

СПРАВКА

За по-важните научни приноси на чл.-кор., проф., д.физ.н. Георги Младенов

Научните трудове и изобретенията на Г. Младенов са посветени на изследване на, физичните процеси и приложенията на генерирането на интензивни снопове от ускорени електрони и йони и взаимодействието им с веществото. Получени са нови данни, изучени са закономерности, предложени са нови методи на изследване и са създадени оригинални технологични устройства, допринасящи за обогатяване на знанията в областта на физическата електроника. Разработени са модели, алгоритми и компютърни програми за числено моделиране на процесите при генериране на снопове от заредени частици, както и за симулиране на процесите при обработката на материалите с тях. Предложени са оригинални подходи и методики за пресмятане на сложни електро-физични устройства и модули; създадени са и са проверени експериментално нови методи за управление и оптимизиране на инсталациите и на технологичните процеси. Разработени и изпитани са нови електронно-оптични системи и блокове за хранване и управление, нов метод за окачествяване на интензивните електронни снопове, нов физичен и топлинен модел на електроннолъчевото заваряване, оригинален подход за оптимизиране на рафинирането при електроннолъчево топене, оригинален пакет от приложни компютърни програми за симулиране процесите на експониране и проявяване при получаване на субмикронни и нано-размерни електронно-литографски изображения; предложени са оригинални концепции за електро-механичните системи за движение на обработваните образци във вакуумните технологични камери, нови методики за изследване на получените с електронни и йонни снопове нови материали и изделия.

1 Физика на генериране, окачествяване и управление на интензивни електронни снопове

Отношението яркост/енергия или емитанса на електронния сноп са използвани за пръв път за числено характеризирание на качеството на технологични електронни снопове-т.е. на способността им да пренасят ускорените електрони на по-далечни разстояния или да се фокусират в по-малко фокусно петно. По този начин се съпоставят както интензивните електронни снопове, така и създаващите ги електронно-оптични системи.

Показано е, че при конструиране на електронно-оптични системи за технологични цели фазовият анализ е по-подходящ от сега използвания траекторен анализ на сноповете. За пресмятане на нормирания емитанс и отношението яркост/ускоряващо напрежение е предложена статистическа обработка на данните от цифрово моделиране на снопа. На тази основа са разработени алгоритми и компютърни програми за оптимизиране на източниците на интензивни снопове, при отчитане на големината и посоката на началните скорости на емитираните частици, на потенциалния минимум пред катода и на разпределението на емитирания ток по катодната повърхност поради различните стойности на потенциала пред различните участъци на катода.

Предложен е нов метод за експериментално определяне профила на плътността на тока на снопа в радиално направление и ъгловото му разпределение с помощта на движещи се перпендикулярни процепи. Използвани са също и известните методи на измерване профила на снопа с въртящи се сонда или процеп, заедно с Фарадеев цилиндър. За експериментално определяне на емитанса са предложени измервания а)на три профила на

тока на снопа в три напречни сечения по дължината на оста му, б) промяна на фокусиращия ток и измерване на профила в едно напречно сечение. При тези измервания се допуска гаусово разпределение на сноповите електрони. Показано е, че освен максимална електронна яркост, към технологичните електронни снопове за заваряване има изискване за определено съотношение на дисперсиите на радиалното и ъгловото разпределение на електроните в снопа. Така прогнозираните технологични възможности на снопа се използват при проектиране на оптимизирани електронно-оптични системи. На този подход се базира и предложен от Г. Младенов и **сътрудници нов метод за електроннолъчево заваряване на детайли с променлива дебелина, геометрия и състав, използващ промяна на разположението на фокусиращата система.**

При изучаване на влиянието на неутрализацията на обемния заряд на електронен сноп от йони е въведено ново понятие-локална степен на зарядова неутрализация и е предложена нова класификация на технологичните електронни снопове на тази основа. Оригинална компютърна програма, създадена в ИЕ БАН, позволява да се използват различни модели на зарядова неутрализация и числените експерименти показват силна зависимост на конфигурацията на снопа и разпределението на електроните по дължината на снопа от големината и разпределението на локалната неутрализация, а не само от интегралните стойности на зарядова компенсация на обемния заряд на електроните.

Спектрите на Фурие и модулационната предавателна функция на сигнала са избрани като основни характеристики на анализаторите на електронни снопове. Показано е, че матрица от повече от 32x32 кратки импулси и скорост на предаване двойно по-голяма от максималната честота на спектъра обезпечава адекватно изображение на разпределението на снопа. Показано е, че при обработката на данните от въртящи се сонда или процеп е възможно получаване на фалшив минимум в пресметнатото разпределение на снопа.

II Физически процеси при проникване на ускорени електрони и йони в полимерни слоеве (експониране и проявяване в условията на субмикронна електронна и йонна литография)

Инсталациите за електронна литография са най-скъпите технологични съоръжения в микроелектронната промишленост. Под ръководството на Г. Младенов през 1974-75 г. са **създадени първите лабораторни инсталации за електронна литография у нас** (едновременно с пионерните изследвания в тази област в най-развитите в индустриално отношение страни). Проведени са теоретични изследвания и компютърна симулация за изясняване на проникването на бързи електрони в полимерни резисти. **Установени са за пръв път промени на инфрачервените спектри на облъчени резисти поради радиационна модификация или вследствие на термична деструкция на чувствителността на резиста към електрони или ултравиолет.** Предложен е нов метод за комбинирано ултравиолетово и електронно експониране на позитивни електронни резисти с цел повишаване на рандемана, при които елементите на профила с големи размери се получава с ултравиолетово облъчване, а само субмикронните критични елементи на профила се експонират в началото с електрони, използвайки термичната загуба на чувствителност на резиста.

През 1981 г. на оборудване на Изследователския институт по физика в Стокхолм са изпълнени **едни от първите експерименти по йонна литография с йони с различни маси и широк диапазон енергии** от няколко десетки keV до 2 MeV. Едновременно за пръв път се **прилага компютърна симулация на проникване на йони в полимерни тънки слоеве.** В работите [A31, A54] е показано, **че промените на разтворимостта на резиста се обясняват с електронните загуби на проникващите йони** (а не с ядрените загуби, както това е при модификацията или разпрашването на метали и изолатори с ускорени йони). **Тези работи са с**

най-много цитирания – съответно 47 и 46 независими цитирания, а общо по тематиката за основите на електронната и йонна литография цитиранията на 52 работи са 291.

С оригиналните компютърни програми за симулиране процесите на експониране и проявяване на полимерните резисти са пресметнати характеристиките на пространствените разпределения на предаваната енергия и разпределението на имплантираните електрони или йони за редица практически важни случаи. Публикувани са оригиналните алгоритми и резултатите от числени експерименти за еволюцията на профила на проявяване на полимерни резисти, облъчени с бързи електрони и йони. Изучено е влиянието на условията на проявяване – т.е. на дозата на облъчване, типа на проявителя, дебелината на резиста, размерите на проявяваната структура, параметрите на лъча и на подложката върху резултатите на процеса. Компютърния пакет от програми за симулиране на процесите при електронна и йонна литография, създадена в ИЕ БАН под ръководството на Г. Младенов е сред най-добрите няколко програми, разработени в университети в САЩ, Япония и Европа и е единствената, която има модули за симулиране и на двата субмикронни метода на структуриране (с електрони и йони).

Предложена е нова методика за пресмятане на радиационната ефективност и на контрастния параметър на двойките резист-проявител, използвани при електронна и йонна литография. Пресметнати са тези параметри за случай, за които няма публикувани данни. Показано е, че чувствителността и контрастния параметър са свързани величини. Поради това двойките резист/проявител обладават висока чувствителност при нисък контраст или позволяват проявяване на високо-контрастни структури при експониране с високи дози.

Получени са данни за поведението на използваните в нано-литографията резисти. При много тънки резистивни слоеве и резисти с нелинейно проявяване, за точно проследяване еволюцията на проявения профил при електронна нано-литография е предложена симулация с зависима от времето на разтваряне на резиста (дълбочината на резиста) скорост на проявяване. Числено пресмятане е направено за функцията на близост при експониране на многослойни структури, съдържащи тънък слой от високотемпературен свръхпроводник. Резултатите от компютърното симулиране са необходими за въвеждане на корекции в реални електронно-литографски процеси, свързани с функцията на близост. Обсъдени са общите проблеми и ограниченията на субмикронните литографски методи, показани са тенденциите на развитие на тези технологии.

III Физични процеси при електроннолъчево заваряване

Уточнени са физическия и топлинен модел на електроннолъчево заваряване. Отчетени са йонната само-фокусировка (**наличието на плазма [A8]**) и **разсейването на снопа в парите на материала**, както и хидро-динамичните процеси в течната вана. Показана е необходимостта за използване на нестационарен топлинен модел на процеса. Предложени са методики на пресмятане на режимите на електроннолъчево заваряване. **При тънкостенни детайли методиката се базира на представата за нагриване на образеца с линеен подвижен източник на топлина.** При дебелистенни детайли, поради сложността на процесите (създаване на кратер в течната вана, пълнен с метални пари и плазма и взаимодействието им със снопа) топлинните модели позволяват в най-добрия случай да предскажат само по порядък параметрите на напречното сечение на шева (дълбочина и ширина). **Прилагайки планиране на експеримента и статистически анализ на данните от експерименти се получават модели, точно прогнозиращи геометрията на напречното сечение на заваръчния шев за изследвания материал и машина.** Регресионните модели, както и модели, получени с прилагане на обучени изкуствени невронни клетки, могат да се използват при автоматизация на процеса и при компютърни методи за оптимизация на технологичните резултати, както и в компютърни експертни системи за подпомагане на решенията на оператора.

Получени са нови данни при изследване на колектираните вторични частици от плазмата, генерирана в процеса на електроннолъчево заваряване. Теоретично и експериментално са изследвани параметрите на плазмата в кратера в заваръчната вана, и в пространството над зоната на взаимодействие. При положителен потенциал на колектора, превишаващ плазменния потенциал, колектираният електронен ток е ток на несамостоятелен дъгов разряд, горящ от прегретите участъци на стените на кратера, където попадат успелите да проникнат електрони на снопа. **По този начин плазменният сигнал носи информация за неустойчивостите в системата снопа / кратер.** Наблюдавано е и възбуждане на йонно-звукови акустични колебания, ако разстоянието колектор/зона на взаимодействие е голямо. При ниски положителни потенциали на колектора и при колектиране на плазмени йони също се наблюдават нестационарности на регистрирания сигнал. **Във всички описани случаи, предложеното от нас сумиране на случайните регистрирани сигнали (наречено метод на кохерентно акумулиране), се оказва плодотворно при управление на технологичния процес и при анализ на протичащите явления,** тъй като по закона за големите числа и централна пределна теорема на теория на вероятностите резултата от това сумиране на случайни сигнали не е случайна величина.

Други по-важни приноси са: а) предложеният нов метод за фокусиране на снопа по тока на насищане на регистрирания сигнал, измерен със сонда на Ленгмюр, екранирана от отразени от течната вана бързи електрони; б) новият метод за размерна електроннолъчева обработка, основан на йонната самофокусировка на снопа, преминаващ през пластина, разположена над обработвания образец.

IV Изследване на топлинните процеси и рафинирането на метала при електроннолъчево топене във вакуум

Теоретично и експериментално са изучени особеностите на процесите на топене и рафиниране в различните зони на процеса: на челото на претапяния образец, в капките течен метал и в течната вана в медния водно-охлаждаем кристализатор, в който се формира готовата отливка. **Разработени са компютърни програми за симулиране на процесите на топло-разпределение и пренос на маси в течния слой на челото на претапяния образец и във ваната в получаваната отливка.** Показано е, че разтворените газове се отделят още в началото на процеса на топене, а оптимизацията на процеса изисква подходящо избрано разпределение на влаганата енергия. Получени са данни за лимитиращия процес за намаляване на примесите при различни термодинамични условия в течния метал и в зависимост другите контролиращи фактори на процеса. Например оптимизацията на отнемане на кислорода от течната вана, намиращ се във вид на неметални включения в изходния метал, зависи от концентрацията на примесите и от протичащите термо-химични процеси. На тази основа е показана изгодата да се използва нерафинирана мед като изходна суровина за получаване на чиста безкислородна мед, а също-добавяне на въглероден прах и контактуване с въглероден тигел в процеса на рафиниране. По аналогичен начин, чрез подходящо подбиране на температурата на течния титан и скоростта на топенето му се оптимизира кислородното съдържание на получената отливка при електроннолъчево топене и рафиниране.

Обосновано е използване на вакуумния кондензат за получаване на отделени компоненти при рафиниране на мед. Предложено е ново обяснение на грапавината на отливките блокове, свързано с нестационарните топлинни процеси в зоната на контакта на течния метал с водно-охлаждаемия меден кристализатор. То е база за повишаване рандемана на технологичния процес. Получените чисти метали и сплави са използвани за получаване лазерни огледала за мощни лазери, тигли за израстване на кристали, мишени за йонно разпрашване и отлагане тънки слоеве в микроелектрониката и приборостроенето и др.

V. Изучаване на процесите на йонно внедряване, разпрашване и на емисия на фото електрони от грапави повърхности. Използване на бързи електрони и йони за анализ на образците

Създадени са алгоритми и са проведени числени експерименти при рентгенова/електронна спектроскопия на грапава повърхност на образци, покрити или не с тънък слой от разнороден метал или при наличие на модифицирана повърхност. Сигналят, получен при направления, близки до плъзгащ ъгъл към изследваната повърхност не носи информация за приповърхностния материал на образеца, защото е повлиян от засенчването на емитираните фотоелектрони от съседните грапавини. Предложена е интегрална профилометрия, основана на измерване на сигнала под различни ъгли.

В работата [A33] тънки слоеве от фоторезисти (ПММА и AZ1450J) са облъчени с водородни и хелиеви йони с енергия 1,5 MeV - 2 MeV. Състава и дебелината на облъчените слоеве е определяно с Ръдерфордово обратно отражение на падащите частици. Наблюдавани са драстични промени на състава на ПММА, както и много висока скорост на ерозия (100 - 20 000 атома/падащ йон). Намерено е, че тези явления корелират с електронните загуби на проникващите йони, свързани с накъсване на връзките в полимерните молекули.

При изследване на генерацията на неутрални, възбудени и заредени частици при бомбардиране с йони на покрити с полимерен слой образци са наблюдавани два ефекта: а) висока скорост на ерозия на полимера, корелираща с електронните загуби на проникващите йони и зависещи от облъчвания полимер; б) промяна на спектъра на дискретната радиация, емитирана от напусналите мишената разпрашени частици, преди те да са достигнали подложката. Наблюдавано е също, че при бомбардировка на чисти метални мишени (например от Берилий) и наличие на кислородни атоми на повърхността на мишената, вероятността за емисия на дискретни спектри от напускащите мишената разпрашени атоми расте. Спадът на интензитета на светлинната радиация с отдалечаване от мишената носи информация за скоростта на възбудените разпрашени частици. **Направен е извод, че разпрашените частици при дострояване на външните им електронни слоеве при напускане повърхността на образеца могат да се окажат възбудени**, а не както се предполагаше по-рано, че възбудени частици се емитират само след първия удар на падащата частица с атом на мишената.

Получени са данни от систематично изследване на скоростта на йонно разпрашване на метални образци в тлеещ газов разряд, в зависимост от тока, налягането и топло-отвода от разпрашвания образец (катод). **На тази основа е предложен нов метод за ускорени изпитания на трайност на електроди в газови лазери и на цифрови индикаторни лампи.** При разпрашване на текстурирана мишена от двуалуминиев триоксид е наблюдавано ъглово разпределение на разпрашените частици с по-висока степен от 1 на косинусово разпределение. Изследвани са контактни структури на полупроводникови прибори с RBS анализ с отразени протони или хелиеви ядра. Получаването на платинов силицид показва, че силициеви атоми се транспортират при температури до 400°C през тънкослойна бариера от хром.

Изследвани са резултатите от облъчване във вакуум на аморфни и кристални слоеве от титан. При енергии 6 J/cm² нарастват зърната в металния слой, докато при по-високи енергии-24 J/cm² започва оксидиране на слоя, заедно с появяване и растеж на пори. При облъчване на епитаксиални слоеве от титан се наблюдава оксидиране на слоевете-във вид на стохиометричен Ti₃O. Изследвано е влиянието на импулсно лазерно и електроннолъчево облъчване на алуминиеви слоеве. Показано е, че в слоевете протичат нарастване на зърната и формиране на по-съвършена структура, при ниски плътности на енергията (0.24 J/cm² -1,5 J/cm²). При по-високи енергии на облъчващия поток 5 J/cm² слоевете се окисляват. Резултатът не зависи от средата на обработката-въздух или вакуум.

Композиция Al-Si върху Si, облъчвана с електрони или лазерна радиация, аналогично рекристализира, като се наблюдава нарастване на зърната. При увеличаване на плътността на енергията, на границата между силиция и композита се създава евтектика. От измерената ВАХ показва, че се появява бариера на Шотки от 0.59 eV. При нарастване плътността на облъчващата енергия тази бариера намалява, което е свързано с деградация на слоя силициев оксид в интерфейса пластина/композит. При плътност на енергията на облъчващите електрони 12.4 J/cm² контактът става омичен.

Изследвано е проникването на йони в силициев образец при плазма-базирана йонна имплантация. Плазмата се запалва от отрицателен импулс (-15keV, 3.5A, 5 μ s) в азотно-съдържаща остатъчна атмосфера в технологичната камера. Модифицираният слой се изследва със SIMS – (Cs 2 keV йони) профилен анализ по дълбочина, като се измерва сигналът от внедрените азотни йони. Намерено е, че разпределението по дълбочина на внедрените йони съответства на обратно-пропорционално на йонната енергия, от 2 keV до енергията на пика на импулса. Изследвана е модификацията на полимери (ПЕТ-полиетилен терефталат; ПВС-поливинил хлорид; ПА- полиамид) с йонна имплантация. Наблюдаваните изменения на физическите свойства (например електро-проводимостта на модифицираните слоеве) не се обясняват с пресметнатите йонни пробези и разпределението на имплантираните йони. Модификацията на състава, ерозията на полимерния материал, генерирането и дифузията на газ са по-важни причини за промяна на модифицираните физически характеристики. Видът на бомбардиращите йони и състава на полимерния материал са от първостепенна важност.

VI Енергийна ефективност и възобновяеми енергийни източници. Получаване на тънкослойни структури с потенциал за приложения в нови енергийни устройства

Използването на нетрадиционни енергийни източници и подобряването на енергийната ефективност при потребителите на енергия световна тенденция, наложена от ограничените изкопаеми енергийни ресурси и ръста на количеството потребявана енергия. България има потенциал за развитие на възобновяемите енергийни източници, но рязкото нарастване на действащите мощности, при висока цена на произведената енергия и ниски доходи на населението доведоха до проблеми. При това България е най-неефективно използващата енергия страна в Европейския съюз, което задълбочава проблемите с икономическата стабилност на българската енергетика. Състоянието и тенденциите на развитие на различните възобновяеми източници и перспективните технологии на преобразуване на слънчевата енергия се дискутират. Показано е, че след достигане на планирания за 2020 г. дял на възобновяемите източници в България в енергосистемата ни ще се появят нестабилности, което налага от сега да започне доизграждане и усъвършенстване на енергосистемата по концепцията за интелигентна електрическа мрежа. Приведени са и данни за производството и потребяваната енергия, за енергийната ефективност на жилищата и на някои водещи енергоемки технологии в индустрията.

Теоретично са получени номограми за прогнозиране на максималната електрическа активност на бор, имплантиран в големи дози в силиций. Изследвани са йонно-имплантирани структури за фотоелементи и биполярни полупроводникови прибори. При изследване ролята на концентрацията на бариери върху електрическите и термоелектронните свойства на оксидни слоеве в широк температурен диапазон са наблюдавани два механизма- нискотемпературен, свързан с отгряването на донорни центрове и огъване на енергийни зони при повърхността на образците, и високотемпературен, свързан с емисия на свободни електрони в порите на материала.

Изследвани са особеностите на получаване на тънки слоеве и модифициране на структурата им с помощта на електронен лъч. Предложен е оригинален метод и устройство и са получени свръхпроводящи високотемпературни слоеве от итриево-бариеви купро-оксиди; изучен е литографския процес за получаване на микроструктури в тях и на тази основа са разработени нови свръхпроводящи сензори на инфрачервена радиация и филтри за безжични радиовръзки от микровълновия диапазон.

VII Разработка на електроннолъчевы инсталации. Изследване и автоматизация на процесите.

На микропроцесорно управление на електроннолъчевы процеси е посветена монографията [2]. Оригинални приноси при разработването на сложни и скъпи технологични съоръжения за електроннолъчево заваряване са приведени в редица публикации. Важен принос е предложението нов подход при изграждане на източника на стабилизирано ускоряващо напрежение на основата на източник на ток, потвърден с авторско свидетелство за изобретение. По този път се получава рязко ограничение на токовете на късо съединение, което при

високоволтовите източници може да разруши устройството. Предложен е нов вариант на измерване ускоряващото напрежение на инсталация за електроннолъчево заваряване. Описани са 9 специализирани хибридни интегрални схеми, разработени за повишаване на качеството на инсталациите за електроннолъчева обработка.

Разработен е универсален манипулатор за електроннолъчево заваряване във вакуум, съчетаващ всички необходими работни и спомагателни движения в едно устройство, като вакуумните изводи на механичното задвижване са събрани в една плоскост. В друго изобретение са предложени метод и устройство за предотвратяване на високоволтови пробиви в инсталациите за електроннолъчева обработка чрез регистриране и анализ на пред-разрядните токове, с което електрическата защита и надеждността на тези инсталации нараства. Публикувани са данни за първите български инсталации за електроннолъчево заваряване .

Описана е система за автоматизация на инсталация за електроннолъчево топене. Публикувани са данни за техническите и технологичните решения на тези инсталации. Получено е свидетелство за изобретение за електроннолъчево топене и рафиниране на мед. Изобретения са получени и за нови метод и устройство за получаване на високотемпературни свръхпроводящи покрития със сложен състав. В други изобретения са описани детайли на нова технология за електроннолъчево заваряване на мембранни възли, както и ново устройство за управление на инсталация за електроннолъчево заваряване. Описан е също подходът и реализацията на системи за автоматизация на електроннолъчеви технологии. Публикувани са данни за инженерна експертна система, подпомагаща оператора при управление на инсталация за електроннолъчево заваряване и топене.

Заклучение

Разгледаните по-горе резултати издигат нивото на българските изследвания до световните постижения в съответните области на физическата електроника. Получените оригинални резултати, натрупаният опит, разработеното оборудване и обучените изследователи са основа за успешно развитие на електронни и йонни технологии у нас.