

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ МОНОКРИСТАЛІВ

На правах рукопису

МОШЕЛЬ Микола Васильович

УДК 532.783:620.179

**НЕМАТИЧНІ РІДКІ КРИСТАЛИ
В НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ
МАТЕРІАЛІВ ТА ВИРОБІВ
МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ**

05.27.03 — технологія обладнання та
виробництво матеріалів і
пристроїв електронної техніки

**Автореферат дисертації на здобуття
наукового ступеня
доктора технічних наук**

Харків - 1996

ДВ 33. 03

Дисертація є рукопис

Робота виконана в лабораторії рідких кристалів
Чернігівського державного педагогічного інституту
ім. Т.Г.Шевченка

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00779412 (U)

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук,
професор Готра З.Ю.

доктор фізико-математичних
наук, професор Прохоров Е.Д.

доктор технічних наук
Гриньов Б.В.

Провідна організація:

Інститут фізики напівпровідників
НАН України, м. Київ

Захист відбудеться 21 лютого 1996 р.
о 14⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої Ради
Д021101 при Інституті монокристалів за адресою:
310001, Харків, проспект Леніна 60.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту
монокристалів

Автореферат розісланий 19 січня 1996 р.

Учений секретар
спеціалізованої ради
кандидат технічних наук

Атрощенко Л.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з важливих проблем сучасної тонкоплівкової технології є пошук та розробка методів неруйнівного контролю матеріалів та виробів мікроелектроніки. Це пов'язано з все ширшим впровадженням багатошарових плівкових структур та переходом до мікронних і субмікронних технологій. В таких умовах, коли дефект окремого шару може змінити характеристики всієї структури, роль засобів неруйнівного контролю особливо зростає як при розробці та оптимізації технологічних процесів виготовлення виробів, так і в пошуку причин їх відмов. Особливо небезпечними для багатошарових структур є дефекти, пов'язані із зміною електричних параметрів шару, тому перевагою будуть користуватись методи дефектоскопії, що ґрунтуються на дослідженні електрофізичних властивостей об'єкту. Серед таких методів слід виділити метод, що базується на використанні електрооптичних ефектів в нематичних рідких кристалах (НРК). Суть його заключається в тому, що при реалізації електрооптичних ефектів в НРК на поверхні контрольованої плівки неоднорідності (дефекти) плівки викликають локальну переорієнтацію шару НРК. Цей метод порівняно простий в реалізації, не потребує складного обладнання і характеризується великою інформативністю.

При використанні НРК для дефектоскопії основним являється питання про взаємозв'язок параметрів НРК і характеру його електрооптичного відгуку над дефектом, з однієї сторони, і властивостей дефекту — з другої. Традиційно шар НРК розглядався як упорядкована система молекул, що мають анізотропію показника заломлення і анізотропію діелектричної проникливості без врахування його електропровідності і явищ, що супроводжують перенос заряду в тонких рідкокристалічних плівках. Такий підхід звужував область застосування НРК, оскільки в багатьох випадках якраз струми витоку вказували на наявність дефекту в досліджуваній структурі. Іонна провідність НРК в сукупності з підвищенням параметра порядку на межі з твердим тілом приводять до накопичення значних приелектродних зарядів в системі "провідник — НРК — провідник" і неоднорідного розподілу електричного поля в ній. Тому навіть при незначних зовнішніх напругах в

тонких плівках НРК можливі процеси поляризації, інжекції і подвійної інжекції. Дослідження цих процесів важливі не тільки для розуміння фізичної природи явищ на межі НРК — тверде тіло, але і в практичних застосуваннях, оскільки дають можливість провести відповідність між характеристиками дефекту і його відображенням в шарі НРК.

Широкий діапазон фізичних властивостей матеріалів сучасної тонкоплівкової технології (діелектричні, напівпровідникові, металічні і резистивні плівки, багат шарові діелектрики) вимагає попереднього детального аналізу поведінки НРК в неоднорідних структурах типу “метал — НРК — діелектрик — метал”, а умова неруйнівності відповідно повної технологічної проробки операцій по реалізації методу від нанесення орієнтованого шару НРК до видалення залишків рідкого кристалу і орієнтанта. Впровадження методу у виробництво стримувалось також відсутністю наукового обґрунтованого технологічного забезпечення, здатного зберегти метрологічні параметри методу при контролі елементів порядку мікрометрів на об'єктах розмірами від 1 до 10^4 мм².

Мета роботи заключалась в тому, щоб виробити єдиний підхід до проблеми використання НРК в неруйнівному контролі і на його основі розробити комплекс методик неруйнівного контролю матеріалів та виробів мікроелектроніки. Основний акцент при досягненні поставленої мети було зроблено на слідуючих завданнях:

— вивчення процесів переносу і накопичення заряду в мезофазі і впливу їх на практично важливі електрооптичні ефекти в НРК;

— дослідження поведінки НРК в неоднорідних багат шарових структурах та неоднорідних електричних полях, розробка та експериментальне обґрунтування фізичних основ методу неруйнівного контролю на основі НРК;

— дослідження впливу параметрів НРК на режими візуалізації дефектів плівок різних типу і природи, чутливість та роздільну здатність методу;

— технологічна проробка операцій по реалізації методу для дефектоскопії об'єктів від 1 до 10^4 мм² при умові його неруйнівності;

— розробка технологічного оснащення для викорис-

тання методу в післяопераційному контролі тонкоплівкового виробництва;

— розробка сукупності методик неруйнівного контролю матеріалів сучасної мікроелектроніки та виробів на їх основі.

Вказане коло питань визначає розвинутий в роботі науковий напрям: створення фізико-технічних основ і розробка технології неруйнівного контролю матеріалів та виробів мікроелектроніки на основі нематичних рідких кристалів.

Об'єктами дослідження були структури інтегральних схем на основі кремнію, діоксид кремнію, скловидні та багат шарові діелектрики, полімерні фоторезисти, плівки Al, Mo, Cr, SnO₂, моно- та полікремнію. Як активні середовища в методі контролю використовувались НРК з ряду основ Шіффа, представники ряду алкоксиданобіфенілів та їх евтектичні суміші, а також інші НРК з різним знаком і величиною анізотропії діелектричної проникливості (ЖК 440, ЖК 404И, ЖК-1268). Вказані НРК досить добре вивчені і можуть використовуватись як модельні.

Специфіка неруйнівного контролю матеріалів та виробів мікроелектроніки заключається в необхідності виявлення дефектів розмірами менше 1 мкм на елементах схем від декілька мікрометрів до пластин діаметром 150 мм. Тому основним експериментальним методом був метод оптичної поляризаційної мікроскопії, доповнений фотометричними вимірюваннями, реєстрацією вольт-амперних, вольт-контрастних характеристик. При відпрацюванні методик і технологічних операцій використовувались електрохімічні та електролітичні методи дефектоскопії, методи зондовий та РЕМ.

Наукова новизна роботи заключається в наступному:

1. Вперше проведено систематичне дослідження режимів візуалізації дефектів тонких плівок різного типу (діелектричних, напівпровідникових, металічних, резистивних) і сформульовані основні фізичні принципи неруйнівного контролю з використанням НРК.

2. Запропонована і експериментально обґрунтована модель просторово неоднорідного електричного поля над дефектом діелектрика в структурі "метал — НРК — діелектрик — метал", у відповідності з якою поле над дефектом являє собою суперпозицію зовнішнього

електричного поля і поля рухомих іонних зарядів НРК. Ці заряди являються причиною невідповідності розмірів області деформації НРК розмірам самих дефектів.

3. Встановлені межі застосування і визначено порівняльний вклад флексоелектричного і діелектричного механізмів при переорієнтації НРК з різною провідністю в неоднорідних електричних полях. Запропонована методика ідентифікації дефектів діелектрика на основі аналізу електрооптичного відгуку НРК над дефектом.

4. Вперше запропоновано і обґрунтовано застосування комбінованого електрооптичного ефекту в гомеотропному шарі НРК з позитивною анізотропією діелектричної проникливості як універсального методу дефектоскопії з використанням НРК.

Запропонований і реалізований спосіб керування чутливістю методу шляхом зміни граничних умов, температури і провідності НРК.

5. Проведена повна технологічна проробка операцій контролю матеріалів та виробів мікроелектроніки з допомогою НРК, що зробило можливим використання методу на кожному з етапів виготовлення виробів твердотільної мікроелектроніки.

На захист виносяться:

1. Метод дефектоскопії тонких плівок та виробів тонкоплівкової технології, в основі якого лежать: переорієнтація НРК неоднорідним електричним полем над дефектом, вплив дефекту на напруги переорієнтації та енергію взаємодії НРК з підкладкою. Сукупність методик неруйнівного контролю, що базуються на пошуку та реєстрації змін, викликаних дефектом, в електричних властивостях контрольованої плівки; візуалізації локальних неоднорідностей енергії взаємодії НРК з підкладкою; зв'язаної з цими неоднорідностями передпорогової переорієнтації НРК.

2. Основний фізичний принцип методу неруйнівного контролю, який ґрунтується на встановлених закономірностях переносу і накопичення заряду на межі рідкий кристал — тверде тіло в однорідних та неоднорідних електричних полях: іонні заряди нематичного рідкого кристалу формують просторово неоднорідне електричне поле над дефектом контрольованої плівки, а сам НРК

виявляє це поле у вигляді електрооптичного відгуку, розмір і форма якого визначаються струмами витоку через дефект і провідністю НРК.

3. Комбінований електрооптичний ефект в гомеотропно орієнтованому шарі НРК з додатнього анізотропією діелектричної проникливості як універсальний метод рідкокристалічної дефектокопії, оскільки в такій геометрії НРК реагує на тангенціальну складову електричного поля підкладки, що дозволяє проводити контроль як в постійних, так і в змінних електричних полях.

4. Керування чутливістю методу шляхом пригнічення теплових флуктуацій директора, з допомогою поверхнево-активних речовин, які впливають на енергію взаємодії НРК з підкладкою, а також зміною концентрації і рухливості носіїв заряду в НРК.

5. Режими дефектоскопії технологічних шарів в процесі виробництва інтегральних схем, способи ідентифікації дефектів і оцінки товщини діелектрика в структурі "метал — НРК — діелектрик — напівпровідник" та атестації діелектричної плівки.

Методи візуалізації ізолюючих р-п-переходов, розсіяних електричних полів та визначення електричних потенціалів елементів інтегральних схем (ІС).

6. Метод аналізу стану поверхні кремнію та його окислів, в якому використано локальний гомеопланарний перехід Фредерікса при слабому зчепленні НРК з підкладкою і одночасному пригніченні теплових флуктуацій директора, що дозволяє виявляти місця забруднень поверхні, області легування, опромінення електронними та іонними пучками.

Практична цінність роботи. В результаті реалізації поставлених завдань розроблений комплекс методик неруйнівного контролю матеріалів та виробів мікроелектроніки на основі НРК:

- візуалізації і аналізу дефектів тонких діелектричних плівок;
- контролю якості металізації і фоторезистивних шарів;
- виявлення місць скупчення зарядів в неоднорідних структурах;
- аналізу передпробійних станів в діелектричних плівках;
- контролю стану поверхні плівки;
- реєстрації поверхневих потенціалів виробів

тонкоплівкової технології;

— вибіркового аналізу багатошарових структур;

— оцінки товщини діелектричного шару на провідній підкладці;

— контролю окремих етапів виготовлення ІС;

— виявлення причин відмов готових виробів.

Проведена повна технологічна проробка операцій по реалізації методу в умовах виробництва, що забезпечило його сумісність з сучасними процесами виготовлення інтегральних схем та інших виробів тонкоплівкової мікроелектроніки. Запропоновані і розроблені конструкції уніфікованих пристроїв для контролю пластин діаметром до 150 мм; насадки до мікроскопів, світловоди та тримачі ІС з врахуванням специфіки методу.

При товщині шару НРК 5÷20 мкм і робочих напругах 5÷10 В досягнуто чутливості до розмірів дефекту 0,1 мкм при роздільній здатності: на поверхні 1÷2 мкм, по товщині 100 Å і по енергії 10^{-3} ерг/см².

Методики та відповідні нормативні документи впроваджені в Московському електротехнічному інституті, Науково-дослідному інституті мікроприладів, Акціонерному об'єднанні "Квазар" (м.Київ) та ін.

Апробація роботи. Основні матеріали роботи доповідались та обговорювались на V (Одеса, 1983 р.), VI (Галле, Німеччина, 1985 р.), VII (Пардубіце, Чехія, 1987 р.), VIII (Краків, Польща, 1989 р.) Міжнародних конференціях соц. країн з рідких кристалів; "Європейській літній конференції з рідких кристалів (Вільнюс, 1991 р.); Міжнародній школі-конференції "Комп'ютерні технології" (Львів, 1994 р.); V (Іваново, 1985 р.), VI (Чернігів, 1988 р.) Всесоюзних конференціях з рідких кристалів та їх практичного використання; Всесоюзних семінарах "Оптика рідких кристалів" (Москва, 1987 р.; Красноярськ, 1990 р.); IV (Запоріжжя, 1987 р.), V (Чернівці, 1989 р.), VI (Кишинів, 1991 р.) Всесоюзних конференціях "Аналітичні методи дослідження матеріалів та виробів мікроелектроніки; I конференції "Технічна діагностика і неруйнівний контроль на Україні" (Дніпропетровськ, 1994 р.); Всесоюзній нараді "Електрооптика межі поділу рідкий кристал — тверде тіло" (Москва, 1985 р.); Українських нарадах з рідких кристалів (Чернігів, 1984 р., Славське, 1986 р.); XI Українській

школі-семінарі “Спектроскопія молекул і кристалів (Харків, 1993 р.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 36 публікаціях, в 2 авторських свідоцтвах та 3 патентах, список яких приведений в кінці автореферату, а також тезах вказаних вище конференцій. За результатами робіт випущено 7 науково-технічних звітів, зареєстрованих в ЦНДІ “Електроніка” (м. Москва).

Особистий внесок автора в отриманні наукових результатів, викладених в роботі, полягає в дослідженні процесів переносу і накопичення заряду в тонких шарах рідких кристалів, механізмів поляризації рідких кристалів постійним електричним полем та впливу їх на практично важливі електрооптичні ефекти в нематичних рідких кристалах; створенні фізичних та математичних моделей неоднорідних електричних полів і експериментальному дослідженні особливостей переорієнтації НРК в неоднорідних електричних полях і при неоднорідних граничних умовах та формуванні на їх основі моделі просторово-неоднорідного електричного поля над дефектом діелектрика в структурі “метал — НРК — діелектрик — метал ” і основного фізичного принципу методу неруйнуючого контролю на основі НРК; реалізації методу в комплексі методик неруйнівного контролю матеріалів та виробів мікроелектроніки, технологічній проробці операцій нанесення орієнтованих шарів НРК на контрольовані поверхні, розробці водних та безводних технологій видалення залишків НРК та орієнтанта; дослідженні та оптимізації режимів дефектоскопії тонких діелектричних, металічних, резистивних і напівпровідникових плівок та технологічних шарів у виробництві інтегральних схем; розробці вимог до технологічного обладнання з метою суміщення методу з процесом сучасного тонкоплівкового виробництва, конструкцій вимірювальних комірок, приставок до мікроскопів зі світловодами, тримачів інтегральних схем, що враховують специфіку методу, порівняльній оцінці методу і його метрологічних параметрів з класичними методами дефектоскопії.

Дослідження дефектів, виявлених методом НРК, з допомогою растрової електронної мікроскопії та вторинної маспектроскопії, розробка робочих місць для контролю методом НРК, виконані спільно з співробітниками науково-

дослідного інституту мікроприладів (м.Київ).

Всі основні положення та результати, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. Із робіт, що опубліковані в співавторстві, використані тільки ті результати, в які автор вніс визначальний вклад (в постановку завдання, участь в експериментах, обговорення результатів і формування висновків).

Структура та об'єм дисертації.

Дисертація складається з вступу, шести розділів, доповнення, висновків та списку літератури з 204 найменувань. Вона містить 253 сторінки машинописного тексту, 13 таблиць та 127 ілюстрацій.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність дослідження, сформульовані мета і конкретні завдання роботи, даний аналіз стану проблеми, приведені основні положення, що виносяться на захист, наукова новизна та практична цінність роботи.

Розділ I. Електрофізичні процеси в структурах "метал НРК — метал".

При використанні НРК в неруйнівному контролі в більшості випадків формується багат шарова структура, в яку входять НРК і контрольована плівка. В даному розділі розглянуто основні фізичні явища, що супроводжують протікання струму в НРК в постійних і низькочастотних змінних електричних полях.

Проведено аналіз експериментальних даних по електропровідності термотропних рідких кристалів (РК), в тому числі і НРК. Носіями струму в НРК являються іони, які мають в основному домішкове походження. Вплив очищення на темнову провідність НРК показано на прикладах МББА і холестерилпеларгонату. Найбільш сильно провідність падає при перших циклах очищення; але і при виході температур фазових переходів на насичення провідність при очищенні знижується. це дає можливість ввести більш чутливий критерій чистоти РК — питому провідність.

При введенні домішок в РК встановлено, що провідність визначається не тільки концентрацією домішки, але й міжмолекулярною взаємодією домішки і РК. Показані можливість легування РК і утворення в них стійких

радіаційно індукованих носіїв при радіаційному опроміненні.

Експериментально досліджені релаксаційні процеси при протіканні струму в НРК: релаксація прямого струму і струму деполяризації при виключенні зовнішнього поля. Заряди, що накопичуються в системі “метал — НРК — метал”, на 2÷4 порядки більше значень, виходячи з геометричної ємності зразка. Це свідчить про формування подвійних приелектродних шарів, які утруднюють обмін зарядами в системі РК — електрод. Розрахунки показують, що напруженість електричного поля в приелектродних шарах на 2÷3 порядки більше поля в об'ємі НРК. Тому при аналізі розподілу напруги в структурах типу “метал — НРК — діелектрик — метал” слід врахувати не статичну, а ефективну діелектричну проникливість НРК, яка досягає максимальних значень при частотах, близьких до нуля.

Оцінка співвідношень між рухомим і накопичуваним зарядами показала, що в електрично стабільних НРК із збільшенням напруги та часу дії поля накопичуваний заряд росте, а концентрація носіїв в об'ємі падає. В іншій групі НРК заряд, що накопичується, більш ніж на порядок перевищує рухомий заряд і концентрація носіїв в об'ємі практично постійна. Дослідження показали, що в цих НРК одночасно з розділенням носіїв в електричному полі відбувається дисоціація молекул на іони. Розраховані значення коефіцієнтів дисоціації і концентрації іонів узгоджуються з відомими даними.

При дослідженні релаксації струмів в НРК на вольтамперних і вольт-фарадних характеристиках виділяються дві характерні ділянки. В припущенні, що вони відповідають розділенню об'ємних носіїв і інжекції з електродів проведені теоретичні розрахунки співвідношень між струмом, напругою, накопичуваним зарядом і часом дії поля та їх експериментальна перевірка. Встановлено, що в слабких електричних полях переважає поляризація шару НРК власними (об'ємними) носіями; підвищення напруги веде до інжекції носіїв з електрода і захоплення їх на нейтральні молекули з утворенням іонів. Максимальний рівень інжекції спостерігався з електрода Sn, легованого Se, при цьому інжектувалися дірки: інжекція електронів з утворенням негативних іонів викликала короткочасним імпульсом напруги амплітудою 150÷200 в.

Напруга переходу U_0 від власного до інжекційного механізму поляризації визначається концентрацією власних носіїв. В МББА з провідністю $2 \cdot 10^{-8}$ См/м $U_0 \cong 5$ В; при оцистці НРК до провідності $3 \cdot 10^{-9}$ См/м $U_0 = 1,5 \div 2$ В.

В цілому релаксація струму в НРК обумовлюється взаємозв'язаними процесами накопичення приелектродних іонних зарядів і втратами їх шляхом прориву приелектродних потенціальних бар'єрів. Підтвердженням цього являється відкриття в НРК зростаюча релаксація струму при постійній зовнішній напрузі. Вона спостерігається в області напруг, що відповідають максимальній неоднорідності поля в НРК і її закономірності не залежать від величини і знака діелектричної анізотропії. Це свідчить, що зростаюча релаксація струмів в НРК обумовлена приелектродними, а не об'ємними процесами. З врахуванням поляризації на носії в об'ємі НРК буде діяти не зовнішня, а ефективна напруга: $U_{\text{еф}} = (U - U_{\text{пол}}) / \alpha$, де $U_{\text{пол}}$ — зворотня напруга поляризації; α — параметр, що описує спад напруги на приелектродних шарах.

Розділ II. Фізичні основи методу неруйнівного контролю, матеріалів та виробів мікроелектроніки з використанням НРК.

Розглянуті результати досліджень переорієнтації НРК в неоднорідних електричних полях та при неоднорідних граничних умовах в провідному і “непровідному” режимах. Найбільший вплив процеси переносу заряду чинять на електрооптичні ефекти в НРК з від'ємною анізотропією діелектричної проникливості ($\Delta\epsilon < 0$), оскільки в такій геометрії діелектричному обертовому моменту протидіє гідродинамічний момент іонного потоку.

Періодична деформація НРК приелектродними іонними зарядами виявлена при дифракції лазерних променів в орієнтованому шарі НРК Н-37. Ця деформація починається при напругах порядку половини порогу переорієнтації і проявляється включно до напруг дроблення доменної структури.

Про суттєвий вплив процесів переносу і накопичення заряду на хід електрооптичних ефектів в НРК свідчать також:

— різке підвищення порогів переорієнтації в структурах “метал — НРК — діелектрик — метал” при частотах менше 20 Гц;

— вплив електричної обробки зразка на пороги переорієнтації;

— збереження переорієнтації після виключення електричного поля.

В структурі “метал — НРК — діелектрик — метал” (М-НРКД-М) при поданні прямокутного імпульсу напруги одночасно з переорієнтацією відбувається поляризація шару НРК і коли ефективна напруга стане менша порогу переорієнтації $U_{пор}$, НРК повернеться до початкового стану. Якщо за час дії поля буде досягнуто умови $U_{пол} > U_{пор}$, в кінці імпульсу спостерігатиметься подібна релаксація НРК. Переорієнтація НРК полем іонних зарядів використана при візуалізації розсіяних електричних полів ІС та пошуку передпробійних станів в діелектричних плівках.

Дослідження переорієнтації НРК в неоднорідних електричних полях проводились в спеціально створеній тестовій структурі, яка давала можливість одночасно діяти на НРК однорідним і неоднорідним полями. Показано, що в неоднорідних полях вольт-контрастні характеристики НРК стають безпороговими і при товщинах рідкокристалічного шару не більше 20 мкм являються монотонними. Це дає можливість за інтенсивністю відбитого світла визначити потенціал відповідного елемента ІС.

Електричне поле над дефектом діелектрика в структурі М-НРК-Д-М було використано як модель неоднорідного поля між точкою і безконечною площиною. При використанні В-ефекту (гомеотропний шар НРК з $\Delta\epsilon < 0$) і S-ефекту (планарно орієнтовний НРК з $\Delta\epsilon > 0$) переорієнтація НРК над дефектом діелектрика відбувається при напругах, менших $U_{пор}$ в однорідних полях, а розмір області переорієнтації залежить від напруги, і вязкості НРК. В загальному випадку свій вклад в переорієнтацію НРК дають пружна енергія, енергія дипольної взаємодії, флексоелектрична і поверхнева поляризація. Оскільки при В- і S-ефектах НРК реагує на нормальну складову електричного поля підкладки E_n , запропоновано використати для візуалізації неоднорідного електричного поля над дефектом діелектрика гомеотропний шар НРК з $\Delta\epsilon > 0$ (S-В-ефект).

Комбінований S-В-ефект має слідуючі переваги при використанні його в дефектоскопії:

— ширший діапазон значень відомих нематиків з $\Delta\epsilon > 0$,

що відкриває нові можливості для оптимізації параметрів контролю;

— НРК з $\Delta\epsilon > 0$ краще орієнтується гомеотропно навіть з вільною поверхнею;

— реакція на тангенціальну складову електричного поля підкладки в сукупності з високою чутливістю ($\Delta\epsilon > 10$) дозволяє виявляти самі незначні неоднорідності. В місцях однорідного поля гомеотропна орієнтація стабілізується, підвищуючи контраст;

— завдяки кінечній провідності НРК вдається підсилити тангенціальну складову поля і виявляти потенціальні бар'єри на поверхні кристалу;

— геометрія S-B-ефекту дозволяє використовувати для дефектоскопії змінні електричні поля, тобто досліджувати різні технологічні шари і структури під шаром діелектрика.

За допомогою S-B-ефекту оцінено вклад флексоелектричної та поверхневої поляризації в переорієнтацію шляхом зміни граничних умов на протилежні, тобто поворотом молекул НРК на 180° . Поворот гомеотропного шару Д205 ($\Delta\epsilon = +12$) виконано підбором поверхнево-активних речовин (орієтантів), при цьому напруги переорієнтації для різних комбінацій орієтантів змінюються на $15 \div 20\%$. Знехтувавши поверхневою поляризацією, оскільки розміри області переорієнтації мають порядок товщини РК — шару, для типових НРК розраховано вклад флексоелектричного заряду в переорієнтацію. В постійному електричному полі наведений флексоелектричний заряд буде екрануватись рухомих іонним зарядом; з їх рівності випливає, що для переваги флексоелектричного механізму переорієнтації провідність НРК повинна бути не більше 10^{-11} См/м.

В припущенні діелектричного механізму переорієнтації НРК з $\Delta\epsilon \neq 0$, S-B-ефект може бути використаний для дефектоскопії діелектричних плівок як в постійних, так і в змінних електричних полях, тоді як використання B- і S-ефектів в змінних полях неможливе. Для вибору оптимальних режимів проведено розрахунок розподілу напруги в структурі М-НРК-Д-М в діапазоні частот $0 \div 200$ кГц. При цьому товщини, провідності та діелектричні проникливості задавались параметрично; ефективна діелектрична проникливість НРК вводилась як функція частоти і провідності. Показано, що врахування провідності НРК є обов'язковим, тоді як провідністю діелектрика можна

нехтувати при частотах більше $2+5$ Гц.

Результати розрахунків дозволяють запропонувати два підходи до оцінки товщини діелектрика в структурі М-НРК-Д-М. Для товщин діелектрика більше 500 \AA напруга переорієнтації НРК при частотах $\nu \geq 1000$ Гц визначається товщиною діелектрика. З метою запобігання пробом тонких діелектричних плівок їх товщина може бути визначена по частоті переорієнтації НРК при фіксованій напрузі, що подається на структуру.

Для подальшого вивчення механізмів переорієнтації НРК в неоднорідних електричних полях було розраховано розподіл потенціалу та складових E_n і E_t електричного поля над дефектом діелектрика. Промодельовано на ЕОМ розподіл електричних полів над дефектами типу мікрощілини, металічного включення та вентиляного, показано, що конфігурації E_n і E_t складових неоднорідного електричного поля над цими дефектами якісно співпадають.

Оптичні сліди дефекту в гомеотропних шарах НРК з $\Delta\epsilon < 0$ і $\Delta\epsilon > 0$ являють собою осесиметричні коноскопічні фігури і в цілому відповідають розподілу E_n і E_t , але розміри слідів в $10+100$ раз перевищують розміри неоднорідності поля. Це означає, що дефект являється тільки першо-причиною, а результуюче неоднорідне поле над дефектом обумовлене переносом і накопиченням іонних зарядів.

Прямими експериментами підтверджена наявність приелектродних іонних зарядів, що формують просторово неоднорідне поле над дефектом діелектрика. Структура SnO_2 — НРК — SiO_2 — Si з дефектами SiO_2 витримувалась в постійному електричному полі і скло з SnO_2 зміщувалось. Після цього до структури прикладалась змінна напруга і переорієнтація НРК спостерігалась як в областях дефектів, так і в місцях, які раніше знаходились над дефектами. Це означало, що разом з електродом змістився і приелектродний іонний заряд. Як показано було раніше, ефективна діелектрична проникливість НРК має значення 10^3+10^4 і аномально велика приелектродна ємність втримує локалізований іонний заряд і дозволяє переміщувати його. Оскільки ефект переміщення спостерігається при від'ємній полярності на Si, механізм формування поля над дефектом уявляється наступний.

Між від'ємним гомозарядом, що формується біля

точкового катоду (дефекту) і плоским анодом формується неоднорідне електричне поле, і оскільки від'ємний гомозаряд екранує поле біля дефекта, поле біля анода підсилюється. Створюються умови для інжекції додатніх носіїв з аноду і з часом конфігурація поля над дефектом змінюється. Одночасно в об'ємі НРК відбувається процес розділення власних носіїв, тобто формуються гетерозаряди. В результаті конфігурація неоднорідного електричного поля над дефектом визначається взаємозв'язаними процесами утворення гомо- і гетерозарядів. Позитивний заряд над дефектом (біля аноду) розмитий на відносно великі віддалі, чим і пояснюється невідповідність між розмірами дефекту і його електрооптичного відгуку в НРК.

Розділ III. Технологічне забезпечення методу неруйнівного контролю на основі НРК.

Розглянуті фактори, що впливають на орієнтацію НРК на поверхні підкладки, розроблені методики нанесення орієнтованих шарів НРК та видалення залишків НРК і орієнганта. Розроблені конструкції уніфікованих пристроїв для контролю пластин діаметром до 150 мм, тримачів ІС та приставок до мікроскопів, обґрунтовані вимоги до обладнання робочих місць контролю методом НРК.

Вибір методів орієнтації НРК виходив з умов однорідності та репродуктивності орієнтації на об'єктах від 1 мм^2 до 10^4 мм^2 при відсутності будь-яких впливів на контрольовану поверхню. Дослідження показали, що для реалізації цих умов оптимальними являються методи орієнтації із застосуванням поверхнево-активних речовин (ПАВ), які змінюють поверхневу енергію підкладки. Визначені оптимальні концентрації ПАВ в розчинниках, що забезпечують однорідну орієнтацію НРК. Для спрощення операції одержання орієнтованих шарів НРК запропоновано "потрійну суміш" у складі "НРК-розчинник-ПАВ". Розраховані і експериментально перевірені оптимальні співвідношення між компонентами. Наприклад, в суміші МББА — толуол-лецитин вони рівні: 80% — 20% — 0,15%.

Визначальним фактором неруйнівності контролю, як і показником досконалості тонкоплівкової технології являється чистота поверхні. Показано, що забруднення поверхні залишками НРК та орієнганта суттєво залежить від часу контакту з підкладкою. Пророблені послідовності операцій очистки поверхонь від залишків НРК та орієнганта, в яких використано

характерні для тонкоплівкової технології реагенти: гексан, толуол, H_2O_2 , $K_2Cr_2O_7$, деіонізована вода та ін.

Розроблено конструкції пристроїв для контролю пластин діаметром 76, 100, 120, 150 мм, вимоги для яких формувалися виходячи з специфіки методу:

— плоска провідна основа високого ступеня чистоти з контактним вузлом;

— знімна верхня частина з провідним склом;

— можливість формування на пластині, що знаходиться в пристрої, орієнтованого шару НРК заданої товщини;

— простота збирання і розбирання з одночасною жорсткою фіксацією пластини та частин конструкції пристрою;

— можливість транспортування та мала товщина.

Для зменшення вартості конструкції запропоновано замість металічної основи використовувати некондиційні пластини фотошаблонів (в тому числі і фотошаблони, зняті з виробництва).

Виходячи з основних типорозмірів вітчизняних ІС, розроблені варіанти конструкцій тримачів для контролю технологічних шарів в процесі виробництва, виявлення відмов та аналізу режимів роботи ІС. В основу конструктивних рішень лягли два напрями. Згідно першого на базі поверхні ІС формувалась комірка з РК, при цьому прозорий електрод з провідною плівкою жорстко фіксувався відносно корпусу ІС, а кріплення електрода служило і провідним контактом. Прозорі електроди-світловоди являли собою скляні циліндри, паралелепіеди, зрізані конуси, чи піраміди, покриті провідним прозорим шаром SnO_2 .

Другий напрям базується на оптико-механічному з'єднанні прозорого електрода-світловода з об'єктивом мікроскопа. В цьому випадку необхідна додаткова установка нижнього торця світловода по відношенню до предметної площини мікроскопа, при якій настройка мікроскопа на різке зображення автоматично задасть необхідну товщину шару НРК. Для суміщення світловода з полем зору і оптичною віссю мікроскопа розроблені насадки до мікроскопів, в яких передбачена можливість переміщення світловода вздовж трьох осей координат. Розроблена конструкторська та технічна документація на пристрої, насадки та тримачі; виготовлені зразки успішно пройшли випробування в НДІ мікроприладів та АО "Квазар".

При розробці вимог до обладнання робочих місць для

ДІБ ім. В. Стефан
АН України

контролю методом НРК, розглянуті три варіанти в залежності від ступеня складності:

— робоче місце для мобільного візуального контролю дефектності тонких плівок;

— установка для контролю напівпровідникових пластин та ІС із зчитуванням робочого поля пластини за заданою програмою;

— автоматизований комплекс для аналізу якості та відбраковки технологічних шарів і готових виробів.

Виготовлено дослідний зразок установки контролю напівпровідникових пластин, розроблено конструкторську та технічну документацію (ІІ.М2.792.000).

Розділ IV. НРК в післяопераційному контролі тонкоплівкової технології.

Розглянуті особливості застосування методу на різних етапах тонкоплівкової технології. Проведено аналіз режимів візуалізації дефектів діелектричних плівок, металізації і напівпровідникових структур.

Розглянута фізична модель дефектоскопії діелектричних плівок в структурі М—НРК—Д—М; встановлено, що локальна переорієнтація НРК в такій структурі при напругах живлення, близьких до $U_{\text{пор}}$ свідчить про наявність дефекту або області з підвищеною провідністю в діелектричній плівці.

Відпрацювання режимів візуалізації дефектів діелектричних плівок проводилось на модельних структурах і реальних об'єктах з наступним дослідженням дефектів іншими методами (в першу чергу РЕМ). Для ідентифікації дефектів діелектричних плівок як критерій використані вид і поведінка сліду дефекту при зміні режиму живлення структури. Якщо в структурі SnO_2 — НРК — SiO_2 — Si напруга візуалізації дефекту SiO_2 не змінюється при зміні полярності, дефект являє собою відкриту пору. Вентильні дефекти характеризуються різними напругами візуалізації U^+ і U^- (по відношенню до Si).

Місця накопичення зарядів в діелектрику проявляються не зразу, через певний час (до 60 с) з моменту подачі напруги. Відкрито і досліджено дефекти діелектрика, названі електрично активними. Слід такого дефекту квазіперіодично змінюється з часом. Запропонована і експериментально обґрунтована модель цього дефекту, обумовленого виникненням передпробійного стану в діелектричній плівці.

В області дефекту послідовно відбувається накопичення іонів лужних металів і нейтралізація заряду внаслідок ефектів сильного поля.

Показано, що в окислі SiO_2 , одержаному термічним окисленням Si, переважають дефекти вентильного типу, в піролітичному окислі SiO_2 основну масу дефектів складають пори, сторонні вclusions і електрично активні дефекти.

При зменшенні товщини окислу зростає доля дефектів типу наскрізних пор; в термічному окислі SiO_2 товщиною до 500 \AA з максимального числа дефектів до 70% складають наскрізні пори.

Експериментально досліджена переорієнтація НРК на сходинах окислу в структурі $\text{SnO}_2 - \text{НРК} - \text{SiO}_2 - \text{Si}$ і реалізована методика оцінки товщини діелектричного шару, запропонована в розділі II.

Проведено експериментальне дослідження і виявлені типові дефекти ДКЕД та КСДІ-структур: брак при шліфовці пластин перед формуванням затворів та дефектність підзатворних окислів ОПЗІ і ОПЗІІ. Розглянута модель дефекту підзатворного окислу і запропоновано спосіб оцінки струму втрат по напрузі переорієнтації НРК над дефектним затвором.

Методика візуалізації дефектів діелектрика не може бути перенесена на металізацію в силу великої різниці в їх провідності. В структурі $\text{M} - \text{НРК} - \text{M}$ при досягненні порогу переорієнтація НРК відбувається незалежно від наявності чи відсутності мікродефектів металізації. Однак в місцях неоднорідностей підкладки слід чекати зміни в поверхневій енергії НРК, що може проявитись в локальній зміні орієнтації або $U_{\text{пор}}$.

На моделях дефектів металізації в структурах $\text{SnO}_2 - \text{НРК} - \text{Cr}$, $\text{SnO}_2 - \text{НРК} - \text{Mo}$, виготовлених на основі фотошаблонів, встановлена область напруг візуалізації дефектів, названа передпороговою. Ця область лежить безпосередньо перед порогом переорієнтації НРК в бездефектній структурі і її ширина обернено пропорційна величині $\Delta\epsilon$. Дефекти металізації виявляються в змінних електричних полях і в постійному полі при від'ємній полярності на дефектній підкладці. При аналізі суцільності металічних плівок з допомогою S-B-ефекту відбувається оконтурювання металізації (чи дефекту), оскільки візуалізується тангенціальна складова поля підкладки. Цей

же ефект дозволив виявляти резистивні шари всередині багат шарової структури. В основу методики покладено явище резонансу, при якому на досліджуваному шарі буде максимальне падіння напруги. Дефекти фоторезистивних шарів фотошаблонів також виявляються в передпороговій області напруг при використанні НРК з $\Delta\epsilon > 0$.

Залежність напруг переорієнтації НРК від стану поверхні використана для аналізу поверхні як металізації і фоторезисту, так і кремнію та окислу кремнію. Але пороговий характер переорієнтації не дозволяє досягнути граничної чутливості. Тому запропоновано для аналізу стану поверхні використати перехід в НРК від нормальних граничних умов до тангенціальних, індукований неоднорідностями енергії зчеплення НРК з підкладкою. При використанні гранично малих концентрацій орієнанта, який орієнтує молекули НРК нормально до підкладки, похідна $d\alpha/dF$ (α — кут нахилу до підкладки; F — енергія зчеплення НРК з підкладкою) набирає великих значень і незначні зміни F приведуть до переорієнтації.

Виконано аналіз впливу теплових флуктуацій директора на візуалізацію неоднорідностей підкладки. Неоднорідності поверхні будуть видимі в поляризованому світлі тоді, коли $\alpha > \Theta$ (Θ — середньоквадратичний кут теплових коливань директора), тому охолодження зразка приведе до підвищення роздільної здатності. Цим же способом виявлені ділянки поверхні Si і SiO_2 , опромінені електронним пучком з енергією ≈ 20 кеВ.

Експериментально доведена можливість виявлення областей легування Si домішками р- чи п-типу. Тонкоплівкові р-п-переходи використовуються як елементи схеми, так і в якості ізолюючих один елемент від другого. Вихід переходу на поверхню кристала супроводжується появою локального електричного поля з перевагою тангенціальної складової. Показано, що тонкоплівкові р-п-переходи візуалізуються в гомеотропному шарі НРК з $\Delta\epsilon > 0$ без покрівного скла (з вільною поверхнею) при збереженні контрасту і роздільної здатності. Виявлено явище переорієнтації НРК полем об'ємного заряду, що накопичується над переходом, запропонований спосіб оцінки напруги пробю р-п-переходу.

Розділ V. Метод НРК в дослідженні ІС та їх структур.
Досліджені можливості НРК в виявленні відмов та

вивченні режимів роботи ІС. При цьому шар НРК, що знаходиться під певною різницею потенціалів, являється зондом, який аналізує той чи інший елемент схеми.

Описана методика перевірки якості електричного контакту провідних шин і металізації в контактних вікнах з кристалом, запропоновано оцінювати опір залишкового окислу в контактному вікні по напрузі переорієнтації НРК.

При відпрацюванні методики перевірки якості технологічних шарів визначалась дефектність міжшарового та захисного діелектриків, в т.ч. і комбінованого: фосфоросилікатне скло (ФСС) + окисел (SiO_2 , Al_2O_3). Встановлено, що дефектність діелектрика з рельєфною поверхнею в 4+5 раз більше, ніж на пластинах без рельєфу. Дефектність плівок ФСС сильно залежить від товщини, збільшення товщини ФСС в 2 рази зменшило дефектність в 10+30 раз. Додатковий шар Al_2O_3 на ФСС знижує дефектність і зменшує її залежність від товщини шару ФСС. Виявлено, що дефектність міжшарової ізоляції на основі ФСС суттєво залежить від способу її одержання і технологічних процесів обробки; на пластинах відмічені області з аномально високими густинами дефектів до 10^4 1/см². Подальші експерименти показали, що ці аномалії появляються в місцях забруднень діелектричної плівки.

Паралельно з аналізом дефектності технологічних шарів проведено перевірку неруйнівності методу НРК. З партії пластин, підготовлених для схеми МОП БІС 1810ВМ86, після окислення під затвор, частина ($\cong 20\%$) контролювалась методом НРК і після відмивки поверталась для проходження повного технологічного циклу виготовлення БІС. Виявилось, що в партії пластин, перевірених методом НРК, процент браку не змінився.

При багатошаровій технології дефекти, внесені в структуру, будуть впливати на якість наступних шарів. Можливості НРК в аналізі багатошарових структур експериментально перевірялись на пластинах кремнію типу КДБ, які послідовно проходили всі технологічні операції. На стадіях формування схованого n^+ шару, епітаксії Si-n і окислення поверхні до товщини SiO_2 0,5 мкм з допомогою НРК виявляють дефекти SiO_2 і рельєф над n^+ областями.

Після підготовки вікон для дифузії бору, формування ізолюючих p-n-переходів, вирощування міжшарового SiO_2 і розкриття контактних вікон виявляються межі ізолюючих

p-n-переходів, відкриті контактні вікна, рельєф SiO_2 над p-p-областями і прихованим p^+ шаром. На слідуючій стадії формувались еміттерні області p^+ типу, які є складовими транзисторів, діодів, плівкових конденсаторів і т.д. Показано, що при використанні S-B-ефекту вибором режиму живлення можна виділяти ті чи інші елементи схеми під шаром окислу чи в об'ємі структури.

Одним з методів діагностики ІС є вивчення поверхневих потенціалів і їх розподілу. При використанні ефектів керованого двопротонезаломлення НРК переорієнтовується полем самої ІС, отже відпадає необхідність в другому електроді і появляється можливість досліджень безпосередньо в процесі роботи схеми.

Запропоновано спосіб визначення величини і знаку потенціалів елементів ІС та пристрій для його реалізації. В основі способу лежить аналіз ВКХ шару НРК на поверхні ІС при монотонній зміні потенціалу на покривному склі.

Показана перспективність використання нематохонлестеричних систем (НХС) з індукованою спіральною структурою в НК. Ці системи являють собою основу (НРК з $\Delta\epsilon > 0$ чи $\Delta\epsilon < 0$) і оптично активну добавку, яка задає певний крок спіралі. Вони зберігають всі переваги і НРК (низька вязкість, низькі пороги) і холестеричних РК (швидкодія, крутизна ВКХ), причому їх властивості можна змінювати в широких межах підбором основи і добавки. Основні досліді проведено з НХС на основі D205 і добавкою з ряду похідних l-аріліденментагонів. Крок спіралі визначився концентрацією добавки.

НХС використано для виявлення забруднень і нерівномірності товщини діелектрика, рельєфу поверхні напівпровідникової пластини. При цьому досягнута крутизна вольт-товщинної характеристики 40 В/мкм (для МББА 15 В/мкм).

Зони підвищеного тепловиділення в кристалі ІС виявлені з допомогою фазового переходу НРК — ізотропна рідина. Для чистих НРК інтервал температур переходу в умовах, близьких до рівноважних складає 0,1 К і менше, що забезпечує високу чутливість.

Підвищена роздільна здатність реалізується в динамічному режимі при термостатуванні ІС.

При використанні НРК для виявлення причин відмов ІС та їх структур встановлено, що основні причини відмов

структур типу $\text{Si} - \text{SiO}_2 - \text{Al} - \text{SiO}_2$ є розриви і тріщини SiO_2 над виступами на поверхні Al , короткі замикання між сусідніми доріжками. Дослідження дефектів, виявлених методом НРК, з допомогою РЕМ та мас-спектрометрії, підтвердили висновки про їх природу.

Розділ 6. Метрологічні параметри методу НРК в неруйнуючому контролі.

Експериментально досліджено вплив параметрів НРК, в першу чергу провідності, на роздільну здатність і чутливість методу. Підвищення концентрації носіїв заряду в НРК збільшує чутливість і одночасно зменшує роздільну здатність; при підвищенні рухливості носіїв чутливість збільшується і зберігається роздільна здатність, що узгоджується з моделлю просторово неоднорідного електричного поля над дефектом. З ряду орієтантів лецитин найменше впливає на провідність, але, впроваджений в об'єм НРК, знижує температуру ізотропного переходу.

При виборі оптимального діапазону товщин НРК встановлено, що зміна товщини шару НРК більш сильно впливає на метрологічні параметри методу в неоднорідних електричних полях. Підвищення товщини шару НРК з 5 до 20 мкм знижує напругу візуалізації дефектів в 1,5 рази, а роздільну здатність в 3 рази.

Узагальнені дані попередніх досліджень, виділені оптимальні режими дефектоскопії тонких плівок та пліткових структур, сформовані основні вимоги до рідкокристалічних матеріалів:

- інтервал температур існування мезофази, включаючий кімнатні;
- максимальне значення оптичної анізотропії;
- достатня (близька до одиниці) діелектрична анізотропія;
- понижена вязкість НРК.

Оскільки провідність НРК, енергія його взаємодії з підкладкою і температура являються параметрами, що визначають чутливість методу, вони вибираються, виходячи з конкретного застосування.

Оцінка чутливості і інформативності методу проводилась в порівнянні з електрохімічним, електролітичним і електрографічним методами (див. таблицю).

Густина дефектів SiO_2 , які виявлені різними методами ($1/\text{см}^2$). Товщина НРК 50 мкм.

Зразок	Метод аналізу		
	НРК	Бульбашковий	Мідно-желатиновий
Плоска пластина	2	1,6	1,2
Пластина з рельєфом	35	14	8

Після вирощування окислу партія пластин ділилась на групи, одна з яких була контрольною; на інших дефектність діелектрика перевірялась вказаними методами. Потім на всі пластини наносили сітку електродів з полікремнію і вимірювали напруженість електричного поля пробою діелектрика. При малих полях спостерігаються незначні відхилення в густині дефектів, в дальнішому результати для трьох груп пластин співпадають.

Показано, що метод НРК в 1,5÷4 рази більше чутливий, при напругах в 3÷5 раз менших і виявляє крім наскрізних пор сторонні включення, локальні підвищення провідності (закриті пори), місця скупчення зарядів. В силу його інформативності і простоти реалізації метод НРК запропоновано використовувати для атестації інших методів контролю і самих діелектричних плівок. Для атестації діелектрика по виходу придатних виробів на поверхню діелектричної плівки наноситься система Al електродів, які по формі і розміщенню відповідають топології кристалів на пластині і досліджується переорієнтація НРК над електродами. Даний спосіб є більш точний, оскільки придатний для довільного розподілу дефектів по пластині. Запропоновано пристрій для атестації діелектричних плівок методом НРК.

Основні результати і висновки.

1. На основі системних досліджень режимів дефектоскопії тонких плівок та виробів тонкоплівкової мікроелектроніки з допомогою нематичних рідких кристалів, запропонованих та експериментально підтверджених моделі просторово неоднорідного електричного поля в тонкому шарі НРК над дефектом і основного фізичного принципу контролю методом НРК створено комплекс методик неруйнівного контролю матеріалів та виробів мікроелектроніки і їх технологічне забезпечення.

2. Досліджені процеси переносу та накопичення заряду в тонких плівках НРК, який являється причиною неоднорідного розподілу напруги по товщині НРК навіть

при однорідних граничних умовах і проявів ефектів сильного поля: інжекції і наростаючої релаксації струму при порівняно низьких напругах живлення. Розроблена модель, проведені розрахунки і експериментальна перевірка розподілу напруги в структурі “метал НРК — діелектрик — метал” з врахуванням ефективної діелектричної проникливості НРК, обумовленої приелектродними іонними зарядами. Запропонований неруйнівний спосіб визначення товщини діелектрика в структурі “метал — НРК — діелектрик — метал”.

3. Експериментально вивчені особливості переорієнтації НРК в неоднорідних електричних полях при реалізації провідного і непровідного режимів. Показано, що НРК при використанні в неруйнівному контролі слід розглядати як сукупність двох підсистем: рухомих іонних зарядів і анізотропних молекул НРК. Запропонована і експериментально підтверджена модель просторово неоднорідного електричного поля над дефектом діелектрика в структурі “метал — НРК — діелектрик — метал”, згідно якої це поле є суперпозицією зовнішнього електричного поля і поля приелектродних іонних зарядів. Сформульовані основні принципи методу:

— іонні заряди НРК формують просторово неоднорідне електричне поле над дефектом, а сам НРК виявляє ці неоднорідності у вигляді електрооптичного відгуку;

— комбінований S-B-ефект в гомеотропно орієнтованому шарі НРК з $\Delta\epsilon > 0$ є універсальним методом рідкокристалічної дефектоскопії;

— керування чутливістю методу може здійснюватись шляхом зміни енергії взаємодії НРК з підкладкою, провідності НРК і температури.

4. Відпрацьовані методи одержання орієнтованих шарів НРК на контрольованих поверхнях, водні та безводні технології очищення пластин від залишків НРК та орієнтанта. Визначені оптимальні концентрації в сумішах “НРК — орієнтант-розчинник”, які забезпечили швидку і якісну підготовку орієнтованих шарів рідкого кристалу. Розроблена технологічна оснастка для реалізації методу, яка включила тримачі напівпровідникових пластин діаметром до 150 мм та ІС різних типорозмірів, світловоди з провідним покриттям і світловодні насадки до мікроскопів.

5. Експериментально досліджені і визначені оптимальні умови візуалізації дефектів діелектричних плівок, металізації і фоторезистивних шарів. Запропонована класифікація дефектів діелектрика, в основі якої лежить аналіз електрооптичного відгуку НРК над дефектом. Розроблено спосіб аналізу стану поверхні кремнію та його окислів, в якому використовується індукований неоднорідностями енергії зчеплення НРК з підкладкою гомеотропнопланарний перехід. Він дозволив виявляти області легування кремнію, ділянки, опромінені електронним пучком, області забруднень поверхні пластин залишками окислу і фоторезисту.

6. Обґрунтований і реалізований спосіб зондування режимів роботи ІС, в основі якого лежать порогові властивості НРК. Запропоновано спосіб визначення електричних потенціалів елементів ІС та пристрій для його реалізації. Експериментально показана перспективність використання немато-холестеричних систем в неруйнівному контролі, які в ряді застосувань мають переваги перед НРК (більша крутизна ВКХ і вольт-товщинної характеристики, візуалізація рельєфу поверхні без прикладання поля).

7. Виконана оцінка метрологічних параметрів методу, в порівнянні з відомими електрохімічними та електролітичними методами суттєво покращені чутливість та роздільна здатність при більш низьких робочих напругах. Запропонований новий підхід до оцінки дефектності діелектрика і спосіб атестації діелектричної плівки, в основі яких лежить оцінка вкладу конкретної технологічної операції в процент виходу придатних виробів.

8. Розроблений комплекс методик зробив можливим використання методу в контролі технологічних операцій виготовлення виробів тонкоплівкової мікроелектроніки, починаючи від першого окислення напівпровідникової пластини до виявлення відмов готового виробу.

Методики неруйнівного контролю впроваджені на ряді підприємств України і Росії та ввійшли до складу керівних матеріалів і стандартів галузі:

— Устройство контроля диэлектрических слоев КФУЛ 426.474.001.

— Руководящий материал РМ-И1 107-84. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Контроль

неразрушающий. Метод определения микродефектов диэлектрических слоев с помощью НЖК.

— Стандарт СТП И1.104-88. Методы НЖК — зондирования в исследовании и контроле качества интегральных схем.

— Стандарт СТП И1.105-88. Метод контроля дефектов диэлектрических, проводящих и фоторезистивных слоев на полупроводниковых пластинах с помощью НЖК.

— Установка контроля полупроводниковых структур И1.V2. 792.000.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Гриценко Н.И., Мошель Н.В. Влияние электрического поля на размеры рассеивающих центров в нематических жидких кристаллах // Укр. физ. журнал. — 1978. — Т.23, №2. — С.224-228.

2. Гриценко Н.И., Коваль Б.Д., Маркова О.З., Мошель Н.В. Применение нематических жидких кристаллов для визуализации рассеянных электрических полей изделий микроэлектроники // Микроэлектроника. -1980. — Т.9, №5. — С.444-449.

3. Гриценко Н.И., Мошель Н.В. Проводимость, диффузия и подвижность в нематических жидких кристаллах // Укр. физ. журнал. — 1980. — Т.25, №11. -С.1930-1935.

4. Гриценко Н.И., Мошель Н.В. Инжекционные токи в нематическом жидком кристалле // Журнал техн. физики. — 1982.- Т.52, №1. — С.113-116.

5. Гриценко Н.И., Мошель Н.В., Добролеж С.А. и др. Исследование распределения поверхностных потенциалов ИС с помощью нематических жидких кристаллов// Электронная промышленность. - 1982. — №10-11. — С.95-96.

6. Гриценко Н.И., Мошель Н.В., Добролеж С.А. и др. Применение нематических жидких кристаллов для контроля качества технологических слоев ИС// Электронная промышленность. — 1982. - №10-11. — С.90-95.

7. Гриценко Н.И., Коновец Н.К., Мошель Н.В. Переходные токи в жидких кристаллах. В кн.: “Электрические свойства жидких кристаллов”. — Душанбе, Ирфон. — 1982. — С.146-150.

8. Гриценко Н.И., Коновец Н.Р., Мошель Н.В. Коэффициент диффузии и подвижность носителей заряда в

жидких кристаллах. В кн.: "Органические полупроводниковые материалы". — Пермь.-1982-вып.5, ч.1. — С.45-49.

9. Гриценко Н.И., Мошель Н.В., Тиман Б.Л. Механизмы поляризации жидких кристаллов в постоянном электрическом поле // Укр. физ. журнал. — 1983. - Т.28, №1. — С.72-77.

10. Гриценко Н.И., Мошель Н.В., Тиман Б.Л. Возрастающая релаксация тока в жидких кристаллах // Журнал техн. физики.-1983. — Т.52, вып.9. — С.1879-1880.

11. Гриценко Н.И., Мошель Н.В., Рогоза А.В., Тиман Б.Л. Релаксационные процессы при протекании тока в жидких кристаллах// Физика твердого тела. — 1983. — Т.25, вып.11-С.3286-3290.

12. Гриценко Н.И., Клименко А.С., Коваль Ю.Д., Мошель Н.В. Анализ дефектов тонких диэлектрических пленок на проводящих подложках // Микроэлектроника. — 1984. — Т.13, вып.5-С.468-471.

13. Гриценко Н.и., Курик М.В., Мошель Н.В. и др. Влияние примесей на проводимость холестерилпеларгоната/ // Журнал физ. химии. — 1985. — Т.59, вып.2. — С.433-436.

14. Гриценко Н.И., Мошель Н.В., Рогоза А.В. Электропроводность и поляризация холестерилпеларгоната в постоянном электрическом поле // Кристаллография. — 1985. — Т.30, вып.6-С.1155-1160.

15. Гриценко Н.И., Клименко А.С., Мошель Н.В. и др. Анализ дефектов металлических и фоторезистивных слоев фотошаблонов с помощью НЖК// Электронная промышленность. сер.8. — 1985.-вып.4. — С.15-18.

16. Гриценко Н.И., Мошель Н.В., Рогоза А.В., Тиман Б.Л. Возрастающая релаксация тока в жидких кристаллах. В кн.: "Электроника органических материалов". — М. — Наука. — 1985-С.244-247.

17. Гриценко Н.И., Завацкий С.В., Кучеев С.И., Мошель Н.В. Исследование электрически активных дефектов оксидных слоев на кремниевых пластинах с помощью НЖК // Микроэлектроника.-1987. — Т.16, вып.5. — С.402-406.

18. Гриценко Н.И., Добролеж С.А., Мошель Н.В. и др. Применение нематических жидких кристаллов в диагностике изделий тонкопленочной технологии // Электронная техника, сер.8.-1987. — вып.3. — С.34-36.

19. Гриценко Н.И., Кучеев С.И., Мошель Н.В. Влияние электропроводности НЖК на визуализацию дефектов диэлектрических слоев // Укр. физ. журнал. — 1989. — Т.34, №2. — С.217-219.

20. Гриценко Н.И., Мошель Н.В., Цибуля В.В. Влияние протонного облучения на электропроводность холестерических жидких кристаллов // Журнал физ. химии. — 1989. — Т.63, №3. — С.753-757.

21. Гриценко Н.И., Клименко А.С., Мошель Н.В. и др. Визуализация р-п-переходов в изделиях микроэлектроники нематическим жидким кристаллом со свободной поверхностью. // Микроэлектроника. — 1989. — Т.18, вып.4. — С.329-333.

22. Гриценко Н.И., Гуленко И.Н., Мошель Н.В. Перенос и накопление заряда в жидких кристаллах // Известия вузов СССР. 1989. — №7. — С. 8—11.

23. Гриценко Н.И., Клименко А.С., Мошель Н.В. и др. Анализ состояния поверхности окисла методом НЖК // Письма в ЖТФ. 1989. — Т.15, вып. 19. — С.53-55.

24. Гриценко Н.И., Кучеев С.И., Мошель Н.В. Использование НЖК для неразрушающего контроля изделий микроэлектроники // Известия АН СССР, сер. физика. — 1989. — Т.53, №10. — С.2029-2044.

25. Гладких А.В., Клименко А.С., Мошель Н.В. Использование НЖК для обнаружения локального перегрева ИС // Электронная промышленность. — 1990. — №5. — С.53-58.

26. Клименко А.С., Мошель Н.В., Суржина З.Я. Приставка к микроскопам для анализа ИС методом НЖК // Электронная промышленность. — 1990. — №5. — С.57-58.

27. Клименко А.С., Мошель Н.В., Суржина З.Я. Анализ работы ИС с использованием электрооптического эффекта в жидких кристаллах // Электронная промышленность. — 1990. — №6. — С.82-84.

28. Gritsenko N.I., Kucheev S.I., Moshel N.V. A model nonuniform electric field in a nematic liquid crystal over a dielectric defect // Mol. Cryst. and Liquid Cryst. — 1990. -V. 193.- P.43-46.

29. Гладких А.В., Евтух А.А., Мошель Н.В. и др. Неразрушающие методы дефектоскопии диэлектрических пленок // Дефектоскопия. — 1991. — №1. — С.73-80.

30. Добролеж С.А., Гриценко Н.И., Клименко А.С.,

Мошель Н.В. Основные направления и эффективность применения методов ЖК при анализе и исследовании ИС и их структур. В кн.: "Аналитические методы исследований материалов и изделий микроэлектроники." — Кишинев. — 1991. — С.5—7.

31. Клименко А.С., Мошель Н.В., Суржина З.Я. Метрологические характеристики метода НЖК в контроле диэлектрических пленок. В кн.: "Аналитические методы исследования материалов и изделий микроэлектроники". — Кишинев. — 1991. — С.169—171.

32. Клименко А.С., Мошель Н.В. Новый подход к оценке дефектности диэлектрика. В кн.: "Аналитические методы исследования материалов и изделий микроэлектроники". — Кишинев. — 1991. С.92—94.

33. Клименко А.С., Мошель Н.В., Суржина З.Я. НЖК-метод в анализе пленочных многослойных структур. В кн.: "Аналитические методы исследования материалов и изделий микроэлектроники". — Кишинев. — 1991. — С.72—73.

34. Клименко А.С., Мошель Н.В., Суржина З.Я. Конструирование и применение НЖК-зонда в анализе брака и отказов ИС // Электронная промышленность. — 1993. — №4. — С.40—42.

35. Клименко А.С., Мошель Н.В., Суржина З.Я. Технологическое обеспечение ЖК-методов контроля качества тонких пленок // Электронная промышленность. — 1993. — №4. — С.42—45.

36. Gritsenko N.I., Kucheyev S.I., Moshel N.V. Physical aspects of nondestructive testing of microelectroproducts using NLC // Functional materials. —1994.—V.1, №1.— P.97—102.

37. Авторское свидетельство N776226, ДСП.

38. Авторское свидетельство N826816, ДСП.

39. Гриценко М.І., Клименко А.С., Мошель М.В. Спосіб контролю діелектричних плівок. Патент України, НОІЛ 21/66. (Позитивне рішення по заявці N94086506 від 04.08.1994 р.).

40. Гриценко М.І., Клименко А.С., Мошель М.В. Спосіб атестації діелектричної плівки. Патент України, НОІЛ 21/66 (Позитивне ріш. по заявці N94086507 від 04.08.1994 р.).

41. Гриценко М.І., Клименко А.С., Мошель М.В. Спосіб визначення електричних потенціалів елементів ІС. Патент України, GOIR 31/22 (Позитивне рішення по заявці N94086504 від 04. 08.1994 р.).

Moshel N.V. Nematic liquid crystals in non-destructive testing of materials and devices of microelectronics. Dissertation for a Doctor of sciences degree (technical), speciality 05.27.03—technology of equipment and production of materials and devices of electronic techniques. Institute for Single Crystals of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, 1996.

Results presented in 36 papers, 2 inventor's certificates and 3 patents are being submitted, which include: research and development of physical foundations of non-destructive testing techniques using nematic liquid crystals; a set of concrete techniques for testing of thin films and devices based thereon, together with technological realization of the method.

Basing on the proposed model and principles of control techniques, methods have been developed for detection of defects in dielectric films, metallizations and photoresists, analysis of the surface state of silicon and its oxides, studies of the operation regimes of integrated circuits and their structures.

Мошель Н.В. Нематические жидкие кристаллы в неразрушающем контроле материалов и изделий микроэлектроники. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.03 — технология оборудования и производство материалов и устройств электронной техники. Институт монокристаллов, Харьков, 1996.

Защищается 36 работ, 2 авторских свидетельства и 3 патента, которые содержат исследования и разработку физических основ метода неразрушающего контроля с применением нематических жидких кристаллов, комплекса методик дефектоскопии тонких пленок и изделий на их основе и технологического обеспечения метода. На основе предложенных модели и принципа контроля разработаны методики выявления дефектов диэлектрических пленок, металлизации и фоторезиста, анализа состояния поверхности Si и его окислов, исследования режимов работы ИС и их структур.

Ключові слова: нематичні рідкі кристали, неруйнівний контроль, тонкі плівки, електрооптика.

145301

AB 33.757
AB 33.757

Підписано до друку 22.11.1995 р.
формат 60x84 1/16. Тираж 100 прим.

250027, Чернігів, вул. Шевченка, 95,
Ротапринт ЧТІ