

УДК 621.315.592

Д.М. Фреїк, В.Ф. Пасічняк, О.Л. Соколов, Б.С. Дзундза
**Особливості розсіювання носіїв заряду в епітаксійних структурах
на основі халькогенідів свинцю**

*Кафедра фізики і хімії твердого тіла,
Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника,
вул. Галицька, 201, м. Івано-Франківськ, 76000, Україна,
E-mail: freik@pu.if.ua*

Зроблено аналіз залежності рухливості носіїв заряду від товщини епітаксійних одношарових плівок р - PbTe і n - PbS, а також гетероструктур р - PbTe / n - PbS, осаджених із парової фази методом гарячої стінки на сколи (111) кристалів ВаF₂. Визначено внесок розсіювання на поверхні, а також дислокаціях невідповідності на межі “підкладка - плівка” і гетероструктури.

Ключові слова: : плівки, гетероструктури, дислокації, розсіювання, рухливість.

Стаття постуила до редакції 14.04.2004; прийнята до друку 30.08.2004.

I. Вступ

Сульфід свинцю (галеніт) – один із перших напівпровідників, якій був використаний у кристалічних детекторах ще на самих початках розвитку радіо. Кристали і тонкі плівки PbS, а також споріднених сполук PbSe і PbTe зараз знайшли широке використання у приладах інфрачервоної техніки [1,2].

Халькогеніди свинцю відносяться до нестехіометричних сполук. При порівняно вузькій області гомогенності володіють широким діапазоном зміни концентрації носіїв заряду. За умови відхилення складу на бік металу матеріал має n - тип провідності, а на бік халькогену – р - тип. Кристалізуються у структурі типу NaCl, ширина забороненої зони при 4 К складає 0,28; 0,16 і 0,19 eВ для PbS, PbSe і PbTe відповідно [3,4].

Для тонких плівок, на відміну від монокристалів, характерними є те, що відношення поверхні до об'єму є значним. Це і обумовлює їх особливі властивості. Товщина плівок, у ряді випадків, є тим параметром, який визначає транспортні властивості матеріалу і домінуючі механізми розсіювання носіїв заряду, у літературі відомо ряд робіт [5-7], у яких проведено дослідження залежності рухливості і механізмів розсіювання носіїв заряду від товщини плівок сполук A⁴B⁶. Так, зокрема, автори [5] вивчили рухливість плівок n – PbTe, осаджених на кристалах KCl, для товщин до 7 мкм, в області температур 77 – 300 К. Визначено внесок поверхневої і залишкової рухливості, які пов'язують із розсіюванням на

граничах зерен, дислокаціях і нерівностях підкладки. У статті [8] досліджено вже двошарові структури PbTe/PbS де проведено розрахунок ефективної рухливості за умови розсіювання носіїв заряду на поверхні і дислокаціях невідповідності, на границях гетероструктури.

Основною метою цієї роботи є співставлення особливостей розсіювання носіїв заряду в одношарових і двошарових структурах на основі епітаксійних плівок халькогенідів свинцю, осаджених із парової фази методом гарячої стінки на свіжі сколи (111) кристалів ВаF₂.

II. Методика експерименту

Зразки для дослідження отримували з парової фази методом гарячої стінки на свіжих сколах (111) кристалів ВаF₂ згідно [8,9]. Швидкість росту плівок складала 1-3 нм с⁻¹. Товщина плівок складала 0,1 - 2,0 мкм, а температура осадження T_п = 520 – 570 К.

Вимірювання електричних властивостей проводили компенсаційним методом у постійних електричних і магнітних полях. Вимірювання проводили як на окремих плівках р - PbTe і n - PbS, різної товщини, а також гетероструктурах р - PbTe / n - PbS із рівними значеннями товщини окремих шарів і різною загальною товщиною. Струм через зразки складав 0,1 - 0,5 мА. Магнітне поле напрямлялося перпендикулярно до поверхні плівок при індукції 0,8 Тл. Вимірюваний зразок мав чотири холлівські і два струмові контакти.

Структура плівок досліджувалася рентгенографічно.

III. Рухливість носіїв заряду і механізми розсіювання

Рухливість плівок, виміряна на експерименті μ_{exp} , згідно правила Маттіссена співвідноситься із складовими як [5]:

$$\frac{1}{\mu_{\text{exp}}} = \frac{1}{\mu_{\text{П}}} + \frac{1}{\mu_{\text{з}}} + \frac{1}{\mu_{\text{v}}}, \quad (1)$$

тут $\mu_{\text{П}}$ – рухливість носіїв заряду, обумовлена розсіюванням на поверхні (поверхнева); $\mu_{\text{з}}$ – залишкова рухливість, яка враховує розсіювання на дислокаціях невідповідності гетеромежі, міжзеренне розсіювання, дефектах росту; μ_{v} – рухливість монокристалу (об’ємна).

Рухливість, пов’язана із розсіюванням на поверхні можна розрахувати згідно [5,8]:

$$\mu_{\text{П}} = \mu_{\text{v}}(1 + \lambda/d)^{-1}, \quad (2)$$

де λ – середня довжина вільного пробігу вільних носіїв заряду.

Об’ємну рухливість μ_{v} , характерну для монокристалів визначили з врахуванням розсіювання на екранованому кулонівському потенціалі вакансій, деформаційних потенціалах акустичних і оптичних фононів, поляризаційному потенціалі оптичних фононів і взаємодії між носіями (таблиця) [10].

Рухливість носіїв заряду, зумовлену розсіюванням на дислокаціях невідповідності, можна оцінити з двох різних позицій. Перша з них полягає в тому, що дислокації невідповідності, що утворюються на межі “плівка - підкладка” можна розглядати як заряджені включення – деякі мікрообласті електростатичного поля, які приводять до зменшення рухливості носіїв заряду. Так, зокрема, дислокація у кристалі n-типу є не що інше як лінійний від’ємний заряд, навколо якого скупчений позитивний вже об’ємний заряд. Носій заряду –

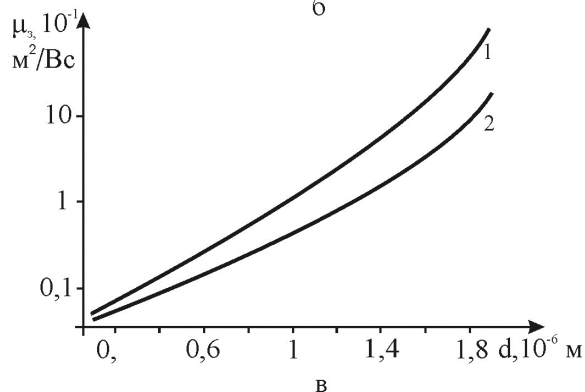
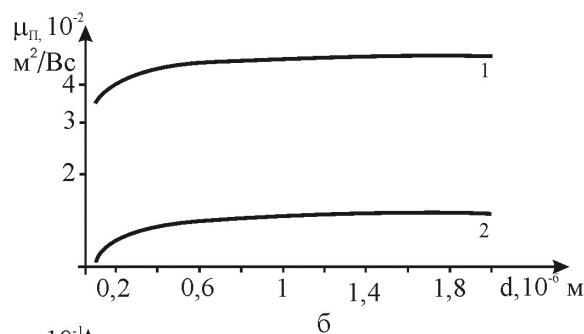
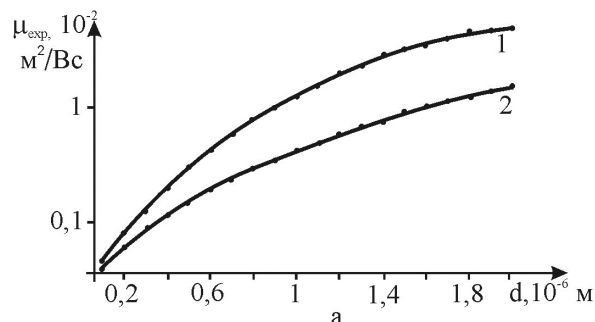


Рис. 1. Залежність експериментально визначеної μ_{exp} (а) [8], поверхневої $\mu_{\text{П}}$ (б) і залишкової $\mu_{\text{з}}$ (в) рухливостей плівок p – PbTe (1) і n – PbS (2) від товщини d.

електрон, який рухається у електростатичному полі дислокації зазнає розсіювання. За умови, що окрема дислокація – заряджений циліндр, для рухливості будемо мати вираз [8]:

$$\mu_{\text{d}} = \mu_{\text{v}}(1 - \delta),$$

Таблиця

Значення основних величин, які використовувалися при розрахунках рухливостей тонких плівок

Величина	Позначення і розмірність	Значення
Об’ємна рухливість (при максимальній товщині)	$\mu_{\text{v}}, \text{ m}^2/\text{Vs}$ (PbTe-p)	0,052
	$\mu_{\text{v}}, \text{ m}^2/\text{Vs}$ (PbS-n)	0,015
Довжина вільного пробігу	$\lambda, \text{ м}$	$5 \cdot 10^{-8}$
Швидкість електрона	$v, \text{ м/с}$	$1 \cdot 10^5$
Концентрація носіїв	$n, \text{ м}^{-3}$	10^{18}
Заряд електрона	$e, \text{ Кл}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$
Стала Планка	$\hbar, \text{ Дж}\cdot\text{с}$	$6,62 \cdot 10^{-34}/(2 \cdot \pi)$
Ефективна маса	$m^*, \text{ Кг}$ (PbTe-p)	$0,184 \cdot 10^{-31}$
	$m^*, \text{ Кг}$ (PbS-n)	$0,112 \cdot 10^{-30}$

$$\text{де } \delta \approx \frac{\pi R^2}{d} \sqrt{N_{\Pi}}$$

Тут δ – доля об'єму, зайнятого циліндрами об'ємного заряду дислокації; R – радіус цього циліндра; N_{Π} – поверхнева густина дислокацій. Тоді

$$\mu_d = \mu_v \left(1 - \frac{\pi R^2}{d} \sqrt{N_{\Pi}} \right). \quad (3)$$

З іншого боку, розсіювання на дислокаціях можна представити у наближенні часу релаксації $\langle \tau \rangle$:

$$\mu_d = \frac{e \langle \tau \rangle}{m^*},$$

де m^* – ефективна маса носіїв заряду; e – заряд електрона. Так як час релаксації визначається співвідношенням [11]

$$\langle \tau \rangle = \frac{3}{8RN_{\Pi}v},$$

вираз для рухливості μ_d буде

$$\mu_d = \frac{3e}{8RN_{\Pi}vm^*}. \quad (4)$$

Тут v – дрейфова швидкість розсіювання електронів.

За умови, що залишкова рухливість μ_3 дорівнює рухливості μ_d вирази (3) і (4) дають можливість зробити оцінку зміни радіуса R і поверхневої густини N дислокацій від товщини плівки. Необхідні дані, використані при розрахунках, наведено у таблиці.

Для двошарових структур μ_{eff} носіїв заряду можна визначити із співвідношення [8]:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_1 (1 + \beta)^{-1} + \mu_2 (1 + \beta^{-1})^{-1}, \quad (5)$$

де $\beta = \sigma_2 d_2 / \sigma_1 d_1$.

Тут μ_1 і μ_2 – рухливості першого (p -PbTe) і другого (n -PbS) епітаксійного шару; σ_1 , d_1 і σ_2 , d_2 – питомі електропровідності і товщини цих шарів відповідно.

IV. Результати експерименту та їх обговорення

Одношарові епітаксійні плівки. Залежність експериментальних значень рухливостей μ_{exp} плівок від товщини (рис. 1,а) можна представити у вигляді поліномів четвертого степеня [8]:

$$\mu_{\text{exp}} = a_0 x^4 + a_1 x^3 + a_2 x^2 + a_3 x + a_4,$$

де a_i – розмірні коефіцієнти, а x – відповідає за розмірністю товщині d (м). Для досліджуваних плівок p -PbTe (1) і n -PbS (2) цими поліномами будуть вирази відповідно:

$$\mu_{1\text{exp}} = -0,779 \cdot 10^{22} d^4 + 0,262 \cdot 10^{17} d^3 - 0,125 \cdot 10^{22} d^2 + 6986,22 d - 0,00021;$$

$$\mu_{2\text{exp}} = -0,563 \cdot 10^{20} d^4 + 0,397 \cdot 10^{15} d^3 + 0,272 \cdot 10^{10} d^2 + 923,3 d + 0,00032$$

Характерною особливістю залежностей $\mu_{\text{exp}}(d)$ є значне зменшення рухливості носіїв заряду для

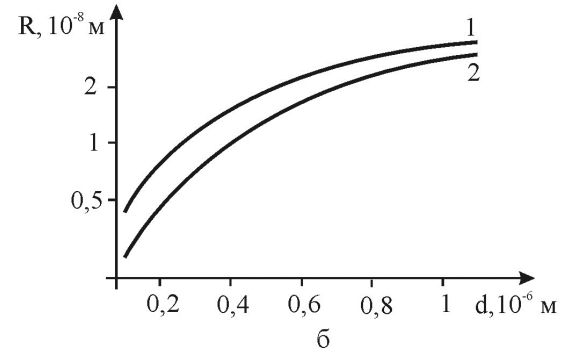
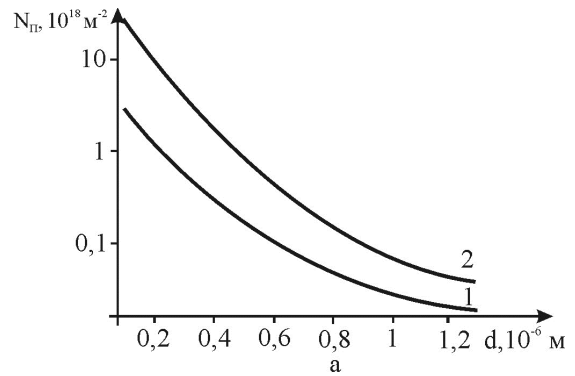


Рис. 2. Залежність поверхневої густини N_{Π} (а) і радіуса R (б) дислокацій для плівок p -PbTe (1) і n -PbS (2) від товщини d .

області малих товщин $d < 1,0$ мкм (рис. 1,а).

Розраховані значення поверхневої рухливості μ_{Π} згідно (2) наведені на рис. 1,б. Зауважимо, що для тонких плівок можна чекати різних ефектів як на середній довжині вільного пробігу носіїв заряду так і на дебаївській довжині екранування. У нашому випадку максимальне значення для цих двох товщин складає $\lambda = 50$ нм (таблиця) [8], що набагато менше за мінімальні значення товщини (≈ 100 нм) досліджуваних плівок. У зв'язку із цим поява розмірних ефектів у плівках мало ймовірна.

Залишкову рухливість μ_3 , розраховано із співвідношення (1) за відомими значеннями μ_{exp} (рис. 1,а), μ_{Π} (рис. 1,б) та μ_v (таблиця), зображено на рис. 1,в. Видно, що із збільшенням товщини плівок у зазначеному інтервалі, вона зростає на три порядки.

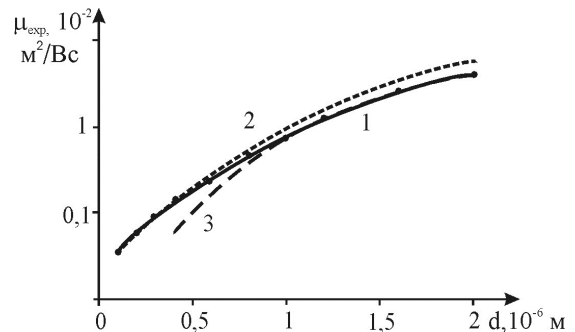


Рис. 3. Залежність експериментально визначеної рухливості (1) і рухливостей, пов'язаних із розсіюванням на поверхні (2) і дислокаціях (3) гетероструктури p -PbTe/ n -PbS від її загальної товщини d за умови рівності товщин окремих шарів ($d_1 = d_2$) [8].

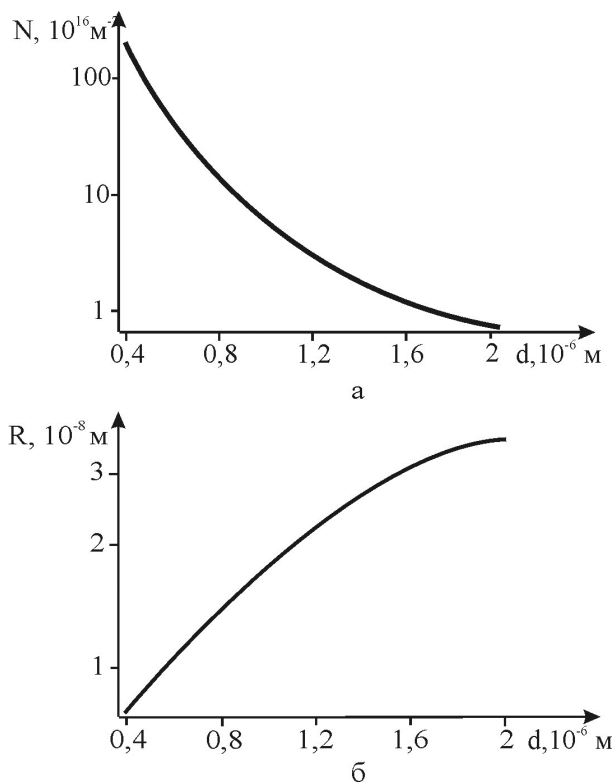


Рис. 4. Залежність поверхневої густини N (а) і радіуса R (б) дислокацій гетероструктури p -PbTe/ n -PbS від товщини, за умови $d_1 = d_2$.

Оцінку поверхневої густини N_{Π} і радіуса R дислокацій проводимо за умови переважання внеску у залишкову рухливість μ_3 розсіювання на дислокаціях μ_d . Це можливо із-за того, що епітаксійні плівки характеризуються достатньою ступінню структурної завершеності, яка дозволяє нехтувати розсіюванню на границях зерен, дефектах росту і нерівностях поверхні підкладки.

Зміни поверхневої густини N_{Π} (рис. 2,а) і радіуса R (рис. 2,б), дислокацій із товщиною плівки носять протилежний характер – із ростом товщини N_{Π} зменшується, а R зростає. Збільшення радіуса дислокації із товщиною плівок можна пояснити зростанням розмірів об’ємного заряду, що є очевидним фактом. Зменшення ж при цьому густини дислокацій пов’язані із віддаленням від їх джерела – межі гетероструктур “підкладка-плівка”.

Двошарові гетероструктури. Двошаровій структурі p -PbTe/ n -PbS наявність межі поділу є причиною утворення дислокацій невідповідності в наслідок різниці періодів ґратки телуриду і сульфиду свинцю. На рис. 3, разом із експериментальним значенням рухливості носіїв заряду гетероструктури (крива 1) наведено розраховані значення поверхневої рухливості μ_{Π} згідно (2). В якості об’ємної використано ефективну рухливість μ_{eff} , розраховану за формулою (5) при $d_1 = d_2$ [8]. Аналіз цих

залежностей вказує на те, що до товщин 0,5 мкм має місце добре співпадання експериментальної і розрахованої кривих. Це підтверджує той факт, що в області малих товщин гетероструктури домінує розсіювання носіїв заряду на поверхні. Рухливість, пов’язана із розсіюванням на дислокаціях (рис. 3 – крива 3), навпаки має суттєве розходження із експериментом при малих товщинах гетероструктури і добре співпадає для значень більших від 0,7 мкм. При цьому зауважимо, що якщо для області малих товщин ($d \approx 0,5$ мкм) гетероструктури характерні високі значення густини дислокацій ($N_{\Pi} \approx 10^{18} \text{ м}^{-2}$) і незначні їх радіуси ($R \approx 10^{-8} \text{ м}$), то при зростанні товщини N падає на три порядки величини, а R зростає (рис.4). При товщинах гетероструктури $d > 1,5$ мкм є тенденція насичення величини радіуса дислокації до $R \approx 4 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ (рис.4,б). Така зміна у характерних параметрах дислокацій невідповідності на межі гетероструктури p -PbTe/ n -PbS, а також врахування домінуючого впливу розсіювання носіїв заряду при $d > 0,7$ мкм вказують, що визначальним фактором у транспортних явищах є не густина, а розміри електростатичного заряду дислокацій.

V. Висновки

1. Зроблено аналіз залежностей рухливості носіїв заряду від товщини для епітаксійних плівок p -PbTe і n -PbS, а також гетероструктури p -PbTe/ n -PbS.
2. Розділено вплив розсіювання носіїв заряду на поверхні і дислокаціях невідповідності, визначено поверхневу густину і радіус дислокації.
3. Встановлено, що якщо в області малих товщин ($\sim 0,5$ мкм) домінує розсіювання на поверхні, то при її збільшенні переважає розсіювання на дислокаціях невідповідності.
4. Показано, що із ростом товщини плівок має місце значне зменшення поверхневої густини дислокації і деяке зростання їх радіуса.
5. Висловлено припущення, що для гетероструктури відповідальним за розсіювання на дислокаціях є радіус просторового електростатичного заряду.

Д.М. Фреїк – заслужений діяч науки і техніки України, доктор хімічних наук, професор, директор Фізико-хімічного інституту, завідувач кафедрою фізики і хімії твердого тіла;

В.Ф. Пасічняк – аспірант кафедри фізики і хімії твердого тіла;

О.Л. Соколов – аспірант кафедри фізики і хімії твердого тіла;

Б.С. Дзундза – аспірант кафедри фізики і хімії твердого тіла.

- [1] Ф.Ф. Сизов. Твёрдые растворы халькогенидов свинца и олова и фотоприёмники на их основе // Зарубежная электронная техника. **24**, сс.31-48 (1977)
- [2] H. Holloway. Thin Films IV-VI semiconductor photodiodes // *Physics thin films*, new York, **11**, pp 105-203 (1980).
- [3] Н.Х. Абрикосов, Н.Е. Шелимова Полупроводниковые материалы на основе соединений $A^{IV}B^{VI}$. Наука. Москва. 194 с. (1975).
- [4] Д.М. Фреїк, В.В. Прокопів, М.О. Галушак, М.В. Пиц, Г.Д. Матеїк. Кристалохімія і термодинаміка атомних дефектів у сполуках $A^{IV}B^{VI}$. За заг. ред. Фреїка Д.М. Плай. Івано-Франківськ. 164 с. (1999).
- [5] P.R. Vaya, J. Majht, B.S.V. Gopalam, C. Dattatrepan. Thickness Dependence of Hall Mobility of HWE Grown PbTe Films // *Phys. Stat. Sol. (a)*, **87**(341), pp 341-350 (1985).
- [6] І.В. Калитчук, В.М. Кланічка. Розсіювання носіїв заряду в плівках n-PbS // *Фізика і хімія твердого тіла*, **5**(1), сс. 106-112 (2004).
- [7] Д.М. Фреїк, Б.С. Дзундза, І.В. Калитчук, В.М. Кланічка. Рухливість носіїв заряду і механізми їх розсіювання в плівках сульфїду свинцю // *Фізика і хімія твердого тіла*. **5** (2), сс.302–306 (2004)
- [8] О.А. Александрова, Р.Ц. Бондоков, Н.В. Саунин, Ю.М. Таиров. Подвижность носителей заряда в двухслойных структурах PbTe/PbS // *Физика и техника полупроводников*, **32**(9), сс. 1064-1068 (1998).
- [9] Д.М. Фреик, М.А. Галушак, Л.И. Межиловская. *Физика и технология полупроводниковых пленок*. Вища школа, Львів, 152 с. (1988).
- [10] D.M. Freik, L.I. Nykyruy, V.M.Shperun. Scattering Mechanisms of Electrons on Monocrystalline PbTe, PbSe and PbS // *Semiconductor Physics, quantum electronics and photoelectronics* . **5**(4), pp362-367 (2002).
- [11] М.А. Глауберман, О.А. Кулініч, В.В. Єгоров, Н.А. Каніщева, В.В. Козел. Вплив структурних дефектів у при поверхневих шарах кремнію на перетворювальні властивості інжекційно-інверсійної магніточутливої структури // *Фізика і хімія твердого тіла*, **5**(1), сс. 38-43 (2004).

D.M. Freik, V.F. Pasichniak, O.L. Sokolov, B.S. Dzungza

Features of Carrier Scattering in the Epitaxial Structures on the Basis of Lead Chalkogenides

*Department of physics and solid chemistry
Precarpathian national university of name of Vasiliy Stefanyk
201, Galitska Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine
E-mail: freik@pu.if.ua*

An analysis of dependence of the mobility of carrier scattering on thickness of the epitaxial films p-PbTe and n-PbS, and also heterostructures of the p-PbTe / n-PbS, deposition from the steam phase by method of hot wall on off the BaF₂ substrates (111). Determine contribution of scattering on surface, and also dislocations on line "substrates - films" and heterostructures .