

Оптимизация режимов ионной обработки поверхности неметаллических материалов

Установлены зависимости изменения исходной шероховатости поверхности стекла марки М1 от технологических параметров процесса ионной обработки. Определены оптимальные режимы ионной обработки, обеспечивающие минимальную шероховатость поверхности.

Ключевые слова: изделия из стекла, подготовка поверхности, ионная обработка, покрытие, шероховатость, технология.

Dependence of changes in initial surface roughness of glass grade M1 from the technological parameters of ion treatment has been determined. The optimal conditions of ion treatment, providing a minimum surface roughness have been ascertained.

Keywords: glass products, preparation of surface, ionic treatment, coating, technology.

Эксплуатационные характеристики изделий из стекла во многом зависят от состояния поверхности, поэтому защита поверхности имеет большое практическое значение. Для защиты поверхности изделий из стекла наиболее часто используют нанесение функциональных покрытий. Одним из перспективных методов формирования защитных покрытий на изделиях из стекла является конденсация покрытий из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой поверхности (метод КИБ). Данный метод позволяет не только улучшить эксплуатационные характеристики изделий, но и придать им надлежащий эстетический вид, что немаловажно для обеспечения конкурентоспособности продукции. Практический опыт внедрения технологии вакуумно-плазменных покрытий показывает, что работоспособность изделий с покрытием во многом зависит от физико-механического состояния поверхности основы (шероховатость, фактура), качества подготовки поверхности (наличие загрязнений, окисных пленок; степень активации поверхности) и культуры производства.

Микрорельеф (шероховатость) поверхности является одним из основных факторов, определяющих качество изделий с покрытием, особенно это важно при формировании оптических покрытий (например, светоотражающие, просветляющие и т.д.). Шероховатость поверхности стекла определяет возможность оседания и физико-механического сцепления с ней частичек пыли, конденсирующейся воды, молекул активных газов, при этом чем больше шероховатость поверхности, тем быстрее происходит ее старение, а значит, уменьшается время эксплуатации изделий с покрытием. В идеальном случае поверхность основы должна быть атомногладкой, чтобы исключить влияние исходного микрорельефа на шероховатость по-

крытий. Однако в реальных условиях степень шероховатости основы зависит от особенностей технологии изготовления деталей. Традиционные механические и химические методы полировки обеспечивают достаточно низкую шероховатость поверхности стекла, но в процессе обработки образуется дефектный поверхностный слой, который характеризуется повышенной твердостью и хрупкостью [1]. Наличие дефектного поверхностного слоя затрудняет заключительную операцию подготовки поверхности деталей, осуществляемую непосредственно в вакуумной камере и приводит к снижению качества вакуумно-плазменных покрытий.

Анализ литературных источников показал, что обработка ионами инертных газов позволяет не только очистить поверхность, но и снизить ее шероховатость и удалить дефектный слой [2–4]. Причем характер изменения микрорельефа при ионной обработке зависит от структуры обрабатываемого материала, исходной шероховатости поверхности и технологических параметров процесса (энергии ионов, плотности ионного потока, давления рабочего газа в камере и состава остаточной атмосферы, угла падения ионов, продолжительности обработки, взаимного расположения ионного источника и обрабатываемой поверхности).

Несмотря на то что ионная обработка широко используется для внутрикамерной подготовки изделий перед формированием покрытий, в литературе встречаются противоречивые данные о режимах ионной обработки, позволяющих получать сверхгладкую (полированную) поверхность [5–7].

Цель работы – определение оптимальных режимов ионной обработки изделий из стекла, обеспечивающих минимальную шероховатость поверхности.

В качестве образцов использовались пластины из стекла марки М1 ГОСТ 111–2001, предназначенного для остекления строительных конструкций, средств транспорта, мебели, а также для изготовления стекол с покрытиями и зеркал. Размеры образцов составляли 80×20×3 мм. Исходная шероховатость поверхности образцов составляла $Ra = 0,0075$ мкм. При анализе профилограмм было выявлено, что исходная поверхность имеет отдельные трещины и сколы, которые предопределены предварительной механической обработкой.

Ионная обработка осуществлялась с использованием установки УВНИПА-1-002 модели УРМ 3.279.079, предназначенной для нанесения износостойких, упрочняющих и декоративных покрытий методом электродугового напыления, оснащенной четырьмя ионными источниками с холодным катодом типа "Радикал". В качестве рабочего газа использовали аргон.

Шероховатость поверхности в соответствии с ГОСТ 2789–73 оценивается средним арифметическим отклонением профиля Ra , высотой микронеровностей Rz и наибольшей высотой неровностей R_{max} [8]. Для покрытий защитно-декоративного назначения основным параметром, определяющим качество изделий с покрытием, является Ra .

Шероховатость поверхности определялась контактным методом на профилографе модели "Tailor Hobson". Измерения шероховатости производились при следующих параметрах: шаг – 0,08 мм; базовая длина – 10 мм.

Предварительная (внекамерная) подготовка поверхности образцов заключалась в промывке в деионизированной воде; протирке батиновой салфеткой, смоченной в деионизированной воде; сушке в потоке очищенного воздуха; протирке батиновой салфеткой, смоченной спиртом-ректификатом; сушке в термошкафе; протирке сухой батиновой салфеткой.

На первом этапе экспериментальных исследований определяли зависимость шероховатости поверхности от угла установки образцов относительно направления ионного потока.

Образцы крепились в специальном приспособлении (одновременно обрабатывалось 5 образцов), позволяющем устанавливать платформу с образцами под различными углами относительно направления ионного потока ($\alpha = 0, 25, 30, 45, 60, 80, 90^\circ$). Приспособление с образцами устанавливалось в вакуумную камеру соосно ионному источнику. При обработке образцы находились в стационарном положении (ввод вращения отключен).

Первая серия экспериментов проводилась при следующих режимах ионной обработки: инертный газ

– Ar^+ ; энергия ионов аргона $E = 2$ кэВ; давление в камере $p = 3,2 \cdot 10^{-2}$ Па; ток разряда $I = 0,2$ А, плотность ионного потока $j = 1,2$ мА/см². Продолжительность ионной обработки составляла 10, 20 и 30 мин. Результаты полученных значений шероховатости поверхности представлены на графиках (рис. 1, а–в).

Результаты экспериментальных исследований, приведенные на рис. 1, а (время ионной обработки 10 мин), показывают, что при установке образцов параллельно направлению ионного потока ($\alpha = 0^\circ$) шероховатость поверхности снижается незначительно по сравнению с исходной. Это происходит потому, что большинство ионов отражается от поверхности, не проникая в глубь материала, т.е. эффект распыления в этом случае незначительный (см. рис. 2). Снижение шероховатости обусловлено преимущественным распылением выступов микронеровностей. При угле $\alpha = 25^\circ$ достигается минимальная шероховатость поверхности, так как ионы инертного газа, проникая в поверхностный слой на небольшую глубину, вызывают каскад столкновений атомов материала, которые, обретя достаточную энергию, превышающую энергию связи атомов на поверхности, распыляются с поверхности [9], причем впадины поверхности распыляются медленнее, чем выступы, за счет того, что происходит их затенение. Также можно предположить, что отдельные распыленные частицы с выступов заполняют впадины.

При увеличении угла α шероховатость поверхности растет. При углах установки образцов в пределах от 45 до 60° шероховатость поверхности соответствует исходной, т.е. впадины и выступы поверхности распыляются с одинаковой скоростью. Значительное повышение шероховатости поверхности, по сравнению с исходной, наблюдается при углах установки образцов, превышающих 60°, и максимальное значение соответствует $\alpha = 90^\circ$. Это можно объяснить следующим. Когда ионы бомбардируют поверхность под углом $\alpha = 90^\circ$, большая часть из них проникает в поверхность образца на относительно большую глубину (см. рис. 2). При этом происходит не только распыление материала основы, но и создание дополнительных дефектов поверхности, в том числе связанных с внедрением бомбардирующих ионов. Также можно предположить, что импульс, передаваемый атомам поверхности бомбардирующим ионом, направлен в глубь образца, поэтому большинство атомов не распыляется, а происходит просто их перераспределение.

С увеличением времени ионной обработки характер зависимости шероховатости поверхности от угла установки образцов не меняется (см. рис. 1, б, в). Бомбардировка более 20 мин приводит к ухудшению

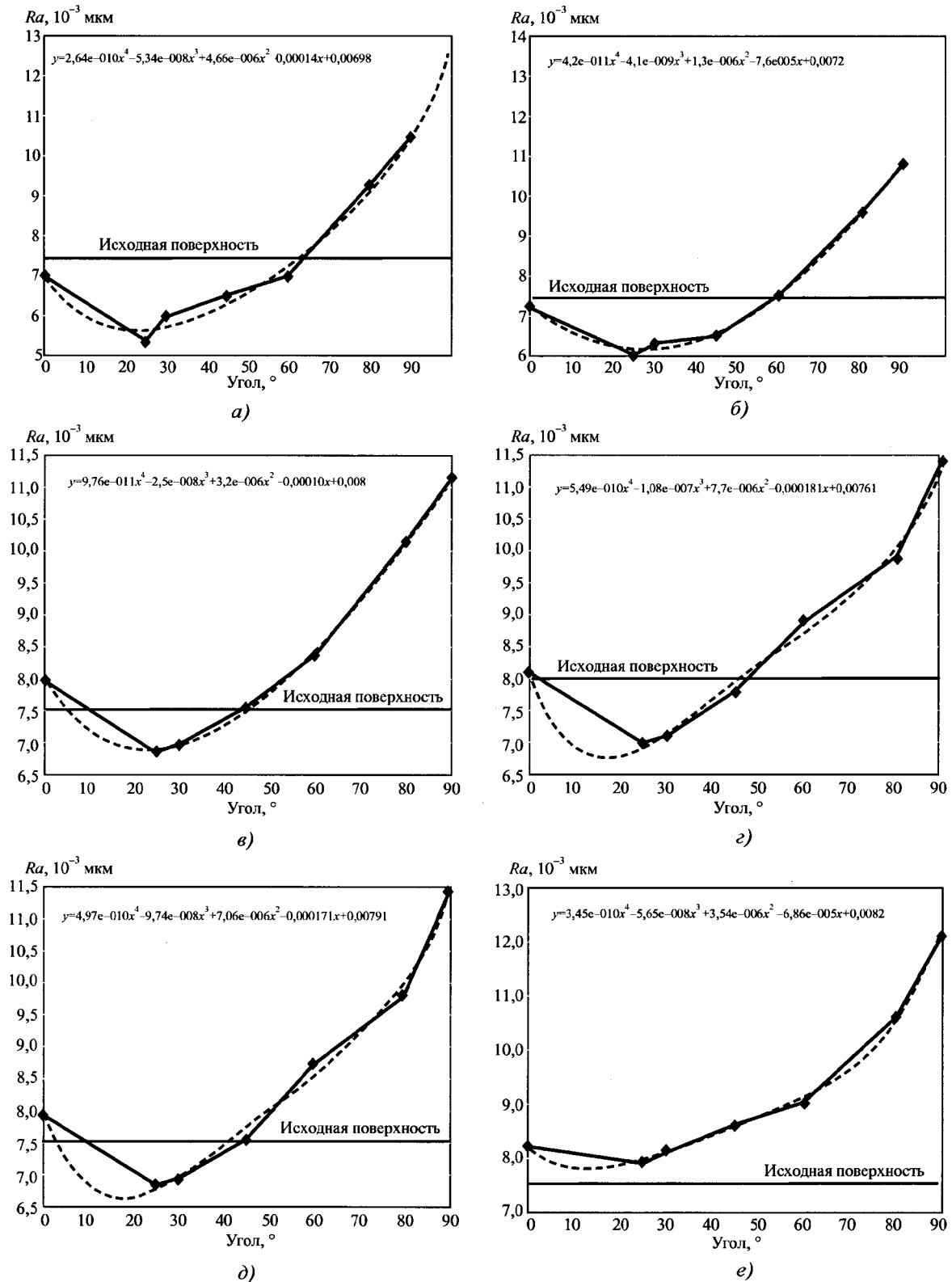


Рис. 1. Зависимость параметра шероховатости поверхности от угла установки образцов относительно направления ионного потока при времени обработки 10 (а, г); 20 (б, д); 30 (в, е) мин соответственно и режимах ионной обработки:

а-в – $E = 2$ кэВ; $p = 3,2 \cdot 10^{-2}$ Па; $I = 0,2$ А; $j = 1,2$ мА/см²; г-е – $E = 3$ кэВ; $p = 4,2 \cdot 10^{-2}$ Па; $J = 0,08$ А; $j = 1,2$ мА/см²;
 ◆ – экспериментальная кривая; - - - математическая модель (полином четвертой степени), полученная в результате аппроксимации экспериментальных данных

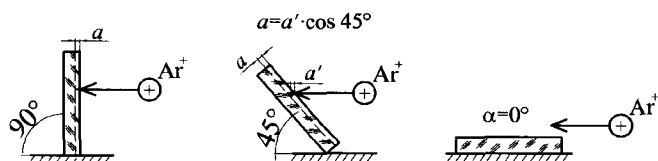


Рис. 2. Схемы взаимодействия иона с поверхностью основы

(росту) шероховатости поверхности. Это связано со значительным разогревом поверхности основы бомбардирующими ионами. По данным работы [9], более 90 % энергии иона расходуется на разогрев поверхности (тепловые колебания атомов).

При увеличении времени ионной обработки и при установке образцов под углами $\alpha = 50...90^\circ$ относительно направления ионного потока на поверхности увеличивается количество дефектов, появляются борозды, возникающие из-за неравномерного распыления материала (см. рис. 3).

Вторая серия экспериментов проводилась при следующих режимах ионной обработки: инертный газ – Ar^+ ; энергия ионов аргона $E = 3$ кэВ; давление в камере $p = 4,2 \cdot 10^{-2}$ Па; ток разряда $I = 0,08$ А; плотность ионного потока $j = 1,2$ мА/см² (см. рис. 1, z–e) (энергия ионов увеличилась с $E = 2$ кэВ до $E = 3$ кэВ, давление в вакуумной камере увеличилось с $p = 3,2 \cdot 10^{-2}$ до $p = 4,2 \cdot 10^{-2}$ Па, ток разряда уменьшился с $I = 0,2$ А до $I = 0,08$ А).

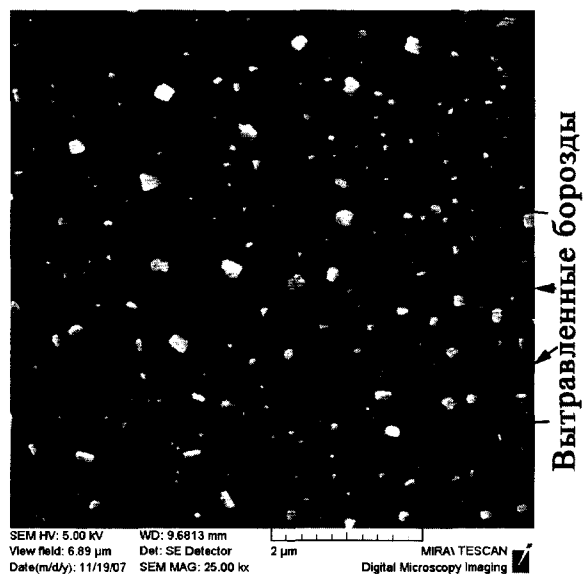


Рис. 3. Поверхность стекла после ионной обработки, $\times 25\,000$
Режимы ионной обработки: угол установки образцов относительно направления ионного потока $\alpha = 90^\circ$, ток разряда $I = 0,2$ А, плотность ионного потока $j = 1,0$ мА/см², давление в вакуумной камере $p = 3,2 \cdot 10^{-2}$ Па, время обработки $t = 20$ мин

Сравнивая результаты полученных экспериментальных зависимостей шероховатости поверхности от угла установки образцов, представленных на рис. 1, можно сделать вывод, что при увеличении энергии бомбардирующих ионов с 2 до 3 кэВ при всех углах α увеличивается шероховатость обрабатываемой поверхности. Дальнейшее увеличение энергии ионов может привести к искажению оптической поверхности. При обработке поверхности ионами с малой энергией ее будет недостаточно для распыления поверхности.

Увеличение шероховатости поверхности обуславливается также увеличением давления в вакуумной камере, так как этот фактор оказывает значительное влияние на формируемый в процессе обработки микрорельеф поверхности. Это связано с тем, что увеличивается вероятность возвращения распыленных частиц обратно на поверхность. Полученные зависимости согласуются с результатами исследований, приведенных в работе [9], где указывается, что при давлении в камере $p = 10^{-1}$ Па до 90 % распыленных частиц может возвращаться обратно на поверхность.

Уменьшение давления не является благоприятным для данного вида обработки, поскольку в этом случае поверхность бомбардирует малое количество ионов рабочего газа, что значительно снижает производительность процесса.

На втором этапе экспериментальных исследований определяли зависимость шероховатости поверхности от плотности ионного потока. Образцы устанавливались в специальное приспособление, позволяющее изменять расстояние между образцом и ионным источником (одновременно обрабатывалось 3 образца).

Образцы подвергались ионной обработке при следующих режимах: инертный газ – Ar^+ ; энергия ионов аргона $E = 2$ кэВ; давление в камере $p = 3,2 \cdot 10^{-2}$ Па; ток разряда $I = 0,2$ А.

Результаты исследования влияния плотности ионного потока на шероховатость образцов из стекла представлены на рис. 4.

Анализ полученной зависимости показывает, что при значениях плотности ионного потока $0,2...0,5$ мА/см² наблюдается незначительное увеличение шероховатости поверхности по сравнению с исходной. Это может быть связано с тем, что на обрабатываемой поверхности происходит выборочное распыление загрязнений, скопившихся во впадинах микрорельефа поверхности (остаточные загрязнения после предварительной внекамерной подготовки, частицы пыли и т.д.), которые экранируют локальные участки поверхности от воздействия ионного потока, вследствие чего образуется более развитый рельеф поверхности. При увеличении плотности ионного по-

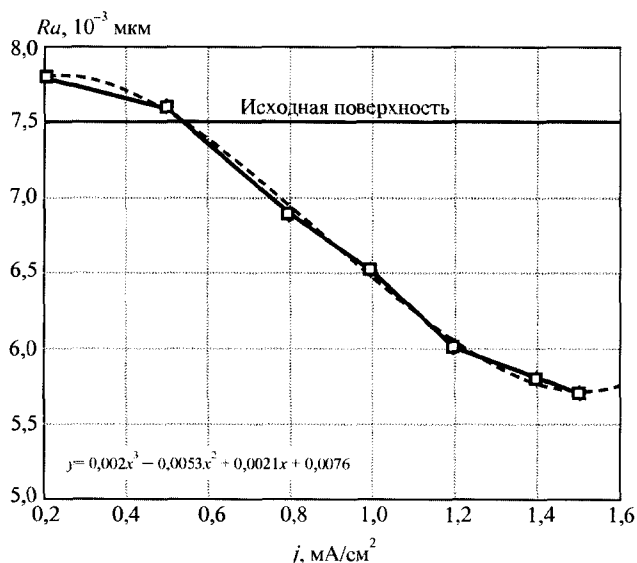


Рис. 4. Зависимость параметра шероховатости поверхности от плотности ионного потока:

□ — экспериментальная кривая; — — — математическая модель (полином третьей степени), полученная в результате аппроксимации экспериментальных данных

тока до 0,8...1,0 мА/см² наблюдается значительное снижение шероховатости поверхности. Это связано с увеличением концентрации ионов, достигающих поверхности и имеющих достаточную энергию для распыления как загрязнений, имеющихся на поверхности, так и материала поверхностного слоя, при этом наиболее интенсивно распыляются выступы микронеровностей. При значениях плотности ионного потока 1,2...1,5 мА/см² процесс травления выступов сопровождается вытравливанием впадин, т.е. формируется квазиравновесный рельеф. Увеличение плотности ионного потока более 1,5 мА/см² приводит к значительному увеличению температуры поверхности обрабатываемых изделий, а так как у стекла низкий коэффициент теплопроводности (1,0 Вт/м·°К), то это может привести к разрушению изделия [10].

В результате проведенных экспериментальных исследований были предложены оптимальные режимы ионной обработки изделий из стекла марки М1 ГОСТ 111–2001, позволяющие получить минимальную

шероховатость поверхности ($Ra = 0,0050...0,0070$ мкм): давление в вакуумной камере ($p = (2,7...3,2) \cdot 10^{-2}$ Па); ток разряда $I = 0,2$ А; энергию ионов $E = 2$ кэВ; плотность ионного потока $j = 0,8...1,2$ мА/см²; время ионной обработки 5...10 мин; угол установки образцов $\alpha = 25 \pm 10^\circ$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Носов Г.И., Калинина И.Е., Белоус В.А. Влияние ионного облучения на модификацию поверхности сплава на основе циркония // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2001. № 1 (12). С. 36–40.
2. Жилейкин В.П., Семенов Е.В. Эллипсометрическое исследование поверхности стекол после ионно-лучевой очистки // *Оптико-механическая промышленность*. 1986. № 2. С. 28–33.
3. Шехтман С.Р. Метод ионно-плазменной очистки и осаждения покрытий на детали ГТД с использованием разряда на основе эффекта полого катода: автореф. ... канд. техн. наук: 05.02.08; 05.03.01. Рос. акад. наук. Уфа, 1999. 16 с.
4. Исследование влияния режимов ионно-плазменной обработки на шероховатость подложек из кварца, поликора и ситалла / В.М. Ветошкин, П.Н. Крылов, Э.А. Романов // *Вакуумная техника и технология*. 2008. Т. 18. № 2. С. 81–85.
5. Черезова Л.А. Модификация поверхности оптических материалов ионной и ионно-химической обработкой // *Оптический журнал*. 2000. Т. 67. № 10. С. 3–8.
6. Габович М.Д., Плешивцев Н.В., Семашко Н.Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. М.: Энергоатомиздат, 1986. 248 с.
7. Влияние ионной обработки подложек на начальные стадии роста металлических пленок / А.В. Степура, Т.С. Туровская, Г.А. Муранова, А.Ф. Первеев // *Оптико-механическая промышленность*. 1983. № 11. С. 30–36.
8. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Введ. 01.01.1975. Гос. комитет стандартов Совета Министров СССР. 1975. 6 с.
9. Ивановский Г.Ф., Петров В.И. Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1986. 232 с.
10. Справочник технолога-оптика / под общ. ред. М.А. Окатова. 2-е изд., переаб. и доп. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.

