

УДК 655.226.4

ФОРМИРОВАНИЕ МЕЖСЛОЙНЫХ ОТВЕРСТИЙ В ПОЛИМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЯХ МИКРОКОММУТАЦИОННЫХ ПЛАТ

Дарья Михайловна Кузищева

Магистр 1 года,

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.С.Боброва,

ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Ключевые слова: фотолитография, оптические волноводы, фотополимеры, плазмо-химическое травление, межслойные отверстия

Аннотация: В процессе изготовления многослойных коммутационных плат с применением технологии оптических волноводов в качестве диэлектрических слоев используются фоточувствительные полимеры. Для обеспечения межслойной коммутации необходимо сформировать межслойные отверстия, которые в дальнейшем будут заполнены проводящим материалом. В статье рассматриваются методы формирования отверстий в полимерных диэлектрических слоях и предлагаются режимы проведения экспериментов.

В недавнее время в области электроники и микроэлектроники замечена тенденция к замене электрических соединений оптическими. Развитие в таком направлении обусловлено значительным увеличением полосы пропускания канала связи при использовании оптических элементов. Для обеспечения связи между устройствами используют оптическое волокно. Такие неоспоримые плюсы оптических соединений как низкие потери сигнала, отсутствие перекрестных помех и тепловыделения подтолкнули к разработке соединений для реализации связи между элементами одного устройства, в частности между составляющими коммутационной платы. Таким видом межсоединения являются планарные оптические волноводы.

Планарный оптический волновод представляет собой канал (ядро) прямоугольного сечения, сформированный внутри оптически менее плотного материала (оболочки). Световой сигнал распространяется в канале за счёт полного внутреннего отражения от поверхности раздела ядро/оболочка [1].

Реализация микроммутационных плат с технологией оптических волноводов

В изделиях интегральной оптики материалами волноводов служат полупроводниковые и металлические (для плазмонных волноводов) плёнки, стёкла, оптические ситаллы и композитные материалы [2]. Волноводы изготавливаются фотолитографическим методом. В свою очередь к коммутационным платам предъявляется строгое требование: материалы световедущей жилы и оболочки волновода должны быть выполнены из диэлектрика, т.к. одновременно с функцией передачи сигнала они реализуют роль межслойного диэлектрика между верхним и нижними слоями коммутации.

Наиболее перспективными материалами для удовлетворения вышеуказанных требований являются фоточувствительные полимеры. Такие материалы обладают существенным преимуществом: отпадает необходимость в использовании фоторезиста при проведении фотолитографии – экспонируются и проявляются непосредственно сами полимеры. Примером таких материалов являются негативные фотополимеры EpoCore и EpoClad компании Microresist technology. Их свойства приведены в таблице 1 [1].

Таблица 1. Свойства полимеров EpoCore и EpoClad

Коэффициент преломления ($\lambda=830$ нм)	Erocore 1,58 Eroclad 1,57
Температура стеклования	>180 °C
Потери ($\lambda=830$ нм)	0,2 Дб/см
КТР	$5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Обозначим в общих чертах технологический процесс формирования волноводов на основе данных фотополимеров (рис.1). На подложку центрифугированием наносится слой EpoClad, после чего сушится и экспонируется по всей площади. Те же действия производятся со слоем EpoCore, но на этапе экспонирования формируется топология волноводов. Производится проявка топологии, не засвеченные области удаляются растворителем mr-Dev 600. Затем формируется верхний слой EpoClad [1].

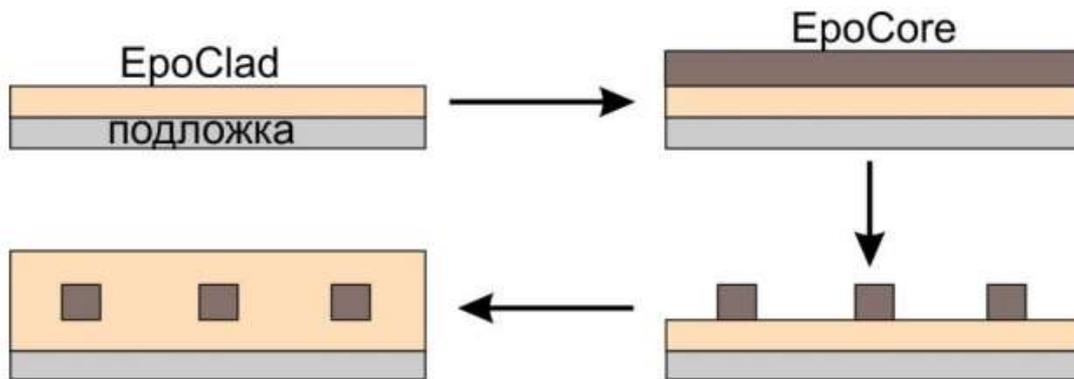


Рис. 1. Формирование планарных оптических волноводов

Пример тонкопленочной коммутационной платы с оптическими межсоединениями представлен на рис.2.

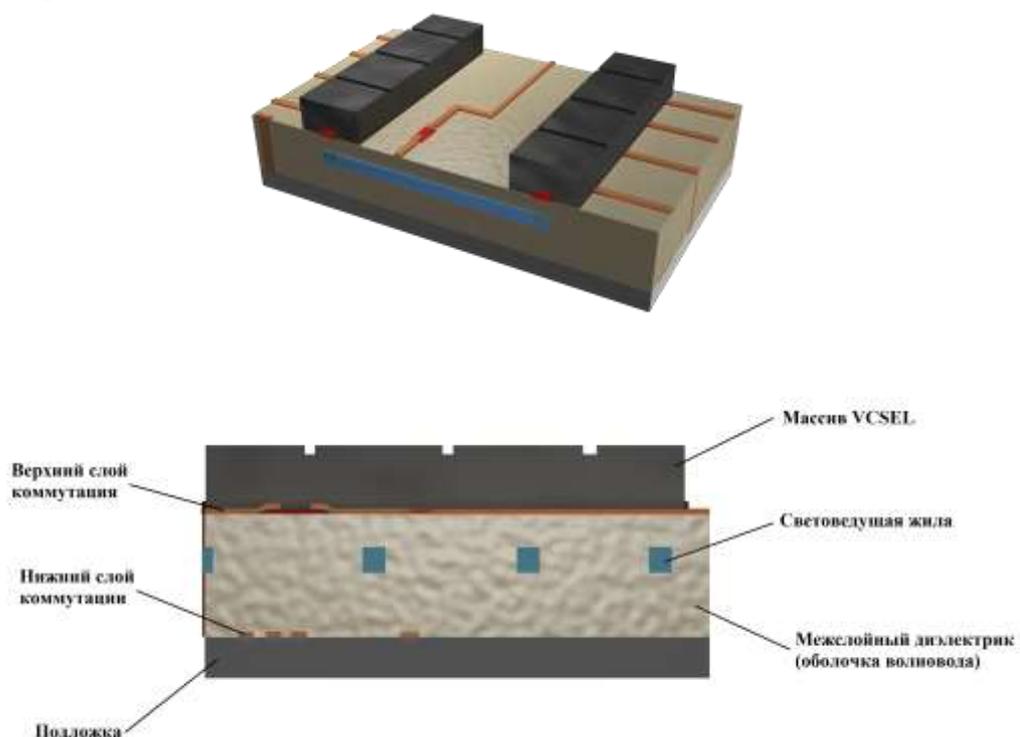


Рис. 2. Конструкция тонкопленочной коммутационной платы

Микросистема расположена на диэлектрической подложке с габаритными размерами 300x300x1 мм. Данная конструкция имеет два уровня электрической коммутации. Нижний уровень содержит пассивные элементы и микрополоски, в то время как верхний уровень содержит элементы тонкопленочной коммутации. Роль межслойного диэлектрика выполняет толстый слой EpoClad, являющийся также оболочкой оптических каналов. Связь между слоями коммутации осуществляется через столбики гальванической меди, сформированные в слое EpoClad. Оптические волноводы сформированы из фоточувствительных негативных полимеров. Материал световедущей жилы имеет несколько более высокий показатель преломления чем нижний и верхний слои полимера, что способствует распространению луча света по волноводу за счет многократно отражения от оболочки. Бескорпусные кристаллы монтируются в «окно» в слое полимера. В качестве излучателя установлен массив VCSEL. Каждый элемент массива имеет два вывода, один из которых общий. Сигнал, генерируемый лазером, распространяется в вертикальном направлении, изменение направления светового потока здесь происходит за счёт рассеивания в периодической структуре. Далее брэгговская решётка играет роль резонатора, усиливающего сигнал в направлении волновода. Период этой решетки будет равен половине волны светового сигнала, а именно 425 нм. В конце волновода световой поток снова меняет направление и регистрируется фотодиодом.

Для обеспечения соединения верхних и нижних слоев коммутации в слое полимера необходимо сформировать микроотверстия, которые в дальнейшем будут заполнены медью. Основной задачей является разработка технологии формирования ортогональных отверстий в толстых (30-100 мкм) слоях полимера.

Анализ методов формирования отверстий в слоях полимера

В микроэлектронной промышленности существует четыре основных технологии получения микроотверстий в платах:

- фотолитографический метод – способ получения отверстия воздействием раствора проявителя на диэлектрический слой;
- сухое травление – получение отверстия травлением медной фольги и удаление вскрытого диэлектрика воздействием плазмы;
- механическая обработка – формирование отверстий механическим сверлением или воздействием пемзы;
- лазерная обработка – получения отверстия удалением меди и диэлектрика путем их разложения под действием лазерного луча;

Основными требованиями, предъявляемыми к межслойным отверстиям, являются:

- диаметр отверстий 10..50 мкм;
- высокое аспектное отношение диаметра к толщине.

Ортогональность стенок отверстия в случае межслойных соединений не является основным критерием выбора метода, в том числе отсутствуют допуски на ортогональность. Это особенность обусловлена дальнейшей металлизацией отверстия, в частности наклонные стенки в виде сужающейся трапеции, что позволяют более однородно металлизировать отверстия.

Однако в остальных случаях, например при обработке торцов волновода или формировании структуры в полимерных слоях, на ортогональность стенок накладываются высокие требования, что является определяющим фактором при выборе того или иного способа обработки. В связи с этим в статье так же будет обращено внимание на возможность получения ортогональных стенок отверстия тем или иным способом.

Механический способ получения отверстий

Сверление глухих отверстий на заданную глубину до определенного слоя имеет технологическое ограничение: для получения качественной металлизации глухих отверстий необходимо, чтобы отношение H/d (отношение глубины сверления к диаметру отверстия) было не более 1 (оптимально — 0,8). Это означает, что чем больше глубина сверления глухого

отверстия (и диэлектрический зазор между слоями), тем больше должен быть диаметр такого отверстия [3]. Данное ограничение не позволяет получить отверстие в соответствии с заданными требованиями, поэтому данный метод рассматриваться более не будет.

Метод лазерного сверления микроотверстий

Под лазерным сверлением понимается прецизионный способ получения отверстий различного диаметра. Для этой операции используются два независимых метода. В одном случае лазерный луч перемещается по заданному контуру, и форма отверстия определяется траекторией его относительного перемещения. Фактически здесь происходит процесс резки, при котором тепловой источник перемещается с определенной скоростью в заданном направлении. При этом, как правило, применяются лазеры непрерывного действия либо импульсные лазеры с очень короткой (нано- или фемтосекундной) длительностью импульсов и высокой частотой их повторения.

В другом случае, получившем название проекционного метода, обрабатываемое отверстие, подобно тому, как это происходит при резке, повторяет форму лазерного пучка, которому с помощью специальной маски (диафрагмы) и проекционной оптической системы можно придать любое сечение.

В последние годы для сверления микроотверстий стали широко использовать метод многоимпульсной обработки (МИО). Техника МИО формирует отверстие за счет использования последовательности лазерных импульсов заданной энергии и длительности. Такой характер генерации лазеров может быть обеспечен в режиме синхронизации продольных мод резонатора. Обработка материала последовательностью импульсов приводит к постепенному увеличению глубины отверстия вследствие испарения слоя за слоем с каждым импульсом. Конечная глубина отверстия определяется полной энергией серии импульсов, в то время как диаметр зависит от средних параметров отдельного импульса (как и диаметр светового пучка и фокальная каустика в зоне воздействия). В режиме МИО можно обеспечить очень высокое качество микроотверстий за счет минимизации оплавления стенок и дна отверстия. Для этого необходимо выполнить следующие условия:

$$\tau_{\text{имп}} \leq r_0^2/a, h(\tau_{\text{имп}}) \leq r_0,$$

где $\tau_{\text{имп}}$ – длительность лазерного импульса; r_0 – радиус лазерного пучка в фокусе; a – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала [4].

Основными преимуществами лазерного метода сверления являются:

- высокое aspectное соотношение диаметра к толщине, вплоть до 1:80;
- возможность получения фигурных отверстий;
- получение отверстий микронного и субмикронного уровня;
- ортогональность стенок отверстия по его длине.

На рис. 3 изображены отверстия в стали, полученные лазерным сверлением. Диаметр отверстия составляет 70 мкм, в то время как толщина пластины равна 1 мм.

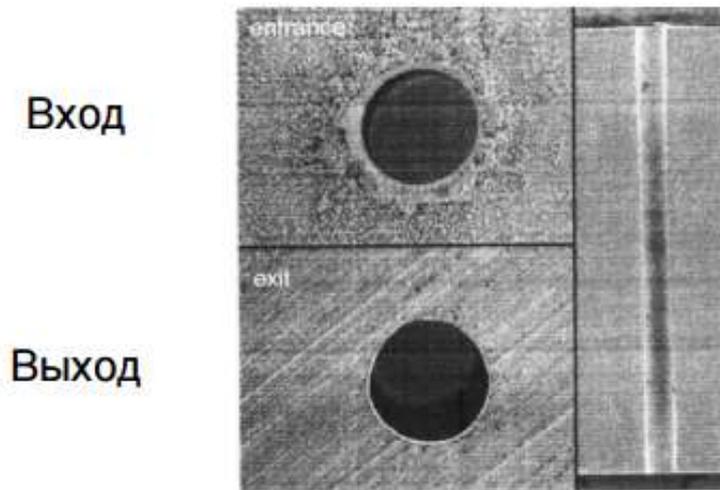


Рис. 3. Отверстия в стали, полученные лазерным сверлением

Как мы можем видеть, метод лазерного сверления обладает высокой анизотропностью, стенки отверстия остаются ортогональными по всей длине отверстия, несмотря на высокое аспектное отношение.

Однако лазерное воздействие существенно изменяет энергетическое состояние близлежащего к обработке слоя полимера. Анализ методом спектроскопии термостимулированных токов свидетельствует о появлении носителей заряда различной природы вследствие вторичных превращений, происходящих в слое полимерной пленки под действием высокоэнергетического потока [5]. Такие изменения в структуре полимера могут оказывать негативные влияния на его функцию передачи светового сигнала. В связи с этим в случае полимерных оптических структур применение лазерного сверления нежелательно. В тоже время при использовании полимеров только в качестве диэлектрических слоев, где несущественны изменения структуры полимеров на энергетическом уровне, данный метод является крайне эффективным способом получения межслойных отверстий с высоким аспектным соотношением и ортогональностью стенок.

Фотолитографический метод получения отверстий

Алгоритм получения отверстий в конструктивных фоточувствительных полимерах состоит из следующих пунктов:

- нанесения слоя фотополимера;
- сушка фотополимера;
- совмещения фотошаблона с пластиной и экспонирование слоя;
- проявление фотополимера.
- сушка фотополимера.

Такой вариант метода получения отверстий обладает высокой анизотропией. Это связано с тем, что проявитель активно реагирует с заэкспонированным фотополимером, но не реагирует с незаэкспонированным (на примере позитивного фотополимера, в случае же использования негативного полимера проявитель реагирует с незасвеченной областью). Размеры отверстий зависят от разрешающей способности фотополимера. При проведении экспериментов по определению разрешающей способности полимеров EpoClad и EpoCore были получены структуры с размерами 5 и 10 мкм, что перекрывает нижнюю границу требований к отверстиям в межслойных слоях.

Данный способ позволяет получить отверстия в слое полимера, удовлетворяющие основным требованиям к межслойным отверстиям. Однако в случае жидкостной обработки на дне сформированного отверстия по поверхности меди могут осаждаться различные загрязнения

после процесса проявления полимера. Чистку поверхности предположительно можно произвести плазменным методом травления.

Получение отверстий методом сухого травления

Сухое травление можно разделить на три основных класса, обуславливаясь природой явления, на основе которого происходит процесс:

- механизм физического распыления;
- сочетание физического распыления и различных химических реакций;
- химическое травление.

Методы на основе физического распыления (ионно-плазменное травление, ионно-лучевое травление, атомно-лучевое травление), а так же совместно физического распыления и химических реакция (реактивное ионно-плазменное травление, реактивное ионно-лучевое травление, реактивное атомно-лучевое травление), обладают высокой степени анизотропии, позволяя получить ортогональные стенки отверстий без бокового подтрав. Однако процессы с участие физического распыления всегда сопровождаются радиационными дефектами. В металлах и полупроводниках данное явление отсутствует, либо является незначительным и неустойчивым, но при травлении диэлектриков наблюдаются глубокие и устойчивые изменения электрофизических и химических свойств, что является неприемлемым в технологии оптических полимерных волноводов.

Методы на основе химического травления (газовое травление, радикальное травление, плазмо-химическое травление) обладают изотропными свойствами, что приводит к подтравам материала. В то же время данные способы обработки материалов не сопровождаются радиационными эффектами, что делает их применимыми для работы с полимерами. Самым эффективным из трех перечисленных методов является метод плазмо-химического травления. Подобрав определенные параметры процесса, можно улучшить анизотропию процесса.

Однако при более детальном изучении процессов сухого травления было выявлено ограничение на толщину травимого слоя полимера: по различным причинам при значениях более 30 мкм проведение процессов становится крайне малоосуществимым и затруднительным. Данные ограничение не позволяют использовать эти методы для травления толстых слоев полимера. Однако метод плазмо-химического травления может быть использован для очистки поверхностей подложек, так и очистки отверстий после фотолитографических процессов.

Ниже, в таблице 2, представлен сравнительный анализ методов формирования отверстий.

Таблица 2. Сравнительная таблица методов формирования отверстий

Метод формирования отверстий	Механический метод	Лазерное сверление	Фотолитографический метод	Сухое травление
Min диаметр, мкм	200	10	5	ИТ, ИПТ* – 0,1..0,5 ПТ** – 2
Ортогональность отверстий	да	да	да	ИТ, ИПТ – да ПТ – нет
Радиационные дефекты	нет	да	нет	ИТ, ИПТ – да ПТ – нет
Сложность	низкая	низкая	средняя	высокая
Полное соответствие требованиям	нет	нет	да	нет

*ИТ – ионное травление, ИПТ – ионно-плазменное травление

**ПТ – плазменное травление

Для обеспечения максимальной эффективности рекомендуется формировать межслойные отверстия в полимерных слоях фотолитографическим методом с последующей зачисткой отверстий плазмо-химическим методом.

Планирование экспериментов

В рамках работы основной целью являлось разработка технологии очистки отверстий, сформированных фотолитографическим методом в полимере EpoClad.

В связи с отсутствием работ по обработке полимера EpoClad, технологические параметры процесса сухого травления неизвестны. Основной задачей являлось определение скоростей травления полимера, рабочих газов и других характеристик рабочего процесса. Были спланированы эксперименты по травлению отверстий в тонком слое полимера.

Основная суть экспериментов заключается в следующем: на подложки (ситалл) центрифугированием наносится слой полимера (25 мкм), затем сушится, экспонируется по всей площади и задубливается. Далее фотолитографическим методом по образцам формируется металлическая маска с рядом отверстий по площади заготовки. Затем при различных параметрах процесса через маску будет проводиться плазмо-химическое травление, и затем защитную маску удалят.

Полимеры типа EpoClad и EpoCore обладают свойствами, схожими со свойствами полимера SU-8, что представлено в таблице 3.

Таблица 3. Характеристики фоточувствительных полимеров

Материал	Плотность, г/см ³	Коэффициент преломления	Вязкость, сСт	Основа
SU – 8	1,075 – 1,173	1,552 – 1,600	65 – 12000	Эпоксидная смола
EpoClad	1,172 – 1,200	1,502 – 1,544	75 – 12000	Эпоксидная смола
EpoCore	1,175 – 1,200	1,505 – 1,546	87 – 10400	Эпоксидная смола

На основе схожести характеристик полимеров предположим о схожести их поведения в условиях сухого травления.

Учеными Датского Технологического Университета был проведен ряд экспериментов по изучению оптимальных режимов травления полимерных микроструктур на основе SU – 8. Формирование структур осуществлялось методом РИПТ в кислородной плазме в среде фторида серы. Установки РИПТ являются универсальными в области травления, т.к. меняя некоторые параметры можно добиться ПХТ или ИТ. Исключая из технологического процесса фторид серы, можно провести ПХТ в чистой кислородной плазме, меняя мощность смещения на подложке, давление, температуру можно добиться процессов с разной степени анизотропности.

На основе результатов исследования ученых Датского Технологического Университета был спланирован эксперимент по формированию отверстий в слое полимера EpoClad и EpoCore, основные параметры которого представлены в таблице 4.

Таблица 4. Основные параметры эксперимента

№№	Технологический метод	Параметры процесса
Подложка №1	Травление в чистой кислородной плазме	Мощность источника плазмы: 1000 Вт; Мощность смещения на подложке: 30 Вт; Температура подложки: 10°C; Рабочее давление: 20 Па; Расход SF ₆ : 0 см ³ /мин; Расход O ₂ : 99 см ³ /мин; Время: 20 мин
Подложка №2	Травление с высокой степенью анизотропии	Мощность источника плазмы: 1000 Вт; Мощность смещения на подложке: 30 Вт; Температура подложки: 30°C; Рабочее давление: 40 Па; Расход SF ₆ : 17 см ³ /мин; Расход O ₂ : 99 см ³ /мин; Время: 20 мин
Подложка №3	Травление с низкой степенью анизотропии	Мощность источника плазмы: 1000 Вт; Мощность смещения на подложке: 0 Вт; Температура подложки: 10°C; Рабочее давление: 20 Па; Расход SF ₆ : 14 см ³ /мин; Расход O ₂ : 99 см ³ /мин; Время: 20 мин
Подложка №4	Травление по «средним» параметрам	Мощность источника плазмы: 1000 Вт; Мощность смещения на подложке: 15 Вт; Температура подложки: 20°C; Рабочее давление: 30 Па; Расход SF ₆ : 15 см ³ /мин; Расход O ₂ : 99 см ³ /мин; Время: 20 мин

В ближайшее время в производственном комплексе ОАО «НПП «Пульсар» будут проведены эксперименты в соответствии с предложенными данными, представленными в таблицах выше.

Выводы

Формирование межслойных отверстий в полимерных слоях методом фотолитографии позволяет получить ортогональные отверстия диаметром порядка 5-10 мкм, не нарушая при этом структуру функциональной части оптических волноводов.

Рекомендуется проводить дополнительную очистку отверстий, сформированных фотолитографическим методом, плазмо-химическим способом для обеспечения более высокого качества обработанной поверхности.

Литература

1. Кузовков А. В., Кузищева Д. М. Планарные оптические волноводы в электронике. Оценка разрешающей способности фотополимера Erosoge. [Электронный ресурс] // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 7 – 10 апреля, 2015, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана. – М.: ООО «КванторФорм», 2015.– № гос. регистрации 0321501427.– URL: studvesna.ru?go=articles&id=1283 (дата обращения: 17.03.2016).– Загл. с экрана.
2. А.И. Сидоров, Н.В. Никоноров. Материалы и технологии интегральной оптики. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 107 с.

3. *Петров Л.И.* Особенности получения глухих металлизированных отверстий МПП с использованием типовых технологических процессов. [Электронный ресурс] // Технологии электронной промышленности, 2011, №4, URL: <http://www.tech-e.ru>
4. *В.А. Парфенов.* Лазерная микрообработка материалов. Учебное пособие – СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 31 с.
5. *В.Г. Сорокин, Е.И. Эйсмонт, Е.В. Новгородская, А.В. Чекель.* Технология лазерного модифицирования полимерных полуфабрикатов для нанесения декоративных покрытий [Электронный ресурс] // Электронная библиотека БГУ, 2011, секция 6