

УДК 621.315

Л.І. Паньків, Д.В. Лабовка, М.М. Лучкевич,

А.М. Терлецька, Г.М. Хляп, В.М. Цмоць

Міжвідомча лабораторія матеріалів твердотільної мікроелектроніки
НАН та МОН України при Дрогобицькому державному педагогічному
університеті імені Івана Франка

ВПЛИВ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ОБРОБКИ НА МЕХАНІЗМИ СТРУМОПРОХОДЖЕННЯ В MONO- I POLY – N-SI

© Паньків Л.І., Лабовка Д.В., Лучкевич М.М.,
Терлецька А.М., Хляп Г.М., Цмоць В.М., 2003

L.I.Pan'kiv, D.V.Labovka, M.M.Luchkevich,

H.M.Terletska, G.M.Khlyap, V.M.Tsmots

THE INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURE TREATMENT ON CURRENT MECHANISMS IN MONO- I POLY – N-SI

© Pan'kiv L.I., Labovka D.V., Luchkevich M.M.,
Terletska H.M., Khlyap G.M., Tsmots V.M., 2003

Описані результати з вивчення впливу високотемпературної обробки при температурі 900⁰ С (ВТО-900) на механізми струмопроходження в структурах на основі моно- та poly-n-Si вихідних зразків і зразків, що пройшли ВТО. Порівняння ВАХ показало, що високотемпературна обробка не впливає на механізми струмопроходження в цих структурах. Встановлено, що домінуючою компонентою струму, який спостерігається в експерименті є тунельний.

The results of the influence of high-temperature treatment at 900⁰ C (НТТ-900) on current mechanism in initial and treated mono-and poly-n-Si-based structures are presented. Comparison of I-V characteristics showed that high-temperature treatment does not influence on current mechanism in these structures. It was turned out that tunneling current is the dominant component of experimentally observed current.

Вступ. Дослідження магнітної сприйнятливості (МС) монокристалів кремнію, які піддавалися високотемпературній обробці (ВТО) (650-1100⁰ С) показало, що вказана ВТО приводить до зменшення діамagnetизму і до появи нелінійності залежностей МС від напруженості магнітного поля (Н). Особливо значні нелінійності спостерігалися на зразках моно-n-Si, що пройшли ВТО-900. Автори роботи [1] це пов'язують з виникненням системи взаємодіючих парамагнітних центрів, а наявність нелінійностей на залежностях $\chi(H)$ – з магнітним впорядкуванням даних центрів.

З метою одержання додаткової інформації про вплив ВТО на властивості досліджуваних кристалів n-Si було проведено експериментальні дослідження вольт-амперних характеристик структур Me-n-Si, створених на основі вихідних зразків і зразків, що пройшли ВТО-900.

Експеримент. Для проведення досліджень вольт-амперних характеристик (ВАХ) нами були виготовлені структури Me-mono-n-Si і Me-poly-n-Si. Зразки піддавалися відповідній обробці у поліруючому травнику (HNO_3 : HF : CH_3COOH з відповідними концентраціями 70%, 49% та 99,8% у масовому співвідношенні 3:1:1). Після цього кристали промивалися в спирті. На свіжополіровану поверхню наплавлилися In-Ag-контакти, розміри яких не перевищували 0,1 геометричної площі поверхні, на яку їх наносили. Високотемпературний відпал кристалів відбувався на повітрі; точність регулювання температури відпалу $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Експерименти проводилися при кімнатній температурі (290 К).

1. Структура Me – mono-n-Si. Експериментальні ВАХ структури Me – mono-n-Si на основі вихідного і відпаленого зразків зображені на рис. 1 а, б відповідно. Порівнюючи ВАХ вихідного і відпаленого зразків, можемо сказати, що експоненціально-несиметричний характер вихідної ВАХ змінюється на сублінійно-симетричний після ВТО-900.

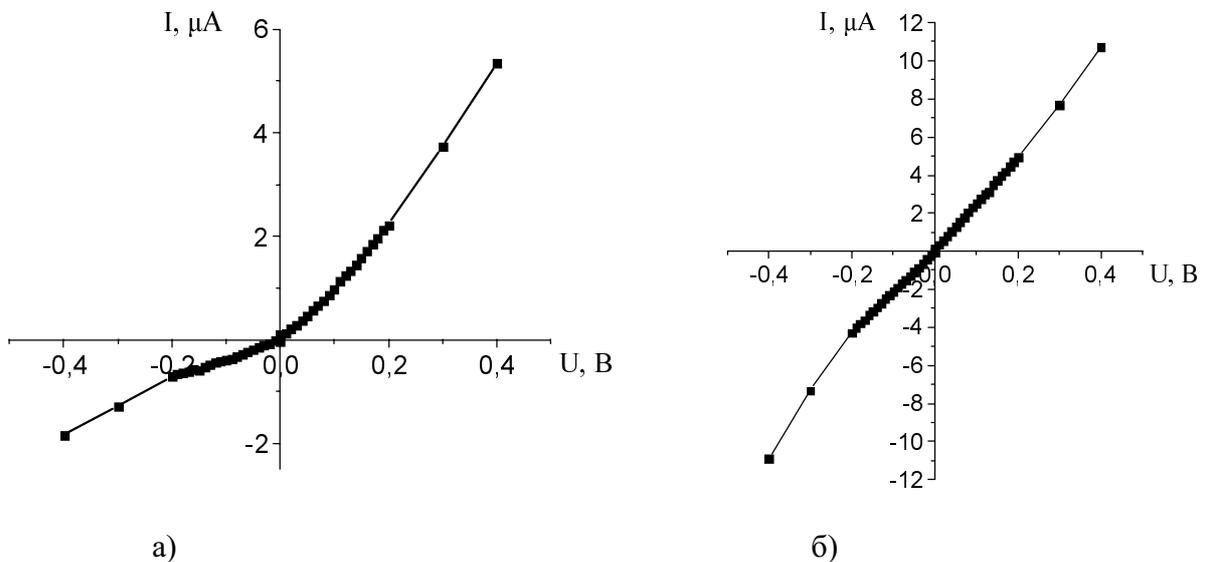


Рис. 1. Вольт-амперні характеристики структури Me – mono-n-Si на основі вихідного матеріалу (а) та матеріалу, що пройшов ВТО-900 (б)

2. Структури Me – poly-n-Si (зернистий і колончастий). Результати одержані на структурах Me – poly-n-Si показали, що:

- ВТО-900 змінює вигляд ВАХ структур на основі кристалів кремнію колончастого типу (рис. 2 а, б);
- ВТО-900 не впливає на характер ВАХ структур на основі кристалів кремнію зернистого типу (рис. 3 а, б)

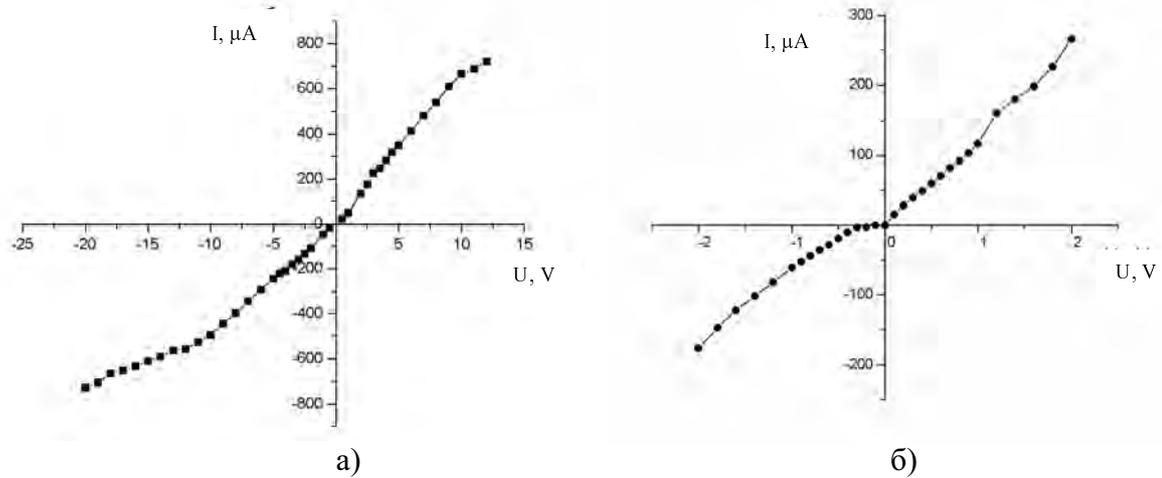


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики структури Me—poly-n-Si (колончастого типу) на основі вихідного матеріалу (а) та матеріалу, що пройшов VTO-900 (б)

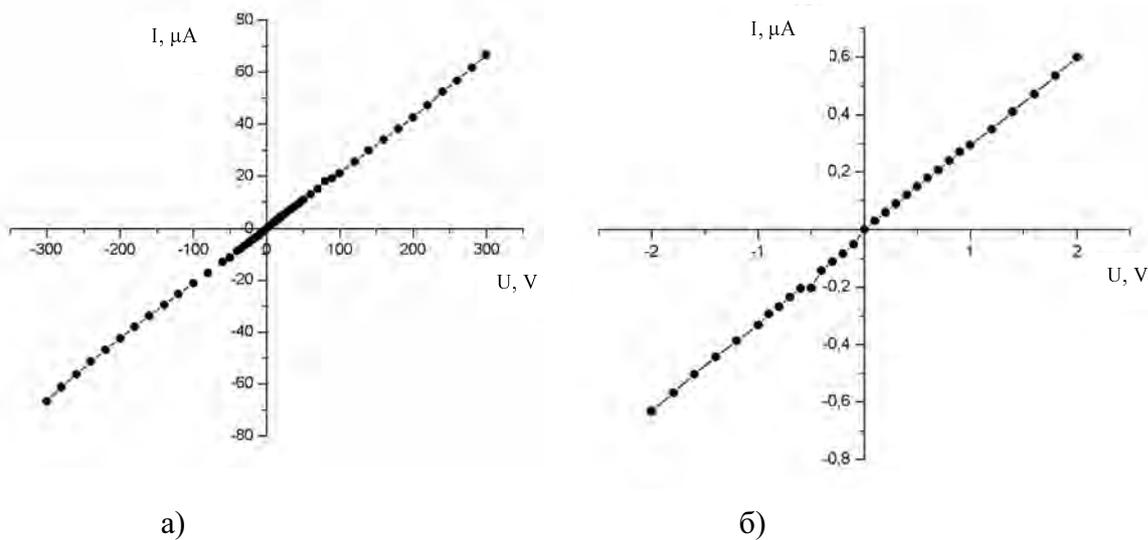


Рис. 3. Вольт-амперні характеристики структури Me—poly-n-Si (зернистого типу) на основі вихідного матеріалу (а) та матеріалу, що пройшов VTO-900 (б)

Результати та їх обговорення. 1. Структура Me – моно-n-Si. Для детальнішого аналізу експериментальних ВАХ було проведено їх перерахунок в подвійному логарифмічному масштабі. ВАХ досліджуваних структур апроксимується залежністю $I \sim U^m$, де m – коефіцієнт ідеальності, що визначає механізм перенесення носіїв заряду.

Згідно з моделлю [2] пряма вітка ВАХ структури на вихідному зразку (рис. 4а, крива 1) описується функціональною залежністю:

$$I = X_{tun} \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{Si} v_{char} A_{el}}{L^2} U, \quad (1)$$

де X_{tun} — коефіцієнт тунельної прозорості бар'єру, ε_{Si} — діелектрична проникність кремнію, v_{char} — характеристична швидкість, яка є складною функцією (залежить від

прикладеного електричного поля і параметрів матеріалу) [2], A_{el} — електрична площа зразка, L – відстань між контактами.

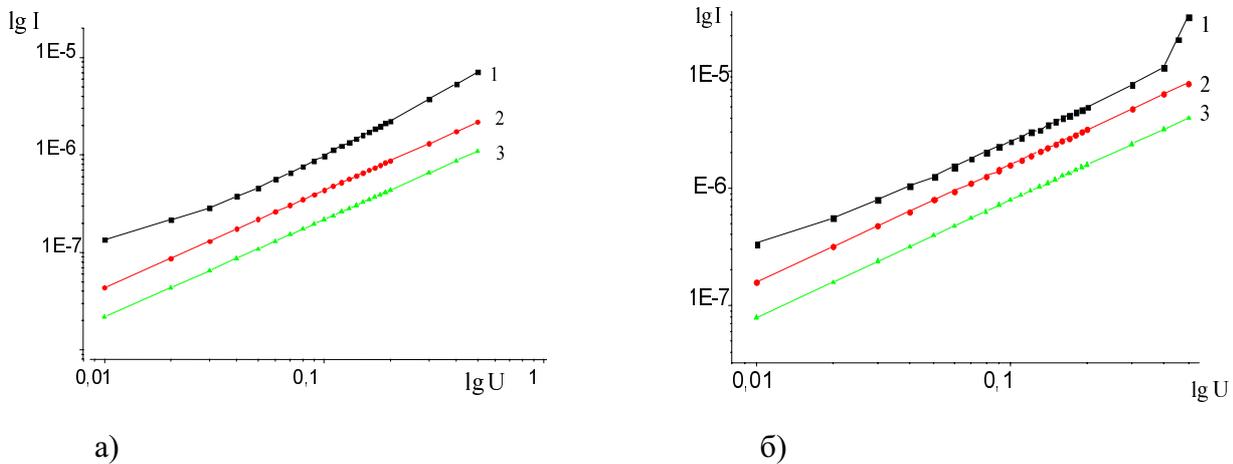


Рис. 4. Експериментальні (1) та розрахункові (2 – $X_{tun}=0.1$, 3 – $X_{tun}=0.05$) ВАХ структури Me – топо-n-Si на основі вихідного матеріалу (а) та матеріалу, що пройшов ВТО-900 (б)

Пряма вітка ВАХ структури на зразку, що пройшов ВТО-900 (рис. 4б, крива 1) до порогової напруги 0,45V описується залежністю (1). Із зростанням напруги струм характеризується залежністю (2)

$$I = X_{tun} \cdot \frac{4\varepsilon_0\varepsilon_{Si}A_{el}}{9L^2} \left(\frac{2e}{m^*} \right)^{1/2} U^{3/2}, \quad (2)$$

де m^* – ефективна маса електрона.

При цьому експериментальну ВАХ до відпалу можна описати чисельним виразом $I = 1.3 \cdot 10^{-4}U$ і після відпалу $I = 2.46 \cdot 10^{-3}U$ при зміщеннях, що не перевищують порогову напругу $U_{thr} = 0.45V$; починаючи з напруги 0,45 V $I = 5.57 \cdot 10^{-3}U^{3/2}$.

Для розрахунку залежностей згідно з виразами (1), (2) необхідно оцінити коефіцієнт тунельної прозорості бар'єра. Згідно з ВКБ наближення [3]

$$X_{tun} \approx \exp \left(- \frac{4\sqrt{2m^*} \varphi_b^{3/2}}{3e\hbar F_{max}} \right), \quad (3)$$

де F_{max} – максимальна напруженість електричного поля, φ_b — величина бар'єру (в нашому випадку до ВТО $\varphi_b = 0,083 V$, а після ВТО — $\varphi_b = 0,093 V$). Максимальна напруженість електричного поля розраховувалося згідно з [4]

$$F_{max} = \sqrt{\frac{2enU_{max}}{\varepsilon_0\varepsilon_{Si}}}, \quad (4)$$

де n – концентрація електронів.

Величина коефіцієнта тунельної прозорості бар'єру X_{tun} згідно з (3) знаходиться в межах 0,05-0,15. Найкраще наближення теоретично розрахованих залежностей до експериментальних одержано при $X_{tun} = 0,1$, що зображено на рис. 4 (криві 2).

2. Структури Me – poly-n-Si. Вимірювання ВАХ на вихідних Me–poly-n-Si ст (columnar) структурах (рис.5) показали незначні розбіжності між “прямим” і “зворотним” струмами, які можуть бути пов’язані з невеликою асиметрією In-контактів. Загалом ВАХ даної структури являє собою сукупність двох ділянок, які спрямляються в координатах $\ln j = f(\sqrt{U})$, де U – прикладена до зразка напруга. Такий вигляд ВАХ свідчить про двоступеневе тунелювання з пороговою напругою ~ 9 V.

На рис. 6 зображена ВАХ структури Me–poly-n-Si gt (grain type). Видно, що дана структура володіє плавнішим переходом між типами тунелювання (тунелювання в приконтактній області + тунелювання носіїв крізь бар’єри, утворені на границях між зернами). При цьому якісно ВАХ можна описати виразом $j \sim \exp(\sqrt{U})$.

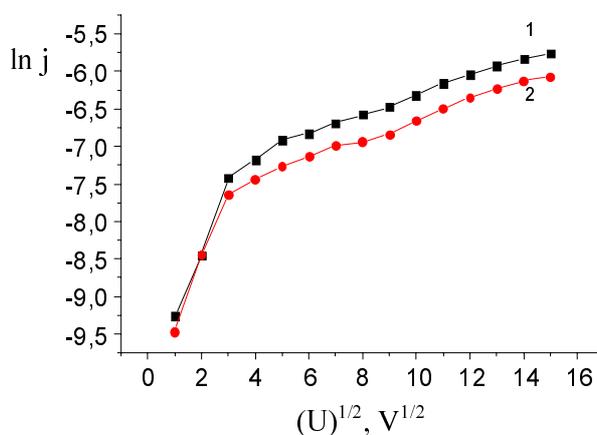


Рис. 5. Вольт-амперна характеристика контакту Me –poly-n-Si колончастого типу структури в координатах $\ln j = f(\sqrt{U})$ ($T = 290$ K):

1 – пряме зміщення; 2 – зворотне зміщення.

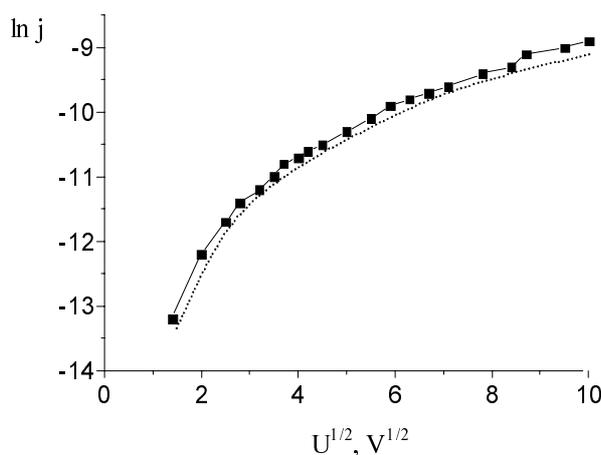


Рис. 6. Вольт-амперна характеристика контакту Me – poly-n-Si зернистого типу структури в координатах $\ln j = f(\sqrt{U})$. Даний рисунок вказує на відсутність помітних відмінностей між струмами при прикладенні до структури зміщень різних знаків ($T=290$ K)

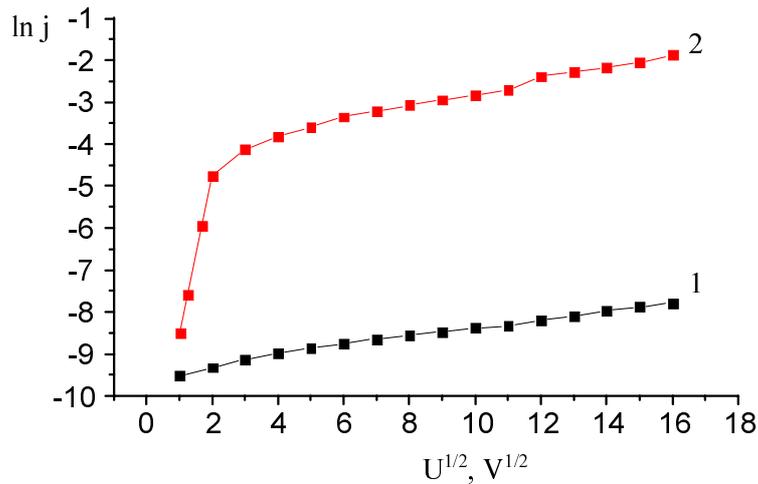


Рис. 7. Вольт-амперна характеристика контакту Me – poly-n-Si після відпалу при 900°C полікристалічного кремнію в координатах $\ln j = f(\sqrt{U})$:
 1 – poly-n-Si зернистого типу структури; 2 – poly-n-Si колончастого типу структури

Цей рисунок вказує на відсутність помітних відмінностей між струмами при прикладених до структури зміщень різних знаків ($T=290\text{ K}$)

Відпал при температурі 900°C на відкритому повітрі не змінює якісний хід ВАХ структур на основі полікремнію обох типів (рис.7).

Однак внаслідок такої термообробки зменшується опір зразків, а порогова напруга для структури Me–poly-n-Si ст зменшується майже в два рази (до 4 V).

Згідно з [5], ці явища можна пов'язати з виникненням флуктуацій носіїв заряду як в приконтактній області, так і в об'ємі зразка, що, в свою чергу, приводить до сильного звуження тунельного бар'єру. Можлива й інша ситуація: при не дуже великих зміщеннях проходження струму здійснюється шляхом прямого тунелювання електронів під бар'єром, форма якого визначається розподілом флуктуаційного заряду. Але, якщо в забороненій зоні в області флуктуації існують локалізовані стани (ЛС), підбар'єрний рух електрона можна здійснювати стрибками по ЛС, що приводить до додаткового збільшення прозорості звуженого бар'єру.

У результаті тунельний струм j через такі звуження можна описати таким виразом:

$$\ln\left(\frac{j}{j_0}\right) = -\frac{1}{5}\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2}\left(\frac{U_0}{E_B}\right)^{5/4}\left(N_D a_B^3\right)^{-1/2}, \quad (5)$$

де U_0 – висота бар'єру, $E_B = me^4 / 2\hbar^2 \varepsilon^2$ і $a_B = \hbar^2 \varepsilon / me^2$ — борівські енергія і радіус електрона, m – ефективна маса електрона, ε - діелектрична проникність кремнію, j_0 – передекспоненціальний множник. Розрахунок з використанням експериментальних даних показав, що висота бар'єру у вихідних зразках становить 0.48 eV та 0.36 eV для зернистої і колончастої структур, відповідно; після термообробки при 900°C ці величини становлять відповідно 0.12 eV і 0.9 eV.

Для з'ясування питання про енергетичну вигідність стрибкового механізму в області зміщень, менших від порогової напруги, оцінимо величину відношення (6) [5]:

$$\frac{Q_h}{Q_t} = \frac{15\pi^{1/6} (N_D a_B^3)^{1/6}}{2^{5/6} (5 + 2\nu)^{2/3}} \left(\frac{E_B}{U_0} \right)^{\frac{5-4\nu}{12}} \left(\frac{E_0}{U_B} \right)^{\frac{\nu}{3}}, \quad (6)$$

де E_0 – енергетичний параметр, який визначається чисельним методом згідно з [5], показник степеня $\nu \leq 1.4$. Розрахунок показує, що $Q_h/Q_t = 0.01 - 0.02 \ll 1$, що свідчить про переважання стрибкового тунелювання по ЛС в допороговій області зміщень.

Висновки. Порівнюючи результати дослідження ВАХ структури Me – n-Si на основі моно- і полікристалів після проведення ВТО-900 можна стверджувати, що:

- 1) електричний опір зразків зменшується в два рази порівняно з вихідними зразками;
- 2) порогова напруга зменшується в два рази порівняно з вихідними зразками для poly-n-Si колончастого типу структури і не змінюється для моно-n-Si.
- 3) висота бар'єру в приконтактній області структури Me – моно-n-Si на основі зразків, що пройшли ВТО-900 збільшується на 10 meV порівняно з вихідними, а в Me – poly-n-Si (обох типів структур) після проведення ВТО-900 зменшується в 4 рази.

Експериментальні дослідження і теоретичні розрахунки ВАХ структур Me – моно-n-Si і Me – poly-n-Si на вихідних зразках і зразках, що пройшли ВТО-900 показали, що високотемпературна обробка не впливає на механізми струмопроходження.

1. П.Г.Литовченко, М.І.Старчик, В.М.Цмоць, Ю.В.Павловський. // Тези доповідей. – Одеса, 10 – 14 вересня 2002р. – 1. – С.154.

2. Горев Н. Б., Прохоров Е. Ф., Уколов А. Т. // Микроэлектроника. – 1994. – 24. – С.42-47.

3. Полукристаллические полупроводники / Под ред. Г. Харбеке. – М., 1989. – 344 с.

4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 т., Т.1. – М, 1984. – 454 с.

5. Райх М. Э., Рузин И. М., Шкловский Б. И. // ФТП. – 1988. – 22. – С.1979-1984.