

Исследование тонкопленочных резисторов на основе нитрида тантала, полученных методом реактивного магнетронного распыления, для устройств радиофотоники*Е. В. Ерофеев, Е. С. Полынцев, С. В. Ишуткин*

Исследованы электрофизические характеристики и их термическая стабильность тонкопленочных резисторов на основе нитрида тантала (TaN), полученных методом реактивного магнетронного распыления. Определены оптимальные режимы процесса магнетронного распыления, обеспечивающие получение пленок фазового состава Ta₂N со значением удельного электрического сопротивления 250 мкОм см и высокой термической стабильностью параметров. При использовании полученных результатов были изготовлены согласующие тонкопленочные резисторы для электрооптического модулятора Маха-Цендера на основе InP.

Ключевые слова: магнетронное распыление, тонкие пленки, резистор, нитрид тантала, электрооптический модулятор, радиофотоника.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-93-98

Введение

Радиофотоника – новое научно-техническое и технологическое направление, появившееся в результате интеграции оптоэлектроники и СВЧ-радиоэлектроники. Высокая частота оптической несущей (порядка 10^{15} Гц), огромная полоса пропускания оптических систем (более 10 ТГц), низкие потери в оптических волноводах (менее 0,15 дБ/км) [1], а также невосприимчивость к радиочастотным интерференционным помехам позволяют эффективно решать целый ряд проблем современных сверхширокополосных систем в составе

телекоммуникационных и радиолокационных комплексов, включая построение высокоскоростных волоконно-оптических и беспроводных систем связи (5G, HDWDM) [2, 3], активных фазированных антенных решеток (АФАР) большой апертуры [4, 5], фильтрацию СВЧ-сигналов, построение малошумящих оптоэлектронных СВЧ-генераторов и др.

Одним из неотъемлемых элементов любой радиофотонной системы является электрооптический модулятор (ЭОМ) – устройство, преобразующее полезный СВЧ-сигнал в оптический сигнал путем модуляции оптической несущей. ЭОМ изготавливаются в интегральном виде на подложках GaAs или InP, что позволяет получить размер конечного устройства порядка единиц мм². Как и у любого элемента СВЧ-тракта, импеданс ЭОМ должен быть согласован по входу для минимизации коэффициента стоячей волны. Для этого между СВЧ-портом и электрооптическим модулятором включен тонкопленочный резистор. Резистор предназначен для поглощения СВЧ-мощности, передаваемой по линии, и имеет сопротивление 50 Ом.

На сегодняшний день нихром и нитрид тантала (TaN) являются наиболее широко ис-

Ерофеев Евгений Викторович^{1,2}, зав. лаб., с.н.с.

E-mail: erofeev@sibmail.com

Полынцев Егор Сергеевич¹, м.н.с.

E-mail: e.polyntsev@gmail.com

Ишуткин Сергей Владимирович¹, в.н.с.

E-mail: sergei.v.ishutkin@tusur.ru

¹ Томский университет систем управления и радиоэлектроники.

Россия, 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40.

² Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН.

Россия, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.

Статья поступила в редакцию 28 мая 2021 г.

пользуемыми материалами для тонкопленочных резисторов в СВЧ- и радиофотонных монолитных интегральных схемах. Основные требования, предъявляемые к резисторам: удельное сопротивление на уровне от 20 до 100 Ом/□, низкий температурный коэффициент сопротивления (ТКС) в широком диапазоне температур, высокая деструктивная плотность тока, температурная и электрическая стабильность, химическая инертность и стойкость к окислению. Пленки нитрида тантала обладают многими из этих свойств [7–9], кроме того, в отличие от пленок нихрома, они не окисляются на воздухе и поэтому нашли широкое применение в микроэлектронной промышленности.

Получение пленок TaN с помощью магнетронного осаждения позволяет обеспечить хорошую управляемость и воспроизводимость технологического процесса [10]. Именно поэтому ряд ведущих зарубежных компаний-производителей изделий СВЧ-микроэлектроники, например, таких как Skyworks, Qorvo, MACOM, UMS, успешно квалифицировали свои технологические процессы формирования тонкопленочных резисторов на основе TaN [11].

Целью данной работы является исследование влияния режимов реактивного магнетронного распыления на электрофизические характеристики и их термическую стабильность тонкопленочных резисторов на основе TaN, а также их интеграция в состав технологического маршрута изготовления электрооптического модулятора Маха-Цендера на основе InP.

Методика и техника эксперимента

Объектами исследования являлись тонкие пленки нитрида тантала, нанесенные на полупроводниковые подложки из полуизолирующего арсенида галлия диаметром 100 мм методом реактивного магнетронного распыления мишени на основе тантала в смеси газов аргона и азота. В ходе работы были исследованы: толщина, структура, элементный состав тонких пленок, а также электрофизические параметры и их термическая стабильность.

В первой серии экспериментов исследовалось влияние режимов реактивного магне-

тронного распыления на электрофизические характеристики тонких пленок нитрида тантала. Исследовались пленки, полученные с использованием режимов 1–9, представленных в табл. 1. Во всех режимах осаждения поток аргона был постоянным и равным 25 см³/мин, изменялись потоки азота в диапазоне от 6 до 12 см³/мин и мощность плазмы в диапазоне от 250 до 750 Вт. Измерялись удельное электрическое сопротивление и толщина пленок. Удельное электрическое сопротивление ρ определялось исходя из геометрии тестовых элементов на пластине методом Кельвина с точностью измерения не хуже 5%. Толщина и морфология пленок оценивалась с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). По толщине и времени осаждения была оценена средняя скорость роста пленок. Также была оценена деструктивная плотность тока.

Во второй серии экспериментов исследовалась термическая стабильность удельного электрического сопротивления пленок TaN в выборке оптимальных режимов распыления, полученных по результатам первой серии экспериментов. Для исследования термической стабильности образцы с пленками TaN подвергались термической обработке при температуре 300 °С в течение трех часов в среде очищенного азота. Измерения удельного электрического сопротивления пленок проводились до и после отжига. Кроме того, производилось исследование элементного состава пленок TaN до термической обработки. Элементный анализ состава пленок проводился методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

По результатам второй серии экспериментов был выбран образец, демонстрирующий лучшую термическую стабильность в выборке, который подвергался дальнейшим рентгенографическим исследованиям с целью измерения постоянных кристаллических решеток, размера частиц, величины микронапряжений, типа кристаллической решетки.

Далее на основе проведенных исследований тонких пленок TaN были выбраны оптимальные параметры режима реактивного магнетронного распыления для формирования согласующих тонкопленочных резисторов в составе электрооптического модулятора Маха-Цендера. Были реализованы две кон-

струкции резисторов с расположением резистивного слоя на планаризирующем слое бензоциклобутена (benzocyclobutene – BCB) толщиной 2–2,5 мкм и на тонком слое SiN_x. В качестве контактов к резистору была использована двухслойная композиция Ti/Au (25/3000 нм). Сопротивление изготовленных резисторов составляло 50 Ом при габаритах резистивного слоя 16×40 мкм. Далее с резисторов снималась вольтамперная характеристика с целью определения деструктивной плотности тока.

Технологический маршрут формирования тонкопленочных резисторов включал в себя четыре основных этапа: подготовка поверхности подложки, формирование двух-

слойной резистивной маски методом оптической литографии, напыление пленок нитрида тантала методом реактивного магнетронного распыления, удаление (взрыв) резистивной маски.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлены результаты исследования удельного электрического сопротивления, а также скорости осаждения тонких пленок на основе нитрида тантала, полученных при использовании различных режимов реактивного магнетронного распыления.

Таблица 1

Режимы реактивного магнетронного распыления тонких пленок на основе TaN

№	j_{Ar} , см ³ /мин	j_{N_2} , см ³ /мин	P , Вт	v , нм/мин	ρ , мкОм см
1	25	6	250	11,7	270,6
2	25	6	500	25	253,75
3	25	6	750	30,3	254,4
4	25	8	250	11,2	230,72
5	25	8	500	23,1	246,24
6	25	8	750	29,3	237,8
7	25	12	250	10,5	315
8	25	12	500	17,9	250
9	25	12	750	26	223,86

Из результатов, представленных в табл. 1 видно, что в диапазоне потоков азота от 6 до 8 см³/мин удельное электрическое сопротивление плёнок TaN меняется незначительно, а мощность разряда не оказывает существенного влияния на величину удельного сопротивления. Однако с увеличением потока азота до 12 см³/мин наблюдается зависимость уменьшения удельного сопротивления пленок на 10–20 % с ростом мощности разряда с 250 до 750 Вт. Средняя величина удельного электрического сопротивления тонких пленок нитрида тантала, осажденных в разных режимах магнетронного распыления, составила порядка 250 мкОм см.

Установлено, что для режимов реактивного магнетронного распыления с потоком азота 6 см³/мин при увеличении мощности разряда с 250 до 500 Вт наблюдается линейный рост скорости осаждения пленки. Однако с увеличением потока азота до 8 и 12 см³/мин данная зависимость носит нелинейный характер. Максимальная скорость осаждения плен-

ки TaN порядка 30 нм/мин была достигнута при минимальном потоке азота 6 см³/мин и максимальной мощности разряда 750 Вт.

В таблице 2 представлены результаты исследования термической стабильности удельного электрического сопротивления ρ_0 и элементный состав тонких пленок на основе нитрида тантала, полученных при использовании режимов магнетронного распыления № 2–8, представленных в табл. 1.

Таблица 2

Результаты исследования термической стабильности удельного электрического сопротивления и элементного состава тонких пленок нитрида тантала

№	ρ , мкОм см	$\Delta\rho$, %	Ta, %	N, %
2	253,7	11	86,6	13,4
3	254,45	5	88,1	11,9
4	230,7	18,4	82,7	17,3
5	246,24	9,9	87	13
6	237,8	19,8	81,5	18,5
7	315	16,3	84,2	15,8
8	250	7	87,9	12,1

На рис. 1 представлена экспериментальная зависимость удельного электрического сопротивления, а также его термической стабильности для тонких пленок нитрида тантала от процентного содержания азота в пленке после термической обработки при температуре 300 °С в течение 3 часов.

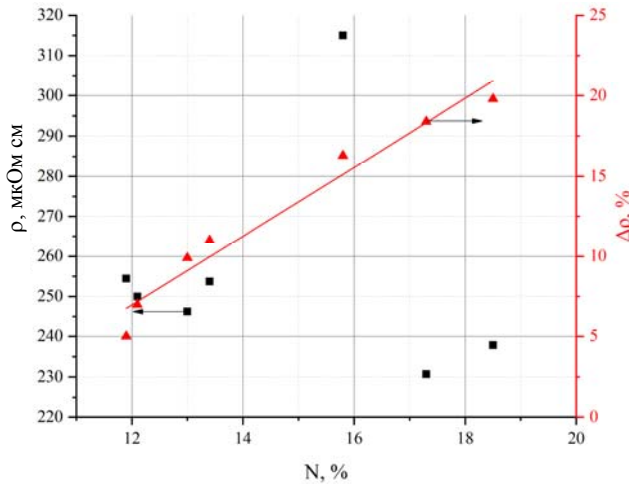


Рис. 1. Зависимость изменения удельного электрического сопротивления тонких пленок TaN от доли азота N в пленке после термической обработки при температуре 300 °С в течение 3 часов.

Из рис. 1 можно сделать вывод, что с ростом доли азота в пленке наблюдается рост удельного сопротивления после термической обработки. Установлено, что высокую термическую стабильность электрических параметров демонстрируют образцы с тонкими пленками TaN с содержанием азота порядка 11–13 %

и значением начального удельного сопротивления в диапазоне 245–255 мкОм см (образцы 2, 3, 5 и 8), что может быть обусловлено наличием фазы Ta₂N в составе тонких пленок. Как видно из результатов (табл. 2), лучшую термическую стабильность электрических параметров демонстрирует образец № 3, полученный при потоках аргона и азота 25 и 6 см³/мин соответственно и мощности разряда 750 Вт.

Для исследования структуры пленки нитрида тантала образца № 3 были проведены рентгенографические исследования. Были измерены постоянные кристаллической решетки, размеры частиц, величины микронапряжений и тип кристаллической решетки. В результате исследований было выявлено, что тонкая пленка нитрида тантала состоит из фаз состава Ta₂N с параметрами решетки $a = 3,15 \text{ \AA}$, $c = 5,03 \text{ \AA}$. Кристаллическая решетка имеет гексагональную структуру. Средний размер частиц по ОКР составил порядка 11 нм.

На основе тонких пленок TaN были изготовлены резисторы для применения в качестве согласующего элемента в электрооптическом модуляторе на основе InP. Разрабатываемая технология изготовления ЭОМ предполагает планаризацию поверхности подложки пленкой BCB. С целью определения оптимального расположения согласующего резистора были опробованы две конструкции (см. рис. 2). С расположением резистивного слоя непосредственно на пленке BCB и в его окнах на тонком слое SiN_x.

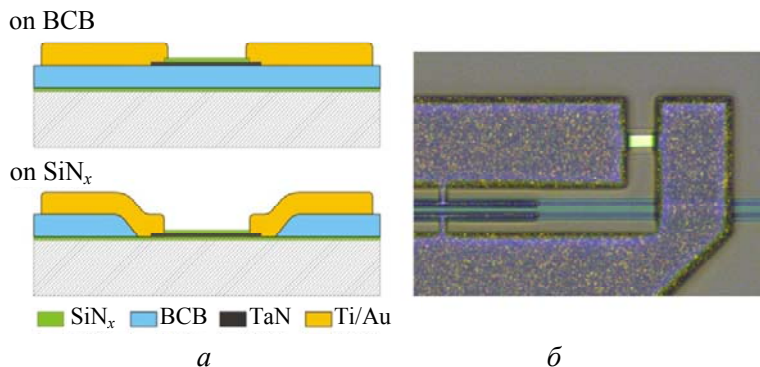


Рис. 2. Тонкопленочный TaN резистор: а – конструкции резистора с расположением на BCB и SiN_x; б – микроскопическое изображение резистора с расположением на BCB в составе ЭОМ.

Электрооптические модуляторы, в состав которых требуется интегрировать согласующий резистор, могут иметь размах модулирующего сигнала до 3,5 В. Резисторы должны длительно выдерживать данное напряжение без деградации сопротивления. На рис. 3 представлены вольт-амперные ха-

рактеристики изготовленных резисторов. Резистор с расположением на толстой пленке BCB начал деградировать уже после напряжения 1,2 В. В то же время резистор с расположением на тонком слое SiN_x оставался стабилен до напряжения 5,4 В. Деструктивная плотность тока для обеих конструкций рези-

стора составила порядка 1,5 и 6,8 мА/мкм соответственно.

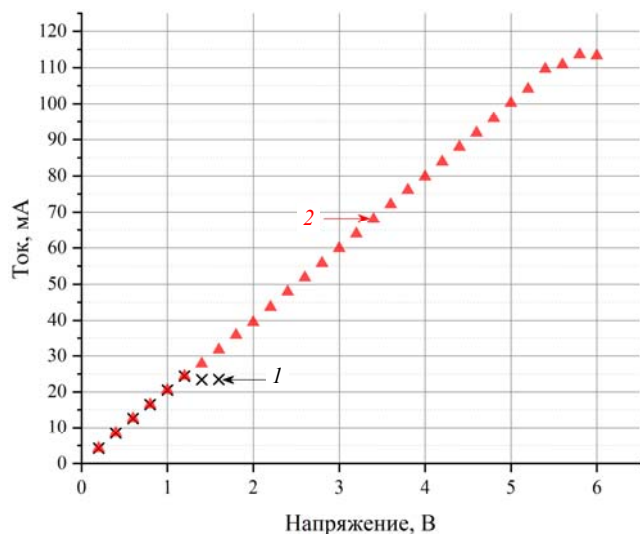


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики TaN-резисторов с расположением на ВСВ (1) и на SiN_x (2) со словесым сопротивлением 20 Ом/кв и габаритами 16×40 мкм.

Значительно более низкая деструктивная плотность тока для тонкопленочного резистора с расположением на толстой пленке ВСВ, по-видимому, связана с низкой теплопроводностью пленки ВСВ, что приводит к более раннему перегреву и выгоранию резистора. Для использования данного резистора в составе разрабатываемых модуляторов необходимо, как минимум, в 4 раза увеличить его габариты. В то же время при расположении резистора на тонком слое SiN_x теплоотвод значительно лучше и при сохранении габаритов имеется полуторкратный запас по напряжению.

В настоящее время проводятся измерения оптических параметров изготовленного электрооптического модулятора.

Заключение

В работе представлены исследования электрофизических характеристик, а также их термической стабильности для тонкопленочных резисторов на основе нитрида тантала (TaN), полученных методом реактивного магнетронного распыления. Установлено, что лучшей термической стабильностью обладают пленки TaN с содержанием азота порядка 11–13 %, со значением начального удельного со-

противления порядка 250 мкОм см, что может быть обусловлено наличием фазы Ta₂N в составе тонких пленок.

Рентгенографическое исследование показало, что пленки нитрида тантала, полученные методом реактивного магнетронного распыления, имеют гексагональную структуру и состоят из фаз Ta₂N.

На основе проведенных исследований был выбран режим осаждения пленок нитрида тантала для формирования тонкопленочных согласующих резисторов в составе электрооптического модулятора Маха-Цендера на основе InP. Полученные результаты позволили изготовить резисторы, которые обеспечивают требуемый уровень температурной и электрической стабильности.

Работа выполнена коллективом научной лаборатории интегральной оптики и радиофотоники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 075-03-2020-237/1 от 05.03.2020, внутренний номер проекта FEWM-2020-0040), а также проекта No. АААА-А19-119110690036-9. Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Импульс» ТУСУР (рег. номер 200568).

ЛИТЕРАТУРА

1. Tamura Y., Sakuma H., Morita K., Suzuki M., Yamamoto Y., Shimada K., Yuya H., Kazuyuki S., Takashi F., Takemi H. // Journal of Lightwave Technology. 2018. Vol. 36. № 1. P. 44.
2. Erofeev E., Arykov V., Stepanenko M., Voevodin A., Kogai A., Kurikalov V. // Symmetry. 2020. Vol. 12. № 7. P. 1167.
3. Skubic B., Bottari G., Öhlén P., Cavaliere F. / The European Conference on Optical Communication (ECOC) (2014, September). P. 1–3.
4. Akiba S., Oishi M., Nishikawa Y., Minoguchi K., Hirokawa J., Ando M. / Optical Fiber Communication Conference (2014, March). P. W2A-51.
5. Belkin M. E., Fofanov D., Golovin V., Tyschuk Y., Sigov A. S. / Array Pattern Optimization – InTechOpen, 2018.
6. Baiqing Z., Xiaohong Z., Xiaotong L., Jianli W., Yijun C. / Asia Communications and Photonics Conference (2017, November). P. Su2A. 11.

7. Riekkinen T., Molarius J., Laurila T., Nurmela A., Suni I., Kivilahti J. K. // *Microelectronic Engineering*. 2002. Vol. 64. № 1-4. P. 289.

8. Hieber K. // *Thin Solid Films*, 1974. Vol. 24. № 1. P. 157.

9. Schauer A., Roschy M. // *Thin Solid Films*, 1972. Vol. 12. № 2. P. 313.

10. Mellberg A., Nicols S.P., Rorsman N., Zirath H. // *Electrochemical and Solid State Letters*. 2004. Vol. 7. № 11. P. G261.

11. Shen H., Arreaga J., Ramanathan R., Knoedler H., Sawyer J., Tiku S. / *International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology's* (2003, May). Vol. 3.

PACS: 84.32.Ff

Investigation of reactively sputtered TaN thin-film resistors for microwave photonic applications

E. V. Erofeev^{1,2}, E. S. Polyntsev¹, and S. V. Ishutkin¹

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenina st., Tomsk, 634050, Russia
Email: erofeev@sibmail.com

² V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS
Academician Zuev square, 1, Tomsk, 634055, Russia

Received May 28, 2021

Electrophysical characteristics and their thermal stability of thin-film resistors based on tantalum nitride (TaN) obtained by reactive magnetron sputtering were investigated. The optimal modes of the magnetron sputtering process are determined, ensuring the Ta₂N phase film composition with the value of the specific electrical resistance of 250 μm cm and high thermal stability of the parameters. On the basis of the investigations carried out, thin-film matching resistors were manufactured for use as part of an electro-optical InP-based MZ modulator.

Keywords: magnetron sputtering, thin films, thin film resistor, tantalum nitride, electro-optical modulator, microwave photonics.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-93-98

REFERENCES

1. Y. Tamura, H. Sakuma, K. Morita, M. Suzuki, Y. Yamamoto, K. Shimada, H. Yuya, S. Kazuyuki, F. Takashi, and H. Takemi, *Journal of Lightwave Technology* **36** (1), 44 (2018).
2. E. Erofeev, V. Arykov, M. Stepanenko, A. Voevodin, A. Kogai, and V. Kurikalov, *Symmetry* **12** (7), 1167 (2020).
3. B. Skubic, G. Bottari, P. Öhlén, and F. Cavaliere, in *The European Conference on Optical Communication (ECOC)* (2014, September). P. 1–3.
4. S. Akiba, M. Oishi, Y. Nishikawa, et al., in *Proc. Optical Fiber Communication Conference* (2014, March). P. W2A-51.
5. M. E. Belkin, D. Fofanov, V. Golovin, et al., in *Proc. Array Pattern Optimization – InTechOpen*, 2018.
6. Z. Baiqing, Z. Xiaohong, L. Xiaotong, et al., in *Asia Communications and Photonics Conference* (2017, November). P. Su2A. 11.
7. T. Riekkinen, J. Molarius, T. Laurila et al., *Microelectronic Engineering* **64** (1-4), 289 (2002).
8. K. Hieber, *Thin Solid Films* **24** (1), 157 (1974).
9. A. Schauer and M. Roschy, *Thin Solid Films* **12** (2), 313 (1972).
10. A. Mellberg, S. P. Nicols, N. Rorsman, and H. Zirath, *Electrochemical and Solid State Letters* **7** (11), G261 (2004).
11. H. Shen, J. Arreaga, R. Ramanathan, et al., in *Proc. International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology's* (2003, May). Vol. 3.