

Создано: 04/01/2018

Автор: Allegorithmic

Обновлено: 10/04/2018

Ревизия: 25

Перевод: Леонид Садеков (Специально для [XYZ School](#))

! BEGINNER

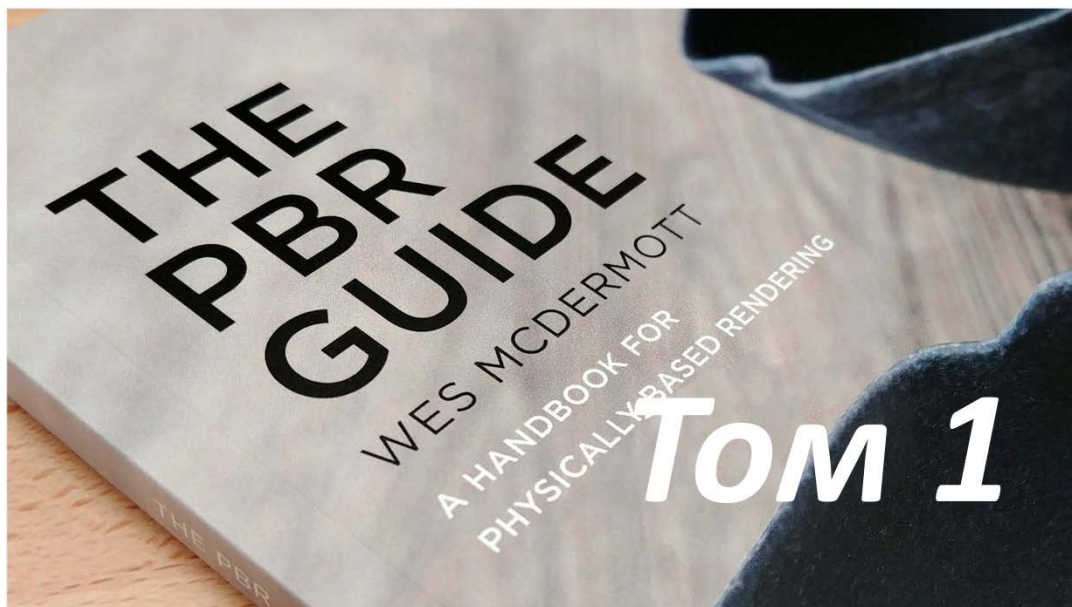
◆ SUBSTANCE PAINTER

◆ SUBSTANCE DESIGNER

◆ SUBSTANCE B2M

PBR руководство от Allegorithmic – том 1

Свет и материя: Теория физически корректного рендеринга и затенения



Читайте вторую часть PBR руководства [здесь](#) ([оригинал](#))



Содержание:

- Световые лучи
- Поглощение и рассеивание – Прозрачность и полупрозрачность
- Диффузное и зеркальное отражения – Теория микроповерхностей
- Цвет
- BRDF
- Сохранение энергии
- Эффект Френеля - F0 (Коэффициент отражения Френеля при 0 градусах)
- Проводники и диэлектрики – Металлы и неметаллы
- Рендеринг в линейном пространстве
- Ключевые характеристики PBR

Теория физически корректного рендеринга и затенения

Свет – это сложный феномен, который сочетает свойства волн и частиц. Поэтому для описания поведения световых лучей было создано несколько различных моделей.

Как художников по текстурам нас интересует лучевая модель света, поскольку она описывает взаимодействие света с материей. Наша работа заключается в создании текстур, описывающих поверхность, поэтому важно четко понимать, как световые лучи взаимодействуют с поверхностью материи. Мы создаем текстуры и материалы, которые взаимодействуют со светом в виртуальных мирах. И чем лучше мы понимаем поведение света, тем реалистичней будут выглядеть текстуры.

В руководстве рассматривается физическая теория модели физически корректного рендеринга (PBR). Сначала мы изучим поведение световых лучей и затем определим ключевые характеристики PBR.

Световые лучи

Согласно лучевой модели света, световой луч проходит по прямолинейной траектории в однородной прозрачной среде, например, воздухе. Она также гласит, что поведение луча предсказуемо при соударении с непрозрачной поверхностью или прохождении сквозь отличающиеся среды, как из воздуха в воду.

Это позволяет проиллюстрировать путь светового луча, движущегося из начальной точки до той, где он переходит в другую форму энергии, например, в тепло.

Световой луч, ударяющийся о поверхность, называется падающим лучом. Угол, под которым луч ударяется, называется углом падения (Рисунок 01).

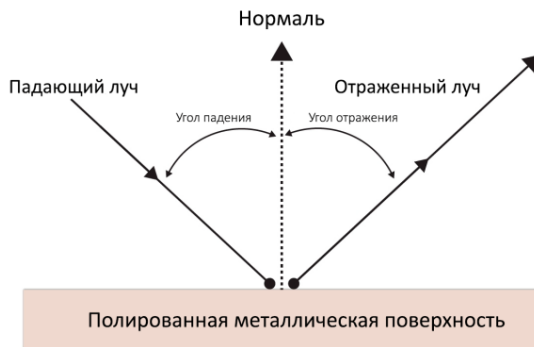


Рисунок 01: Угол падения, падающий и отраженный лучи

Световой луч падает на границу раздела двух сред. При соударении светового луча с поверхностью происходит одно или оба из следующих явлений:

1. Световой луч отражается поверхностью и движется в другом направлении. Это следствие Закона отражения, который утверждает, что угол отражения равен углу падения (отраженный свет).
2. Световой луч пройдет из одной среды в другую по прямолинейной траектории (преломленный свет).

В точке соударения световые лучи расходятся в двух направлениях: отражения и преломления. На поверхности световой луч либо отражается, либо преломляется, после чего поглощается одной из сред. Поглощение, однако, не происходит на поверхности материала.

Поглощение и рассеивание (Прозрачность и полупрозрачность)

Проходя через неоднородную среду или полупрозрачный материал, свет поглощается или рассеивается:

При поглощении интенсивность света уменьшается по мере перехода в другую форму энергии – чаще всего тепло. Цвет световых лучей изменяется, поскольку количество поглощенного света зависит от длины волны, но направление луча при этом не изменяется.

При рассеивании направление луча отклоняется на случайную величину, зависящую от материала. Рассеивание хаотично изменяет направление света, но не интенсивность. Ухо наглядно иллюстрирует этот феномен. Оно тонкое (малое поглощение) и из его задней части отчетливо виден исходящий рассеянный свет, как показано на Рисунке 02.

Если рассеивание отсутствует, а поглощение низкое, то световые лучи пройдут прямо сквозь поверхность, что характерно для стекла. Представьте, что плаваете в чистом бассейне, где, открыв глаза, вы будете видеть на довольно большом расстоянии сквозь прозрачную воду.

Однако если тот же бассейн станет относительно грязным, то частички грязи будут рассеивать свет, уменьшая чистоту воды вместе с расстоянием, на котором вы способны видеть в ней.

Чем дальше свет проходит в подобной среде, тем больше он поглощается и/или рассеивается. Следовательно, толщина объекта прямо влияет на количество поглощенного или рассеянного света. Карта толщины используется для описания толщины объекта шейдеру, как показано на Рисунке 03.



Рисунок 02: Рассеянный свет излучается из задней части уха

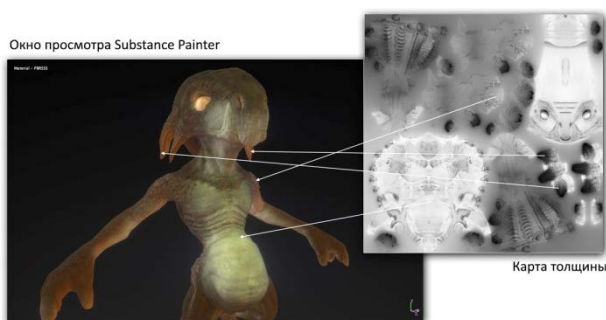


Рисунок 03: Картa толщины используется для подповерхностного рассеивания в Substance Painter

Диффузное и зеркальное отражения

Зеркальное отражение – это свет, зеркально отраженный поверхностью, как уже упомянули в разделе о световых лучах. Световой луч отражается от поверхности и движется в другом направлении. Это следствие закона отражения, утверждающего, что на идеально ровной поверхности угол отражения равен углу падения. Однако большинство поверхностей неоднородно, и направление отражения хаотично изменяется из-за шероховатости поверхности. Она влияет на изменение направления отраженного света, но не на его интенсивность.

На шероховатых поверхностях световые блики выглядят большими и тусклыми. На гладких поверхностях блики сохраняют четкие зеркальные отражения и выглядят ярче или интенсивней при взгляде с нужного угла. Однако в обоих случаях суммарное количество отраженного света остается одинаковым (Рисунок 04).

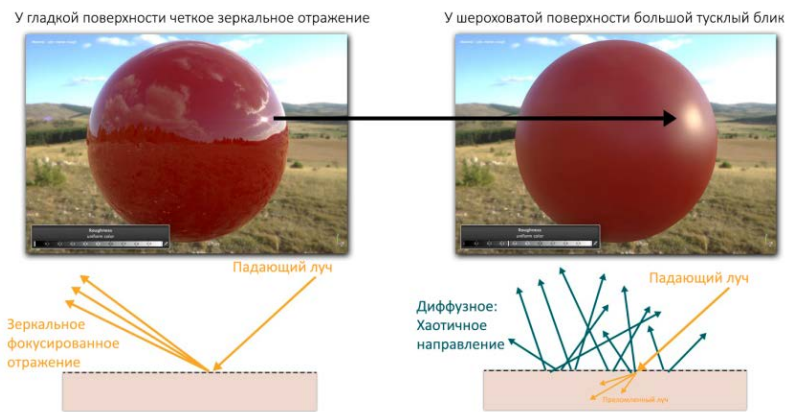


Рисунок 04: Направление отраженных лучей хаотично изменяется, отражаясь от шероховатой поверхности

Преломление – это изменение направления светового луча. Когда свет проходит из одной среды в другую, его скорость и направление изменяются. Коэффициент преломления (Index of refraction - IOR) – это оптическая мера, которая определяет изменение направления проходящего светового луча. Значением IOR определяется величина искажения луча, проходящего из одной среды в другую. Например, у воды IOR равен 1.33, а у стекла – 1.52. На Рисунке 05 представлено изображение соломинки, помещенной в стакан с водой. Соломинка выглядит изогнутой из-за преломления света, проходящего через различные среды (воздух, вода и стекло).

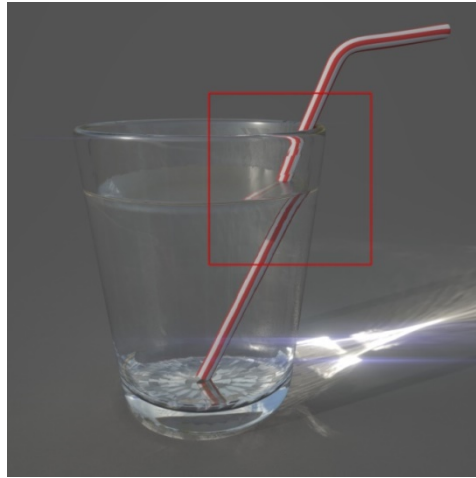


Рисунок 05: Соломинка выглядит изогнутой из-за преломления

Диффузное отражение – это преломленный свет. Световой луч проходит из одной среды в другую, как и в нашем примере, предположим, что свет проникает в объект. Затем свет неоднократно рассеивается внутри объекта. После чего снова преломляется, покидает объект и возвращается в изначальную среду близ области точки вхождения (Рисунок 06).

Диффузные материалы относятся к поглотителям. Если преломленный свет слишком долго передвигается в таком материале, то он в итоге полностью поглощается. Если свету удастся покинуть материал, значит, он прошел очень малый путь от точки вхождения.

Следовательно, расстояние между точками входа и выхода нивелируется. Модель Ламберта, которая используется для симуляции диффузного отражения в традиционной модели затенения, не учитывает шероховатость поверхности. Однако ее учитывают другие, например, модель Орен-Найара.

Материалы с высоким рассеиванием и низким поглощением также называют полупрозрачными. Примеры подобных материалов - дым, молоко, кожа, нефрит и мрамор. Отрисовка последних трех становится возможной при дополнительном моделировании подповерхностного рассеивания, где расстояние между точкой входа и выхода светового луча перестает нивелироваться. Для достоверной отрисовки среды с крайне изменчивыми и очень низкими поглощаемостью и рассеиванием (дым или туман) требуется использовать более комплексные методы, например, симуляцию Монте Карло.

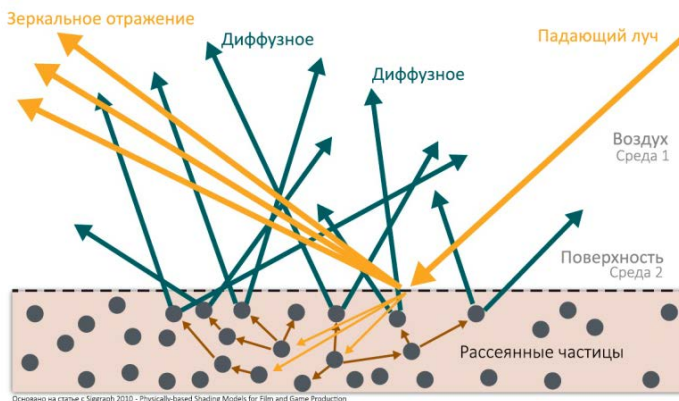


Рисунок 06: Световой луч проходит из одной среды в другую, рассеиваясь внутри объекта

Теория микроповерхностей

В теории на диффузное и зеркальное отражения влияет неоднородность поверхности в местах соударения световых лучей с поверхностью. Однако на практике воздействие шероховатости на диффузное отражение менее заметно из-за рассеивания, происходящего внутри материала. В результате направление луча, исходящего от поверхности, почти не зависит от ее шероховатости и угла падения. Самая распространенная модель диффузного отражения (модель Ламберта) полностью игнорирует шероховатость.

В нашем руководстве неоднородность поверхности обозначается как шероховатость (*roughness*). Помимо этого также встречаются другие названия: гладкость (*smoothness*), глянец (*glossiness*) или микро-поверхность, в зависимости от используемой PBR модели. Этими названиями описывается одно единственное свойство поверхности, которое является геометрической деталью саб-текстур.

Используемая PBR модель определяет, какая карта - шероховатости или глянцевоности - будет использоваться для описания неоднородности поверхности. Физически корректный BRDF основан на теории микроповерхностей, предполагающей, что поверхность состоит из хаотично ориентированных мелких плоскостей, называемых микроповерхностями. Каждая из этих маленьких плоскостей на основании собственной нормали отражает свет в единственном направлении (Рисунок 07).

Микроповерхности, чьи поверхностные нормали ориентированы посередине между направлением света и взгляда, будут отражать видимый свет. Однако в случаях, когда нормаль микроповерхности и полунормаль сонаправлены, некоторые микроповерхности перестанут отражать свет, поскольку заблокируются самозатенением (направлением света) или самоперекрытием (направлением взгляда), как показано на Рисунке 08.

Неоднородность поверхности на микроскопическом уровне - причина рассеивания света. Например, зеркальные отражения размываются из-за рассеивания световых лучей, поскольку они отражаются не параллельно (Рисунок 08).

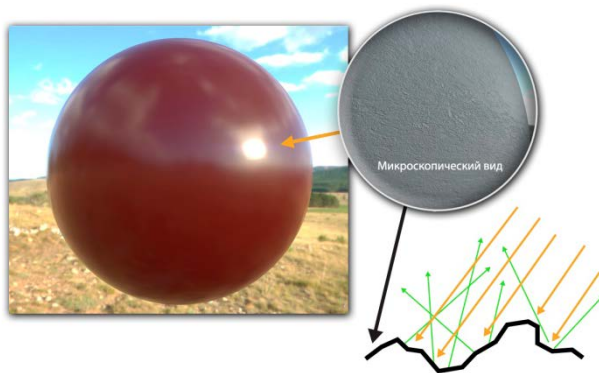


Рисунок 07: Физически корректный BRDF основан на теории микроповерхностей

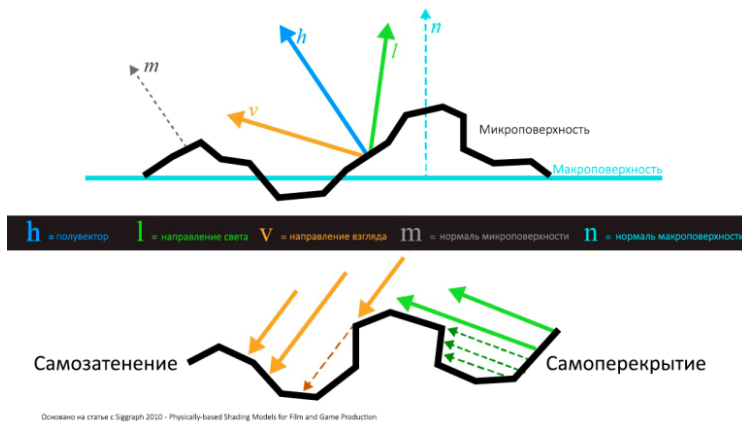


Рисунок 08: Отражения размываются из-за рассеивания световых лучей

Цвет

Длины волн, испускаемые источником света, определяют видимый цвет поверхности. Объект поглощает определенные длины волн и отражает их как зеркально, так и диффузно, тогда оставшиеся отраженные волны становятся видимым цветом.

Например, яблочная кожура преимущественно отражает красный цвет. Только красные длины волн рассеиваются обратно от кожуры, пока другие поглощаются. (Рисунок 09).

У яблока также присутствуют яркие зеркальные блики того же цвета, что и источник света, поскольку у материалов, не проводящих электричество (диэлектриков), например, яблочной кожуры, зеркальное отражение почти не зависит от длины волны. У подобных материалов зеркальное отражение никогда не окрашивается. Позднее мы рассмотрим эти виды материалов (металлы и диэлектрики).

PBR шейдеры Substance используют распределение микроповерхностей GGX.



Рисунок 09: Красные длины волн отражаются для глаза

BRDF

Двулучевая функция отражательной способности (BRDF) описывает отражательные свойства поверхности. В компьютерной графике существует несколько BRDF моделей, не все из которых физически корректны. Физически корректная BRDF должна соблюдать принципы сохранения энергии и взаимности. Последнее относится к принципу взаимности Гельмгольца, который заключается в том, что входящие и исходящие световые лучи считаются инверсией друг к другу без влияния на результат BRDF.

Модель BRDF, используемая шейдерами Substance, создавалась на принципах модели отражений Disney. Последняя основывается на распространении микроповерхностей GGX, которое предоставляет одно из наилучших решений для зеркальных отражений, где малый пик блика и плавный шлейф позволяют отражениям выглядеть более реалистично (Рисунок 10).

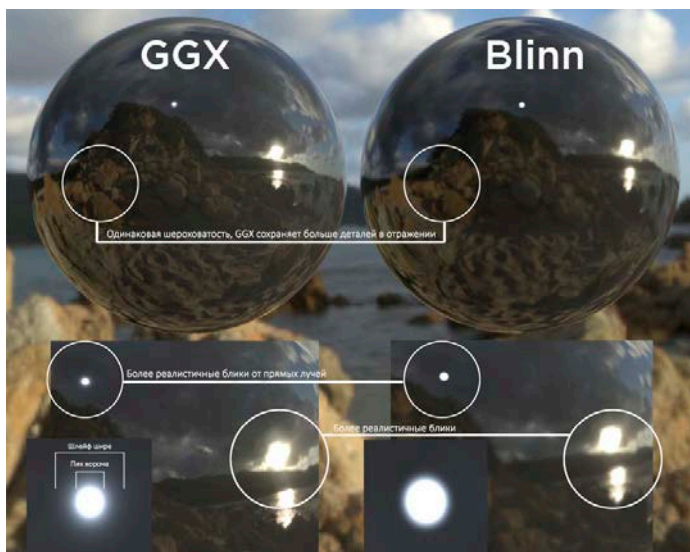


Рисунок 10: Зеркальное распределение GGX vs Blinn – GGX предоставляет одно из наилучших решений для зеркальных отражений

Сохранение энергии

Сохранение энергии играет чрезвычайно важную роль в моделях физически корректного рендеринга. Принцип сохранения энергии гласит, что суммарное количество повторно излученного поверхностью света (отраженного или рассеянного обратно) всегда меньше, чем изначально попавшего на нее. Другими словами, отраженный свет никогда не будет интенсивней, чем был до соприкосновения с поверхностью. Художникам не стоит волноваться о соблюдении сохранения энергии, поскольку это часть модели PBR и одно из его преимуществ: сохранение энергии контролируется самим шейдером, что позволяет художнику сконцентрироваться на творчестве, а не на физике.

Эффект Френеля

Коэффициент отражения Френеля тоже играет важную роль в физически корректном шейдинге, являясь коэффициентом BRDF. Эффект Френеля, открытый французским физиком Жаном Огюстеном Френелем, гласит, что количество отраженного поверхностью света зависит от угла обзора, под которым он воспринимается. Представьте бассейн с водой. Посмотрев вниз – перпендикулярно поверхности воды – вы без проблем разглядите дно. Здесь угол между направлением взгляда и нормалью поверхности воды будет нулевым. Если же посмотреть на бассейн под углом скольжения, ближе к параллели поверхности воды, то будет видно, что зеркальные отражения на воде стали интенсивней. При этом вы больше не увидите, что лежит под ее поверхностью.

В PBR коэффициент Френеля не контролируется художником, как в традиционном шейдинге. Этот физический параметр также регулируется PBR шейдером. При взгляде на поверхность под углом скольжения, гладкие поверхности становятся почти на 100% отражающими при угле падения 90 градусов.

Отражения на шероховатых поверхностях под углом скольжения станут практически зеркальными, но не приблизятся к 100% отражаемости. Самый важный фактор здесь – угол между нормалью каждой микроповерхности и светом, а не угол между нормалью “макроповерхности” и светом. Поскольку световые лучи расходятся в нескольких направлениях, то отражение становится мягче и тусклее. Происходящее на макроскопическом уровне похоже на результат среднего значения суммы коэффициентов Френеля каждой из наблюдаемых микроповерхностей.

F0 (Коэффициент отражения Френеля при 0 градусах)

Когда свет ударяется о поверхность перпендикулярно или под прямым углом (при 0 градусов), то часть этого света отражается зеркально. Через коэффициент преломления (Index of Refraction - IOR) для поверхности рассчитывается количество отраженного света. Это называют F0 (нулевой Френель) (Рисунок 11). Количество преломляемого на поверхности света называют 1-F0.

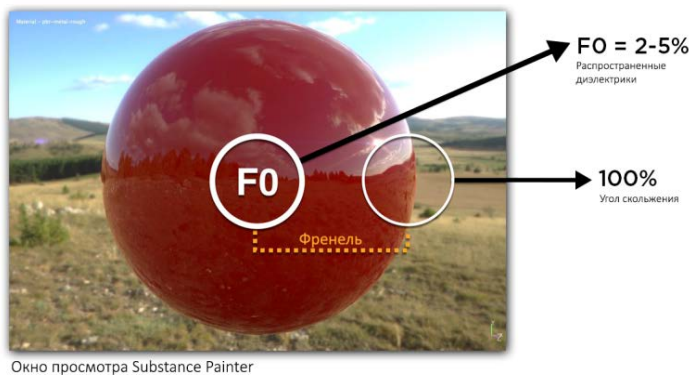


Рисунок 11: На гладкой диэлектрической поверхности в точке F0 отражается около 2-5% света и 100% под углом скольжения

Диапазоном F0 для большинства распространенных диэлектриков является 0.02-0.05 (линейные значения). Для проводников (металлов) диапазоном F0 будет 0.5-1.0. Следовательно, отражаемость поверхности определяется коэффициентом преломления, как показано в уравнении ниже (Лагард 2011).

$$F(0^\circ) = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} = 0.02$$

Это коэффициент отражения F_0 , о котором стоит помнить, создавая текстуры. Неметаллы (диэлектрики/изоляторы) обозначаются значениями серого цвета, а металлы (проводники) - RGB. Руководствуясь PBR моделью и художественным пониманием отражаемости, можно сказать, что коэффициент F_0 у большинства гладких диэлектрических поверхностей отражает 2 – 5% света, а при угле скольжения примерно 100%, как показано на Рисунке 11.

Значения отражаемости у диэлектриков (неметаллов) в действительности не изменяются слишком сильно. Регулируя параметр шероховатости, трудно заметить изменения в значениях. Однако в них все-таки присутствуют различия. На Рисунке 12 изображена таблица, на которой показаны диапазоны F_0 для металлов и неметаллов.

Обратите внимание, что диапазоны для неметаллов не отличаются друг от друга слишком сильно. Самоцветы - исключение, поскольку их отражаемость более высокая. Коэффициент отражения F_0 проводников и диэлектриков рассматривается во второй части.

Проводники и диэлектрики (Металлы и неметаллы)

При создании PBR материалов полезно мысленно делить их на металлы или неметаллы. Спросите себя, принадлежит ли поверхность к металлам. Если да, то стоит придерживаться одного набора правил, а если нет, то другого.

Возможно, это упрощенный подход, поскольку некоторые материалы четко не разделяются по категориям металл или неметалл, как, например, металлоиды (сочетание металла и неметалла). Однако при создании материалов полезно разделять их для себя на металлы и неметаллы, поскольку металлоиды скорее исключение. Чтобы определить рекомендации для материалов, нужно сначала понять, что мы пытаемся создать. В PBR для получения подобных рекомендаций художники обращаются к свойствам металлов (проводников) и неметаллов (диэлектриков), как показано на Рисунке 12.



Значения из DONTNOD таблицы: физические свойства референса для Unreal Engine 4. Значения доступны в паках PBR Base Material и Metal Reflectance

Рисунок 12: Диапазоны FO для металлов и неметаллов

У металлов преломляемый свет поглощается, а цветовой оттенок они получают от отраженного цвета, поэтому для них на текстурах не задается диффузный цвет.

Металлы

Металлы – хорошие проводники тепла и электричества. Электрическое поле в проводящих металлах равно нулю. Когда проходящая световая волна, состоящая из электрических и магнитных полей, ударяется о поверхность, она частично отражается, а преломленный свет поглощается. Значение отражаемости для полированных металлов лежит внутри примерного диапазона 70-100% отражаемости (Рисунок 13).

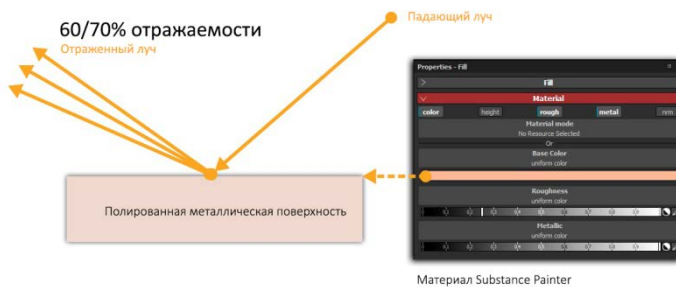


Рисунок 13: Значение отражаемости для металлов лежит в примерном диапазоне 70-100% отражаемости

Некоторые металлы поглощают свет с разными длинами волн. К примеру, золото поглощает синий свет в высоких частотах видимого спектра, поэтому оно выглядит желтым. Но так как преломленный свет поглощается, цветовой оттенок у металлов появляется от отраженного света. Следовательно, на текстурах диффузный цвет металлам не задается. Например, в подходе specular/gloss голый металл обозначается черным цветом на карте диффузности, а значение отражаемости передается через цветовой оттенок на карте зеркальности. Поскольку отражения у металлов имеют цветовой оттенок, то для текстуры используется RGB формат. Ввиду того, что мы работаем с физически корректной моделью, важно использовать результаты реальных измерений для отражаемости металла в текстурах.

Другой важный аспект текстурирования металлов – их склонность к коррозии. Это значит, что погодные эффекты могут крайне сильно повлиять на отражательную способность металлов. Если металл ржавеет, то его отражательная способность изменяется. Области ржавчины считаются диэлектриком и обозначаются чёрным цветом на карте металла, как показано на Рисунке 14. Как написано во второй части, шейдер модели metallic/roughness использует стандартное значение F0 для диэлектриков равное 4% отражаемости. На Рисунке 14 ржавчина показывается на карте базового цвета как диффузный отраженный цвет со значением F0 - 4%.

Если слой краски покрывает голый металл, то окрашенная часть считается скорее диэлектриком, нежели металлом. Это не относится к местам обвалившейся краски, где из-под нее пробивается голый металл. Диэлектриком также считается слой грязи или иного материала, покрывающего голый металл.

Как уже упомянули в начале раздела, при создании PBR материалов полезно задавать себе вопрос, принадлежит ли материал к металлам. Для большей точности, в вопрос стоит добавить состояние металла: окрашенный или покрытый ржавчиной или другим материалом, как грязь или пыль. Если это не голый металл, то материал считается диэлектриком. В зависимости от погодных эффектов происходит смешивание между металлом и неметаллом, поскольку подобные эффекты сильно влияют на отражательную способность металла.

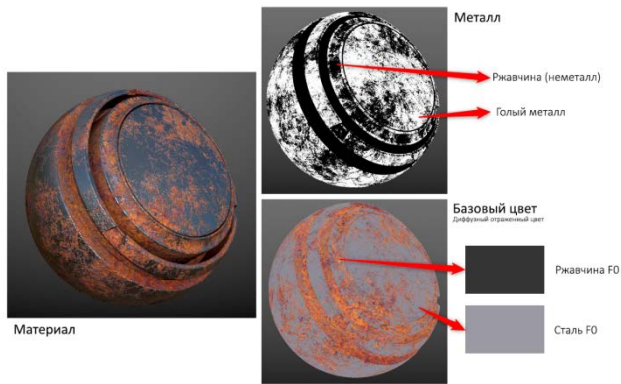


Рисунок 14: Области ржавчины считаются диэлектриком со значением отражаемости F_0 – 4%.

Неметаллы

Неметаллы (изоляторы/диэлектрики) относятся к слабым проводникам электричества. Преломленный свет рассеивается и/или поглощается (чаще повторно излучается поверхностью), поэтому неметаллы отражают гораздо меньшее количество света, чем металлы, а также имеют цвет альбеда.

Выше мы упомянули, что значения отражаемости для большинства диэлектриков лежат внутри примерного диапазона 2-5%, основанного на F_0 , который рассчитывается через коэффициент преломления. Эти значения лежат внутри линейного диапазона 0.017 – 0.067 (40-75 RGB), как показано на Рисунке 15. У большинства диэлектриков значение коэффициента F_0 не превышает 4%, за исключением самоцветов.

Нам важно придерживаться результатов реальных измерений, как и с металлами, независимо от того, насколько трудно найти значения коэффициента преломления (IOR) для других непрозрачных материалов. Однако значения коэффициента среди большинства диэлектриков сильно не различаются, поэтому мы будем использовать некоторый набор рекомендаций для отражаемости неметаллов, который рассмотрим позже.

Значения отражаемости для большинства диэлектриков лежат внутри примерного диапазона 2-5%, основанного на F_0 , который рассчитывается через IOR. На Рисунке 15 изображен этот диапазон.

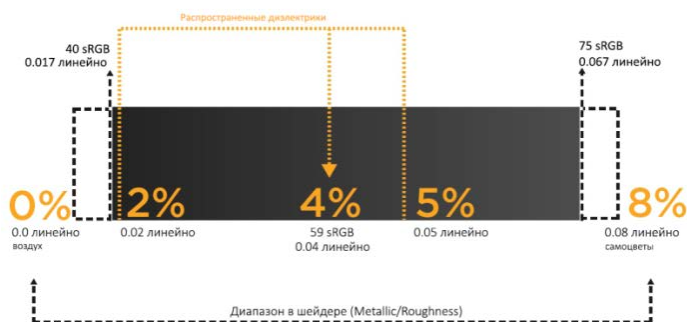


Рисунок 15: Преобразование из sRGB в линейное пространство рассчитывается с приближением гаммы 2.2. За подробностями обратитесь к главе о рендеринге в линейном пространстве

Рендеринг в линейном пространстве

Рендеринг в линейном пространстве - крайне сложная тема. В этом руководстве мы придерживаемся приближения, гласящего, что рендеринг в линейном пространстве предоставляет корректную математическую модель для расчета освещения. Линейное пространство создает условия, позволяющие имитировать поведение реального освещения. В линейном пространстве гамма равна 1.0, и сами расчёты выполняются линейно. Но чтобы глаз правильно воспринимал выводимое изображение, значение линейной гаммы требуется корректировать.

Наши глаза воспринимают изменения световых значений нелинейно, так как они работают при гамме, превышающей 1.0. Человеческий глаз более чувствителен к темным тонам, нежели светлым. При выводе изображения компьютер учитывает этот фактор, чтобы мы воспринимали результат корректно. Следовательно, на мониторе цвет отображается в нелинейной гамме, или гамма-кодированным (sRGB).

Расчет цветовых значений и операции с цветом выполняются в линейном пространстве. Процесс преобразуют гамма-кодированные значения в линейные из цветных текстур и цветов, выбранных на мониторе. Система управления цветом использует маркировку для преобразования текстурных карт из линейного пространства в sRGB. Затем сами преобразования выполняются в линейном пространстве (гамма 1.0), а финальный результат выводится на окно просмотра в гамма-кодированном пространстве (sRGB).

Проще будет запомнить, что если текстура передает видимый цвет (диффузный отраженный цвет), например, оттенок металла или зеленый цвет травы, то она представляется в sRGB.

Если текстура передает информацию, как шероховатость поверхности или принадлежность материала к металлу, то она представляется в линейном пространстве.

В Substance Painter и Substance Designer преобразование из линейного пространства в sRGB для входных текстур выполняется шейдером автоматически, так же как и гамма-коррекция при выводе результата в окно просмотра. Как художникам нам не стоит волноваться о линейных вычислениях и преобразованиях внутри программ Substance, поскольку значения рассчитываются по умолчанию.

При использовании интегрированных плагинов Substance выводимые текстуры автоматически помечаются системой управления цветом основного приложения, как линейные или sRGB. Однако важно понимать сам процесс: когда текстуры из Substance выводятся через экспорт изображений, а не материалами, то может понадобиться самостоятельно отметить конкретную текстуру как sRGB или линейную, в зависимости от используемого рендера.

Формула расчета корректного (стандартного) преобразования из sRGB в линейное пространство, используемая в Substance Painter и Substance Designer, выглядит так:

$$\begin{array}{ll} \textit{if} & C_{srgb} \leq 0.04045 \\ \textit{then} & C_{lin} = \frac{C_{srgb}}{12.92} \\ \textit{otherwise} & C_{lin} = \left(\frac{C_{srgb} + 0.055}{1.055} \right)^{2.4} \end{array}$$

**На момент написания статьи нода для преобразования линейного пространства в RGB и наоборот не использует эту формулу по причинам оптимизации. В будущих релизах это возможно изменится.

Для простоты все преобразования в данном руководстве используют следующую упрощенную (но приближенную) функцию:

$$C_{lin} = (C_{srgb})^{2.2}$$

Ключевые характеристики PBR

Мы рассмотрели базовую теорию физических явлений, из которых теперь выведем некоторые ключевые характеристики PBR:

1. Сохранение энергии. Отраженный луч никогда не будет интенсивней, чем был до соприкосновения с поверхностью. Этот закон регулируется шейдером.

2. Френель. Значение BRDF рассчитывается шейдером. Значения отражаемости F_0 у большинства диэлектриков сильно не различаются и лежат внутри диапазона 2-5%. Примерный диапазон для F_0 металлов гораздо выше – 70-100%.
3. Интенсивность зеркального отражения контролируется через BRDF, картой шероховатости или глянцеваемости и через значение коэффициента F_0 .
4. Расчет освещения выполняется в линейном пространстве. Текстуры с гамма-кодированными значениями, такие как карты базового и диффузного цвета, конвертируются шейдером в линейное пространство, но стоит убедиться в правильности конвертирования, задав корректные параметры импорта изображения внутри игрового движка или рендера. Текстуры, описывающие характеристику поверхности, такие как карты шероховатости, глянцеваемости, металла и высоты, представляются в линейном пространстве.