

*С.П. АРСЕНИЧЕВ, Г.Н. БЕНДЕБЕРЯ, Е.В. ГРИГОРЬЕВ, канд. техн. наук,
С.А. ЗУЕВ, канд. техн. наук, Н.И. СЛИПЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук,
В.В. СТАРОСТЕНКО, д-р физ.-мат. наук, Е.П. ТАРАН, канд. физ.-мат. наук*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК В ВОЛНОВОДЕ

Введение

Широкие возможности изучения структуры, свойств и характеристик тонких пленок появились сравнительно недавно – с появлением микроскопии, обеспечивающей нанометровое разрешение, с использованием современной измерительной аппаратуры. Поглощение электромагнитных волн в тонких пленках объясняется их рассеянием в кристаллитах структуры с преобразованием в акустические волны [1]. При этом под тонкими понимаются пленки, толщина которых много меньше скин-слоя и соизмерима с длиной свободного пробега электронов (пленки толщиной менее 50 нм) [1 – 3].

В оптике известно явление резонансного поглощения электромагнитных волн нанометровыми проводящими пленками. Первая теория оптических свойств полупрозрачных металлических пленок, которые представлялись в виде коллоидных растворов, была разработана еще в начале прошлого века [4]. Следует отметить, что поглощение электромагнитных волн в тонких пленках имеет место не только в оптическом, но и в радиодиапазоне, в частности диапазоне СВЧ. В оптике нанометровые пленки находят различные применения, в частности в интерферометрии, при их использовании в различных датчиках и т.д. [2, 3, 6].

В радиотехнике и электронике интерес к тонким проводящим пленкам связан в большей степени либо с их использованием в качестве защитных покрытий, либо с созданием элементов приборов и устройств с заданными поверхностными свойствами. В то же время тонкие проводящие пленки являются неотъемлемой частью полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. При воздействии электромагнитных полей на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы происходит их преобразование в акустические волны в проводящих пленках, что может приводить к необратимым как механическим, так и электрическим деструктивным явлениям. В частности, при воздействии электромагнитных полей на микросхемы наиболее уязвимым микроструктурным элементом является металлизация [7].

Численное моделирование электротепловых процессов на упрощенной модели микросхем (металлодиэлектрической структуре – МДС) предполагает последовательное решение дифракционной и электротепловой задач. Для тонких пленок коэффициенты в волновом уравнении и в уравнении теплопроводности (удельная проводимость, удельная теплопроводность и коэффициент теплопроводности) зависят от толщины пленки и ряда других факторов и эти значения необходимо брать из экспериментальных данных.

В большинстве работ по тонким пленкам основное внимание уделяется исследованию их структуры, проводимости, отражающим свойствам, вопросам разрушения пленок при воздействии электромагнитных волн, либо имитации такого воздействия [1, 5]. Исследования прохождения и поглощения в тонких проводящих пленках, если и производились, то только на фиксированных частотах [5, 6].

Цель работы – экспериментальные исследования отражения, прохождения и поглощения электромагнитных волн в тонких пленках меди, алюминия и никрома в диапазоне длин волн 2 – 10 см.

Аппаратура и методика проведения экспериментальных исследований

При проведении экспериментальных исследований использовались панорамные измерители коэффициента стоячей волны (K_{CB}) и ослабления (A) – P2-56 (3,0 – 4,1 ГГц), P2-61 (8,3 – 12,05 ГГц), P2-66 (17,5 – 25,5 ГГц).

Проводящие пленки наносились методом магнетронного напыления на подложки из ситалла и боросиликатного стекла. Исследования дифракции проводились в волноводе на МДС для пленок из меди, алюминия и никрома толщиной от 5 нм до 1,5 мкм. Характеристики пленок толщиной менее 10 нм, в особенности толщиной менее 5 нм, очень зависят от технологии напыления, характеристик подложек и ряда других факторов [2, 3, 5]. Актуальным является также вопрос измерения толщины тонких пленок. В работе представлены результаты исследований для пленок толщиной 10 нм и более. К точности определения толщины пленок особых требований не предъявлялось – предполагалось, что толщина пленки однозначно связана со временем напыления.

МДС размещались в центре поперечного сечения волновода в трех ориентациях (рис.1, а - с). Поперечное сечение проводящей грани МДС имело размеры 18×18 мм для волновода сечения 34×72 мм (P2-56). На других частотах сохранялось отношение площади металлизации к площади поперечного сечения волновода такое же, как и при исследовании на панорамном измерителе P2-56, либо тонкая пленка располагалась по всему поперечному сечению волновода, что оговаривается отдельно.

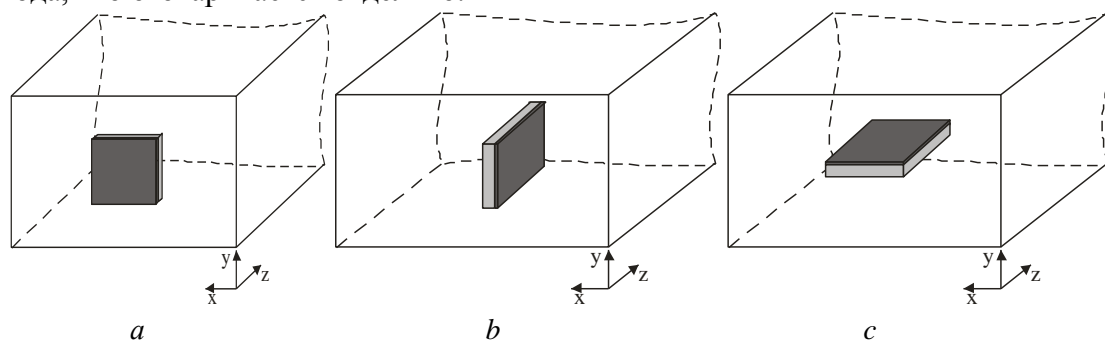


Рис.1. Характерные ориентации МДС в волноводном тракте

Для K_{CB} и ослабления использовались принятые в технике СВЧ определения:

$$K_{CB} = \frac{1 + |\dot{\Gamma}|}{1 - |\dot{\Gamma}|} \quad (1)$$

$$A = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{прош}}{P_{пад}} \right) \quad (2)$$

$$|\dot{\Gamma}| = \frac{|\dot{E}_{отр}|}{|\dot{E}_{пад}|} = \frac{\sqrt{P_{отр}}}{\sqrt{P_{пад}}} \quad , \quad (3)$$

где $|\dot{\Gamma}|$ – коэффициент отражения по полю.

Для волн в волноводе справедливо соотношение

$$P_{пад} = P_{отр} + P_{погл} + P_{прош} \quad \text{или} \quad R + T + L = 1, \quad (4)$$

где $P_{пад}$, $P_{отр}$, $P_{погл}$, $P_{прош}$ – мощности падающей, отраженной, поглощенной и прошедшей волн соответственно; $R = \frac{P_{отр}}{P_{пад}}$ – коэффициент отражения, $T = \frac{P_{прош}}{P_{пад}}$ – коэффициент

прохождения, $L = \frac{P_{погл}}{P_{пад}}$ – коэффициент поглощения.

В оптике R , T и L называют оптическими коэффициентами. Связь R , T и L со значениями K_{CB} и A следующая:

$$R = \left(\frac{K_{CB} - 1}{K_{CB} + 1} \right)^2, \quad T = 10^{0,1 \cdot A}, \quad L = 1 - \left(\frac{K_{CB} - 1}{K_{CB} + 1} \right)^2 - 10^{0,1 \cdot A} \quad (5).$$

Следует отметить, что значения K_{CB} и ослабления, совместно с соотношениями (5) в полной мере характеризуют дифракционные свойства МДС в приближении основной волны в дальней зоне волновода.

Результаты экспериментальных исследований

При проведении экспериментальных исследований наибольший интерес представляет влияние таких параметров МДС как материал, толщина и ориентация проводящей пленки в волноводе, а со стороны воздействующего фактора – влияние частоты на дифракционные свойства МДС в волноводе. Экспериментальные исследования проводились на МДС с подложками толщиной 0,5 – 1 мм. Как показали экспериментальные исследования, используемые материалы подложек с близкими значениями ε (ситалл, боросиликатное стекло) практически не влияют на значения K_{CB} и ослабления A . Следует отметить, что для пленок толщиной менее 10 нм материал подложки существенно влияет на структуру пленок [5].

В соответствии с физическими представлениями и результатами экспериментальных исследований, МДС в ориентации рис.1, *с* не влияет на прохождение волны в волноводе ($K_{CB} \approx 1$, $A \approx 0$). Поэтому далее все зависимости, кроме специально оговоренных, приводятся для ориентации МДС в волноводе рис.1, *а*. В работе приводятся осциллографические (непрерывные) зависимости K_{CB} от частоты, полученные на индикаторных блоках панорамных измерителей.

На рис.2 и 3 приведены зависимости $K_{CB} = K_{CB}(f)$ и $A = A(f)$, снятые в диапазоне длин волн вблизи $\lambda = 10$ см. Поведение зависимостей K_{CB} естественное (рис.2), т.е. с увеличением толщины пленки (0 – 500 нм) возрастают значения K_{CB} . Значения K_{CB} также возрастают по мере роста частоты: увеличиваются «электрические размеры» пленки в волноводе. Конечные и практически одинаковые значения K_{CB} с пленками толщиной более 50 нм обусловлены дифракцией на МДС с соответствующими размерами и сформировавшейся структурой пленки с электрофизическими параметрами, характерными для рассматриваемых материалов.

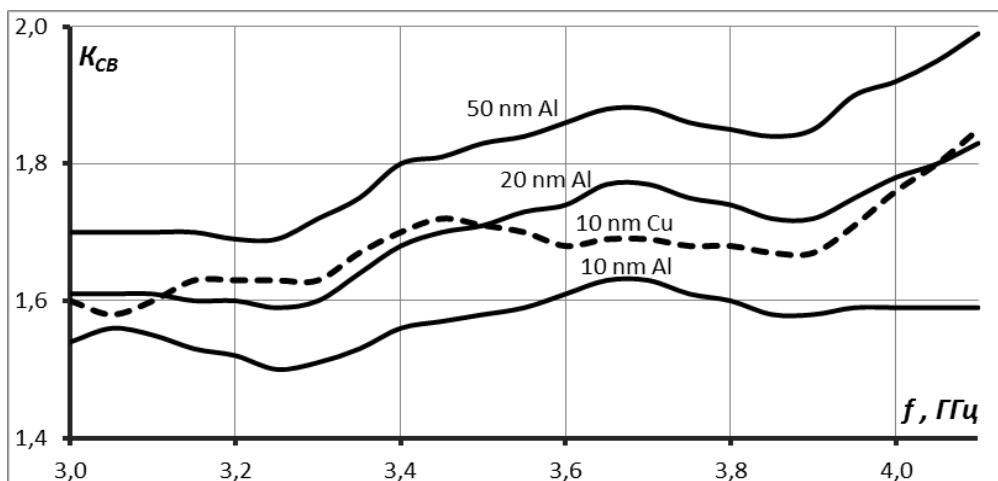


Рис.2. Зависимости K_{CB} от частоты при различных толщинах пленок

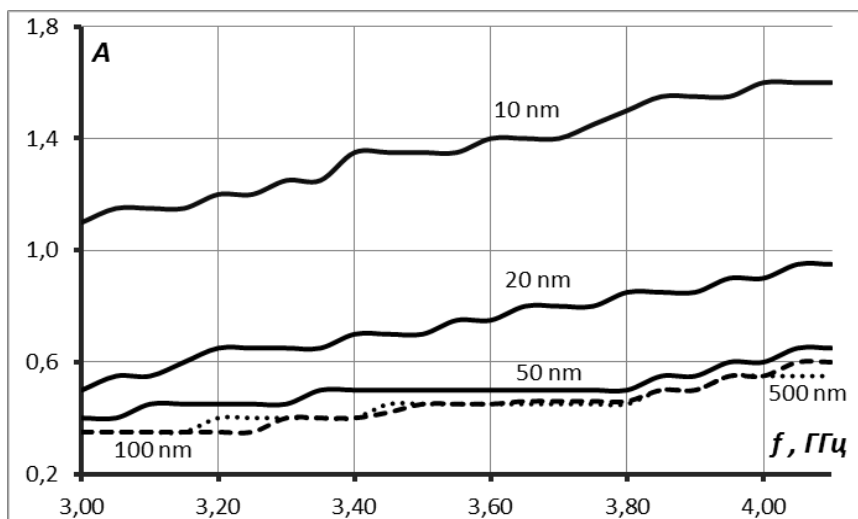


Рис.3. Зависимости ослабления A от частоты при различных толщинах алюминиевых пленок

Площадь МДС (пленки) составляла порядка 0,15 площади поперечного сечения волновода. Пленки толщиной более 50 нм, расположенные по всему поперечному сечению волновода, практически приводят к его короткому замыканию: толщина скин-слоя при $\lambda=10$ см составляет 30 мкм, $K_{CB} \rightarrow \infty$. Экспериментальные исследования показывают, что для пленок из Al, Cu и NiCr толщиной более 50 нм значения K_{CB} достаточно близки между собой, т.е. величина удельной проводимости не оказывает существенного влияния на отражающие свойства пленок. У медной пленки толщиной 10 нм значения K_{CB} (отражение) больше, чем у алюминиевой пленки той же толщины (рис.2). В первую очередь, это может быть обусловлено структурой тонких пленок [2, 3, 5]. Зависимости коэффициентов отражения ($|R|$, R) и прохождения (T) от частоты подобны зависимостям, приведенным на рис.2 и 3.

При измерении ослабления значения A получаются отрицательными. Ниже, на рисунках с различными зависимостями ослабления, приводятся соответствующие зависимости модуля ослабления. Для коэффициента прохождения T : чем больше модуль A , тем меньше значения относительной прошедшей мощности T .

Из рис.3 видно, что при толщинах алюминиевой пленки менее 20 нм ослабление сильно возрастает, особенно это видно для МДС с пленкой толщиной 10 нм. Поскольку отражение при уменьшении толщины пленки также уменьшается, следовательно, это обусловлено потерями (поглощением) в пленке.

На рис.4 приведены зависимости $A = A(f)$ в диапазоне частот 3 – 4,1 ГГц для различных материалов пленок. Ослабление падающей волны медной пленки заметно отличается от ослабления пленок из Al и NiCr (рис.4). Для тонких пленок их электрофизические параметры (проводимость, теплоемкость и т.д.) являются не только функциями толщины пленки, но и существенно зависят от структуры пленки, технологии и других факторов. Это как раз видно из соответствующих зависимостей на рис.2 – 4. В частности, при различии в значениях удельной проводимости у алюминия и никрома почти на два порядка, ослабления у них достаточно близки для пленок толщиной 10 нм (рис.4). В то же время при близких значениях удельной проводимости у меди и алюминия ослабления достаточно сильно разнятся. Это свидетельствует о том, что на поглощение в тонких пленках сильно влияет структура пленок, их однородность по составу и присутствие окислов, а также методика их напыления. В соответствии с работами [2, 5, 6] пленки из алюминия окисляются и их дифракционные характеристики оказываются во многом близки к подобным для пленок из NiCr.

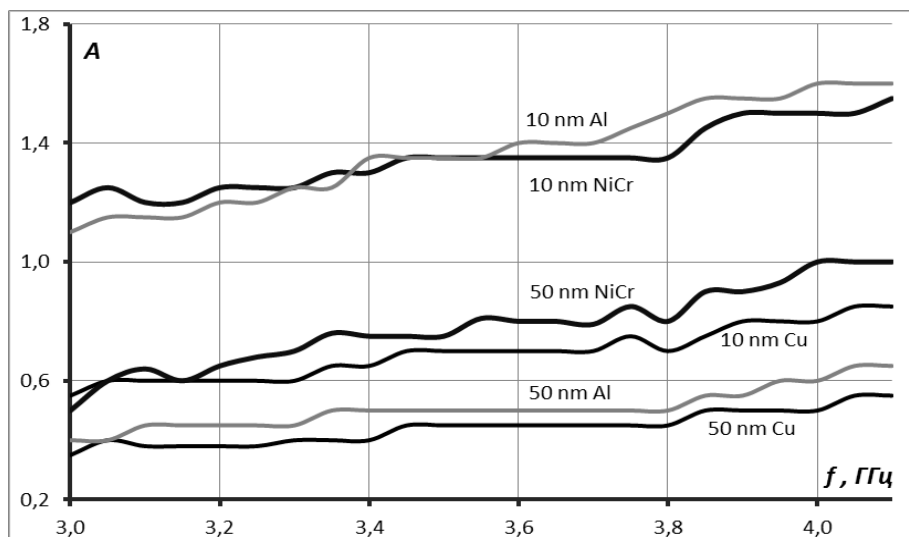


Рис.4. Зависимости ослабления A от частоты для пленок из Cu, Al и NiCr

В проведенных экспериментальных исследованиях система «МДС – волновод» не являлась резонансной. Изменение площади «перекрытия» поперечного сечения не сказывалось на характере зависимостей $K_{CB} = K_{CB}(f)$ и $A = A(f)$ в диапазоне длин волн 2 – 10 см, но оказывало влияние на значения этих характеристик. В то же время ориентация МДС в волноводе («поляризационный фактор») определяет преобразование электромагнитного излучения в акустические волны.

На рис.5 приведены зависимости $A = A(f)$ для пленки в ориентации рис.1, *b*. Для преобразования электромагнитных волн в акустические необходимо, чтобы вектор напряженности электрической компоненты поля был параллелен плоскости тонкой пленки. В ориентации рис.1, *b* значения $K_{CB} \approx 1$ и практически не зависят от частоты в диапазоне длин волн 2 – 10 см при пропорциональном изменении размеров МДС в волноводах разного сечения. Зависимости, приведенные на рис.4 и 5, во многом идентичны и служат для демонстрации влияния положения пленки и поляризации волны на ее преобразование в акустическую волну.

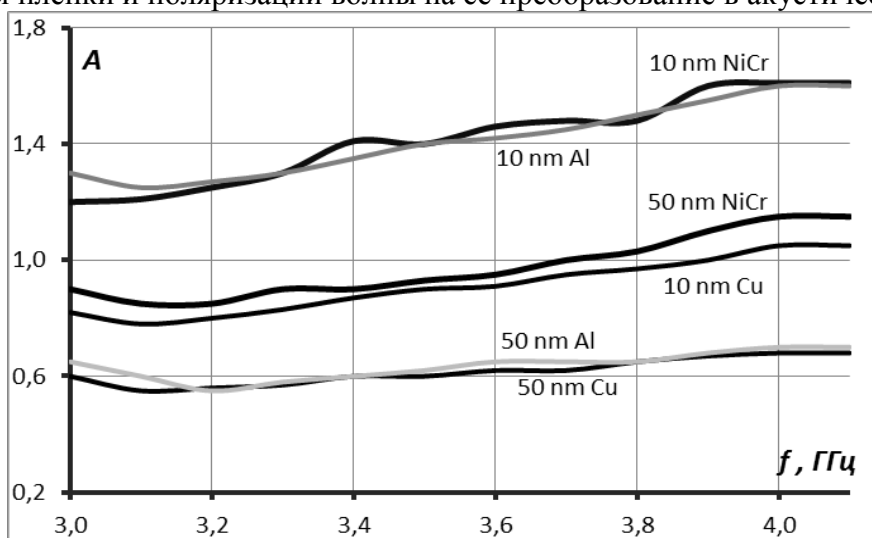


Рис.5. Зависимости ослабления A от частоты для пленок из Cu, Al и NiCr в ориентации рис.1, *b*

На рис.6 приведены зависимости ослабления A от толщины пленки для Cu, Al и NiCr. В соответствии с тенденцией поведения зависимостей $A = A(d)$ следует, что максимум рассеяния электромагнитных волн в пленках приходится на толщины $d = 2 - 5$ нм (в пределе при толщине пленки $d \rightarrow 0$, $|A| \rightarrow 0$).

Экспериментальные исследования проводились для пленок толщиной от 5 нм и до 1 мкм. Начиная с пленок толщиной менее 10 нм характеристики пленок могут достаточно сильно отличаться в зависимости от технологии их нанесения и ряда других факторов [1 – 3, 5]. Поэтому в работе приведены результаты исследований для пленок толщиной $d \geq 10$ нм. Участок от 1 до 5 нм требует отдельных исследований, а также договоренностей по технологии нанесения пленок, материала подложки, аппаратуры по исследованию структуры и характеристик пленок, методики проведения экспериментальных исследований и т.д.

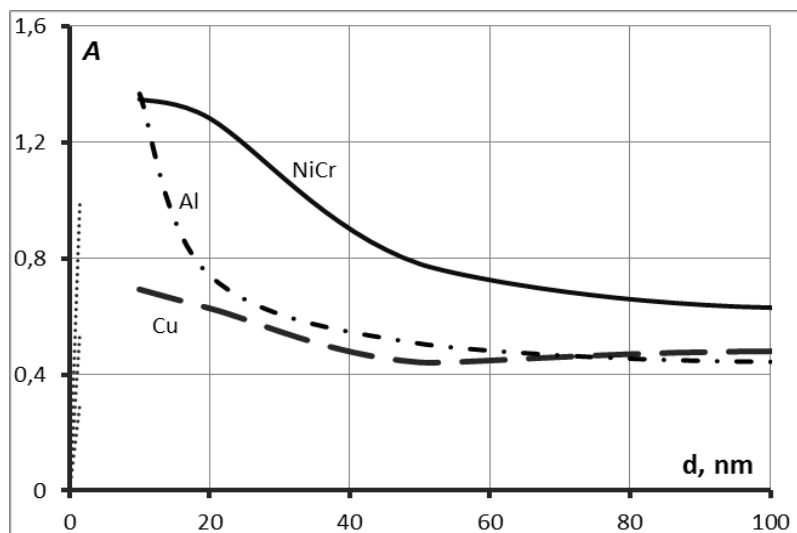


Рис.6. Зависимость ослабления A от толщины пленки ($f=3.4$ ГГц)

Для подложки без проводящей пленки значения ослабления близки к нулю. Поэтому на рис.6 ход зависимостей $A=A(d)$ для $d < 1 - 2$ нм обозначен направлением. Как упоминалось выше, максимальное значение поглощения зависит от ряда факторов, но для пленок из меди и алюминия даже при $d = 10$ нм не было максимума поглощения.

В целом поведение K_{CB} и ослабление A в диапазонах длин волн вблизи 4 и 2 см аналогичны подобным зависимостям вблизи $\lambda=10$ см. На рис.7 и 8 приведены зависимости относительной поглощенной мощности $L = \frac{P_{погл}}{P_{над}}$ от толщины пленок из Cu, Al и NiCr в диапазоне длин волн вблизи 4 и 2 см.

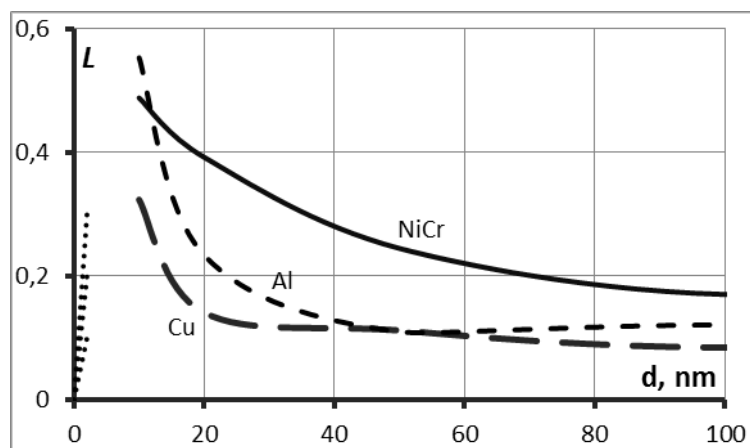


Рис.7. Зависимость коэффициента поглощения L от толщины пленок из Cu, Al и NiCr на частоте $f=10$ ГГц

Во всех диапазонах длин волн (рис.6 – 8) значительное поглощение в пленках из Cu, Al имеет место при толщине пленки менее 30 нм, для пленок из NiCr поглощение растет при $d \leq$

50 нм. В частности, для пленок из Al и NiCr толщиной $d = 10 - 20$ нм проходит около 70 % мощности падающей волны, в то время как для пленок толщиной $d > 50$ нм проходит порядка 90 % мощности падающей волны. Соответственно, в пленках из Al и NiCr толщиной $d = 10 - 20$ нм поглощается около 20 % мощности падающей волны, в то время как в толстых пленках ($d > 50$ нм) поглощается менее 10 % мощности падающей волны (для исследуемого соотношения площадей пленки и поперечного сечения волновода). Следует отметить, что при резонансе ($d = 1 - 3$ нм) поглощается порядка 40 % мощности падающей волны [6].

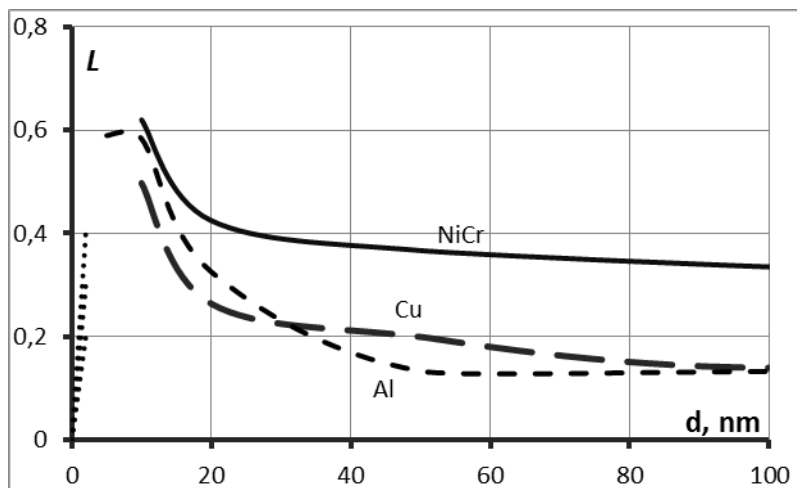


Рис.8. Зависимость коэффициента поглощения L от толщины пленок из Cu, Al и NiCr на частоте $f = 20$ ГГц

Заключение

Проведенные исследования показывают, что K_{CB} (коэффициенты отражения $|Γ|$ и R) уменьшаются по мере уменьшения толщины пленки. При этом на их значения влияет не столько величина удельной проводимости материала пленки, сколько структура пленки.

Поведение ослабления A (коэффициента прохождения T) в тонких пленках определяется поглощением (коэффициентом поглощения L), значения которого зависят нелинейно от толщины и определяется технологией и рядом других факторов. В значительной мере поглощение возрастает для пленок толщиной менее 50 нм. Это обстоятельство необходимо учитывать при рассмотрении механизмов взаимодействия электромагнитных волн с микроструктурными элементами микросхем, а также при их работе в напряженных токовых режимах.

Результаты проведенных исследований необходимы для корректного построения численной модели дифракции и моделирования электротепловых процессов в кинетическом приближении.

Список литературы: 1. Быков Ю.А., Карпунин С.Д., Газукина Е.И. О некоторых особенностях структуры и свойств металлических "тонких" плёнок // МиТОМ. – 2000. – №6. – С.45-47. 2. Розенберг Г.В. Оптика тонкослойных покрытий. – М.: Физматгиз, 1958. – 570 с. 3. Борзяк П.Г., Кулюпин Ю.А. Электронные процессы в островковых металлических плёнках. – Киев: Наук. думка, 1980. – 240 с. 4. Maxwell-Garnett. Phil. Trans. Roy. Soc 203A, 385 (1904); 205A, 237 (1906). 5. Антонец И.В., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Проводящие и отражающие свойства пленок нанометровых толщин из различных металлов // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, N 12. – С. 1481-1487. 6. Вдовин В.А. Нанометровые металлические пленки в датчиках мощных СВЧ импульсов // III Всерос. конф. «Радиолокация и радиосвязь». – М., 26-30 октября 2009 г.: Материалы конференции. – М.: ИРЭ РАН, 2009. – С. 832–835. 7. Ахрамович Л.Н., Григорьев Е.В., Зуев С.А., Старостенко В.В., Чурюмов Г.И. Воздействие импульсных электромагнитных полей на интегральные микросхемы памяти // Радиоэлектроника и информатика. – 2006. – №4 (35). – С.15-17.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники
Таврический национальный университет
имени В.И. Вернадского

Поступила в редколлегию 11.10.2013