

Контроль лазерной обработки поликристаллических алмазных пластин методом низкокогерентной оптической интерферометрии

**В.В.Кононенко, В.И.Конов, С.М.Пименов, П.В.Волков, А.В.Горюнов, В.В.Иванов,
М.А.Новиков, В.А.Маркелов, А.Д.Тертышник, С.С.Уставщиков**

Продемонстрирована возможность применения низкокогерентной волоконно-оптической интерферометрии для локального бесконтактного измерения оптической толщины пластин поликристаллического алмаза в процессе воздействия на его поверхность мощного импульсно-периодического лазерного излучения. Создана экспериментальная автоматизированная система, обеспечивающая контроль толщины образцов в процессе абляции их поверхности сканирующим пучком эксимерного Krf-лазера ($\lambda = 248$ нм). Показано, что данный метод может быть использован для on line контроля лазерной шлифовки и изготовления плоскопараллельных пластин.

Ключевые слова: поликристаллические алмазные пластины, лазерная шлифовка поверхности, низкокогерентная интерферометрия, абляция.

1. Введение

В последние годы благодаря развитию технологий осаждения вещества из газовой фазы стало возможным получение синтетических поликристаллических алмазных пластин, пленок и покрытий с размерами, достаточными для создания на их основе различных физических устройств. В этой ситуации особенно актуальной становится разработка лазерных методов модификации поверхности алмаза, которые обеспечивают необходимую точность и скорость локальной обработки (см., напр. [1]), а также, будучи бесконтактными, позволяют использовать интерференционные технологии для контроля формы и рельефа поверхности образца в реальном времени.

Настоящая работа посвящена проблеме контроля толщины алмазных пластин в процессе их шлифовки методом лазерной абляции [2]. Поликристаллические алмазные пластины обычно имеют значительную шероховатость, которая увеличивается с толщиной образца; например, при толщине образца ~ 1 мм шероховатость может превышать 100 мкм. Бесконтактное измерение профиля таких объектов традиционными интерференционными методами связано с известными трудностями, обусловленными рядом причин. Основная из них заключается в том, что при освещении образцов с шероховатостью, существенно превышающей длину волны зондирующего излучения, наблюдаемая интерференционная картина характеризуется наличием развитой спекл-

структуры. Из-за спекл-шума корректное восстановление распределения фазы интерферирующих волн оказывается практически невозможным.

Для устранения спекл-шума зондирующий пучок фокусируется так, что его диаметр становится меньше характерного размера неоднородностей объекта, и в этом случае наблюдается регулярная интерференционная картина. Однако при сканировании зондирующего пучка по поверхности образца непрерывность измерения интерференционной фазы теряется при переходе от одной неоднородности рельефа к другой, если разность толщин между двумя соседними измеряемыми участками поверхности превышает полуволну зондирующего излучения.

Поскольку при использовании когерентной интерферометрии измеряется не толщина пластины, а лишь ее приращение, одно неправильное измерение делает некорректными все последующие получаемые значения. Ситуация еще более усложняется большим поглощением света в поверхностном графитизированном слое, который всегда образуется в процессе лазерной абляции алмаза [2, 3].

В настоящей работе описаны эксперименты по локальному измерению толщины поликристаллических пластин синтетического алмаза в процессе абляции поверхности образца импульсно-периодическим излучением эксимерного Krf-лазера с помощью низкокогерентной волоконно-оптической интерферометрии, которая позволила преодолеть упомянутые проблемы.

2. Экспериментальная установка и методика измерений

Для микрообработки поверхности алмазных пластин (рис.1) использовался эксимерный Krf-лазер (EMG 1003i, Lambda Physik, $\lambda = 248$ нм). Энергия лазерного импульса составляла 200 мДж при частоте их следования до 50 Гц и длительности 20 нс. Для достижения максимального эффекта так называемого выглаживания поверхности образец облучался под углом 70° к нормали

В.В.Кононенко, В.И.Конов, С.М.Пименов. Центр естественно-научных исследований Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38;
e-mail: vitali.kononenko@nsc.gpi.ru

П.В.Волков, А.В.Горюнов, В.В.Иванов, М.А.Новиков, В.А.Маркелов, А.Д.Тертышник, С.С.Уставщиков. Институт физики микроструктур РАН, Россия, 603950 Нижний Новгород, ГСП-105;
e-mail: ivanov@ipm.sci.nnov.ru

Поступила в редакцию 30 сентября 2004 г., после доработки – 27 мая 2005 г.

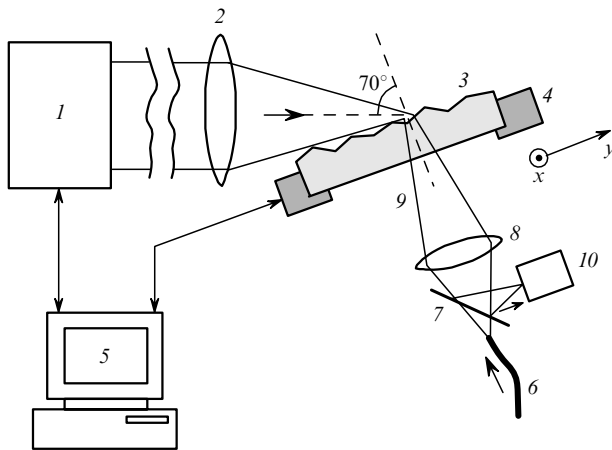


Рис.1. Установка для контролируемой лазерной обработки алмазных пластин:

1 – эксимерный КгF-лазер; 2 – объектив; 3 – алмазная пластина; 4 – двухкоординатный столик; 5 – управляющий компьютер системы лазерной обработки; 6 – оптическое волокно от измерительного блока системы контроля толщины; 7 – 50 %-ный светоделитель; 8 – объектив; 9 – зондирующий пучок; 10 – фотоприемник.

[2]. Пучок эксимерного лазера фокусировался на обрабатываемой поверхности в пятно размером 200×200 мкм. Алмазная пластина перемещалась посредством управляемого компьютером столика с минимальным шагом 1 мкм. Экспериментальная установка обеспечивала одновременное управление перемещением образца и его облучение требуемым числом лазерных импульсов.

Использованные в экспериментах алмазные пластины были получены методом осаждения из газовой фазы в плазменном СВЧ реакторе [4] (модель ASTeX-PDS19, мощность 5 кВт, частота 2.45 ГГц). Оптически прозрачные образцы имели толщину 150–200 мкм при шероховатости необработанной ростовой поверхности до 30 мкм; вторая поверхность образцов была плоской и имела оптическое качество.

Локальный контроль толщины алмазных пластин осуществлялся с помощью волоконно-оптического низкокогерентного интерферометра (рис.2). На образец по-

давалось пропущенное через перестраиваемый интерферометр 2 широкополосное излучение от источника 1, длина когерентности которого была равна нескольким длинам волн. Образец освещался по нормали к поверхности с гладкой необрабатываемой стороны, что позволило исключить влияние лазерно-индуцированного непрозрачного графитоподобного слоя на наблюдаемые интерференционные сигналы (рис.1). Зондирующий пучок был сфокусирован на обрабатываемой поверхности в пятно размером 20–30 мкм, т.е. меньше или порядка характерного поперечного масштаба шероховатостей (размера отдельных алмазных кристаллитов). Интенсивность излучения, отраженного от поверхности алмазной пластины, регистрировалась одноэлементным фотоприемником 7 (рис.2).

Используемый метод измерения толщины прозрачного объекта основан на том, что для пучков частично когерентного света интерференция (т.е. сложение напряженностей электрического поля) возникает только в том случае, если оптическая разность хода между этими пучками не превышает определенную величину, так называемую длину когерентности источника излучения. В противном случае происходит простое сложение интенсивностей пучков. Толщина пластины измеряется следующим образом. Свет от источника 1 делится в перестраиваемом интерферометре 2 на два пучка с оптической разностью хода $2x$, где x – разность длин плеч интерферометра. При отражении от образца каждый из этих пучков снова делится на два, и, таким образом, на фотоприемник 7 приходят четыре пучка. Соответствующие пути (волновые пакеты) показаны на рис.2. Их полные оптические пути таковы:

$$l_1 = L, \quad l_2 = L + 2x, \quad l_3 = L + 2nd, \quad l_4 = L + 2x + 2nd, \quad (1)$$

где d – геометрическая толщина образца; n – его показатель преломления; L – общий оптический путь от перестраиваемого интерферометра до передней поверхности образца и от образца до фотоприемника. В данной схеме интерференция будет наблюдаться только между теми из четырех пучков, пути которых перекрываются хотя бы

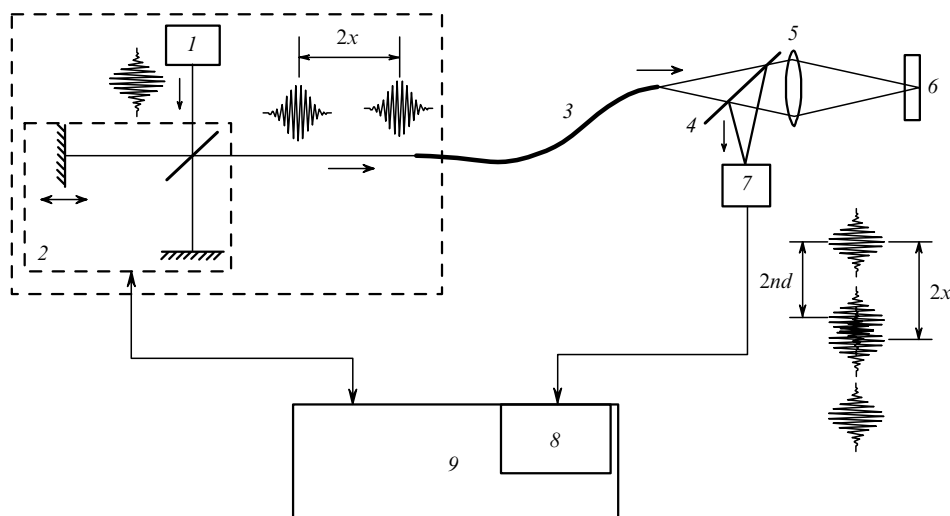


Рис.2. Схема измерения толщины алмазной пластины методом низкокогерентной интерферометрии:

1 – низкокогерентный источник света; 2 – перестраиваемый интерферометр; 3 – оптическое волокно; 4 – полупрозрачное зеркало; 5 – объектив; 6 – образец; 7 – фотоприемник; 8 – аналого-цифровой преобразователь; 9 – персональный компьютер; x – разность длин плеч перестраиваемого интерферометра; n – показатель преломления образца; d – толщина образца.

частично. Поскольку оптическая толщина образца превышает длину когерентности источника, то интерференционная картина на фотоприемнике 7 может быть создана либо перекрытием пучков 1 и 2 при разности плеч интерферометра $|x| \leq l_{\text{coh}}/2$ («нулевой» интерференционный сигнал на рис.3), либо перекрытием пучков 2 и 3 при разности плеч интерферометра $|x \pm nd| \leq l_{\text{coh}}/2$ (боковые сигналы на рис.3). Таким образом, измерение оптической толщины образца nd сводится к сканированию разности плеч перестраиваемого интерферометра 2 и к измерению расстояния между центральными интерференционными максимумами «нулевого» и одного из боковых сигналов на рис.3.

Существенно, что положение интерференционных максимумов сигнала (рис.3) не зависит от общего пути L . Это делает интерферометр нечувствительным к широкому классу внешних возмущений и нестабильностей, таких как температурные флуктуации длины волокна 3 и перемещение образца вдоль зондирующего пучка [5].

В качестве широкополосного источника света мы использовали суперлюминесцентный диод SLD-381-MP2 (Superlum Diodes Ltd.) с $\lambda = 820$ нм и длиной когерентности ~ 15 мкм. Одно из зеркал интерферометра было закреплено на мембране акустического динамика, с помощью которого производилось сканирование разности хода в перестраиваемом интерферометре. Излучение подавалось на образец через отрезок одномодового оптического волокна FS-SN-4224 длиной 5 м. Процесс измерения толщины был полностью автоматизирован, обработка интерференционных сигналов и выдача результатов измерений осуществлялись в реальном времени с помощью персонального компьютера Pentium III. Система производила 8 измерений в секунду, точность измерения геометрической толщины пластины составляла 1 мкм в диапазоне измеряемых толщин 50–500 мкм. Зондирующий пучок низкокогерентного интерферометра совмещался на обрабатываемой поверхности с пучком эксимерного лазера, что позволяло непосредственно отслеживать локальное изменение толщины образца в ходе многоимпульсного лазерного воздействия.

3. Результаты и их обсуждение

При измерениях толщины поликристаллических пластин величина наблюдаемых интерференционных сигналов в значительной степени определяется пространственной структурой интерферирующих пучков. Несовпадение волновых фронтов лучей, отраженных от разных поверхностей образца, приводит к возникновению дополнительной интерференции, т. е. к появлению темных и

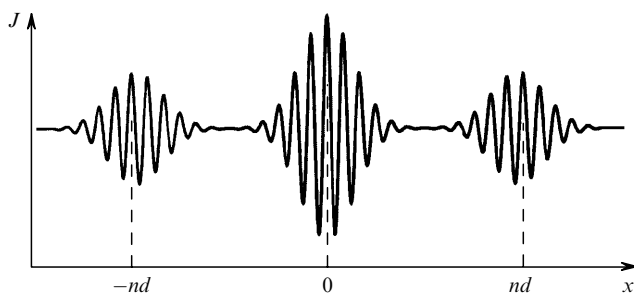


Рис.3. Интерференционный сигнал в низкокогерентном интерферометре (J – фототок фотоприемника, x – разность длин плеч интерферометра).

светлых полос в поперечном сечении интерферирующих пучков. С ростом числа интерференционных полос на апертуре фотоприемника видимость боковых интерференционных сигналов (рис.3) падает, поскольку изменение разности хода интерферирующих пучков приводит к перемещению полос по апертуре фотоприемника, но не к изменению полной световой мощности на фотоприемнике.

В наших экспериментах при освещении поверхности пучком с диаметром меньше или порядка характерного размера граней кристаллических зерен, в плоскости фотоприемника наблюдалась картина эллиптических интерференционных полос, образованных интерференцией двух пучков, отраженных от гладкой необрабатываемой поверхности и от освещаемой грани кристаллита на обрабатываемой поверхности. Ширина интерференционных полос уменьшалась с ростом угла между гранью зерна и необрабатываемой поверхностью и с увеличением толщины образца d . Для заданных параметров проекционной системы и минимального отношения сигнал/шум, допускающего измерение толщины с заданной точностью, существует максимальный угол β между гранью монокристалла и необрабатываемой поверхностью, при котором толщина образца еще может быть измерена. Таким образом, при зондировании образца интерференционный сигнал наблюдается заведомо не во всех точках образца, однако даже на необработанных пластинах (рис.4,а) существуют участки, в которых возможны измерения.

Для заданных толщин и отношения сигнал/шум существует оптимальное увеличение объектива 5, т. е. отношение диаметра моды волокна 3 к диаметру фокального пятна на образце, при котором угол β максимален. Это связано с тем, что зависимость видности интерференционного сигнала от увеличения объектива определяется двумя конкурирующими эффектами. С одной стороны, ширина колец равного наклона растет с увеличением объектива, поэтому плоскопараллельный образец целесообразнее освещать параллельным пучком. С другой стороны, полосы равной толщины, возникающие из-за непараллельности поверхностей образца, становятся тоньше с ростом увеличения объектива [6]. После оптимизации проекционной системы доля успешных измерений необработанных пластин составила $\sim 10\%$, что достаточно для предварительного определения профиля толщины образца.

Лазерная шлифовка алмазных поликристаллических пластин, детальное описание режимов которой содержится в работе [2], позволяет существенно уменьшить шероховатость поверхности до ~ 1 мкм и менее. В описываемых экспериментах исследовалась динамика роста числа успешных измерений в процессе лазерной обработки, которая уже на начальном этапе приводит к сглаживанию вершин кристаллических зерен. В результате поверхность вокруг вершины представляет собой плоскость, параллельную необрабатываемой поверхности. Перемещаясь по заданной программе, образец облучался импульсами эксимерного лазера, причем в каждом новом цикле обработки энергия лазерного излучения повышалась. Толщина пластины измерялась в режиме сканирования зондирующего пучка по поверхности образца после каждого цикла лазерного выглаживания. Расстояние между двумя соседними точками на поверхности, в которых проводились измерения, составляло 20 мкм.

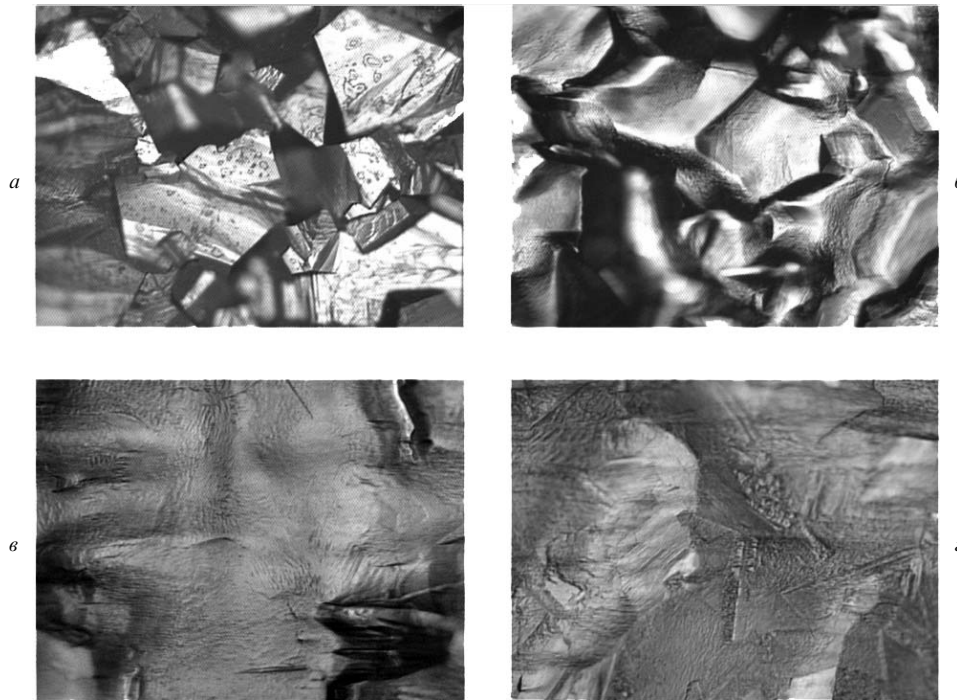


Рис.4. Эволюция исходного состояния (а) поверхности алмазной пластины в процессе лазерного выглаживания после первого (б), второго (в) и четвертого (г) циклов обработки.

Условия лазерной обработки пластины излучением КгF-лазера приведены в табл.1. В ходе обработки доля успешных измерений толщины образца выросла с 10 % (для необработанной пластины) до 83 % (в последнем цикле обработки). Динамика выглаживания поверхности и травления алмаза показана на рис.4 и 5. Как видно из полученных результатов (рис.5), используемый образец

Табл.1.

Номер цикла измерений	Лазерная шлифовка		Доля корректных измерений толщины образца после лазерной обработки (%)
	Энергия в импульсе (мДж)	Эффективное число импульсов облучения в точке поверхности	
1	60	150	26
2	140	120	43
3	200	60	59
4	290	120	83

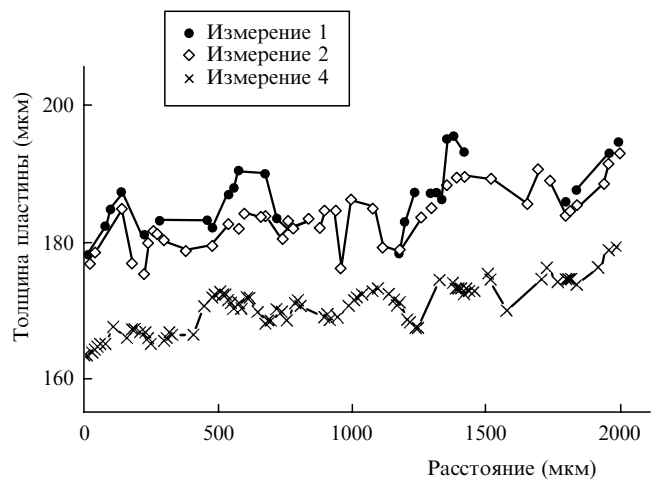


Рис.5. Модификация профиля алмазной пластины в ходе нескольких последовательных циклов лазерного выглаживания.

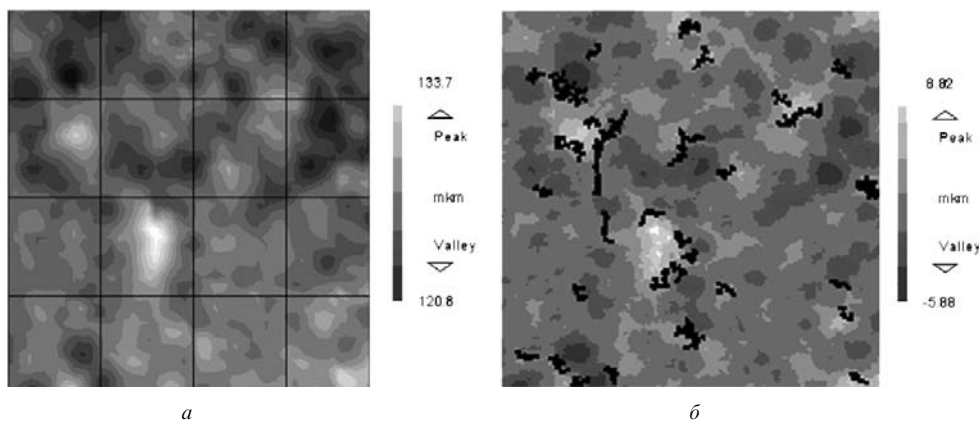


Рис.6. Рельеф алмазной поликристаллической пластины после лазерного выглаживания (площадь 2×2 мм, шероховатость 1.4 мкм, максимальный перепад высоты рельефа 14 мкм), зарегистрированный волоконно-оптическим низкокогерентным интерферометром (а) и интерференционным профилометром NewView 5000 (Zygo) (б).

существенно неоднороден по толщине, поскольку вырезан с края исходного алмазного диска диаметром 5 см.

На следующем этапе было проведено сравнение профилей образца после лазерного выглаживания, полученных низкокогерентным интерферометром и эталонным инструментом, в качестве которого использовался интерференционный профилометр NewView 5000 (Zygo) с вертикальным разрешением 1 нм. Толщина пластины до лазерной обработки составляла 150 мкм. Измерения низкокогерентным интерферометром проводились в режиме сканирования по квадратному растру с шагом 50 мкм. Количество точек образца, в которых интерференционный сигнал оказался достаточно большим для измерения толщины с заданной точностью в 1 мкм, составило 96 %. Между профилем толщины и картой поверхности, зарегистрированными волоконным низкокогерентным интерферометром и профилометром (рис.6), наблюдается хорошее соответствие. Так, по данным поверхностной профилометрии максимальный перепад высоты рельефа составляет 14 мкм, а по данным волоконно-оптической интерферометрии – 13 мкм. Толщина материала, удаленного в процессе лазерного выглаживания, составила около 25 мкм.

4. Заключение

Проведенные исследования показали возможность применения низкокогерентной оптической интерферометрии для локального бесконтактного измерения оптической толщины поликристаллических пластин алмаза с шероховатостью поверхности ~ 30 мкм, в том числе при наличии на обрабатываемой стороне лазерно-индуцированного поглощающего графитоподобного слоя. Созда-

на экспериментальная автоматизированная система, обеспечивающая измерения толщины образцов в процессе выглаживания их поверхности эксимерным KrF-лазером ($\lambda = 248$ нм). В режиме реального времени достигнута точность измерения толщины не хуже 1 мкм, что открывает путь к автоматизации процессов лазерной шлифовки, профилирования и микрообработки поликристаллических алмазных пластин. В случае обработки исходно гладких поверхностей, а также при использовании новых методов низкокогерентной интерферометрии точность и быстродействие измерительной системы могут быть улучшены по крайней мере на порядок [7].

Авторы признательны А.А.Андронову за внимание к работе и полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке гранта НШ-1788-2003.2

1. Ralchenko V.G., Pimenov S.M., in *Handbook of Industrial Diamonds and Diamond Films*. Ed. by M.A.Prelas, G.Popovici, L.K.Bigelow (New York: Marcel Dekker, Inc., 1998, p. 983–1021).
2. Pimenov S.M., Kononenko V.V., Ralchenko V.G., Konov V.I., Gloor S., Lüthy W., Weber H.P., Khomich A.V. *Appl. Phys. A*, **69** (1), 81 (1999).
3. Kononenko V.V., Konov V.I., Pimenov S.M., Prokhorov A.M., Pavelyev V.S., Soifer V.A., Luedge B., Duparre M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4426**, 128 (2002).
4. Ralchenko V.G., Smolin A.A., Konov V.I., Sergeichev K.F., Sychov I.A., Vlasov I.I., Migulin V.V., Voronina S.V., Khomich A.V. *Diamond and Related Mater.*, **6**, 417 (1997).
5. Ivanov V.V., Novikov M.A., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4900**, 548 (2002).
6. *Handbook of Optics*. Ed. by M.Bass (New York: McGraw-Hill, 1995, Vol. 1, p. 2.21).
7. Ivanov V.V., Markelov V.A., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5134**, 64 (2003).