

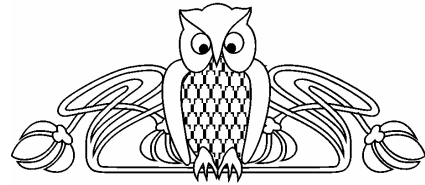


УДК 621.396:534

ВЛИЯНИЕ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОДОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

С.Г. Сучков, Д.С. Чайковский

Саратовский государственный университет,
кафедра физики твердого тела
E-mail: suchkov@sgu.ru
composite1@mail.ru



На характеристики устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в СВЧ-диапазоне оказывают влияние не только толщина и упругие свойства тонкой алюминиевой плёнки электродов, но и свойства нанометрового адгезионного подслоя. Исследовано влияние толщины подслоя хрома и ванадия на термостабильность одноповоротных Y-срезов кварца для частот 1 и 2 ГГц, а также на коэффициент отражения ПАВ от краев электродов встречно-штыревого преобразователя, причем были найдены такие толщины алюминия и хрома в двухслойных электродах, при которых коэффициент отражения равен нулю.

The Influence of the Layered Structure Electrodes on the Characteristics of the Surface Acoustic Waves Devices

S.G. Suchkov, D.S. Chaikovsky

Effect of the thickness and elastic properties of sublayer chrome and vanadium of two-layer metallic film, from which the electrode structure is formed, on thermostability of SAW devices in the microwave band is investigated. Angles of the thermostable Y-cuts for the frequencies 1 and 2 GHz are found. Also reflection factor of SAW from edges of electrodes IDT is investigated. Thickness of aluminium and chrome in two-layer electrodes at which the reflection factor is equal to zero are found.

В устройствах на поверхностных акустических волнах (ПАВ), работающих в диапазоне частот не выше 100 МГц, с хорошим приближением электроды считают бесконечно тонкими и не влияющими на упругие свойства поверхности кристалла. На более высоких частотах различие упругих свойств кристалла и электродов встречно-штыревых преобразователей (ВШП) приводит к отражению ПАВ от краев электродов [1], а также к ухудшению термостабильности [2]. Это делает необходимым, например, для устранения отражений ПАВ, применять ВШП с «расщепленными штырями» [1], а для восстановления термостабильных свойств фильтров на кварце немного изменять угол среза [2].

На частотах свыше 1 ГГц становится существенным влияние упругих свойств не только алюминиевой пленки, из которой в основном состоит электрод, но и нанометрово-

го адгезионного подслоя, чаще всего из хрома или ванадия, напыляемого на поверхность кристалла перед напылением алюминия.

ВЛИЯНИЕ НА ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ

В работе [2] автором статьи было исследовано влияние толщины и упругих свойств алюминиевых электродов ВШП на термостабильность частотных характеристик устройств на ПАВ в СВЧ-диапазоне, а также найдены углы термостабильных одноповоротных Y-срезов кварца для частот 1 и 2 ГГц. Модули упругости и плотность металлической пленки алюминия с примесью меди, используемые при расчёте температурной расстройки частоты (ТРЧ), были рассчитаны с использованием экспериментальных зависимостей скорости ПАВ на металлизированной поверхности ST-кварца от угла направления в плоскости среза, приведенных в [3]. Метод определения модулей упругости C_{11} , C_{12} , C_{44} и плотности пленки ρ изложен в [4, 5] и основан на поиске глобального минимума функции четырех переменных

$$F(C_{11}, C_{12}, C_{44}, \rho) = \sum_{i=1}^N [V_s(C_{11}, C_{12}, C_{44}, \rho, \psi_i) - V_e(\psi_i)]^2,$$

где V_s – скорость ПАВ в том же направлении, рассчитанная путем строгого решения краевой задачи для уравнений Максвелла и Кристоффеля с электрическими и механическими граничными условиями на поверхности раздела кристалла и пленки и свободной поверхности пленки, V_e – измеренная скорость ПАВ в направлении, заданном углом ψ_i [5]. Найденные модули упругости C_{11} , C_{12} , C_{44} и плотность пленки ρ , приведенные в табл.1, доставляют функции F минимальное значение. Например, для пленки алюминия тол-



Таблица 1

Модули упругости, плотность и параметр анизотропии пленок алюминия (с примесью меди)[5], хрома и ванадия, использованные при расчетах

Толщина, нм	$C_{11} \cdot 10^{-10}$, Н/м ²	$C_{12} \cdot 10^{-10}$, Н/м ²	$C_{44} \cdot 10^{-10}$, Н/м ²	ρ , кг/м ³	Параметр анизотропии A
Al $h_2 = 150$	13.673	6.626	2.605	2697.6	0.739
Cr $h_1 = 10-50$	31.4	8.341	10.53	7100	0.913
V $h_1 = 10-50$	20.3	11.9	3.0	5600	0.714

щиной $h = 150$ нм на ST-кварце $\min\{F\} = 0.15$, что соответствует среднеквадратичному отклонению расчетных значений от экспериментальных 0.17 м/с или в относительных единицах $5.4 \cdot 10^{-5}$.

В настоящей работе, аналогично [2], на основе строгого решения краевой задачи для уравнений Максвелла и Кристоффеля с электрическими и механическими граничными условиями на поверхностях раздела в структуре «двухслойная металлическая пленка – кристалл» в инвариантной постановке [4] численно исследуется влияние упругих свойств двухслойного металлического покрытия на термостабильность устройств на ПАВ в СВЧ-диапазоне.

Для того чтобы количественно характеризовать температурные изменения центральной частоты ВШП в широком интервале температур, используется параметр, называемый температурной расстройкой частоты (ТРЧ)[2]:

$$ТРЧ = \frac{f_0(T) - f_0(T_0)}{f_0(T_0)},$$

где с учетом зависимости от температуры T скоростей ПАВ и линейных размеров

$$f_0(T) = \frac{1}{2} \left(\frac{b}{V_m(T)} + \frac{g}{V_0(T)} \right)^{-1} (1 + \alpha_{11}(T - T_0))^{-1},$$

где b – ширина штыря, V_m – скорость ПАВ на поверхности кристалла, покрытой металлической пленкой, g – расстояние между штырями ВШП (ширина зазора), V_0 – скорость ПАВ на свободной поверхности кристалла,

$$ТКЧ = \frac{1}{f_0} \frac{df_0}{dT} = \frac{V_0 b \left(\frac{1}{V_m} \frac{dV_m}{dT} - \alpha_{11} \right) + V_m g \left(\frac{1}{V_0} \frac{dV_0}{dT} - \alpha_{11} \right)}{bV_0 + gV_m}.$$

α_{11} – температурный коэффициент расширения кристалла в направлении распространения ПАВ, T_0 – рабочая температура, относительно которой измеряется температурная расстройка частоты.

Для определения влияния адгезионного подслоя расчеты проводились для тех же частот (1 и 2 ГГц), для которых были найдены в [2] термостабильные углы среза $\Upsilon + 48^\circ$ и $\Upsilon + 50.5^\circ$ соответственно. В устройствах на ПАВ толщина адгезионного подслоя обычно не превышает 50 нм. В связи с этим расчёты проводились для толщин подслоя h_1 от 10 нм до 50 нм и толщины пленки алюминия (с примесью меди) $h_2 = 150$ нм. В качестве материала адгезионного подслоя анализировались наиболее широко используемые и имеющие большую жесткость по сравнению с алюминием хром ($C_{11} = 31.4 \cdot 10^{10}$) и ванадий ($C_{11} = 20.3 \cdot 10^{10}$) (см. табл. 1).

Адгезионный подслоя приводит к увеличению жесткости слоистой металлической пленки и, как следствие, к увеличению скорости ПАВ на металлизированных участках поверхности кристалла.

Используя в расчетах параметры, приведенные в табл.1, авторы статьи получили ТРЧ ВШП при коэффициенте металлизации $K_M = b/(b+g)$ для $\Upsilon + 48^\circ$ -среза и $\Upsilon + 50.5^\circ$ -среза кристалла кварца на частотах 1 и 2 ГГц.

На приведенных выше зависимостях ТРЧ хорошо заметно резкое изменение характеристики при напылении тонкой пленки (10 нм) хрома или ванадия. Реально напыление сплошной пленки толщиной 10–20 нм невозможно, поэтому эти кривые имеют лишь теоретическое значение, показывающее то, что решение краевой задачи сильно зависит от наличия между слоем алюминия и кристаллом фактически бесконечно тонкой упругой пленки Cr или V.

По результатам расчетов, представленных на рис.1–4, определены температуры нулевого значения температурного коэффициента частоты (ТКЧ) (табл.2), который является количественной характеристикой термостабильности устройства на ПАВ в небольшом интервале температур и определяется по формуле [2]:

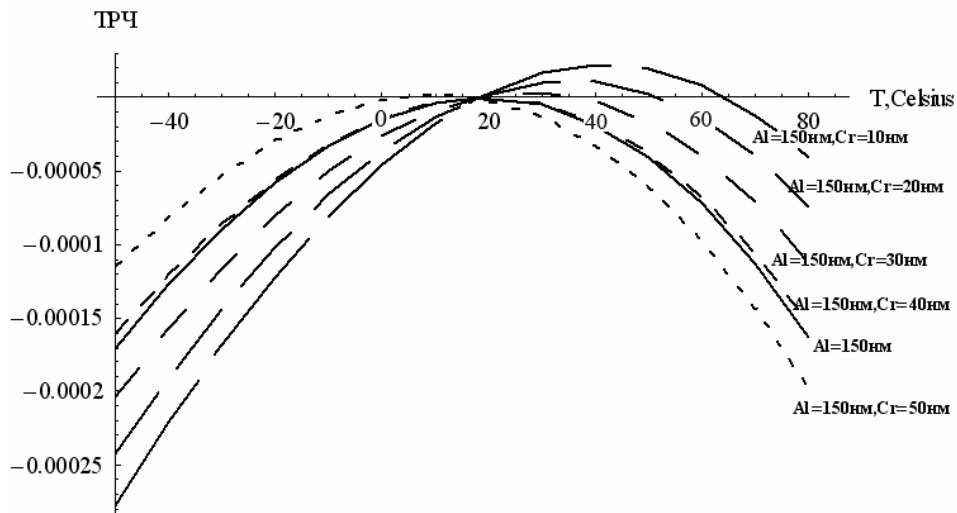


Рис. 1. Зависимость ТРЧ ВШП с электродами из алюминия ($h = 150$ нм) от температуры для различной толщины адгезионного подслоя хрома при резонансной частоте ВШП 1 ГГц на $Y+48^\circ$ -срезах кварца

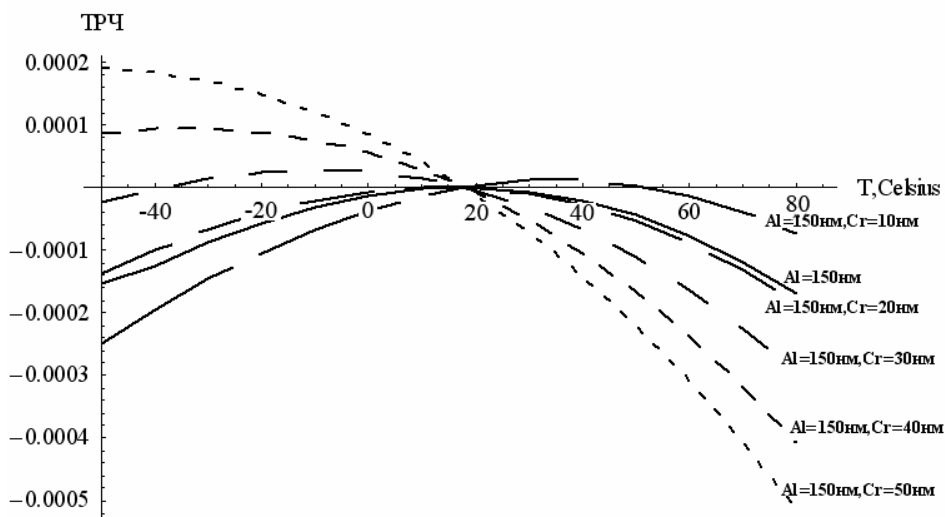


Рис. 2. Зависимость ТРЧ ВШП с электродами из алюминия ($h = 150$ нм) от температуры для различной толщины адгезионного подслоя хрома при резонансной частоте ВШП 2 ГГц на $Y+50.5^\circ$ -срезах кварца

Из графиков, приведенных на рис.1–4, видно, что незначительное изменение толщины адгезионного подслоя приводит к существенному смещению нулевого значения ТКЧ. Причем, если для частоты 1 ГГц на $Y+48^\circ$ -срезах кварца толщина подслоя хрома, равная 40 нм, обеспечивает хорошее совпадение нулевого значения ТКЧ с ТКЧ алюминиевой пленки без адгезионного подслоя при температуре 18°C (рис.1), то для частоты 2 ГГц на $Y+50.5^\circ$ -срезах кварца нулевое зна-

чение ТКЧ достигается уже при толщине пленки хрома, равной 20 нм (рис.2). При использовании в качестве материала адгезионного подслоя ванадия на частоте 1 ГГц нулевому значению ТКЧ соответствует толщина равная 50 нм (рис.3), а на частоте 2 ГГц – 30 нм (рис.4). Если сравнивать графики ТРЧ ВШП для двухслойной металлизации, где в качестве адгезионного подслоя используется хром и ванадий, то видно, что более сильная зависимость ТРЧ от толщины проявляется в слу-

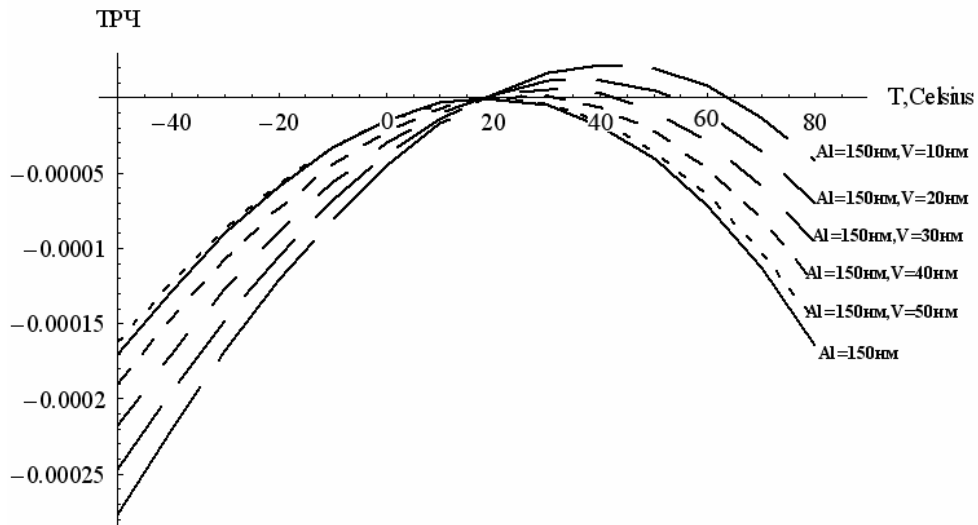


Рис. 3. Зависимость ТРЧ ВШП с электродами из алюминия ($h = 150$ нм) от температуры для различной толщины адгезионного подслоя ванадия при резонансной частоте ВШП 1 ГГц на $Y+48^0$ -срезах кварца

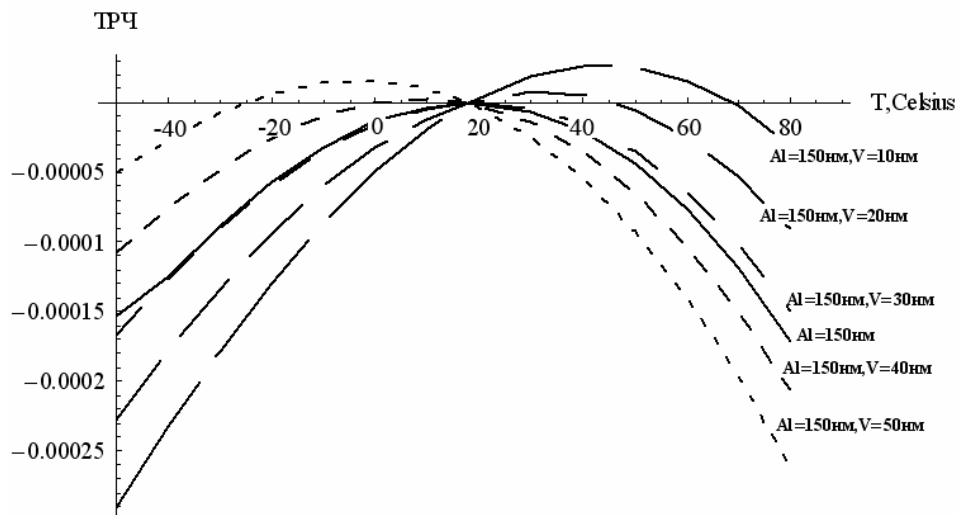


Рис. 4. Зависимость ТРЧ ВШП с электродами из алюминия ($h = 150$ нм) от температуры для различной толщины адгезионного подслоя ванадия при резонансной частоте ВШП 2 ГГц на $Y+50.5^0$ -срезах кварца

Таблица 2

Температуры нулевого ТКЧ в зависимости от частотного диапазона и толщины пленки адгезионного подслоя хрома и ванадия для углов среза $Y+48^0$ и $Y+50.5^0$ кристалла кварца

f_0 , МГц \ h , нм	Cr				
	10	20	30	40	50
1000 ($Y+48^0$)	45°C	38°C	30°C	18°C	10°C
2000 ($Y+50.5^0$)	37°C	20°C	-8°C	-30°C	-50°C

f_0 , МГц \ h , нм	V				
	10	20	30	40	50
1000 ($Y+48^0$)	45°C	40°C	34°C	20°C	18°C
2000 ($Y+50.5^0$)	42°C	32°C	20°C	10°C	-2°C



чае использования хрома. Это явление объясняется большей жесткостью пленки хрома по сравнению с ванадием.

В связи с тем, что термостабильные углы среза кристалла кварца, которые были найдены для однослойных электродов, теряют свои свойства, в случае использования ВШП, состоящего из двухслойных электродов, был произведен поиск новых термостабильных углов среза. Так, например, для толщины подслоя хрома, равного 20 нм, и толщины алюминия 150 нм, на частоте 1 ГГц термостабильным является срез $\gamma+51.5^{\circ}$, а при таком же соотношении толщин и на той же частоте, но при использовании ванадия, термостабильным будет срез $\gamma+52.5^{\circ}$. Для частоты 2 ГГц и толщин хрома и алюминия 20 и 150 нм соответственно термостабильным является срез $\gamma+49.2^{\circ}$, а для ванадия и алюминия при том же соотношении толщин – срез $\gamma+54.5^{\circ}$.

Таким образом, полученные результаты говорят о том, что при проектировании устройств на ПАВ, работающих в СВЧ-диапазоне, необходимо принимать во внимание влияние адгезионного подслоя на ТРЧ.

ВЛИЯНИЕ НА КОЭФФИЦИЕНТ ОТРАЖЕНИЯ

Известно, что в устройствах на ПАВ существует целый ряд паразитных эффектов, которые ухудшают характеристики устройств на ПАВ. Одним из таких нежелательных эффектов является отражение ПАВ от краев электродов ВШП. Коэффициент отражения приближенно описывается формулой [6, 7]:

$$R(h, \lambda) = \frac{V_m(h, \lambda) - V_0}{V_m(h, \lambda) + V_0} + C_1 \frac{h}{\lambda} + C_2 \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2,$$

где V_m и V_0 – скорости ПАВ на свободной и на металлизированной поверхностях кристалла, а C_1 и C_2 – коэффициенты, определяемые экспериментально для каждого сочетания материалов (например, для кварца ST-среза и алюминия $C_1 = 0.00033$, $C_2 = 0.0019$ [7]). Таким образом, основной причиной отражения является различие в скоро-

стях ПАВ на свободной и металлизированной поверхности кристалла. Для устранения этой причины исследуется возможность создания такой слоистой структуры металлической пленки, чтобы скорость ПАВ под ней была почти равна скорости на свободной поверхности с учетом компенсации малого вклада от второго и третьего членов в формуле для R . Поэтому вторым объектом исследования в данной работе было изучение частотной зависимости коэффициента отражения ПАВ от краев двухслойных электродов ВШП от материала и толщин слоев.

У ВШП, имеющего два штыря на период, отраженные от электродов волны искажают импульсный отклик, в результате чего происходит искажение и амплитудно-частотной характеристики. Для подавления таких отраженных волн при проектировании ВШП используют «расщепленные электроды», дающие отраженные волны со сдвигом фазы на 180° , благодаря чему при интерференции они компенсируются. Однако «расщепленные электроды» имеют в 2 раза меньшую ширину и, следовательно, в 2 раза уменьшается предельная рабочая частота ВШП, что является одним из основных препятствий продвижения устройств на ПАВ в СВЧ-диапазон.

В работе численно исследовано влияние толщины нанометрового адгезионного подслоя алюминиевых электродов ВШП на коэффициент отражения R ПАВ от их краев в СВЧ-диапазоне. Исследования проводились как для пленки из чистого алюминия, так и из алюминия с примесью меди, а в качестве материала адгезионного подслоя исследовались хром и ванадий. Было обнаружено, что только в сочетании металлов «алюминий с примесью меди / хром» при некотором соотношении толщин слоев коэффициент отражения может обратиться в нуль. Были получены зависимости коэффициента отражения от частоты при различных толщинах хрома (рис.5–7) и найдены частоты F_0 нулевого значения R для разных толщин слоев алюминия и хрома (табл.3).

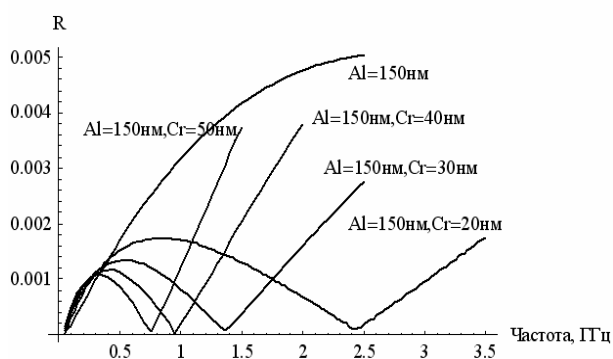


Рис.5. Зависимости коэффициента отражения ПАВ R от частоты для однослойного и двухслойного электрода из алюминия ($h = 150$ нм) и различных толщинах подслоя хрома на подложке ST-среза кварца

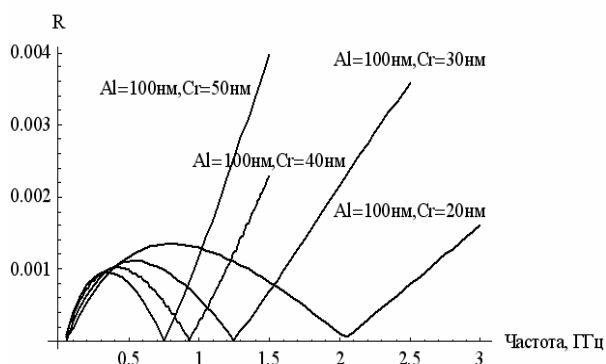


Рис.6. Зависимость коэффициента отражения ПАВ R от частоты для подложки ST-среза кварца при толщине алюминия 100 нм и различных толщинах подслоя хрома

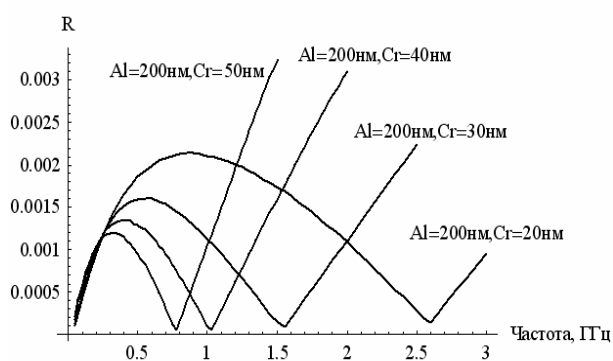


Рис.7. Зависимость коэффициента отражения ПАВ R от частоты для подложки ST-среза кварца при толщине алюминия 200 нм и различных толщинах подслоя хрома

Таблица 3

Частоты F_0 (ГГц), нулевого значения R для разных толщин слоев алюминия и хрома (см. рис. 5–7)

Толщина Al, нм	Толщина Cr, нм			
	20	30	40	50
100	2.05	1.25	0.92	0.75
150	2.41	1.32	0.95	0.76
200	2.6	1.55	1.02	0.77

Таким образом, изменяя толщину адгезионного подслоя хрома, можно устранить отражения, использовать ВШП с двумя штырями на период и в 2 раза повысить предельную рабочую частоту ВШП ПАВ.

Библиографический список

1. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах: М.: Радио и связь, 1990. 414 с.
2. Сучков С.Г. К вопросу о термостабильности устройств на поверхностных акустических волнах в СВЧ-диапазоне // Радиотехника и электроника. 2006. Т.51, №4. С.504–508.
3. Henry-Briot E., Ballandras S., Marianneau G., Martin G. Influence of Metal Thickness on Phase Velocity and Thermal Sensitivity of SAW Devices // IEEE Trans. on UFFC. 2001. Vol.48, №2. P.538–546.
4. Казачкова Т.И., Лазерсон А.Г., Сучков С.Г. Численный анализ распространения ПАВ в пьезокристаллах // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. 1979. Вып.6. С.7–12.
5. Сучков С.Г., Баринов Д.А. Анизотропия упругих свойств тонких металлических пленок и её влияние на характеристики устройств на ПАВ // Радиотехника и электроника. 2002. Т.47, №4. С.510–512.
6. Гуляев Ю.В., Плесский В.П. Распространение поверхностных акустических волн в периодических структурах // Успехи физических наук. 1989. Т.157, вып.1. С.85–120.
7. Datta S., Hunsinger B.J. An Analysis Energy Storage Effects on SAW Propagation in Periodic Arrays // IEEE Trans. on UFFC. 1980. Vol.27, №6. P.333–341.