

УДК 544.653.2

## ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МЕМБРАННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

А.Д. Цаладонов, С.А. Биран, А.В. Короткевич

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Беларусь*

**Аннотация.** В данной работе рассмотрены перспективы применения пленок пористого анодного оксида алюминия для изготовления МЭМС на его основе. Проведены исследования коэффициента использования алюминия в процессе анодирования на алюминиевых подложках различного состава. Предложены методы для уменьшения бокового роста анодного оксида алюминия в процессе локального анодирования.

**Ключевые слова:** пористый оксид алюминия, анодирование, МЭМС.

## SENSITIVE MEMBRANE ELEMENTS BASED ON POROUS ALUMINUM OXIDE FILMS

A.D. Tsaladonov, S.A. Biran, A.V. Korotkevich

*Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics",  
Minsk, Belarus*

**Abstract.** This work explores the prospects of using porous anodic aluminum oxide (AAO) films for the fabrication of AAO-based MEMS. Studies were conducted on the aluminum utilization coefficient during anodization on aluminum substrates of varying composition. Methods for reducing lateral growth of anodic aluminum oxide during localized anodization are proposed.

**Keywords:** porous aluminum oxide, anodization, MEMS.

### Введение

В настоящее время технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) активно развиваются и находят применение в различных областях, в том числе и в системах защиты информации. Одним из перспективных материалов для создания МЭМС является анодный оксид алюминия (АОА). Объемные структуры из пористого анодного оксида алюминия находят широкое применение в МЭМС за счет механической стойкости и возможности контроля линейных размеров данных структур в процессе производства. Эти характеристики делают оксид алюминия подходящей основой для разработки сенсоров, индукторов, МЭМС-конденсаторов и других компонентов, используемых в технических средствах, которые обеспечивают защиту информации.

На основе пленок анодного оксида алюминия изготавливают термостойкие мембраны для применения в термокаталитических газовых сенсорах [1], гибкие нанопористые комбинационные мембраны с ячеистой структурой [2], а также нанопористый анодный оксид алюминия подходит для изготовления чувствительных элементов кольцевого гироскопа [3].

Чувствительность мембран на основе пористого оксида алюминия определяется механическими свойствами оксида, которые можно варьировать в процессе анодирования. Для получения объемных элементов МЭМС на основе пленок АОА с заданной вертикальной геометрией необходимо точно знать параметры объемного роста пористого анодного оксида алюминия (такие как коэффициент объемного роста оксида и коэффициент использования алюминия), на которые влияет чистота материала подложки, состав электролита, напряжение формовки и другие параметры процесса анодирования. Также при проведении локального анодирования через

фоторезистивную маску наблюдается процесс бокового роста оксида, что приводит к искажению горизонтальных размеров объемной структуры. Для уменьшения величины бокового роста необходимо улучшать качество маскирующих покрытий при введении операции локального анодирования.

### Основная часть

Исследование объемного роста оксида алюминия в процессе анодирования проводили на алюминиевых подложках марок: Al98Si2, A0N, AlMg2. На первом этапе с поверхности подложек удаляли органические загрязнения и производили травление в течение 15 мин в 10%-м растворе NaOH. После улучшения качества поверхности подложки осветляли в азотной кислоте. Анодирование проводили в специализированной ванне с постоянным перемешиванием электролита для обеспечения доступа свежего электролита к подложке, что приводит к ускорению процесса роста анодного оксида. Температура в ванне поддерживали на одном уровне за счет охлаждения проточной водой и нагрева с помощью термонагревателя. Перед проведением анодирования толщину образцов измеряли с помощью микрометра. Анодирование проводили в 4%-м растворе шавелевой кислоты в гальваностатическом режиме при постоянной плотности тока  $20 \text{ mA/cm}^2$ . Время анодирования варьировали от 1 до 6 часов для получения образцов с различной толщиной анодного оксида (рис. 1).



Рис. 1. Образцы из алюминия марки A0N после 1, 2, 3 и 4 часов анодирования соответственно  
Fig. 1. Samples of aluminum grade A0N after 1, 2, 3 and 4 hours of anodizing, respectively.

После анодирования повторно измеряли толщину образцов. Травление анодного оксида алюминия проводили в селективном травителе на основе ортофосфорной кислоты и хромового ангидрида. Время травления составило 7 минут при температуре травителя  $80^\circ\text{C}$ . После удаления оксида снова измеряли образец для расчета толщины полученной оксидной пленки.

Полученные в процессе проведения исследования результаты приведены в таблице.

Из полученных данных рассчитывали коэффициент использования алюминия  $k_{Al}$  с применением формулы:  $h_{Al} = k_{Al} \cdot J_a \cdot t$ , где  $h_{Al}$  – толщина алюминия, «израсходованного» в процессе анодирования,  $J_a$  – плотность тока анодирования,  $\text{mA/cm}^2$ ,  $t$  – время анодирования, мин.

Параметры объемного роста оксидных пленок  
Parameters of volumetric growth of oxide films

№	Тип алюминия	Толщина образца, мкм	Время анодирования, мин	Толщина образца после анодирования, мкм	Толщина образцов после снятия оксида, мкм	Толщина оксида, мкм	Использованный алюминий, мкм
1.	Al98Si2	280	60	308	233	37,5	23,5
2.	Al98Si2	280	120	320	185	67,5	47,5
3.	Al98Si2	280	180	340	135	102,5	72,5
4.	Al98Si2	280	240	352	110	121	85
5.	Al98Si2	280	300	364	94	135	93
6.	Al98Si2	280	360	373	73	150	103,5
7.	Al99	900	60	920	860	30	20
8.	Al99	900	120	942	820	61	40
9.	Al99	900	180	960	774	92	63
10.	Al99	900	240	970	746	112	77
11.	Al99	900	300	983	731	126	84,5
12.	Al99	900	360	992	712	140	94
13.	Al98Mg2	1920	60	1950	1893	30	13,5
14.	Al98Mg2	1920	120	1970	1865	50	27,5
15.	Al98Mg2	1920	180	1990	1835	75	42,5
16.	Al98Mg2	1920	240	2014	1800	107	60
17.	Al98Mg2	1920	300	2030	1784	123	68
18.	Al98Mg2	1920	360	2042	1770	136	75

По результатам измерений в процессе исследования и данным, полученным в результате расчетов, был построен график зависимости коэффициента использования алюминия от толщины выращенного пористого анодного оксида (рис. 2). Установлено, что по достижении толщины около 100 мкм коэффициент использования алюминия начинает уменьшаться на всех типах подложек. В процессе роста оксидной пленки от 38 мкм до 150 мкм на подложках алюминия с добавлением примеси кремния коэффициент использования алюминия уменьшился с 0,019 до 0,014; на подложках без добавления примесей при росте оксидной пленки от 30 мкм до 140 мкм – с 0,016 до 0,013; на подложках с добавлением примеси магния при росте оксидной пленки от 30 мкм до 136 мкм также уменьшился с 0,012 до 0,011.

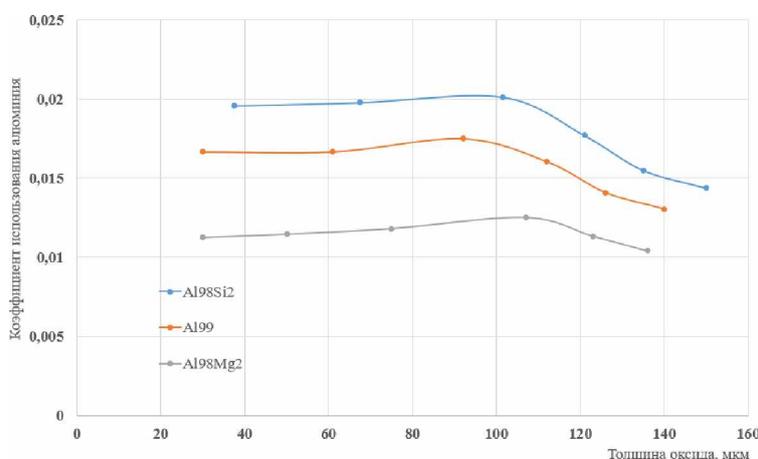


Рис. 2. График зависимости коэффициента использования алюминия от толщины выращенного оксида алюминия

Fig. 2. Graph of the dependence of the aluminum utilization coefficient on the thickness of the grown aluminum oxide

Исследование бокового роста при локальном анодировании алюминия через фоторезистивную маску проводили на подложках из алюминия размером 60×48 мм. На поверхности подложке формировали фоторезистивную маску. Открытыми оставляли полоски алюминия длиной 5 см и шириной от 1 до 5 мм. Анодирование проводили в электролите на основе щавелевой кислоты в гальваностатическом режиме при постоянной плотности тока 20 мА/см<sup>2</sup>.

После анодирования для исследования образцов под микроскопом, подложку разрезали, а срез шлифовали и полировали. Исследование проводили на оптическом микроскопе при стократном увеличении (рис. 3): измеряли ширину окна для локального анодирования  $L_1$  и ширину оксидной пленки после анодирования  $L_2$ .

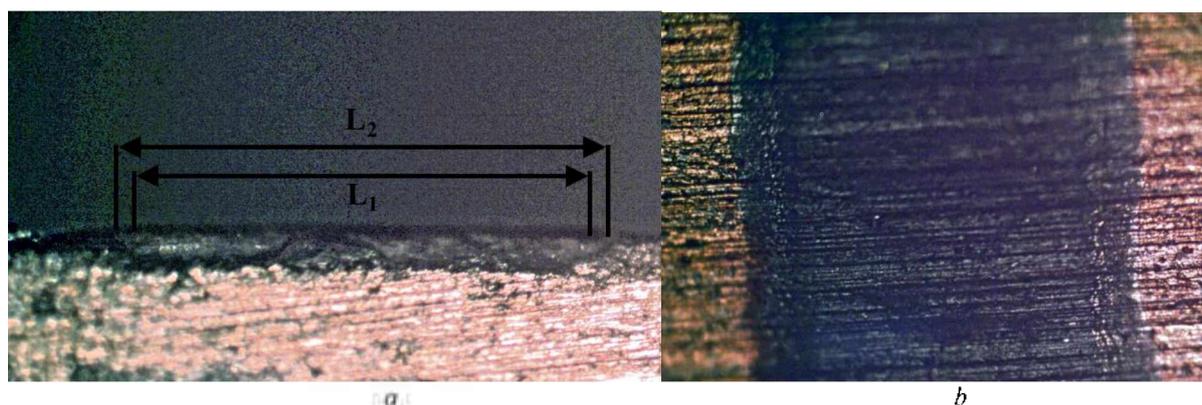


Рис. 3. Локальное анодирование алюминия через фоторезистивную маску:  $a$  – в разрезе,  $b$  – вид сверху  
Fig. 3. Local anodization of aluminum through a photoresistive mask:  $a$  – sectional view,  $b$  – top view

При проведении исследований установлено, что при использовании маски из фоторезиста при толщине оксида 70 мкм боковой уход составил около 40 мкм. Для устранения бокового ухода использовали комбинацию из фоторезистивной маски и пористого анодного оксида алюминия толщиной 5–10 мкм, что позволило снизить боковой рост в процессе локального анодирования до 40 % от толщины оксида.

### Заключение

При выполнении научных исследований показана возможность применения пленок пористого анодного оксида алюминия для изготовления мембранных чувствительных элементов МЭМС. Установлено, при достижении пленкой оксида алюминия толщины 100 мкм в процессе анодирования коэффициент использования алюминия начинает снижаться при дальнейшем росте на всех типах исследованных подложек. Так же установлено, что использование комбинированной маски для локального анодирования позволяет уменьшить боковой рост оксида алюминия до 40 % от толщины полученного оксида.

### Список использованных источников

1. Патент RU2242271C1. 20.12.2004.
2. Патент RU2545887C2. 23.10.2012.
3. Белогуров Е.А., Горох Г.Г., Таратын И.А., Хатько В.В. (2013) Чувствительный элемент кольцевого гироскопа на основе нанопористого анодного оксида алюминия. *Нано- и микросистемная техника*. (7), 16-19.

## References

1. Patent RU2242271C1, 20.12.2004.
2. Patent RU2545887C2, 23.10.2012.
3. Belogurov, E.A., Gorokh, G.G., Taratyn, I.A., & Khatko, V.V. (2013). Sensitive element of a ring gyroscope based on nanoporous anodic aluminum oxide. *Nano- and Microsystems Technology*, (7), 16-19.

### Сведения об авторах

**Цаладонов А.Д.**, магистрант кафедры МНЭ, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

**Биран С.А.**, старший преподаватель кафедры МНЭ, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», [biran@bsuir.by](mailto:biran@bsuir.by).

**Короткевич А.В.**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры МНЭ, Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», [korotkevich@bsuir.by](mailto:korotkevich@bsuir.by).

### Information about the authors

**Tsaladonov A.D.**, master's student MNE Department, Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics".

**Biran S.A.**, senior lecture MNE Department, Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", [biran@bsuir.by](mailto:biran@bsuir.by).

**Korotkevich A.V.**, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor MNE Department, Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", [korotkevich@bsuir.by](mailto:korotkevich@bsuir.by).