

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ И ФЛУКТУАЦИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНОК

А.А. Шульгинов, Н.С. Забейворота

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

E-mail: shulginovaa@susu.ru; zabeivorotans@susu.ru

Аннотация. Воздействие импульсных электромагнитных полей на металлические плёнки, которые являются основой современной микро- и наноэлектроники, может приводить к изменению их характеристик проводимости и свойств поверхности. В данной работе поставлена цель изучить влияние электромагнитных импульсов на состояние поверхности тонких металлических плёнок Вi, Cr и Fe и исследовать влияние электромагнитных импульсов на проводимость и флуктуации проводимости этих плёнок. Исследуемые образцы были подвергнуты воздействию наносекундными электромагнитными импульсами без несущей частоты в течение 30 мин. Обнаружено, что такое воздействие сильнее всего изменило шероховатость поверхности плёнки хрома, в меньшей степени – плёнки висмута, а у плёнки железа воздействие не вызвало существенных изменений поверхности. Железная плёнка оказалась наиболее устойчивой к воздействию также и при исследовании проводимости. Её сопротивление и уровень флуктуаций не изменились. Воздействие на плёнку висмута привело к уменьшению среднего количества скачков и всплесков электропроводности в 2–3 раза. Воздействие на плёнку хрома привело к подобному же эффекту и к двукратному уменьшению уровня мелкомасштабных флуктуаций электропроводности.

Ключевые слова: металлическая плёнка; электропроводность; шероховатость поверхности; электромагнитные импульсы.

Введение

Металлические плёнки являются основой микро- и наноэлектроники, и воздействие импульсных электромагнитных полей может приводить к разрушению плёночных резисторов и других элементов наноэлектроники. Такое воздействие может приводить также к изменению структуры плёнки без заметных видимых изменений, что проявляется, например, в появлении нестационарного шума электропроводности. Причинами этого явления могут быть как внутренние явления (старение плёнок, рост дефектов), так и внешние воздействия, например, электромагнитные поля, радиация. Наши исследования направлены на изучение влияния импульсных электромагнитных полей на металлические плёнки. Воздействие наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) без несущей частоты на расплавленные металлы в процессе их кристаллизации приводит к снижению пористости, увеличению плотности, прочности, пластичности при одновременном уменьшении удельного сопротивления [1–3]. Цель нашей работы состояла в том, чтобы исследовать изменения в результате облучения НЭМИ без несущей частоты состояния поверхности плёнки и количественных характеристик флуктуаций проводимости металлических плёнок в низкочастотной области.

Эксперимент

В качестве объектов исследования были выбраны металлические плёнки Вi, Cr, Fe, причём плёнки висмута и хрома были нанесены термовакuumным методом на подложки из поликора, а плёнка железа – ионно-плазменным методом на подложку из ситалла. Размеры подложек – 48×60 мм. Вначале были определены параметры поверхности и проводимости плёнок.

Для исследования проводимости была собрана установка, включающая в себя контейнер с исследуемыми плёнками, помещённый в термостат, и компьютер, оснащённый платой сбора данных (ПСД). Температура поддерживалась в течение всего времени измерения $15,0 \pm 0,5$ °С.

Установка с плёнками была изолирована от электромагнитных помех. На контакты 1 и 2 подавалось напряжение 1–2 В (рис. 1). На противоположные стороны плёнок были наложены электроды в виде узких полосок во всю ширину (48 мм). Флуктуации проводимости плёнки определялись по флуктуациям потенциалов двух платиновых электродов А и В, поставленных на плёнку, относительно соответствующих точек С и D полумостов. Эта разность потенциалов усиливалась с помощью операционных усилителей (ОУ) AD623 с низким уровнем собственных шумов. Сигналы с ОУ подавались на предусилитель ПСД L1450. Общее сопротивление плёнок определялось до начала измерений флуктуаций. Перед началом экспериментов по измерению флуктуаций проводимости плёнок были измерены собственные шумы мостов и усилительных трактов. Для этого вместо металлических плёнок использовались прецизионные непроволочные сопротивления С2-29 номиналом 100 Ом («модельные плёнки» – 3 штуки). После этого в контейнер были установлены по одной плёнке Vi, Cr и Fe. Регистрация флуктуаций проводимости проводилась в круглосуточном режиме с частотой 1,73 Гц со всех трёх плёнок по 2 канала с каждой. Установка позволяла регистрировать минимальные относительные флуктуации проводимости плёнки $\sim 10^{-7}$.

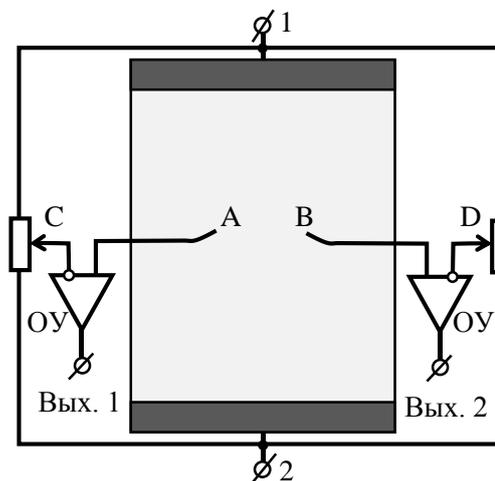


Рис. 1. Схема регистрации флуктуаций проводимости плёнки

После многодневных измерений флуктуаций проводимости эти плёнки были подвергнуты воздействию НЭМИ без несущей частоты в течение 30 мин. Частота электромагнитных импульсов длительностью 0,5 нс составляла 1000 Гц. Мощность одного импульса составляла ~ 1 МВт, а амплитуда напряжённости электрического поля, согласно расчётам, составляла около ~ 10 МВ/м. После этого воздействия проводилась повторная регистрация флуктуаций проводимости плёнок Vi, Cr, Fe, которая продолжалась 2 месяца.

Компьютерная обработка флуктуаций проводимости производилась с использованием вейвлет-анализа с целью выделения явлений разной природы: мелкомасштабные флуктуации, связанные с тепловым и фликкер-шумом проводимости, а также кратковременные резкие изменения (скачки и всплески). Мелкомасштабные флуктуации характеризуются средним относительным уровнем $\sigma\Delta/\sigma$, где $\sigma\Delta$ – стандартное отклонение удельной проводимости плёнки от среднего значения σ . Основные статистические характеристики отражены в табл. 1 для мелкомасштабных флуктуаций, скачков и всплесков проводимости.

Таблица 1

Характеристики проводимости плёнок

Плёнка	№	Общее сопротивление плёнки, Ом	Средний уровень мелкомасштабных флуктуаций $\sigma\Delta/\sigma$, 10^{-6}	Среднее число всплесков за 100 ч	Среднее число скачков за 100 ч	Длительность записи, ч
Модельная			1,6	0,2	0,2	607
Vi	1	6,65	14,1	9,4	8,9	837
	2	7,45	14,8	4,2	3,4	2177
Cr	1	189,3	44,1	48,1	31,1	837
	2	172,9	24,9	22,1	8,5	2082
Fe	1	1,64	144	1,0	0,1	978
	2	1,63	130	4,7	0,2	2177

Прим.: 1 – до облучения, 2 – после облучения

Для анализа выбирались не все скачки и всплески, а только те, которые превышали 10-кратный порог по отношению к уровню мелкомасштабных флуктуаций. Как следует из этих данных, уровень мелкомасштабных флуктуаций с любой металлической плёнкой был как минимум на порядок выше, чем с «модельной плёнки», т. е. шумы усилительного тракта существенно не

влияти на исследуемые флуктуации. Полужирным шрифтом выделены значения величин, которые существенно изменились после облучения.

Измерения шероховатости поверхности проводились с использованием зондового сканирующего микроскопа SOLVER PRO. Основными параметрами, по которым производилась оценка состояния поверхностей плёнок, были выбраны – Ra (среднее арифметическое профиля шероховатости), Rq (среднее квадратичное отклонение высоты профиля от средней линии), Rm (средний размах высот) [4]. Эти параметры определялись в пределах выбранной базовой длины ~ 8 мкм. Для минимизации случайной погрешности, измерения параметров шероховатости производились в разных местах плёнки как на краях, так и в середине. Количество измерений – не менее 5. Для выбранных параметров поверхности (Ra , Rq , Rm) определялось математическое ожидание и стандартное отклонение. Затем был применён z-критерий для проверки гипотезы о равенстве средних величин до и после облучения [5, с. 389]. Результаты этих исследований показаны на рис. 2 и табл. 2–4. Если параметр, согласно этому статистическому критерию, показывает различие среднего значения с вероятностью более 90 %, то эти значения в таблицах выделялись полужирным шрифтом.

Плётка Bi

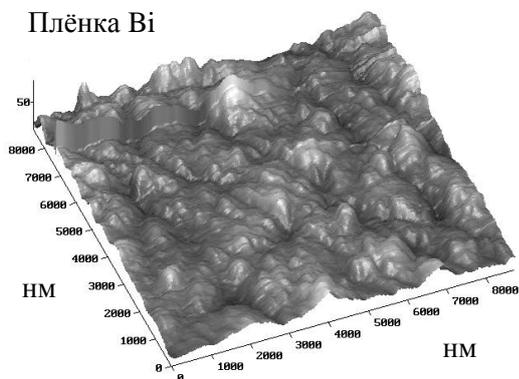


Таблица 2

Bi	Ra , нм	Rq , нм	Rm , нм
1	10,9±6,6	16,6±10,8	56,4±41,3
2	13,9±8,3	20,5±12,6	91,1±55,5
z	0,97	0,80	1,76

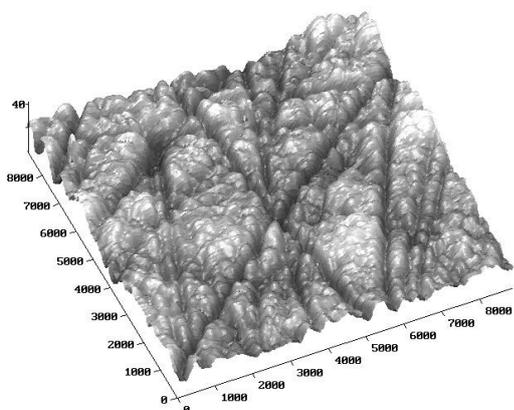


Таблица 3

Cr	Ra , нм	Rq , нм	Rm , нм
1	3,0±0,5	3,7±0,7	15,7±4,3
2	4,7±1,3	6,3±2,0	45,4±29,9
z	2,58	2,47	1,97

Плётка Cr

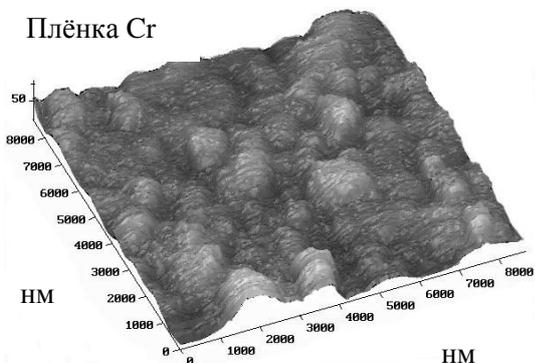


Таблица 4

Fe	Ra , нм	Rq , нм	Rm , нм
1	11,5±1,9	15,2±4,5	97,6±52,6
2	10,4±2,3	13,7±3,2	81,4±62,1
z	0,87	0,63	0,47

Рис. 2. Изображения металлических плёнок.

В табл. 2–4: 1 – до облучения, 2 – после облучения НЭМИ, z-критерий различия средних величин [5]

Основные результаты

Шероховатость поверхности плёнок под воздействие НЭМИ без несущей частоты сильнее всего изменилась у плёнки хрома (см. табл. 3), а также заметны изменения у плёнки висмута (см. табл. 2). У плёнки железа воздействие НЭМИ не вызвало существенных изменений (табл. 4).

Исследования проводимости плёнок до и после воздействия выявило, что железо оказалось наиболее стойким к этому воздействию (см. табл. 1). Его проводимость не изменилась, а проводимость висмута и хрома изменилась примерно на 10 %.

Анализ флуктуаций проводимости плёнок показал:

1. Для плёнки Вi – примерно в 2 раза сократилось количество всплесков и скачков проводимости, что указывает на уплотнение плёнки.

2. Для плёнки Cr – эффект воздействия НЭМИ оказался ещё сильнее: сократилось количество всплесков и скачков проводимости, а также значительно уменьшился уровень мелкомасштабных флуктуаций.

3. Для плёнки Fe – после облучения несколько увеличилось количество всплесков в единицу времени, что указывает на образование внутренних дефектов.

Таким образом, воздействие НЭМИ на металлические плёнки может приводить к появлению поверхностных и объёмных дефектов, что сказывается на шероховатости поверхности и уровне флуктуаций электропроводности.

Литература

1. Влияние наносекундных однополярных электроимпульсных воздействий на свойства сплава Cu-1%Cr. Связь свойств сплава с длительностью обработки расплава / Э.Ю. Гойда, И.Э. Игнатъев, П.В. Котенков и др. // Бутлеровские сообщения. – 2018. – Т. 53, № 2. – С. 145–152.

2. Krymsky, V. Applying of Pulsed Electromagnetic Processing of Melts in Laboratory and Industrial Conditions / V. Krymsky, N. Shaburova // Materials. – 2018. – Vol. 11, Iss. 6. – P. 954.

3. Krymsky, V. Analysis of the Results of Pulsed Processing of Melts / V. Krymsky, E. Litvinova, N. Shaburova // Metals. – 2020. – Vol. 10, Iss. 2. – P. 205.

4. ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. – М.: Стандартинформ, 2019. – 18 с.

5. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 813 с.

Поступила в редакцию 18 ноября 2024 г.

Сведения об авторах

Шульгинов Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедры оптоинформатики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0085-0550>, e-mail: shulginovaa@susu.ru.

Забейворота Николай Семёнович – кандидат технических наук, доцент, кафедра физики наноразмерных систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6210-3732>, e-mail: zabeivorotans@susu.ru.

*Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2025, vol. 17, no. 1, pp. 76–80*

DOI: 10.14529/mmp250109

THE EFFECT OF ELECTROMAGNETIC PULSES ON SURFACE ROUGHNESS AND FLUCTUATIONS IN ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF METAL FILMS

A.A. Shulginov, N.S. Zabeyvorota

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

E-mail: shulginovaa@susu.ru; zabeivorotans@susu.ru

Abstract. The effect of pulsed electromagnetic fields on metal films, which are the basis of modern micro- and nanoelectronics, can lead to changes in their conductivity characteristics and surface properties. The paper aims to study the effect of electromagnetic pulses on the surface condition of thin metal-

lic films of Bi, Cr and Fe and to investigate the effect of electromagnetic pulses on their conductivity and conductivity variations of the films. Surface roughness measurements were performed using a SOLVER PRO probe scanning microscope. In order to study the fluctuations of the film conductivity, a setup was set up that allowed measurements to be made around the clock for several months. The samples were exposed to nanosecond electromagnetic pulses without carrier frequency for 30 minutes. It was found that such exposure most strongly changed the surface roughness of chromium film, to a lesser extent - bismuth film, and for iron film exposure did not cause significant changes in the surface. The iron film also proved to be the most resistant to exposure in the conductivity study. Its resistivity and variation remained virtually unchanged. Exposure of the film to bismuth resulted in a 2–3 times decrease in the average number of conductivity jumps and bursts. Exposure to chromium film resulted in a similar effect and a twofold decrease in the level of small-scale fluctuations of electrical conductivity.

Keywords: metal film; electrical conductivity; surface roughness; electromagnetic pulses..

References

1. Goyda E.Yu., Ignat'ev I.E., Kotenkov P.V., Dolmatov A.V., Balakirev V.F., Ignat'eva E.V., Krymskiy V.V. Vliyanie nanosekundnykh odnopolyarnykh elektroimpul'snykh vozdeystviy na svoystva splava Su-1%Sr. Svyaz' svoystv splava s dlitel'nost'yu obrabotki rasplava (The Effect of Nanosecond Unipolar Electric Pulse Effects on the Properties of the Si-1%Sg Alloy. The Relationship of Alloy Properties with the Duration of Melt Treatment). *Butlerovskie soobshcheniya* (Butler's messages), 2018, Vol. 53, no. 2, p. 145–152. (in Russ.).
2. Krymskiy V., Shaburova N. Applying of Pulsed Electromagnetic Processing of Melts in Laboratory and Industrial Conditions. *Materials*, 2018, Vol. 11, Iss. 6, p. 954. DOI: 10.3390/ma11060954.
3. Krymskiy V., Litvinova E., Shaburova N. Analysis of the Results of Pulsed Processing of Melts. *Metals*, 2020, Vol. 10, Iss. 2, p. 205. DOI: 10.3390/met10020205.
4. GOST R ISO 4287-2014. *Geometricheskie harakteristiki izdelii (GPS). Struktura poverhnosti. Profil'nyi metod. Terminy, opredeleniya i parametry struktury poverhnosti.* (Geometric Characteristics of the Products (GPS). The Structure of the Surface. The Profile Method. Terms, Definitions and Parameters of the Surface Structure). Moscow, Standartinform Publ., 2019, 18 p. (in Russ.).
5. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* (Applied Mathematical Statistics for Engineers and Scientists). Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 813 p. (in Russ.).

Received November 18, 2024

Information about the authors

Shulginov Alexandr Anatolyevich is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, e-mail: shulginovaa@susu.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0085-0550>.

Zbeyvorota Nikolay Semyonovich is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, e-mail: zabeivorotans@susu.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6210-3732>.