



**Технически университет София**



**Департамент по приложна физика**

## **О Т Ч Е Т**

на договор 102ni140-20

Първи етап

# ***ИЗСЛЕДВАНЕ НА МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНИ ХИДРОГЕНИРАНИ И НИТРИДИРАНИ СИЛИЦИЕВИ СТРУКТУРИ С ПОДОБРЕНИ ИНТЕРФЕЙСНИ СВОЙСТВА***

Ръководител на проекта:

**Доцент д-р Сашка Петрова Александрова**

Ноември 2010

## Съдържание:

1. Участници в проекта	3
2. Кратка информация за проекта	3
3. Отчет на дейностите	4
4. Финансов отчет за направените разходи	18
5. Заключение	19

## Приложения:

1. Резюме на български и английски език.
2. Постерен доклад, представен на 11<sup>th</sup> Europhysical Conference on Defects in Insulating Materials (EURODIM 2010), 12-16 July 2010, Pécs, Hungary.
  - Програма на 11<sup>th</sup> Europhysical Conference on Defects in Insulating Materials, на която е представен докладът.
  - текст на научната статия, изпратена за печат
3. Постерен доклад, представен на 16 Международна школа по физика на кондензираната материя.
  - Програма на 16 Международна школа по физика на кондензираната материя, на която е представен докладът.
  - текст на научната статия, изпратена за печат
4. Задание за разработка на компютърна програма за обработка на експериментални данни.

[http://phys.tu-sofia.bg/Projects/OT4ET\\_102ni140-20\\_2010.pdf](http://phys.tu-sofia.bg/Projects/OT4ET_102ni140-20_2010.pdf)

## 1. Участници в проекта

Доцент д-р Сашка Петрова Александрова – ръководител

Гл. ас. д-р Елена Йорданова Халова

Студент Димитър Томов Димитров

## 2. Кратка информация за проекта

Изследваните силициеви структури с микро- и наноразмери са оформени върху (100)p-Si и (111)n-Si. Хидрогениране се прилага като предокислителна обработка във вч водородна плазма или чрез плазмено-имерсионна имплантация. Нитридиране се прилага преди окисление чрез йонна имплантация. Окислението се провежда при понижени температури (800-860°C) с цел общо намаление на термичния баланс. При двете технологии се предполага насищане на Si връзки с H- или N-атоми, което да доведе до понижени плътности на интерфейсите дефекти.

Плазмената обработка на Si е извършена в планарен плазмен реактор, с вч генератор на честота 13.56 MHz и мощност 15 W, свързан капацитивно към работната камера. Налягането е 133 Pa. Температурата по време на плазмената обработка може да се повишава до 300°C.

При плазмено-имерсионна имплантация Si подложка се имплантира с H<sup>+</sup> йони 2 keV. Дозата е в интервала  $10^{13} - 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ .

Окислителният процес протича в среда от сух O<sub>2</sub> при температури в интервала 700 - 800°C за различни времена за получаване на оксиди с различна дебелина. Не са прилагани допълнителни термични обработки.

### 3. Отчет на дейностите

***В настоящия отчет са представени резултатите от дейността на колектива на договора за първата година.***

В изпълнение на предвидената в договора програма за изследователската работа за първата година бяха проведени изследвания на електрически и оптически свойства на микро- и наноразмерни силициеви структури. Изследванията включваха провеждане на подробни измервания, моделиране на процесите на въвеждане на примеси, обработка на измерените данни, получаване на резултати за разпределението на интерфейсните дефекти и подготовка и представяне на получените резултати. Закупена бе апаратура за оптични измервания. Подготвяни бяха необходимите микро- и наноструктури. За обработката на данни от измерванията са подготвяни компютърни програми. *По-важните дейности и постигнатите резултати са изложени съгласно работната програма на договора и следват същата номерация.*

***1.1 Провеждане на детайлни C-V и G-V измервания в интервал 500Hz-300kHz на структури Al/хидрогениран Si/оксид с различна дебелина на оксидите.***

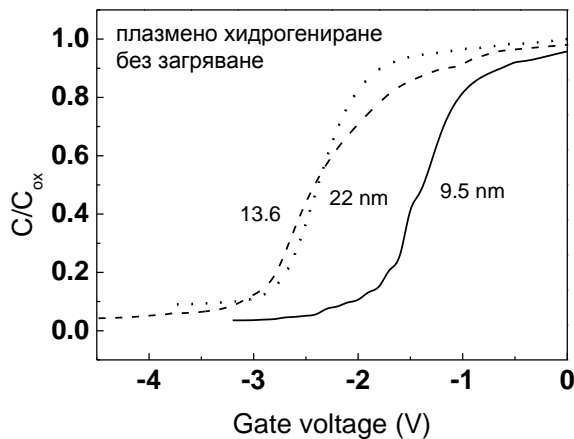
C-V и G-V измерванията се извършваха в честотния интервал от 500 Hz до 1 MHz при стайна температура. Използваният прибор е Precision Component Analyzer Wayne Kerr 6425.

Представените резултати относно интерфейсните свойства на тънки оксидни слоеве върху хидрогениран Si са получени чрез детайлно изследване на C-V и G-V характеристики. Честотните зависимости на тези характеристики позволяват да се получи информация за електричноактивните дефекти на интерфейса оксид/Si. Честотната дисперсия е резултат от присъствието на интерфейсни уловки, които имат повишена концентрация. Характерните особености във формата на кривите могат да са индикация и за нехомогенно латерално разпределение на тези уловки. Количеството и природата им

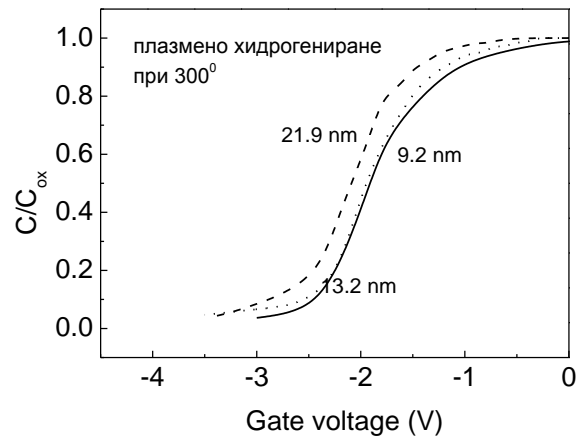
зависят от температурата на Si подложка по време на хидрогенирането в H-плазма.

За характеризиране на електрично-активните дефекти са използвани кондензаторни структури от вида метал-оксид-силиций (МОС), които се формират чрез вакуумно изпарение на Al контакти с кръгова форма върху повърхността на оксида. За осъществяване на контакт към Si подложка се използва изпарен плътен Al слой на задната ѝ страна.

На фиг. 1 и 2 са дадени високочестотните C-V криви за МОС структури с различна дебелина на оксидния слой, формирани върху Si подложки с определена предокислителна обработка.



**Фиг. 1.** Високочестотни C-V криви за МОС структури с различна дебелина на оксида, формиран върху n-Si, хидрогениран в плазма без загряване.

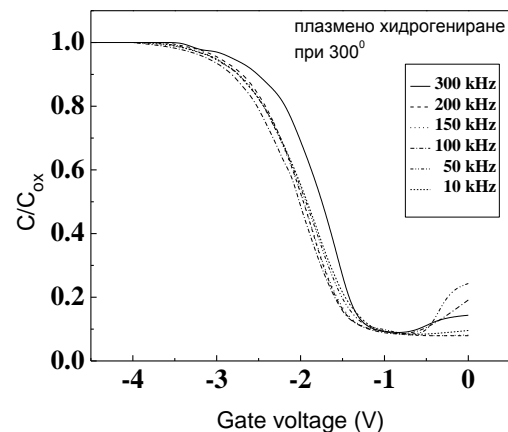
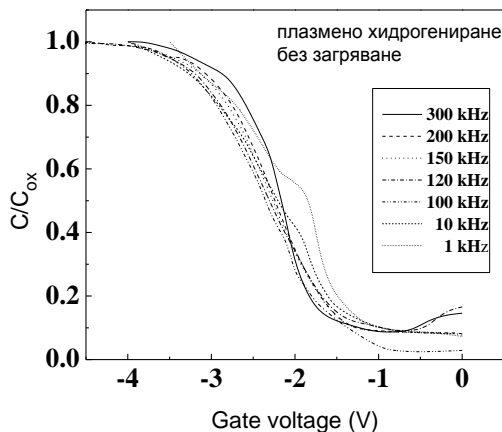


**Фиг. 2.** Високочестотни C-V криви за МОС структури с различна дебелина на оксида, формиран върху n-Si, хидрогениран в плазма при температура 300°C.

Вижда се, че зависимостта от дебелината на оксида е по-ясно изразена за оксидите, формирани върху Si, хидрогениран в плазма без загряване. Този факт има своето логично обяснение във модифицирания повърхностен слой в Si подложка по време на хидрогенирането. В случая без загряване се формира дефектен слой с определена дебелина в дълбочина на подложката - критична дебелина ~ 9 -13 nm. Това обяснява положението на C-V кривите, където оксидите с дебелина над критичната, показват приблизително еднакво отместване. Това е индикация за едно и също количество фиксиран оксиден

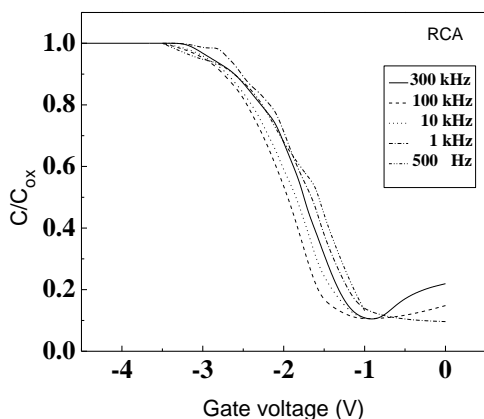
заряд. В този случай интерфейсите дефекти, определящи това количество, съответстват на една и съща дебелина на интерфейсната област. Модифицираната от плазмата приповърхностна област в Si подложка е вече изконсумирана в процеса на окисление. Оксидният слой с по-малката дебелина показва по-малко количество заряд, но и изяви особености (вълнистост) в самата C-V крива. Причината за по-ниското ниво на оксиден заряд е в по-тънката окислена област от Si. Особеностите в C-V кривата се дължат на дефекти, разположени непосредствено на интерфейса с оксида и са индикация за локално увеличение на плътността на повърхностните уловки, т.е. наличие на пикове в разпределенията по енергия в забранената зона на Si.

По-подробно ще се спрем на оксиди с дебелина  $\sim 9$  nm. Тъй като оксидите са получени в един технологичен цикъл за всички преокислителни обработки (с или без хидрогениране в плазма), т.е. температурата и времето на окисление са едни и същи, дебелината варира около 9 nm, в зависимост от обработките. Оксидите, израстнати върху подложки, изложени на плазма, показват малко по-големи дебелини в сравнение с тези върху RCA почистен Si поради по-бързото израстване на първите монослоеве на SiO<sub>2</sub>, дължащо се на присъствието на модифицирания повърхностен слой на Si повърхност.



**Фиг. 3.** Честотна дисперсия на C-V кривите за оксид, израстнат върху p-Si подложка, хидрогенирана без загряване.

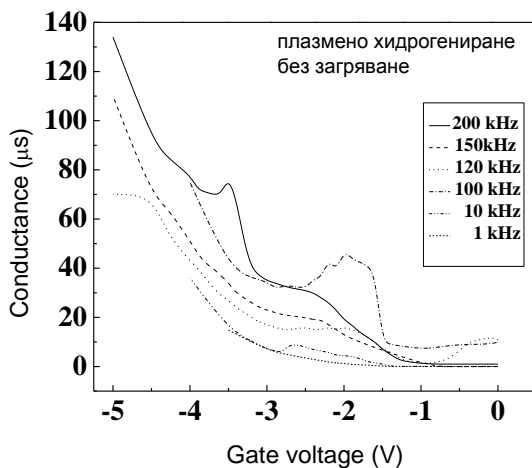
**Фиг. 4.** Честотна дисперсия на C-V кривите за оксид, израстнат върху (100)Si подложка с RCA почистване.



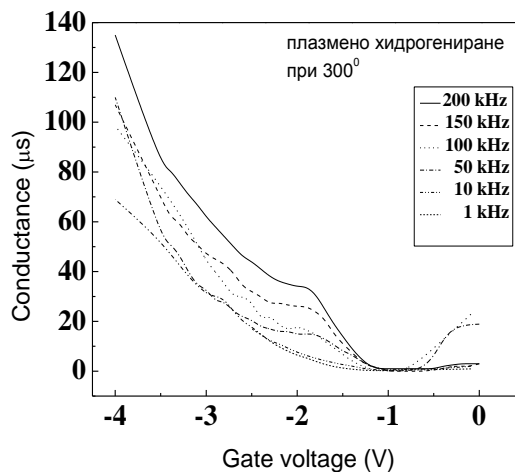
**Фиг. 5 .** Честотна дисперсия на C-V кривите за оксид, израснат върху p-Si подложка с RCA почистване.

при изписване на C-V кривата, запълването на тези уловки постепенно се увеличава и това предизвиква различен наклон на C-V кривите при следващите измервания при по-малки честоти. На този въпрос ще се спрем отново по-надолу.

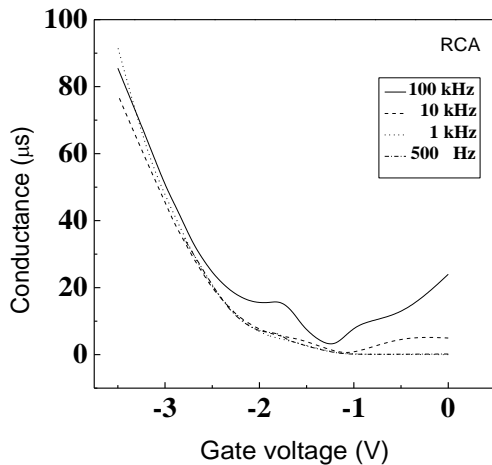
G-V характеристиките на МОС кондензаторите са показани на фигури 6, 7 и 8.



**Фиг. 6.** Честотна дисперсия на G-V кривите за оксид, израснат върху (100) p-Si подложка, хидрогенирана без загряване.



**Фиг. 7.** Честотна дисперсия на G-V кривите за оксид, израснат върху (100) p-Si подложка, хидрогенирана със загряване при 300 °C.



**Фиг. 8.** Честотна дисперсия на  $G$ - $V$  кривите за оксид, израснат върху (100)  $p$ - $Si$  подложка с RCA почистване.

## **1.2 Обработка на експериментални данни. Провеждане на допълнителни измервания. Моделиране на разпределенията на дефектите.**

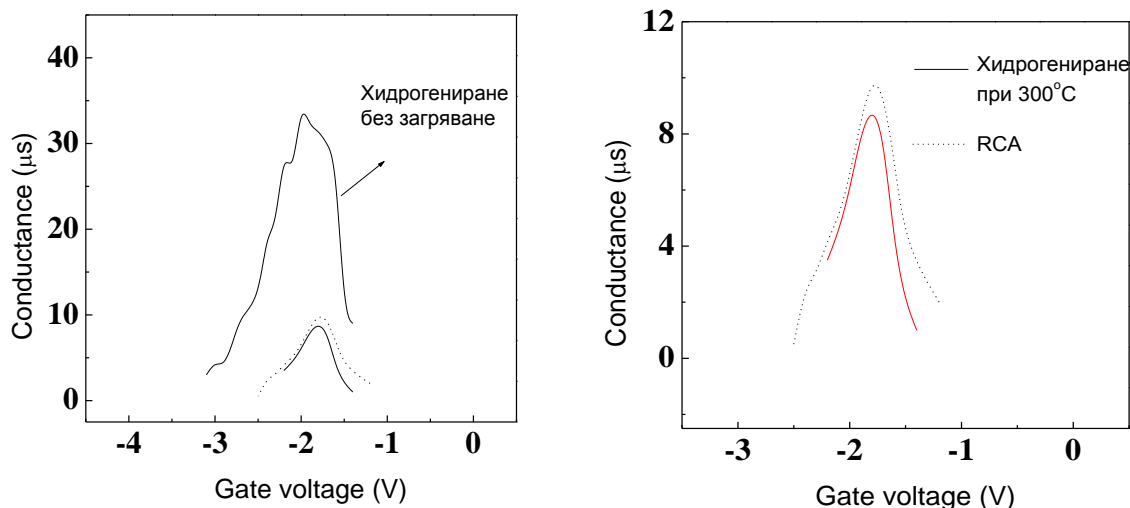
На фиг. 6, 7 и 8 се наблюдава нарастване на проводимостта с нарастване на измерителната честота. Нарастването на измерения сигнал с нарастване на напрежението е индикация за нарастнала утечка през окиса, което често се наблюдава в МОС структури върху  $p$ - $Si$ .

Поради тази причина  $G$ - $V$  кривите бяха коригирани за увеличената утечка. Получените  $G$ - $V$  криви за една измерителна честота за различните оксиди са показани на фиг. 9.

Относително висок максимум във  $G$ - $V$  характеристиката се наблюдава за оксиди върху  $Si$  подложка, хидрогенирана без загряване, което означава и най-висока плътност на интерфейсите състояния. Вижда се, че значително намаление на максималната стойност се наблюдава за хидрогениране при  $300^{\circ}C$ . Освен това, се наблюдава сложна форма на  $G$ - $V$  кривата, очевидно състояща се от насложени пикове.

Моделиране на разпределението на водородните атоми при плазмено-имерсионна имплантация и на азот при имплантация в класическа система е представено в параграф 1.4.



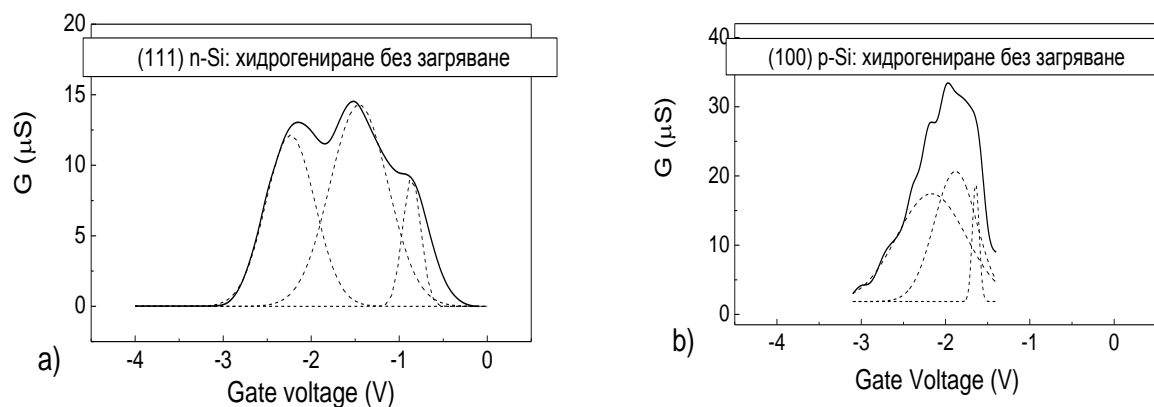


**Фиг. 9.** *G-V* криви за всички оксиди, измерени при 100 kHz и коригирани за утечката през оксида. В дясно е показано сравнение на характеристиките за хидрогениране при 300°C и стандартна преокислителна обработка.

### **1.3 Определяне на плътности, енергетични и пространствени разпределения на различните типове електрично-активни центри.**

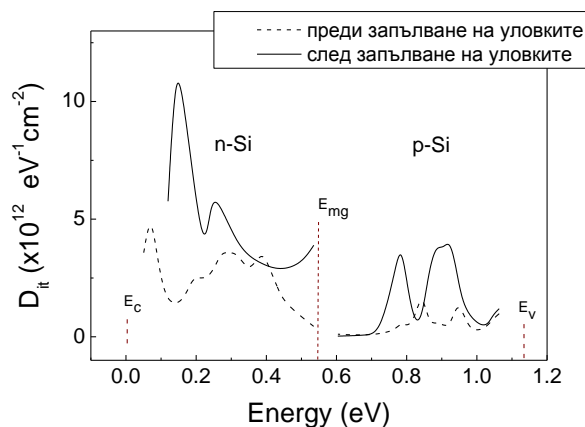
Пиковете във *G-V* характеристиките могат да се интерпретират като индикация за наличие на повече от един център на уловки. Положението на тези пикове при различни стойности на гейтовото напрежение показва, че те имат различно положение в забранената зона и са следователно единични интерфейсни уловки.

Разложението на *G-V* кривите от фиг. 9. на няколко пика позволява характеризиране на тези уловки като нива, локализирани в забранената зона на Si подложка. Резултатите са показани на фиг. 10 а за (111)*n-Si* (а) и на фиг. 10 б за (100)*p-Si*.



**Фиг. 10.** *G-V* характеристики на МОС структурите за (111) *n-Si* (a) и (100)*p-Si* (b), показващи наличие на локализирани интерфейсни състояния.

Наличието на единични интерфейсни състояния може да се установи и от високочестотния анализ на *C-V* зависимостите. Получените *енергетични разпределения* на интерфейсните уловки са показани на фиг. 11.



**Фиг. 11.** *Разпределение на интерфейсните състояния за оксиди върху хидрогенирани n-Si и p-Si подложки.*

Разпределенията, получени преди запълване на граничните уловки, разкриват реалните профили на интерфейсните уловки, дължащи се на дефекти на самия интерфейс. Граничните уловки се запълват при отрицателните напрежения. Енергетичните разпределения на интерфейсните уловки след запълването на граничните уловки показват

влиянието им върху крайните електрични параметри на МОС кондензаторите и са индикация за възникващи радиационни дефекти.

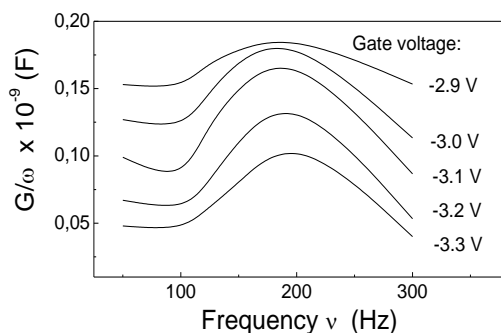
Сравнението на двата вида спектри (преди и след запълване на граничните уловки) показва изменение на енергетичното положение на интерфейсните уловки, което може да се свърже със структурна релаксация на дефектните състояния. Двата вида спектри дават възможност за оценка на

пространственото разделяне на граничните уловки от реалните интерфейсни състояния.

Плътностите на дефектите в този случай са много по-малки, средно около 2,4 пъти за всички оксиди за (100)Si в сравнение с (111)Si, както може да се очаква от известната зависимост от ориентацията на Si. Стойностите на тези плътности са относително ниски, като се има предвид, че оксидите не са подложени на отгряване, нито високотемпературно, нито нискотемпературно.

**Плътностите на интерфейсните състояния за оксиди, израснати върху хидрогенирани подложки показват по-ниски стойности в сравнение с тези за оксиди върху подложки, преминали стандартна RCA предокислителна обработка.**

Приложението на G-V метода позволява и отделяне на приноса на обемни уловки, които са разположени в областта на пространствен заряд на Si повърхност. Информация за този вид уловки се получава от анализ на енергетичното положение на пиковете от фиг. 10. Обемните уловки се проявяват като пикове в зависимостта на  $G/\omega$  от  $\omega$ , като позицията им не зависи от гейтовото напрежение. Илюстрация е дадена на фиг. 12 за оксиди,



израснати върху хидрогениран n-Si.

Изходни дефекти на такива уловки, се дължат на предизвиканото от плазмата наноструктуриране на Si повърхност, което се запазва и при окислението. Този тип уловки се наблюдават само при оксиди

**Фиг. 12.** Честотна дисперсия на  $G/\omega$  за оксиди, израснати върху хидрогениран n-Si

върху плазменохидрогениран Si без загряване. Генерацията им се избягва при хидрогениране на подложките при 300°C. Тази температура е достатъчна за отгряване на изходните дефекти.

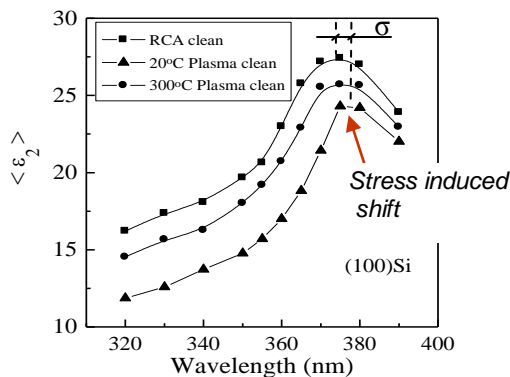
Беше намерено добро съвпадение на резултатите, получени от C-V кривите с изследванията на G-V характеристиките. В сложната форма на тези характеристики положенията на пиковете на фиг. 10 при различни гейтови

напрежения отговарят на положенията на пиковете от фиг. 11, които считаме, че са свързани с различни уловки. Също така, **най-ниски плътности** на интерфейсни уловки бяха намерени за оксиди върху Si, хидрогениран **при 300°C**, което се изразява чрез най-ниския G-V пик.

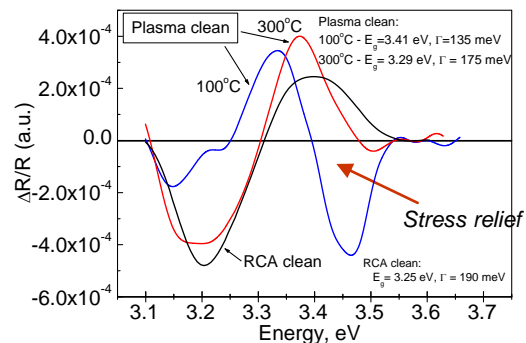
#### 1.4 Изследване на оптичните свойства на структури хидрогениран Si/оксид и нитрогениран Si/оксид.

Възникването на електрически активни уловки често се свързва с висящи и напрегнати химични връзки, което има макроскопичен израз в наличие на механични напрежения в структурите. За по-пълно изясняване на влиянието на вграденото напрежение в структурата Si/оксид допринасят изследвания на оптичните свойства на структурите.

Проведените елипсометричните изследвания на структури върху плазмено-хидрогениран Si/оксид показаха наличие на напрегната област в Si



**Фиг. 13.** Имагинерната част  $\langle \epsilon_2 \rangle$  на псевдо-диелектричната функция за структури с оксиди, израснати върху (100) p-Si.



**Фиг. 14.** Спектри на отражение за структури (100) p-Si/оксид с различна обработка.

подложка. Структурата Si/оксид се разглежда в рамките на трислоен модел - Si подложка, оксиден слой и преходен слой, разположен между тях. Пресметнатата беше псевдо-диелектричната функция  $\langle \epsilon \rangle$ . Имагинерната част  $\langle \epsilon_2 \rangle$ , която е свързана с процесите на абсорбция в структурата, е показана на фиг. 13. В показаните спектри пикът близо до 365 nm е характерен за Si и обикновено се свързва с междузонен преход. Сравняването на експерименталните данни за

$\langle \varepsilon_2 \rangle$  с теоретично пресметнатите за идеалния случай, при който не се отчита наличие на напрежение в системата, позволява да предположим, че отместването на положението на пика е предизвикано от наличието на напрежение в оксидния слой, което е оценено на  $\sigma = 6.1 \times 10^9 \text{ dyn/cm}^2$ .

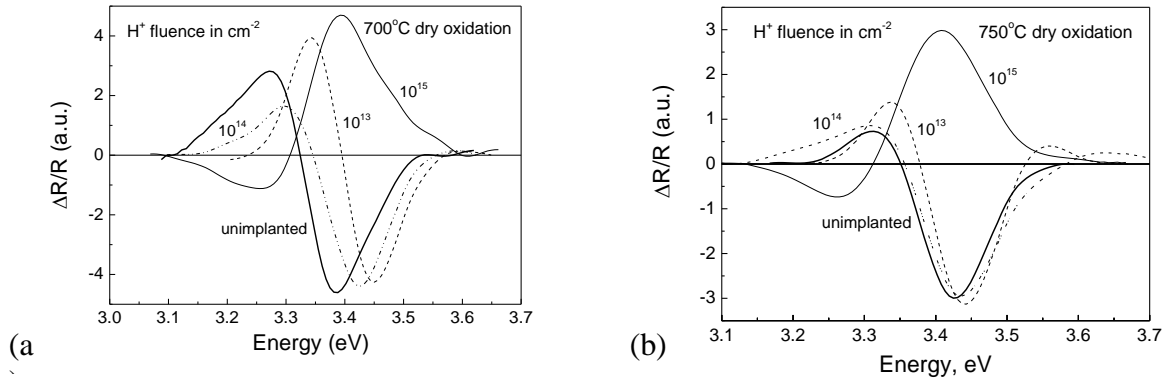
Структурата и механичните напрежения в оксидния слой бяха изследвани и с помощта на електроотражателна спектроскопия. Енергетичното положение  $E_g$  на директния преход при  $k = 0$  в спектрите на отражение на фиг. 14 и параметърът на уширение  $\Gamma$  характеризират състоянието на Si повърхност и на дефектите в приповърхностния слой. Стойността на  $E_g$  от 3,4 eV показва повърхност на Si без механично напрежение. Това означава **структурно подобрене на приповърхностната област на Si**. Ниската стойност на  $\Gamma = 135 \text{ meV}$  също показва, че тази област съдържа ниска концентрация на дефекти. Стойностите на  $E_g$  и  $\Gamma$  за оксидите върху плазменохидрогенирани Si подложки показват **релаксация на механичните напрежения и понижена плътност на дефекти**.

Може да се предположи, че генерацията на изходни дефекти по време на плазмената обработка се подтиска от повишената температура. Ако разглеждаме влиянието на плазмата като конкурентен процес на едновременно генериране и отгряване на уловки, очевидно в този случай преобладава отгряването. Това позволява да се дефинират **условия** на предокислителна плазмена обработка, при която се постига **подобряване на интерфейсите свойства** в силициеви микро- и наноструктури.

Структури върху Si подложки, хидрогенирани чрез йонно-имерсионна имплантация, са окислени в атмосфера на сух  $O_2$  при температури в интервала  $700 - 800^\circ\text{C}$  за време 30 min. Свойствата на интерфейлната област са характеризирани посредством електроотражателна спектроскопия. Получени са резултати за степента на съвършенство на интерфейса и нивото на механичните напрежения.

Спектрите на отражение за оксиди, получени при  $700$  и  $750^\circ\text{C}$  са показани на фиг. 15. Спектрите съответстват на пряк преход в центъра на зоната на Brillouin при  $E_g = 3.4 \text{ eV}$ . Както е известно, този преход за Si повърхност без механични напрежения е при  $3.37 \text{ eV}$ . Наличието на преход при

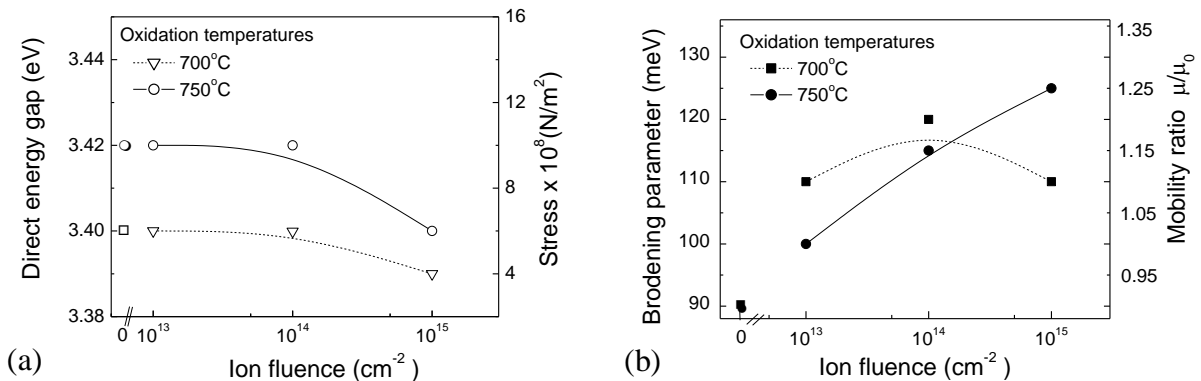
3.4 eV в спектрите на фиг. 15 е индикация за това, че сигналът идва от подложката и формата на спектрите и е свързана с условията на имплантация.



**Фиг. 15.** Спектри на електро-отражение на окислени Si повърхности, хидрогенирани с различни дози  $H^+$ . Температури на окисление  $700^\circ\text{C}$  (a) и  $750^\circ\text{C}$  (b).

Енергиите на прекия преход  $E_g$  и параметъра на уширение са показани на фиг. 16.

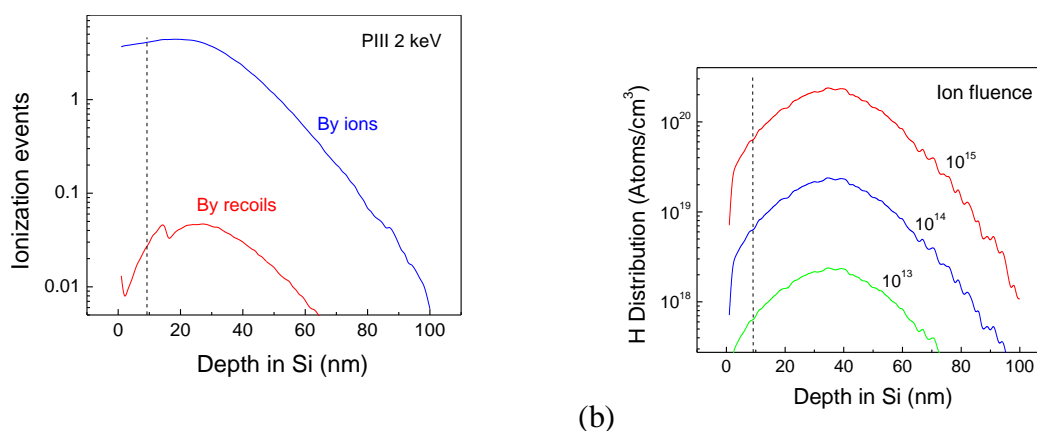
Отместванията на  $E_g$  са индикация за наличието на механични напрежения, които са резултат от окислителния процес. На дясната ос на фиг. 16 отместванията на енергиите са дадени като механични напрежения. За целта са използвани литературни данни за съответствие на отместванията и механичните напрежения  $1 \times 10^7 \text{ N/m}^2/\text{meV}$  от изследвания с фотоотражение на анизотропно ецван Si. Вижда се, че нивото на механичните напрежения не превишава  $10^9 \text{ N/m}^2$ .



**Фиг. 16.** Енергии на прехода (a) и параметър на уширение (b) за различни дози на имплантация. Стойностите за неимплантираните подложки са дадени при доза 0.

Параметърът на уширение  $\Gamma = 95 \text{ meV}$  показва относително ниска стойност. Този параметър е обратно пропорционален на времето за релаксация на носителите и характеризира процесите на разсейване. **Ниската стойност е индикация за висококачествен интерфейс.**

Спектрите за дози  $10^{13}$  и  $10^{14} \text{ cm}^{-2}$  показват форма, характерна за окислен Si. Енергията  $E_g$  не показва изменение, изменя се само параметърът  $\Gamma$  (фиг. 16 b). Причината е, че имплантацията с леки  $\text{H}^+$  йони не води до сериозни повреди в Si решетка. Йонизацията обаче може да се окаже съществена. Моделиране с програмата SRIM илюстрира нивата на йонизация, както е показано на фиг. 17.



(a)

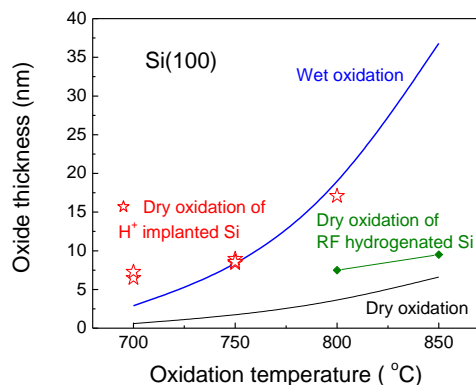
(b)

**Фиг. 17.** Йонизационни ефекти в Si подложка (a) и разпределение на имплантираните йони (b).

Йонизацията води до генерация на дефекти в приповърхностната област на Si и на интерфейса. Тези дефекти са отговорни за процеси на разсейване и увеличение на  $\Gamma$ , и следователно на намаление на подвижността (фиг. 16 b). Процесът на отгряване при окислението не е достатъчен за пълното отгряване. Високата концентрация на водород (фиг. 17 b) очевидно не води до пълно насищане на висящите връзки на интерфейса.

За доза  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  отместването на  $E_g$  достига 3.39, приближавайки 3.37 eV, и може да се обясни с релаксация на механичните напрежения. Намаляването на уширението  $\Gamma$  също показва интерфейс с **по-висока степен на подреденост и по-ниска концентрация на дефекти.**

Окислението на имплантирания Si би следвало да протича с увеличена скорост. Поради наличието на дефекти дифузията на окислителния агент се улеснява. Присъствието на H-атоми може да ускори химичната реакция при окислителния процес. Повишената скорост е илюстрирана на фиг. 18.



**Фиг. 18.** Сравнителни данни за скоростите на окисление. Времето за окисление е 30 min.

Данните за окисление на имплантирания Si (звездички) са сравнени със скоростите на окисление съгласно модела на Deal-Grove (плътни линии) за окисление във влажна и суха среда. Очевидно е, че скоростта на окисление на имплантирания Si достига тази на окисление във влажна среда, като увеличението е по-изразено при 700°C. Не се наблюдава силна зависимост от дозата на имплнтация.

Тези резултати показват, че **хидрогенирането посредством плазмено-имерсионна имплантация е подходящ метод за постигане осиди с висока степен на съвършенство с ниски нива на напрежения при значително понижение на температурата на окисление.**

За изследване на нитридирани структури са подготвени Si подложки, имплантирани с N<sup>+</sup> йони през термично израснат SiO<sub>2</sub> с енергия 45 keV и дози 10<sup>15</sup> и 10<sup>16</sup> cm<sup>-2</sup> в стандартна имплантационна система. Силициевите подложки са имплнтирани с N<sup>+</sup> йони и посредством плазмено-имерсионна йонна имплантация с енергия 4 keV и дози от 5.10<sup>15</sup> до 5.10<sup>17</sup> cm<sup>-2</sup>.

За определяне на условия за контролирано формиране на наноразмерни оксинитридни SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub> слоеве в кристални силициеви подложки



чрез двустъпален процес йонна имплантация/окисление е проведено моделиране на свойствата на структурите при класически имплантационен процес на азот в силиций с прилагане на Монте Карло симулации.

**1.5 Подготовка и оформяне на получени резултати за докладване на конференции и публикуване в международни и български издания.**

Резултатите от настоящите изследвания са представени на две международни конференции, както следва:

1. Постерен доклад, представен на 11<sup>th</sup> Europhysical Conference on Defects in Insulating Materials (EURODIM 2010), 12-16 July 2010, Pécs, Hungary

*“Defects in SiO<sub>2</sub>/Si Structures Formed by Dry Thermal Oxidation of RF Hydrogen Plasma Cleaned Si”*

Докладът е оформен като статия, предадена и приета за публикуване в *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.

2. Постерен доклад, представен на 16<sup>th</sup> INTERNATIONAL SCHOOL ON CONDENSED MATTER PHYSICS *“Progress in Solid State and Molecular Electronics, Ionics and Photonics”*, August 29th - September 3rd, 2010 Varna, Bulgaria

*“Electroreflectance spectroscopy study of hydrogen plasma immersion ion implanted silicon with ultrathin oxide film”*

Докладът е оформен като статия и, която след положителна рецензия, е изпратена за публикуване в *Journal of Physics: Conference Series*.

## ***Други дейности***

1. За изпълнение на задачи по проекта е закупено специализирано оборудване:

**Спектрофотометър USB4000-VIS-NIR** (USB4000 Preconfigured for General Lab Use, 350-1000 nm) 1 бр.

**Принадлежности** по 1 брой всяка:

**приставка за отражение R400-7-VIS-NIR** (400um Reflection Probe, VIS/NIR, 2m (KB);

**светлинен източник LS-1** (Tungsten Halogen Source, 360-2000 nm, 900 hrs, 3100 K);

**стандарт за отражение STANSSH** (Specular Reflectance Standard, high reflectivity);

**държател RPH-1** (Reflection Probe Holder for 6.35-mm diameter probes)

**софтуеър SPECTRA SUITE** (Cross-platform Spectroscopy Operating Software).

В ход е усвояване и пускане в действие на апаратурата. Осигурено е подходящо помещение и са подготвени образци за започване на измервания.

2. Изготвено е задание за разработка на компютърна програма за обработка на експериментални данни от измервания по ВЧ C-V метод. Специфичността на метода изисква специална програма за:

- пресмятане на идеални криви
- сравнение на измерени и теоретично пресметнати данни.

## **4. Финансов отчет за направените разходи**

Отпуснатите средства се изразходвани изцяло за закупуване на посоченото по-горе оборудване.

## 5. Заключение

Следва да се отбележи, че задачите от проекта са изпълнени в предвидения за първата година обем. Колективът има готовност за изпълнение на задачите, предвидени за втората година от проекта. Изследванията се предвижда да бъдат съгласно предвидената в проекта програма. Предвидени са и конкретни теми към задачите:

- Изследване на повърхностната и интерфейлната морфология на структури хидрогениран Si/оксид и нитрогениран Si/оксид.
  - \* Зависимости от дебелината на оксидния слой.
  - \* Характеризиране на нитридирани структури.
- Сравнителен анализ на резултатите, получени от експерименталните измервания по различните методи.
  - \* Обработка на експериментални данни от електрически измервания чрез подготвената програма.
  - \* Получаване и обработка на експериментални данни със закупената апаратура.
- Обобщен анализ относно природата на дефектите в структурите. Определяне на условия за постигане на подобрени интерфейсни параметри.

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНИ ХИДРОГЕНИРАНИ  
И НИТРИДИРАНИ СИЛИЦИЕВИ СТРУКТУРИ С ПОДОБРЕНИ  
ИНТЕРФЕЙСНИ СВОЙСТВА**

Резюме

В изпълнение на предвидената в договора програма за изследователската работа за първата година бяха проведени изследвания на електрически и оптически свойства на микро- и наноразмерни силициеви структури. Изследванията включваха провеждане на подробни измервания на  $C-V$  и  $G-V$  характеристики, измервания чрез елипсометрия и електроотражение, моделиране на процесите на въвеждане на примеси, обработка на измерените данни, получаване на резултати за разпределението на интерфейсните дефекти и подготовка и представяне на получените резултати. Закупена бе апаратура за оптични измервания. Подготвяни бяха необходимите микро- и наноструктури. За обработката на данни от измерванията са подготвяни компютърни програми.

Резултатите от изследванията на електрическите и оптичните свойства на силициеви структури, формирани върху силиций, хидрогениран във ВЧ водородна плазма и чрез плазмено-имерсионна имплантация, показват подобрене на характеристиките им. Наблюдават се понижени плътности на интерфейсните състояния и понижени нива на механичните напрежения, което е индикация за по-високо съвършенство на интерфейсната област. Оценяван е приносът на различните интерфейсни уловки към канцентрациите на дефектите. Установени са подходящи технологични условия за постигане на ниски плътности на интерфейсните дефекти при понижени температури на окисление.

Резултатите са от значение за приложение в прибори от следващите поколения с повишена степен на интеграция.

***INVESTIGATION OF MICRO- AND NANOSIZED HYDROGENATED AND  
NITROGENATED Si BASED STRUCTURES WITH IMPROVED INTERFACE  
PROPERTIES***

Abstract

According to the program foreseen for the first project year investigations were performed on the electrical and optical properties of micro- and nanosized silicon-based structures. The structures were prepared on Si, hydrogenated in rf plasma or by plasma-immersion ion implantation. The investigations include detailed measurements of  $C-V$  и  $G-V$  characteristics, measurements by ellipsometry and electroreflectance, modeling of the impurity introduction, experimental data processing, obtaining of results about interface defects distributions and preparing and presenting the results for publication. Apparatus for optical measurements was purchased. Computer programs were prepared for experimental data processing.

The results from the investigation of the electrical and optical properties of the structures prepared on Si, hydrogenated in rf plasma or by plasma-immersion ion implantation, revealed improvement of their characteristics. Reduced densities of the interface traps and low level of the mechanical stress was observed, which is an indication for higher perfection of the interface region. The contribution of the different interface traps was estimated. Appropriate technological conditions were established for achieving low density of the interface traps at lowered oxidation temperatures.

The results show potential for application in the next generation of electronic devices with increased integration rate.