

На правах рукопису

ПАНКЕВИЧ
Ігор Миронович

ПРОГНОЗУВАННЯ ТА МОДИФІКАЦІЯ
ЛАЗЕРНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ
ВЛАСТИВОСТЕЙ ШАРІВ ПОЛІКРЕМНІЮ
В СТРУКТУРАХ «КРЕМНІЙ-НА-ДІЕЛЕКТРИКУ»

Спеціальність 05.27.01 — Твердотільна електроніка
(включаючи функціональну)

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття наукового ступення
кандидата технічних наук



00739564 (Y)

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі напівпровідникової електроніки Державного університету "Львівська політехніка".

Наукові керівники: доктор фізико-математичних наук,
професор Буджак Я.С.
доктор технічних наук, професор
Дружинін А.О.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор Стахіра Й.М.
кандидат технічних наук, с.н.с.
Смеркло Л.М.

Провідна організація - Чернівецький державний університет
ім. Ю. Федьковича, м. Чернівці

Захист відбудеться 17 травня 1996 р. о 15⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 04.06.18 при Державному університеті "Львівська політехніка" (290013, м. Львів, вул. С.Бандери, 12, головний корпус, ауд. 124).

З дисертацією можна ознайомитись в науковій бібліотеці університету (290013, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий "42" квітня 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради

Вайцар Р. І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Полікристалічні шари кремнію широко використовуються в технології мікроелектронних приладів. Останнім часом властивості структур на основі цього матеріалу інтенсивно вивчаються у зв'язку з можливостями його застосування в мініатюрних сенсорах і тривимірних інтегральних схемах. Основною метою таких досліджень є покращення електрофізичних параметрів полікремнію, зокрема зменшення кількості дефектів та підвищення рухливості носіїв заряду, тому що прилади, виготовлені в дрібнозернистих шарах, мають малу швидкодю і низьку температурну стабільність характеристик.

Розширення сфери використання структур типу "кремній-надіелектрику" пов'язують, насамперед, із розробкою принципово нових методів покращення їх якості, оскільки використання традиційних способів відпалу не призводить до істотних якісних змін у властивостях матеріалу або не відповідає сучасним технологічним вимогам щодо формування багат шарових мікросхем. Серед них чільне місце займає лазерний відпал матеріалів з рекристалізацією через рідку фазу, що дозволяє цілеспрямовано модифікувати властивості полікристалічних шарів за рахунок теплової дії випромінювання. В порівнянні з відомими методами лазерна обробка призводить до локального розплаву шарів, нанесених на діелектричні підкладки, та збільшення розмірів зерен без пошкоджень структур, сформованих у напівпровідникових пластинах, що є основною вимогою в технології мікроелектронних схем вертикальної інтеграції.

Результати досліджень впливу лазерної рекристалізації на властивості полікремнію, які є в літературі, важко використовувати для прогнозування характеристик матеріалу, оскільки в публікаціях подається розрізнена інформація. Відомі

методи моделювання кінетичних ефектів у шарах полікремнію складні для розрахунків і не дозволяють продиференціювати внески різних механізмів розсіювання носіїв заряду. Тому дослідження впливу лазерного випромінювання на кінетичні ефекти в структурах, виготовлених на основі шарів полікремнію, потребують комплексного підходу, а створення порівняно простого та оперативного способу, придатного для моделювання явищ переносу в полікристалічних шарах, є актуальним науковим завданням.

Наукові дослідження, закладені в дану дисертаційну роботу, виконувалися у відповідності з Державною науково-технічною програмою ДКНТ України " Розробка фізичних і технологічних основ створення багатофункціональних швидкодіючих інтегральних схем нового покоління, в тому числі тривимірної інтеграції, нових типів дискретних приладів та інтегральних сенсорів на основі систем "кремній-на-ізоляторі" (шифри проєктів 5.44.01/033-92 та 5.44.01/025-93).

Метою роботи є комплексне дослідження властивостей шарів полікремнію на діелектричних підкладках і встановлення основних закономірностей у їх змінах під дією лазерного випромінювання для отримання КНД-структур із заданими характеристиками.

Основні завдання дослідження:

- дослідження структурних змін в шарах полікремнію на діелектричних підкладках та залежностей їх електрофізичних властивостей від технологічних режимів мікрозонної лазерної обробки;

- встановлення основних механізмів розсіювання носіїв заряду в рекристалізованому полікремнії при температурах

300 + 500 К;

- створення моделі явищ переносу та програмного забезпечення для розрахунку кінетичних ефектів у шарах полікремнію в залежності від індукції магнітного поля, концентрації домішки, розмірів кристалітів і температури середовища;

- аналіз експериментальних закономірностей змін властивостей шарів полікремнію на діелектричних підкладках і пояснення результатів з використанням запропонованої моделі.

На захист виносяться:

1. Встановлені закономірності у змінах властивостей шарів полікремнію в КНД - структурах під дією лазерного випромінювання:

2. Фізична модель кінетичних ефектів в КНД-структурах при високих температурах з врахуванням розсіювання на границях зерен, іонізованих атомах домішки та коливаннях кристалічної ґратки.

3. Алгоритм розрахунку властивостей шарів полікремнію на основі нового методу в кінетичній теорії.

Об'єкт і методи дослідження. Вирощування шарів полікремнію на діелектричних підкладках здійснювалося шляхом осадження силану з газової фази в реакторі пониженого тиску при температурі 625 °С (LPCVD-метод). На їх поверхню наносилося комбіноване покриття з півки SiO₂ та смуг Si₃N₄ для покращення морфології шарів та забезпечення попередньо заданої локалізації дефектів при рекристалізації матеріалу за допомогою ІАГ: Nd⁺ лазера неперервної дії. Для досліджень структурної досконалості шарів застосований метод просвічуваної електронної мікроскопії. Вимірювання питомого опору полікремнію та дослідження ефекту Холла проведені на тестових

елементах чотиривимірним методом. Для моделювання властивостей використані засоби сучасної теоретичної фізики та чисельні методи розрахунків.

Наукова новизна роботи:

- на основі комплексних досліджень встановлені кореляційні співвідношення між режимами лазерної рекристалізації та електрофізичними параметрами шарів полікремнію;
- розраховані коефіцієнти відбивання лазерного випромінювання з довжиною хвилі 1.06 мкм від системи шарів $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$ -полі;
- запропоновано новий спосіб розрахунку часу релаксації носіїв заряду при розсіюванні на межах зерен;
- при прогнозуванні властивостей шарів полікремнію в структурах "кремній-на-діелектрику" застосовано новий підхід до визначення нерівноважної одночастинкової функції розподілу носіїв заряду за енергією.

Практичне значення. Розроблені рекомендації щодо вибору технологічних режимів лазерної рекристалізації шарів полікремнію за допомогою ІАГ: Nd^{3+} -лазера з довжиною хвилі випромінювання 1.06 мкм для цілеспрямованої модифікації електрофізичних властивостей матеріалу.

Реалізація роботи. Результати дисертаційної роботи використані при створенні тензорезистивних та ємнісних датчиків тиску (АТ "Родон", м. Івано-Франківськ). Практична цінність роботи підтверджена актом про використання.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на Республіканській конференції "Фізика і хімія поверхності і границь раздела узкощелевых полупроводников" (м. Львів, 1990); III-й Міжнародній європейській конфе-

ренції в вирощування кристалів (м.Будапешт,1991); IV-й і V-й Міжнародних конференціях в фізики і технології тонких плівок (м.Івано-Франківськ, 1993, 1995); I-й Міжнародній конференції "Конструкційні та функціональні матеріали" (м.Львів, 1993); на I-й Міжнародній конференції "Матеріалознавство алмазоподібних і халькогенідних напівпровідників" (м.Чернівці,1994); NATO Advanced Research Intern. Workshop, (Gurzuf, Crimea, Ukraine, Nov. 1-4, 1994); Int. Sch.- conf. Physical Problems in Material Science of Semiconductors (Chernivtsi, Ukraine, Sept. 11-16, 1995). Крім того результати досліджень доповідалися на науково-технічних конференціях та наукових семінарах кафедри напівпровідникової електроніки ДУ "Львівська політехніка".

Публікації. Результати досліджень відображені в 10 наукових працях.

Конкретний особистий внесок дисертанта в одержанні наукових результатів. Дисертант провів лазерну рекристалізацію структур "кремній-на-діелектрику" та електрофізичні дослідження зразків. Розробив фізичну модель явищ переносу в шарах полікремнію, алгоритм і програмне забезпечення для розрахунку кінетичних властивостей матеріалу. Брав участь у підготовці публікацій та в науково-дослідних роботах з промислово-виробничих технологій. Висновки і положення, винесені на захист, належать автору.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'ятих розділів, основних результатів та висновків, списку літератури і додатка. Загальний обсяг роботи 162 сторінки машинописного тексту, включаючи 35 рисунків. Список літератури складається з 140 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі в'ясовані актуальність проблеми, тема досліджень, їх наукова новизна і практична цінність, а також сформульовані основні положення, які виносяться на захист.

У першому розділі описані методи лазерної рідкофазної рекристалізації полікремнію і проаналізовані механізми росту кристалітів у залежності від умов обробки матеріалу. Наголошено, що мікронна лазерна рекристалізація з незначним підгрівом підкладки - простий в реалізації технологічний процес, який забезпечує отримання на діелектричних підкладках якісних монокристалічних ділянок, придатних для виготовлення мікроелектронних приладів. Розглянуто результати досліджень властивостей полікремнію і показано, що після лазерної рекристалізації значно покращуються параметри матеріалу.

Проаналізовані моделі, що використовуються для прогнозування змін у властивостях полікремнію в залежності від температури, концентрації домішки та розмірів кристалітів. Відзначено, що в діапазоні температур 300 + 500 К вони неадекватно описують явища переносу при високих рівнях легування і значних розмірах кристалітів, оскільки не враховують внесок об'ємних механізмів розсіювання.

На основі аналізу літературних даних сформульовані завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі розглянуті основні методи кінетичної теорії, які використовуються для моделювання явищ переносу в напівпровідникових кристалах, і запропоновано алгоритм розрахунку властивостей полікремнію на основі альтернативного способу визначення нерівноважної одночастинкової функції розподілу носіїв заряду за енергією.

Шукана нерівноважна одночастинкова функція розподілу $f(\epsilon)$ мала такий вигляд:

$$f(\epsilon) = \left[\exp\left(\frac{\epsilon - \Delta\epsilon_p - \mu}{k_0 T}\right) + 1 \right]^{-1}, \quad (1)$$

де ϵ - енергія носіїв заряду в кристалі, а μ - електрохімічний потенціал. Одночастинкова зміна енергії носіїв заряду $\Delta\epsilon_p$ визначалася за формулою:

$$\Delta\epsilon_p = \mathbf{p} \cdot \mathbf{v}_d = \mathbf{p} \left(u_{ik}(\mathbf{B}) \right) \mathbf{F}_g / e, \quad (2)$$

де \mathbf{v}_d - дрейфова швидкість носіїв заряду; $u_{ik}(\mathbf{B})$ - компоненти тензора мікроскопічної рухливості

$$u_{ik}(\mathbf{B}) = \frac{\delta_{ik} u_1 + z u_1 u_k \delta_{ikl} B_l + B_l B_k u_1 u_2 u_3}{1 + B_1^2 u_2 u_3 + B_2^2 u_1 u_3 + B_3^2 u_1 u_2}, \quad (3)$$

де u_i та B_i - відповідні компоненти діагонального тензора мікроскопічної рухливості носіїв заряду і вектора індукції магнітного поля; δ_{ik} - символ Кронекера; δ_{ikl} - одиничний антисиметричний тензор Леві-Чівіта; \mathbf{F}_g - сила, яка зумовлює дрейф носіїв заряду в кристалі

$$\mathbf{F}_g = ze\mathbf{E}^* - \frac{\epsilon - \mu}{T} \nabla_T T. \quad (4)$$

У формулу (4) введено такі позначення: $\mathbf{E}^* = \mathbf{E} - \nabla_T \mu / (ze)$ - вектор напруженості ефективного електричного поля, а $\nabla_T \mu$ та $\nabla_T T$ - відповідно градієнти концентрації носіїв заряду і температури.

Середня сила взаємодії носіїв заряду з дефектами кристалічної ґратки визначалася згідно з класичним законом Ньютона як зміна імпульсу системи за одиницю часу.

$$\mathbf{F}_T = \nabla_T \overline{\delta V(\mathbf{r})} = \left(\frac{\Delta p}{\Delta t} \right)_{cp} \quad (5)$$

Йї було розраховано за допомогою квантово-механічної ймовір-

ності розсіювання $W(p, p')$.

$$\overline{v_r \delta V(r)} = \int (p - p') W(p, p') dV_p = (\delta_{ik} m_i / \tau_i) v_d, \quad (6)$$

де δ_{ik} / τ_i - діагональний тензор, що має компоненти

$$\frac{1}{\tau_i} = \int (1 - p'/p) W(p, p') dV_p. \quad (7)$$

Вираз (7) - відома в кінетичній теорії функція для розрахунку часу релаксації. Отже, τ_i був введений у модель без розв'язку рівняння Больцмана в наближенні часу релаксації.

Дрейфова швидкість носіїв заряду визначалася з часткового розв'язку векторного рівняння руху Ньютона в наближенні ефективної маси

$$\frac{dv}{dt} = (\overline{m}_{ik})^{-1} \{ F_G + F_T + F_L \}, \quad (8)$$

в якому \overline{m}_{ik} - компоненти тензора ефективної маси, а F_L - сила Лоренца.

Далі для моделювання явищ переносу в кристалах використовувалися формули кінетичної теорії. Прогнозування властивостей полікремнію було безпосередньо пов'язано з визначенням компонент кінетичного інтеграла.

Для розрахунку загального часу релаксації носіїв заряду, що визначає мікроскопічну рухливість (3), були розглянуті процеси розсіювання носіїв заряду в гомеоплярних кристалах і проаналізовані особливості явищ переносу в полікристалічних шарах. До уваги бралося розсіювання на неполярних оптичних та акустичних фонах, іонізованих атомах домішки, границях зерен (ГЗ) та поверхні шарів полікремнію. Подані вирази для розрахунку часів релаксації при довільному сфе-

роїдальному законі дисперсії і запропоновано новий спосіб розрахунку часу релаксації носіїв заряду при пружному розширванні на межах зерен, в якому враховуються довільне розташування кристалітів, їх розміри d та висота потенціального бар'єру F

$$\frac{1}{\tau_{га}} = \frac{m^* F^2 k}{h d k_n} \frac{1 - \exp(-4k_n^2 \delta^2)}{1 + \exp(-4k_n^2 \delta^2) - 2 \exp(-k_n^2 \delta^2) \cos 2k_n d} \quad (9)$$

де δ - стандартне середньоквадратичне відхилення, а k і k_n - компоненти хвильового вектора.

У третьому розділі моделюються кінетичні ефекти в парах полікремнію в урахуванням структури енергетичних зон матеріалу. Вирази для розрахунку компонент тензорів питомого опору та ефекту Холла подані в такому кінцевому вигляді:

$$\overline{(\rho_{ik}(B))} = \frac{1}{e n} \begin{pmatrix} k_1 / \Delta & 0 & 0 \\ 0 & k_1 / \Delta & 0 \\ 0 & 0 & 1/(k_1 + 3k_2 B_3^2) \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\overline{(R_{ik}(B) \delta_{ikl} B_3)} = \frac{1}{ze n} \begin{pmatrix} 0 & k_3 B_3 / \Delta & 0 \\ -k_3 B_3 / \Delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

У формулах (10) та (11) введені наступні позначення:

$$\Delta = k_1^2 + k_3^2 B_3^2; \quad (12)$$

$$k_1 = \left[\int_0^\infty p^3 \left(-\frac{df_0}{d\varepsilon} \right) d\varepsilon \right]^{-1} \int_0^\infty \frac{(u_1 + u_2 + u_3) p^3 (-df_0/d\varepsilon) d\varepsilon}{1 + u_1 u_2 B_3^2}; \quad (13)$$

$$k_2 = \left[\int_0^\infty p^3 \left(-\frac{df_0}{d\varepsilon} \right) d\varepsilon \right]^{-1} \int_0^\infty \frac{u_1 u_2 u_3 p^3 (-df_0/d\varepsilon) d\varepsilon}{1 + u_1 u_2 B_3^2}; \quad (14)$$

$$k_3 = \left[\int_0^{\infty} p^3 \left(- \frac{df_0}{d\varepsilon} \right) d\varepsilon \right]^{-1} \int_0^{\infty} \frac{(u_1 u_2 + u_1 u_3 + u_2 u_3) p^3 (-df_0/d\varepsilon) d\varepsilon}{1 + u_1 u_2 V_3^2}. \quad (15)$$

Для визначення придатності фізичної моделі для прогнозування властивостей матеріалу проведені розрахунки параметрів монокристалів кремнію і співставлені з літературними даними. При моделюванні властивостей врахована температурна залежність власної концентрації носіїв заряду та ширини забороненої зони в кремнії і використана однозонна модель з усередненою ефективною масою густини станів. При розрахунках властивостей шарів полікремнію використано поліноміальну апроксимацію залежності усередненої концентрації носіїв заряду від концентрації імплантованої домішки. Для оцінки висоти потенціального бар'єру застосовано емпіричну формулу.

На основі фізичної моделі отримані розрахункові залежності властивостей полікремнію в широкому діапазоні температур та концентрацій домішки. На рис.1 показано результати моделювання рухливості носіїв заряду в шарах полікремнію з розмірами зерен 0,2 + 1,0 мкм. При концентраціях домішки бору до 10^{17} см^{-3} спостерігається аномальний ріст рухливості. Такий хід кривих пояснюється лише зменшенням ефективності розсіювання на границях зерен. При підвищенні концентрації домішки явища переносу визначаються внеском об'ємних механізмів розсіювання, і рухливість носіїв заряду зменшується. З рис.2 видно, що в області виснаження домішкових рівнів при концентрації домішки бору 10^{16} см^{-3} питомий опір повільно змінюється з ростом температури до $\sim 640 \text{ K}$, а потім різко падає (майже на порядок) за рахунок росту кількості носіїв заряду внаслідок власних переходів через заборонену зону ма-

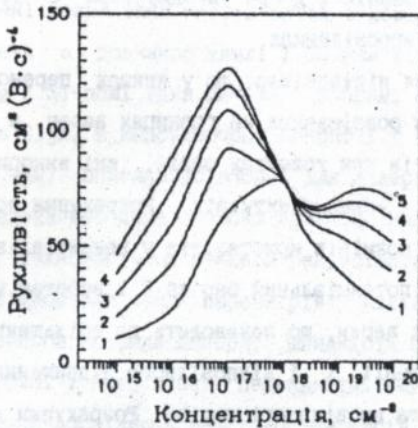


Рис.1. Залежність рухливості носіїв заряду в полікремнії від концентрації домішки бору при різних розмірах кристалітів: 1 - 0,2 мкм, 2 - 0,4 мкм, 3 - 0,6 мкм, 4 - 0,8 мкм, 5 - 1,0 мкм.

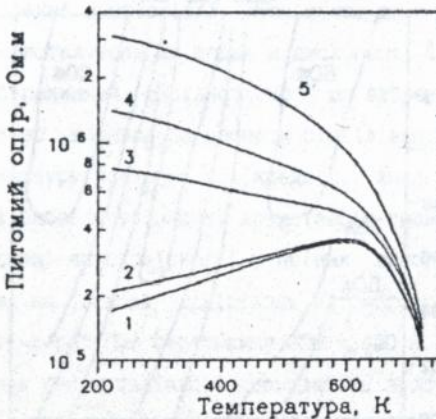


Рис.2. Температурна залежність питомого опору шарів полікремнію при різних розмірах кристалітів: 1 - 30 мкм, 2 - 10 мкм, 3 - 1,0 мкм, 4 - 0,5 мкм, 5 - 0,2 мкм.

теріалу. Ця закономірність зберігається при інших ступенях легування полікремнію і добре узгоджується з теорією явищ переносу в напівпровідниках.

Моделювання підтвердило, що у явищах переносу в полікремнії домінує розсіювання на границях зерен, а впливом поверхневих ефектів при товщинах шарів, які використовувалися для досліджень, можна знехтувати. Розрахунки показали, що при збільшенні розмірів кристалітів у рекристалізованих шарах знижується потенціальний бар'єр F і зростає час релаксації на границях зерен, що призводить до збільшення загального часу релаксації τ і відповідного підвищення рухливості носіїв заряду та провідності шарів. Розрахунки добре узгоджуються з експериментами.

У четвертому розділі описана технологія отримання ви-

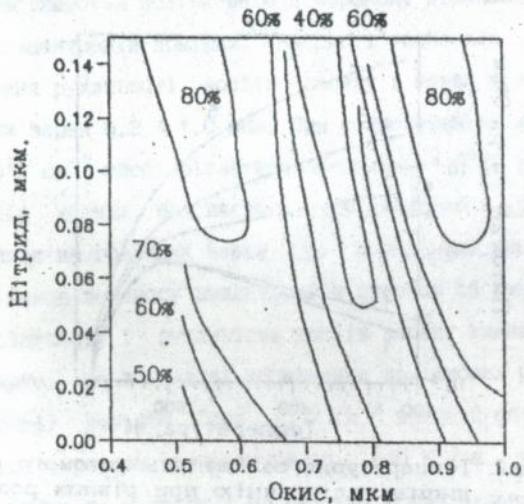


Рис.3. Коефіцієнт відбивання лазерного випромінювання від системи шарів $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$.

хідних зразків і методика досліджень.

Проведені розрахунки коефіцієнтів відбивання лазерного випромінювання з довжиною хвилі 1.06 мкм від системи шарів $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_2 / \text{Si}$ -полі (див.рис.3) і вибрані оптимальні товщини SiO_2 та Si_3N_4 в капсулюючому покритті (відповідно 0,75 мкм та 0,15 мкм). Описана установка для лазерної рекристалізації. Приведена методика обробки зразків. Наголошено, що для оптимізації технологічних режимів рекристалізації слід підбирати співвідношення таких параметрів: підігрів підкладки, потужність випромінювання лазера, швидкість сканування променя по поверхні і коефіцієнт перекриття смуг сканування. Подана методика досліджень властивостей шарів полікремнію.

У п'ятому розділі відображені результати експериментальних досліджень властивостей рекристалізованого полікремнію.

Проаналізовано вплив режимів рекристалізації на процеси дефектоутворення в матеріалі. Виявлено, що основними дефектами в рекристалізованих шарах є дислокації і сітка границь зерен з субграницями. Встановлено, що вибране захисне покриття суттєво впливає на процеси стабілізації росту зерен, покращує текстуру поверхні полікремнію, зменшує масоперенос матеріалу і забезпечує задану локалізацію границь зерен.

Досліджені закономірності у змінах властивостей шарів полікремнію на основі вимірювань питомого опору та ефекту Холла при температурах середовища 300 + 450 К. З рис.4 видно, що після рекристалізації провідність зростала майже на порядок. Це явище пояснюється зменшенням впливу ГЗ внаслідок збільшення розмірів кристалітів та перерозподілу імплантованої домішки при рідкофазному відпалі. При порівнянні експериментальних залежностей з розрахунками виявлені незначні

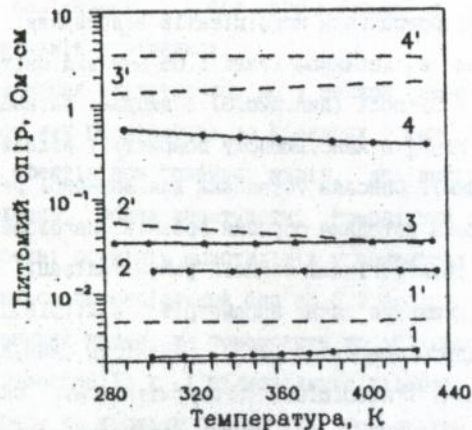


Рис.4. Температурна залежність питомого опору шарів полікремнію до- (3,4) та після (1,2) лазерної рекристалізації при концентраціях домішки бору $3,75 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$ та $8,25 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$.

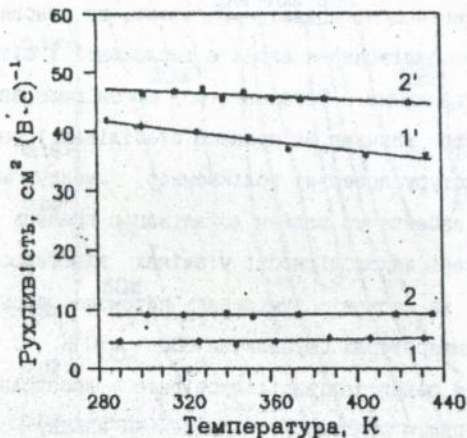


Рис.5. Температурна залежність холівської рухливості носіїв заряду в шарах полікремнію при різних концентраціях домішки бору: 1 - $3,75 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$, 2 - $8,25 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$.

розходження. Встановлено, що при вказаних температурах явища переносу визначаються процесами розсіювання носіїв заряду на неполярних оптичних фонах, іонізованих атомах домішки та висотою потенціального бар'єру на границях зерен. У рекристалізованих шарах останній механізм має незначний вплив на кінетичні ефекти. Це призводить до зростання рухливості носіїв заряду (див.рис.5) і помітного зменшення температурного коефіцієнта опору при концентраціях домішки в матеріалі до $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Подані структури мікроелектронних сенсорів та КНД МОН-транзистора, виготовлені на основі рекристалізованих шарів полікремнію, і приведені їх параметри. Показано, що такі прилади мають кращу чутливість, високу надійність та стабільні характеристики в широкому діапазоні робочих температур.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Для формування заданих температурних профілів у зоні розплаву при лазерній рекристалізації ($\lambda = 1,06 \text{ мкм}$) оптимізовано товщини шарів капсулюючого захисного покриття. Визначено, що при товщинах Si_3N_4 і SiO_2 відповідно рівних 0,15 мкм та 0,75 мкм коефіцієнт відбивання випромінювання від структур зменшується до 12 %. Застосування таких шарів дозволяє локалізувати границі зерен у наперед заданих місцях структур "кремній-на-діелектрику".

2. Показано, що лазерна обробка суттєво змінює параметри матеріалу. Встановлено, що внаслідок рекристалізації в КНД-структурах розміри кристалітів зростають до 100 мкм і покращується морфологія поверхні шарів. При цьому рухливість носіїв заряду в полікремнії з р - типом провідності збільшується до $50 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ і знижується його питомий опір.

3. Встановлено, що при концентраціях домішки бору $\sim 4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ в шарах полікремнію мінімальний температурний коефіцієнт опору ($\sim 8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$); при вищих рівнях легування помічено аномальний ріст ТКО і зміну його знака. Зменшення ТКО в рекристалізованих шарах у порівнянні з вихідним матеріалом пояснюється перерозподілом імплантованої домішки та зменшенням кількості дефектів у структурах і є важливим для підвищення температурної стабільності параметрів мікроелектронних приладів.

4. Для прогнозування властивостей полікремнію застосовано новий спосіб визначення нерівноважної функції розподілу носіїв заряду за енергією, що полягає у знаходженні одночастинкової зміни енергії носіїв ($\Delta \epsilon_p$) під дією зовнішніх збуджуючих факторів. Нерівноважна функція розподілу придатна для моделювання властивостей в області смічної провідності та слабого електронного розігріву.

5. Запропонований підхід до визначення одночастинкової зміни енергії носіїв значно спрощує моделювання кінетичних ефектів за формулами кінетичної теорії, оскільки величина $\Delta \epsilon_p$ знаходиться в операторного рівняння руху частинок в кристалі, в якому сила взаємодії носіїв заряду з дефектами кристалічної ґратки (F_T) розраховується на основі класичного поняття сили як зміни імпульсу частинки за одиницю часу, що визначається через квантово-механічну ймовірність розсіювання. У вираз для F_T входить час релаксації носіїв заряду, який вводиться в розрахунковий алгоритм без розв'язання рівняння Больцмана в τ -наближенні.

6. Запропоновано новий спосіб розрахунку часу релаксації на границях зерен у шарах полікремнію, що враховує висо-

ту потенціального бар'єру та довільне розташування кристалітів в напрямі руху носіїв заряду. Встановлено, що при високих температурах у полікремнії домінуючу роль відіграє розсіювання на іонізованих атомах домішки, неполярних оптичних фононах та границях зерен. Мікроскопічний час релаксації носіїв заряду для останнього механізму розсіювання може змінюватися в межах від 10^{-14} до 10^{-12} с. Його внесок у кінетичні ефекти зменшується із збільшенням середніх розмірів кристалітів та зниженням потенціальних бар'єрів на границях зерен при зростанні концентрації легуючої домішки.

7. За розробленим алгоритмом створено програмне забезпечення для моделювання явищ переносу в полікремнієвих шарах, що дозволяє прогнозувати питомий опір, рухливість носіїв заряду, а також оцінювати внески механізмів розсіювання в кінетичні ефекти в залежності від температури, середніх розмірів кристалітів і концентрації домішки.

8. Встановлено кореляційні співвідношення між режимами лазерної обробки та властивостями шарів полікремнію і на основі запропонованої фізичної моделі пояснено отримані експериментальні закономірності.

9. Показано, що прилади, виготовлені в КНД-структурах на основі рекристалізованого полікремнію, відрізняються від аналогів, створених з дрібнозернистого матеріалу, більшою швидкодією, кращою температурною стабільністю характеристик і в порівнянні з монокристалічними кремнієвими сенсорами мають ширший діапазон робочих температур.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНІ В РОБОТАХ:

1. Буджак Я.С., Швед М.М., Сиротюк С.В., Панкевич І.М. Квантовомеханічний розрахунок кінетичних коефіцієнтів кри-

талів // Фізична електроніка. Респ. міжвід. наук.- техн. зб.
- Львів, 1992. - Вип.42. - С.38-42.

2. Буджак Я.С., Сиротюк С.В., Панкевич І.М., Собчук І.С., Швед М.М. Елементи квазікласичної теорії кінетичних ефектів в кристалах // Вісник Львів. політехн.ін-ту "Теорія і проектування напівпровідникових та радіоелектронних пристроїв". -1992. N 264. - С.65-70.

3. Druzhinin A.A., Kostur V.G., Lvba O.M. and Pankevich I.M. Structure changes and crystallization process peculiarities of polysilicon layers under laser irradiation effect // Proc. 3rd European Conf. on Crystal Growth. Budapest, Hungary. Crystal Prop. Prep. Vol. 36-38 (1991). - P.388-393.

4. Druzhinin A.A., Kostur V.G., Kogut I.T., Pankevich I.M., Deschinsky Y.L. Microzone laser recrystallized polysilicon layers on insulator // NATO ASI Series. Series 3. Physical and Technical Problems of SOI Structures and Devices. - 1995. - Vol.4. - P.101-106.

5. Панкевич І.М., Костур В.Г. Исследование структур типа "кремний-на-изоляторе" // Тез. докл. Межресп. студ. науч. конф. "Электронные средства в промышленности". Ваку, 1987. - С.19.

6. Дружинин А.А., Костур В.Г., Панкевич І.М. Лазерный нагрев поверхностных слоев некоторых полупроводников (CdHgTe, Si-поли), капсулированных диэлектриком // Тез. докл. Респ. конф. "Физика и химия поверхности и границ раздела узкощелевых полупроводников". Львов, 1990. - С.22-23.

7. Буджак Я.С.; Дружинин А.О., Панкевич І.М. Моделювання властивостей плівок полікремнію, рекристалізованих лазерним випромінюванням // Тези доп. ІV Міжнар. конф. з фізики і

технології тонких плівок. Івано-Франківськ, 1993. - С.208.

8. Дружинін А.О., Костур В.Г., Корольова Л.С., Панкевич І.М., Васько А.М., Ховерко Ю.М. Структурні особливості і дефектоутворення в шарах полікремнію під дією лазерного випромінювання // Тези доп. І Міжнар. конф. "Конструкційні та функціональні матеріали" КФМ'93. Львів, 1993. - С.201-202.

9. Дружинін А.О., Когут І.Т., Корольова Л.С., Костур В.Г., Панкевич І.М. Зміна структурних та електрофізичних властивостей полікремнієвих шарів на діелектричних підкладках під дією лазерного випромінювання // Тези доп. І Міжнар. конф. "Матеріалознавство алмазоподібних і халькогенідних налівпровідників". Чернівці, ЧДУ, 1994. - С.146.

10. Druzhinin A.A., Pankov Y.M., Kostur V.G., Vasko A.M., Pankevich I.M. Recrystallized polysilicon films as a material for capacitive pressure sensors // Тези доп. V Міжнар. конф. з фізики і технології тонких плівок. Івано-Франківськ, 1995. - С.45.

Панкевич И.М. Прогнозирование и модификация лазерным излучением свойств слоев поликремния в структурах "кремний-на-диэлектрике". Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 - Твердотельная электроника (включая функциональную). Государственный университет "Львівська політехніка", Львов, 1996.

Защищается 10 научных работ, которые содержат результаты экспериментального исследования влияния лазерной рекристаллизации на структуру и кинетические эффекты в поликремниевых слоях на диэлектрических подложках в интервале температур 300 + 450 К. Исследованы механизмы рассеяния носителей

варяда, промоделированы свойства поликремния при концентрациях примеси $10^{15} + 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и размерах зерен $1 + 30 \text{ мкм}$. Установлены оптимальные толщины антиотражающего покрытия для отжига слоев лазером ИАГ:Nd⁺ ($\lambda = 1.06 \text{ мкм}$). Определены зависимости свойств поликремния от технологических режимов рекристаллизации.

Pankevich I.M. Prognozation and modification by lazer irradiation the properties of polysilicon layers in "silicon-on-insulator" structures. Dissertation paper for fulfillment of the scientific degree of technical science candidate according to speciality 05.27.01 - Solid State Electronic (including functional). State University "Lvivska Politechnika", Lviv, 1996.

Ten scientific publications, containing results of experimental research of the laser recrystallization influence on poly-Si layers on insulator wafers structure and kinetic effects in the interval $300 + 450 \text{ K}$, are defended. The scattering mechanisms of charge carries are investigated, the properties of poly-Si at impurity concentrations $10^{15} + 10^{19} \text{ см}^{-3}$ and grain sizes $1 + 30 \text{ мкм}$ are modeled. The optimal sizes of antireflective layers are established for films annealing by laser ИАГ:Nd⁺ ($\lambda = 1.06 \text{ мкм}$). The dependences of poly-Si properties from the technology recrystallization regims are determined.

Ключові слова: кінетичні ефекти, нерівноважна функція розподілу, розсіювання, полікремній, лазерна рекристалізація.

Підписано до друку 03.04.96. Формат 60x84/16.
Обсяг I Друк. лист. Зам. 208. Тир. 100.
Друкарня УАД. Львів. Личаківська 3.

AB 34.591

AB 34.591