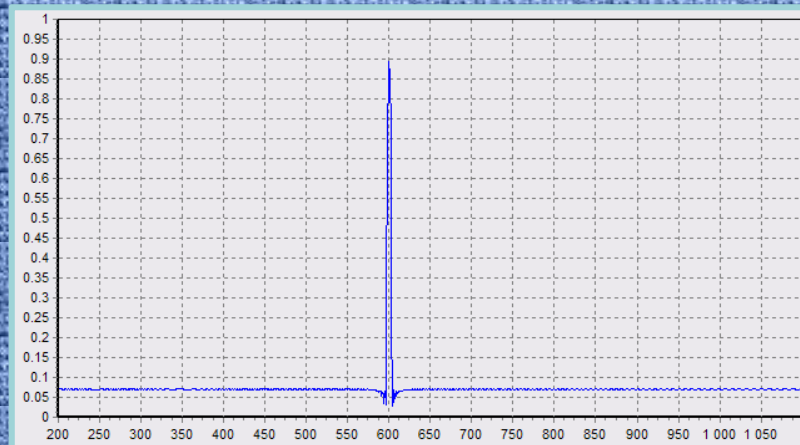
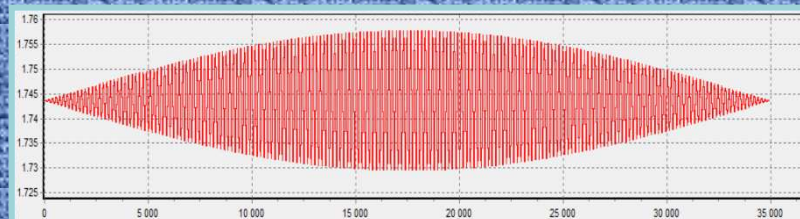


МАГНЕТРОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ

О. Д. Вольпян, Ю. А. Обод □□, С. В. Шкатула

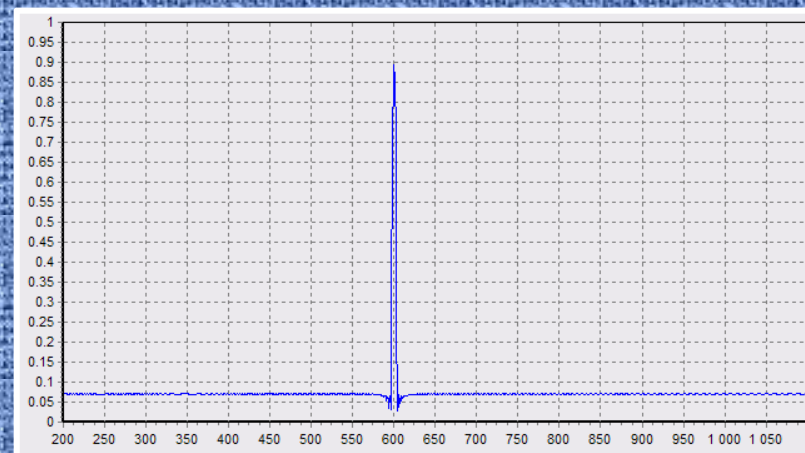
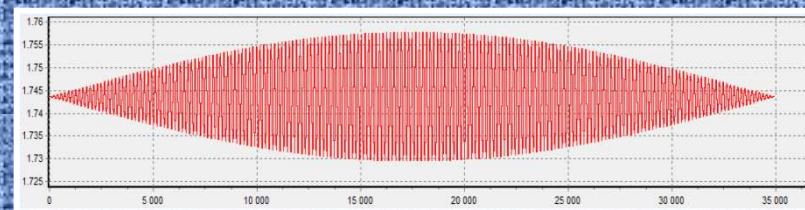
ОАО «НИИ «ПОЛЮС» им. М. Ф. СТЕЛЬМАХА», ООО «НПК Фотрон-Авто» □□



MAGNETRON SPUTTERED OPTICAL COATINGS FOR LASER RANGING SYSTEMS

Volpian O.D., Obod Yu.A. *, Shkatula S.V.

OJSC“M. F. Stelmakh Research & Development Institute-Polyus”
Scientific-Manufacturing Enterprise “Fotron-Auto Ltd”*





ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЯМ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ



спектральные характеристики покрытия

- суперширокие рабочие области спектра ($\lambda_k - \lambda_n > 10\lambda_n$) и рабочих углов ($\Delta\alpha > 0,3$), глубокая модуляция характеристик ($R_1 > 99,99\%$; $R_2 < 0,1\%$); высокое спектральное разрешение $\Delta\lambda \leq 10\text{\AA}$ при $T_{0,5} > 0,7$ в области $1\text{ мкм} < \lambda_{\text{раб}} < 5\text{ мкм}$);
- высокая устойчивость спектральных характеристик к изменению параметров покрытия (температурный уход толщин слоев, «старение» покрытия);

оптические потери

- уровень оптических потерь (поглощение, рассеяние) в лазерных зеркалах составляет менее 100 ppm;

устойчивость к радиационному воздействию

- приемлемый уровень устойчивости интерференционного зеркала и просветляющего покрытия торца активного элемента к излучению лазера превышает $0,9\text{ ГВт/см}^2$ ($\lambda = 1,06\text{ мкм}$; $t_{\text{имп}} = 10\text{ нс}$);

устойчивость к факторам внешней среды (температуре, её перепадам, влажности)

- нулевая группа устойчивости (полевые условия)

устойчивость к внешним механическим воздействиям

- нулевая группа устойчивости (старт ракеты и т. д.)

воспроизводимость технологического процесса

- детерминированная связь между рабочими характеристиками покрытия и параметрами технологического процесса;
- относительная ошибка воспроизведения характеристик исполнительных устройств, задействованных в технологическом процессе, не более 0,005;



PROSPECTIVE REQUIREMENTS TO OPTICAL COATINGS AND TECHNOLOGY OF THEIR MANUFACTURING



coating spectral characteristics

- superwide operating spectrum ($\lambda_{\text{term}} - \lambda_{\text{init}} > 10\lambda_{\text{init}}$) and operating angles ($\Delta\alpha > 0,3$), hard-driving modulation of optical characteristics ($R_1 > 99,99\%$; $R_2 < 0,1\%$); high spectral resolution ($\Delta\lambda \leq 10\text{\AA}$ with $T_{0,5} > 0,7$ in the range of $1\text{ }\mu\text{m} < \lambda_{\text{oper}} < 5\text{ }\mu\text{m}$);
- high stability of spectral characteristics under coating parameter changes (thermal change of layers thickness, coating “aging”);

optical losses

- good-enough level of optical losses (absorption, scattering) in laser mirrors is less than 100 ppm

resistance to radiation

- good-enough stability level of the interference mirror and the anti-reflecting coating of active element face to laser emission is over $0,9\text{ GW}/\text{sm}^2$ ($\lambda = 1,06\text{ }\mu\text{m}$; $t_{\text{pulse}} = 10\text{ ns}$);

resistance to ambient factors (temperature and its gradients, humidity)

- zero resistance group (field conditions)

resistance to external mechanical influences

- zero resistance group (missile launch, etc.)

technological process reproductivity

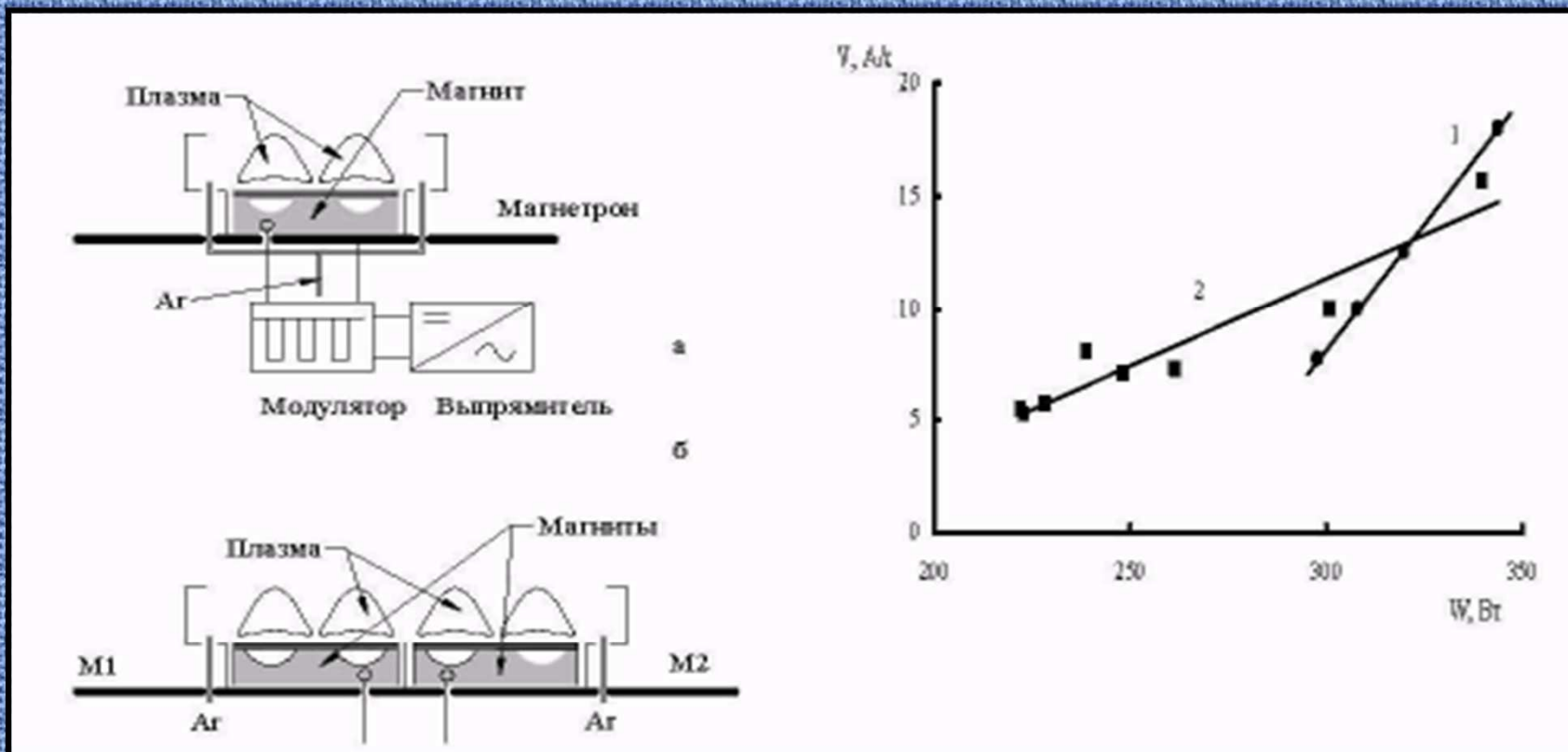
- strongly determined connection between optical coating characteristics and technological process parameters;

- relative reproduction error of the characteristics of execution unit involved in a technological process is at most 0.005



МАГНЕТРОННЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Вольпян О.Д. Кузьмичев А.И. Конструкции и характеристики магнетронов для получения прецизионных оптических покрытий
«Прикладная физика», 2008, № 3



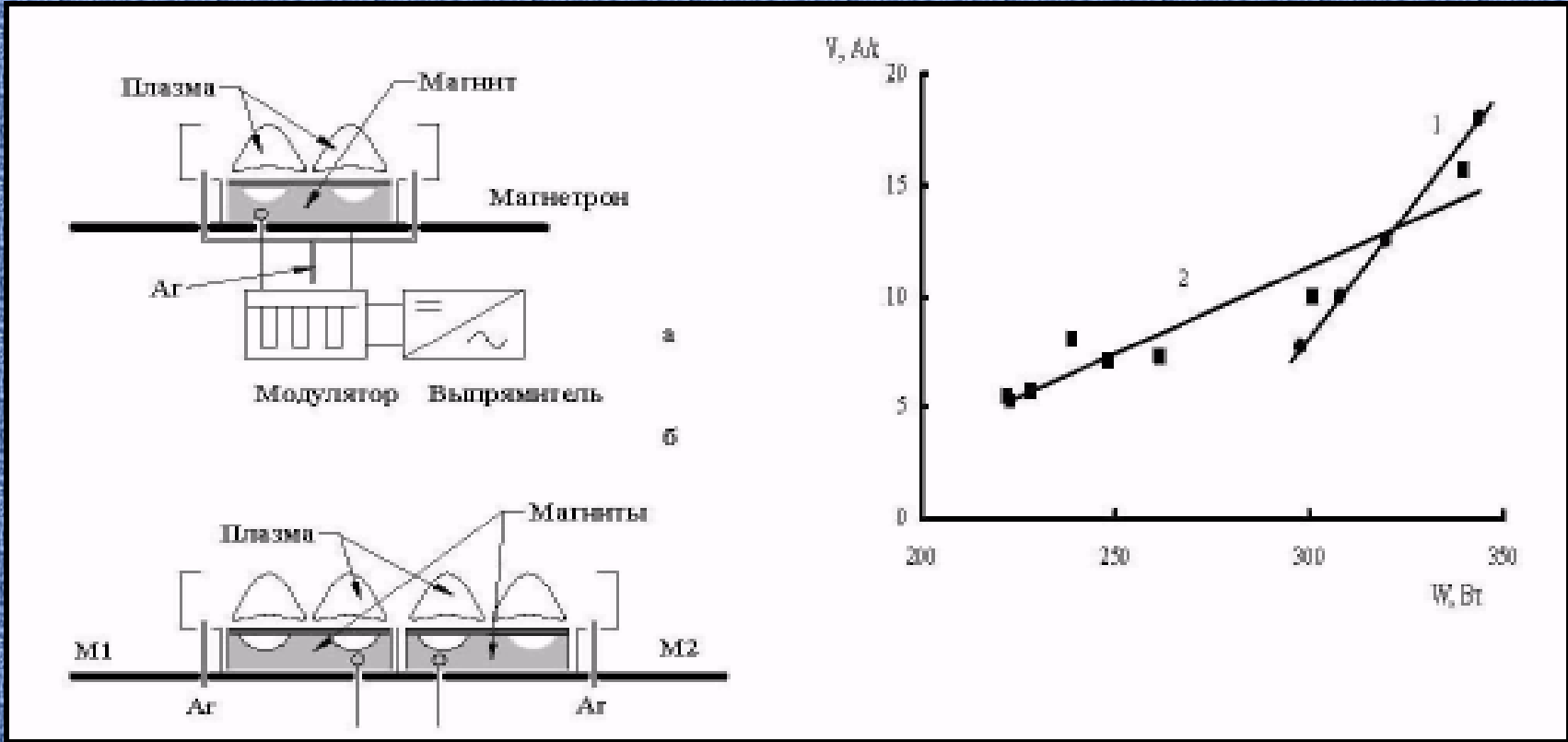
Конструктивные схемы импульсных магнетронных распылителей M_1 и M_2 — спаренные магнетроны, Ar — подача аргона

Зависимости скорости роста пленок Ta_2O_5 (1) и SiO_2 (2) от мощности магнетронного разряда



MAGNETRON SPUTTERING METHOD OF OPTICAL COATINGS

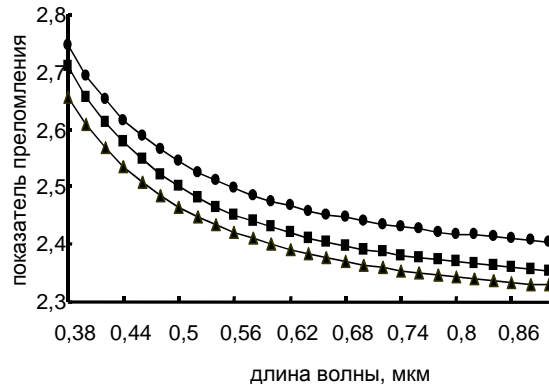
Вольпян О.Д. Кузьмичев А.И. Конструкции и характеристики магнетронов для получения прецизионных оптических покрытий
«Прикладная физика», 2008, № 3



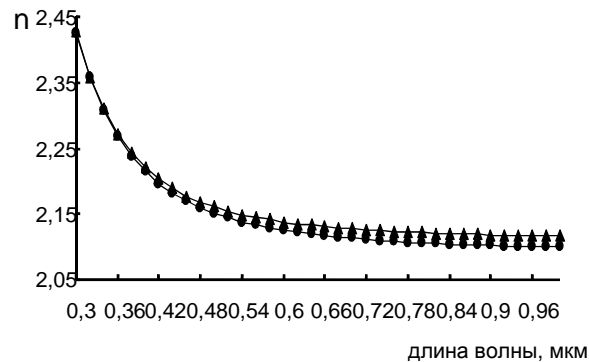
Constructive schemes of impulse magnetron guns
M1 and M2 - twin magnetrons
Ar - argon flow

Dependences of the growth rate of Ta₂O₅ films (1) and SiO₂ (2) on the magnetron discharge power

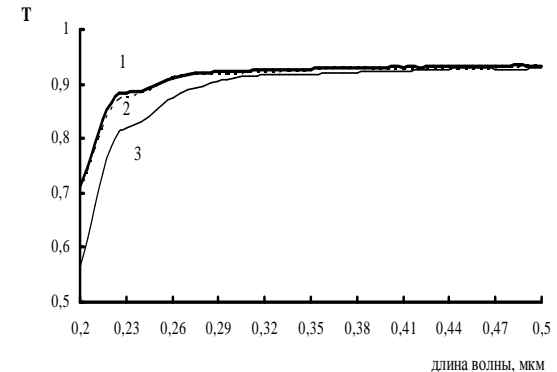
МАГНЕТРОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ



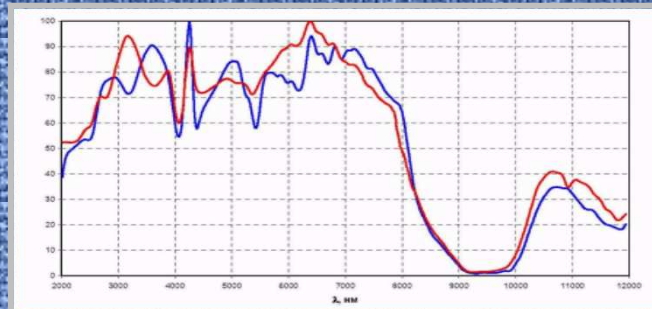
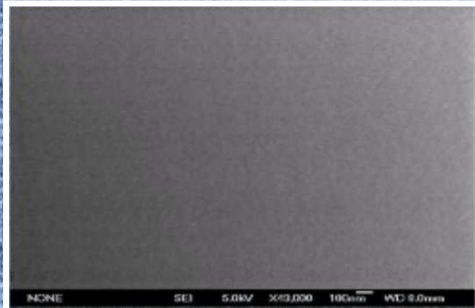
TiO_2



Ta_2O_5



SiO_2



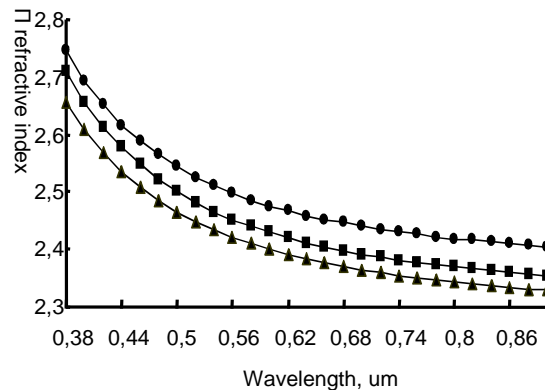
**СОЗДАН БАНК
БАЗОВЫХ
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ
ЛАЗЕРНОЙ
ДАЛЬНОМЕТРИИ**

Вольпян О. Д., Яковлев П. П., Мешков Б. Б., Обод Ю. А. Получение оптических пленок TiO_2 методом реактивного магнетронного распыления на переменном токе. // Оптический журнал, 2001, т. 68, № 7, с. 36 -39.

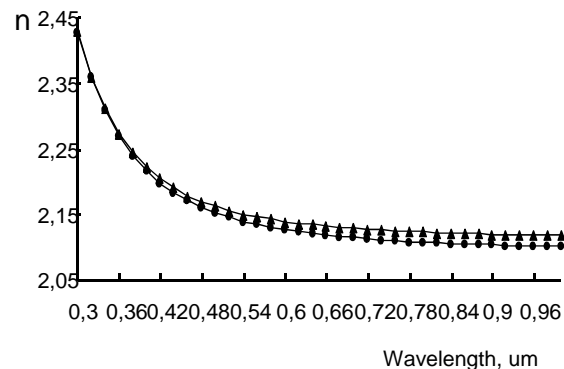
Вольпян О. Д., Яковлев П. П., Мешков Б. Б., Обод Ю. А. Оптические свойства пленок Ta_2O_5 , полученные реактивным магнетронным распылением на постоянном и переменном токе. // Оптический журнал, 2003, т.70, №9, с. 56 – 60.

Вольпян О. Д., Обод Ю. А, Яковлев П. П. Исследование оптических пленок SiO_2 , полученных реактивным магнетронным распылением на переменном токе. // Оптический журнал. 2004, т.71, № 7, с.81-84.

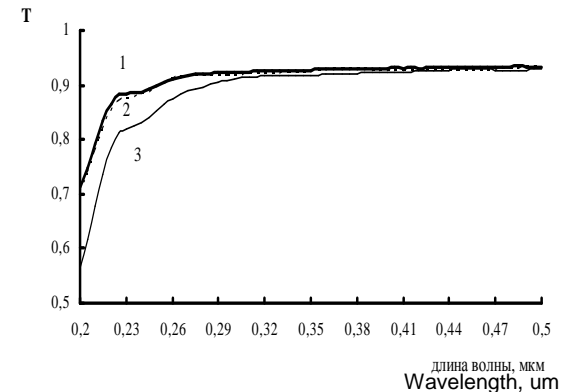
MAGNETRON SPUTTERED OPTICAL COATINGS



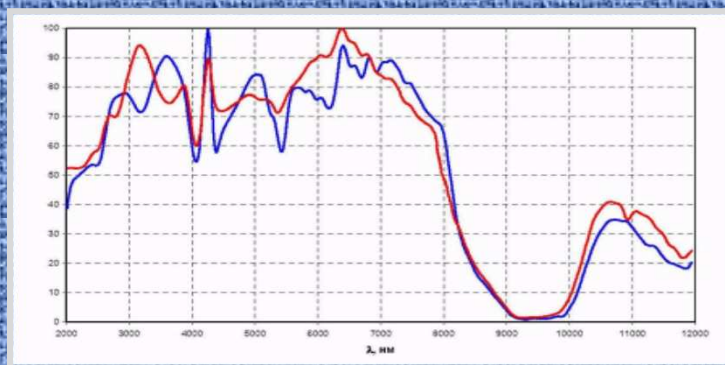
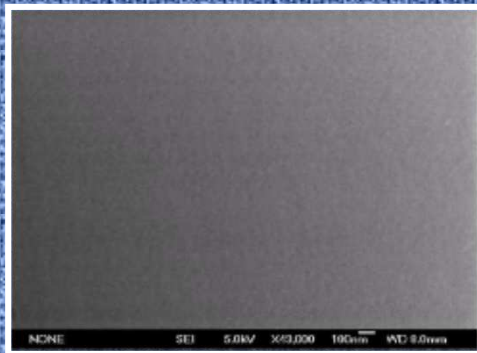
TiO_2



Ta_2O_5



SiO_2



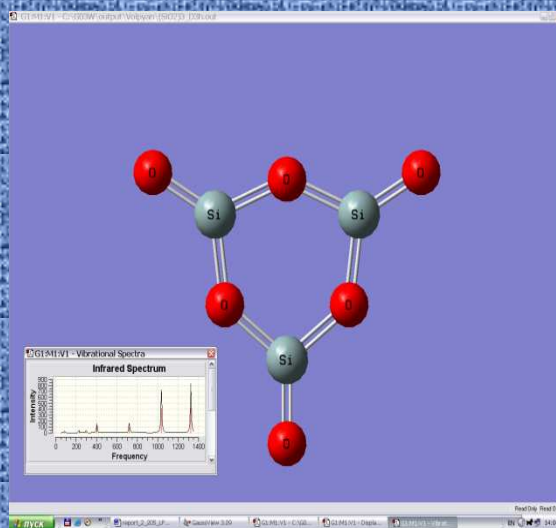
THE BANK OF
BASIC THIN-FILM
MATERIALS IS
CREATED FOR
LASER RANGING
SYSTEMS

- O. D. Vol'p'yan and B. B. Meshkov, Yu. D. Obod, P. P. Yakovlev, Obtaining TiO_2 optical films by reactive ac magnetron sputtering// J. Opt. Technol. 68 (7), July 2001, p. 494 – 487.
- O. D. Vol'p'yan and B. B. Meshkov, Yu. A. Obod, P. P. Yakovlev. Optical properties of Ta_2O_5 films obtained by reactive magnetron sputtering, J. Opt. Technol. 70 (9), September 2003, p. 669 – 672.
- O. D. Vol'p'yan and P. P. Yakovlev, Yu. A. Obod. Investigation of SiO_2 optical films produced by reactive ac magnetron sputtering// J. Opt. Technol. 71 (7), July 2004, p.487 -490.

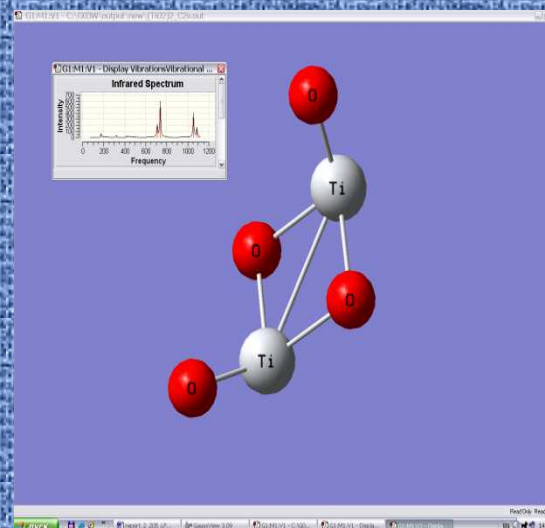
НАНОКЛАСТЕРНЫЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ СТРУКТУРЫ

для важнейших применений необходимо сочетание заданной модуляции структуры материала (градиентов электрической и магнитной проницаемостей и т. д.) с его надатомной организацией – нанокластерами

кластер $(\text{SiO}_2)_3$
 D_{3h} - симметрии
и его ИК спектр



кластер $(\text{TiO}_2)_2$
 C_{2v} - симметрии
и его ИК спектр

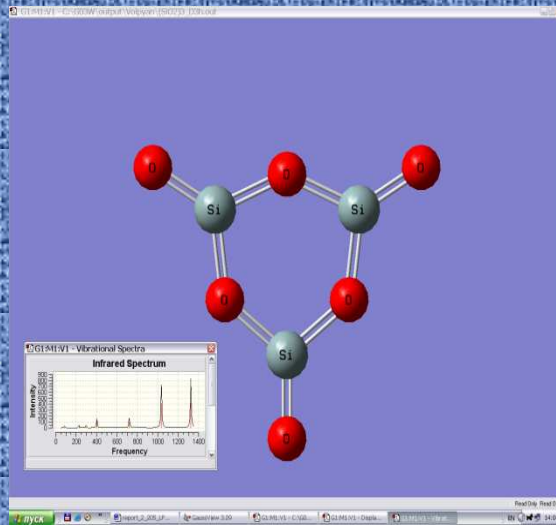


нанокластерные пленки, сочетающие заданную модуляцию и нанокластерную структуру имеют высокую устойчивость к экстремальным условиям эксплуатации. Они устойчивы к влажной морской атмосфере при применении их в оптических системах видимого и среднего ИК диапазона для морских объектов. Они также имеют минимальные оптические потери

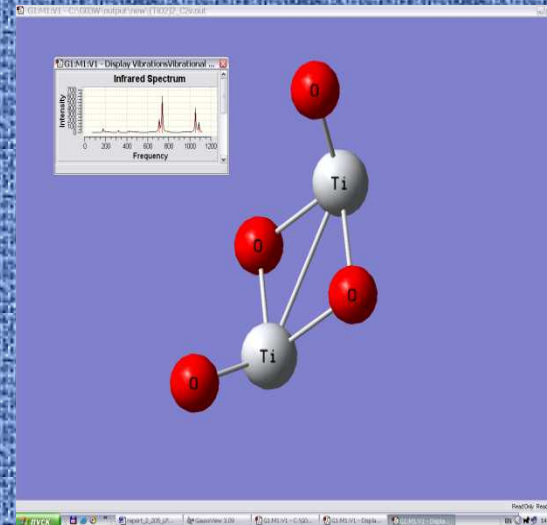
Nanocluster thin film structure

Essential applications require a combination of a preassigned modulation of the material structure (permittivity, permeability, etc.) with its supra atomic organization – nanoclusters.

cluster $(\text{SiO}_2)_3$
 D_{3h} - symmetry
and its spectrum



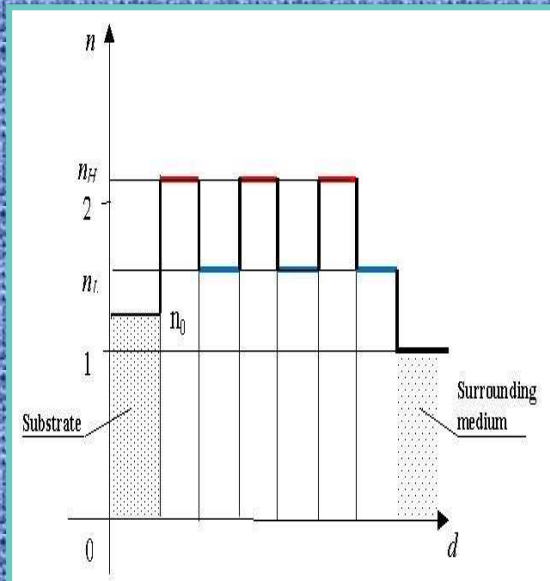
cluster $(\text{TiO}_2)_2$
 C_{2v} - symmetry
and its spectrum



Nanocomposite films, which combine a preassigned modulation and nanocluster structures, have a high resistance to extreme conditions. They are resistant to wet marine atmosphere when applied in optical systems of the visible and mid-IR range for offshore facilities. They also have the minimal optical losses.

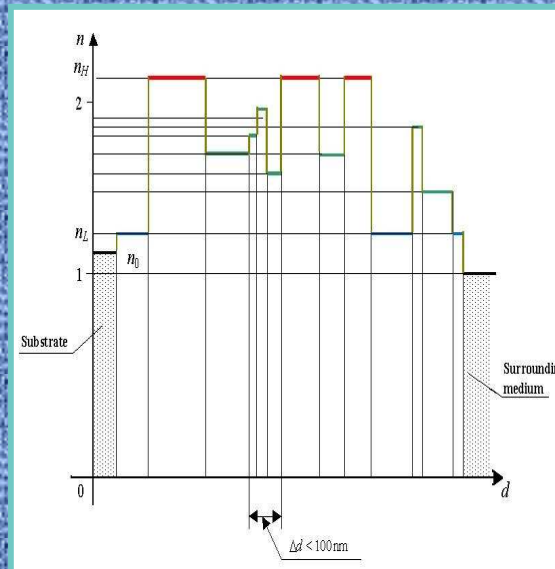
СТРУКТУРЫ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИСТЕМ

ТРАДИЦИОННАЯ

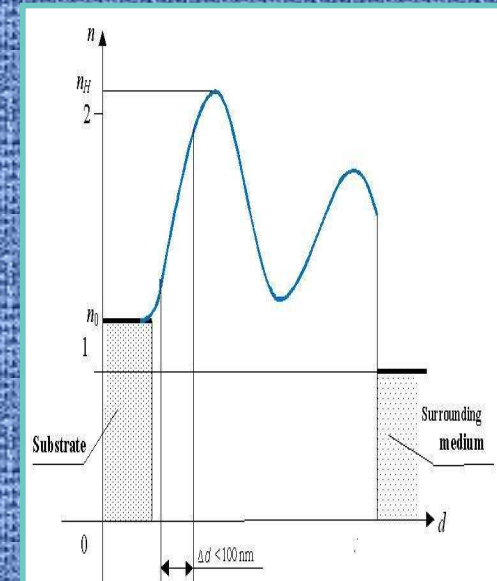


два материала
два $n_H; n_L$

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ



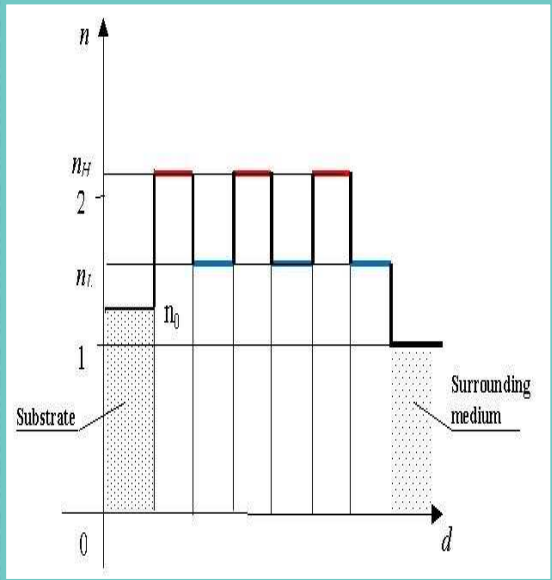
два материала
любой $n_H < n_i < n_L$



наноградиентные (1D_z)

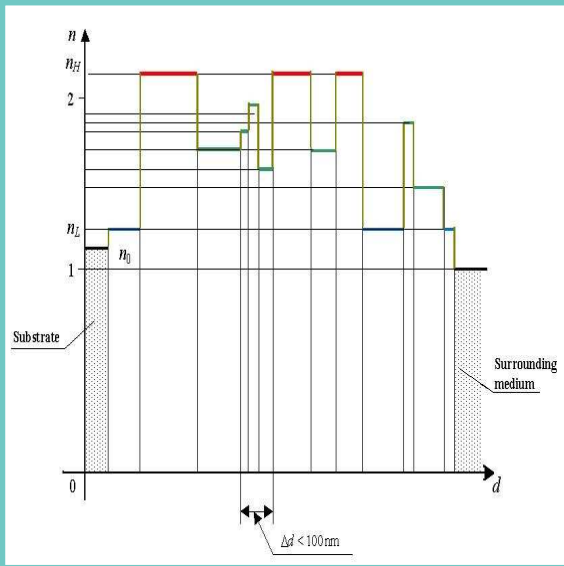
THIN FILM INTERFEROMETRIC STRUCTURE

TRADITIONAL

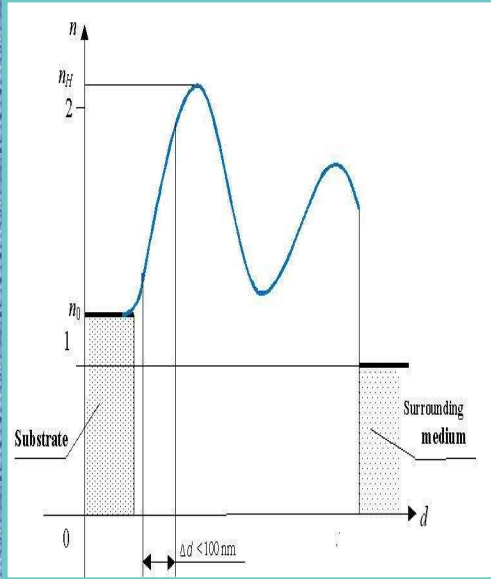


two materials
two n : n_H ; n_L

PROSPECTIVE

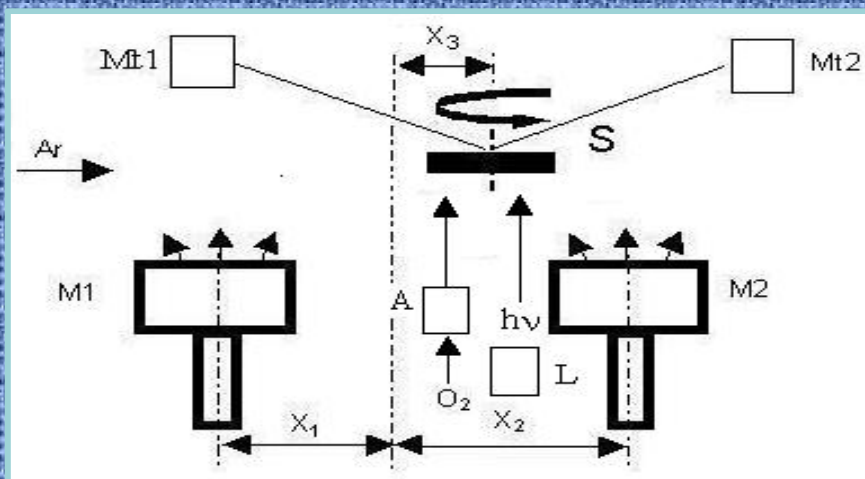


two materials
 n : $n_L < n_i < n_H$



nanogradient ($1D_z$)

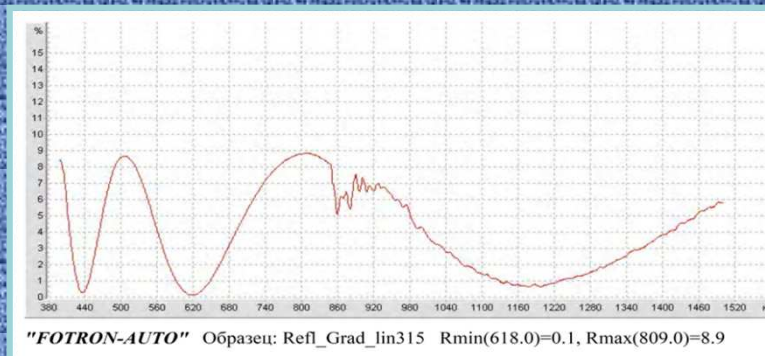
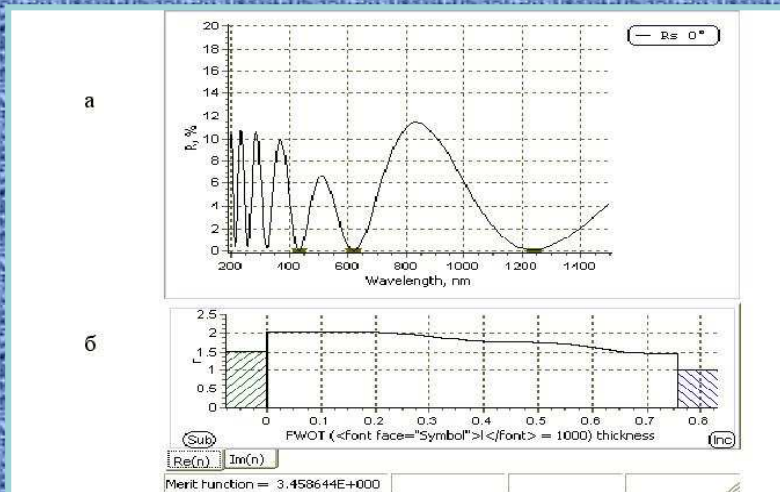
ПОЛУЧЕНИЕ 1D₂ НАНОГРАДИЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ



A – устройство ионного ассистирования плазмой кислорода, L – устройство с УФ лазером для лазерного ассистирования фотохимических и термических процессов на подложке, M1, M2 – дуальные соиспаряющие магнетроны; Mt1, Mt2 – система оптического мониторинга *in situ*, S – устройство планетарного вращения подложек и их движения между M1 и M2

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТЕХНОЛОГИИ:

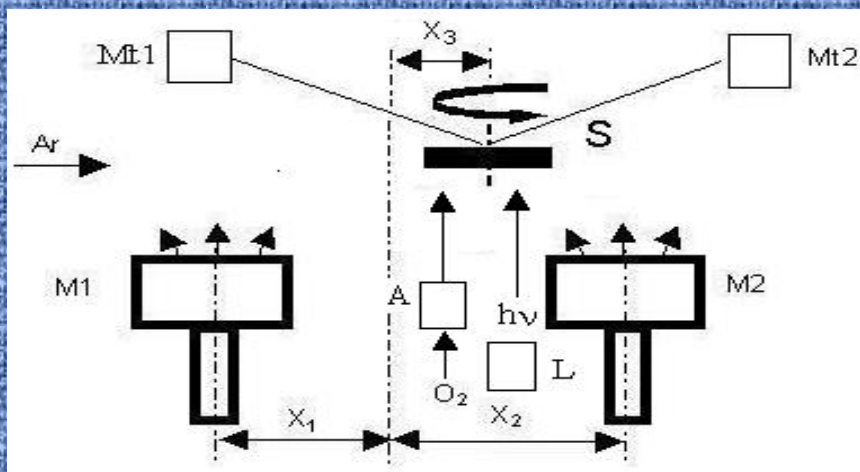
M1, M2 – Mt1, Mt2 – S – A - L



Вольпян О.Д., Кузьмичёв А.И., Обод Ю.А., Яковлев П.П. Получение оптических наногradientных и метапокрытий методом реакционного магнетронного распыления Наноинженерия 2011, № 10

A.I. Kuzmichev, A.B. Shvartsburg, O.D. Volpian, Y.A. Obod, P.P. Yakovlev. Polarized light in nanogradient metamaterials //Optical Complex Systems: OCS11, 5-8 September 2011, Marseille, France

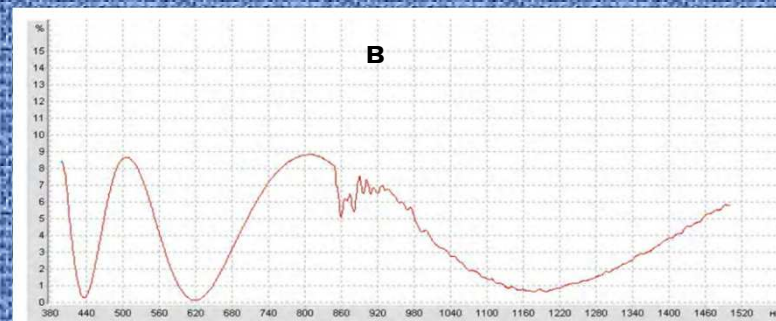
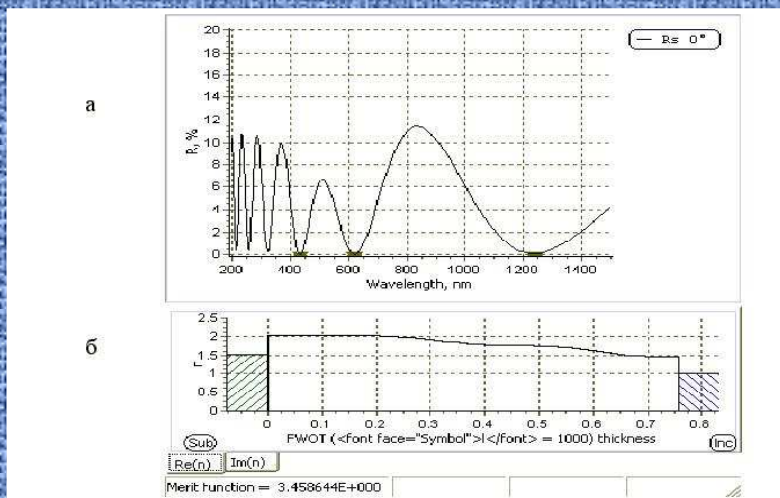
MANUFACTURING OF 1D_z NANOGRADIENT OPTICAL COATINGS



A – gas-discharge plasma activator of oxygen, L – UV laser for activation of chemical processes on the substrate surface, M1, M2 – sputtering magnetrons with Si and Ti targets, Mt1, Mt2 – optical parts of monitoring *in situ* system, S – rotating substrate; the arrows over M1 and M2 show sputtered target material ejection.

TECHNOLOGY BASIC ELEMENTS:

M1, M2 – Mt1, Mt2 – S – A - L



"FOTRON-AUTO" Образец: Refl_Grad_lin315 Rmin(618.0)=0.1, Rmax(809.0)=8.9

Вольпян О.Д., Кузьмичёв А.И., Обод Ю.А., Яковлев П.П. Получение оптических наногradientных и метапокрытий методом реакционного магнетронного распыления Наноинженерия 2011, № 10
A.I. Kuzmichev, A.B. Shvartsburg, O.D. Volpian, Y.A. Obod, P.P. Yakovlev. Polarized light in nanogradient metamaterials //Optical Complex Systems: OCS11, 5-8 September 2011, Marseille, France

ПОЛУЧЕНИЕ $1D_z$ НАНОГРАДИЕНТНЫХ НЕМОНОТОННЫХ ПРОФИЛЕЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ

Пропускание 3-х зонного фотонного барьера

Уравнение и профиль показателя преломления фотонного барьера

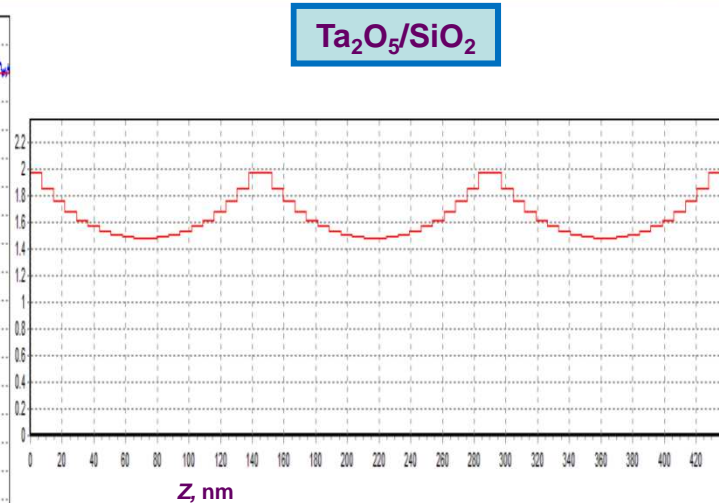
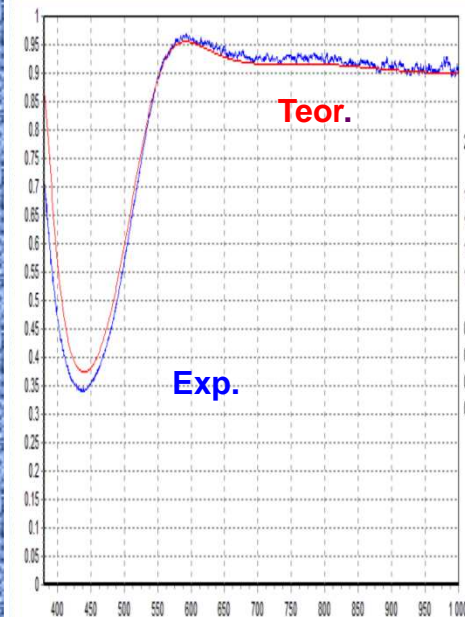
$$n(z) = (1 + z/L_1 - z^2/L_2^2)^{-1};$$

$$n_{min} = (1 + y^2)^{-1};$$

$$L_1 = d/4y^2; L_2 = d/2y;$$

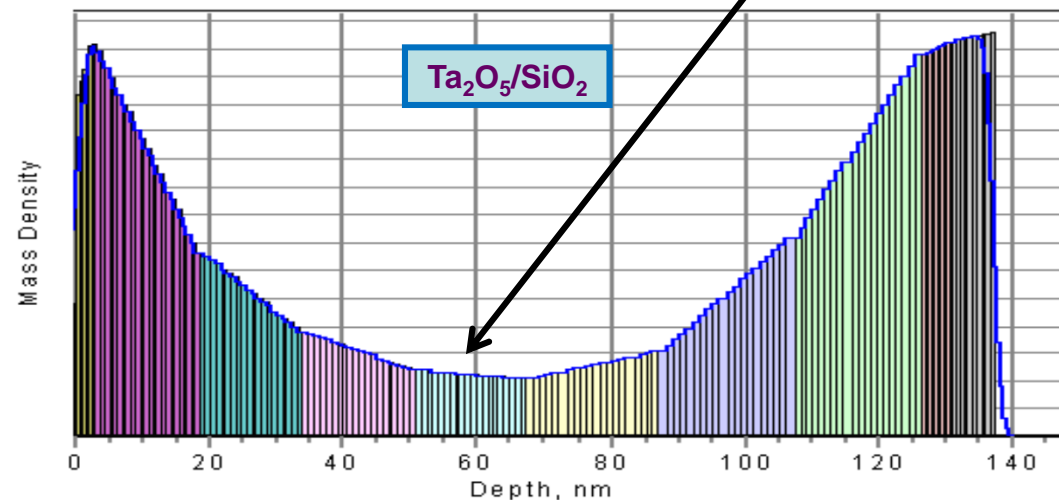
$$y = L_2/2L_1$$

Экспериментальное распределение плотности материала фотонного барьера, измеренное методом рентгеновской рефлексомерии



Ta_2O_5/SiO_2

Density profile

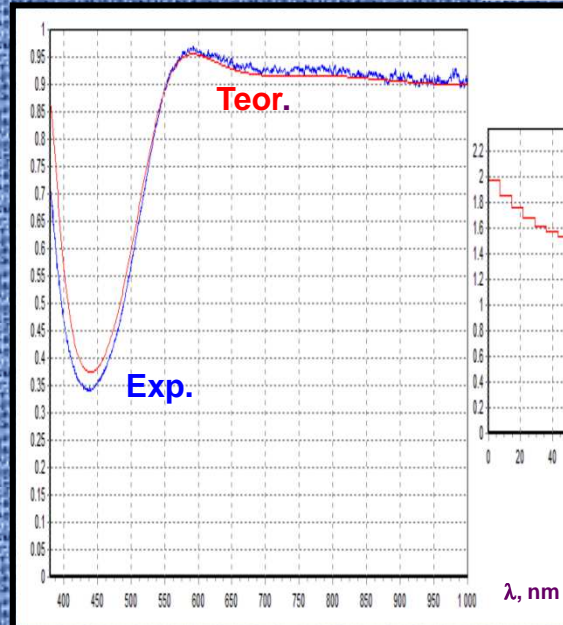


Ta_2O_5/SiO_2

Разработана технология получения тонких слоев с $1D_z$ градиентным немонотонным профилем показателя преломления для толщин $\ll \lambda$ (фотонные барьеры)

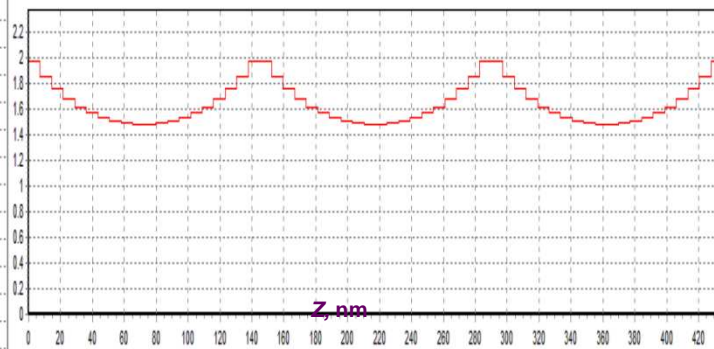
EXPERIMENTS WITH NON-MONOTONIC 1D_z NANOGRAIDENT REFRACTION INDEX DISTRIBUTION ALONG Z-AXIS

Transmission spectrum



Project of nanogradient coating with non-monotonic distribution of n

Ta₂O₅/SiO₂



$$n(z) = (1 + z/L_1 - z^2/L_2^2)^{-1};$$

$$n_{min} = (1 + y^2)^{-1};$$

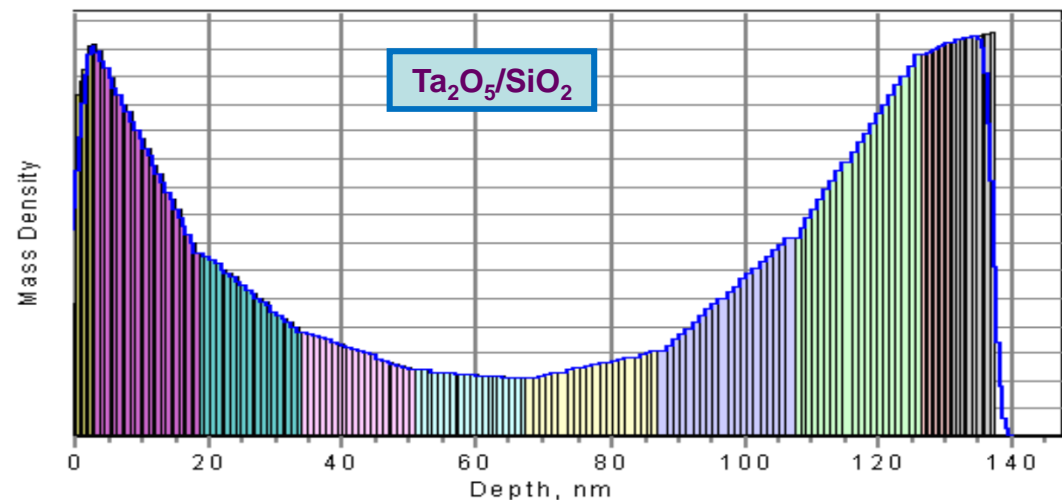
$$L_1 = d/4y^2; L_2 = d/2y;$$

$$y = L_2/2L_1$$

Photonic barriers ensity profile is measured by X-ray reflectometry

The technology of thin-films with 1D_z gradient refractive index manufacturing for coating thickness $\ll \lambda$ was developed (for photonic barriers application)

Density profile



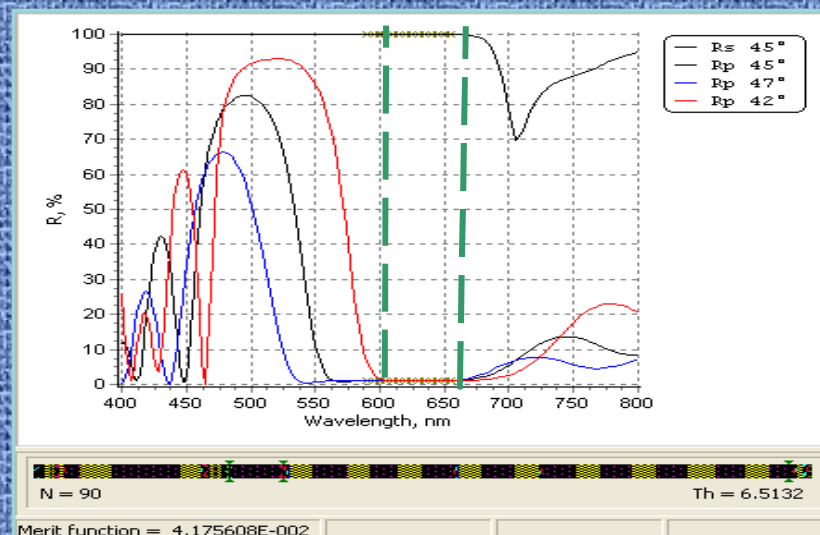
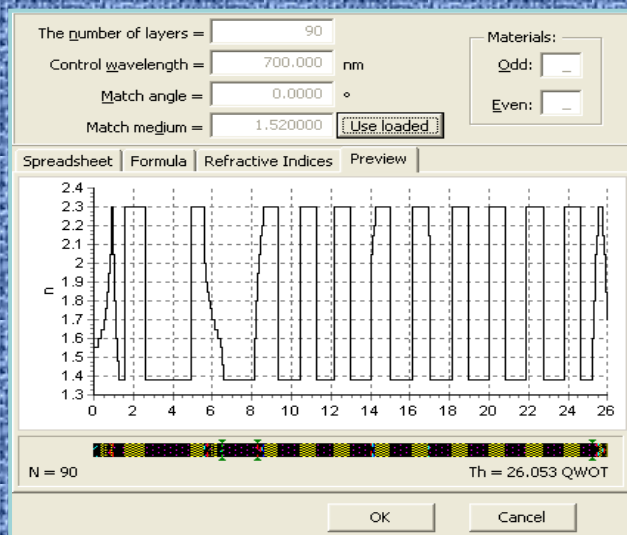
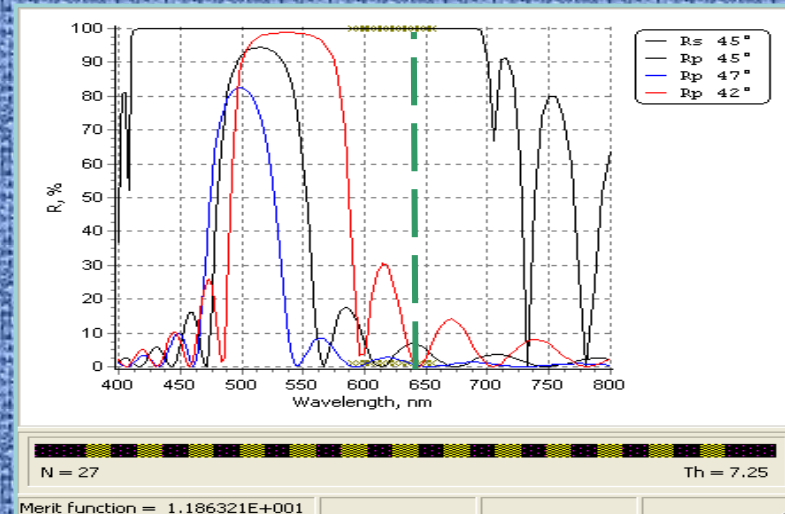
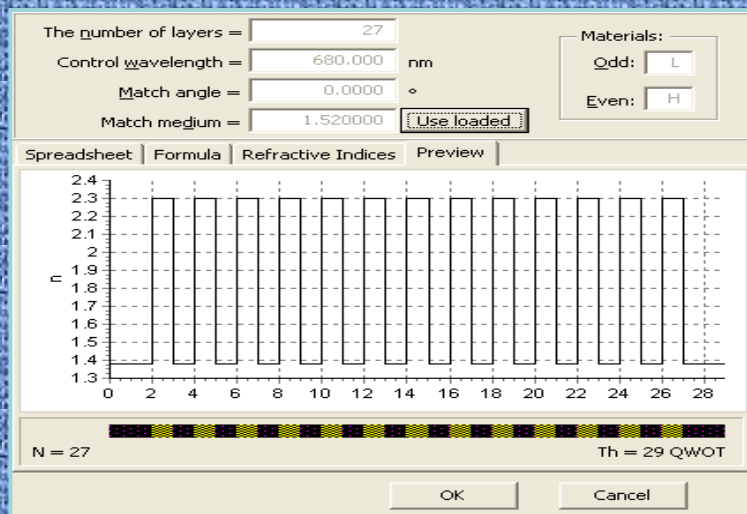
КОМУ НУЖНЫ ГРАДИЕНТНЫЕ ПОКРЫТИЯ???

- отсутствие в градиентных покрытиях границ между слоями разных материалов приводит к **снижению оптических потерь в покрытии** (из-за отсутствия рассеяния на шероховатостях границы слоя), и
- способствует **повышению его механической, термической и лазерной прочности**;
- применение различных профилей показателя преломления: **линейного, квадратичного, синусоидального, многочлена 5-степени** позволяет улучшить спектрально- амплитудные, угловые, поляризационные, фазовые характеристики оптических и лазерных покрытий.

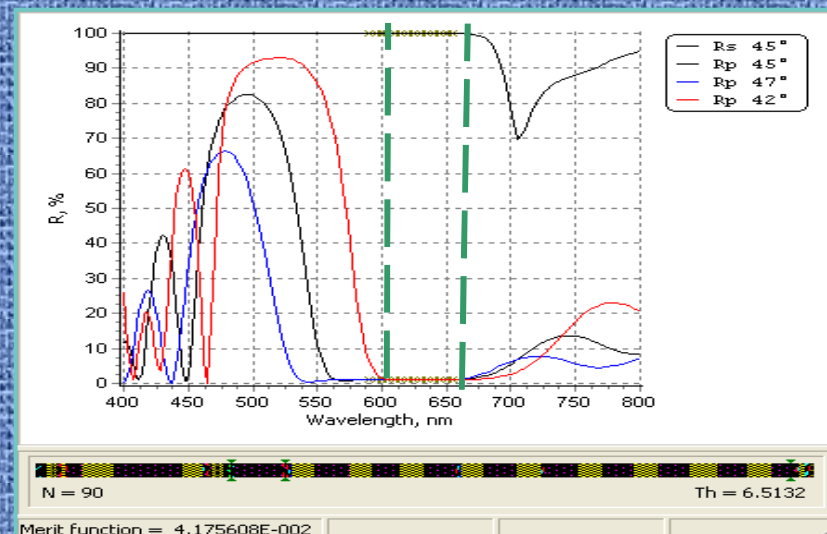
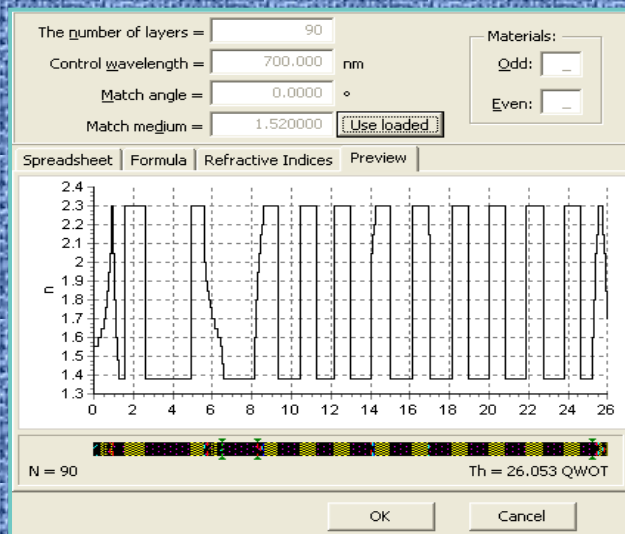
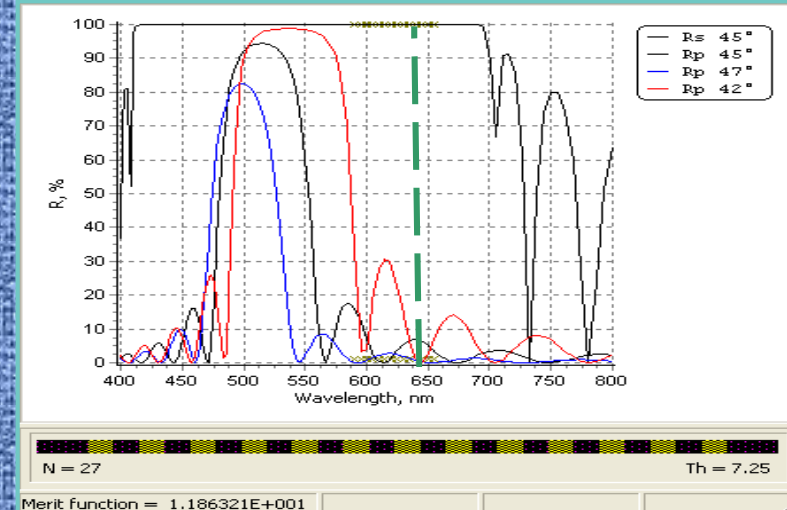
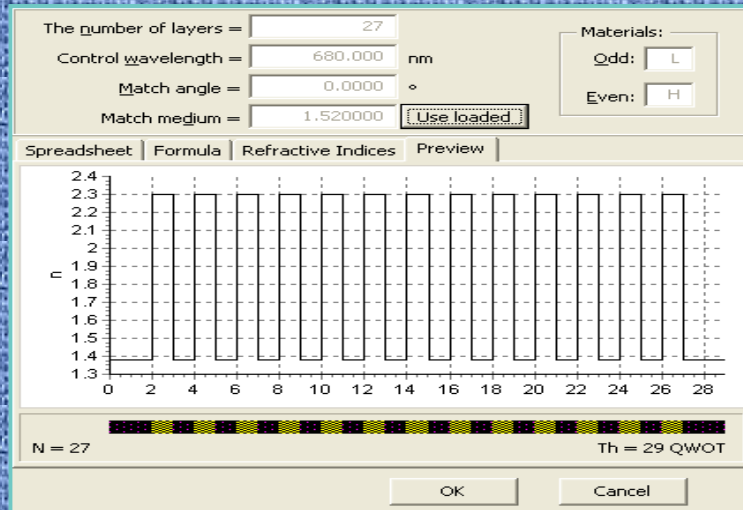
WHAT FOR NANOGRAIDENT COATINGS ARE NECESSARY???

- absence of borders between layers of different materials in gradient coatings leads to **the optical losses decrease in a coating** (because of the absence of scattering on roughness of layer border)
- leads to the increase of its **mechanical, thermal and laser resistance**;
- application of various refractive index profiles: **linear, square, sinusoidal, 5th-degree polynomial** allows to improve spectral-amplitude, angular, polarising, phase characteristics of optical and laser coatings.

УСТОЙЧИВЫЕ К ИЗМЕНЕНИЮ ДЛИНЫ ВОЛНЫ И УГЛА ПАДЕНИЯ ПОЛЯРИЗАТОРЫ

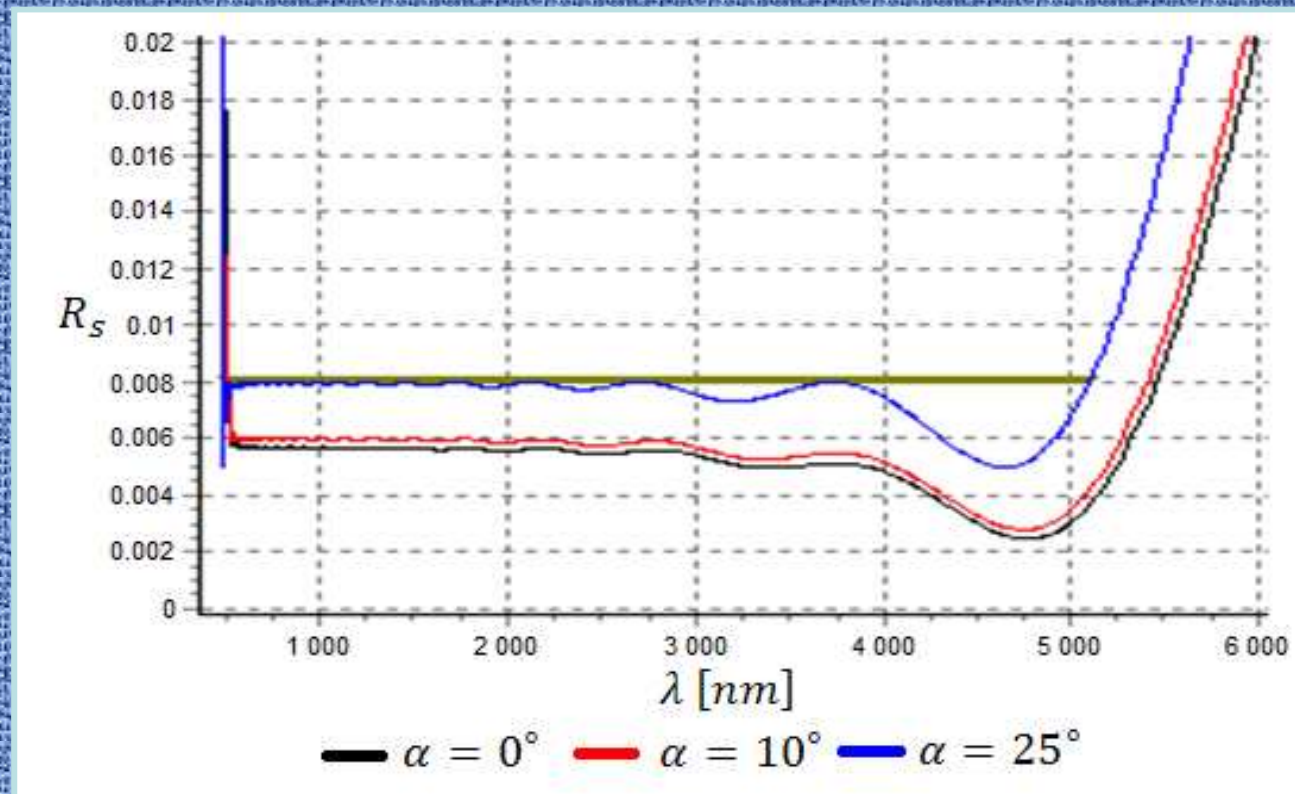
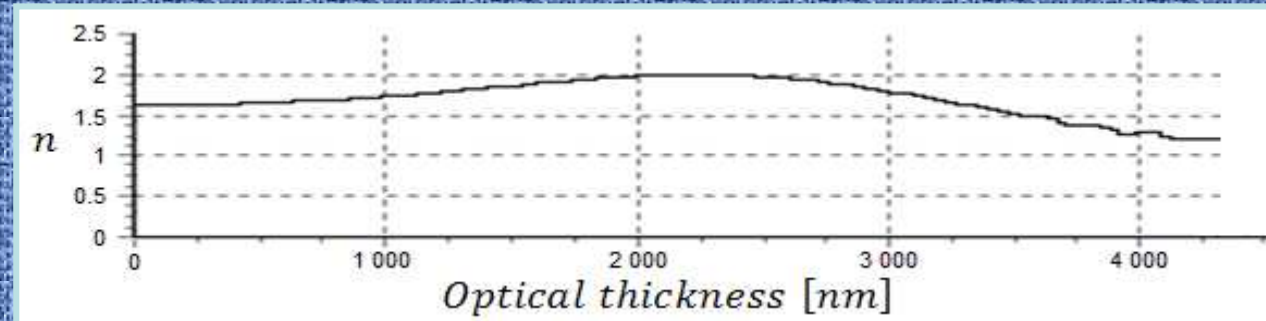


POLARIZERS RESISTANT TO CHANGE OF THE WAVELENGTH AND INCIDENCE ANGLE



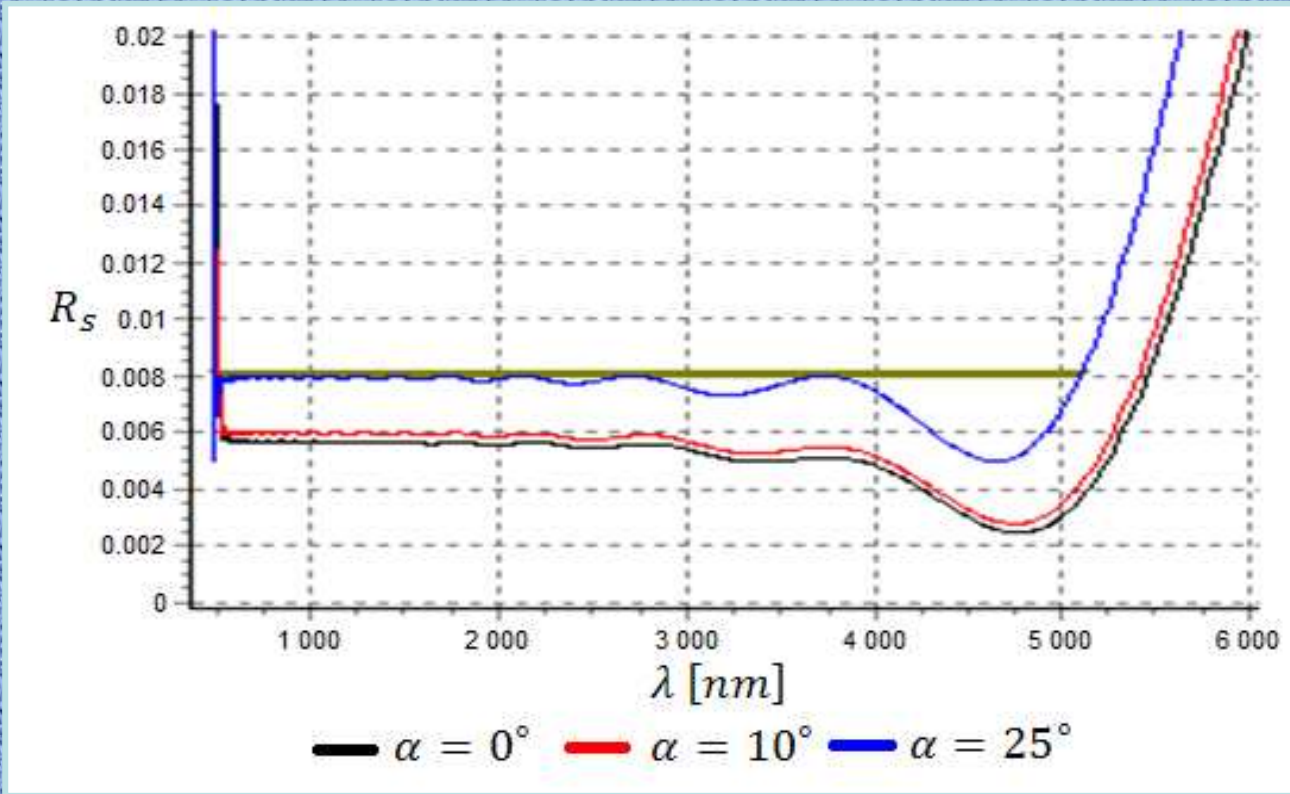
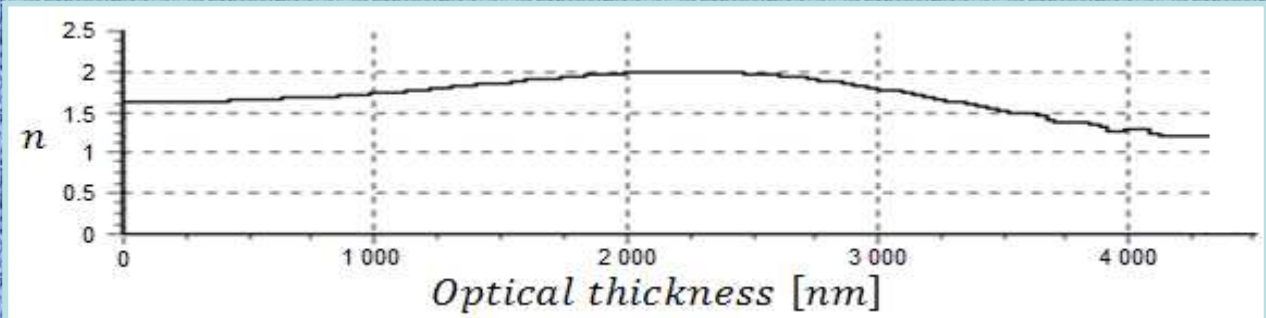
ГИПЕРШИРОКИЕ ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ

Изделия из
сапфира,
флюорита
и т. д.

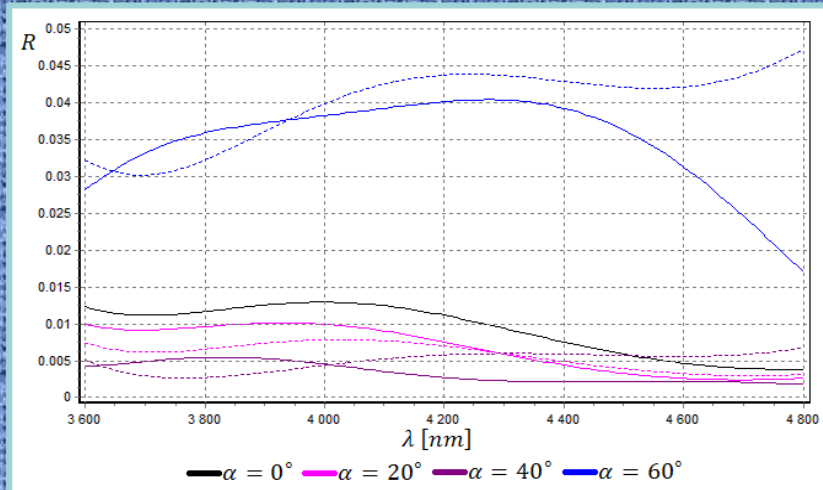


HYPERWIDE ANTIREFLECTING COATING

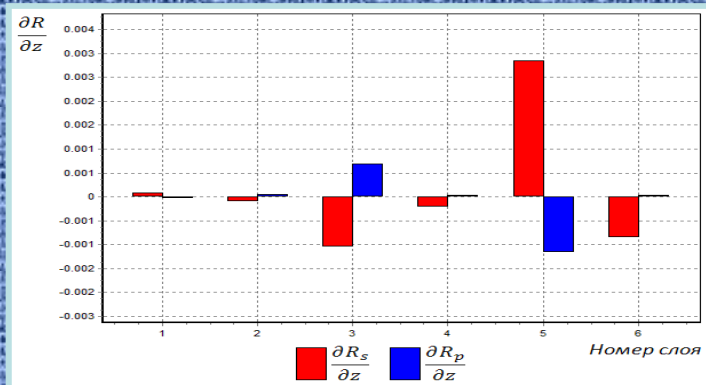
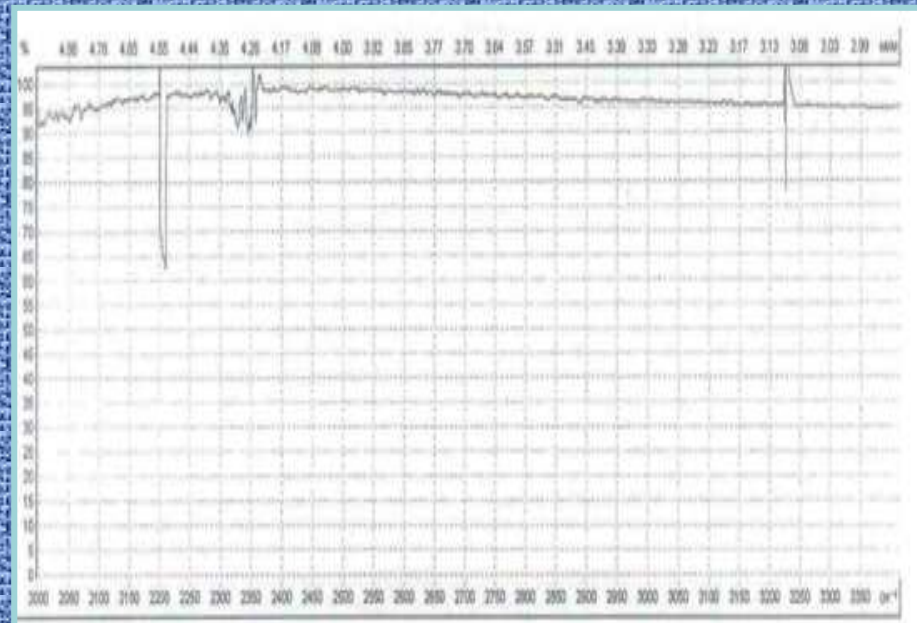
Products made of sapphire, fluorite, etc.



ГИПЕРШИРОКИЕ ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ



Отражение рабочей поверхности изделия из Ge с покрытием

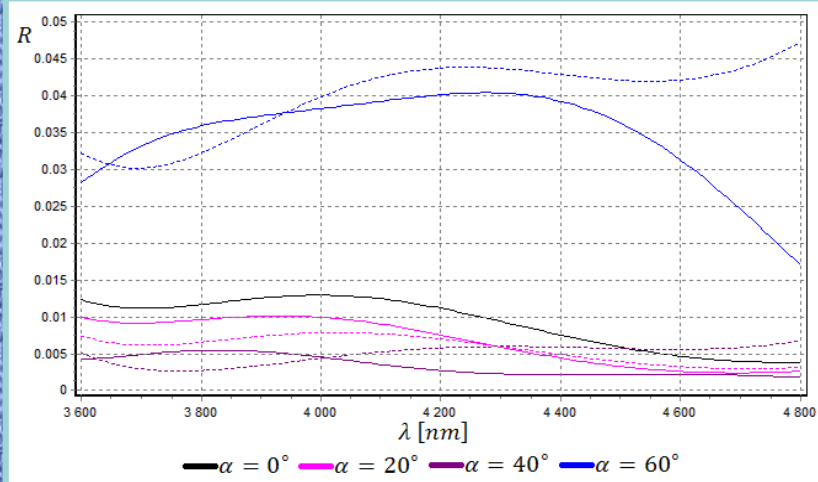


Устойчивость спектральной характеристики покрытия к изменению толщин слоёв

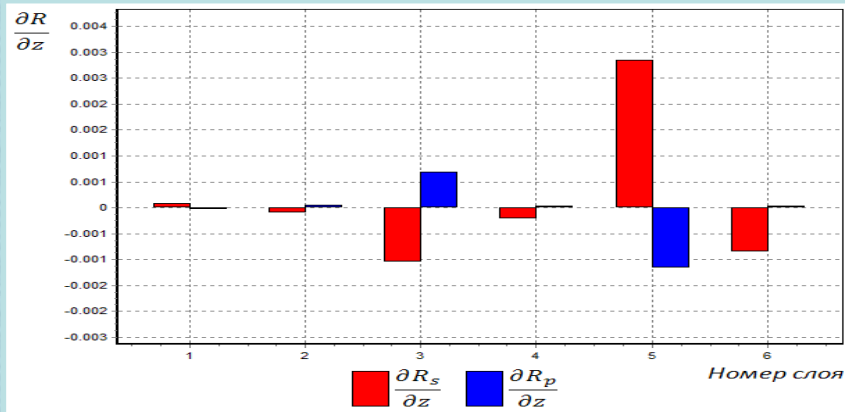
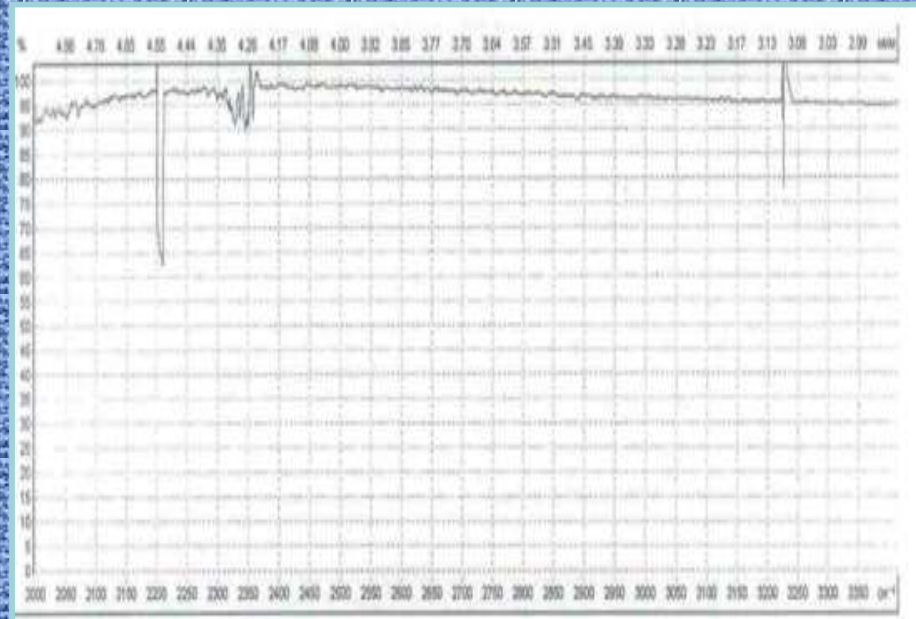


Изделия из Ge, Si, ZnSe

HYPERWIDE ANTIREFLECTING COATINGS



Reflection of the surface of Ge substrate with the coating

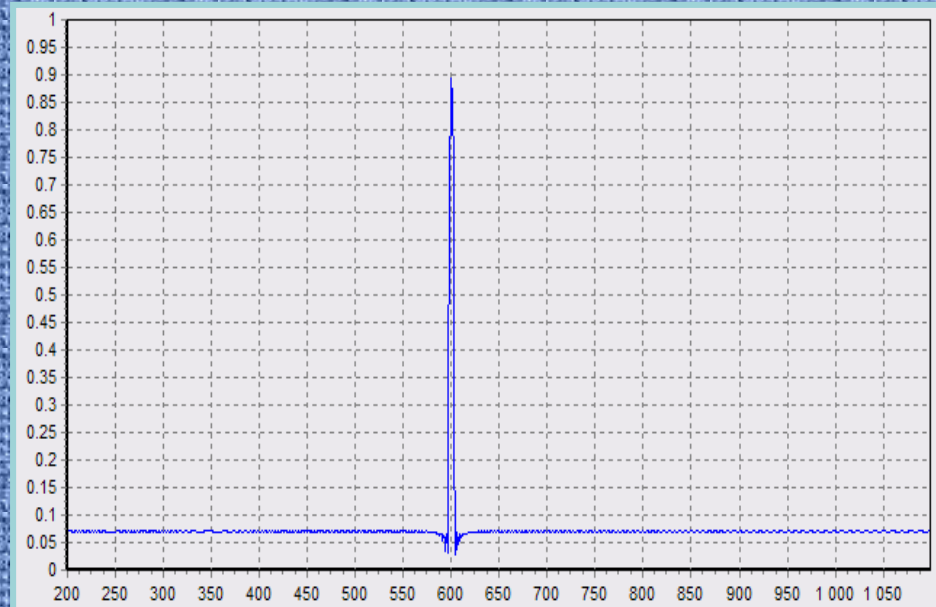
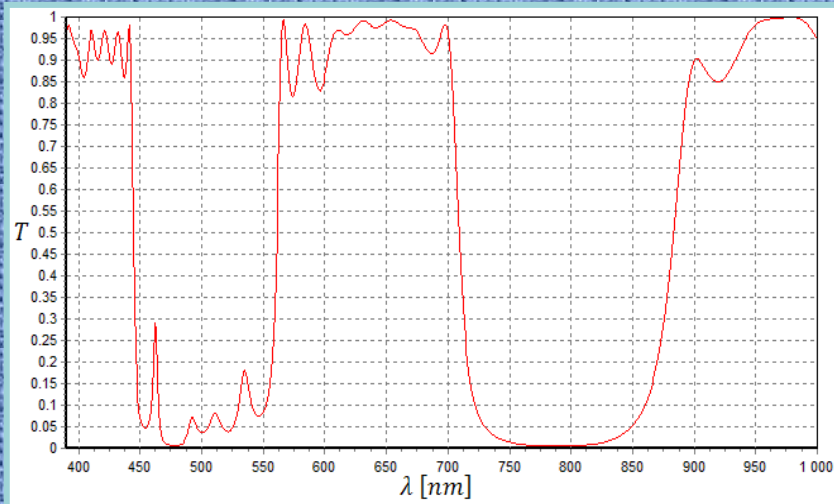
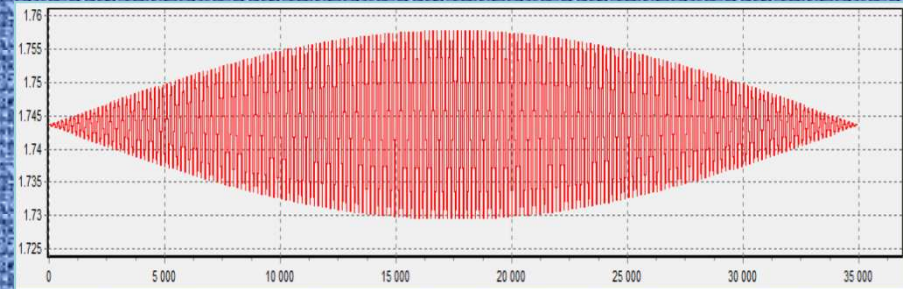


Spectral characteristic resistance to layer thickness changing of coating



Products made of Ge, Si, ZnSe

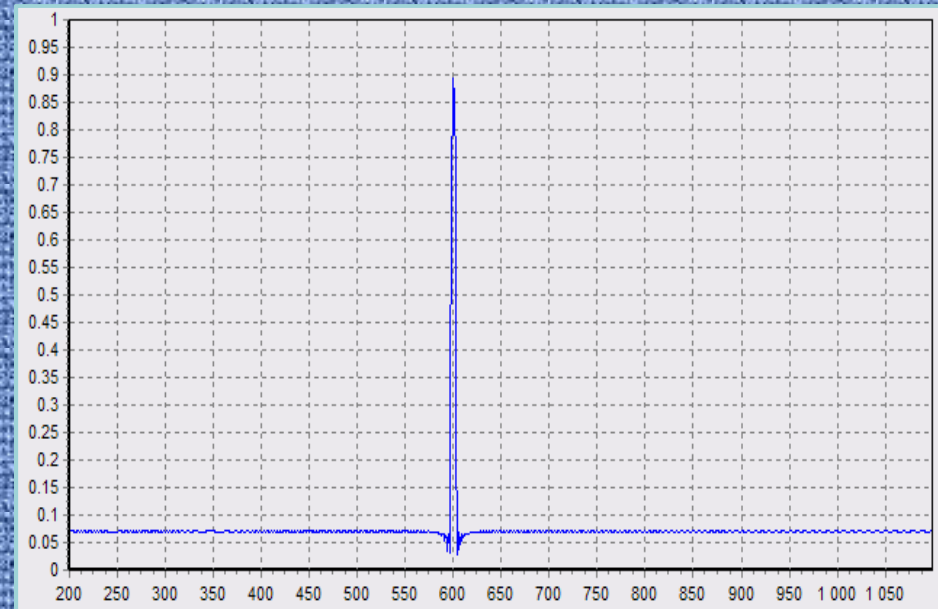
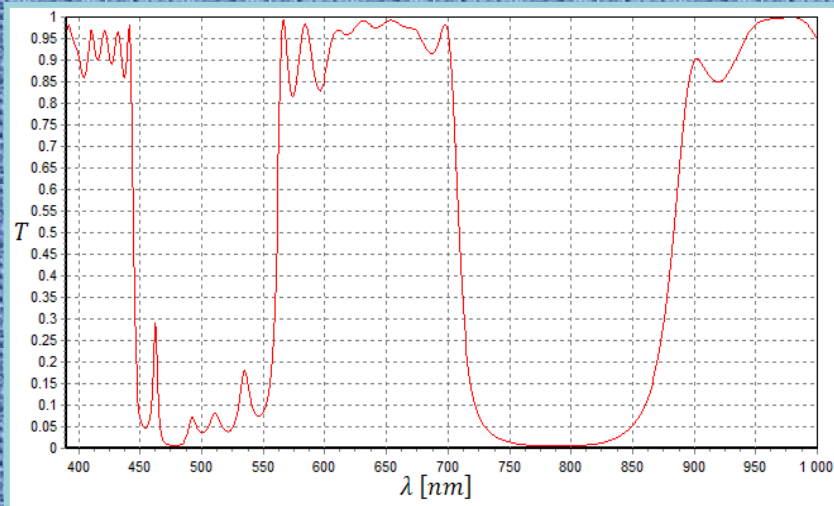
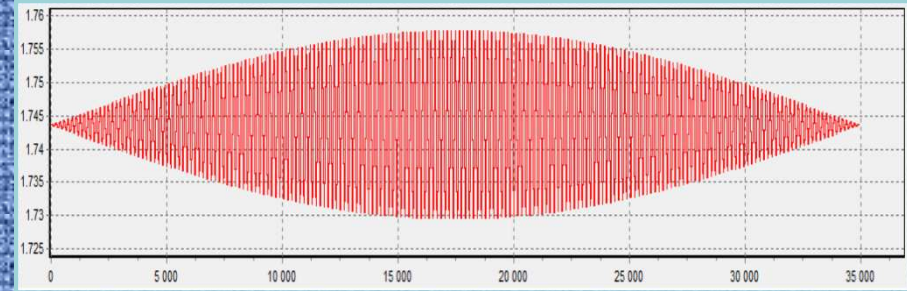
МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ ВИДИМОГО И ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА



$\lambda \in [390nm; 440nm] \langle T \rangle \geq 92\%$
 $\lambda \in [450nm; 550nm] \langle T \rangle \leq 7\%$
 $\lambda \in [560nm; 710nm] \langle T \rangle \geq 92\%$
 $\lambda \in [720nm; 870nm] \langle T \rangle \leq 4\%$
 $\lambda \in [900nm; 1000nm] \langle T \rangle \geq 94\%$

новый перспективный элемент нанопотоники

MULTIPARAMETER FILTERS FOR VISIBLE AND INFRARED RANGES



$\lambda \in [390nm; 440nm] \langle T \rangle \geq 92\%$

$\lambda \in [450nm; 550nm] \langle T \rangle \leq 7\%$

$\lambda \in [560nm; 710nm] \langle T \rangle \geq 92\%$

$\lambda \in [720nm; 870nm] \langle T \rangle \leq 4\%$

$\lambda \in [900nm; 1000nm] \langle T \rangle \geq 94\%$

novel prospective element for nanophotonics

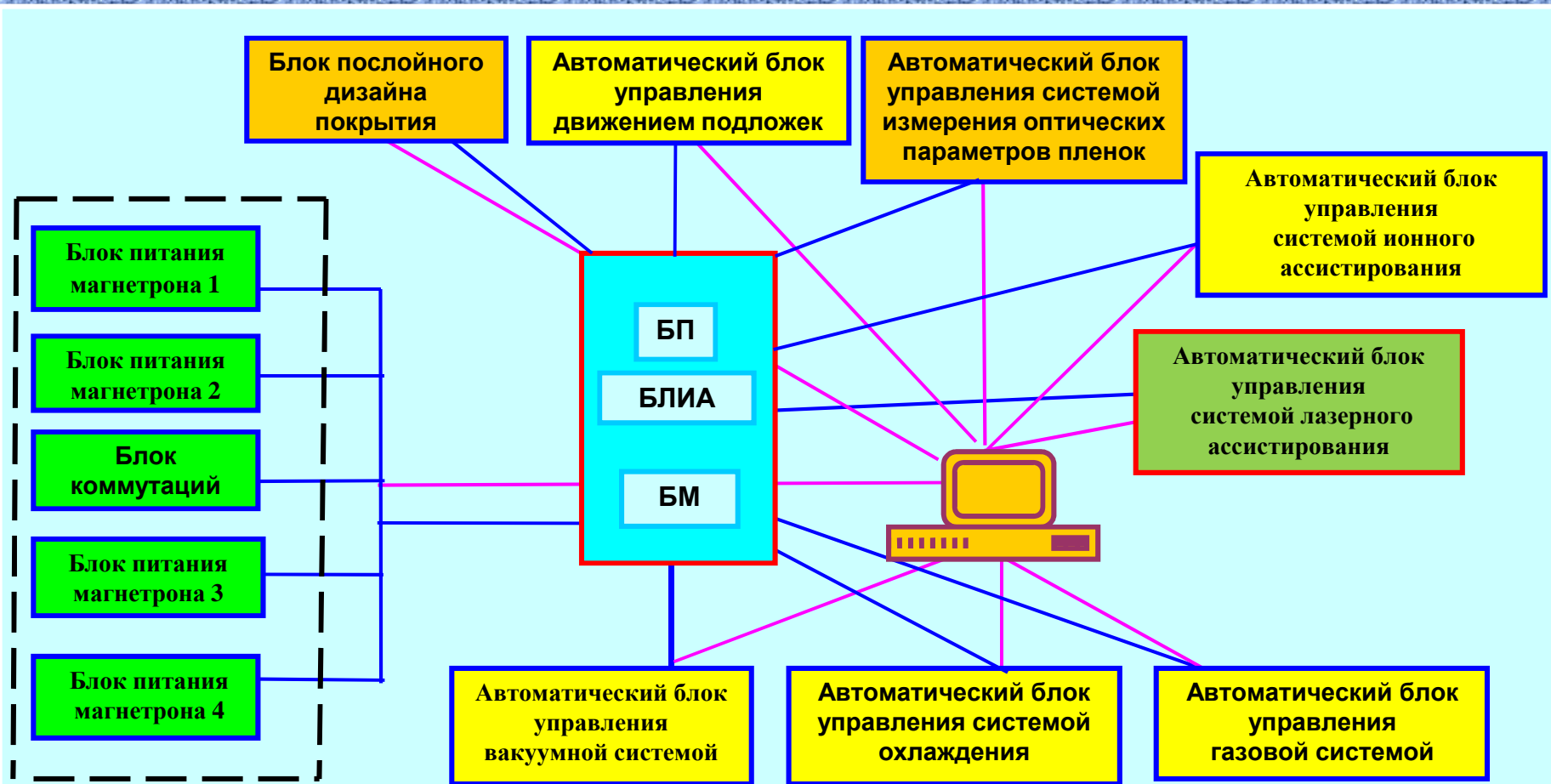
УСТАНОВКА МАГНЕТРОННОГО НАНЕСЕНИЯ НАНОГРАДИЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ «ЭЛИМАГ»



INSTALLATION FOR MAGNETRON DEPOSITION OF NANOGRADIENT OPTICAL COATINGS "ELIMAG"

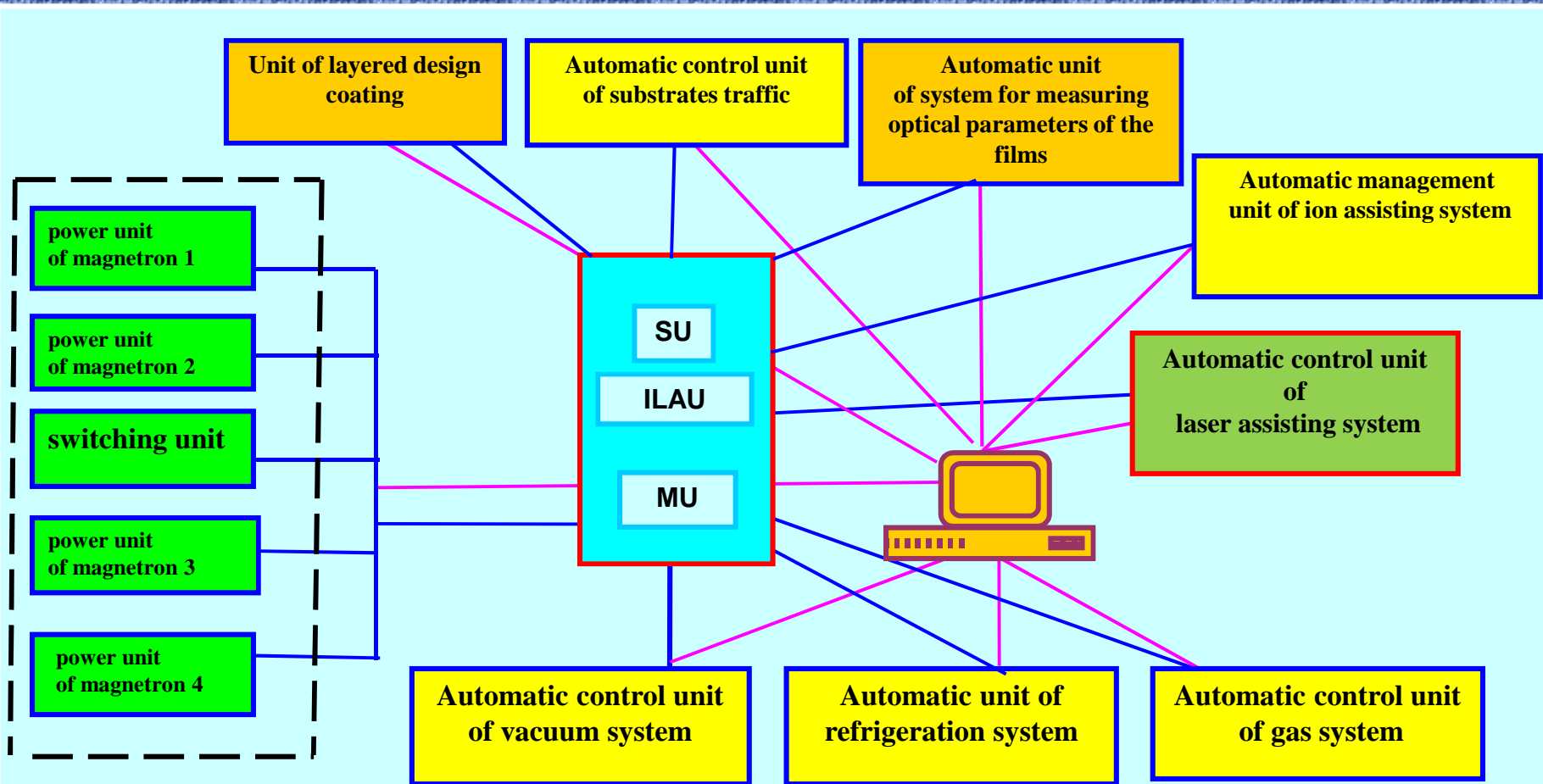


АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА



БП – блок подложек; БЛИА – блок ионно-лазерного ассистирования; БМ – блок магнетронов

TECHNOLOGICAL PROCESS AUTOMATION



SU– substrate unit; ILAU – ion-laser assisting unit;
MU – magnetron unit

Карусель-сиг-мониторинг

Программа Напуск Газа Карусель Связь

ручной режим

СДВИГ
ПАУЗА
1 on 1 off
2 on 2 off
3 on 3 off
ЦИКЛ (ПОВТОР)
FREEZE
TA TA
SI SI
NB NB
TI TI
ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

№пп	команда	параметр	комментарии
1	СДВИГ	64	
2	ИП1	1	
3	ИП2	1	
4	СДВИГ	1	
5	Душ ТА	1	
6	ПАУЗА	120	
7	Душ ТА	0	
8	ИП1	0	
9	ИП2	0	
10	ИП3	1	
11	Цикл ОТ	2	
12	Цикл ДО	9	
* 13	Цикл повторить раз	3	

Время откр. натекаелей: текущая позиция: **44**
 аргон **0**
 кислорода **0**

Посл. цикл 0

COM3 38400 :on COM1 38400 :on

Окно «Программа напыления»

Карусель-снг-мониторинг

Программа Напуск Газа Карусель Связь

START STOP

№пп	команда	параметр	комментарии
1	СДВИГ	64	
2	ИП1	1	
3	ИП2	1	
4	СДВИГ	1	
5	Душ ТА	1	
6	ПАУЗА	120	
7	Душ ТА	0	
8	ИП1	0	
9	ИП2	0	
10	ИП3	1	
11	Цикл ОТ	2	
12	Цикл ДО	9	
* 13	Цикл повторить раз	3	

СДВИГ
ПАУЗА
1 on 1 off
2 on 2 off
3 on 3 off
ЦИКЛ (ПОВТОР)
FREEZE
ТА ТА
СИ СИ
НВ НВ
ТИ ТИ
ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

ручной режим

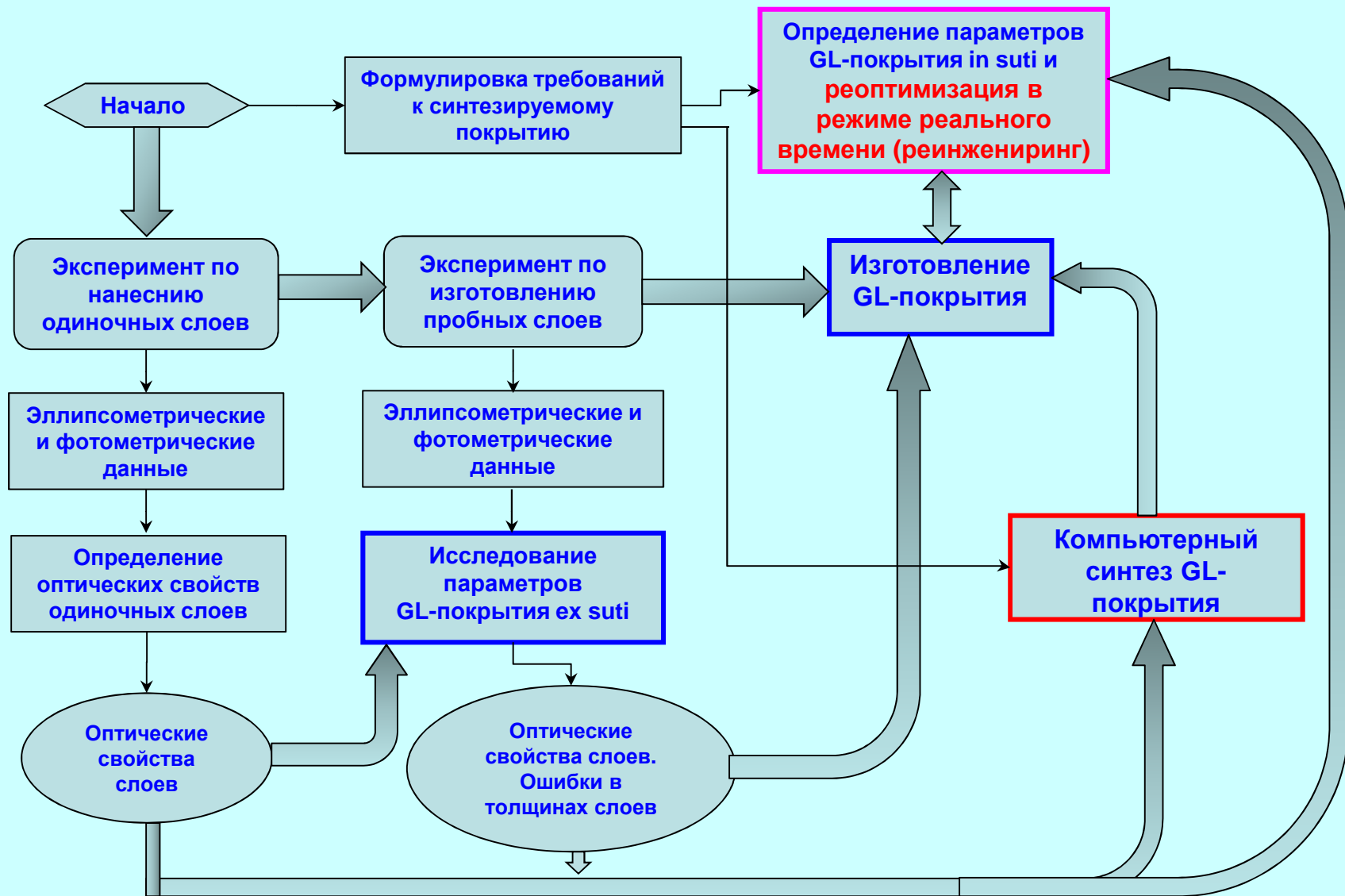
Время откр. натекаелей: аргон 0, кислорода 0

текущая позиция: 44

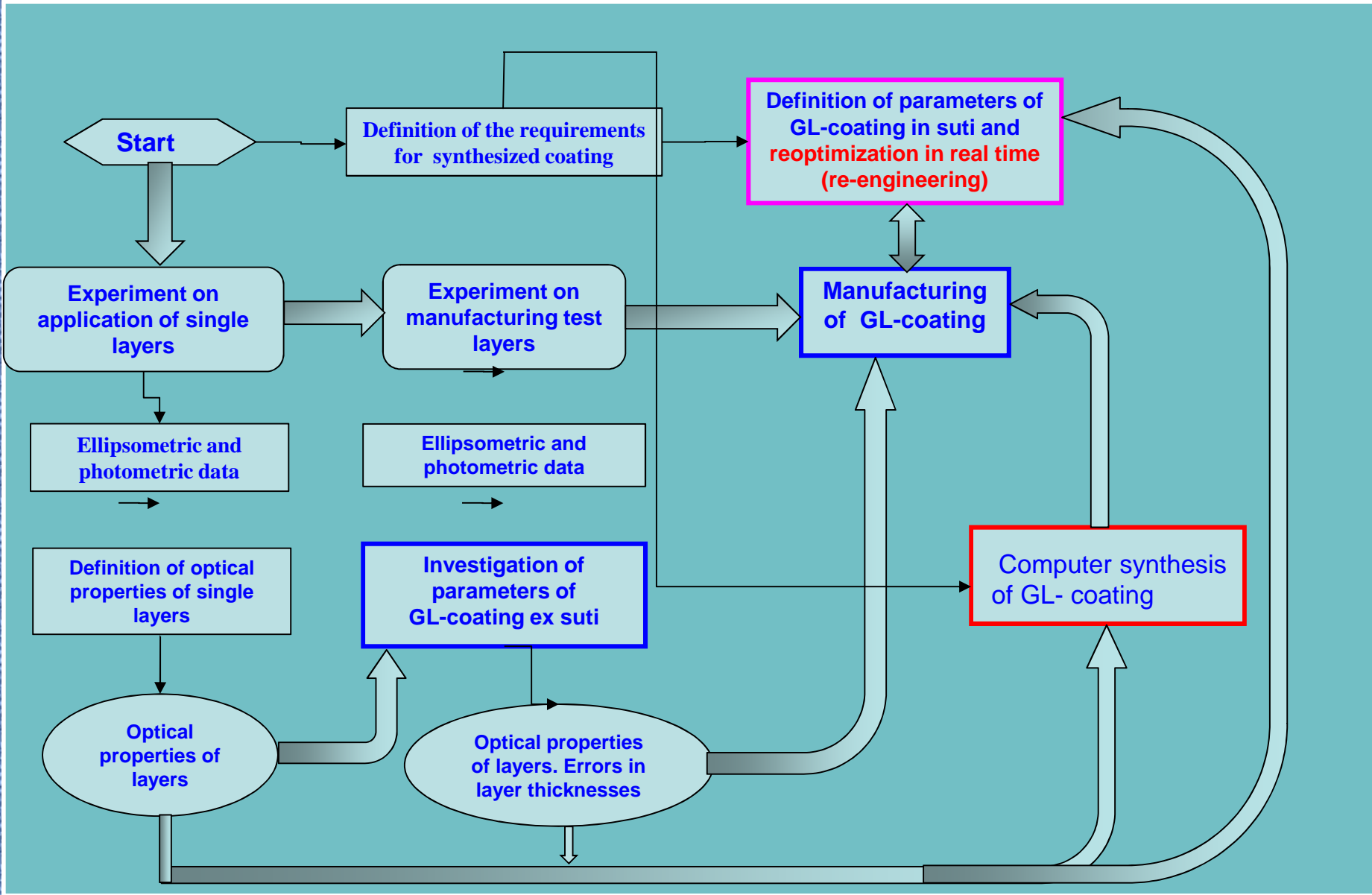
COM3 38400 :on COM1 38400 :on

«Deposition Program» window

РАЗРАБОТКА GL-ПОКРЫТИЯ



DEVELOPMENT OF GL-COATING



ПРЕИМУЩЕСТВА НАНОГРАДИЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ И МАГНЕТРОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

НАНОГРАДИЕНТНЫЕ ПОКРЫТИЯ:

- ✓ широко-, и гиперширокоспектральные,
- ✓ широкоугольные;
- ✓ низкие оптические потери.

ПРИБОРЫ С НАНОГРАДИЕНТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ:

- ✓ увеличение энергетической эффективности приборов лазерной дальнометрии и локации на 30 – 40%
- ✓ повышение чувствительности лазерных приборов обнаружения и сопровождения на 10 – 15%

МАГНЕТРОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ:

- полностью автоматизированный процесс;
- высокопроизводительный процесс;
- высокий процент выхода годных
- высокая устойчивость магнетронных покрытий к механическим, термическим и влажностным воздействиям.

ADVANTAGES OF NANOGRADIENT OPTICAL COATINGS

NANOGRADIENT COATINGS

- ✓ hyper-broadband
- ✓ wide-angle
- ✓ small optical losses

NANOGRADIENT COATING DEVICES:

- ✓ increase the energy efficiency of laser ranging and location devices by 30-40%
- ✓ increase the sensitivity of laser devices to detect and track by 10 - 15%

GRADIENT MAGNETRON SPUTTERED COATINGS TECHNOLOGY:

- fully automated process
- high productivity
- high yield rate
- high resistance to mechanical, thermal and to humid environments

БЛАГОДАРИМ ЗА ВНИМАНИЕ



WE THANK FOR ATTENTION

