

АВТОРСКА СПРАВКА
за научни приноси
на доц. дфн Албена Паскалева Дончева

Творческа биография

Образование и научни степени

- Доктор на науките: 2015 г., ИФТТ, БАН
- Доктор: 1999 г., тема: “Влияние на плазмени процеси и бързо термично отгряване във вакуум върху свойствата на тънкослойни Si-SiO₂ структури.”, ИФТТ, БАН
- Висше: 1986-1991г., СУ “Климент Охридски”, Физически Факултет, специалност “Физика на твърдото тяло” (успех от дипломата 5.83).
- Средно: 1986 г., ОМГ “Акад. Кирил Попов”, гр. Пловдив

Работа

- март 2016 – до сега – Заместник-директор ИФТТ
- ноември 2013 – до сега - ръководител Направление "Микро- и акусто-електроника", ИФТТ, БАН
- октомври 2010 - до сега – ръководител лаб. “Физически проблеми на микроелектрониката”, ИФТТ, БАН
- ноември 2005 – до сега – доцент към лаб. “Физически проблеми на микроелектрониката”, ИФТТ, БАН;
- октомври 1993 – ноември 2005– последователно н.с. III, II, I ст. към лаб. “Физически проблеми на микроелектрониката”, ИФТТ, БАН;
- юни 1991 – октомври 1993 – физик в лаб. “Физически проблеми на микроелектрониката”, ИФТТ, БАН;
- декември 1987 – юни 1991 – студент, работа по договор към лаб. “Физически проблеми на микроелектрониката”, ИФТТ, БАН;

Специализации и работа в чужди научни организации

- март 2002 - март 2003, Хумболтова специализация, Университет Ерланген-Нюрнберг, гр. Ерланген, Германия.
- 2003-2013 – регулярни визити за работа по съвместни проекти във Фраунхоферов Институт по Интегрални Схеми и Технологии, гр. Ерланген, Германия.
- май - август 2010, Хумболтова специализация, Университет Ерланген-Нюрнберг, гр. Ерланген, Германия.
- 2012-2013 – 3 мес., Институт по електронно инженерство, Словашка Академия на Науките, Братислава.

Конференции

Участник в над 40 конференции в страната и чужбина с устни или постерни доклади, (6 от които поканени).

Проекти

- Ръководител на договор МУ-Ф2: “Кинетика на захват и пространствено

разпределение на обемни уловки в тънък SiO₂, генерирани от плазмени процеси за VLSI и ULSI приложения” с Националния фонд за научни изследвания към МОН.

- Ръководител на договор ДТК02-50: “Явления на захват и тяхното влияние върху дълго-времевата надеждност на наноразмерни структури метален електрод/high-k диелектрик”, 2010-2013 с Националния фонд за научни изследвания към МОН.
- Участник в редица договори (около 10) с Националния фонд за научни изследвания към МОН;
- Ръководител и участник в договори по ЕБР с научни организации от Словакия, Сърбия, Македония

Отличия и награди

- 1986 г. – трета награда от Първа балканска олимпиада по физика за средношколци.
- 1999 г. – участие в колектива на договор по тема: “Тънки слоеве от Ta₂O₅ като активен диелектрик за субмикронната електроника” (ръководител ст.н.с. дфн Е.Атанасова), награден с Първа награда в рамките на Пета конкурсна сесия на Национален съвет “Научни изследвания”.
- 2000 г. – награда на БАН “Марин Дринов” за млади учени.
- 2004 г. – 24th International Conference on Microelectronics, MIEL 2004, Nish, Serbia, награда за най-добра работа от името на списание Microelectronics Reliability.
- 2012 г. – 28th International Conference on Microelectronics, MIEL 2012, Nish, Serbia, награда за най-добра работа от името на списание Microelectronics Reliability.
- 2016 г. – награда за най-добър постер INERA Conference “Vapor Phase Technologies for Metal Oxide and Carbon Nanostructures” July 2016, Velingrad

Други

- Член на Редакционната колегия на списание “Materials Science in Semiconductor Processing”; Elsevier
- Guest Editor of Special Issue “Advanced oxides for Electronics”, “Materials Science in Semiconductor Processing”, 16(5) (2013)
- рецензент към списания J. Phys D: Appl. Phys., Semicond. Sci. Technol., Mater. Sci. Semicond. Proc., J. Appl. Physics, Appl. Surf. Sci., Thin Solid Films, Microelectr. Reliab., etc.
- рецензент към Европейската Комисия

ОПИСАНИЕ НА НАУЧНИТЕ ПРИНОСИ, СЪДЪРЖАЩИ СЕ В ПУБЛИКУВАНИТЕ ТРУДОВЕ

Общият списък на научните публикации, в които съм автор или съавтор включва 2 автореферата, общо 125 работи в списания, глави от книги и доклади, публикувани в пълен текст в сборници на конференции. Имам участие в над 40 научни конференции. Наукометричните показатели на публикациите са: над 900 цитирания, h-индекс 16; i(10) = 26.

В конкурса участвам с 2 автореферата, 74 публикации, (от които 3 глави от книги, 64 статии с IF) и 21 доклада, публикувани в пълен текст в сборници на конференции.

Наукометричните показатели на представените работи са: 810 цитирания, h-индекс – 15.

Изследванията са в областта на диелектрици и технологии за микро- и наноелектронни приложения и са извършени в периода 1991-2016 г. Този период беше белязан от замяната на стандартно използвания SiO_2 с диелектрици с по-висока диелектрична константа (т.нар. high-k диелектрици), наложена от непрекъснатото намаляване геометричните размери на микроелектронните елементи и увеличаваща се плътност на интеграция, следваща закона на Мур. Изследванията са изцяло мотивирани от този преход и предизвикателствата, свързани с успешното интегриране в силициевата технология на тези нови диелектрици. Накратко това са проблеми, касаещи оптимизиране на технологичния процес за отлагане на диелектрика, включително установяване на отгряващи процеси за подобряване неговите структурни и електрически свойства, както и подходи за подобряване интерфейса high-k диелектрик/Si; идентифициране на най-подходящите диелектрици за дадена технологична генерация и микро-(нано-)електронно приложение (динамични паметни; микропроцесори, както за персонални компютри, така и за мобилни устройства; енергонезависими паметни и пр.), тъй като различните приложения поставят различни изисквания към свойствата и електрическото поведение на high-k диелектриците; замяна на стандартно използваните poly-Si гейтови електроди с метални електроди и интегрирането им със съответния high-k диелектрик. Един от основните фокуси на изследванията е свързан с изясняване природата на електрически активните дефекти и тяхното влияние върху механизмите на захват, токове на утечка, деградация и надеждност на наноразмерни микроелектронни структури с активен слой от high-k диелектрик.

Научните приноси от тези изследвания може да бъдат разделени в следните групи:

1. Изследване на електрически активни дефекти в тънкослойни структури Si-SiO₂, генерирани след въздействието на актуални технологични процеси и високо-полеви стрес

Тази група включва работите [A1-A8, B1-B4], върху които е защитена дисертация за степен „доктор”, както и няколко последващи изследвания [A9-A12, A21, B5]. В тях са изследвани електрически активни дефекти, създадени от актуални технологични процеси (няколко вида плазмени процеси [A2; A5; A7-A12; A21; B4; B5]; бързо термично отгряване [A3, A4, A6, B1-B3]), както и външни въздействия (гама радиация [A1], високо полеви стрес [A11]) и тяхното влияние върху електрическото поведение на структури Si-SiO₂. Сравнителния анализ на въздействието на “мека”, “твърда” (реактивно йонно ецване, RIE) и нехомогенна (магнитно подпомогнато реактивно йонно ецване, MERIE) плазма върху структури Si - SiO₂ показва, че: типът, количеството, пространственото и енергетично положение на електрически активните дефекти, както и влиянието им върху механизмите на проводимост, токовете на утечка, полето на пробив и транспортните свойства на електроните в инверсия канал, зависят силно от плазмените условия и технологичната предистория на окисния слой, като ефектът на плазмата е доминиращ. Резултатите еднозначно показват, че обяснение на тези зависимости трябва да се търси главно в относителния принос на отделните плазмени компоненти за всеки конкретен плазмен процес. Наложеният от непрекъснатия процес на намаляване геометричните размери на електронните елементи преход меки – твърди - нехомогенни плазмени технологии допълнително усложнява

проблемите с плазмено генерираните дефекти. Направено е сравнение между дефекти, генерирани от N_2 RIE плазма и такива, създадени от високо полеви стрес и е получено, че и двата вида стрес създават нехомогенно разпределен по дебелината на SiO_2 положителен заряд под формата на обемни уловки и бавни състояния.

2. Изследване структурните и електрически свойства на тънки диелектрични слоеве на основата на Ta_2O_5 , като алтернатива на SiO_2 за приложение в свръхплътни динамични паметни (DRAM).

Извършени са комплексни и систематични изследвания на диелектричните, електрически и структурни свойства на МОС структури с high-k диелектрични слоеве на основата на Ta_2O_5 . Изследванията са свързани с: оптимизиране на технологии за отлагане на Ta_2O_5 (най-перспективен за приложения в динамични паметни), смесени окиси на основата на Ta_2O_5 ; изясняване ефекта на различни метални електроди върху електрическото поведение на помнещи кондензатори с активен high-k диелектрик; състав и структура на слоевете по дълбочина, ефект на интерфейсите при Si и при металния електрод; механизми на проводимост и дълговременна надеждност [A13-A18; A23; A27; A28; A33-A35; A37, A38, A40; A42-A45; A48-A50; A52; A54; A55; A57; A59-A62; A64; B6; B8; B11; B13-B20].

Идентифицирани са вида, структурната природа, енергетичното и пространствено разпределение на уловките, които регулират проводимостта, както и електрически активните дефекти, които причиняват деградация и са прекурсори на диелектричния пробив, в зависимост от нитрирането на Si повърхност [A23; A27; A33; A40; A42; A61, B8, B15], металния електрод (Al, W, TiN, Au, Ru) [A28; A37; A43-A45; A48; A55; A57; A60; B18] и легиране с метални елементи (Ti, Hf) [A45; A49; A50; A54; A57; A59; A62; A64; B14; B16; B19; B20]. Установени са отгряващи процеси, които ефективно намаляват плътностите на различни електрически активни дефекти и подобряват електрическото поведение на МОС структури с Ta_2O_5 диелектричен слой [A15; A23; A35; B6; B8; B13]. Структури с Ru(RuO_2) електрод и диелектрик на основата на Ta_2O_5 удовлетворяват изискванията на International Technology Roadmap for Semiconductors и имат по-добри свойства от гл.т. токове на утечка и стабилен интерфейс в сравнение с други high-k диелектрици в комбинация с Ru(RuO_2) електрод [A55; A57]. Повърхностно легиране с Ti, слоеве Ta_2O_5 , отложени върху нитридирана Si повърхност са най-стабилни под действие на електрически стрес [A49; B14; B20]. Резултатите са обобщени и в няколко поканени обзорни статии и две глави от книги [A16; A34; A37; A38; A50; A62; B11; B19]. Представените резултати са важни за изясняване механизмите на проводимост и електрическа деградация в МОС структури с high-k диелектрик на основата на Ta_2O_5 , подходящи за производството на помнещи кондензатори във високо-плътни динамични паметни. Голяма част от резултатите са приоритетни – изследванията в тази област стартираха под ръководството на проф. дфн Елена Атанасова още около 1994 г., когато проблемът с миниатюризацията на схемите и евентуалните фундаментални физически ограничения на SiO_2 не беше така остър и само се очертаваше за в бъдеще. Тези изследвания са известни на специалистите в областта, което се отразява и в големия брой цитирания.

3. Изследване на тънки high-k диелектрични слоеве (Zr-силикат, HfTi-силикат, Hf-силикат) като алтернатива на SiO_2 в логически приложения.

Извършени са комплексни електрически изследвания на слоеве Zr- и Hf-силикат (най-атраktivните high-k диелектрици за MOSFET) и са съставени зонните диаграми на

съответните структури метал/диелектрик/Si. Показано е, че: Zr- и Hf-силикат са термически стабилни в контакт със Si; индуцираният от електрически стрес ток на утечки (SILC), захватът на електрически носители и надеждността на тези слоеве, зависят силно от поляритета на приложения електрически стрес; и в двата типа силикати се захващат предимно електрони. Енергетичното положение на уловките е различно в двата вида диелектрици и играе съществена роля в процесите на захват в слоевете, както и определя времевата скала на обмен на електрони със Si [A19, A20, A22, A26, A39, A41, B10, B12]. Предложен е модел [A36], според който обратимата компонента на стрес-генерирания ток на утечки в слоеве Hf-силикат се дължи на захват в кислородни ваканции, а необратимата компонента на SILC се свързва със захват във водородни уловки. Захватът в съществуващи уловки е първият етап от процеса на генериране на дефекти от електричен стрес. Показано е, че в тези диелектрици не се наблюдава известната за SiO₂ зависимост SILC да предшества диелектричния пробив.

Изготвени са МОС структури с Hf_xTi_ySi_zO слоеве с различно отношение на Hf:Ti и са изследвани техните диелектрични и електрически свойства. Идеята е да се комбинира високата диелектрична константа на TiO₂ с термическата стабилност, добри интерфейсни свойства и ниските токове на утечка на Hf-силикат. Това са едни от първите подробни изследвания и анализ на диелектричните и електрически свойства и механизмите на проводимост в сложни четири компонентни смеси (Hf_xTi_ySi_zO) на два high-*k* диелектрика в зависимост от отношението Hf:Ti [A24, A29, A30, B7, B9]. За пръв път в high-*k* диелектрици е наблюдавано подпомогнато от фонони тунелиране. Показано е, че в чистите силикатни слоеве и в смесени такива с малко количество на един от металните компоненти (Hf или Ti), проводимостта се определя от собствени свойства на диелектрика (собствени уловки и „меки“ оптични фонони). Смесване на два high-*k* диелектрика и двата в значителни количества, води до локални нехомогенности в състава и структурата на слоевете, които модифицират механизмите на проводимост, дефинирани от собствените свойства, и допълнително усложняват наблюдаваните явления.

4. Изследване явления на захват и деградация в high-*k* диелектрици на нано-ниво

Чрез тунелна атомно-силова микроскопия (С-AFM) са изследвани едновременно структурните и електрически свойства на high-*k* диелектрици [A46, A47, A53, A66] и е показано, че това е много чувствителен метод, чрез който може да се установи връзка между физическите свойства на тънки диелектрични слоеве и тяхното електрическо поведение на нано-ниво (напр. възможно е да се определи дебелината на интерфейсия SiO₂ и неговата промяна, предизвикана от различни отгряващи процеси). Наблюдавани са повишени токове на утечка по границите на кристални зърна, което е едно от първите преки доказателствата за това явление [A46]. Чрез прилагане на оригинален подход на изследване са идентифицирани явления на захват и деградация в наноскалата [A47]. Предложен е модел, според който собствените уловки са прекурсори на индуцираните от стрес електрически активни дефекти. Прогресивното им трансформиране от класически уловки в необратими дефекти е процесът, който причинява деградация на електрическите параметри на high-*k* диелектрика и който предшества необратимия диелектричен пробив. Резултатите са стъпка към изясняване механизмите на деградация в high-*k* диелектрици – значителен, все още неразрешен проблем, който определя дълговремовата надеждност на нано-електронните структури на основата на high-*k* диелектрици. Тези изследвания привлякоха интереса на научната общност и бяха поканени да бъдат публикувани като

глава от книгата "Conductive Atomic Force Microscopy: Application in nanomaterials", ed. M. Lanza, Wiley VCH [A74] (поканата е приложена).

5. Метал-диелектрик-метал (MIM) структури за приложение в DRAM

Чрез процес на Atomic Layer Deposition (ALD) са изготвени структури метал-изолатор-метал (MIM) с различни диелектрици на основата на ZrO_2 , ($ZrAlO$; $ZrSiO$) и е изследвано влиянието на вида и количеството на легиращия елемент; времето на окисление; морфологията (кристална/аморфна) и дебелината на слоя върху диелектричните и електрически свойства на структурите [A51, A58, A63, A69]. Изследвани са специфични диелектрични явления в тези структури (нелинейност на капацитета; диелектрична релаксация; диелектрични загуби) и е получено, че те са силно зависими от аморфната/кристална структура на слоя. Показано е, че температурата на кристализация нараства с нарастване на концентрацията на легиращия примес (Al). Изяснено е влиянието на уловките върху механизмите на проводимост в структури $TiN/Al(Si)ZrO_2/TiN$. Показано е, че времето на окисление трябва да бъде внимателно оптимизирано, за да се получат диелектрични слоеве с ниски плътности на дефектите и ниски токове на утечка. Легиране с малки количества Al или Si съществено намалява токовете на утечка, без да влияе съществено на диелектричната константа. Получени са $ZrAlO$ и $ZrSiO$ слоеве с еквивалентна окисна дебелина под 1 nm и токове на утечки, които напълно удовлетворяват изискванията за генерации DRAM памети под 80 nm.

В няколко поканени обзорни статии и доклади [A32, A56, A62, B19] са обобщени резултатите от извършените комплексни електрически и структурни изследвания (представени в т.2-5) на различни диелектрични слоеве - Ta_2O_5 , ZrO_2 , $HfSiO$ (включително техни легирани модификации), разграничени са явления и ефекти общи за всички high-k диелектрици и такива, типични за дадена фамилия диелектрици и са направени важни изводи. Собствените уловки, свързани със специфичната електронната структура на диелектрика влияят върху електричното поведение на структурите по два начина – действайки като класически уловки на електричен заряд или действайки като центрове, през които се осъществява електронния транспорт и които улесняват електричната проводимост. Чрез задълбочено и подробно изследване механизмите на проводимост е възможно да се получи ценна информация за параметрите на съществуващите уловки. Мултикомпонентната природа на изследваните материали обуславя голяма сложност и разнообразие на процесите, определящи електрическото им поведение в наноелектронни прибори. Наблюдавано е голямо разнообразие от различни механизми на проводимост в зависимост от диелектрика и е показано, че една и съща уловка може да определя и участва в различни механизми на проводимост в даден high-k диелектрик в зависимост от конкретните параметри на изследваната структура и условия на измерване. Въпреки това разнообразие, резултатите категорично сочат, че в повечето случаи положително заредена кислородна ваканция е основната уловка, през която се извършва транспортът на електричен заряд, независимо от диелектрика (Ta_2O_5 , ZrO_2 , $HfSiO$). Чрез легиране и/или смесване на high-k диелектрици е възможно да се променят параметрите на собствените уловки (напр. тяхното енергетично положение в забранената зона) и по този начин да се контролира електричното поведение на структурите. Процесите на легиране или смесване трябва да бъдат оптимизирани внимателно, за да не стимулират формиране на нехомогенности в структурата и/или състава на слоя (фазово разделяне, граници на кристални зърна, интерфейсни реакции и др.), които въвеждат

допълнителни уловки и променят съществено електрическото поведение на структурата, дефинирано от собствените свойства на high-k диелектрика.

6. Изследване на диелектрични слоеве, включително многослойни структури, за приложение в новопоявяващи се концепции за енерго-независими флаш памети (non-volatile memories, NVM)

6.1. Памети, базирани на захват на заряд

Изследвани са диелектричните и електрични свойства на легирани с Al, HfO₂ и ZrO₂ слоеве, отложени чрез плазмено подпомогнато отлагане на монослоеви (PE-ALD) или чрез реактивно разпръскване [A70-A73]. Изследвано е влиянието на дебелината на диелектричния слой, степента на легиране с Al, средата на отгряване върху тези свойства на структурите. Извършени са електрически измервания за изследване на механизмите на “полезен” захват и съхранение на заряда в структури от типа MNOS (metal/high-k dielectric/SiO₂/Si). Резултатите показват, че чрез подходящи отгряващи процеси и легиране може съществено да се модифицира захвата на токови носители в HfO₂, както в посока намаляване на този захват, така и в посока на неговото увеличаване. Получени са високи плътности на захванатия заряд и времена на неговото задържане в активната среда. Анализирани са механизмите на проводимост и са идентифицирани дефектите участващи в проводимостта. Получени са съществени резултати за природата, пространственото и енергетично положение на уловките и тяхното влияние върху механизмите на захват в изследваните структури. Показано е, че чрез внимателно оптимизиране параметрите на технологичния процес и вида и количеството на легиращия елемент, е възможно да се модифицират свойствата на high-k диелектрици и да се удовлетворят изискванията на дадено наноелектронно приложение. Специално внимание е отделено на възможността да се увеличи полезния захват и способността на структурите за съхранение на заряд с цел приложението им в новопоявяващия се клас енерго-независими флаш памети със захват на заряд.

6.2. Памети, базирани на резистивно превключване

Изследвани са ефектите на резистивно превключване (RS) и е наблюдаван стабилен биполярен RS ефект в MIM структури с диелектричен слой TiO₂ или HfO₂, TiN долен електрод и Pt горен електрод [A65, A67, A68, B21]. Показано е, че RS ефект може да съществува в свръх-тънки HfO₂ слоеве с дебелина под 3 nm. Установено е, че чрез въвеждане на допълнителен кислород на интерфейса HfO₂/TiN могат да се подобрят значително всички параметри на процеса на резистивно превключване. Резултатите зависят съществено от количеството на кислорода, как той се въвежда на интерфейса и респективно какви връзки формира. Този процес, както и дебелината на диелектричния слой, трябва да се оптимизират внимателно, за да се получи стабилно и контролируемо резистивно превключване. За повечето структури е наблюдавано отношение между двете резистивни състояния (ON/OFF) 100-1000, което е оптимално за функциониране на т.нар. резистивни памети. В някои структури се наблюдава пълно възстановяване на проводящите сегменти, формирани в процеса на контролируем пробив, като в този случай, това отношение достига 10⁸.

Направени са систематични изследвания на ефекта на бариерния Al₂O₃ слой върху процесите на резистивно превключване в структури Pt/Al₂O₃/TiO₂/TiN [A67]. Установено е, че дебелината на Al₂O₃ слой има определяща роля за стабилизиране и усилване процесите на резистивно превключване в тези структури. Структури с дебелина 3-4 nm на Al₂O₃ слой демонстрират устойчиво превключване за 10⁴ цикъла. Установен е механизма на резистивно превключване, а именно движение на кислородни

ваканции от TiO_2 към Al_2O_3 по време на SET процеса, които участват във формиране на проводящи области.

7. Изследване електрическите свойства на МОС структури диелектрик (SiO_2 , Al_2O_3) - SiC.

Направено е сравнение на електрическите свойства на МОС структури на базата на SiC и гейтови диелектрици SiO_2 и Al_2O_3 [A25, A31]. Показано е, че видът на електрически активните дефекти в тези структури зависи силно както от диелектрика, така и от типа (р- или n-тип) на SiC. Структури с Al_2O_3 върху р-тип 4H-SiC показват значително по-добри електрически свойства от аналогични структури със SiO_2 . Този резултат е много важен за приложението на МОС структури на базата на SiC в прибори, работещи при високи електрични полета.