

PACS: 68.65.Ac

А.И. Беляева, С.Н. Коломиец

МНОГОСЛОЙНЫЕ ПОЛИМЕРКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ОТРЕЗАЮЩЕГО И ПОЛОСОВОГО ТИПОВ

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина

Статья поступила в редакцию 8 июля 2003 года

Разработаны методы нанесения многослойных интерференционных систем (МИС) из диэлектрических и полупроводниковых материалов с высоким показателем преломления и различной температурой плавления на тонкие пленочные подложки из полиэтилена, лавсана и фторопласта. Предложена методика нанесения покрытий из тугоплавких материалов на такие пленки с использованием промежуточной подложки под давлением. Одним из основных преимуществ предлагаемого способа изготовления МИС является возможность использования интерференционного слоя с низким показателем преломления в качестве подложки при осаждении слоев с высоким показателем. При этом полимер одновременно является подложкой, интерференционным слоем с низким показателем преломления и клеем в горячем виде. Разработанный метод позволяет получать МИС различного назначения – отрезающие зеркала и фильтры, спектроделители, полосовые системы.

Введение

Многослойные интерференционные системы, широко используемые для фильтрации излучения в ближней и средней инфракрасных (ИК) областях спектра, состоят из чередующихся слоев материалов с высоким и низким показателями преломления [1]. Поскольку при этом слои с низким показателем преломления имеют большую геометрическую толщину, к их оптическим и механическим свойствам предъявляются повышенные требования: высокая прозрачность в рабочей области спектра, химическая устойчивость и механическая прочность. Выполнение данных условий осложняется с продвижением в длинноволновую область, так как толщина слоев при этом все увеличивается, а в толстых слоях, наряду с увеличением ослабления излучения за счет поглощения и рассеяния, накапливаются значительные механические напряжения, нередко приводящие к шелушению слоев и даже к отслаиванию от подложки. В частности, в области 30–300 мкм известные способы изготовления МИС не годятся, поскольку, с одной стороны, геометри-

ческие толщины слоев малы, чтобы выполнять процесс полировки. С другой стороны, толщины термически осажденных слоев очень велики, что способствует накоплению механических напряжений и возникновению тангенциальных усилий, приводящих либо к искажению спектральных характеристик, либо к разрушению систем.

Круг материалов, пригодных для использования в качестве интерференционных слоев с низким показателем преломления, ограничен даже для спектрального диапазона $\lambda \sim 10\text{--}20 \mu\text{m}$ [1]. Для $\lambda > 20 \mu\text{m}$ практически все известные к настоящему времени кристаллические материалы обладают значительным поглощением. Поскольку ослабление излучения в зависимости от толщины слоя происходит по экспоненциальному закону, для слоев с низким показателем преломления из-за большой геометрической толщины ослабление наиболее существенно. К этому следует добавить проблему поиска подложки. Для дальней ИК-области спектра подложку следует выбирать из материала с низким показателем преломления, так как при этом отпадает задача ее просветления. Но среди кристаллических материалов, применяющихся сейчас в оптике, нет подходящих подложек для дальней ИК-области спектра.

Отсутствие подходящих материалов с низким показателем преломления является одной из причин ограничения спектральной области применения МИС, получаемых традиционными методами термического испарения в вакууме. Среди материалов с низким показателем преломления, способных представлять интерес для использования в многослойных интерференционных фильтрах для длинноволнового ИК-диапазона, следует выделить полимерные материалы, которые до сих пор для решения таких задач не применялись. Они удовлетворяют основным требованиям высокой прозрачностью

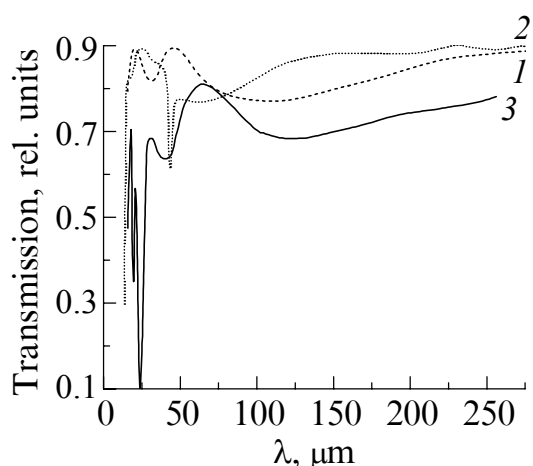


Рис. 1. Спектры пропускания различных пленок в дальней ИК-области спектра: 1 – полиэтилен (толщина $d \sim 15 \mu\text{m}$), 2 – фторопласт ($d \sim 10 \mu\text{m}$), 3 – лавсан ($d \sim 20 \mu\text{m}$)

в дальней ИК-области, достаточной механической прочностью и химической устойчивостью [2].

На рис. 1 представлены спектры пропускания пленки полиэтилена $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$ толщиной $15 \mu\text{m}$ в диапазоне длин волн $1\text{--}300 \mu\text{m}$. Очевидно, что все основные полосы поглощения полиэтилена расположены в ближней и средней ИК-областях спектра $\lambda < 15 \mu\text{m}$ (рис. 1,б). Следует отметить, что спектр поглощения полиэтилена в диапазоне $\lambda > 75 \mu\text{m}$ не зависит от его модификации. Полиэтиленовые пленки могут быть использованы как для интерференционных слоев

с низким показателем преломления, так и в качестве подложек многослойных систем. Полиэтиленовая пленка с геометрической толщиной 10–12 μm (четвертьволновой интерференционный слой для $\lambda \sim 40\text{--}46 \mu\text{m}$) обладает достаточной механической прочностью, чтобы выполнять роль подложки при термическом осаждении материала с высоким показателем преломления. Это открывает возможности разработки нового типа многослойных интерференционных систем – полимеркристаллических структур без подложек. Нами использовался полиэтилен высокой плотности 0.95–0.96 g/cm^3 с температурой плавления $T_{\text{melt}} = 129\text{--}135^\circ\text{C}$ [2].

Аналогом полиэтилена для интерференционных систем в дальней ИК-области могут быть пленки полиэтилентерефталата (лавсана) $[-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}-]_n$ и политетрафторэтилена (фторопласта) $[-\text{CF}_2-\text{CF}_2-]_n$, обладающие высокой прозрачностью в длинноволновой ИК-области (рис. 1). Для фторопласта наблюдается полоса поглощения в области $\lambda \sim 50 \mu\text{m}$, поэтому его применение для ИК-фильтров целесообразно в спектральном диапазоне $\lambda > 50 \mu\text{m}$.

В качестве материалов с высоким показателем преломления в сочетании с полимерными пленками в МИС для длинноволнового ИК-диапазона могут быть использованы диэлектрические и полупроводниковые материалы. Однако изготовить полимеркристаллический интерференционный фильтр традиционным способом поочередного термического испарения слоев в вакууме не удастся, так как невозможно получить термическим испарением пленки из полимерных материалов. Применение полимеров в качестве материалов с низким показателем преломления в МИС будет возможно после разработки новых способов их изготовления. Для этого требуется решить две основные задачи: 1) разработать методику нанесения покрытий из диэлектрических и полупроводниковых материалов на тонкие полимерные пленки; 2) создать оптический контакт поверхностей полимерной пленки диэлектрического или полупроводникового материала, необходимый для формирования многослойной полимеркристаллической интерференционной структуры.

В настоящей работе предложен метод создания МИС, в которых материалы с высоким показателем преломления наносятся на тонкие пленочные подложки из полиэтилена, лавсана и фторопласта. В разработанном способе полимер одновременно является подложкой, интерференционным слоем с низким показателем преломления и клеем в горячем виде.

Подготовка поверхности полимерных подложек и методика нанесения покрытий с высоким показателем преломления на полимерные пленки

При осаждении на полимерную подложку покрытий из диэлектрических и полупроводниковых материалов могут быть использованы методы подготовки поверхности, применяемые при осаждении металлических покрытий [3], однако в каждом случае следует учитывать особенности взаимодействия системы подложка–покрытие. Опыт осаждения кристаллических материалов

KRS-5, LiF, KCl, SrF₂, ИКС-25, Ge и др. на подложки из полиэтилена, фторопласта, лавсана показал, что для разных материалов достигается достаточно хорошее сцепление подложка–покрытие.

Поверхности необходимо тщательно очистить от загрязнения и активировать физические и химические связи для повышения адгезии. Иногда для этих целей значительно повышают степень шероховатости подложки, но к этому следует подходить осторожно, чтобы не допустить ухудшения оптических характеристик из-за увеличения рассеяния излучения шероховатой поверхностью. Особенно это касается фторопластовых пленок, поверхность которых и без обработки имеет значительную шероховатость.

В результате поиска оптимальных методов и режимов обработки найдены достаточно простые и эффективные способы, пригодные для всех типов используемых подложек. Вначале полимерную подложку тщательно очищают от загрязнений смесью петролейного эфира и 15–25%-ного этилового спирта, затем просушивают и помещают в вакуумную камеру. Дальнейшую обработку производят электрическим разрядом при давлении остаточных газов 13.3–1.33 Па. На данном этапе обработки учитывают тип полимерного материала – от этого зависит режим обработки в тлеющем разряде. Для пленок полиэтилена время обработки составляет ~ 30–50 с при напряжении ~ 1.0 кВ. Более длительная обработка не повышает адгезию, так как начинает происходить деструкция полиэтилена, что ведет к уменьшению его прочности. Для лавсановых пленок время обработки увеличивается до 2–3 min. Самое продолжительное (до ~ 10 min) время обработки в разряде рекомендуется для фторопластовых подложек.

Осаждение диэлектрических и полупроводниковых покрытий на полимерные подложки производили термическим испарением в вакууме на установках ВУТП-2М и ВУ-1А. Имеющиеся в литературе сведения по нанесению покрытий на полимерные материалы относятся, как правило, к способам напыления металлических слоев, применяющихся в радиоэлектронике [4], на достаточно толстые ($d > 50 \mu\text{m}$) полимерные подложки. Толщина же подложки при использовании полимеров играет важную роль, поскольку полимерные материалы обладают невысокой теплостойкостью и трудности значительно повышаются с уменьшением толщины применяемых пленок. Особенно это касается полиэтиленовых подложек, температура размягчения которых составляет 129–135°C. Важно предотвратить перегрев и расплавление подложки во время нанесения покрытия.

При термическом испарении разогрев подложки производят в основном за счет двух факторов – излучения от испарения и теплоты конденсации при формировании покрытия. При этом излучение испарителя является преобладающим источником тепла при малых скоростях осаждения. При больших скоростях осаждения подложки разогревают за счет как излучения испарителя, так и конденсации.

С целью уменьшения энергии падающего на подложку излучения производили экранировку испарителей, а сам процесс испарения осуществляли в несколько приемов для обеспечения возможности остывания подложки. Температуру подложки во время осаждения контролировали термопарой. Для полиэтилена не допускали разогрев выше 80°C. При использовании материалов с невысокой температурой плавления $t < 1000^\circ\text{C}$ удавалось получать покрытия толщиной 3–5 μm даже на полиэтиленовых пленках геометрической толщины 6–10 μm . Использование тугоплавких материалов (например, германия) существенно затрудняло получение покрытий на полиэтилене, поэтому был разработан специальный метод нанесения покрытий из тугоплавких материалов на тонкие полиэтиленовые пленки.

Осаждение на полиэтиленовые пленки производили со скоростью от $5 \cdot 10^{-10}$ до $50 \cdot 10^{-10}$ m/s. При осаждении на фторопластовые пленки скорость осаждения могла достигать $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Процесс термического осаждения покрытий всегда происходит при наличии некоторого количества остаточных газов. Последние могут внедряться в структуру покрытия, приводя к ослаблению адгезионных связей, а также к увеличению пористости и локальной неоднородности показателя преломления. Для уменьшения влияния остаточных газов все процессы осаждения производили в условиях, когда длина свободного пробега молекул остаточных газов намного превышает расстояние от испарителя до подложки. Такие условия выполняются в вакуумных установках при давлении в рабочей камере $< 5 \cdot 10^{-3}$ Pa [5].

Методика нанесения покрытий из тугоплавких материалов на тонкие полиэтиленовые пленки

Для получения на полиэтиленовых пленках, имеющих невысокую теплоустойчивость, покрытий из тугоплавких материалов был разработан специальный способ с использованием промежуточной подложки. Сущность его заключается в следующем. Вначале покрытие осаждается на более теплоустойчивую подложку, на его поверхность накладывается полиэтиленовая пленка, вся трехслойная система полиэтилен–покрытие–промежуточная подложка нагревается до определенной температуры под давлением, не превышающем 5 Pa, и затем промежуточная подложка устраняется. Такой процесс возможен, когда величина адгезии покрытия к промежуточной подложке меньше, чем к полиэтиленовой пленке.

В случае использования в качестве промежуточной подложки фторопластовой пленки ($T_{\text{melt}} = 325^\circ\text{C}$ [2]) удастся найти такую совокупность геометрических и термических параметров, при которых достигается отделение фторопластовой подложки без использования дополнительных «грунтовочных» слоев. Последние могут загрязнить покрытие благодаря тому, что величину адгезии покрытий к фторопласту можно в широком диапазоне менять в зависимости от предварительной обработки его поверхности. Для этого покрытие осаждают на фторопластовую подложку, поверхность которой не обрабатывали специаль-

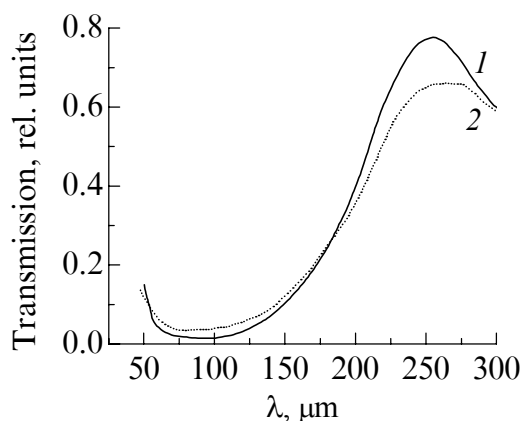


Рис. 2. Спектры пропускания 3-слойных систем германий–полиэтилен–германий, полученных при температуре сваривания $t_{\text{weld}} = 130^\circ\text{C}$ и давлении P , Па: 1 – 1, 2 – 4

ными методами, а также не подвергали действию электрического разряда. Допускается только протирка поверхности смесью петролейного эфира и этилового спирта для удаления загрязнений. После нанесения покрытия термическим испарением в вакууме на поверхность осажденного слоя накладывают полиэтиленовую пленку, сваривают их под давлением 0.1–1 Па и удаляют фторопластовую подложку по направлению ее ориентации при температуре 50–80°C. Давления, меньшие 0.1 Па, недостаточны для обеспечения оптического контакта по всей поверхности подложка–покрытие.

Оптимальные толщины фторопластовой пленки, используемой для промежуточной подложки, лежат в пределах 10–40 μm . При толщине менее 10 μm пленки обладают недостаточной тепловой стойкостью для нанесения покрытия большой толщины. Если толщина выше 40 μm , пленки обладают недостаточной гибкостью, необходимой для устранения подложки без нарушения механической прочности покрытия.

Разработанный способ позволяет наносить покрытия полиэтилена толщиной до $\sim 10 \mu\text{m}$. Более тонкие полиэтиленовые пленки обладают недостаточной механической прочностью для осуществления процессов переноса. Этот способ дает хорошие результаты при получении на полиэтиленовых пленках покрытий из германия (рис. 2), прозрачного в диапазоне $\lambda = 100\text{--}300 \mu\text{m}$, с высоким показателем преломления $n \sim 4$.

Оценка влияния структурных неоднородностей на спектры пропускания осаждаемых покрытий

Для получения высококачественных оптических покрытий необходимо иметь полностью однородную среду с ровными поверхностями. При использовании полимерных подложек, когда процесс осаждения приходится проводить в несколько приемов, неизбежно появление оптических микрон неоднородностей, возникающих из-за флуктуаций показателя преломления формирующегося покрытия. Дополнительное ослабление излучения может происходить также за счет рассеяния на шероховатостях подложки.

Теоретическая оценка такого дополнительного ослабления излучения может быть сделана из рассмотрения взаимодействия излучения с системой рассеивателей, расположенных вплотную друг к другу, имеющих средние размеры, равные размерам шероховатостей. Если положить, что рассеяние в

этом случае однократно, а пропускание подчиняется закону Бугера, то можно получить следующую зависимость пропускания T от длины волны λ :

$$T_{\lambda} = \exp\left[-\frac{8\pi^2 r^2}{\lambda^2} (n-1)^2\right],$$

где n – показатель преломления материала поверхности; r – размер неоднородности.

По мере увеличения размера шероховатости поверхности по сравнению с λ пропускание будет уменьшаться. Если размеры неоднородностей $< 1 \mu\text{m}$, то ослабление излучения за счет рассеяния шероховатой поверхностью для спектрального диапазона $\lambda > 50 \mu\text{m}$ будет незначительным.

Экспериментальные исследования проводили для полиэтиленовых, лавсановых и фторопластовых подложек. Для качественной оценки шероховатости на подложки наносили тонкие металлические покрытия из алюминия и на них направляли излучение He–Ne лазера $\{\lambda = 0.633 \mu\text{m}\}$. Анализировали интенсивность зеркально отраженной компоненты. Оказалось, что наиболее однородной поверхностью обладают лавсановые пленки, рассеивающие свойства которых даже для излучения видимого диапазона малы. В наибольшей же степени излучение видимого диапазона рассеивается на поверхности фторопласта (практически полностью отсутствует зеркальная компонента). Это связано с тем, что неоднородности поверхности фторопласта сравнимы по величине с длиной волны излучения He–Ne лазера.

Количественные оценки ослабления излучения на шероховатостях поверхности полимерных подложек проводили спектрофотометрическим методом. Для этого на полимерные подложки толщиной $20 \mu\text{m}$ наносили слои оптической толщины $\sim 1 \mu\text{m}$ покрытий из фторида лития и германия. Исследо-

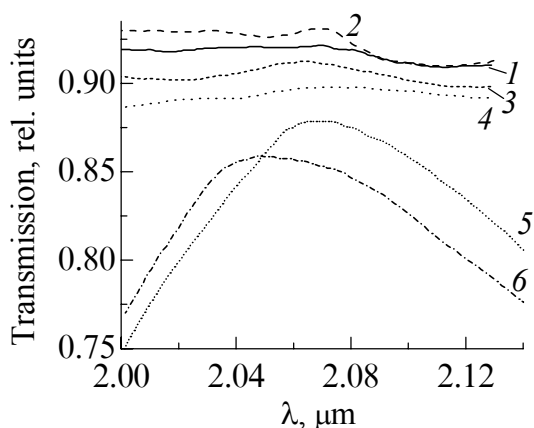


Рис. 3. Спектры пропускания подложек из лавсана (1), фторопласта (2) и покрытий оптической толщины $\sim 1 \mu\text{m}$: из LiF на лавсане (3) и фторопласте (4); из германия на лавсане (5) и фторопласте (6)

вания проводили в спектральном диапазоне $\lambda < 3 \mu\text{m}$, т.е. там, где у полимерных материалов отсутствуют полосы поглощения, и в диапазоне $\lambda > 50 \mu\text{m}$. Для покрытий из LiF (рис. 3, кривые 3 и 4) отличие в пропускании в спектральном диапазоне $\lambda \sim 2.0\text{--}2.1 \mu\text{m}$ на фторопласте и лавсане составляет $\sim 0.5\text{--}1\%$ (показатель преломления для LiF в этой области равен ~ 1.35). Для покрытий из германия (рис. 3, кривые 5 и 6) различие в пропускании составляет $\sim 2\text{--}3\%$ (показатель преломления германия в этом спектральном диапазоне равен ~ 4). В дальней ИК-области

спектра $\lambda > 50 \text{ }\mu\text{m}$ различий в пропускании практически не наблюдается. Это можно объяснить тем, что соотношение между размером неоднородностей поверхности полимерных подложек и длиной волны велико и влияние рассеяния поэтому незначительно. В дальней ИК-области спектра целесообразно использовать фторопластовые пленки в МИС, поскольку в этом случае шероховатость поверхности играет роль дополнительного ослабителя коротковолнового фонового излучения, не вносящего заметных ослаблений в спектры пропускания покрытий.

Проверена возможность ослабления излучения на микрооднородностях, возникающих из-за флуктуаций показателя преломления формирующегося покрытия. Такие флуктуации могут появляться вследствие нанесения покрытия в несколько приемов. В этом случае разные участки покрытия, в зависимости от их расположения относительно поверхности подложки, будут формироваться фактически в разных условиях – каждый последующий элементарный слой покрытия будет осаждаться на остывшую поверхность предыдущего. Хотя диапазон колебаний температуры небольшой ($\sim 50^\circ\text{C}$), исследовали возможность влияния таких изменений на оптические характеристики покрытий. Для исключения влияния шероховатости поверхности подложки покрытия наносили на лавсановые подложки. Поскольку наибольшего эффекта можно ожидать при осаждении материала с большим показателем преломления, для испарения использовали германий с $n \sim 4$. Покрытия наносили в 4–5 приемов с остыванием подложки.

Для спектрального диапазона $\lambda > 50 \text{ }\mu\text{m}$ в пределах ошибки измерения нет заметного ослабления излучения. Для спектрального диапазона $\lambda < 50 \text{ }\mu\text{m}$ наблюдается небольшое уменьшение пропускания (порядка 2–5% для спектральной области $\lambda \sim 2 \text{ }\mu\text{m}$). Меняя в процессе осаждения скорость испарения, величину остаточного давления, можно достигать различия в пропускании для $\lambda < 5 \text{ }\mu\text{m}$ до $\sim 10\%$. При этом в дальней ИК-области уменьшение пропускания составляет не более 2–3%. Поскольку данные покрытия предназначены для использования в дальней ИК-области спектра $\lambda > 50 \text{ }\mu\text{m}$, а излучение коротковолнового диапазона $\lambda < 50 \text{ }\mu\text{m}$ необходимо подавлять, наличие небольшого рассеяния на микрооднородностях слоев с высоким показателем преломления, так же как и расстояния на шероховатостях подложки, играет положительную роль, способствуя увеличению отношения сигнал–шум в изготавливаемых системах.

Многослойные полимеркристаллические системы отрезающего и полосового типов

Предложенная методика позволила изготавливать МИС отрезающего и полосового типов для спектрального диапазона $30 < \lambda < 300 \text{ }\mu\text{m}$, для которого такие МИС ранее не изготавливались.

С целью устранения тангенциальных напряжений в местах соприкосновения интерференционных слоев в качестве материала с низким показателем

преломления выбран полиэтилен, обладающий высокой эластичностью, способностью к большим, длительно развивающимся обратимым деформациям. При этом появилась возможность разделить процесс изготовления МИС на отдельные этапы. Сначала на полиэтиленовую пленку осаждается термическим испарением в вакууме интерференционный слой с высоким показателем преломления, затем производится соединение двухслойных компонент полиэтилен–покрытие в многослойную систему. Образование МИС ведется без использования специальных склеивающих средств, так как в горячем состоянии полиэтилен обладает вязкостью, достаточной для сваривания его поверхности с поверхностью диэлектрического или полупроводникового материала и для обеспечения оптического контакта на границе полиэтилен–покрытие.

Практически процесс сварки поверхности полиэтилена с поверхностью диэлектрического или полупроводникового материала можно рассматривать как переход полиэтилена из высокоэластичного состояния в начальную стадию вязкотекучего состояния. Важным здесь является соблюдение режимов сваривания, чтобы не выйти за пределы упругой деформации полиэтилена, иначе может произойти изменение его оптической толщины за счет растекания. Для этого необходимо проводить процесс сваривания при более низких температурах, чем температура текучести полиэтилена, т.е. при таких термических условиях, когда еще не накапливаются необратимые деформации. Наилучшие результаты получаются при проведении процесса под давлением до 3 Па при температуре 110–130°C. Более высокие температуры могут привести к выходу за пределы упругой деформации полиэтилена, меньшие температуры недостаточны для размягчения его поверхности. Более высокие давления способны вызывать растрескивание покрытий.

Реально способ осуществляется следующим образом. Если необходимо изготовить интерференционное зеркало с центром полосы высокого отражения (минимумом пропускания) на $\lambda = 52 \mu\text{m}$, на полиэтиленовую пленку оптической толщины 13 μm в вакуумной установке термическим испарением наносят контролируемый по толщине в процессе осаждения четвертьволновой слой материала KRS-5 (йодид таллия–бромид таллия), показатель преломления которого в области 40 μm равен ~ 2.2 . Затем из полученной двухслойной компоненты вырезают заготовки диаметром 30 mm, укладывают в стопу в необходимом количестве и сваривают в вакууме с разрежением 7 Па при температуре 110–130°C под давлением 1 Па. Процесс термического осаждения можно производить на уже заранее вырезанные полиэтиленовые пленки определенного диаметра. На рис. 4, 5 приведены спектральные характеристики систем KRS-5–полиэтилен и LiF–полиэтилен, изготовленных при различных термических и барических условиях. Для разглаживания поверхности полиэтилена пленки перед осаждением на них покрытия закрепляли на держателях и их поверхность жестко фиксировали натяжением.

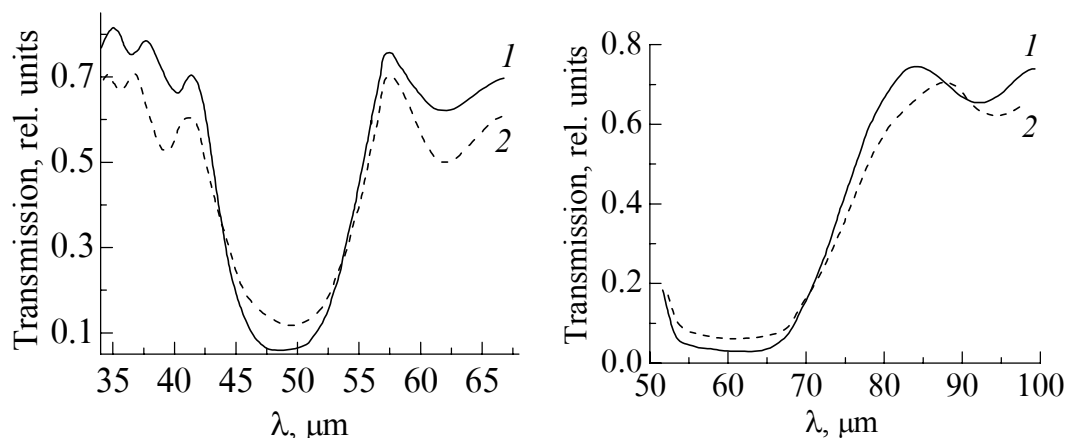


Рис. 4. Спектральные характеристики 13-слойных систем KRS-5–полиэтилен, полученных при $P = 1.5$ Па и разных температурах сваривания t_{weld} , °C: 1 – ~ 130; 2 – ~ 150

Рис. 5. Спектральные характеристики 11-слойных систем LiF–полиэтилен, полученных при $t_{\text{weld}} = 120$ °C и при разных давлениях P , Па: 1 – 3, 2 – 5

В результате того, что осаждение материала с высоким показателем преломления производилось однократно на подложку большой площади, из которой затем вырезались отдельные двухслойные заготовки (или процесс осуществляли одновременно на большое количество отдельных малых заготовок), значительно упростился контроль толщины в процессе осаждения, так как его выполняли не последовательно для каждого слоя, а однократно. Проблема контроля – одна из самых основных при изготовлении МИС для ИК-области спектра. Причем она обостряется при продвижении в длинноволновую область, поскольку при увеличении толщины слоев все меньше имеется возможностей для ведения прямого контроля – приходится осуществлять его на кратной длине волны. Это означает, что намного возрастает число экстремумов пропускания (или отражения), которые необходимо точно зафиксировать, т.е. приходится работать последовательно на нескольких контрольных образцах, что увеличивает вероятность ошибки. Решение проблемы контроля толщин во многом определяет качество получаемых МИС, так как их характеристики сильно зависят от ошибок в толщинах. Контроль слоев с высоким показателем преломления осуществляли один раз интерференционным методом по числу экстремумов пропускания на кратной длине волны, и все слои при этом получали одинаковой толщины.

Контроль слоев с низким показателем преломления проводили отдельно, до процесса осаждения покрытий. Для этого записывали спектральную характеристику полимерной пленки, толщину определяли расчетом из интерференционных экстремумов пропускания. Использовали также метод экспрессного контроля по интенсивности полос поглощения – он позволяет быстро выбрать полимерные пленки одинаковой толщины при анализе в узком спектральном диапазоне. Для полиэтиленовых пленок имеет место достаточно хорошее соответствие между интенсивностью полосы $\lambda = 6.8166$ μm и

толщиной. Метод позволяет произвести предварительную оценку толщины полиэтилена с точностью до десятых долей микрона.

Одним из преимуществ данного способа изготовления МИС является возможность использования интерференционного слоя с низким показателем преломления в качестве подложки при осаждении слоев с высоким показателем преломления. Многослойная интерференционная полимеркристаллическая система обладает высокой механической прочностью при большом числе слоев – количество слоев ограничивается только требованиями к спектральным характеристикам системы. В разработанном способе изготовления МИС полиэтилен одновременно является подложкой, интерференционным слоем с низким показателем преломления и клеем в горячем виде.

Вопрос локальной однородности полимерных пленок является важным для разработки технологии изготовления полимеркристаллического фильтра, так как на практике довольно сложно точно выдержать условия сваривания – ведь необходимо не допускать размягчения значительной части объема полиэтиленовых пленок при нагреве, и в то же время нужно довести полиэтилен до такого состояния, когда его поверхность приобретает склеивающие свойства. Вследствие того, что полиэтиленовая пленка представляет собой, как правило, совокупность двух фаз – кристаллической и аморфной (причем области кристаллической и аморфной фаз могут от пленки к пленке отличаться по объему), в процессе сваривания могут усиливаться структурные неоднородности, приводящие к появлению флуктуации оптической толщины. Хотя размеры локальных неоднородностей будут малыми, тем не менее увеличение количества полиэтиленовых слоев неизбежно приведет к их накоплению, а значит, к ослаблению излучения за счет нарушения условий интерференции. Это заметно проявляется при практической реализации способа – необходимо иметь достаточный опыт для получения воспроизводимых результатов. Особенно ощутимо это для полосового многослойного полимеркристаллического фильтра, когда формирование спектральной характеристики происходит в узком спектральном диапазоне и небольшие отклонения в оптической толщине центрального слоя, задающего положение полосы прозрачности, могут приводить к сдвигу полосы, сравнимому с ее полушириной.

Именно поэтому был разработан простой способ, дающий воспроизводимые результаты при значительном увеличении числа полимерных пленок, который включает последовательное осаждение термическим испарением материала с высоким показателем преломления на обе стороны фторопластовой пленки, являющейся одновременно подложкой и интерференционным слоем с низким показателем преломления. То есть изготавливаются трехслойные заготовки покрытие–фторопласт–покрытие, в которых оптический контакт поверхностей полимерного материала с поверхностью диэлектрика или полупроводника обеспечивается термическим испарением, затем производится сваривание трехслойных компонент интерференционными

слоями из полиэтилена. Сваривание производится при тех же режимах, что и для ранее описанного способа. Поскольку теплостойкость фторопласта значительно превышает температуру размягчения полиэтилена, в процессе сваривания сохраняется локальная однородность фторопластовых пленок. В результате сокращается число ошибок при увеличении количества интерференционных слоев с низким показателем преломления и улучшаются оптические характеристики изготавливаемых систем.

Если комбинировать оба способа, т.е. в зависимости от конструкции системы одновременно с двухслойными заготовками использовать трехслойные компоненты и одиночные слои полиэтилена, то можно создавать полимеркристаллические структуры высокого качества и сложной структуры.

Разработанный способ позволяет получать МИС различного назначения: спектроделители, отрезающие фильтры, полосовые системы и др.

Выводы

1. Разработаны методы нанесения оптических покрытий из диэлектрических и полупроводниковых материалов с высоким показателем преломления и различной температурой плавления на тонкие пленочные подложки из полиэтилена, лавсана и фторопласта.

2. Проведены оценки влияния рассеяния излучения на оптические характеристики покрытий, осажденных на полимерные подложки. Установлено, что рассеяние на шероховатостях поверхности полимерных подложек и на микронеоднородностях структуры осажденных покрытий не приводит к заметному ослаблению длинноволнового инфракрасного излучения $\lambda > 50 \mu\text{m}$.

3. Найдены оптимальные условия образования оптического контакта поверхностей полиэтиленовая пленка–диэлектрическое (полупроводниковое) покрытие. Разработаны новые способы изготовления МИС, в которых полимерные пленки выполняют тройную роль – интерференционных слоев с низким показателем преломления, подложки на стадии термического осаждения материалов слоев с высоким показателем преломления и клеявого соединения для обеспечения оптического контакта при формировании многослойной структуры.

1. *А.И. Беляева, В.А. Сиренко*, Криогенные многослойные покрытия, Наукова думка, Киев (1991).
2. *М.Д. Кацнельсон, Г.А. Бабаев*, Полимерные материалы. Справочник, Химия, Ленинград (1982).
3. *И.Л. Ройх, Л.Н. Колтунова, С.Н. Федосов*, Нанесение защитных покрытий в вакууме, Машиностроение, Москва (1976).
4. *Г.А. Александров*, ОМП вып. 10, 55 (1982).
5. *Л.Н. Розанов*, Вакуумная техника, Высшая школа, Москва (1982).

A.I. Belyayeva, S.N. Kolomyets

MULTILAYER POLYMER-CRYSTALLINE CUTOFF AND BAND PASS INTERFERENCE SYSTEMS

Coating technology for multilayer interference system (MIS) is presented. Dielectric and semiconductor materials with high refractive index and different melting temperature are deposited on thin film polyethylene, lavsan or fluorocarbon polymer (teflon) substrates. Refractory material coatings on such kind of films are created using intermediate substrate and pressure. This technique of MIS creation allows to use interference layer with low refractive index as substrate for layers with high refractive index. In the technology, polymer is used as substrate, low refractive index interference layer and glue at the same time. Coating techniques are available for fabrication of components such as sharp cutoff filters and mirrors, spectrum dividers, band pass systems.

Fig. 1. Transmission spectra of different films in far infrared spectral region: 1 – polyethylene (thickness $d \sim 15 \mu\text{m}$), 2 – fluoroplastic ($d \sim 10 \mu\text{m}$), 3 – lavsan ($d \sim 20 \mu\text{m}$)

Fig. 2. Transmission spectra of three-layer germanium–polyethylene–germanium system for welding temperature $t_{\text{weld}} = 130^\circ\text{C}$ and pressure P , Pa: 1 – 1, 2 – 4

Fig. 3. Transmission spectra for lavsan (1), fluoroplastic (2) substrates; LiF covering (optical thickness $\sim 1 \mu\text{m}$) on lavsan (3) and fluoroplastic (4); germanium covering on lavsan (5) and fluoroplastic (6)

Fig. 4. Spectral characteristic of 13-layer system KRS-5–polyethylene created at $P = 1.5 \text{ Pa}$ and welding temperatures t_{weld} , $^\circ\text{C}$: 1 – ~ 130 ; 2 – ~ 150

Fig. 5. Spectral characteristic of 11-layer system LiF–polyethylene created at $t_{\text{weld}} = 120^\circ\text{C}$ and various pressure P , Pa: 1 – 3, 2 – 5