO_3$ [30]. Установена е зависимост на промяната на коефициента на пречупване от стехиометрията на кристала. При непротониран литиев танталат с намаляване съдържанието на литий ивиците в инфрачервените спектри на поглъщане се отместват към по-високи честоти, а полуширините им намаляват.

II. Аморфни и нанокристални тънки слоеве

Направено е сравнение на електричната проводимост на обемни стъкла и тънки слоеве от системата $Ge_xSb_{40-x}S_{60}$ [9]. На базата на електрични измервания е показано, че в стъклата проводимостта се определя от транспорт на токови носители в локализирани състояния в забранената зона, а в слоевете – от транспорт в нелокализирани състояния. Наблюдаваната особеност в зависимостите на параметрите от състава при средно координационно число 2.67 е свързана с настъпилия топологичен фазов преход.

Изследвани са тънки нанокристални слоеве от CdSe и ZnSe, получени с термично изпарение във вакуум по методите на стандартно или стъпково отлагане.

С измервания по методите на стационарния фототок, на преходния фототок и на термостимулираните токове са изследвани неотгрети, отгрети и съхранявани в продължение на 10 години слоеве от CdSe [19]. При отгретите и при остарелите слоеве се наблюдава намаляване на концентрацията на дефекти. Това е обяснено с по-подредената структура на тези слоеве в сравнение с неотгретите, потвърдено и от Рамановите спектри. Транспортът на токови носители е изследван посредством модулирана фотопроводимост. Резултатите показват широко експоненциално разпределение на локализирани състояния над нивото на Ферми с характеристична енергия ~ 45 meV [25]. Изследвана е възможността за използване на нанокристални слоеве от CdSe като газови сензори. Предложен е нов метод за повишаване на селективността на сензорите на базата на тънкослойни материали въз основа на измерване на модулирана фотопроводимост и оценяване на специфичната промяна в плътността на дефектните състояния, предизвикана от абсорбция на молекули от различен тип [23].

Изследвани са структурата и оптичните свойства на слоеве от ZnSe с дебелина <100 nm. Рамановото разсейване, елипсометричните данни и атомно-силовата микроскопия показват, че при тези дебелини слоевете са съставени от случайно ориентирани нанокристали и аморфна матрица [26, 27, 28]. С намаляване на дебелината на слоевете нараства количеството на аморфната фаза. Във фотолуминесцентните спектри на тези слоеве се наблюдават две ивици, свързани с излъчвателна рекомбинация през дефектни състояния, разположени в долната половина на забранената зона на нанокристалния ZnSe [28].

Разработена е оригинална техника за отлагане на слоеве от $Zn_xCd_{1-x}Se$ с различен състав. Съставът им е определен въз основа на данни от оптични измервания и EDS. Изследванията с атомно-силова микроскопия показват, че слоевете са нанокристални и размерът на НК е ≤20 nm [34, 44]. Според резултатите от рентгеновата дифракция слоевете имат кубична структура и не съдържат чиста фаза от CdSe или ZnSe, което се потвърждава от Рамановите изследвания. От Рамановите спектри и фотоелектричните измервания се вижда, че оптичната ширина на забранената зона на слоевете нараства с нарастването на x и достига стойност ~ 2.4 eV при x=0.8 [29].

III. Периодични аморфни многослойни структури

За изследване на зонната и подзонната абсорбция и промяната в интерфейсите след отгряване на аморфни многослойни структури (МС) от Se/CdSe е използван методът на константния фототок. Направено е заключение, че фотопроводимостта на подслоевете от CdSe намалява с намаляване на дебелината им и на скоростта, с която са отложени. Предположено е, че наблюдаваното „рамо” в спектъра на поглъщане е свързано с непреки преходи от валентната зона на Se към зоната на проводимост на CdSe [2]. При отгряване в определен температурен интервал за МС с дебелини на подслоевете под 5 nm е установено намаляване на неподредеността в подслоевете от CdSe и подобряване на качеството на интерфейсите [6].

IV. Аморфни-нанокристални многослойни структури и композитни слоеве

Въз основа на развитата техника за получаване на аморфни МС чрез вакуумно термично изпарение е разработена методика за получаване на аморфни-нанокристални многослойни структури и композитни слоеве (КС), съдържащи нанокристални слоеве

от CdSe (SiO_x/CdSe, GeS_2/CdSe, SiO_x/ZnSe, ZnSe/CdSe). Всеки от слоевете в МС се отлага стъпково, при което се наблюдава добра периодичност и гладкост на интерфейсите [1, 21]. При КС съотношението на дебелините на двата вида слоеве е 1:20, като слоевете с по-голяма дебелина (от матричния материал) се отлагат статично, а по-тънките – стъпково, както в МС [1, 7, 13, 36]. В резултат се формират самоорганизирани нанокристали (НК) от CdSe с размери 3-8 nm, вградени в матрица от SiO_x, GeS_2 или ZnSe. Изследванията с високоразделителна електронна микроскопия показват, че нанокристалите са със случайна ориентация, формата им е близка до сферична и размерното им разпределение е относително тясно. Те не са разпределени в целия обем, а образуват композитен подслой. Пространственото разположение на НК следва повърхностната морфология на слоевете от матричния материал. Предположено е, че зародишообразуването става на местата, където се наблюдава най-силна деформация на решетката на слоя от матричния материал. С подходящо термично третиране на КС е постигната промяна в структурата на НК и равномерно разпределение на НК от CdSe в матрица от SiO_x [1, 13, 20, 37, 38, 39].

Чрез оптични и фотоелектрични измервания, резонансно Раманово разсейване и модулационна спектроскопия е показано, че оптичната ширина на забранената зона на CdSe нараства с намаляване на дебелината на слоевете в МС и размера на НК в КС и нарастването е по-голямо при квазиизолираните НК в КС. Направено е заключение, че локализацията на зарядовите носители в нанокристалните CdSe слоеве на многослойните структури е едномерна (по оста на структурата), докато в нанокристалите в композитните слоеве тя е тримерна [1, 8, 13, 20, 41]. Резултатите от Рамановото разсейване при възбуждане с различни дължини на вълните и наличието на фина структура в спектрите на поглъщане на композитните слоеве от GeS_2/CdSe показват, че CdSe НК имат сферична форма, тясно размерно разпределение и много добра кристалност [17, 20]. Предложени са схематични зонни диаграми на многослойни структури от SiO_x/CdSe и GeS_2/CdSe [8, 20]. Изследвани са фотоструктурните промени в КС от GeS_2-CdSe. Установено е, че наличието на CdSe НК затруднява фотоструктурните промени в аморфната матрица от GeS_2, като ефектът е по-силен при нанокристалите с по-голям размер [20, 40].

Наблюдаваната във фотолуминесцентните спектри на МС основна ивица се отмества към по-високи енергии с намаляване на размера на CdSe нанокристали, което дава основание да бъде свързана с междузонна излъчвателна рекомбинация [8]. При КС няма такова отместване на ивицата и тя е свързана с рекомбинация през интерфейсни дефектни състояния [10, 11].

Изследван е транспортът на токови носители в МС и КС от SiO_x/CdSe в посока, успоредна на равнината на слоевете при приложено постоянно електрично поле. Предположено е, че и в двата вида структури транспортът на носители е по перколационни „пътеки” от контактуващи НК, поради което е повлиян в различна степен от височината на потенциалните бариери на границите между НК. Наблюдаваната монотонна промяна в активационната енергия е обяснена с влияние на технологични фактори върху височината на бариерите [12].

От проведените комбинирани измервания на термостимулирани токове и на преходен фототок е получена информация за плътността на дефектните състояния в забранената зона на нанокристалния CdSe в МС и КС. И по двата метода са наблюдавани три нива на дефекти. Първото, разположено на ~ 0.55 eV, е свързано с дефекти в обема на НК, второто – на 0.65–0.7 eV под „дъното” на зоната на проводимост – с дефекти на интерфейса между контактуващи CdSe НК. Предположено е, че намереното трето ниво, разположено на ~ 0.45 eV над върха на валентната зона, е свързано с дефекти на интерфейса SiO_x-CdSe и през тези дефекти се осъществява

излъчвателната рекомбинация, с която е свързана наблюдаваната в КС фотолуминесценция [11, 18]. При МС и КС от GeS_2/CdSe също са разграничени дефектни нива при ~ 0.55 eV и при ~ 0.50 eV под „дъното” на зоната на проводимост, което е приписано на дефект на интерфейса GeS_2-CdSe. Нивото при 0.65–0.7 eV не се наблюдава при структурите с този състав, което е обяснено с по-малка плътност на дефектите на интерфейсите между нанокристалите [20].

Изследването на МС и КС от ZnSe/CdSe с Раманово разсейване показа смесване на двата материала. То е по-силно изразено при КС и е свързано с лесното взаимно заместване на атомите на Zn и Cd и формиране на обща подрешетка на металните атоми. Дебелината на сплавения интерфейсен слой нараства след отгряване при T=300°C. Резултатите за НК с най-малки размери в КС дават основание да се направи заключение, че при подходящо термично третиране в матрица от ZnSe могат да бъдат получени НК от ZnCdSe [32]. Сплавяване е наблюдавано и в КС от GeS_2/CdSe след отгряване при T=300°C [38].

V. Композитни слоеве, съдържащи силициеви наночастици

Разработена е методика за изготвяне на стабилни във времето слоеве от SiO_x с желан състав ($1.1 \leq x \leq 1.7$). При подходящи условия на термично третиране в тези слоеве се израстват аморфни или кристални Si наночастици, съответно в матрица от SiO_x или SiO_2. Високоразделителната електронна микроскопия и Рамановото разсейване доказват формирането на наночастици в матрицата след отгряване. Наблюдавана е фотолуминесценция както от аморфни, така и от кристални Si наночастици. При Si наночастици с размер >2.5 nm тя е свързана с междузонна рекомбинация, а при тези с по-малък размер - с рекомбинация през дефектни състояния на интерфейса Si-SiO_2 (Si-SiO_x). Фотолуминесценцията от аморфните наночастици е по-интензивна в сравнение с тази от НК [15]. Изследвано е влиянието на атмосферата, в която е направено отгряването на слоеве от SiO_x. Установено е, че интензитетът на фотолуминесценцията в слоевете, отгрети в атмосфера на аргон, е много по-висок от този при отгретите във водород [16]. Изследвани са слоеве от SiO_x (x=1.15), отгрети при различни температури. Определени са средните диаметри на формираните аморфни и кристални наночастици, както и стойностите на фактора на запълване с наночастици. Показано е, че механизмът на транспорт на токови носители в слоевете е различен при различните температури на отгряване. В слоевете отгрети при 250°C, които не съдържат наночастици, доминират токове ограничени от пространствен заряд. В слоевете, отгрети при 700°C, включващи аморфни силициеви наночастици е предположен Пул-Френкел транспортен механизъм, а в отгретите при 1000°C се наблюдава тунелиране между силициевите НК [24].

Предложен е нов подход за изготвяне на метал-изолатор-силиций (МИС) структури, съдържащи аморфни или кристални Si наночастици. Волт-капацитивните хистерезисни криви показват, че формирането на наночастиците е от съществено значение за наблюдавания ефект на памет в тези структури. Доказано е, че ефектът на памет се дължи на залавяне на заряди в силициевите наночастици. Установено е, че при МИС структурите, съдържащи аморфни наночастици, времето на задържане на заловения заряд е много по-дълго и концентрацията на дефекти на интерфейса подложка/диелектрик е по-ниска.

На базата на тези резултати е защитен български патент за изготвяне на метал-изолатор-силиций (МИС) структури от типа Al/c-Si/на(нк)-Si-SiO_2/SiO_x/Al, подходящи за електронни памети, в които върху подложката от кристален Si (c-Si) не е отложен

стандартно отлаганият от другите изследователи тунелен слой от SiO_2. Тунелният слой се формира по време на отгряване на структурите, едновременно с израстването на силициевите наночастици. За израстване на аморфни наночастици структурите се отгряват при 700°C в аргон, а за израстване на кристални наночастици – при 1000°C в азот. С този подход се намалява броят на процесите, необходими за изготвяне на структурата, както и енергоемкостта. Показано е, че в структурите, отгрети при 700°C, интерфейсът c-Si/диелектричен слой е по-добър, отколкото в структурите, отгрети при 1000°C. В съдържащите аморфни наночастици структури 60% от носителите на заряд се съхраняват за повече от четири денонощия, а в структурите със силициеви НК 50% от носителите съхраняват за повече от едно денонощие. Тези резултати дават основание структурите, съдържащи аморфни наночастици да бъдат предпочитани за изготвяне на постоянни памети [22, 33, 42, 43, 45].