

А. В. ГОГА, А. А. ПОЗНЯК, Д. А. ГОЛОСОВ, С. В. ГРАНЬКО, А. Н. ПЛИГОВКА

ВЛИЯНИЕ АНОДНОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ НАНОПЛЁНОК СПЛАВА WTi

Плотным анодированием в 1 %-м водном растворе лимонной кислоты пленки сплава W (80 %) Ti (20 %) толщиной 125 нм на стеклянной подложке толщиной 400 мкм получены тонкие пассивированные металлические пленки с сопротивлением от 100 до 500 Ом·м⁻¹. Анодирование до 195 В со скоростью развертки 0,3 В·с⁻¹ пленки WTi позволяет получить пленку с сопротивлением в диапазоне от 100 до 300 Ом·м⁻¹ закрытым оксидом WTi, что является достаточным и необходимым условием для использования в тонкопленочном СВЧ-калориметре.

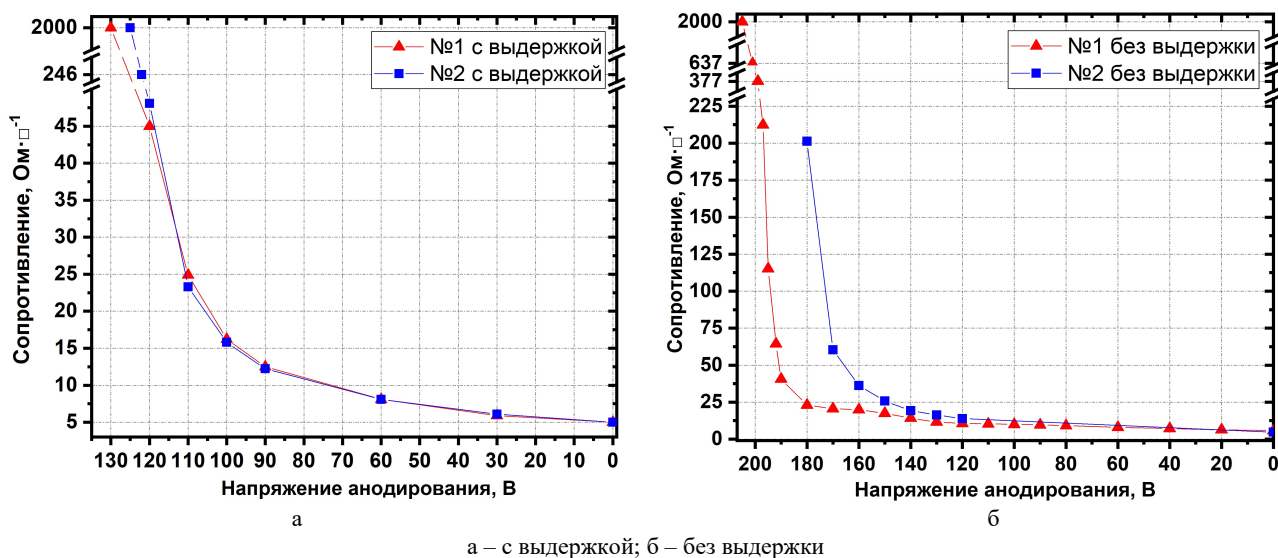
Использование тонких металлических пленок повышает чувствительность и уменьшает время отклика трубчатых волноводных СВЧ-калориметров [1]. Тонкая металлическая пленка выступает в качестве активного слоя в данной конструкции, которая при поглощении СВЧ-излучения нагревается, и далее передает тепло на термочувствительный слой. Однако получение тонких пленок порядка 5–10 нм сопряжено с высокими требованиями к точности напыления и равномерности подложки, также непассивированные тонкие

металлические пленки под действием СВЧ излучения и внешней среды быстро деградируют. Решением данной проблемы может быть использование в качестве активного слоя вентиляльных металлов, таких как Nb, W, Hf. Это является возможным за счет того, что их анодные оксиды обладают термочувствительными свойствами, что позволяет получать интегрированный активный и термочувствительный слои в конструкции трубчатого волноводного СВЧ калориметра [2]. Известно, что для использования тонкой пленки в качестве активного слоя в СВЧ калориметре необходимо, чтобы сопротивление пленки составляло от 100 до 500 Ом· \square^{-1} , в данном диапазоне поглощение СВЧ излучения составляет 50 % [3]. Таким сопротивлением обладают металлические пленки толщиной от 2 до 20 нм. При этом зависимость изменения сопротивления от толщины металлической пленки в данном диапазоне имеет экспоненциальный характер. Поэтому существуют научная и прикладная задачи получения металлической пленки вентиляльного металла с заданным сопротивлением и ультратонкой толщиной. Для активного слоя идеально подходит сплав W (80 %) Ti (20 %) (далее WTi), так как вольфрам является тугоплавким, а добавление Ti повышает его удельное поверхностное сопротивление (УПС). Анодирование пленки WTi позволяет сформировать на металлической пленке диэлектрический слой, соответственно, становится возможным формирование тонких измеряемых пленок металла под оксидным слоем.

В данной работе методом плотного анодирования сплава WTi и селективного травления были получены тонкие пассивированные металлические пленки WTi, а также измерено их УПС в зависимости от напряжения анодирования для фиксированной толщины пленки WTi.

Двухслойную систему Al/W (80 %) Ti (20 %) 2000/125 нм наносили на стеклянную подложку методом магнетронного распыления. Для селективного удаления слоя алюминия использовали раствор 50 %-й фосфорной кислоты. Анодирование WTi проводили в 1 %-м водном растворе лимонной кислоты при температуре 21 °С. Были использованы следующие режимы анодирования:

- 1) развертка напряжения анодирования 0,05 В·с⁻¹, после достижения предельного напряжения, выдержка перед выключением составляла 15 минут;
- 2) развертка напряжения анодирования 0,3 В·с⁻¹, без выдержки;
- 3) развертка напряжения анодирования 0,3 В·с⁻¹ до 195 В, без выдержки. Измерения сопротивления металлической пленки проводили двухконтактным способом через алюминиевые контакты при помощи цифрового мультиметра *Keysight 34461A*.



а – с выдержкой; б – без выдержки
Рисунок 1 – График зависимости сопротивления неокисленной тонкой металлической плёнки W (80 %) Ti (20 %) от напряжения анодирования

На рисунках 1а и 1б показаны зависимости сопротивления непроанодированной части WTi от напряжения анодирования в режиме с выдержкой и без выдержки соответственно. Для образцов, сформированных с выдержкой, воспроизводимость УПС соблюдается до напряжения 120 В, сопротивление пленки при этом составляет 42 Ом· \square^{-1} , что соответствует толщине пленки порядка 15 нм, согласно литературным данным [4].

Дальнейшее снижение толщины пленки экспоненциально повышало ее сопротивление, что видно из графика. Поэтому добавление времени выдержки или точек измерения может изменить толщину оставшейся пленки на ± 2 нм, что сильно скажется на сопротивлении пленки. Для образцов № 1 и № 2 (рисунок 1а) финальными точками измерения являлись 125 и 130 В соответственно, при этом оценочно толщина пленки

составляла ниже 5 нм. Для образца № 2 добавление точек измерения и, соответственно, времени выдержки ускорило прокисление пленки.

Из рисунка 1б видно, что для образцов, сформированных без выдержки, финальной точкой измерения является напряжение 205 В. При этом установлено, что добавление точек при данном способе не влияет значительно на скорость прокисления пленки WTi. Для образца № 2 измерение началось с напряжения анодирования 120 В – для данного случая воспроизводимость УПС сохранялась до напряжения 160 В. Однако в дальнейшем для одинаковых напряжений анодирования разница в сопротивлении составляет уже 1 порядок.

Для образцов без выдержки и без точек измерения до напряжения 195 В сопротивление пленки WTi меняется в диапазоне $\pm 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}^{-1}$. Такая большая погрешность в сопротивлении пленки WTi связана с тем, что для малых толщин имеет место экспоненциальная зависимость сопротивления от толщины. Значения УПС для разных условий анодирования сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Значения УПС для образцов пленки WTi на разных этапах изготовления

Параметр	С выдержкой		Без выдержки		Без выдержки и без точек		
	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 3
Конечная точка анодирования	130 В	125 В	205 В	205 В	195 В	195 В	195 В
Точка начала экспоненциального роста сопротивления	120 В	122 В	195 В	170 В	–	–	–
Значение сопротивления для точки экспоненциального роста	42 Ом·м ⁻¹	246 Ом·м ⁻¹	115 Ом·м ⁻¹	60 Ом·м ⁻¹	251 Ом·м ⁻¹	192 Ом·м ⁻¹	102 Ом·м ⁻¹
Общее количество точек измерения	8	9	22	7	0	0	0

Таким образом, показано, что использование анодирования для получения тонких пассивированных пленок WTi с сопротивлением от 100 Ом·м⁻¹, которые могут использоваться в качестве активного поглощающего слоя СВЧ излучения в перспективных калориметрах с активным и термочувствительным анодно-оксидным слоем. Анодирование до 195 В со скоростью развертки 0,3 В·с⁻¹ пленки WTi позволяет получить пленку с сопротивлением в диапазоне от 100 до 300 Ом·м⁻¹, закрытой оксидом WTi, что является достаточным и необходимым условием для использования в тонкопленочном СВЧ калориметре.

Список литературы

1. Erickson, N. A fast and sensitive submillivolt waveguide power meter / N. Erickson // Proc. 13th Int. Symp. on Space THz Technol. – Charlottesville, 2002. – Vol. 13. – P. 301–307.
2. Pligovka, A. Anodic Niobia Column-like 3-D Nanostructures for Semiconductor Devices / A. Pligovka, A. Lazavenka, G. Gorokh // IEEE Transactions on Nanotechnology. – 2019. – Vol. 18, No. 125. – P. 790–797.
3. Nimtz, G. High-Broad band electromagnetic wave absorbers designed with nano-metal films / G. Nimtz, U. Panten // Ann. Phys. – 2010. – Vol. 19. – P. 53–59.
4. Structure-stress-resistivity relationship in WTi alloy ultra-thin and thin films prepared by magnetron sputtering / A. Le Priol [et al.] // Ann. Phys. – 2010. – Vol. 19. – P. 53–59.

Use of anodizing for thin passivated W (80 %) Ti (20 %) films with a sheet resistance to 100 Ohm/□, which can be adopted as an active microwave absorbing layer, can occur in advanced anodic oxide nanostructured calorimeters.

Гога Александр Владимирович, студент II ступени образования, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, sash4ka06@yandex.ru.

Позняк Александр Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, roznyak@bsuir.by.

Голосов Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, dmgolesov@bsuir.by.

Гранько Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, granko@bsuir.by.

Научный руководитель – *Плиговка Андрей Николаевич*, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, pligovka@bsuir.by.