

Исследование особенностей проектирования охлаждаемых интерференционных светофильтров для фотоприемных устройств длинноволнового ИК диапазона.

77-48211/492427

11, ноябрь 2012

Степанов Р. О., Барышников Н. В.

УДК.681.7.064.45

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

stepanovr@kapella.gpi.ru

baryshnikov@bmstu.ru

В настоящее время перед разработчиками охлаждаемых фотоприемных устройств (ФПУ) на базе соединения кадмий-ртуть-теллур (КРТ), работающих в длинноволновом ИК диапазоне (8...12 мкм), возникает потребность в применении блокирующих коротковолновых светофильтров для выделения информативных участков спектра. Особенность работы таких фильтров обусловлена необходимостью их размещения в охлаждаемой зоне криостата ФПУ, в непосредственной близости от фоточувствительного элемента, с целью уменьшения фоновой нагрузки, создаваемой собственным излучением светофильтра. В этой связи к светофильтру предъявляются специфические требования, а именно: необходимость обеспечения требуемой спектральной характеристики при температуре близкой к минус 196 °С, устойчивость интерференционного покрытия к многократным циклическим перепадам температур от минус 196 °С до 20 °С, минимальная масса светофильтра, обеспечивающая минимальное время выхода ФПУ на рабочий температурный режим.

В настоящей статье исследуются особенности проектирования таких светофильтров и формулируются рекомендации, позволяющие учесть условия их эксплуатации в составе охлаждаемых ФПУ.

Проектирование светофильтров обычно осуществляется в последовательности, которую условно можно разделить на 6 этапов:

1. Формулирование общих требований, предъявляемых к оптическим и эксплуатационным характеристикам светофильтра;

2. Обоснование выбора материалов подложки и наносимых интерференционных слоев;
3. Обоснование выбора исходной структуры покрытия;
4. Определение конструкции покрытия, обеспечивающей получение требуемых оптических характеристик с заданной точностью;
5. Оценка устойчивости характеристик светофильтра к действию дестабилизирующих факторов, таких как флуктуации толщин слоев, отклонения показателей преломления пленкообразующих материалов и т.д.;
6. Выработка технологической стратегии формирования и контроля интерференционного покрытия.

Особенности методики проектирования, связанные со спецификой работы охлаждаемых светофильтров, возникают при проведении первых четырех этапов указанной последовательности. Рассмотрим и исследуем каждый из этих этапов.

1. Формулирование общих требований, предъявляемых к оптическим и эксплуатационным характеристикам светофильтра.

Требования, предъявляемые к оптическим характеристикам светофильтра, определяются, прежде всего, его назначением. К таким требованиям, в первую очередь, относятся спектральные области высокого и низкого (фонового) пропускания, абсолютные значения коэффициента пропускания в этих областях, крутизна фронтов спектральной характеристики и некоторые другие.

Отечественная система нормируемых параметров интерференционных светофильтров определена в отраслевом стандарте [1]. Блокирующие коротковолновые светофильтры, согласно указанному стандарту, характеризуются следующими основными параметрами (рис.1):

- рабочий спектральный диапазон - $(\lambda_k \dots \lambda_d)$, где λ_k и λ_d – соответственно коротковолновая и длинноволновая границы диапазона, при этом λ_k должна соответствовать значению коэффициента пропускания 60%;
- среднее значение коэффициента пропускания в рабочем спектральном диапазоне – $\tau_{ср}$;
- длина волны коротковолновой границы пропускания $\lambda_{гр}$, соответствующая значению коэффициента пропускания 10 %;

- крутизна коротковолновой границы пропускания, определяемая как $Kp = \frac{\lambda_{ср}}{\lambda_k}$;

- область подавления мешающего излучения (фоновый диапазон) - ($\lambda_{\text{КФ}} \dots \lambda_{\text{ДФ}}$);
- среднее значение коэффициента пропускания в фоновом диапазоне – $\tau_{\text{КФ}}$.

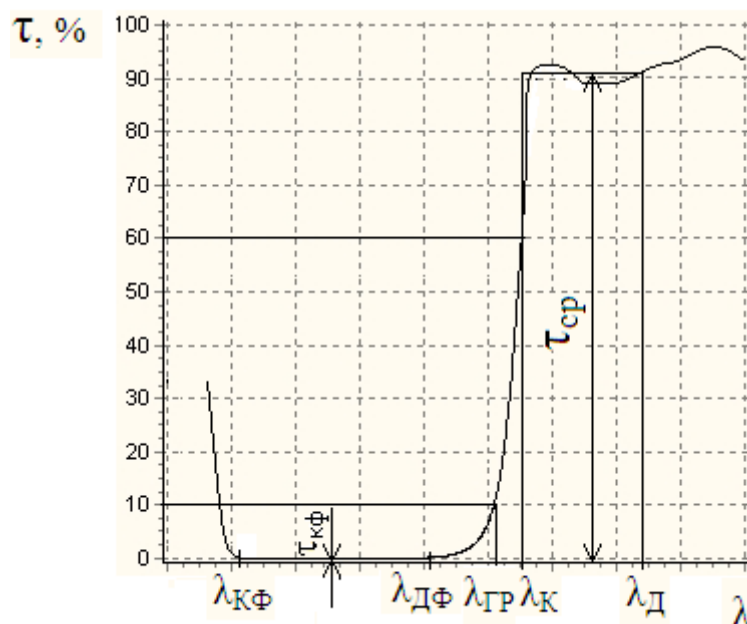


Рис. 1. Нормируемые параметры интерференционных светофильтров.

Используя представленную систему параметров, обоснуем и сформулируем основные требования, которые предъявляются к оптическим характеристикам светофильтра в рамках нашей задачи.

Для охлаждаемых светофильтров входящих в состав ФПУ на базе КРТ эти требования определяются двумя следующими факторами.

Во-первых, необходимостью устранения реакции ФПУ на излучение в нерабочей области спектра от 3000...7200 нм, где материал КРТ обладает некоторой остаточной чувствительностью, уровень которой примерно в 10 раз ниже, чем в рабочем спектральном диапазоне.

Во-вторых, обеспечением максимального уровня оптического сигнала в рабочей области от 8500...12000 нм при значительной крутизне фронта разделяющего эти области.

Исходя из вышесказанного, требования к оптическим характеристикам типичного охлаждаемого светофильтра для ФПУ на базе КРТ можно охарактеризовать параметрами, представленными в таблице 1.

Таблица 1. Требования к оптическим параметрам охлаждаемого светофильтра, работающего в составе ФПУ на базе КРТ.

Наименование параметра	Требуемое значение
рабочий спектральный диапазон - $(\lambda_{\text{к}}... \lambda_{\text{д}})$, нм	$(8500...12000) \pm 500$
среднее значение коэффициента пропускания в рабочем спектральном диапазоне – $\tau_{\text{ср}}$, %, не менее	80
длина волны коротковолновой границы пропускания $\lambda_{\text{Гр, нм}}$	8000 ± 200
крутизна коротковолновой границы пропускания - $K_{\text{р}}$, отн. ед., не менее	0.92
фоновый диапазон - $(\lambda_{\text{кф}}... \lambda_{\text{дф}})$, нм	$(3000...7200)$
среднее значение коэффициента пропускания в фоновом диапазоне – $\tau_{\text{кф}}$, %, не более	0.2

Полная система технических требований к любому интерференционному светофильтру наряду с оптическими параметрами включает в себя перечень внешних воздействующих факторов, учитывающих условия его эксплуатации в составе изделия. Классификация наиболее распространенных внешних факторов, воздействующих на интерференционные светофильтры, предложена в работах [1,2,3].

Анализ назначения и условий эксплуатации ряда ФПУ на базе КРТ позволил сформулировать типичные воздействующие факторы, которые необходимо учитывать при проектировании охлаждаемых светофильтров. Разработанный перечень факторов представлен в таблице 2.

Таблица 2. Внешние воздействующие факторы, оказывающие влияние на охлаждаемые светофильтры, работающие в составе ФПУ на базе КРТ.

Наименование внешнего воздействующего фактора	Значение внешнего воздействующего фактора	Примечание
Устойчивость к внешним воздействиям по ОСТ 3-854-88	Категория 3	К этой категории относятся фильтры обеспечивающие эксплуатацию в условиях воздействия среды с относительной влажностью 98% при температуре до 40 °С, а также циклическом изменении температуры от минус 196 до 80 °С, включая многократное (не менее 50 раз) кратковременное (не более 10 с) изменение температуры от минус 60 °С до 60 °С.
Механическая прочность по ОСТ - 1901-95	Не ниже 2 группы	Параметр характеризует возможность очистки поверхности светофильтра. Определяется устойчивостью поверхности вращающегося светофильтра к истиранию от давления резинового наконечника особой формы. Для 2-й группы поверхность должна выдерживать без нарушения покрытия не менее 1000 оборотов.
Прочность к воздействию органических растворителей по ОСТ -1901-95	Не ниже 2-й группы	Параметр определяет возможность очистки поверхности путем протирки. Покрытие соответствующее 2-й группе должно быть устойчиво к очистке с помощью батиновой салфетки смоченной спиртом.

Представленные в таблицах 1 и 2 данные определяют систему требований, предъявляемых к оптическим и эксплуатационным характеристикам охлаждаемых светофильтров. Наличие этих требований позволяет перейти к следующему этапу проектирования светофильтра.

2. Обоснование выбора материалов подложек и наносимых интерференционных слоев.

Принцип действия интерференционных светофильтров основывается на явлении многолучевой интерференции, возникающей в системе тонких оптических слоев, нанесенных на массивную подложку. При этом конструкция светофильтра, обеспечивающего требуемый оптический эффект, может быть построена на базе различных материалов.

Как правило, интерференционные покрытия, наносимые на подложку, изготавливаются из чередующихся слоев двух материалов, один из которых обладает низким, а другой высоким показателями преломления.

Общие рекомендации по выбору материалов подложек и наносимых интерференционных слоев можно свести к необходимости выполнения трех основных требований.

Во-первых, свойства выбираемых материалов должны соответствовать требованиям к оптическим параметрам, определенным в таблице 1.

Для этого материалы должны обладать минимальным собственным поглощением в пределах рабочего спектрального диапазона ($\lambda_{\text{к}} \dots \lambda_{\text{д}}$). При этом желательно, чтобы хотя бы один из этих материалов (например, материал подложки) обладал значительным поглощением в фоновом диапазоне ($\lambda_{\text{кф}} \dots \lambda_{\text{дф}}$), что позволит отказаться от введения дополнительных блокирующих слоев.

Во-вторых, выбранные материалы должны обеспечивать устойчивость светофильтра к влиянию внешних воздействующих факторов, перечень которых представлен в таблице 2.

В-третьих, выбранные материалы должны быть технологичными.

В отношении материала подложки это требование означает, что он должен быть пригоден для получения оптических поверхностей максимально высокого качества, так как все дефекты поверхности наследуются интерференционным покрытием [3], приводя к рассеянию и нежелательным флуктуациям толщины покрытия.

В отношении материалов слоев последнее требование означает, что эти материалы должны быть принципиально пригодны для формирования пленок при вакуумном осаждении с помощью известных методов получения, таких как: электронно-лучевое испарение, термическое испарение, катодное распыление, высокочастотное распыление, магнетронное распыление.

Наряду с указанными выше требованиями следует выделить ряд критериев, позволяющих осуществить корректный выбор пленкообразующих материалов в рамках задачи проектирования светофильтров для ИК ФПУ.

Для охлаждаемых светофильтров особенно важно, чтобы выбираемые пленкообразующие материалы обладали высокой адгезией и близкими, между собой и подложкой коэффициентами линейного расширения, чтобы при многократном охлаждении и нагреве светофильтра не происходило отслоения покрытия.

Кроме того, желательно, чтобы разница показателей преломления пленкообразующих материалов была как можно больше. Чем значительней эта разница, тем меньшее число слоев необходимо для достижения требуемых оптических характеристик. Это, в свою очередь, положительно сказывается как на технологических, так и на эксплуатационных характеристиках покрытия при его работе в условиях значительных перепадов температур.

С учетом вышеуказанных рекомендаций был проведен анализ физических свойств более, чем 50-ти оптических материалов работающих в ИК области спектра [4]. На основании такого анализа было выявлено, что перечень материалов, отвечающих всем оптическим и эксплуатационным требованиям весьма ограничен.

В итоге выбор подложки был остановлен на двух материалах, наиболее подходящих для создания охлаждаемых светофильтров – германии (Ge) и антимониде индия (InSb).

Германий обладает малым собственным поглощением в рабочем спектральном диапазоне, технологичен и устойчив к влиянию перечисленных в таблице 1 воздействующих факторов. При этом он также прозрачен в пределах фонового диапазона, поэтому для обеспечения малого пропускания в этом диапазоне потребуется создание там области высокого отражения с помощью дополнительной интерференционной системы.

Антимонид индия менее технологичен, но он также отвечает всем выдвинутым требованиям. Этот материал обладает несколько большим, по сравнению с германием, поглощением в рабочей области, но, в отличие от германия, имеет большое поглощение в пределах фонового диапазона, что, несомненно, является его преимуществом в рамках решения данной задачи.

Анализ свойств известных пленкообразующих материалов [3,4], с учетом выдвинутых требований и рекомендаций, позволил установить, что для формирования охлаждаемых светофильтров наилучшим образом подходят германий и трифторид иттрия (YF_3). Эти материалы образуют пару, имеющую значительную разницу показателей преломления ($n_{\text{Ge}}=4$, $n_{\text{YF}_3}=1.5$). Они обладают близкими коэффициентами линейного расширения ($\alpha_{\text{Ge}} \approx 6 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_{\text{YF}_3} \approx 6 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) и, наряду с этим, могут быть получены термическим и электронно-лучевым испарением.

Таким образом, осуществлен обоснованный выбор оптических материалов, который позволяет перейти к определению исходной конструкции для разработки охлаждаемого светофильтра.

3. Обоснование выбора исходной структуры покрытия.

Известно [3,5], что для построения элементарных блокирующих коротковолновых светофильтров используют систему чередующихся слоев с высоким и низким показателями преломления n_v и n_n , которые имеют оптическую толщину $\lambda_0/4$ и расположены между двумя крайними слоями с высокими показателями преломления и оптической толщиной $\lambda_0/8$, где λ_0 – масштабная длина волны, вопрос ее выбора решается ниже.

Таким образом структура покрытия блокирующего светофильтра может быть представлена в виде $0.5B(HB)^mH0.5B$, где: В – обозначение слоев с высоким показателем преломления; Н – условное обозначение слоев с низким показателем преломления; m - число раз, которое повторяется система (HB), записанная в скобках (так например, запись $0.5B(HB)^4H0.5B$ эквивалентна записи $0.5BHBHBHBHBH0.5B$). Множитель 0,5, стоящий перед символами последнего и первого слоев, означает, что оптическая толщина этих слоев изменена пропорционально этому множителю (т.е. составляет $\lambda_0/8$).

Эту общепринятую систему обозначений будем использовать далее без пояснений.

В нашем случае свойства выбранных пленкообразующих материалов накладывают некоторые ограничения на возможность использования классической комбинации слоев вида $0.5\text{B}(\text{HB})^{\text{m}}\text{H}0.5\text{B}$. Это связано со способностью германия к постепенному окислению в атмосфере. Поэтому желательно, чтобы наружным был слой трифторида иттрия, который в выбранной паре материалов является низкопреломляющим.

Для формирования отрезающего светофильтра с низкопреломляющим слоем со стороны окружающей среды оптическая толщина этого слоя должна быть примерно равна $\lambda_0/2$.

Кроме того, показатель преломления первого со стороны подложки слоя (Ge) близок к показателям преломления материалов выбранных в качестве подложек (Ge и InSb). Применение указанного слоя, в данном случае, не окажет влияние на вид итоговой спектральной характеристики и его можно без последствий исключить из исходной комбинации.

Таким образом, первым со стороны подложки станет слой YF_3 . Не углубляясь в тонкости технологии, отметим, что для повышения адгезии такого первого слоя рекомендуется наносить на подложку буферный подслой из оксида иттрия (Y_2O_3) толщиной примерно 20 нм. Такой подслоя в силу малости толщины практически не оказывает влияния на форму спектральной характеристики интерференционной конструкции, поэтому нет необходимости включать его в состав комбинации слоев исходной конструкции.

Исходя из указанного выше, классическая комбинация $0.5\text{B}(\text{NBH})^m0.5\text{B}$ должна быть изменена и приведена к виду $\text{H}(\text{BN})^m0.5\text{B}2\text{H}$.

Для дальнейшего уточнения параметров исходной комбинации необходимо определить величину масштабной длины волны λ_0 и значение показателя степени m .

Длина волны λ_0 соответствует середине области высокого отражения, формируемой системой равнотолщинных интерференционных слоев (см. рис. 2). Ширина этой области $\Delta\lambda_{\text{отр}}$ зависит от разницы показателей преломления $\Delta n = n_{\text{в}} - n_{\text{н}}$ оптических слоев образующих интерференционную систему.

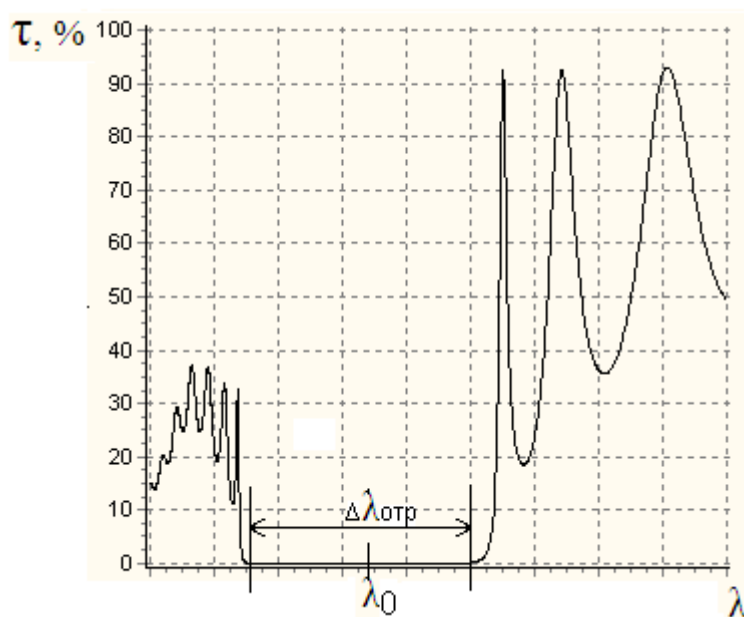


Рис. 2. Положение масштабной длины волны на спектральной характеристике системы равнотолщинных интерференционных слоев.

В работе [6] приведен график зависимости $\Delta\lambda_{\text{отр}}(\Delta n)$. Этот график имеет вид, показанный на рис .3.

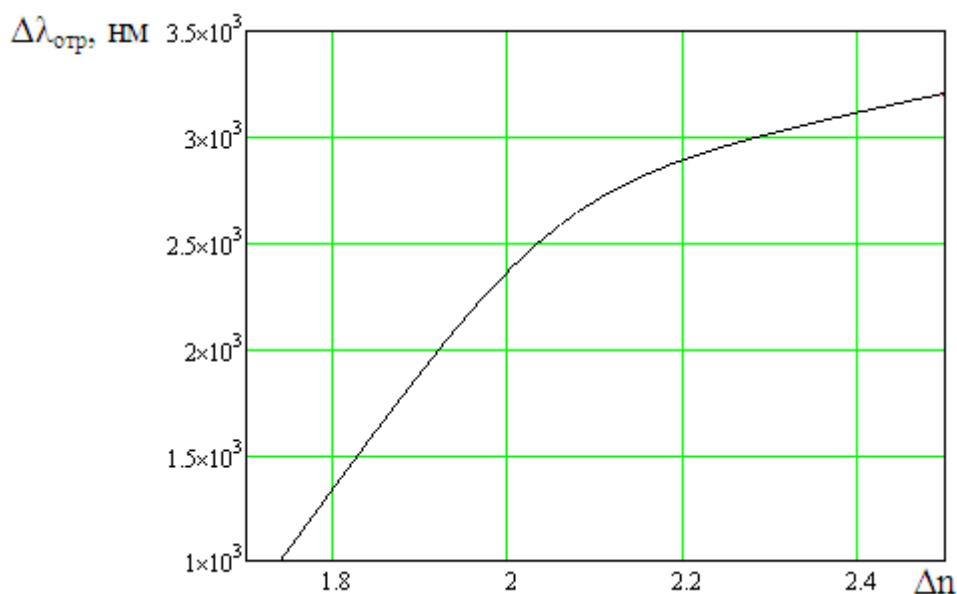


Рис. 3. Зависимость ширины области высокого отражения спектральной характеристики от разницы показателей преломления интерференционных слоев.

Для выбранной пары пленкообразующих материалов $\Delta n = n_{\text{Ge}} - n_{\text{YF3}} = 2.5$. При этом с помощью графика на рис. 3 легко определить, что соответствующая ширина области высокого отражения составляет $\Delta\lambda_{\text{отр}}(\Delta n = 2.8) = 3200 \text{ нм}$.

Тогда значение масштабной длины волны для выбранной исходной комбинации слоев может быть определено с помощи выражения:

$$\lambda_0 = \lambda_{\text{ДФ}} - \Delta\lambda_{\text{отр}}(\Delta n = 2.8)/2.$$

При подстановке в приведенное выражение численных значений получим $\lambda_0 = 5600 \text{ нм}$.

Для определения значение показателя m , рекомендуется использовать следующий подход.

Известно [5], что коэффициент отражения двухкомпонентной интерференционной конструкции состоящей из m слоев имеющих оптическую толщину равную четверти длины волны определяется выражением:

$$R(m) = \left(\frac{1 - (n_s)(n_s/n_n)^{(n_s/n_n)^m}}{1 + (n_s)(n_s/n_n)^{(n_s/n_n)^m}} \right)^2,$$

где n_n — показатель преломления подложки.

Считая, что слои не обладают собственным поглощением, а $n_n = 4$, построим график зависимости пропускания фонового излучения $\tau_{\text{КФ}}(m) = 1 - R(m)$ от числа m пар входящих в нее слоев (рис. 4)

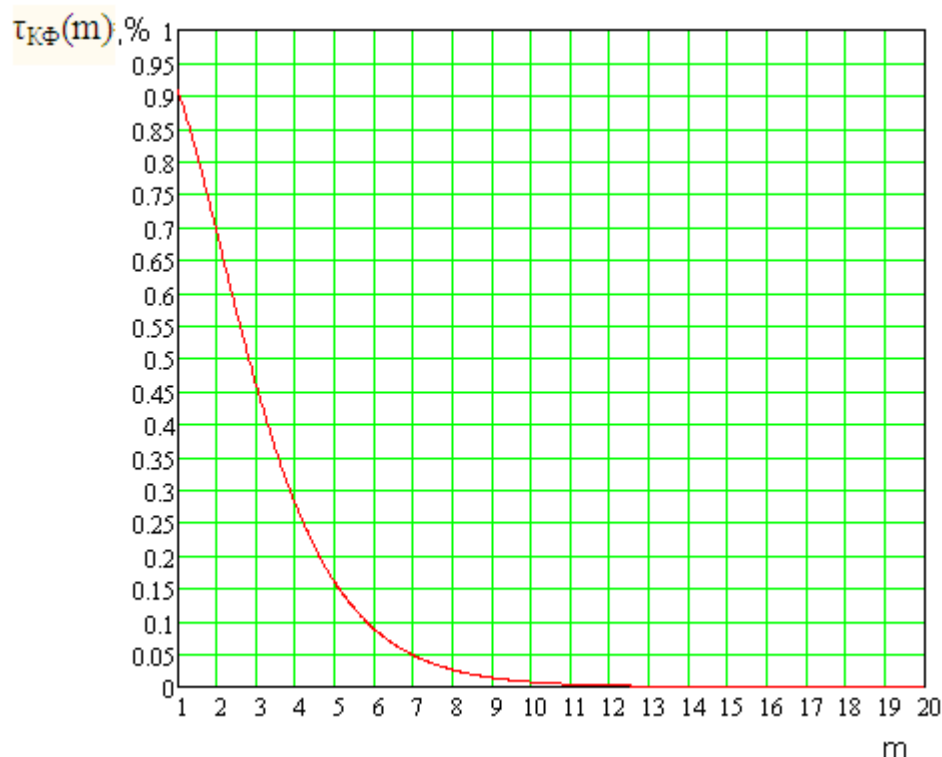


Рис. 4. Зависимость коэффициента пропускания в фоновом диапазоне от числа пар слоев в интерференционной конструкции.

Анализ полученного графика показывает, что значение коэффициента пропускания $\tau_{\text{КФ}}$ становится меньше заданного $\tau_{\text{КФ}} < 0.1\%$ (см. табл. 1) при $m \geq 5$.

Таким образом, полностью определена исходная конструкция, которая далее будет использоваться в качестве отправной точки для разработки охлаждаемого светофильтра. Эта конструкция представляет собой комбинацию слоев вида $\text{H}(\text{ВН})^6 0.5\text{В}2\text{Н}$, имеющую масштабную длину волны $\lambda_0 = 5600$ нм.

4. Определение конструкции покрытия, обеспечивающей получение требуемых оптических характеристик.

Дальнейшее решение задачи проектирования светофильтра связано с расчетом спектральных характеристик светофильтра, построенного на базе исходной конструкции,

а также с определением недостатков и оптимизацией этой конструкции с целью достижения заданных оптических характеристик.

Расчет спектральных характеристик интерференционных покрытий базируется на решении стационарного волнового уравнения в приближении плоских волн, распространяющихся в многослойной системе с плоскими границами раздела между слоями. При этом задача оптимизации покрытия относится к классу обратных задач, рассмотрение которых усложняется отсутствием единственности решения. К настоящему времени существует значительное количество алгоритмов, применяемых для решения таких задач в интерференционной оптике [3,5]. Эти алгоритмы позволяют автоматизировать численные методы оптимизации покрытий, основанные на минимизации целевой функции, которая определяет степень отклонения спектральной характеристики синтезированной интерференционной системы от требуемых параметров.

На сегодняшний день автоматизация таких методов нашла воплощение в САПР, позволяющих осуществлять синтез покрытий в инженерной практике, минуя трудоемкие расчеты, требующие специальной математической подготовки. Перечень САПР, получивших широкое распространение, включает в себя такие программные пакеты как: Essential Macleod (производства фирмы Thin Film Center Inc, США); TFCalc (производства фирмы Software Spectra, США); Optilayer (производство компании OptiLayer LTD, Россия); FilmMgr (производства кафедры физики СПбГУАП, Россия).

Проектирования охлаждаемого светофильтра в рамках настоящей работы осуществлялось с помощью САПР Optilayer.

Опустим описание процесса ввода в базу указанной САПР данных о выбранных материалах слоев и подложки, а также формировании файла исходной конструкции и перейдем к анализу спектральной характеристики исходной комбинации слоев $H(BH)^5 0.5B2H$. Вид кривой спектрального пропускания исходной конструкции (без учета поглощения в материале подложки и отражения от ее второй стороны) представлен на рис. 5.

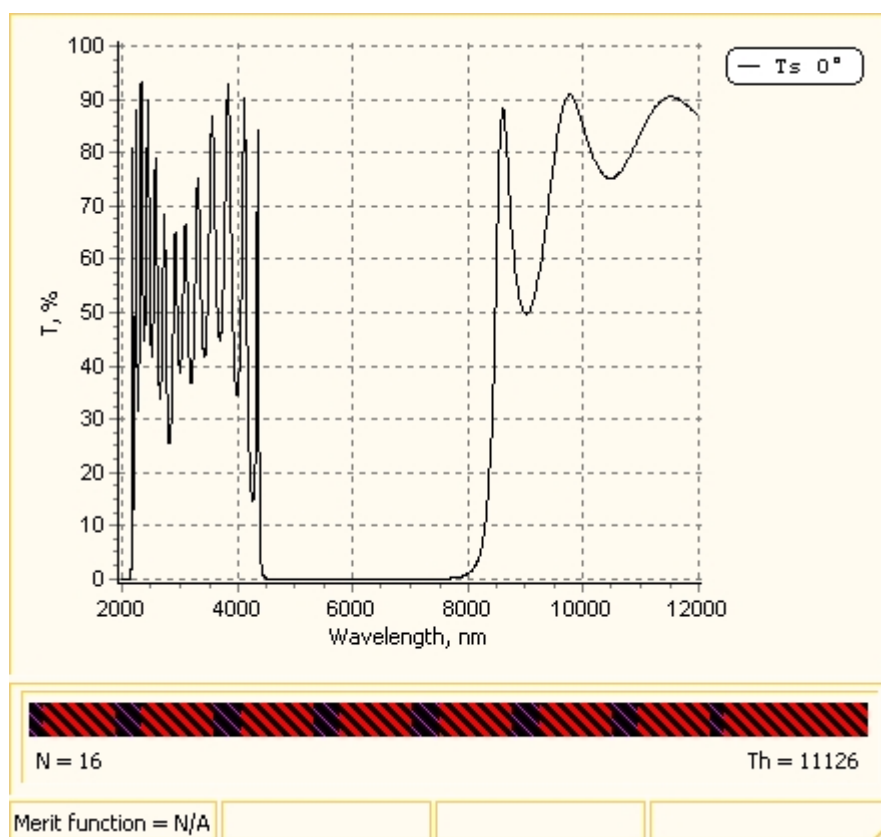


Рис. 5.Спектральная характеристика исходной конструкции.

Анализ графика на рис. 5, позволяет выявить следующие недостатки, присущие исходной конструкции.

Во-первых, в фоновой зоне ($\lambda_{KF} \dots \lambda_{ДФ}$) (см. табл. 1) существует недопустимая область высокого пропускания в диапазоне длин волн от 2200 до 4500 нм.

Во-вторых, средний уровень пропускания (даже без учета второй стороны и поглощения в подложке) в рабочем спектральном диапазоне составляет 78%, что ниже заданного в таблице 1 $\tau_{cp} = 80 \%$.

Указанные недостатки, для каждой из выбранных в разделе 2 подложек будут устранены по-своему.

Для подложки из InSb первый недостаток устраняется за счет высокого поглощения материала подложки в этой области.

Второй недостаток может быть исключен путем оптимизации исходной конструкции.

При этом следует обратить внимание на то, что оптические свойства InSb в значительной степени зависят от температуры. В частности, граница области высокого поглощения, которая при температуре $T=20^\circ\text{C}$ составляет 7200 нм, смещается с уменьшением температуры подложки до $T=-196^\circ\text{C}$ в коротковолновую область и

составляет 5100 мкм [4]. С учетом этого, требуемая функции пропускания, к которой в процессе оптимизации должна “стремиться” спектральная кривая исходной конструкции, имеет форму, установленную нами и представленную на рис.6.

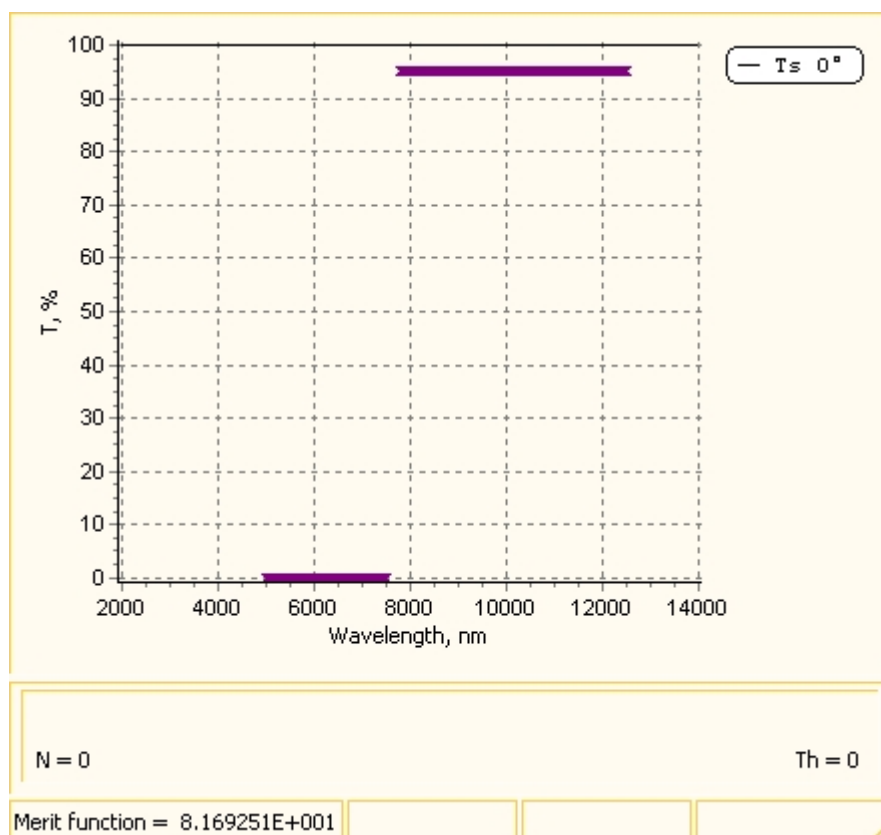


Рис. 6. Требуемая функция пропускания для оптимизации исходной системы.

В рамках решаемой задачи, в качестве параметров оптимизации могут рассматриваться только толщины интерференционных слоев (поскольку показатели преломления и порядок чередования слоев нами задан). Общие технологические рекомендации по выбору толщин слоев заключаются в том, чтобы интерференционное покрытие должно содержать максимальное количество слоев равной толщины, а также не должно иметь слоев слишком малой и слишком большой толщины. Рекомендуется при оптимизации варьировать толщину первого и последних трех слоев, вводя при этом ограничения на минимальную (не менее 30 нм) и максимальную (не более 2000 нм) толщину. $\text{H}(\text{BN})^50.5\text{B}2\text{H}$

Комбинация слоев, полученная нами в результате оптимизации с помощью возможностей Optilayer имеет вид $0.45\text{H}(\text{BN})^4\text{B}0.9\text{H}0.45\text{B}1.85\text{H}$. Соответствующая такой комбинации слоев спектральная характеристика, построенная с учетом поглощения в

подложке, толщиной 0.5 мм и отражения от обратной стороны подложки представлена на рис. 7.

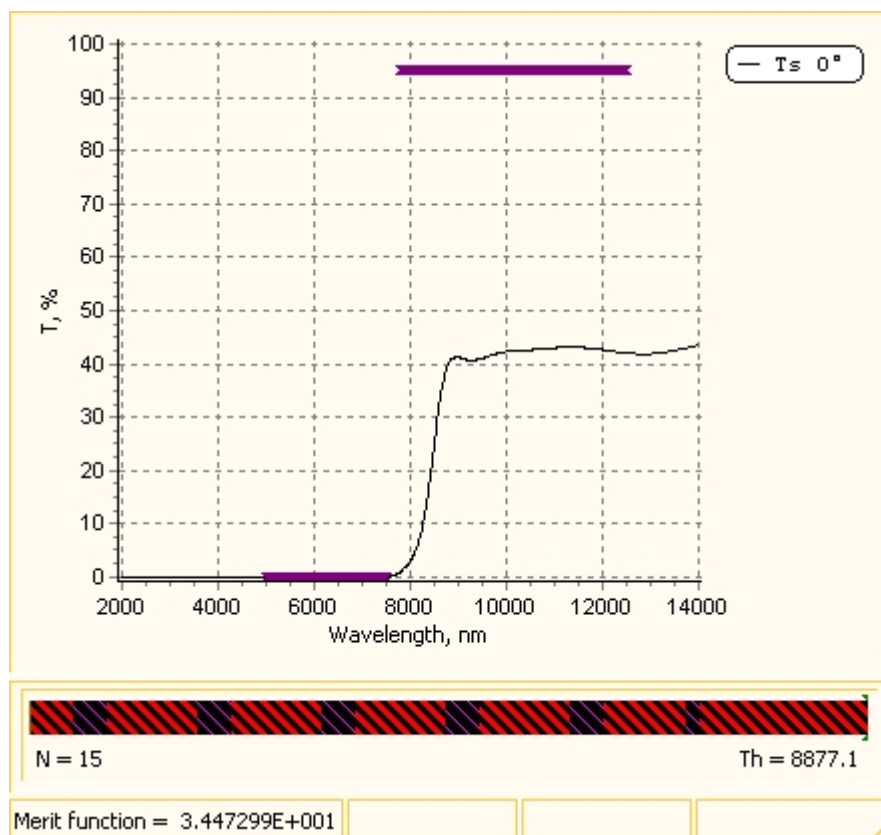


Рис. 7. Спектральная характеристика отрезающей интерференционной конструкции на подложке из антимонида индия после оптимизации.

Очевидно, что представленная на рис.7 спектральная кривая демонстрирует недостаточное пропускание $\tau_{\text{ср}}$ в рабочей области ($\lambda_{\text{к}} \dots \lambda_{\text{д}}$) (см. табл.1).

Для повышения пропускания предлагается нанести на обратную сторону подложки широкополосное просветляющее покрытие вида 0.2Н0.4В1.2Н, с контрольной длиной волны $\lambda_0=9000\text{нм}$.

При этом итоговая конструкция светофильтра с отрезающим покрытием на одной стороне подложки из InSb и просветляющим на другой может быть описана комбинацией вида 1.2Н0.4В0.2Н(П)0.45Н(ВН)⁴В0.9Н0.45В1.85Н, где П – условное обозначение подложки. Результат расчета спектральной характеристики такой конструкция представлен на рис.8.

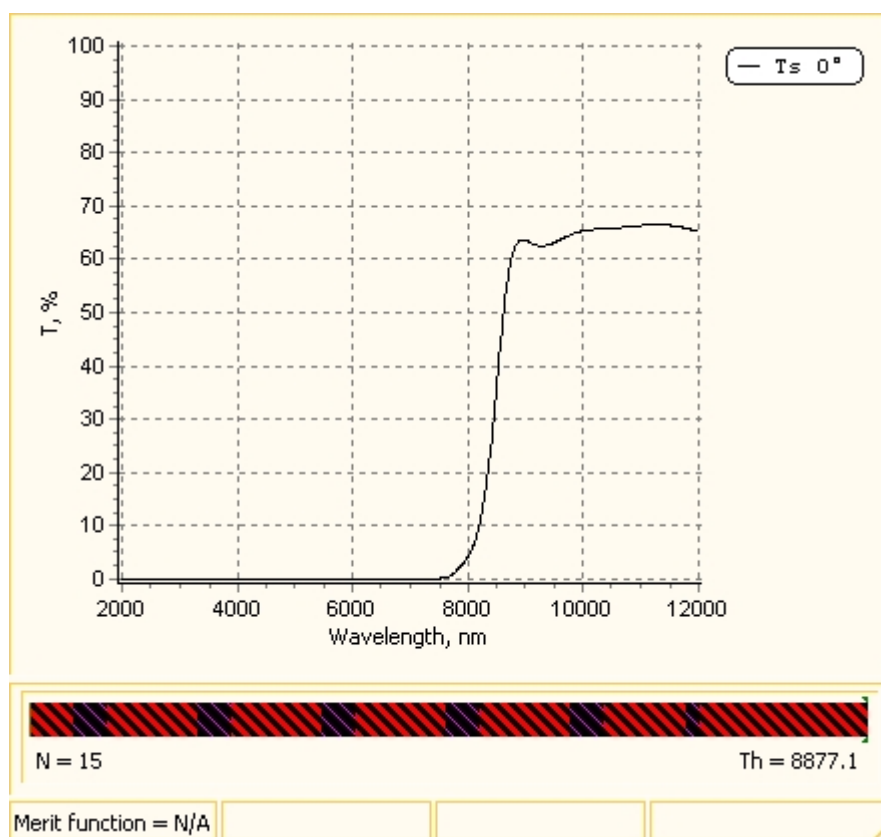


Рис. 8. Результирующая спектральная характеристика светофильтра на подложке из антимонида индия.

Анализ спектральной характеристики представленной на рис. 8 средствами САПР Optilayer позволил определить ее основные параметры, а именно: $\lambda_{\text{ГР}}=8052$ нм, $\tau_{\text{КФ}} = 7 \cdot 10^{-4}\%$, $T_{\text{ср}} = 60\%$, а $K_{\text{р}}=0.93$. Сравнение полученных параметров с требованиями, приведенными в таблице 1, показывает, что разработанная конструкция удовлетворяет всем выдвинутым требованиям, за исключением требования к величине пропускания в рабочем диапазоне.

Решить проблему повышения величины пропускания светофильтра в рабочем диапазоне позволяет применение второй выбранной нами подложки - германиевой.

При создании фильтра на германиевой подложке на одну сторону может быть нанесено фильтрующее покрытие $0.45\text{H}(\text{ВН})^4\text{В}0.9\text{Н}0.45\text{В}1.85\text{Н}$, с контрольной длиной волны $\lambda_0=5600$ нм. На другую сторону для подавления остаточных всплесков пропускания в фоновом диапазоне следует нанести блокирующую систему слоев. Блокирующей, в данном случае, называется система, которая обеспечит максимальное отражение в диапазоне от 2200 до 4500 нм и будет иметь при этом максимальное пропускание в рабочем спектральном диапазоне ($\lambda_{\text{к}} \dots \lambda_{\text{д}}$) (см. табл.1). Получить такую систему можно на

базе исходной конструкции $0.45\text{H}(\text{ВН})^4\text{В}0.9\text{Н}0.45\text{В}1.85\text{Н}$ путем ее смещения в коротковолновую область. Для этого необходимо выбрать новую масштабную длину волны λ_0 равной 4000 нм.

Тогда конструкция светофильтра с отрезающим покрытием на одной стороне подложки из Ge и системой блокирующих слоев на другой будет иметь вид $1.85\text{Н}0.45\text{В}0.9\text{НВ}(\text{ВН})^40.45\text{Н}(\Pi)0.45\text{Н}(\text{ВН})^4\text{В}0.9\text{Н}0.45\text{В}1.85\text{Н}$

Спектральная характеристика, соответствующая такой системе, представлена на рис. 9.

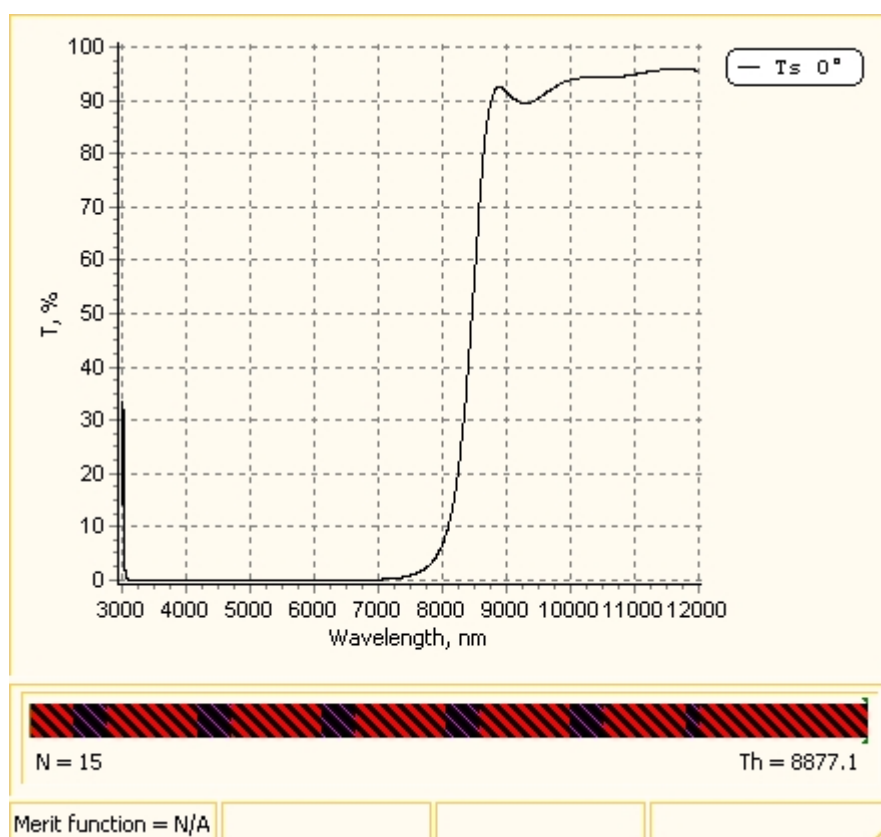


Рис. 9. Результирующая спектральная характеристика светофильтра на подложке из германия.

Анализ спектральной характеристики представленной на рис. 9 средствами САПР Optilayer позволил определить ее основные параметры, а именно: $\lambda_{\text{ГР}}=8032$ нм, $\tau_{\text{КФ}} = 0,1$ %, $T_{\text{ср}}=93\%$, а $K_{\text{р}}=0.95$.

Очевидно, что полученные параметры удовлетворяет требованиям, приведенным в таблице 1. Сравнение этих параметров с аналогичными результатами для фильтра на подложке из антимонида индия демонстрирует значительное (почти на 20 %) увеличение

пропускания в рабочем диапазоне ($\lambda_{\text{к}} \dots \lambda_{\text{д}}$). При этом, однако, наличие остаточного пропускания в зоне ($\lambda_{\text{кф}} \dots \lambda_{\text{дф}}$) не позволяет добиться такого пропускания $\tau_{\text{кф}}$, которое было получено на подложке из антимонида индия.

Таким образом, нами разработаны две конструкции светофильтров на базе подложек из Ge и InSb, обеспечивающие выполнение заданных требований к оптическим характеристика блокирующих фильтров для ФПУ на базе КРТ.

В заключении важно обратить внимание на то, что представленные на рис 8 и 9 спектральные кривые будут претерпевать изменения при охлаждении разработанных светофильтров. Это, в первую очередь, связано с зависимостью толщин оптических слоев от температуры которую имеет светофильтр. Для учета температурных условий эксплуатации, полученные конструкции нуждаются во введении поправок на изменение толщин интерференционных слоев.

Расчет поправок ΔL для i -го слоя интерференционной конструкции может быть проведен по формуле:

$$\Delta L_i = \alpha_i \cdot \frac{\lambda_0}{4 \cdot n_i} \cdot \Delta T,$$

где α_i -коэффициент линейного расширения материала i -го слоя, ΔT перепад температуры, n_i -показатель преломления i -го слоя.

Поправки ΔL_i , полученные с помощью приведенной формулы, должны быть прибавлены к соответствующим толщинам слоев.

Такие поправки были рассчитаны для рассматриваемого случая, исходя из требуемого перепада температур ΔT от 20 °С до минус 196 °С.

Новая форма спектральных характеристик, полученная с учетом указанных поправок, представлена на рис. 10 и 11, соответственно для фильтров на основе подложек из InSb и Ge.

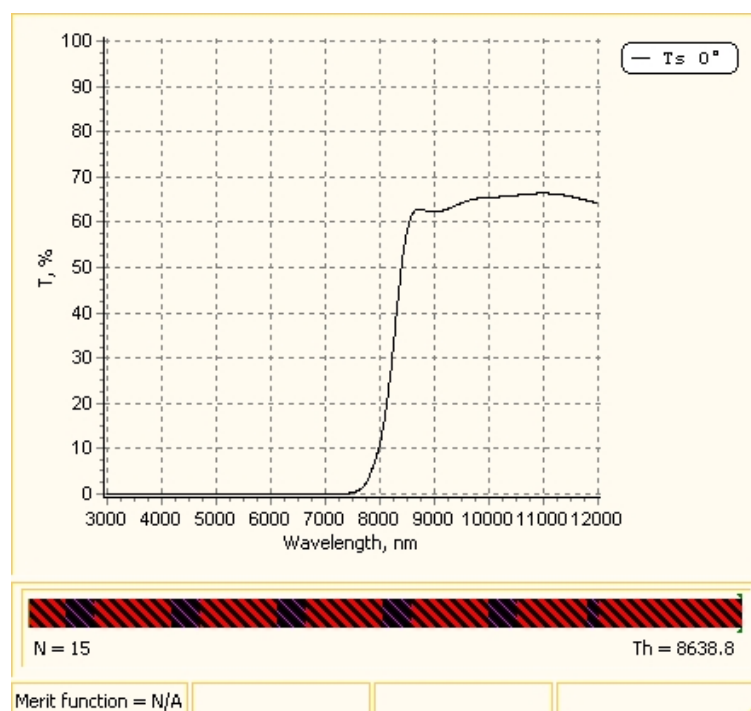


Рис. 10. Спектральная характеристика светофильтра на подложке из антимонида индия при температуре минус 196 °С.

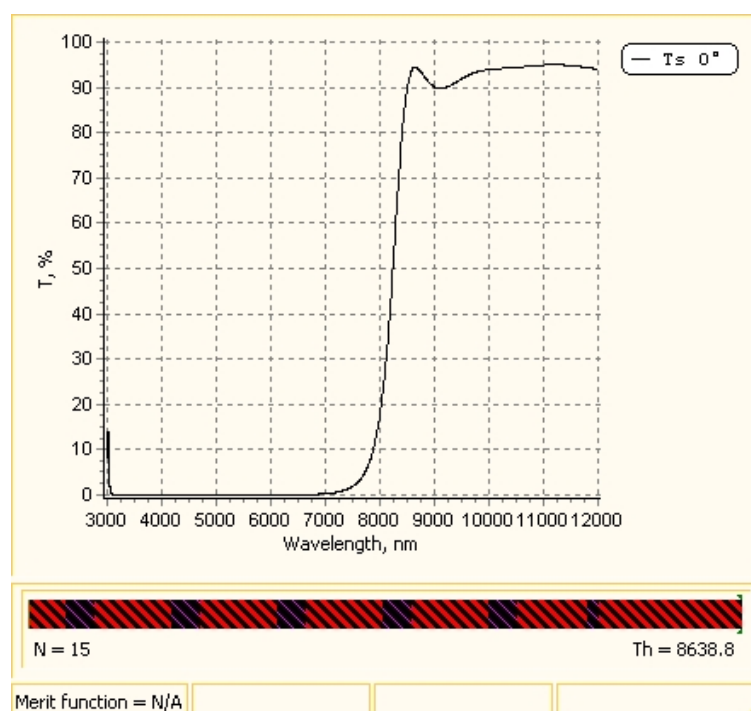


Рис. 11. Спектральная характеристика светофильтра на подложке из германия при температуре минус 196 °С.

Сравнение кривых на рис. 10,11 с кривыми, представленными на рис 8,9, позволяет утверждать, что изменение толщин слоев при охлаждении влечет за собой смещение спектральных характеристик в коротковолновую область. В частности, это смещение выражается уменьшением значения $\lambda_{гр}$. Для обеих разработанных конструкций это уменьшение составляет примерно 50 нм. В рамках нашей задачи, величина температурного смещения оказалось меньше допуска ± 200 нм установленного в таблице 1, Поэтому им можно пренебречь. Однако, при уменьшении допуска на $\lambda_{гр}$ учет температурного смещения необходим.

Таким образом, полученные в статье результаты позволяют отметить, что при проектировании охлаждаемых светофильтров для ФПУ на базе КРТ, целесообразно использовать подложки из антимонида индия или германия, на которые будут наноситься чередующиеся системы высокопреломляющих оптических слоев из германия и низкопреломляющих слоев из трифторида иттрия.

При этом установлено, что светофильтры на основе подложек из антимонида индия имеют минимальное пропускание в пределах фонового диапазона. Поэтому они могут быть использованы в ФПУ, работающих в условиях повышенных фоновых засветок.

Кроме того показано, что светофильтры на основе подложек из германия обладают более высоким пропусканием в рабочем спектральном диапазоне и следовательно могут быть применены в ФПУ, работающих в условиях малых уровней сигнального излучения.

Список литературы

1. ОСТ 3-854-88. Фильтры оптические интерференционные вакуумного напыления. Типы. М.: ВНИИМС, 1988. 23 с.
2. ОСТ 3-1901-95. Покрытия оптических деталей. Типы, основные параметры и методы контроля. М.: ВНИИМС, 1995. 166 с.
3. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения/ Гайнутдинов И.С. [и др], Казань: Издательство Фэн, 2003. 423 с.
4. Воронкова Е.М. Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Наука, 1965. 335 с.
5. Яковлев П.П., Мешков Б.Б. Проектирование интерференционных покрытий. М.: Машиностроение, 1987. 190 с.
6. Coating Materials, Sputtering targets, Evaporation sources. Journal of Balzers AG.1994.V. 84, P. 71.