УДК 537.8
DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-52-58

Сергей Дмитриевич Крылов,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
(672014, Россия, г. Чита, ул. Недорезова, 16 а),
e-mail: lgc255@mail.ru

Использование микроволнового излучения дли исследования тонких плёнок жидкости на поверхности металла

В статье представлены результаты исследования электрических свойств тонких плёнок жидкости на поверхности металла с помощью микроволн. Исследования были выполнены в медном прямоугольном волноводе на частоте излучения 54.5 ГГц. Измерялась мощность микроволнового излучения, проходящего через волновод. На стенках волновода методом конденсации газа в жидкость при его охлаждении осаждались плёнки жидкого кислорода и аргона. Исследования выполнялись при предположении, что появление плёнки жидкости на стенках волновода будет менять величину проходящей мощности, т. е. проходящее микроволновое излучение будет зависеть от свойств плёнки на стенках волновода. Охлаждение осуществлялось с помощью жидкого азота. Обнаружено уменьшение электромагнитных потерь при пропускании микроволнового излучения. Этот эффект можно объяснить появлением высокопроводящей плёнки на границе металл – жидкость. Следовательно, использование микроволн для изучения тонких слоёв жидкости на металлической поверхности может дать необычную и недоступную для других методов информацию.

Ключевые слова: микроволновое излучение, электропроводность, тонкие плёнки жидкости, конденсация газа

Введение. Свойства вещества в тонком поверхностном слое на границе, отделяющей одно вещество от другого, значительно отличаются от свойств внутри объёма. Представляет научный и практический интерес изучение свойств вещества в тонком поверхностном слое, на границах двух сред [10]. Плёнки проявляют самые разнообразные свойства и в настоящее время широко используются в оптике, медицине, электронике и микроэлектронике, бытовых приборах и т. д. Соответственно широк и многообразен фронт исследований способов получения плёнок [4; 6] и их свойств [2; 3; 7; 11; 12].

В данной работе предпринята попытка исследовать свойства тонкого слоя жидкости на поверхности металла с помощью микроволн (СВЧ волн). Как известно, микроволновое излучение проникает в проводящие среды на глубину, соответствующую так называемому скин-слою (δ). Толщина скин-слоя определяется электрической проводимостью материала (σ) и частотой излучения (f): $\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi\mu\sigma f}}$ [8]. В этой формуле μ – магнитная проницаемость материала, для меди равна 1. Предполагается, что в тонком слое жидкости на поверхности металла могут появиться особые электрические свойства [5]. Такие свойства теоретически предсказаны для поверхности льда для квазижидкого слоя толщиной в единицы и десятки нанометров, проводимость которого возрастала на шесть порядков, по сравнению с водой [9]. То же для контакта двух диэлектриков с большой разницей значений статической диэлектрической проницаемости [13; 14]. Экспериментально плёнку с проводимостью выше

 © Крылов С. Д., 2017

проводимости меди для осаждения азота и, возможно, кислорода на внутренней поверхности медного резонатора наблюдали в [1], однако это наблюдение не было подтверждено другими способами.

Цель настоящей работы заключалась в измерении прохождения микроволнового излучения через металлический волновод, на внутреннюю поверхность которого осаждали различные жидкости. Для их равномерного осаждения использовали конденсацию газов в жидкое состояние при понижении температуры стенок волновода. Так как электромагнитная волна при распространении в волноводе взаимодействует только с внутренней поверхностью волновода, то появление жидкого слоя на поверхности волновода приводит к появлению поглощения, если проводимость слоя меньше проводимости металла или наоборот. Измеряя мощность проходящего через волновод микроволнового излучения, можно определить относительное изменение проводимости тонкого поверхностного слоя жидкости на металлической поверхности, т.е. получить сведения о необычных свойствах плёнки.

Описание эксперимента. Измерения выполнялись в прямоугольном волноводе, на внутренние стенки которого осаждали различные жидкости. Для их равномерного осаждения использовали конденсацию газов в жидкое состояние при понижении температуры волновода. Охлаждение исследуемого волновода осуществлялось с помощью жидкого азота следующим образом. Исследуемый волновод помещался в металлическую ёмкость, в которую по трубке из сосуда Дьюара подавался струйкой жидкий азот. Сама ёмкость вместе с волноводом помещалась в пенопластовый контейнер для термоизоляции. В начальный период волновод охлаждался парами азота, а затем жидкий азот заливал волновод. Температура, которую удавалось достичь, составляла -195.8 °C, т. е. равнялась температуре кипения жидкого азота. Через охлаждаемый волновод пропускались газы: кислород, температура кипения которого -183 °C, аргон, температура кипения – -186 °C, углекислый газ CO_2 и водород. Углекислый газ и водород исследовались для того, чтобы сравнить результаты измерений с аргоном и кислородом. Углекислый газ из газообразного состояния при атмосферном давлении переходит в твёрдое, минуя жидкое состояние при температуре -78.5 °C. Для водорода жидкого состояния с помощью охлаждения азотом достичь нельзя. Температура кипения водорода -259 °C, т. е. значительно ниже температуры кипения азота.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

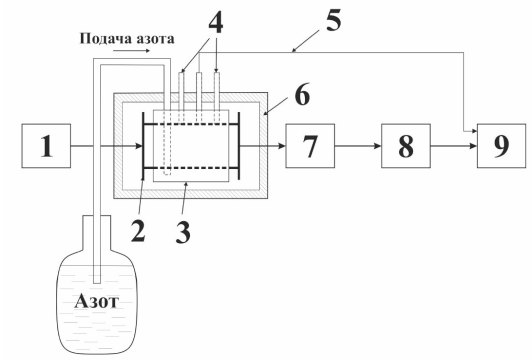

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – генератор микроволнового излучения Г4–142; 2 – исследуемый волновод; 3 – металлическая ёмкость; 4 – трубки для подвода газа в волновод; 5 – термопара; 6 – пенопластовый контейнер; 7 – вентиль; 8 – детектор; 9 – система сбора информации фирмы “Agilent”

Fig. 1. Diagram of the experimental setup: 1 – the microwave radiation generator G4-142; 2 – the studied waveguide; 3 – metal vessel; 4 – pipe for supplying a gas into the waveguide; 5 – thermocouple; 6 – foam container; 7 – valve; 8 – detector; 9 – the system of gathering information of the company “Agilent”

Сигнал от генератора микроволнового излучения Г4–142 подавался на исследуемый участок волновода, а далее через вентиль на детектор и систему сбора информации фирмы “Agilent”. Частота подаваемого сигнала 54.5 ГГц. Размеры исследуемого волновода: длина волновода 124 мм, внутренние размеры 5×3 мм. Волновод изготовлен из меди. Регистрация мощности проходящего микроволнового излучения осуществлялась непрерывно с записью на компьютер. Одновременно с измерением проходящей мощности излучения с помощью термопары регистрировалась температура исследуемого волновода.

Результаты измерений. Результаты измерений изменения проходящей мощности микроволнового излучения при заполнении волновода кислородом представлены на рис. 2.

Из рисунка видно, что при пропускании кислорода через волновод первоначально в момент появления жидкого кислорода наблюдалось небольшое увеличение сигнала в пределах 15 %. Это можно объяснить появлением плёнки кислорода на стенках волновода, что ведёт к улучшению прохождения микроволнового излучения через волновод. Далее наблюдались хаотические флуктуации проходящей мощности, связанные с увеличением толщины плёнки кислорода и стоком жидкости в нижнюю часть волновода. Когда в волноводе накопилось много жидкости, флуктуации уменьшились — средняя часть графика. Затем при нагревании наблюдался обратный процесс — увеличение флуктуаций и их исчезновение, когда весь кислород перешёл в газообразное состояние. Такое же поведение сигнала наблюдается с аргоном (рис. 3).

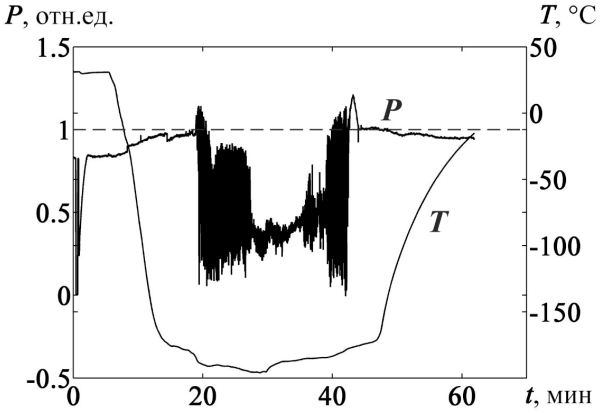

Рис. 2. Результаты измерений мощности проходящего через волновод микроволнового излучения P (в относительных единицах) при заполнении волновода жидким кислородом: левая ось – значения мощности; правая ось – температура волновода T; штриховая горизонтальная линия – уровень мощности, проходящей через волновод без жидкости

Fig. 2. The results of measurement of the power passing through the waveguide of the microwave radiation P (in relative units) when filling the waveguide with liquid oxygen: left axis – values of power; the right axis is the temperature of the waveguide T; the dashed horizontal line is the level power passing through the waveguide without fluid

Отличие от первого эксперимента в том, что в момент появления флуктуаций наблюдается более значительное увеличение сигнала приблизительно на 40 процентов.

При выполнении этого же эксперимента с водородом такого поведения сигнала не наблюдается (рис. 4).

Объясняется это тем, что водород в жидкое состояние не переходит и жидкости на стенках волновода не образуется.

Интересное наблюдение с углекислым газом (рис. 5).

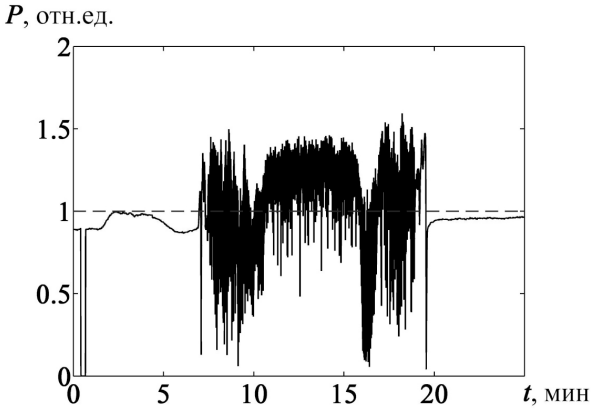

Рис. 3. Результаты измерений мощности проходящего через волновод микроволнового излучения при заполнении волновода жидким аргоном

Fig. 3. The results of measurement of the power passing through the waveguide of the microwave radiation when filling the waveguide with liquid argon

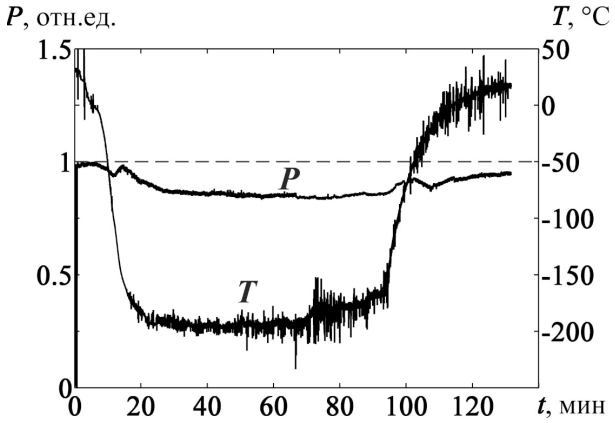

Рис. 4. Результаты измерений мощности проходящего через волновод микроволнового излучения P при заполнении волновода водородом

Fig. 4. The results of the measurement of the power passing through the waveguide of the microwave radiation P when filling the waveguide with hydrogen

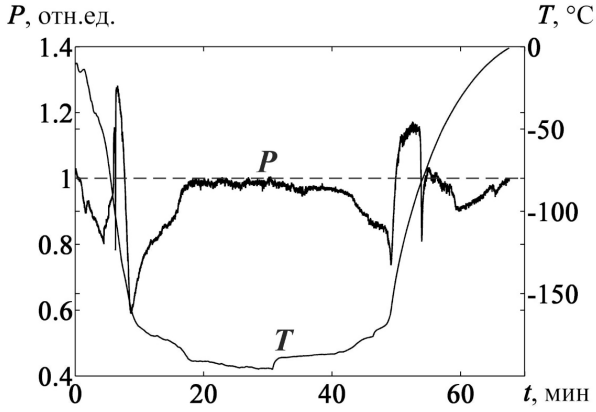

Рис. 5. Результаты измерений мощности проходящего через волновод микроволнового излучения P при заполнении волновода углекислым газом

Fig. 5. The results of measurement of the power passing through the waveguide of the microwave radiation P when filling the waveguide with carbon dioxide

Есть изменения сигнала, но быстрых флуктуаций, связанных с конденсацией газа, не наблюдается. Углекислый газ при температуре −78.5 °C переходит в твёрдое состояние, минуя жидкое.

Выводы.

1. В экспериментах по конденсации газа в жидкое состояние на внутренней поверхности металлических волноводов и измерении проходящей мощности на частоте 54.5 ГГц обнаружено уменьшение электромагнитных потерь при пропускании микроволнового излучения. Наблюдаемый эффект можно объяснить появлением высоко проводящей плёнки на границе металл – жидкость или на границе жидкость – воздух толщиной порядка 1 мкм (скин-слой).

2. Проводимость плёнки может быть выше проводимости меди. В части случаев в процессе конденсации пара проходящая мощность, по отношению к её значению для пустого волновода, значительно уменьшилась, что можно связать с изменением толщины плёнки и ухудшением её проводимости. Возможно также накопление жидкости в волноводе, которая увеличивает потери пропускания.

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что метод исследования тонких слоёв жидкости с помощью микроволн может дать необычную и недоступную для других методов информацию. Тем более, в этом методе можно легко менять условия эксперимента – использовать микроволновое излучение разных длин волн, использовать волноводы, сделанные не только из меди, но и из других металлов, таких, как железо, латунь и т. д. Изменять интенсивность микроволнового излучения, изменять скорость конденсации жидкости и толщины плёнки.

Список литературы

1. Бордонский Г. С., Гурулёв А. А., Крылов С. Д. Электромагнитные свойства нанослоя жидкого азота на поверхности различных веществ при измерениях в резонаторе // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 12. С. 8–15.

2. Бордонский Г. С., Филиппова Т. Г. Влияние перколяции на диэлектрические свойства мёрзлых дисперсных сред // Конденсированные среды и межфазные границы. 2002. Т. 4, № 1. С. 21–26.

3. Вартанян Т. А., Гладских И. А., Леонов Н. Б., Пржибельский С. Г. Тонкие структуры и переключение электропроводности в лабиринтных плёнках серебра на сапфире // Физика твёрдого тела. 2014. Т. 56, вып. 4. С. 783–789.

4. Дунюшкина Л. А. Введение в методы получения плёночных электролитов для твёрдооксидных топливных элементов. Екатеринбург: УРО РАН, 2015. 126 с.

5. Ениколопян Н. С., Берлин Ю. А., Бешенко С. И., Жорин В. А. Аномально низкое электрическое сопротивление тонких плёнок диэлектриков // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 33, вып. 10. С. 508–511.

6. Кукушкин С. А., Осипов А. В. Процессы конденсации тонких плёнок // УФН. 1998. Т. 168, № 10. С. 1083–1116.

7. Лачинов А. Н., Воробьёва Н. В. Электроника тонких слоёв широкозонных полимеров // УФН. 2006. Т. 176, № 12. С. 1249–1266.

8. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1970. Т. 1. 439 с.

9. Рыжкин И. А., Петренко В. Ф. Протонная структура льда вблизи границы лёд — металл // ЖЭТФ. 2005. Т. 128, вып. 2. С. 364–369.

10. Уваров Н. Ф. Композиционные твёрдые электролиты. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 258 с.

11. Хасс Г. Физика тонких плёнок. М.: Мир, 1967. Т. 1. 343 с.

12. Чопра К. Л. Электрические явления в тонких плёнках. М.: Мир, 1972. 435 с.

13. Korobeynikov S. M., Drozhzhin A. P., Furin G. G., Charalambakos V. P., Agoris D. P. Surface conductivity in liquid-solid interface due to image force // Proceedings of 2002 IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids. ICDL. 2002. P. 270–273.

14. Korobeynikov S. M., Melekhov A. V., Soloveitchik Yu. G., Royak M. E., Agoris D. P., Pyrgioti E. Surface conductivity at the interface between ceramics and transformer oil // Journal of Physics D: Applied Physics. 2005. Vol. 38, No. 6. P. 915–921.

Статья поступила в редакцию 05.05.2017; принята к публикации 15.05.2017

Библиографическое описание статьи

Крылов С. Д. Использование микроволнового излучения для исследования тонких плёнок жидкости на поверхности металла // Учёные записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2017. Т. 12, № 4. С. 52–58. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-52-58.

Sergei D. Krylov,
Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher,
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
(16 a Nedorezova st., Chita, 672014, Russia),
e-mail: lgc255@mail.ru

Using Microwave Radiation to Study Thin Liquid Films on a Metal Surface

This paper presents results of an investigation of the electrical properties of thin liquid films on a metal surface by means of microwaves. The studies were carried out in a copper rectangular waveguide at frequency of 54.5 GHz. The microwave radiation power passing through the waveguide was measured. The films of liquid oxygen and argon on the walls of the waveguide were deposited by the method of condensation from gas to liquid upon cooling. The investigations were carried out under the assumption that the appearance of a liquid film on the walls of the waveguide will change the value of the transmitted power, i. e. it will depend on the properties of the film on the walls of the waveguide. Cooling was carried out with the help of liquid nitrogen. A decrease in the electromagnetic losses during the microwave radiation passing was detected. This effect can be explained by the appearance of a high-conductivity film at the boundary metal – liquid. Therefore, the use of microwaves to study thin layers of liquid on a metal surface can give unusual and not available for other methods information.

Keywords: microwave radiation, electric conductivity, thin liquid films, gas condensation

References

1. Bordonskii G. S., Gurulev A. A., Krylov S. D. Elektromagnitnye svoistva nanosloya zhidkogo azota na poverkhnosti razlichnykh veshchestv pri izmereniyakh v rezonatore // Pis'ma v ZhTF. 2011. T. 37, vyp. 12. S. 8–15.

2. Bordonskii G. S., Filippova T. G. Vliyanie perkolyatsii na dielektricheskie svoistva merzlykh dispersnykh sred // Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy. 2002. T. 4, № 1. S. 21–26.

3. Vartanyan T. A., Gladskikh I. A., Leonov N. B., Przhibel'skii S. G. Tonkie struktury i pereklyuchenie elektroprovodnosti v labirintnykh plenkakh serebra na sapfire // Fizika tverdogo tela. 2014. T. 56, vyp. 4. S. 783–789.

4. Dunyushkina L. A. Vvedenie v metody polucheniya plenochnykh elektrolitov dlya tverdooksidnykh toplivnykh elementov. Ekaterinburg: URO RAN, 2015. 126 s.

5. Enikolopyan N. S., Berlin Yu. A., Beshenko S. I., Zhorin V. A. Anomal'no nizkoe elektricheskoe soprotivlenie tonkikh plenok dielektrikov // Pis'ma v ZhETF. 1981. T. 33, vyp. 10. S. 508–511.

6. Kukushkin S. A., Osipov A. V. Protsessy kondensatsii tonkikh plenok // UFN. 1998. T. 168, № 10. S. 1083–1116.

7. Lachinov A. N., Vorob'eva N. V. Elektronika tonkikh sloev shirokozonnykh polimerov // UFN. 2006. T. 176, № 12. S. 1249–1266.

8. Lebedev I. V. Tekhnika i pribory SVCh. M.: Vysshaya shkola, 1970. T. 1. 439 s.

9. Ryzhkin I. A., Petrenko V. F. Protonnaya struktura l'da vblizi granitsy led — metall // ZhETF. 2005. T. 128, vyp. 2. S. 364–369.

10. Uvarov N. F. Kompozitsionnye tverdye elektrolity. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2008. 258 s.

11. Khass G. Fizika tonkikh plenok. M.: Mir, 1967. T. 1. 343 s.

12. Chopra K. L. Elektricheskie yavleniya v tonkikh plenkakh. M.: Mir, 1972. 435 s.

13. Korobeynikov S. M., Drozhzhin A. P., Furin G. G., Charalambakos V. P., Agoris D. P. Surface conductivity in liquid-solid interface due to image force // Proceedings of 2002 IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids. ICDL. 2002. P. 270–273.

14. Korobeynikov S. M., Melekhov A. V., Soloveitchik Yu. G., Royak M. E., Agoris D. P., Pyrgioti E. Surface conductivity at the interface between ceramics and transformer oil // Journal of Physics D: Applied Physics. 2005. Vol. 38, No. 6. P. 915–921.

Received: May 05, 2017; accepted for publication May 15, 2017

Reference to article

Krylov S. D. Using Microwave Radiation to Study Thin Liquid Films on a Metal Surface // Scholarly Notes Of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2017. Vol. 12, No. 4. PP. 52–58. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-52-58.