



Оптические покрытия

Френелевское отражение на границе сред с различными показателями преломления и интерференция в тонких плёнках позволяют выборочно и контролируемо изменять отражающие и пропускающие свойства оптических компонентов. Отражение от поверхности оптической детали в выбранном спектральном диапазоне может быть усилено или подавлено за счет нанесения специальных оптических покрытий. Нанесенные плёнки дополнительно могут модифицировать физические свойства поверхности оптической детали, например, повышать её стойкость к воздействию влаги и/или пыли.

Тидекс предлагает большой выбор оптических покрытий для производимых нами компонентов из всех обрабатываемых материалов. Спектральный диапазон покрытий очень широк: от ближнего ультрафиолета до дальнего инфракрасного и миллиметрового диапазонов. Для нанесения оптических покрытий применяются электронно-лучевое и резистивное испарения с ионной очисткой поверхности деталей и ионным ассистированием на установках Balzers BAK-760 (Лихтенштейн), ВУ-1АИ и ВУ-2МИ (Беларусь).

При изготовлении покрытий мы не ограничиваем себя стандартным набором конструкций, а стараемся максимально удовлетворить ТЗ заказчика. Приводимые ниже примеры демонстрируют, но не исчерпывают наши возможности. Обращайтесь, и мы приложим все усилия для максимально полного решения именно Вашей задачи.

I. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ

Металлические зеркала применяют, когда необходимо высокое отражение в широком спектральном диапазоне. Коэффициент отражения металлических зеркал, в отличие от диэлектрических, мало меняется с изменением поляризации или угла падения света. Основными недостатками металлических зеркал, в сравнении с диэлектрическими, являются несколько меньший коэффициент отражения на заданных длинах волн и существенно меньшая лучевая стойкость.

1. Алюминиевые зеркала

Алюминиевые зеркала остаются наиболее часто используемыми металлическими зеркалами благодаря тому, что обладают неплохим отражением от УФ до дальнего ИК и ТГц диапазона, низкой стоимостью и высокой стойкостью ко внешним воздействиям. При контакте с воздухом алюминий формирует слой оксида Al_2O_3 толщиной несколько нанометров. Слой оптически прозрачен, очень плотен и химически стабилен. Этот слой обеспечивает высочайшую химическую стойкость плёнки алюминия, но не может защитить её от механических воздействий. Если таких воздействий на зеркало не ожидается, можно использовать слой алюминия без защиты. Такие зеркала востребованы, например, внутри научных приборов, когда защитный слой может быть источником нежелательных интерференций или поглощения.

Но в большинстве случаев требуется дополнительная защита отражающего слоя.

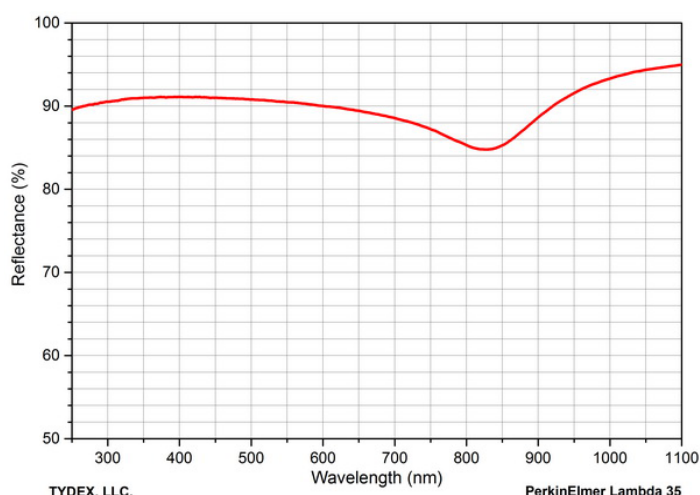


Рис. 1. Спектр отражения плёнки алюминия без защиты.

1.1. Алюминий с защитой

1.1.1. Чаще всего используют алюминиевые зеркала с защитным слоем SiO_2 или SiO . Такой слой механически достаточно прочен для большинства применений, но несколько снижает отражение в УФ. Также он обладает некоторым поглощением на 3 мкм (вода) и на 9-11 мкм ($Si-O$ связь).

Длина волны, мкм	Среднее отражение, %	Порог повреждения, J/cm^2 , 50 ns pulse
0.25-20.0	>90	0.25-0.3

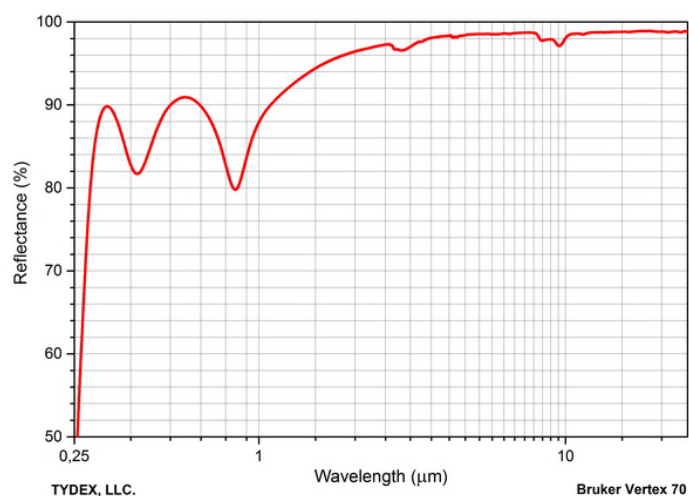


Рис. 1.1. Спектр отражения плёнки алюминия с защитой (SiO_2).

1.1.2. Поскольку SiO_2 , а в ещё большей степени SiO , обладают высоким поглощением на длинах волн короче 250 нм, такие зеркала плохо отражают глубокий УФ. Для зеркал, работающих в диапазоне 200-250 нм, предпочтительнее в качестве защиты использовать слой MgF_2 . Он позволяет уменьшить потери на поглощение в защите, но его механическая прочность ниже. Другим важным фактором потерь в ГУФ является рассеяние; для его уменьшения алюминий следует напылять специальным образом.





Оптические покрытия

1.2. Усиленный алюминий

Вместо однослойной защиты можно поверх алюминиевой плёнки напылить многослойную структуру, которая несколько повысит отражение в видимом или ближнем ИК диапазоне. При этом вне диапазона «усиления» отражение будет ниже, чем у обычного алюминия. Лучевая стойкость также останется на уровне «обычного» алюминия.

Длина волны, мкм	Среднее отражение, %	Порог повреждения, J/cm ² , 50 ns pulse
0.4-0.7	>93	0.25-0.3

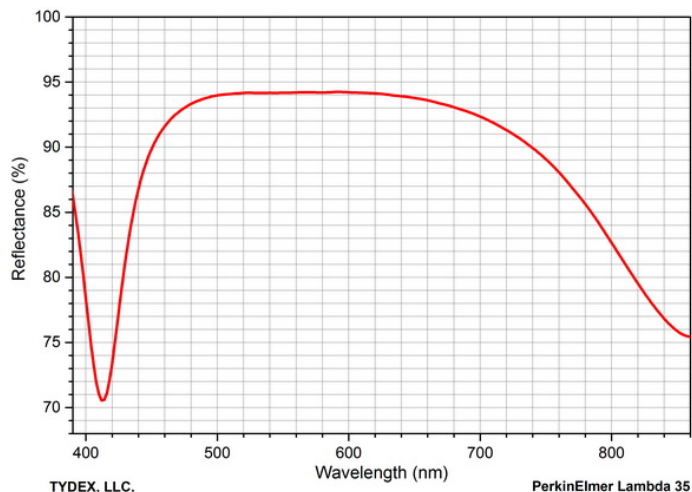


Рис. 1.2.A. Спектр отражения «усиленного алюминия».

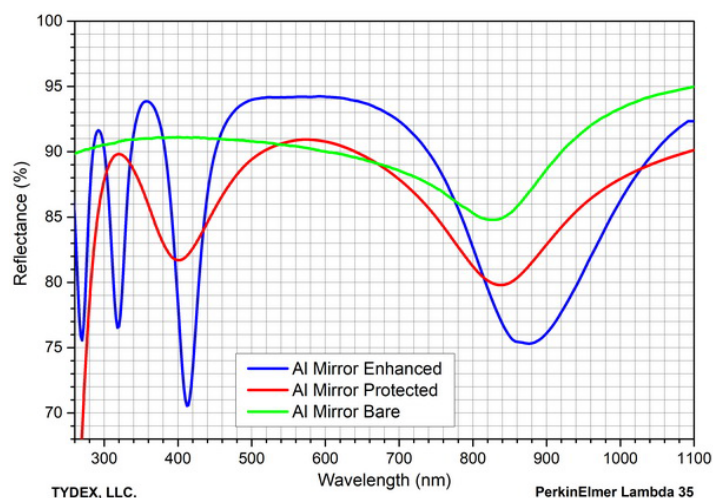
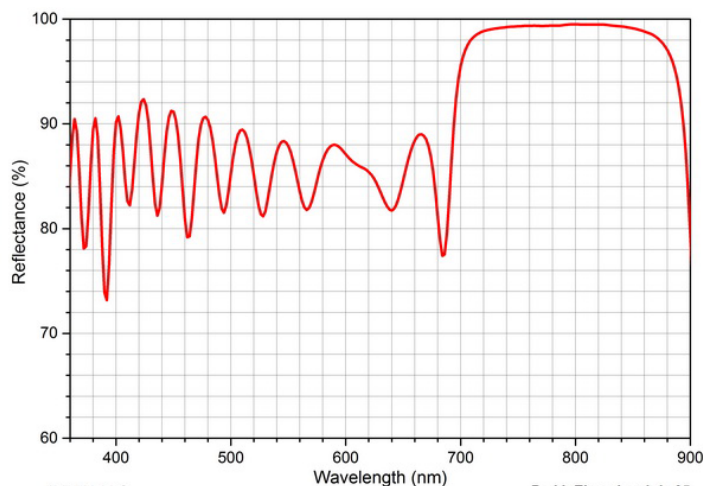


Рис. 1.2.B. Сравнительный спектр отражения плёнок усиленного алюминия, стандартного алюминия и алюминия без защиты.

1.3. Металл-диэлектрические зеркала

Увеличивая количество диэлектрических слоёв поверх плёнки алюминия, можно достичь отражения выше 99% в требуемом спектральном регионе. По сути дела, поверх алюминиевой плёнки создаётся полноценное диэлектрическое зеркало. Достоинством такой конструкции по сравнению с классическим диэлектрическим зеркалом является высокое отражение во всём спектральном диапазоне и меньшая чувствительность конструкции к изменению угла падения и поляризации света. Но лучевая стойкость данных конструкций остаётся низкой, не позволяя применять их в силовой оптике.



TYDEX, LLC. ПеркинЭлмер Ламбда 35
Рис. 1.3. Спектр отражения металл-диэлектрического зеркала.

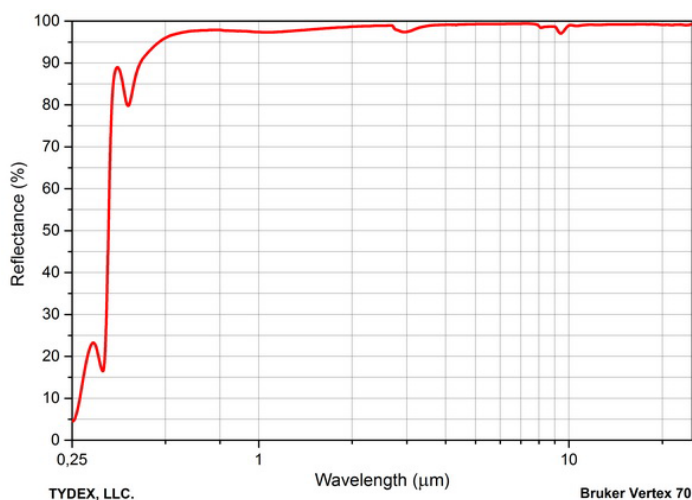
2. Серебряные зеркала

Серебряные зеркала отличаются от алюминиевых более высоким отражением в видимом и ИК-диапазонах, но заметно хуже отражают УФ. В отличие от Al₂O₃, оксид серебра не образует прочную и устойчивую плёнку на поверхности серебра, и не может обеспечить ни механическую, ни химическую защиту металла. Поэтому применение серебряных зеркал без защитного слоя практически невозможно даже тогда, когда зеркало защищено от механических воздействий.

Длина волны, мкм	Среднее отражение, %	Порог повреждения, J/cm ² , 50 ns pulse
0.4-0.7	>95	0.25-0.3
3-15	>98	

2.1. Серебро с защитой

Защита слоя серебра диэлектрической плёнкой делает структуру механически и химически стойкой.



TYDEX, LLC. Bruker Vertex 70
Рис. 2.1. Спектр отражения плёнки серебра с защитой.



Оптические покрытия

2.2. «Запаянное» серебро

Малейшие поры в защитной плёнке позволяют серебру химически взаимодействовать с воздухом, кислотными газами и водой. При тяжелых нагрузках со стороны окружающей среды, таких, как высокая температура и влажность, высокая промышленная загрязненность воздуха, срок жизни серебряных зеркал может существенно сокращаться. Нанесение дополнительного защитного слоя в специальном дополнительном процессе позволяет «запечатать» поры в защитной плёнке и на краях детали и заметно продлить срок службы изделия. Это может быть особенно важно для оборудования, находящегося в труднодоступных местах. Оптически данное покрытие практически неотличимо от «обычного» серебра с защитой.

3. Золотые зеркала

Золотые зеркала чаще всего применяют в ИК-диапазоне. Для света с длинами волн короче 600 нм отражение от золота весьма низкое. Золото химически нейтрально, поэтому даже без защитного слоя оно практически не взаимодействует с атмосферными газами и водой. Это позволяет использовать золото без защиты в научных инструментах, когда интерференция или линии поглощения в защитных слоях могут быть нежелательны. Но следует помнить, что слой золота крайне мягкий и легко может быть поврежден механически. Для большинства применений золото следует покрывать оксидной защитной структурой.

Длина волны, мкм	Среднее отражение, %	Порог повреждения, Дж/см ² , 50 ns pulse
0.6-20	>98	0.25-0.3

3.1. Золото без защиты

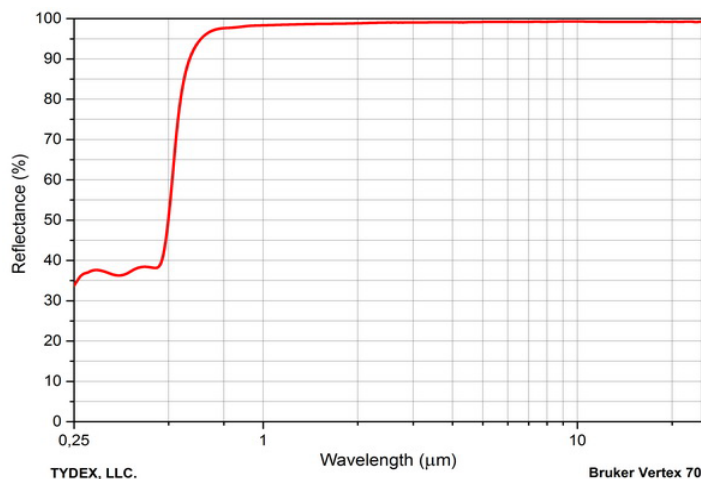


Рис. 3.1. Спектр отражения золота без защиты.

3.2. Золото с защитой

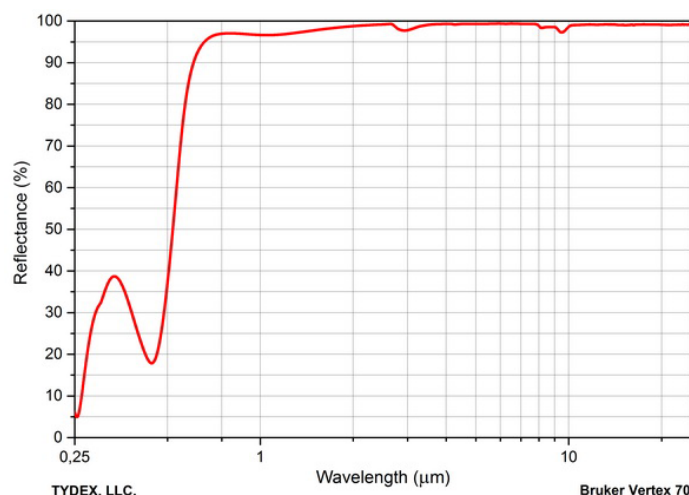


Рис. 3.2. Спектр отражения золота с защитой.

3.3. Золотые зеркала для CO₂-лазеров

Обычный защитный слой на золотом зеркале имеет некоторое поглощение на 10.6 мкм, что снижает лучевую стойкость изделия. Специальная конструкция защиты позволяет снизить поглощение и тем самым несколько повысить порог повреждения и коэффициент отражения. Но следует иметь в виду, что при работе с CO₂-лазером в (квази)непрерывном режиме лучевая стойкость будет определяться в первую очередь теплопроводностью подложки и прочими факторами.

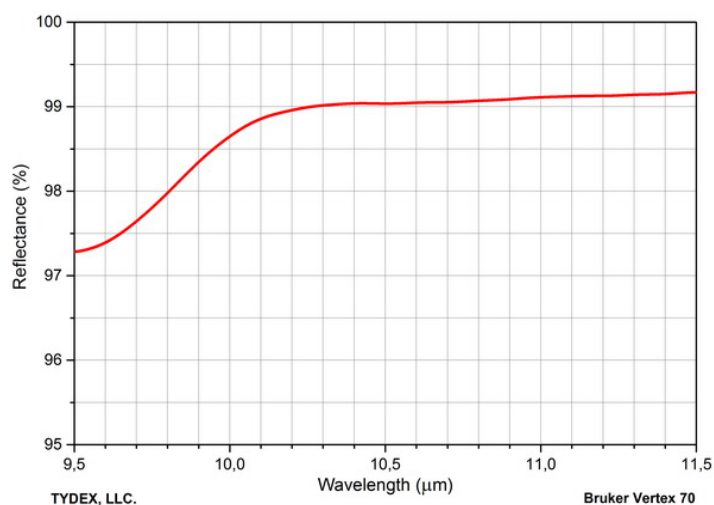


Рис. 3.3. Спектр отражения золотых зеркал для CO₂-лазеров.

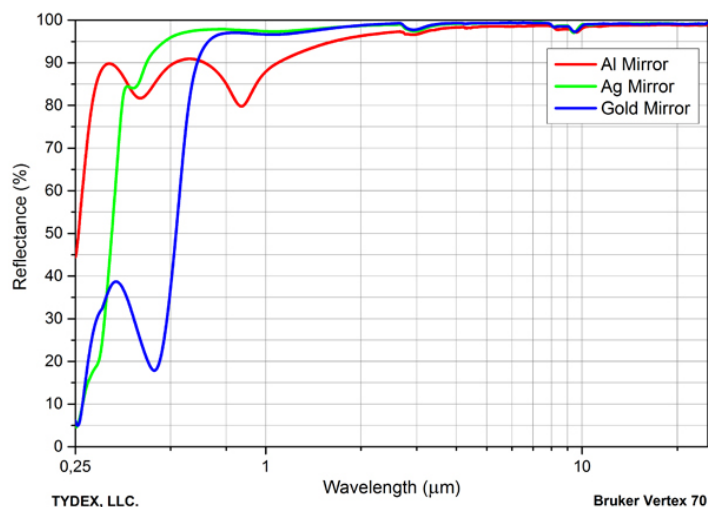
3.4. ТГц зеркала

Проникающая способность электромагнитного излучения в проводник пропорциональна длине волны. Поэтому для обеспечения высокого отражения в ТГц-диапазоне требуется более толстая металлическая плёнка, чем для работы в видимом и ближнем-среднем ИК-диапазоне. Исследования подтверждают, что некоторые «стандартные» металлические зеркала демонстрируют падение отражения в терагерцовом диапазоне. Для обеспечения высокого отражения мы наносим достаточно толстый слой металла. Подробнее о продукте смотрите в статье ТГц зеркала.



Оптические покрытия

Следующий график помогает сравнить оптические свойства металлических зеркал, речь о которых шла выше.



II. ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИК СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА

Материалами для оптических покрытий в данном диапазоне выступают, как правило, оксиды и фторид магния. Они формируют плотные прочные плёнки, устойчивые к механическим и климатическим воздействиям, обладающие крайне низким поглощением и невысоким рассеянием. Поэтому покрытия для данного спектрального диапазона, как правило, проявляют высокую эксплуатационную и лучевую стойкость. Использование ионного ассистирования даёт дополнительный выигрыш в стойкости получаемых конструкций.

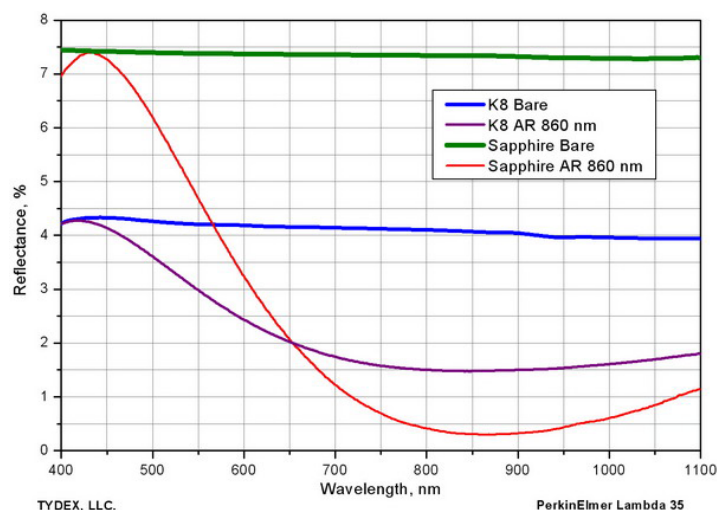
При изготовлении покрытий мы не ограничиваем себя стандартным набором конструкций, а стараемся максимально удовлетворить ТЗ заказчика. Приводимые ниже примеры наших работ демонстрируют, но не исчерпывают наши возможности. Обращаться, и мы приложим все усилия для максимально полного решения именно Вашей задачи.

1. Просветляющие покрытия

1.1. Четвертьволновое просветляющее покрытие – плёнка MgF_2

Возможно, самое простое интерференционное просветляющее покрытие состоит из одного слоя фторида магния (MgF_2). Так как плёнка MgF_2 имеет очень низкий показатель преломления (приблизительно 1.38 на длине волны 550 нм), нанесение четвертьволновой плёнки на любое оптическое стекло позволяет заметно уменьшить остаточное отражение. Так, для К8 (показатель преломления 1.52) – с 4.1% до 1.2%. На высокопреломляющих стёклах и сапфире эффект от применения данной плёнки ещё выше, отражение на центральной длине волны опускается ниже 0.5% при 7-9% отражении от изделия без покрытия. Левее и правее центральной длины волны отражение плавно растёт, оставаясь во всём спектре ниже, чем отражение от детали без покрытия. Так, центрованная на 550 нм плёнка обеспечивает приемлемое просветление во всём видимом диапазоне. Для стекла К8 интегральные потери на отражение на 400-800 нм уменьшаются примерно вдвое на каждой поверхности, для высокопреломляющих стёкол – в 10 раз.

Важным достоинством данного покрытия является его высочайшая в своём классе механическая и химическая стойкость.

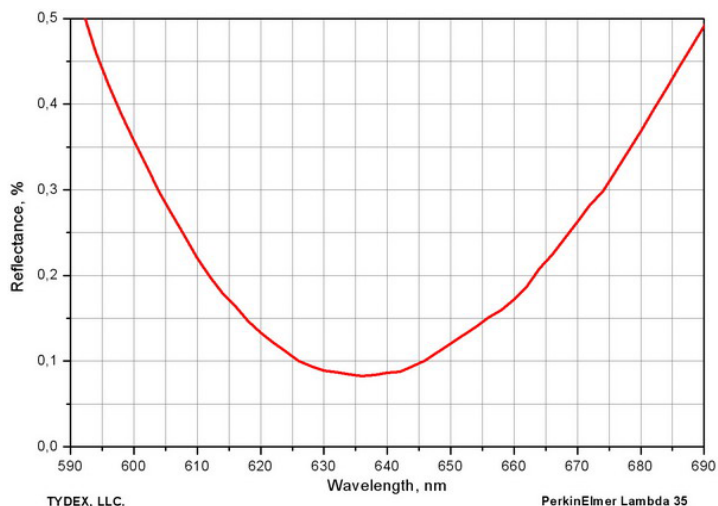


1.2. V-образное просветляющее покрытие на одну длину волны

Обозначение «V-образное» происходит от V-образной формы кривой остаточного отражения (в противоположность плёнке MgF_2 , когда кривая отражения похожа на очень пологую «U»). V-образные просветляющие покрытия состоят, как правило, из двух неравнотолщинных слоёв оксидов с высоким и низким показателем преломления. Варьируя толщины и показатели преломления слоёв, можно достичь чрезвычайно низких потерь на заданной длине волны. Обычно такие покрытия конструируют для линий генерации лазера. Конструкция оптимизируется под рабочий угол падения света.

Стандартное значение остаточного отражения от каждой поверхности для V-образного покрытия менее 0.25%. Достижение величины $\leq 0.15\%$ также возможно по специальному запросу.

В отличие от однослойного просветления MgF_2 , данная структура может быть оптимизирована для получения указанного отражения на стёклах практически всех марок и большинстве кристаллов.





Оптические покрытия

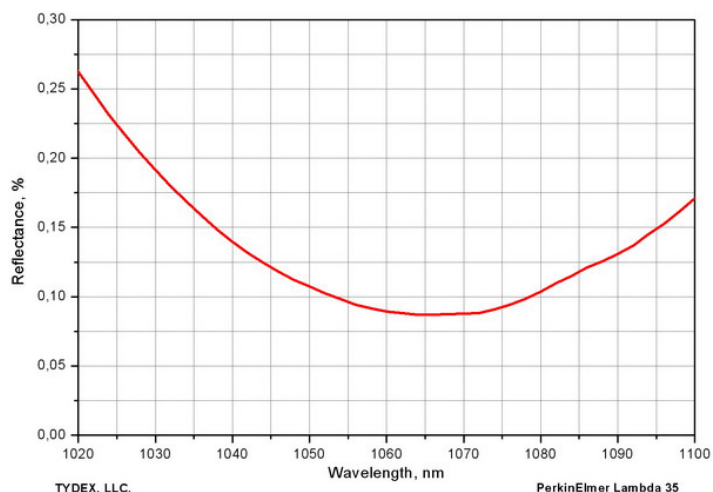


Рис. 1.2.B. Остаточное отражение от изделия из K8 с V-образным просветлением на 1064 нм при нормальном падении.

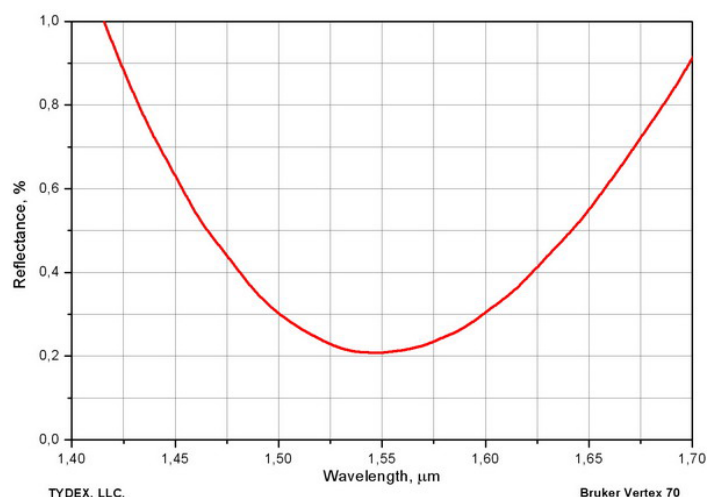


Рис. 1.2.C. Остаточное отражение от изделия из K8 с V-образным просветлением на 1550 нм при нормальном падении.

Следует, однако, помнить, что вне узкого рабочего диапазона отражение от данной структуры окажется выше, чем от стекла без покрытия.

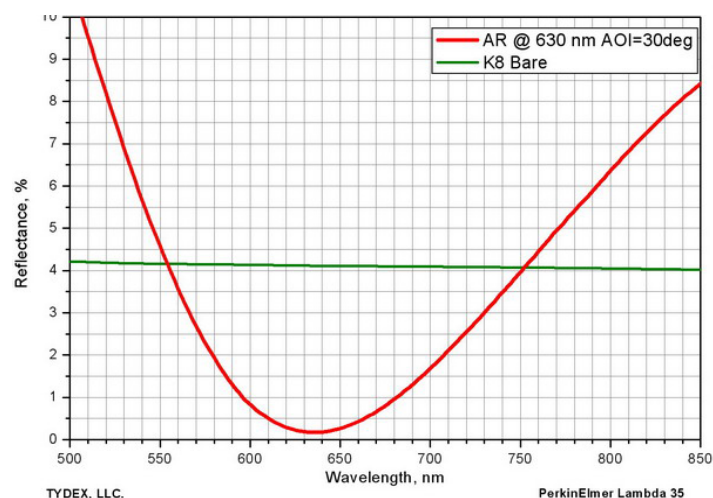


Рис. 1.2.D. Отражение от детали с V-образным просветлением в сравнении с отражением от непросветленного K8. Угол падения 30 градусов, поляризация (s+p)/2.

1.3. Двухполосные W-образные просветляющие покрытия

Двухполосные просветляющие многослойные покрытия требуются, когда оптические компоненты должны обеспечивать очень высокое пропускание на двух различных длинах волн. Например, когда необходимо с высокой эффективностью обеспечить прохождение через оптический элемент фундаментальной длины волны генерации лазера и второй гармоники. Наличие двух «провалов» в спектре остаточного отражения такого покрытия делает его похожим на букву W, что и даёт название данному семейству покрытий. Конструктивно такие покрытия состоят, как правило, из 4 слоёв, сформированных тремя материалами с различными показателями преломления.

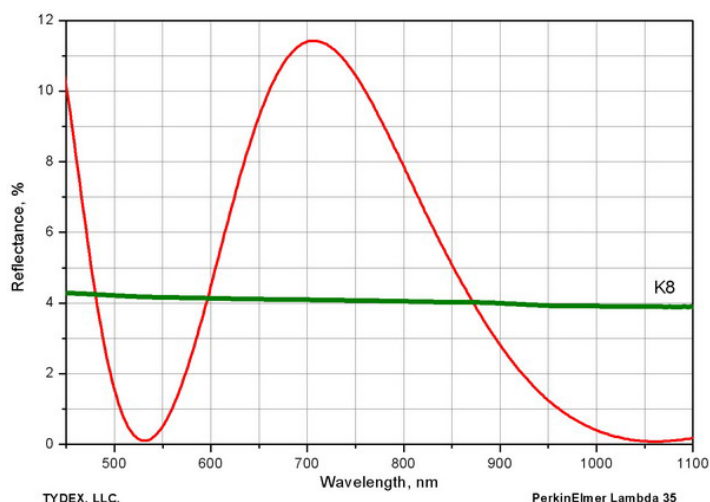


Рис. 1.3.A. Остаточное отражение от поверхности K8 с W-type просветлением для 1064 и 532 нм, угол падения ноль градусов.

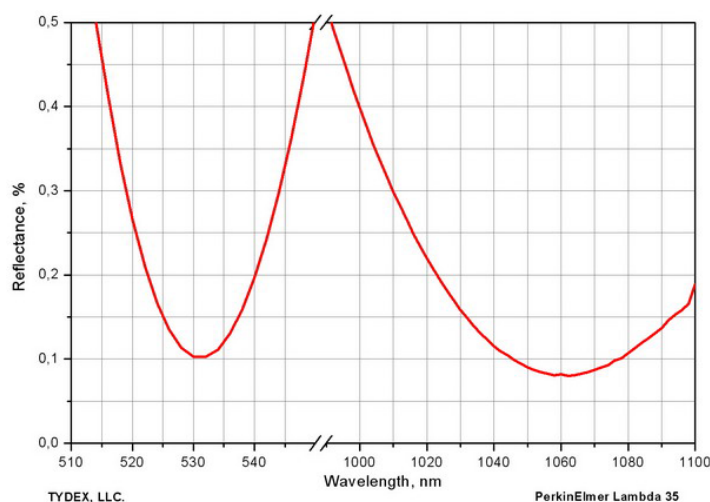


Рис. 1.3.B. Просветление W-type для 532 и 1064 нм, угол падения ноль градусов.

1.4. Широкополосное просветляющее покрытие

Для обеспечения низкого отражения в широком спектральном диапазоне используются структуры из трёх-шести слоёв, состоящие, как правило, из трех и более материалов с разными показателями преломления.

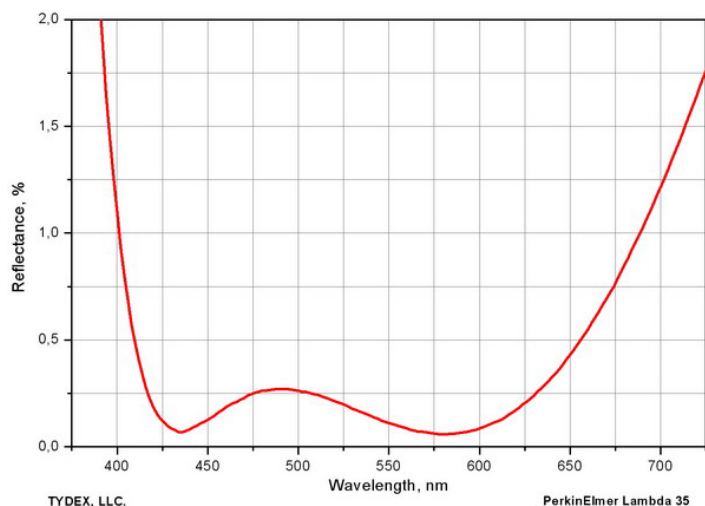


Рис. 1.4.А. Остаточное отражение от изделия из ТФ-9 с широкополосным просветляющим покрытием на 400-700 нм, нормальное падение.

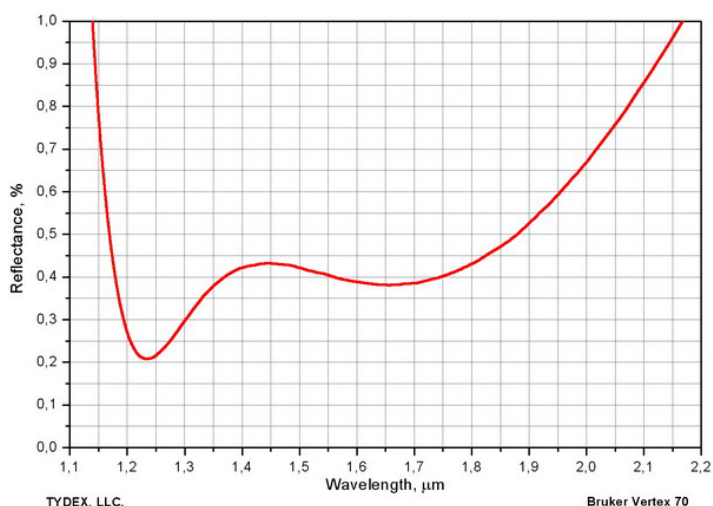


Рис. 1.4.В. Остаточное отражение от изделия из К8 с широкополосным просветляющим покрытием на 1.2-2 мкм, угол падения 45 градусов, (s+p)/2.

2. Высокоотражающие покрытия

2.1. Диэлектрические зеркала

Высокоотражающие (зеркальные) покрытия состоят из достаточного количества пар равнотолщинных слоев диэлектрических материалов. Толщина слоёв и количество пар определяется исходя из условия получения требуемого отражения на центральной рабочей длине волны и при рабочем угле падения. Ширина зоны отражения определяется отношением показателей преломления используемых диэлектриков и составляет, как правило, около 10-12% от рабочей длины волны. Чаще всего такие зеркала создаются для работы с лазерами, когда требуется высокое отражение на одной длине волны и высокая лучевая стойкость. Отражение от таких конструкций в рабочем диапазоне превышает 99% (типичное для металлов значение не превышает 95%), а лучевая стойкость составляет несколько Джоулей на см² (против 0.3 Дж/см² у металлов). Эти покрытия, как правило, конструируются для угла падения 0 или 45 градусов, но могут быть оптимизированы под почти любой другой угол. Например, для наших внеосевых параболических зеркал диэлектрические конструкции оптимизируются под рабочий угол падения, равный половине внеосевого угла параболы.

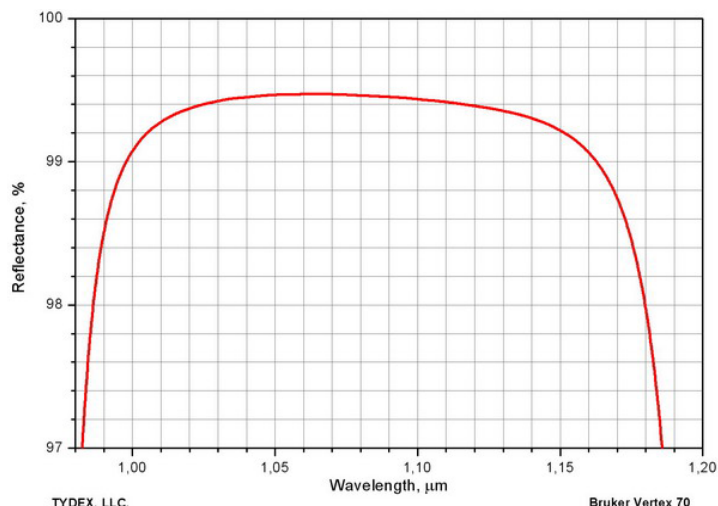


Рис. 2.1.А. Высокоотражающее диэлектрическое зеркало на 1064 нм, угол падения ноль градусов.

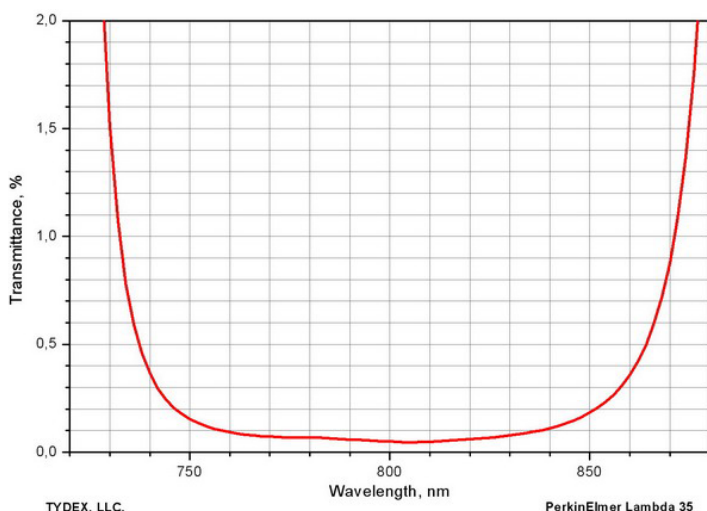


Рис. 2.1.В. Диэлектрическое зеркало на 750-850 нм, угол падения 22.5 градуса. Показано остаточное пропускание. Поляризация (s+p)/2.

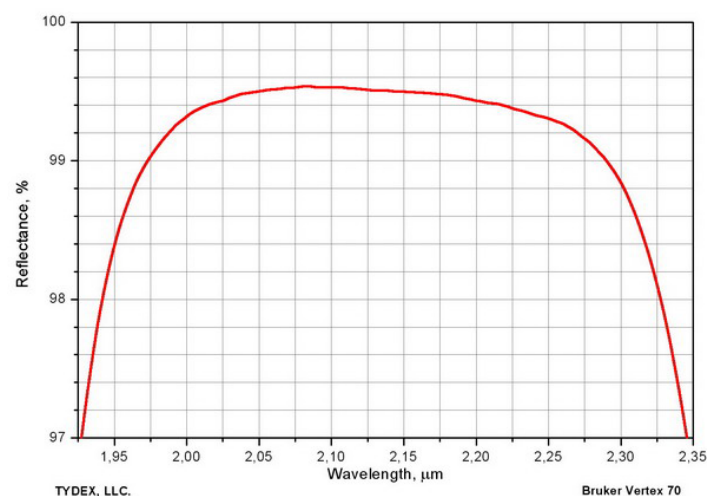


Рис. 2.1.С. Диэлектрическое зеркало на 2.1 мкм, угол падения 45 градусов, (s+p)/2.





Оптические покрытия

2.2. Высокоотражающее покрытие на две длины волны

Конструкция, полученная в результате последовательного нанесения на одну подложку двух диэлектрических зеркал, будет обладать высоким отражением на двух длинах волн, хотя её лучевая стойкость заметно снизится. Такие зеркала удобно использовать, когда в системе используются два лазера или лазер и его гармоника. Типичная задача: канализация рабочего силового луча 1064 нм и пилотного визуализирующего 633 нм.

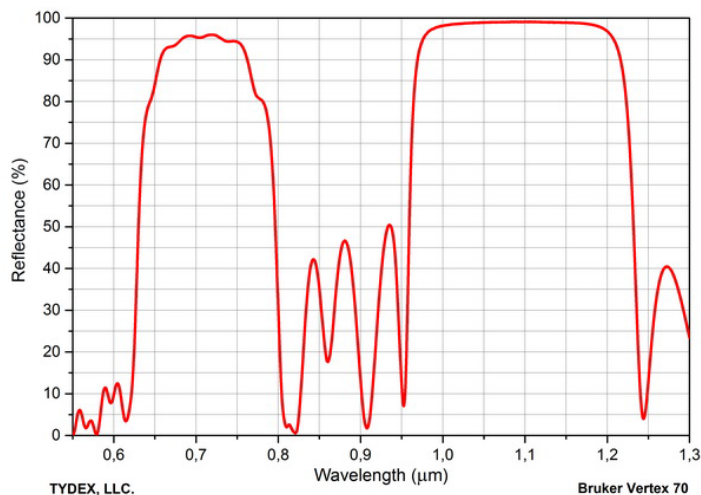


Рис. 2.2. Зеркало на две длины волны для высокоотражающего покрытия.

2.3. Широкополосные высокоотражающие покрытия

Напыляя на одну подложку два диэлектрических зеркала, центрованных на две близкие длины волны, можно получить изделие с широким ровным спектром отражения. Такие покрытия востребованы для работы с перестраиваемыми лазерами (например, Ti:Sa), особенно при больших углах падения, а также для изделий, обеспечивающих высокое отражение в широком диапазоне рабочих углов.

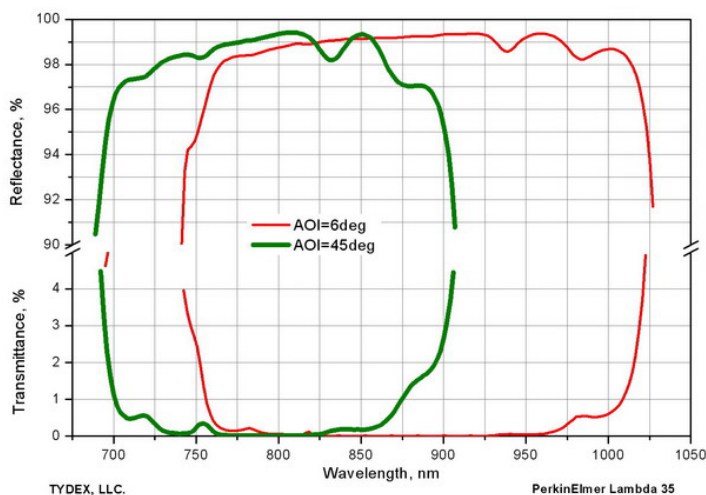


Рис. 2.3. Высокоотражающее «двойное» зеркало на 700-900 нм, угол падения 45°, (s+p)/2. Показан спектр этого же зеркала при нормальном падении.

Широкополосные высокоотражающие покрытия могут также быть металлическими, металл-диэлектрическими.

3. Делительные покрытия

3.1. «Холодные/горячие» зеркала и отрезающие фильтры

Классическое диэлектрическое зеркало помимо основной зоны отражения обладает побочными максимумами, находящимися по спектру как левее, так и правее рабочей длины волны.

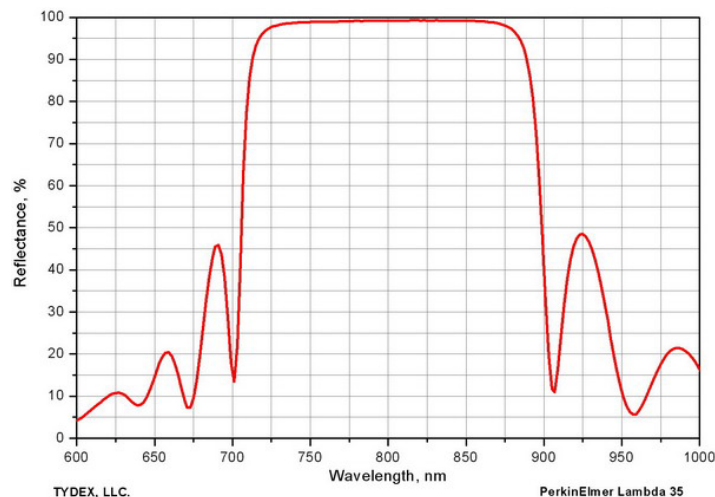


Рис. 3.1.А. Диэлектрическое зеркало и побочные максимумы отражения.

Варьируя некоторые слои «классического» пакета, мы можем, практически не меняя отражение в рабочей спектральной области, перераспределить эти побочные максимумы, подавив их либо в коротковолновой, либо в длинноволновой области. Таким способом можно обеспечить достаточно высокое пропускание в зоне слева или справа от основной зеркальной области. В зависимости от того, в коротковолновой или длинноволновой зоне мы подавили побочные пики, такие конструкции называют холодными или горячими зеркалами. Чаще всего «горячие» зеркала отражают инфракрасное излучение, пропуская видимое. Такие зеркала применяются в проекционных системах для уменьшения тепловой нагрузки.

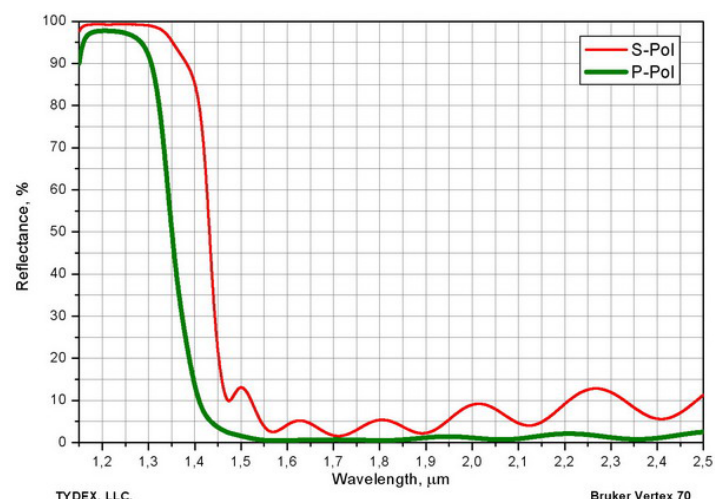


Рис. 3.1.В. «Холодное» зеркало. Отражение на 1.15-1.35 мкм, S-pol, пропускание на 1.5-2.5 мкм, P-pol. Подложка кварц КИ, угол падения 45 градусов.

Такая же конструкция позволяет создать отрезающий фильтр и защитить фотоприёмник от нежелательного излучения.





Оптические покрытия

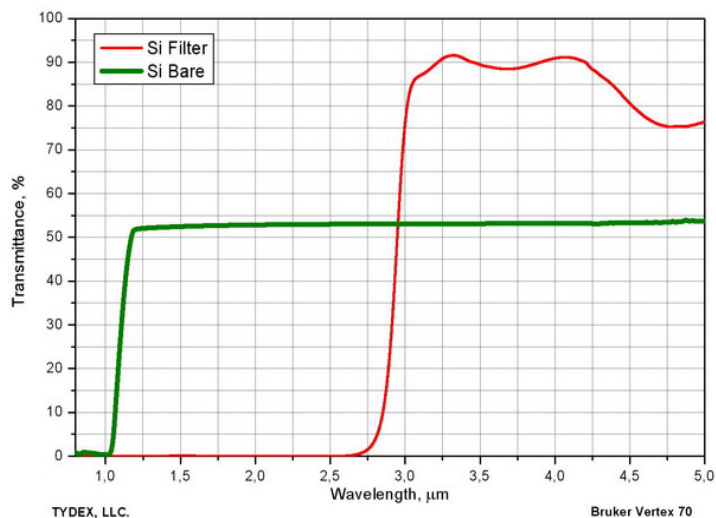
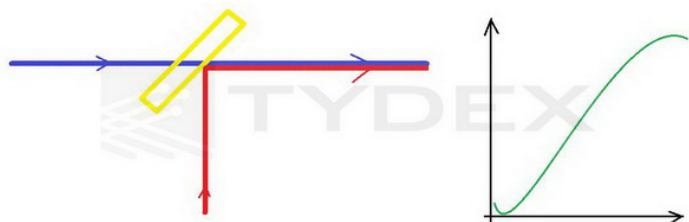


Рис. 3.1.С. Отрезающий фильтр. Пропускание более 85% для 3.25-3.75 мкм (вторая сторона просветлена). Пропускание менее 0.1% для волн короче 2.5 мкм. Подложка – германий. Для сравнения приведен спектр германия без покрытия.

3.2. Конструкции для сведения/разделения лучей

Конструкции для сведения/разделения лучей близки к «холодным/горячим» зеркалам и позволяют сводить лучи работающих на разных длинах волн лазеров.



3.3. Поляризационные делители

При угле падения, отличном от нулевого, отражение для S-поляризации становится значительно выше, чем для Р-поляризации. Также, зона высокого отражения для Р-поляризации сужается значительно быстрее, чем для S. Этот эффект позволяет создавать конструкции, всё ещё хорошо отражающие S-поляризацию, но уже хорошо пропускающие Р.

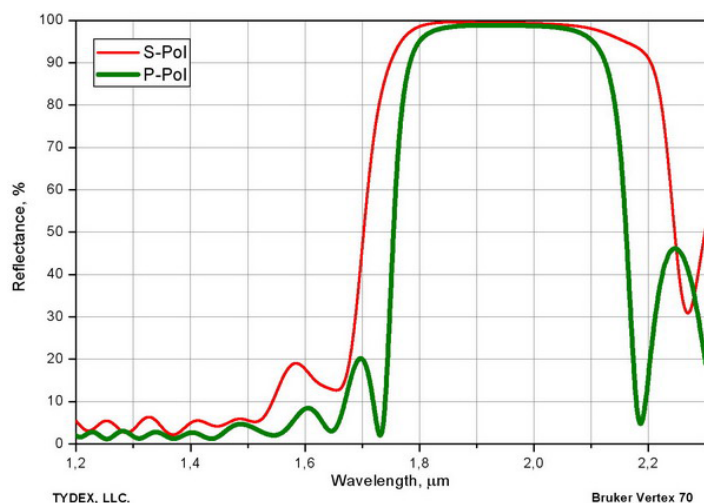


Рис. 3.3. Поляризационный делитель. Высокое отражение на 2.05 мкм, s-pol, высокое пропускание на 2.2 мкм, р-pol. Угол падения 50 градусов.

3.4. Выходные лазерные зеркала

Чтобы получить «глухое» диэлектрическое зеркало, необходимо напылить достаточное количество пар плёнок с высоким и низким показателями преломления. При меньшем числе пар отражение будет ниже, зато часть света будет проходить через зеркало. Такие конструкции практически не поглощают свет, а потери на рассеяние в них минимальны. Подбирая количество пар, а также толщину и материал последнего слоя, можно добиться практически любого соотношения пропускания и отражения. Такие конструкции идеально подходят для работы в качестве выходных зеркал в лазерных резонаторах, выводя из резонатора максимально возможную мощность и поддерживая в нём стоячую волну.

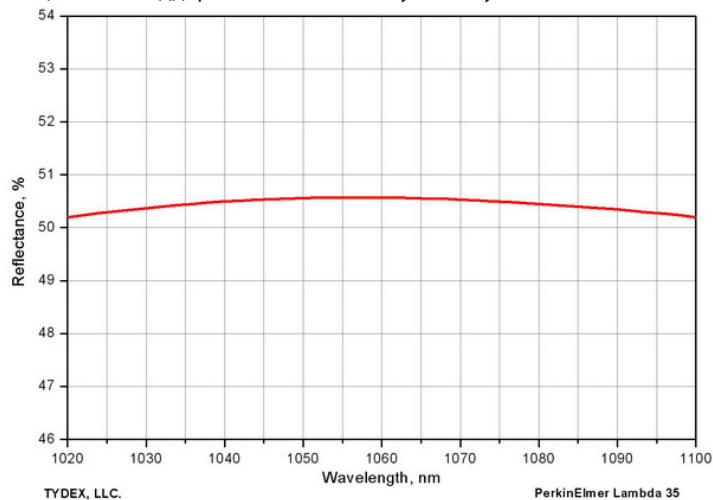


Рис. 3.4. Светоделительное покрытие $R=(50 \pm 1)\%$ на 1064 нм, угол падения 0° .

3.5. Широкополосные частично-отражающие (светоделительные) покрытия

Аналогично изготавливаются частично-отражающие покрытия для широкополосных применений. Типичным приложением можно назвать делитель луча, направляющий часть света от объекта в окуляр, а остальную энергию на фотоприемник. Другой пример – делитель энергии в интерферометре белого света.

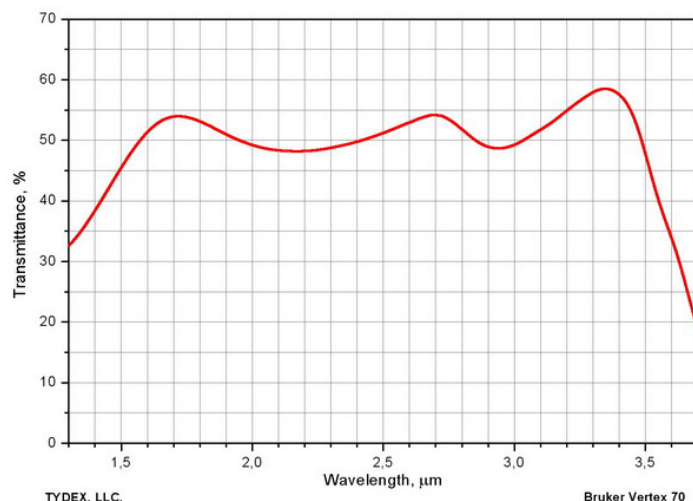


Рис. 3.5. Светоделительное покрытие на 1.5-3.5 мкм, $(s+p)/2$, 45° . Подложка – кварц КИ.

3.6. ТГц делители

Диэлектрические зеркала могут быть использованы для решения задачи разделения сгенерированного ТГц-излучения и остаточного



Оптические покрытия

излучения титан-сапфирового лазера накачки. Для этого зеркало должно состоять из прозрачных в ТГц-диапазоне материалов, нанесённых на прозрачную в терагерцах подложку (как правило, это кремний или кристаллический кварц). Подробнее читайте в разделе ТГц-спектроделители.

III. ИК-ПОКРЫТИЯ

Четвертьволновые плёнки для ИК-покрытий в 10-20 раз толще, чем для видимых. Поэтому напряжение и поглощение в плёнках, которые могли бы быть пренебрежимыми в видимом диапазоне, оказываются в ИК ограничивающим фактором в конструировании структур. В ИК большинство оксидов демонстрирует высокое поглощение, а MgF_2 формирует слишком напряжённые плёнки. Кроме того, ИК-подложки обладают высокими показателями преломления, и для создания эффективных интерференционных структур требуются пленкообразующие материалы с высокими показателями. Поэтому «видимые» материалы не могут использоваться как основные для формирования оптических ИК-покрытий.

Основными пленкообразующими материалами для ИК-диапазона оказываются фториды, халькогениды и полупроводники. Эти материалы, как правило, имеют значительно худшие, чем оксиды и MgF_2 , параметры механической и климатической стойкости, а также плохо переносят ионное ассистирование. Для повышения эксплуатационных характеристик покрытий во многих случаях приходится вводить дополнительные функциональные слои и прослойки и искать компромисс между прочностью, эффективностью и лучевой стойкостью.

1. Простые ИК-покрытия

1.1. Однослойные четвертьволновые просветляющие покрытия

Основным достоинством четвертьволновых плёнок является то, что даже вне зоны просветления они не ухудшают пропускание детали. Максимальное просветление достигается при правильном согласовании показателей преломления просветляемого материала и наносимой плёнки. Классическая плёнка фторида магния, даже если бы её удалось нанести с требуемой для ИК толщиной, не обеспечила бы эффективного просветляющего эффекта на ИК-подложках по причине её слишком низкого показателя преломления. Однако некоторые аналоги однослойки можно изготавливать и для ИК-диапазона. Например, однослойная плёнка сульфида цинка на германии является достаточно эффективным просветляющим покрытием, а по стойкости уступает только алмазоподобному покрытию.

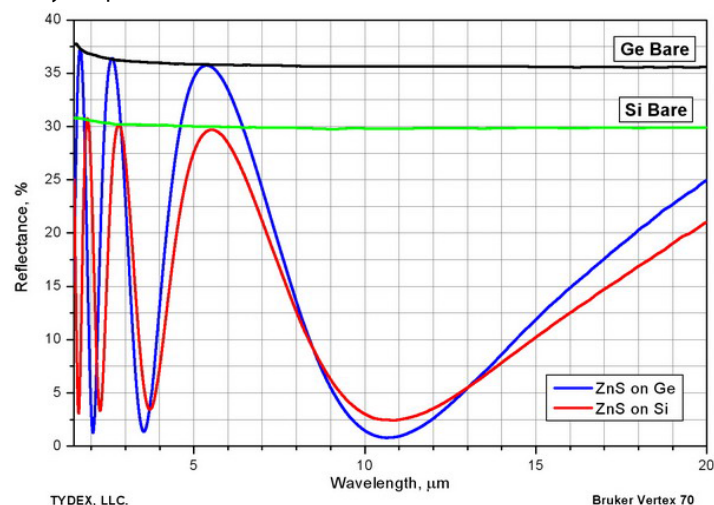


Рис. 1.1.A. Отражение от поверхностей кремния и германия, просветлённых плёнкой ZnS, в сравнении с отражением от поверхностей без покрытия.

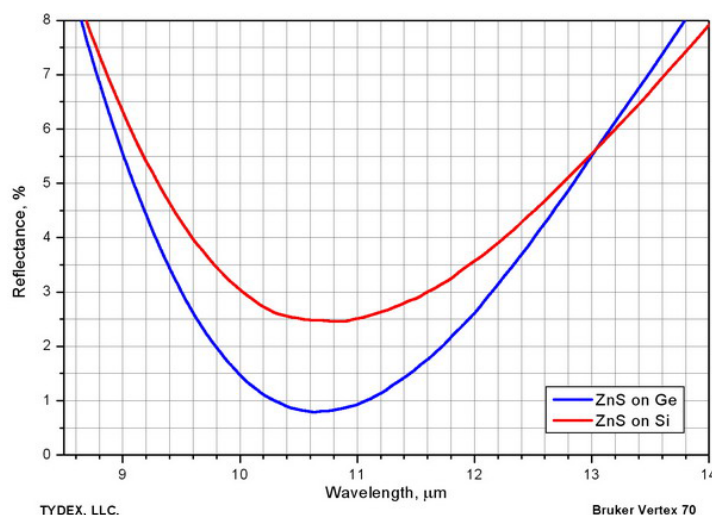


Рис. 1.1.B. Плёнка ZnS на кремнии и германии. Зона максимального просветления.

Видно, что для германия согласование показателей преломления близко к идеальному, а для кремния показатель плёнки несколько высок. Для кремния спектрально эффективным однослойным просветлением является фторид свинца.

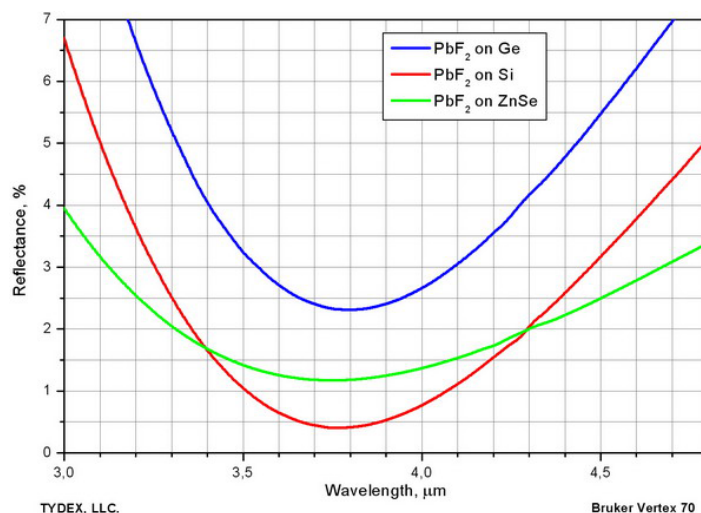


Рис. 1.1.C. Отражение от поверхностей деталей из селенида цинка, кремния и германия, просветлённых плёнкой фторида свинца.

Показатели преломления кремния и плёнки согласованы почти идеально, отражение в минимуме не превышает 0.5%. Приемлемое просветление плёнка обеспечивает и на селениде цинка. А для германия её показатель преломления недостаточно высок.

1.2. Влагозащитное покрытие на солях

Вариантом однослойного ИК-покрытия можно считать защитное покрытие на бромиде калия и других солевых кристаллах (NaCl , KCl , проч.). Низкий показатель преломления солей и их широкий диапазон прозрачности приводят к тому, что улучшить их оптические свойства нанесением плёнок практически невозможно. Для защиты деталей из солевых кристаллов на их поверхность наносят неорганическую пленку, достаточно тонкую для того, чтобы все интерференционные эффекты остались в коротковолновой нерабочей области.

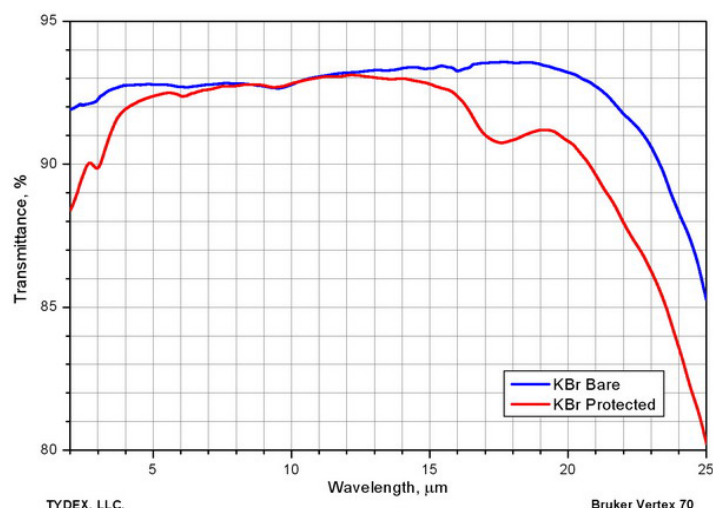


Рис. 1.2. Пропускание окна из KBr с защитным покрытием и без. Пропускание минимально ухудшилось, не появилось «органических» полос поглощения.

1.3. V-образное просветляющее покрытие на одну длину волны

Подобно аналогичным структурам для видимого диапазона, V-образные просветляющие покрытия основаны на конструкции из двух плёнок с высоким и низким показателями преломления. Как и для видимых структур, варьируя толщины и показатели преломления слоёв можно оптимизировать конструкцию под заданную подложку, длину волны и угол падения света. Как и в «видимом» случае, отражение от данной структуры вне узкого рабочего диапазона окажется выше, чем от поверхности без покрытия. Как правило, такие конструкции применяют для просветления на лазерных длинах волн, либо на рабочих длинах волн газоанализаторов.

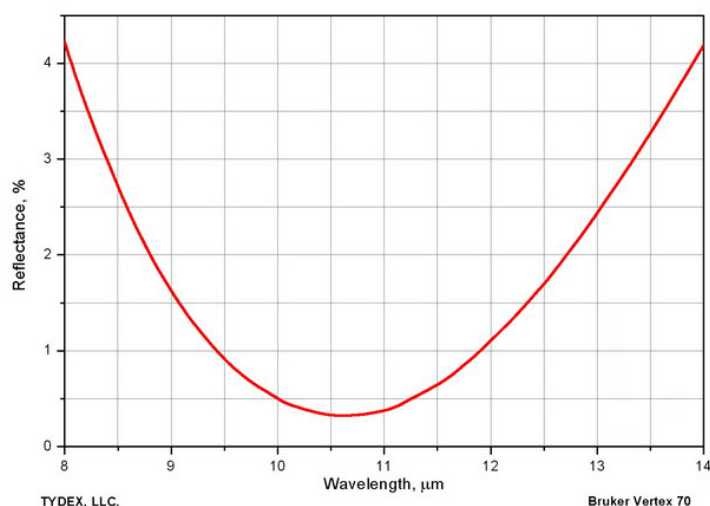


Рис. 1.3. Просветление селенида цинка на 10.6 мкм (под CO₂ лазер).

1.4. Просветление для Er:YAG @ 2.94 мкм

Частным случаем V-образного просветления является просветление на длину волны генерации Er:YAG лазера, 2.94 мкм. Данная длина волны совпадает с максимумом поглощения воды, почти всегда присутствующей в порах оксидных систем. Использование гидрофобных ИК-материалов позволяет создать структуру, обладающую меньшим поглощением, чем оксидное V-образное покрытие на данную длину волны.

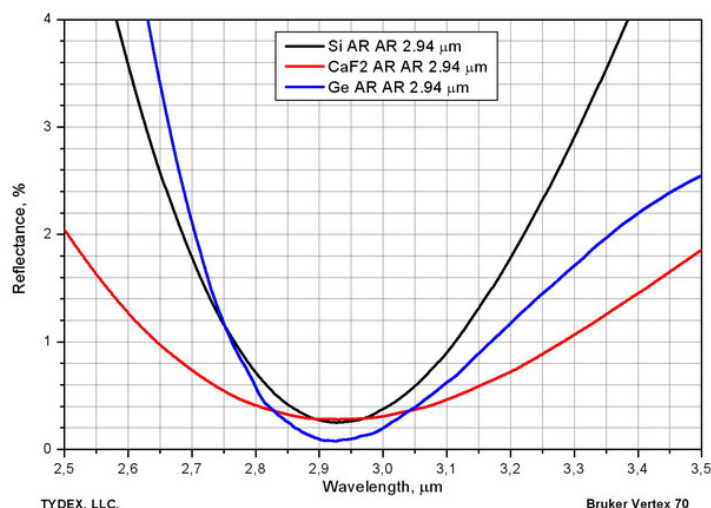


Рис. 1.4. Просветление на 2.94 мкм германия, кремния и фторида кальция.

2. Широкополосные ИК-покрытия

2.1. Широкополосное просветляющее покрытие на 3-5 мкм

Одним из наиболее востребованных спектральных диапазонов является т.н. «первое атмосферное окно» 3-5 мкм. Иногда его сужают до интервала 3.7-4.8 мкм. В этом диапазоне используется множество оптических материалов, например, кремний, селенид цинка, германий, флюорит, сапфир и ИК-кварц. Для всех этих материалов Тидекс предлагает высокоэффективное широкополосное просветление, обладающее достаточной стойкостью для работы вне помещений в неэкстремальных условиях. Используются многослойные структуры, содержащие, как правило, не менее трёх материалов с разными показателями преломления.

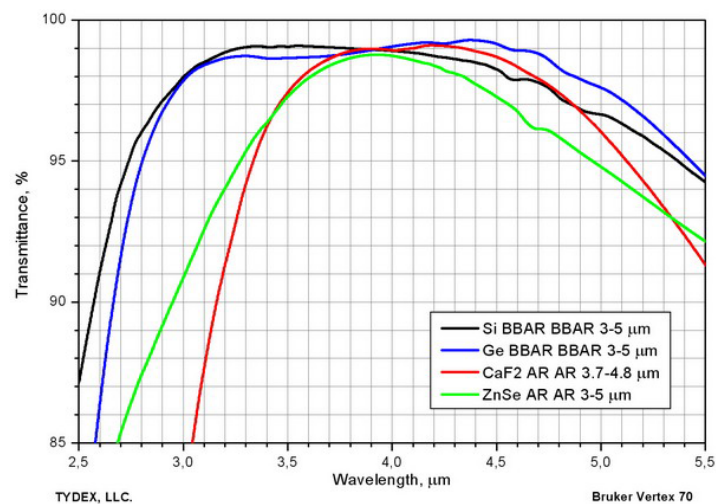


Рис. 2.1.A. Широкополосное просветление на первое атмосферное окно для основных ИК-материалов.

На кремнии и германии данное покрытие может комбинироваться с DLC на фронтальной поверхности изделия. Подробнее смотрите в разделе про DLC (алмазоподобное покрытие).

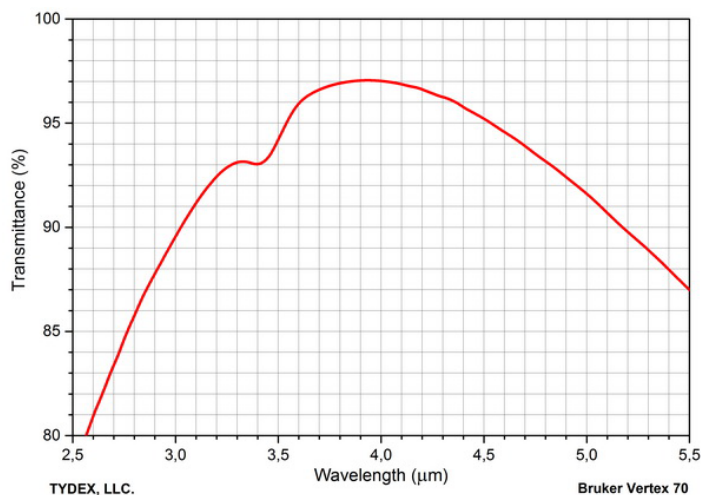


Рис. 2.1.В. Пропускание окна из кремния. Алмазоподобное покрытие на фронтальной стороне изделия и широкополосное просветление на внутренней стороне.

2.2. Широкополосное просветляющее покрытие на 7-14 мкм

Во втором атмосферном окне, 7-14 мкм, в качестве материалов для изготовления оптики применяются, как правило, германий и селенид цинка. В некоторых случаях может использоваться кремний. Для данного диапазона мы предлагаем конструктивно те же просветления, что и для 3-5 мкм, но толщины интерференционных слоёв становятся примерно в 2.5 раза больше. Это приводит к тому, что покрытия оказываются несколько менее стойкими и требуют более аккуратного обращения. Пожертвовав частью спектральной эффективности можно, однако, достичь более высоких эксплуатационных параметров. После 11 мкм сами подложки и напылённые структуры демонстрируют заметное поглощение.

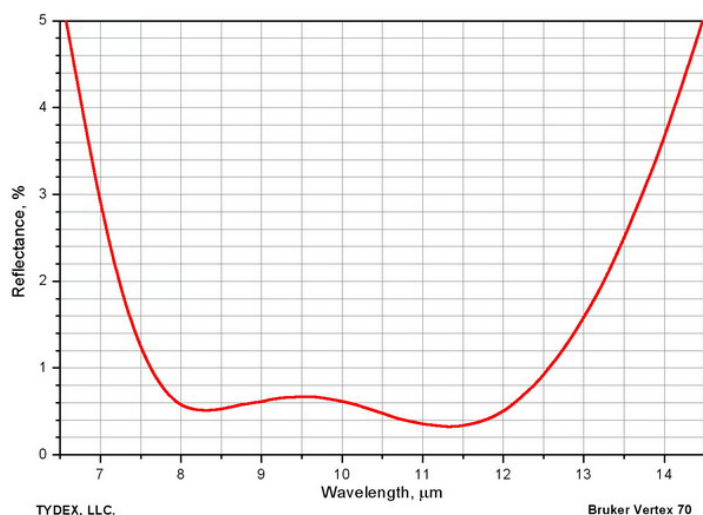


Рис. 2.2.А. Остаточное отражение от германиевой пластины с двусторонним просветлением на 7-14 мкм.

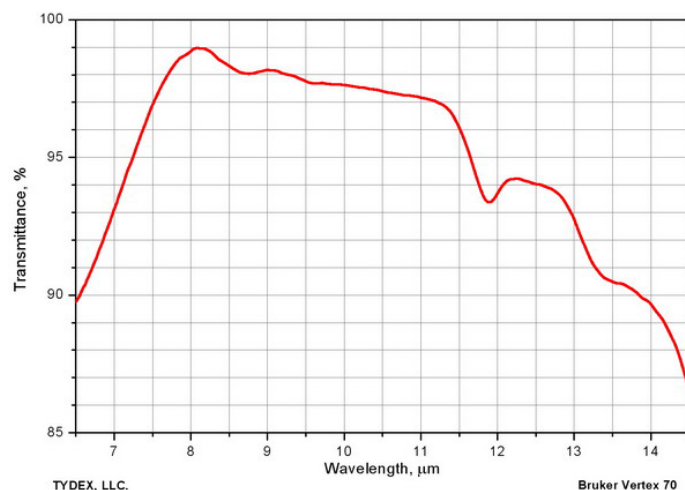


Рис. 2.2.В. Пропускание германиевой пластины с двусторонним просветлением на 7-14 мкм.

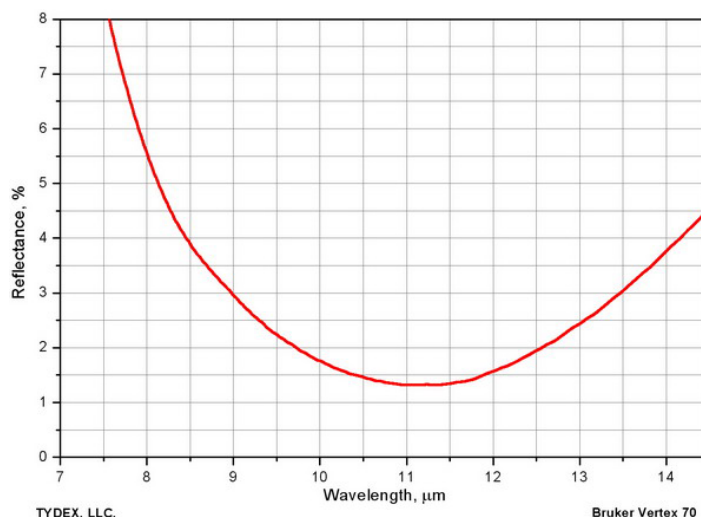


Рис. 2.2.С. Остаточное отражение пластины из селенида цинка с двусторонним просветлением на 7-14 мкм.

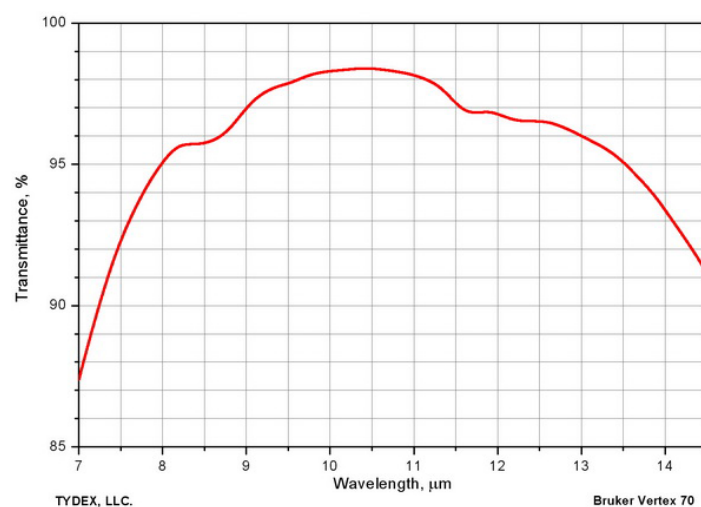


Рис. 2.2.Д. Пропускание пластины из селенида цинка с двусторонним просветлением на 7-14 мкм.





Оптические покрытия

На кремнии и германии, как и для первого атмосферного окна, данное покрытие может комбинироваться с DLC на фронтальной стороне изделия.

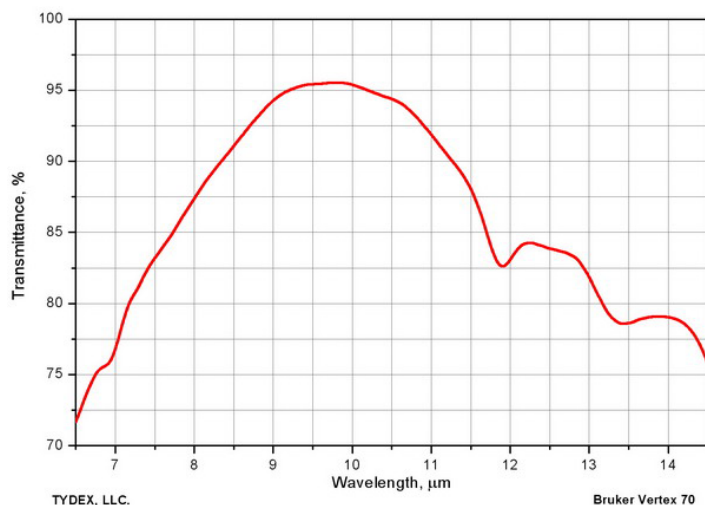


Рис. 2.2.Е. Пропускание германиевой пластины с алмазоподобным покрытием на фронтальной стороне и просветлением на 7-14 мкм на внутренней стороне.

2.3. Широкополосное просветляющее покрытие на 3-5 + 8-12 мкм

В некоторых случаях оба ИК-диапазона канализируются общей оптической системой. В таких случаях мы предлагаем просветление на оба диапазона. Поскольку невозможно просветлить оба эти канала одновременно однослойкой, исключается использование для фронтальной поверхности стойких DLC или ZnS. Нами разработано и изготавливается широкополосное просветление на оба диапазона для германиевых подложек, обладающее приемлемой стойкостью для работы вне помещений в неэкстремальных условиях.



Рис. 2.3. Просветление на 3-5 и 8-12 мкм на германии.

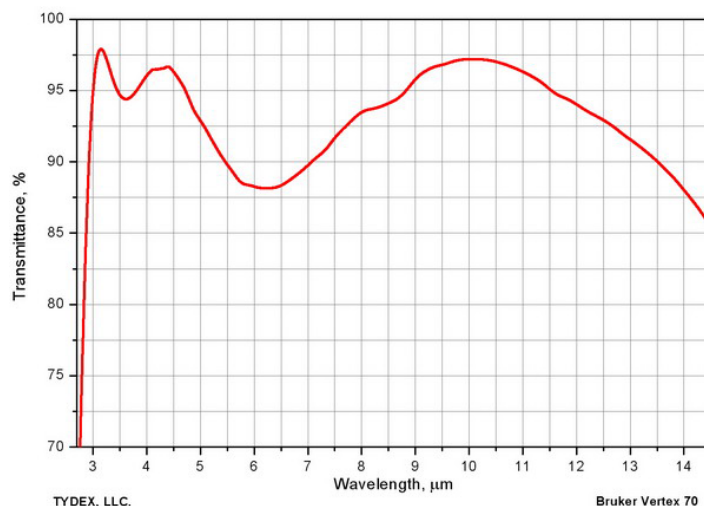


Рис. 2.3.А. Просветление на 3-5 мкм и 8-12 мкм на селениде цинка.

3. Суперширокополосные ИК-покрытия

3.1. Широкополосное просветляющее покрытие на 1.6-15 мкм

Оптика для Фурье-спектрометров должна обладать максимально широкой областью спектральной прозрачности. Наиболее ходовым материалом для такой оптики, после солей, является селенид цинка. Нами разработано и регулярно производится просветляющее покрытие для данного материала, улучшающее пропускание изделий в диапазоне от 1.6 до 15 мкм.

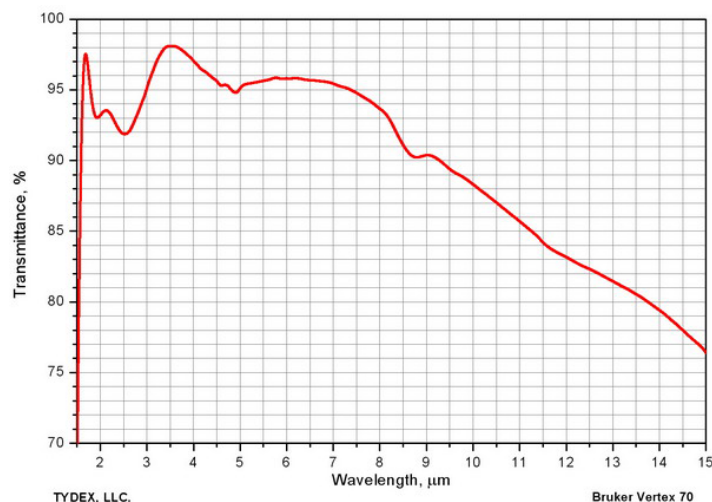


Рис. 3.1. Пропускание окна из ZnSe с двусторонним широкополосным просветлением на 1.6-15 мкм.

В некоторых случаях заказчику желательно ослабить видимое и ближнее ИК-излучение для уменьшения нежелательной засветки. Для данной задачи мы предлагаем «тёмное» просветление, достаточно эффективно подавляющее нежелательный диапазон.



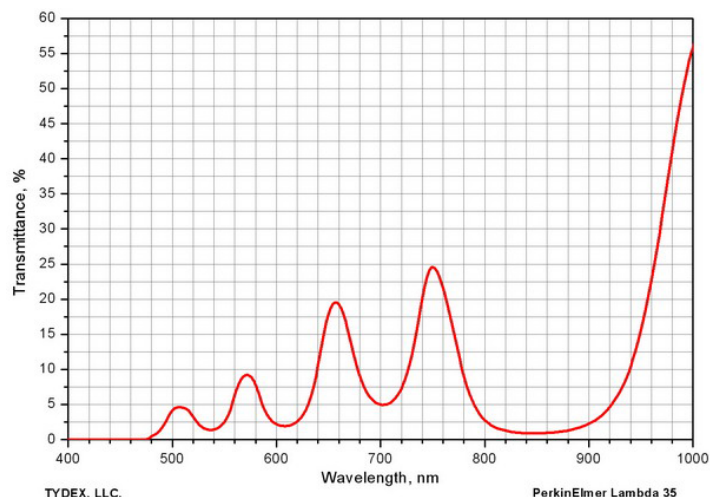


Рис. 3.1.А. Пропускание в видимом и ближнем ИК «тёмного» просветления на 1.6-14 мкм.

3.2. Суперширокополосное просветление на германии на 2.5-25 мкм

Для АТР (НПВО) - спектроскопии необходимы элементы из высокопреломляющих материалов. Френелевские потери на входе в такой АТР-элемент и на выходе из него существенно ослабляют сигнал. Возникает потребность в уменьшении френелевских потерь в максимально широком спектральном диапазоне. Нами разработано и регулярно производится такое просветляющее покрытие для германиевых АТР-зондов.

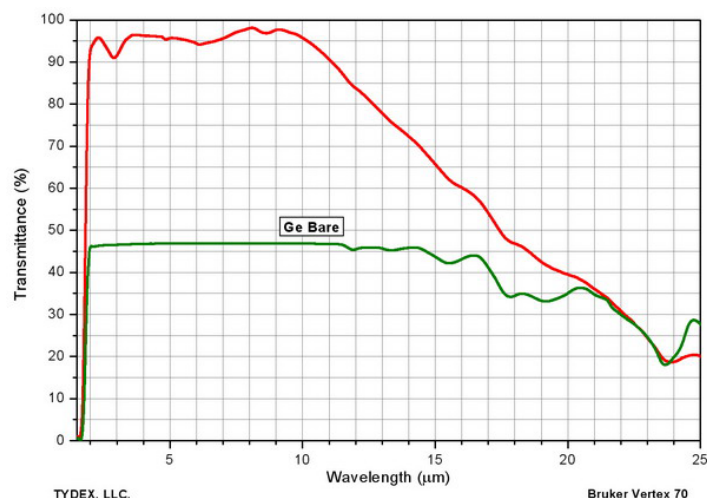


Рис. 3.2. Пропускание германиевого свидетеля с просветляющим покрытием в сравнении с деталью без покрытия.

4.1. ИК-зеркала

Идейно ИК-зеркала устроены так же, как и оксидные. Они состоят из чередующихся четвертьволновых слоёв материалов с высоким и низким показателями преломления. Большая контрастность показателей преломления ИК-материалов позволяет напылять относительно более широкополосные зеркала при меньшем числе пар слоёв по сравнению с «видимыми» структурами. Большая толщина слоёв и специфика ИК-материалов накладывают определенные ограничения на конструкцию покрытий. Такие зеркала гораздо толще, чем оксидные структуры для видимого диапазона, и они обладают несколько большим рассеянием при существенно меньшей лучевой стойкости. Основное их применение – разделение или комбинирование спектральных диапазонов, а не канализация высокоэнергичных лазерных лучей.

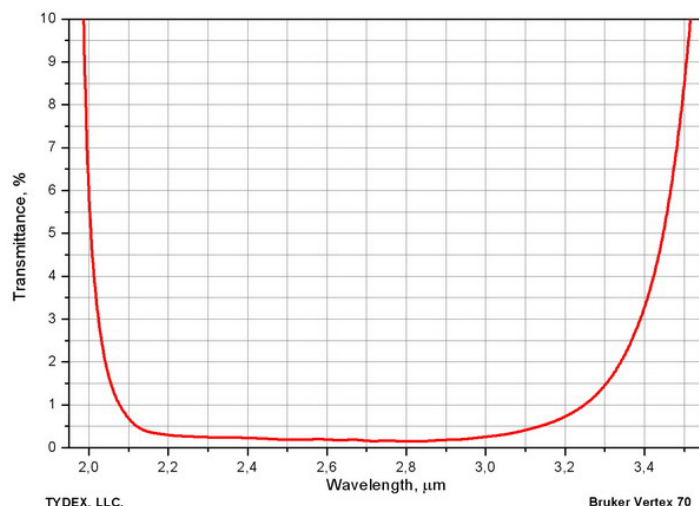


Рис. 4.1.А. Интерференционное зеркало на 2.1-3.3 мкм на подложке из селенида цинка.

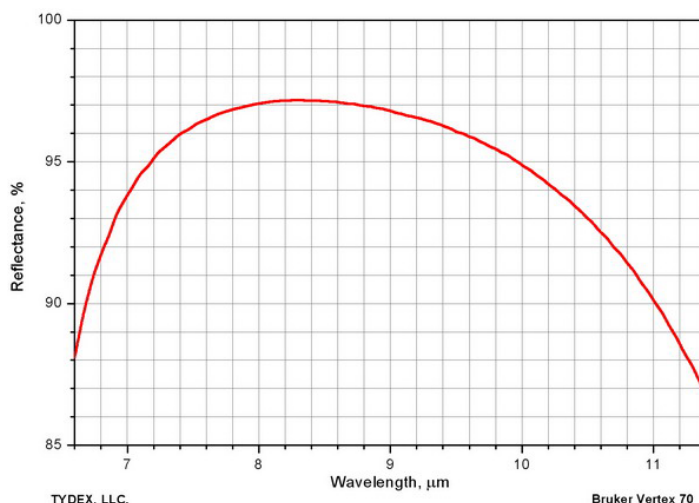


Рис. 4.1.В. Интерференционное зеркало на 7-11 мкм на подложке из кремния, угол падения 45 градусов. Зеркало прозрачно в ТГц-диапазоне.

4.2. ТГц-10600

Диэлектрические ИК-зеркала могут быть использованы для решения задачи разделения сгенерированного ТГц-излучения и остаточного излучения CO₂-лазера накачки. Для этого зеркало должно состоять из прозрачных в ТГц-диапазоне материалов, нанесённых на прозрачную в терагерцах подложку (как правило, это кремний или кристаллический кварц). Подробнее читайте в статье ТГц-спектрodelители.

4.3. Фильтрующие (solar-blind) покрытия

Другим важным применением интерференционных ИК-зеркал является отсечка ближнего ИК-диапазона. Эта задача возникает, например, при создании пиргеометров – приборов для измерения температуры земной поверхности. Для проведения корректных измерений необходимо отсечь прямой солнечный свет от теплового излучения земной поверхности. Солнечный свет энергетически сконцентрирован в основном в диапазоне 0.2 – 5 микрон. Для переизлучаемой энергии пик интенсивности находится в районе 15 мкм (зависит от температуры), при этом достаточно важно пропускать излучение до 45-50 мкм. Точная длина волны отсечки может несколько варьироваться в зависимости от особенностей конструкции и применения готового изделия. Как правило, она выбирается в диапазоне 4.5-5.5 мкм.





Оптические покрытия

Семейство таких покрытий, отсекающих свет левее 5 мкм и пропускающих 5-45 мкм, получило название solar blind (отсекающих солнце) фильтров.

Как и в случае обычных диэлектрических «холодных» зеркал, конструктивно покрытие solar blind представляет собой интерференционное зеркало с несколькими дополнительными слоями, улучшающими спектральное поведение в длинноволновой области. Большинство пленкообразующих ИК-материалов проявляет значительное поглощение правее 12-15 мкм. Для обеспечения высокого пропускания в длинноволновой зоне до 45 мкм необходимо использовать в конструкции только подходящие материалы.

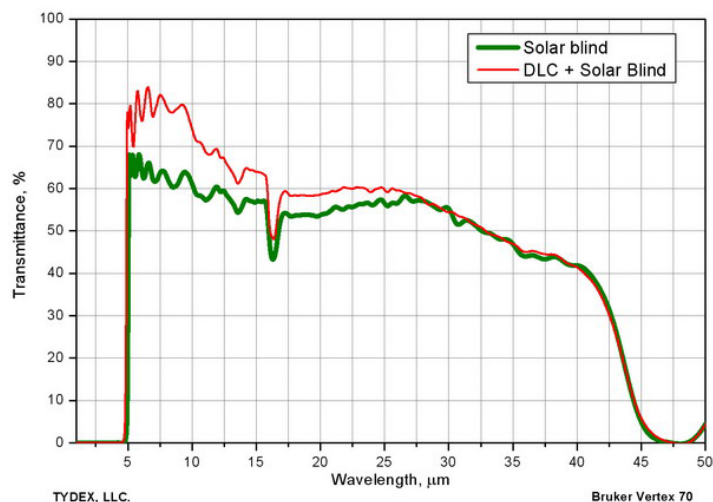


Рис. 4.3. Спектр пропускания кремниевого образца с односторонним solar-blind покрытием и с двусторонним solar-blind плюс алмазоподобным (DLC).

Подобные фильтрующие покрытия широко используются в пиргеометрах - приборах для измерения эффективного излучения земной поверхности.

Поставляемые нами менисковые линзы с покрытием solar blind прошли успешное тестирование в составе пиргеометра в Физико-метеорологической обсерватории в Давосе (Швейцария).

5. Светоделители

Интерференционная структура позволяет увеличить отражение от поверхности детали в широком спектральном диапазоне, оставив при этом её частично пропускающей в том же диапазоне, т.е. разделить световой поток между пропусканием и отражением. Нами освоено производство таких делителей на основе частично отражающих неметаллических интерференционных структур.

6. Делительные покрытия для Фурье-спектрометров

Делители для Фурье-спектрометров должны не только делить ИК-спектр, но и обладать зоной деления калибровочного лазера, как правило это 633 нм. Подробно данные делители описаны в статье Подложки для FTIR-светоделителей.

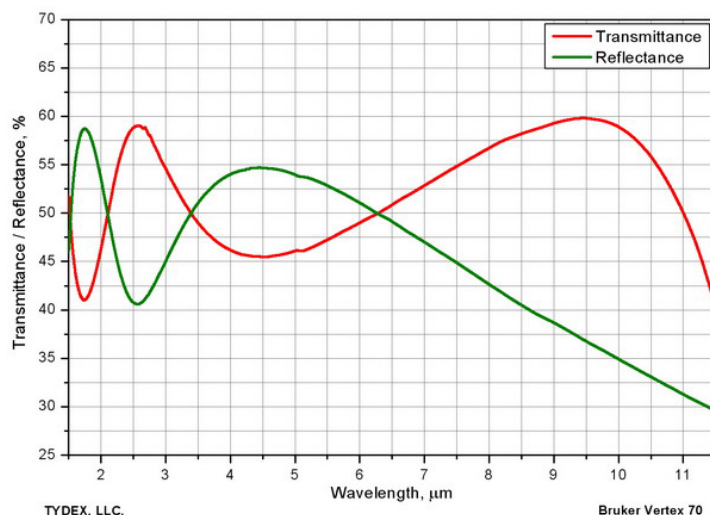


Рис. 5. Делитель 50/50 на подложке из фторида бария.

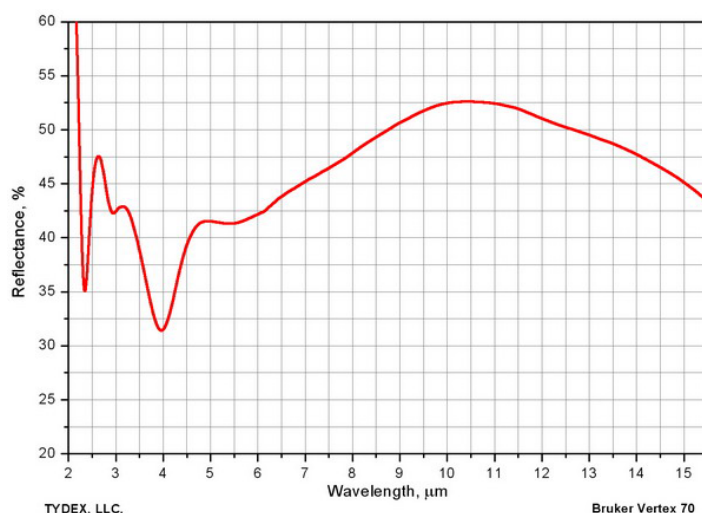


Рис. 6.A. Пример делительного покрытия на подложке из селенида цинка. Рабочий угол 45 градусов.

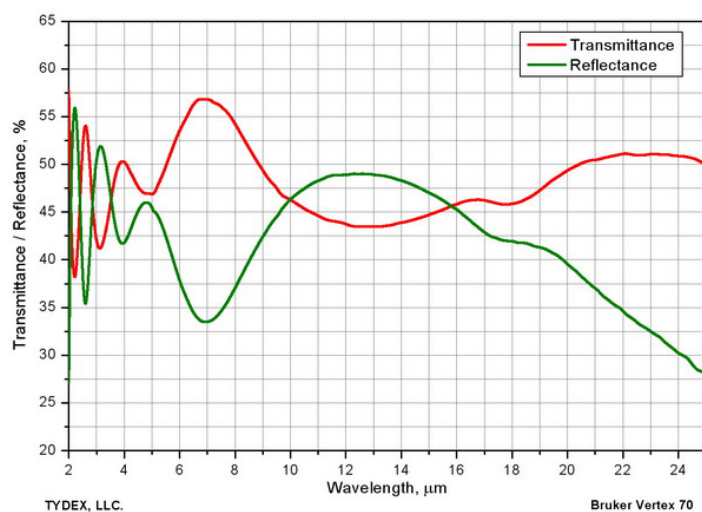


Рис. 6.B. Пример делительного покрытия на подложке из бромиды калия. Рабочий угол 30 градусов.





Оптические покрытия

IV. ВЫСОКОПРОЧНОЕ УГЛЕРОДНОЕ ПОКРЫТИЕ (DLC ИЛИ АЛ-МАЗОПОДОБНОЕ ПОКРЫТИЕ)

DLC (алмазоподобное покрытие), возможно, является самым прочным оптическим покрытием. Оно отличается высочайшей устойчивостью к солям, кислотам, щелочам, большинству органических растворителей. Высокая механическая твёрдость и низкий коэффициент трения делают данную плёнку чрезвычайно стойкой к абразивным воздействиям. DLC имеет очень хорошую адгезию к германию и кремнию.

Данное покрытие чаще всего используется на внешних поверхностях кремниевой и германиевой оптики тепловизоров, применяемых в военной технике и/или работающих в экстремальных климатических условиях. DLC защищает внешние оптические поверхности от абразивного воздействия частиц пыли в воздухе, от морской воды и соли, от машинного масла и топлива, высокой влажности, неправильного обращения и т.п.

Плёнка характеризуется умеренным уровнем поглощения и рассеяния во всем инфракрасном диапазоне длин волн. Показатель преломления алмазоподобной плёнки в ИК-диапазоне близок к 1.95.

Благодаря этому нанесенный специальными методами слой DLC сочетает выдающиеся защитные свойства с хорошим просветляющим действием.

Являясь однослойным покрытием, DLC может быть оптимизировано на определенный диапазон длин волн (обычно на 3-5 или 8-14 микронные полосы) путём подгонки толщины слоя.

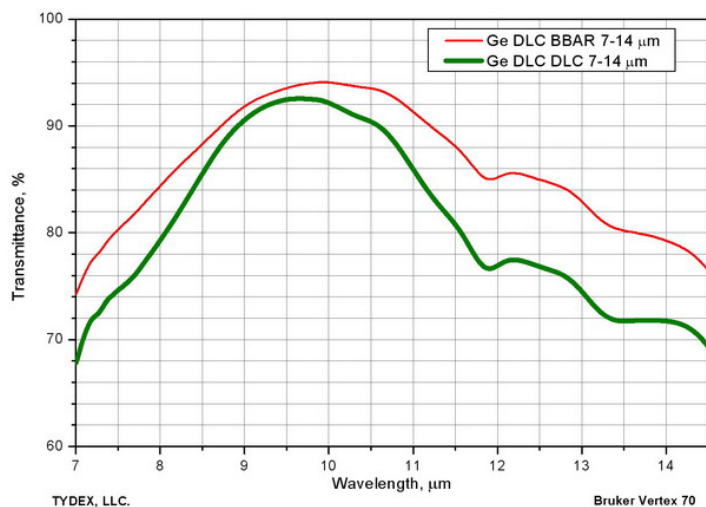


Рис. 1. Спектры пропускания германиевых деталей с двусторонним DLC и с DLC-BBAR. Толщина 1 мм.

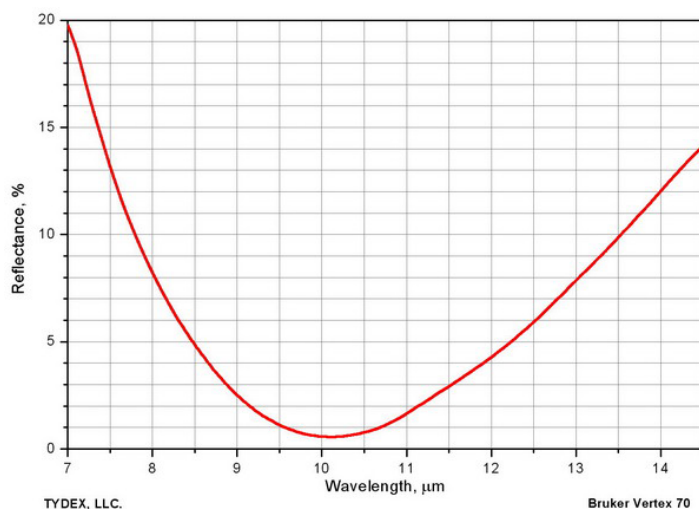


Рис. 2. Отражение от поверхности германиевой детали с плёнкой DLC.

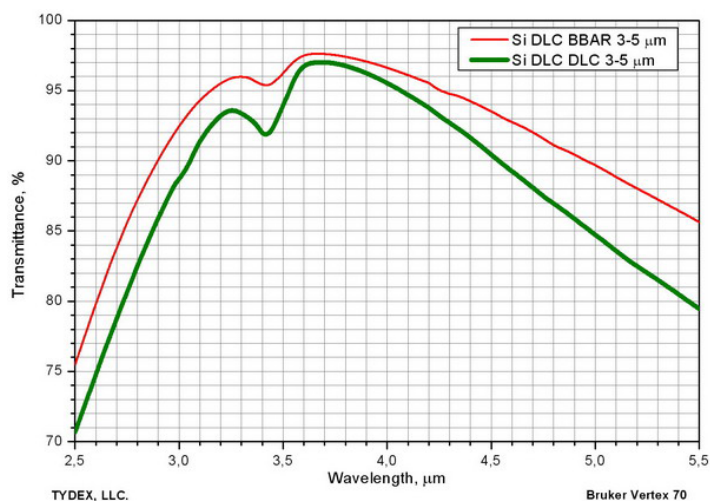


Рис. 3. Спектры пропускания кремниевых деталей с двусторонним DLC и с DLC-BBAR.

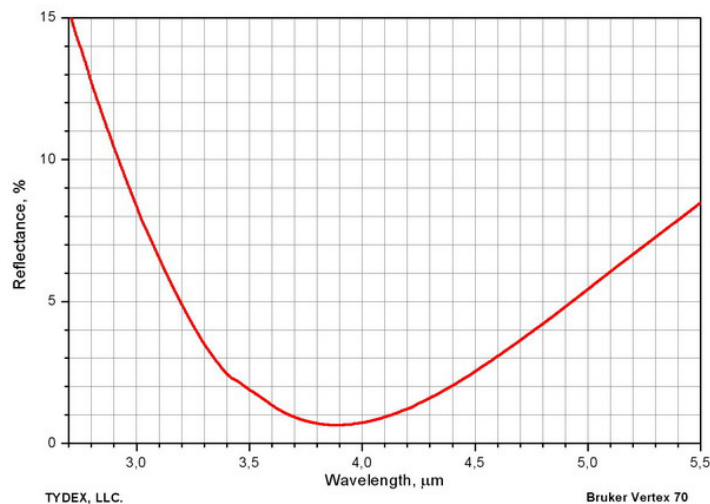


Рис. 4. Отражение от поверхности кремниевой детали с плёнкой DLC.





Оптические покрытия

Спецификация

Химические свойства	
Состав	углерод, водород
Структура	Смесь sp^3 (тетрагональный алмазный тип кристаллической решетки) и sp^2 (тригональный графитовый тип) с аморфным углеродом
Способность к взаимодействию	Инертен к кислотам, щелочам, растворителям, солям, воде и другим реагентам при окружающей температуре. Горит при температуре $> 400^\circ\text{C}$.
Физические свойства	
Плотность	$1.8-2.1 \text{ г/см}^3$
Удельная теплопроводность	$10 \text{ Вт/см} \times \text{K}$
Коэффициент теплового расширения	$9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Рабочий диапазон давлений окружающей среды, мм.рт.ст	$760 \div 10^{-3}$
Электрическое сопротивление	Несколько МОм $\times$ см
Диэлектрическая постоянная	около 4^{-11}
Проницаемость	Непроницаем для водорода и других газов
Оптические свойства	
Оптическая прозрачность	В диапазоне от ближнего до среднего инфракрасного
Показатель преломления	1.85 - 2.0
Другие свойства	
Диапазон рабочих температур	От -60°C до $+400^\circ\text{C}$
Биологическая совместимость	Не разрушает клетки, нет воспалительного действия
Прочностные характеристики	Хорошее сцепление с поверхностью подложки, стойкость к жесткому трению и механическим ударам, высокой влажности, воздействию высокой и низкой температуры, к тепловому удару, к парам соли, к растворам соли, к растворению в воде и осаждению атмосферной влаги, воздействию пыли и песка, сопротивление некоторым кислотам, сопротивление маслам и дизельному топливу по стандартам: MIL-C-675C, MIL-STD-810

V. ТГц ПОКРЫТИЯ

1. Париленовое просветляющее покрытие для ТГц-диапазона

Хорошо известна технология синтеза в вакууме париленовой плёнки на поверхности электронных плат и сборок. Получившаяся плёнка защищает электронику от влаги и загрязнения.

По нашему заданию на базе «микроэлектронной» технологии разработана специальная установка, позволяющая синтезировать париленовую плёнку заданной толщины с высочайшей однородностью на оптических поверхностях произвольной геометрии.

Плёнка имеет показатель преломления около 1.64 в дальнем ИК и терагерцовом диапазонах. Её поглощение и рассеяние в указанных спектральных областях пренебрежимо малы, полосы поглощения локализованы в ближнем и среднем ИК.

Такая плёнка обеспечивает значительное повышение пропускания (уменьшение отражения) ТГц-оптики, изготовленной из высокоомного кремния, кристаллического кварца и сапфира.

Возможно нанесение четвертьволновых однослойных просветляющих покрытий на различные диапазоны, лежащие в интервале от 45 мкм до 2000 мкм.

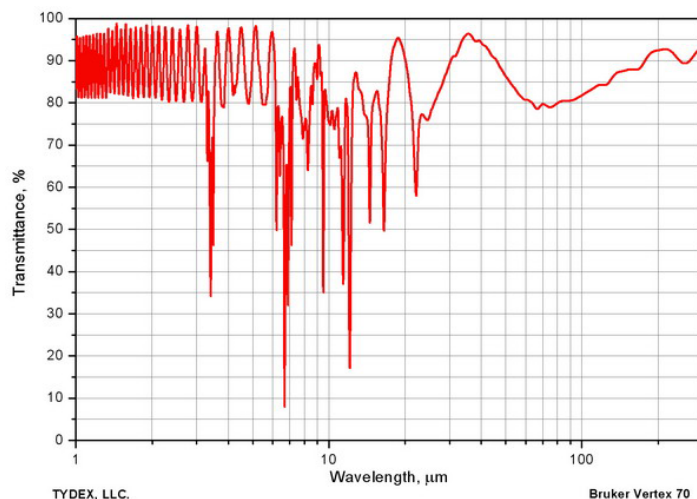


Рис. 1. Спектр пропускания париленовой плёнки. Полосы поглощения локализованы в диапазоне 3.4-22 мкм. Толщина плёнки 14 мкм.

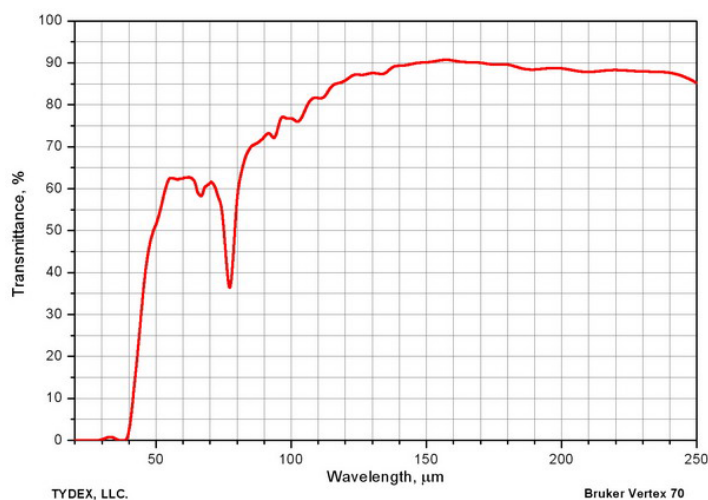


Рис. 2. Окно из кристаллического кварца с двусторонним просветляющим париленовым покрытием, центрованным на 158 мкм.





Оптические покрытия

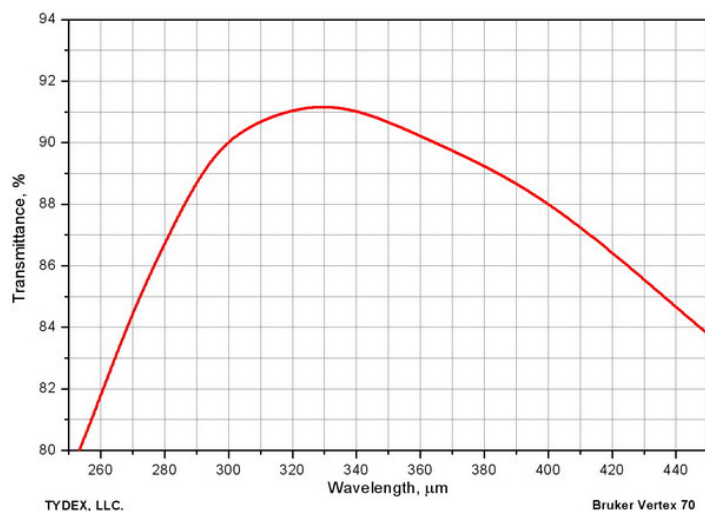


Рис. 3. Окно из высокоомного зонноочищенного кремния с двусторонним просветляющим покрытием.

2. Терагерцовые зеркала

Обычные металлические зеркала могут обладать низким отражением в терагерцовом диапазоне. Это связано с тем, что проникающая способность электромагнитного излучения пропорциональна его длине волны. Поэтому золотые плёнки, достаточно хорошо отражающие в ИК, могут оказаться недостаточно толстыми для работы в ТГц. При изготовлении ТГц зеркал мы обеспечиваем достаточную для обеспечения максимального отражения толщину металла.

3. ТГц спектроделители

Важной задачей является отделение сгенерированного ТГц-сигнала от остаточного излучения лазера накачки. Эту задачу могут решать интерференционные зеркала, отражающие лазерную линию и прозрачные в терагерцах.

