

# Формирование интерференционных картин при резонансах Фабри-Перо мод диэлектрических фотонных кристаллов

Е.А. Кадомина<sup>а,б</sup>, Е.А. Безус<sup>а,б</sup>, Л.Л. Досколович<sup>а,б</sup>

<sup>а</sup> Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, ул. Молодогвардейская 151, Самара, Россия,

<sup>б</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Московское шоссе 34, Самара, Россия

## Аннотация

Предложена оптическая схема для формирования высокочастотных интерференционных картин электромагнитных волн в задачах фотолитографии, основанная на интерференции «объёмных» мод диэлектрических фотонных кристаллов при резонансах Фабри-Перо. Результаты работы могут найти применение при создании новых устройств для ближнепольной интерференционной фотолитографии.

*Ключевые слова:* фотонный кристалл; резонанс Фабри-Перо; интерференционная картина; блоховская поверхностная волна

## 1. Введение

Структуры фотоники, основанные на резонансных эффектах, в настоящее время широко применяются в качестве оптических фильтров [1], химических и биологических датчиков [2], и в области интерференционной ближнепольной фотолитографии [3-5]. Применительно к задачам литографии, главными особенностями резонансных структур являются усиление интенсивности ближнего поля и возможность преодоления дифракционного предела за счет использования затухающих волн.

Наиболее хорошо изученным и широко применяемым в различных устройствах является плазмонный резонанс [1-3]. Существенный недостаток плазмонных структур – относительно высокие потери, связанные с поглощением ППП в металле. Эти потери уменьшают добротность плазмонного резонанса.

При этом существуют поверхностные волны, которые распространяются в полностью диэлектрических средах, при этом потери энергии на поглощение практически отсутствуют. В частности, на границах раздела между фотонным кристаллом (ФК) и диэлектриком могут распространяться т.н. блоховские поверхностные волны (БПВ) [6,7]. В связи с отсутствием или крайне малыми потерями на поглощение в последнее время большое внимание уделяется устройствам на основе БПВ как альтернативе плазмонных устройств [7, 8]. В случае БПВ добротность резонанса ограничена лишь технологическими погрешностями изготовления и чистотой материалов, поэтому в структурах на основе БПВ достижимо гигантское усиление полей, на несколько порядков превышающее аналогичные эффекты в структурах с плазмонным резонансом. Кроме того, возможность использования ТЕ-поляризованного излучения позволяет достигать высоких (близких к 1) значений контраста, что важно для задач фотолитографии [7]. Отметим, что плазмонные моды металлодиэлектрических структур являются ТМ-поляризованными, что автоматически накладывает существенные ограничения на максимально достижимый в таких структурах контраст формируемых картин.

Однако структуры на основе БПВ очень чувствительны к технологическим погрешностям изготовления, и малые отклонения параметров от расчетных приводят к исчезновению или существенному сдвигу резонанса. В связи с этим в настоящей работе рассмотрены структуры, формирование интерференционных картин в которых основано на резонансах Фабри-Перо «объёмных» мод диэлектрического фотонного кристалла. Исследуемые структуры сравниваются со структурами, принцип работы которых основан на возбуждении БПВ.

## 2. Постановка задачи дифракции на фотонном кристалле в схеме Кречмана. Запрещённые и разрешённые зоны ФК

На рис. 1 представлена схема структуры для формирования интерференционных картин. Структура состоит из призмы с показателем преломления  $n_p$  и одномерного фотонного кристалла, который содержит  $N$  периодов ( $N$  пар чередующихся плоскопараллельных однородных слоев с толщинами  $h_1$  и  $h_2$  и показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ ). Под ФК помещён слой фоторезиста, который имеет показатель преломления  $n_{res}$  и толщину  $h_{res}$ . Под слоем фоторезиста располагается подложка с показателем преломления  $n_{sub}$ .

В ФК возможно существование как распространяющихся «объёмных» мод ФК, так и затухающих. Определить тип «объёмных» мод можно из дисперсионного соотношения мод ФК, которое для случая ТЕ-поляризации имеет следующий вид [6]:

$$\cos(\tilde{k}d) = \cos(k_{z,1}h_1) \cos(k_{z,2}h_2) - \frac{k_{z,1}^2 + k_{z,2}^2}{2k_{z,1}k_{z,2}} \sin(k_{z,1}h_1) \sin(k_{z,2}h_2) \quad (1)$$

где  $\tilde{k}$  —  $z$ -компонента волнового вектора моды ФК,  $k_{z,i} = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_i - k_{x,0}^2}$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\lambda$  — длина волны в свободном пространстве,  $d = h_1 + h_2$  — период ФК. Условие  $|\cos(\tilde{k}d)| > 1$  соответствует запрещённой зоне ФК, в которой «объёмные» моды ФК являются затухающими. В случае, когда «объёмные» моды ФК являются затухающими, при определенных условиях на границе раздела ФК и однородной среды могут распространяться БПВ. Для того чтобы иметь возможность контролировать значение эффективного показателя преломления (константы распространения) БПВ, добавим под ФК дополнительный «обрезанный» слой с показателем преломления  $n' = n_1$  и толщиной  $h' = h_1 + h_c$  ( $h_c < 0$  — величина обрезки, рис. 1). Приведем дисперсионное уравнение БПВ [6]:

$$\exp(2ik_{z,1}h_c) = -C \exp(-ik_{z,1}h_1) \frac{k_{z,d} + k_{z,1}}{k_{z,d} - k_{z,1}} \quad (2)$$

где  $k_{z,d} = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_d - k_{x,0}^2}$ ,  $\varepsilon_d$  — диэлектрическая проницаемость среды под ФК (в нашем случае  $\varepsilon_d = n_{res}^2$ ),  $C$  — коэффициент, определяемый из условий сшивки компонент электромагнитного поля на границах. Выражение (2) определяет константу распространения БПВ  $k_{x,0}$  как функцию  $h_c$ . Эффективный показатель преломления БПВ равен константе распространения, нормированной на волновое число:  $n_{eff} = k_{x,0}/k_0 = n_{pr} \sin(\theta)$ , где  $\theta$  — угол падения, при котором происходит возбуждение БПВ. Для возбуждения БПВ необходимыми условиями являются попадание  $k_{x,0}$  в запрещённую зону ФК и выполнение условия  $n_{eff} > n_{res}$  [6].

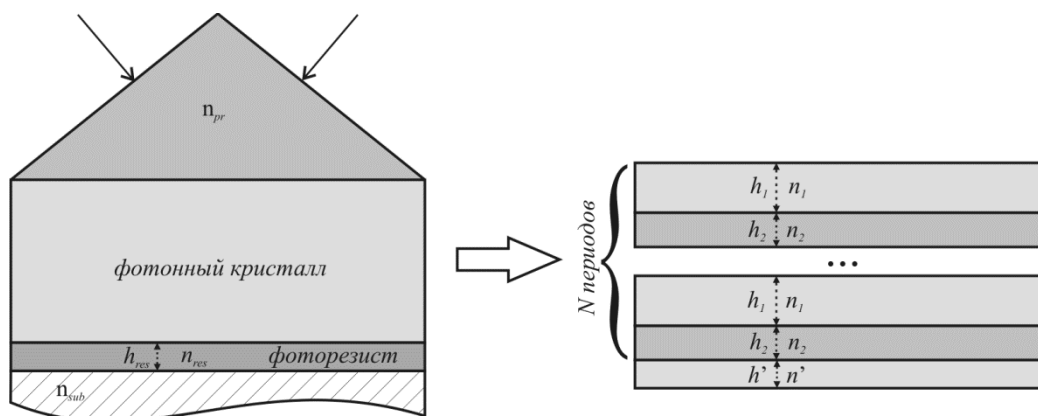


Рис. 1. Устройство для формирования интерференционных картин в геометрии Кречмана.

Рассмотрим теперь распространяющиеся «объёмные» моды ФК, которые существуют в разрешённых зонах ФК. В этом случае, по аналогии с резонансами Фабри-Перо плоских волн в плоскопараллельных пластинках, можно записать условия резонанса Фабри-Перо для ФК, представив его в виде «плоскопараллельной» пластинки, на верхней и нижней границе которой происходят отражения:

$$\varphi_2 + \varphi_1 + 2\tilde{k}Nd = 2\pi n, \quad n \in Z. \quad (3)$$

где  $\varphi_1$  — фаза отраженной моды на нижней границе ФК,  $\varphi_2$  — фаза отраженной моды на верхней границе ФК,  $2\tilde{k}Nd$  — набег фаз, приобретаемый при прохождении моды через ФК.

Таким образом, формирование интерференционных картин в такой структуре возможно на основе двух различных механизмов: при возбуждении БПВ на нижней границе ФК и при резонансах Фабри-Перо «объёмных» мод ФК. При падении света на призму с двух сторон под равными углами падения (рис. 1) и определенных параметрах ФК на границе ФК/фоторезист будут возбуждаться и интерферировать две распространяющиеся в противоположных направлениях волны.

Для большого числа современных фоторезистов «рабочие» длины волн лежат в спектральном диапазоне 300–450 нм. При этом вещественная часть их показателя преломления составляет 1,6–1,7, а мнимая, характеризующая поглощение, находится в интервале  $10^{-4} - 10^{-3}$ . Примем длину волны в свободном пространстве равной  $\lambda = 405$  нм (h-линия ртутной лампы).

Для возбуждения поверхностных волн на границе ФК/фоторезист ФК используют пары слоев с высоким оптическим контрастом (большой разностью показателей преломления) [6]. Обычно в качестве более плотного слоя используют оксиды титана, тантала, ниобия и т. п., а в качестве менее плотного слоя диоксид кремния. Выберем в качестве оптически более плотного материала диоксид титана, имеющий на выбранной длине волны показатель преломления  $n_1 = 2,4335 + 0,0001i$ . Менее оптически плотный материал, диоксид кремния, на этой длине волны имеет показатель преломления  $n_1 = 1,4892$ . Показатели преломления призмы и подложки примем равными  $n_{pr} = 1,988$  (материал ГГГ,

галлий-гадолиниевый гранат) и  $n_{sub} = 1,5$  соответственно. Показатель преломления и толщину слоя фоторезиста выберем  $n_{res} = 1,7 + 0,0005i$  и  $h_{res} = 100$  нм соответственно.

Определим теперь толщины слоёв ФК для двух типов волн. Для возбуждения БПВ на границе ФК/фоторезист необходимо, чтобы эффективный показатель БПВ находился в запрещённой зоне ФК. Кроме того, для рассматриваемого примера для возбуждения БПВ должно выполняться условие  $n_{eff} > 1,7$ . Будем искать ФК с запрещённой зоной 1,6-1,9. Распространяющиеся (незатухающие) «объёмные» моды ФК существуют в разрешённой зоне ФК, а резонансы Фабри-Перо возникают при многократных отражениях от границ ФК, при этом обычно первые отражения вносят наибольший вклад и, соответственно, первые резонансные «пики» самые высокие. Чтобы обеспечить наличие первого или второго пика при  $n_{eff}$  немногим большим значения показателя преломления фоторезиста, необходимо выбирать ФК, у которых перед разрешённой зоной для эффективных показателей преломления 1,7-1,9 есть запрещённая зона ФК. В нашем примере требуемая ширина запрещённой зоны не менее 1,60-1,65. На рис. 2 серым показаны области значений толщин слоёв ФК для возбуждения резонансов Фабри-Перо, а белым – для БПВ.

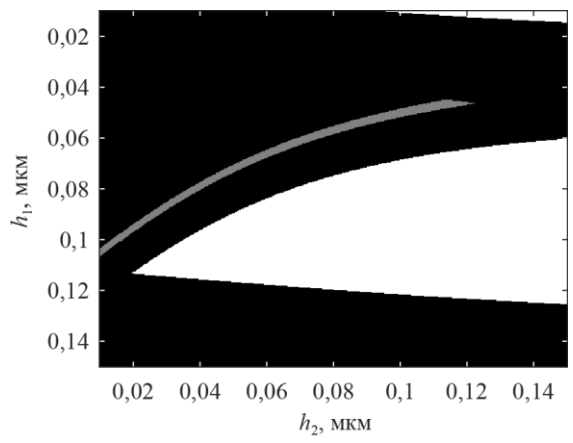


Рис. 2. Области значений толщин слоёв ФК, при которых наблюдаются Фабри-Перо и БПВ резонансы на заданных интервалах эффективных показателей преломления.

Далее рассмотрим формирование интерференционных картин при обоих типах резонансов, причем будем рассматривать примеры с учетом и без учета поглощения в слоях и фоторезисте. Моделирование задачи дифракции на структуре проводилось с помощью собственного программного обеспечения, созданного в среде MATLAB и реализующего метод связанных волн (RCWA) [9-10].

### 3. Интерференция БПВ

Из белой области на рис.2. выберем следующие толщины слоёв ФК:  $h_1 = 86,6$  нм ,  $h_2 = 102,4$  нм . Зафиксируем эффективный показатель преломления  $n_{eff} = 1,734$  , что соответствует углу падения  $\theta = 60,7177^\circ$  . Тогда этому значению эффективного показателя преломления будет соответствовать величина обрезки  $h_c = -57$  нм , при которой будет происходить возбуждение БПВ. На рис. 3а приведена зависимость модуля комплексного коэффициента пропускания без учета (синий) и с учетом (зеленый) поглощения в слоях.

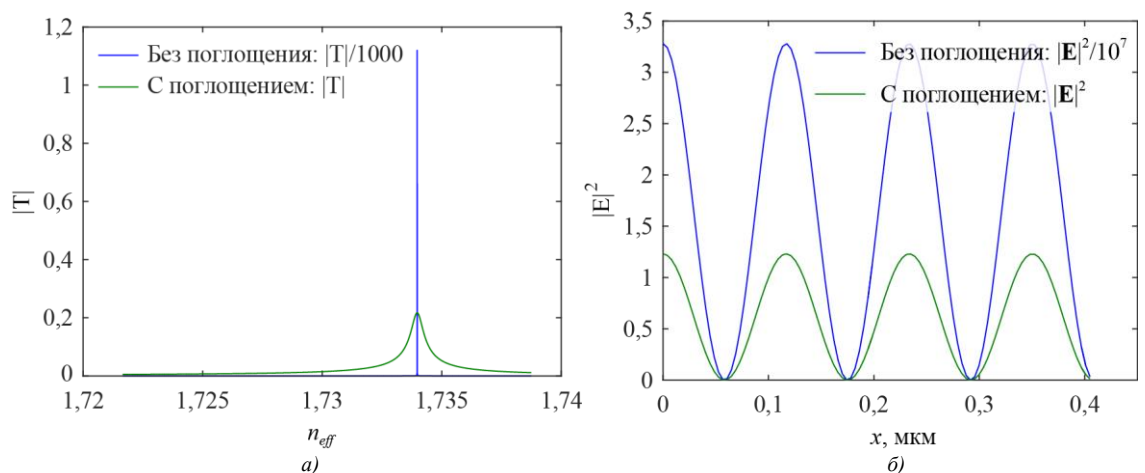


Рис. 3. Генерация и интерференция БПВ.

Очень узкий и высокий «пик» модуля комплексного коэффициента пропускания для примера без поглощения свидетельствует о высокой добротности резонанса, а, следовательно, и высокой чувствительности данного типа резонанса к параметрам структуры, что подтверждается резким уменьшением величины пика (в 5000 раз) при учете

небольших поглощений в слоях и фоторезисте. На рис. 3б представлена интенсивность электромагнитного поля на границе ФК/фоторезист, которая представляет собой интерференционную картину с периодом 116,8 нм, что в 3,47 раз меньше длины волны. В случае отсутствия потерь на поглощение наблюдается гигантское усиление поля (синий график), в случае же с потерями усиления поля не наблюдается. Отношение значений максимальной интенсивности для примеров без потерь на поглощение и с потерями составляет порядка  $3 \cdot 10^7$  раз. На рис. 4а,б приведено поле в фоторезисте для случаев с поглощением и без.

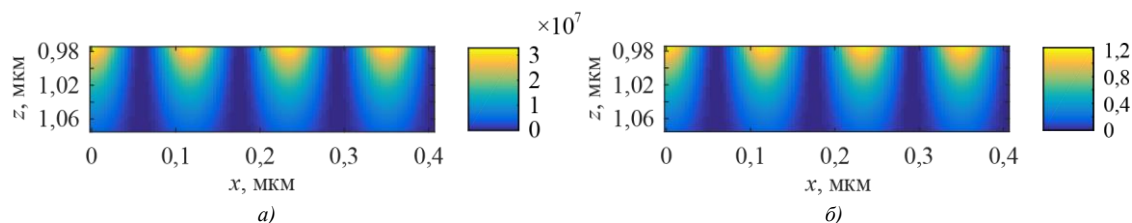


Рис. 4. Электромагнитное поле в фоторезисте при интерференции БПВ.

#### 4. Интерференция мод ФК при резонансах Фабри-Перо

Из серой области рис.2. выберем следующие толщины слоев ФК:  $h_1 = 47,8$  нм,  $h_2 = 108,3$  нм. Зафиксируем эффективный показатель преломления  $n_{eff} = 1,721$  (рис. 5а, первый пик), что соответствует углу падения  $\theta = 59,96^\circ$ . Величину обрезки примем равной  $h_c = -0,5h_1$ . На рис. 5а приведена зависимость модуля комплексного коэффициента пропускания без учета (синий) и с учетом (зеленый) поглощения в слоях. Значения первых максимумов для случаев без поглощения и с поглощением различаются незначительно (в 1,07 раз).

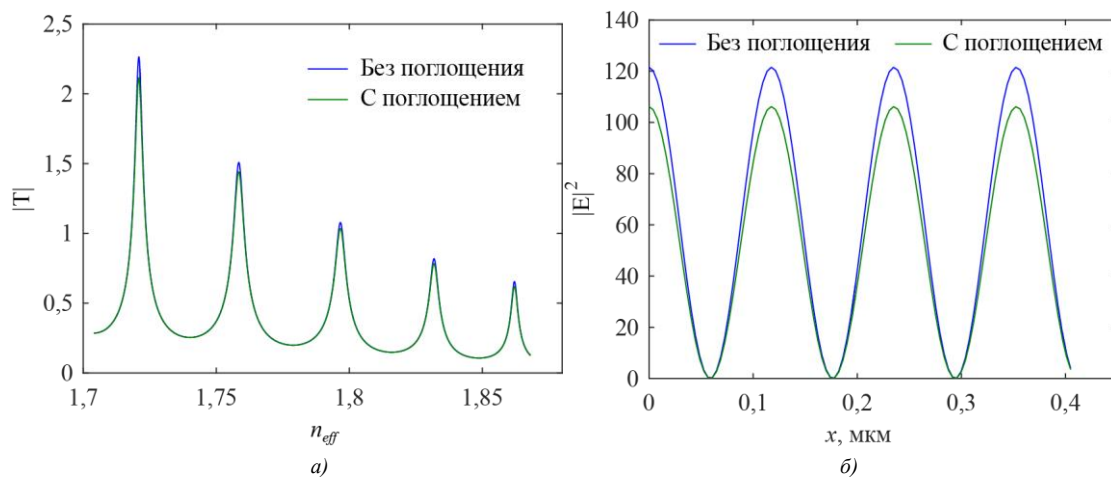


Рис.5. Генерация и интерференция резонансов Фабри-Перо.

Величина резонансных «пиков» модуля комплексного коэффициента пропускания относительно невелика, однако, как следует из рис. 5б, на котором представлена интенсивность электромагнитного поля на границе ФК/фоторезист, этого достаточно для усиления поля в 100-120 раз. Значения интенсивностей в максимумах для случаев с поглощением и без него различаются лишь в 1,14 раз. Период интерференционной картины для рис. 5б составляет 117,7 нм, что в 3,46 меньше длины волны. На рис. 6а,б приведено поле в фоторезисте для случаев с поглощением и без.

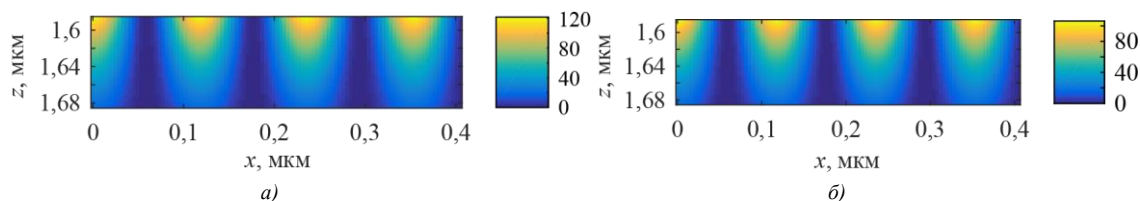


Рис. 6. Электромагнитное поле в фоторезисте при интерференции объемных мод ФК при резонансе Фабри-Перо.

#### 5. Заключение

В работе предложена оптическая схема для формирования высокочастотных интерференционных картин электромагнитных волн в задачах фотолитографии, основанная на интерференции «объемных» мод диэлектрических фотонных кристаллов при резонансах Фабри-Перо. Проведено сравнение работы данной схемы со схемой на основе возбуждения БПВ. Показано, что схема на основе БПВ очень чувствительна даже к крайне малым потерям на поглощение в слоях ФК и фоторезисте, тогда как схема на основе резонансов Фабри-Перо даже при наличии поглощения не имеет значительных потерь в интенсивности формирующихся интерференционных картин.

Достижимое усиление поля в 100-120 раз делает устройства на основе резонансов Фабри-Перо хорошей альтернативой плазмонным устройствам. Результаты работы могут найти применение при создании новых устройств для ближнепольной интерференционной фотолитографии.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-29-11683, 15-07-00548).

## Литература

- [1] Piliarik, M. Surface plasmon resonance (SPR) sensors: approaching their limits? / M.Piliarik, J. Homola // *J. Opt. Express.* – 2009. – Vol.17, №19. – P.16505-16517. (1)
- [2] Li, Y. Phase-sensitive Bloch surface wave sensor based on variable angle spectroscopic ellipsometry / Y. Li, T. Yang, Z. Pang, Z. Pang, G. Du, S. Song, S. Han // *Opt. Express.* – 2014. – Vol.22, №18. – P. 21403–21410. (5)
- [3] Sinibaldi, A. A full ellipsometric approach to optical sensing with Bloch surface waves on photonic crystals / A. Sinibaldi, R. Rizzo, G. Figliozzi, E. Descrovi, N. Danz, P. Munzert, A. Anopchenko, F. Michelotti // *Opt. Express.* – 2013. – Vol. 21, № 20. – P. 23331–23344. (9)
- [4] Chang-Hasnain, C.J. High-contrast gratings for integrated optoelectronics / C. J. Chang-Hasnain, W. Yang // *Adv. Opt. Photon.* – 2012. – Vol.4, №3. – P.379 – 440. (10)
- [5] Chang-Hasnain, C.J. High-contrast gratings as a new platform for integrated optoelectronics / C. J. Chang-Hasnain // *Semicond. Sci. Technol.* – 2011. Vol.26. – P.014043-014054. (11)
- [6] Безус, Е.А. Фазовая модуляция поверхностных электромагнитных волн с помощью дифракционного микрорельефа на границе одномерного фотонного кристалла / Е.А. Безус, Л.Л. Досколович, Д.А. Быков, В.А. Сойфер // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики.* – 2014. – Т. 99, № 2. – С. 67 – 71. (12)
- [7] Kadomina, E.A. Generation of 1D Interference Patterns of Bloch Surface Waves / E.A. Kadomina, E.A. Bezus, L.L. Doskolovich // *Technical Physics.* — 2016. —V.61. —Issue 9. — P. 1389–1394.
- [8] Кадомина, Е.А. Спектрально-селективное усиление ближнего поля в фотоннокристаллической структуре с дифракционной решёткой / Е.А. Кадомина, Е.А. Безус, Л.Л. Досколович // *Компьютерная оптика.* – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 462-468. (13)
- [9] Moharam, M. G. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings / M. G. Moharam, T. K. Gaylord, E. B. Grann, D. A. Pommet // *Journal of the Optical Society of America A.* – 1995. – Vol. 12. – P. 1068 – 1076. (14)
- [10] Moharam, M. G. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach / M. G. Moharam, T. K. Gaylord, D. A. Pommet, E. B. Grann // *Journal of the Optical Society of America A.* – 1995. – Vol. 12. – P. 1077 – 1086. (15)