

# НАНОФИЗИКА и НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Материалы XXIV Международного  
симпозиума

10—13 марта 2020 г.  
Нижний Новгород

[ ТОМ 2 ] секции 3, 5

# **НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

**Труды XXIV Международного  
симпозиума**

*10–13 марта 2020 г., Нижний Новгород*

*Том 2*

*Секции 3, 5*

Нижний Новгород  
Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского  
2020

# Экспериментальное определение механических свойств прострельного анодного элемента рентгеновского литографа

Н.А. Дюжев, Е.Э. Гусев\*, А.А. Дедкова, Д.А. Товарнов, М.А. Махиборода

НИУ МИЭТ, пл. Шокина, д.1, Зеленоград, Москва, 124498.

\*bubbledouble@mail.ru

Изготовлен анодный элемент рентгеновского литографа в виде мембранной структуры PolySi/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> по кремниевой групповой технологии. Критическое давление мембранной структуры диаметром 250 мкм изменяется в диапазоне от 4.84 до 5.64 атм для 15 образцов. Механическая прочность структуры PolySi\*/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> составляет 3.13 ГПа. Экспериментальная величина двухосного модуля упругости E/(1-μ) не менее 85 ГПа.

## Введение

Десятикратное превышение дифракционного предела рабочей длины волны литографа 193 нм приводит к увеличению стоимости процесса и оборудования [1]. Вариант использования проекционной фотолитографии в глубоком ультрафиолете (EUV-литографии) с рабочей длиной волны 13.5 нм [2] при формировании критических размеров на чипе обладает недостаточной производительностью. Одним из возможных решений является безмасочная рентгеновская нанолитография [3], которая потенциально обладает высокой производительностью. В качестве источника рентгеновского излучения в литографе может быть рассмотрена рентгеновская трубка, включающая в себя катод и прострельный анод. Исследованию механических свойств прострельного анодного элемента посвящена данная работа. Анодный элемент должен выдерживать вакуумную атмосферу (избыточное давление в 1 атм) рентгеновской трубки и обладать достаточной рентгенопрозрачностью за счёт малой толщины материала в области мембраны. В качестве элемента мишени выбран материал поликремния, который позволяет генерировать волну длиной 13.5 нм. Слои SiO<sub>2</sub> и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> обладают сжимающими и растягивающими механическими напряжениями, что приводит к компенсации напряжений и повышению запаса механической прочности.

## Методика эксперимента

В технологическом маршруте изготовления прострельного анодного элемента необходимо сформировать толстую и/или высокоселективную маску

для глубокого травления кремния (на глубину подложки). Поэтому стандартный слой фоторезиста заменяется на слой алюминия. Алюминий в качестве маски обладает большей селективностью к кремнию по сравнению с фоторезистом (при травлении кремния). Также осаждают дополнительный слой алюминия на материал мишени анодного элемента (на лицевой стороне) для предотвращения попадания мембран в реакционную камеру. Слой алюминия позволяет временно повысить теплопроводность и механическую прочность образца.

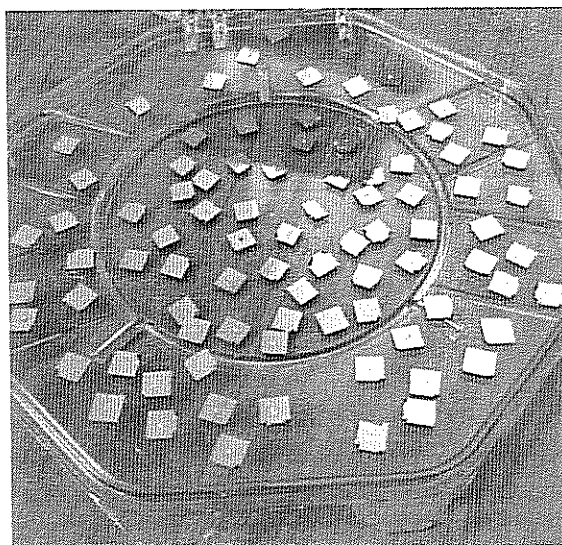


Рис. 1. Набор образцов прострельного анодного элемента после разделения пластины на кристаллы

Изготовленные образцы после разделения пластины на кристаллы представлены ниже (рис.1). Посредством растрового электронного микроскопа получено изображение среза образца (рис.2)

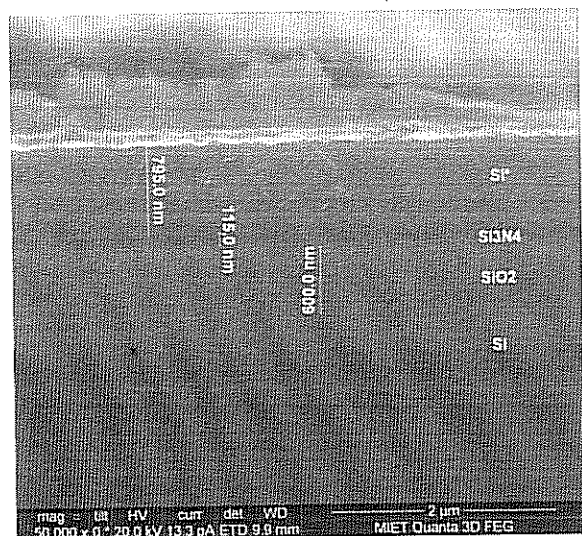


Рис. 2. Срез структуры в области тонкой плёнки

Следующим шагом на разработанном ранее стенде [4] было определено критическое избыточное давление  $P_{\text{крит}}$ , приводящее к разрыву мембраны. Экспериментальное значение механической прочности анодного элемента PolySi  $0.8 \pm 0.05$  мкм /  $\text{Si}_3\text{N}_4$   $0.13 \pm 0.02$  мкм /  $\text{SiO}_2$   $0.5 \pm 0.1$  мкм диаметром 250 мкм было рассчитано согласно методике [4] по формуле (1):

$$\sigma_{\text{крит}} = \frac{P_{\text{крит}} \cdot h^2}{a^2} \cdot B(\mu) \quad (1)$$

$a$  – радиус мембраны,  $h$  – толщина мембраны,  $P_{\text{крит}}$  – экспериментальное значение критического давления, коэффициент  $B(\mu)$  рассчитывается как  $0.75\sqrt{1 + \mu^2}$ , где  $\mu$  – коэффициент Пуассона мембраны.

## Результаты и обсуждение

По результатам измерения на 15 образцах величина  $P_{\text{крит}}$  изменяется в диапазоне от 4.84 до 5.64 атм. Экспериментальное значение механической прочности анодного элемента PolySi  $0.8 \pm 0.05$  мкм /  $\text{Si}_3\text{N}_4$   $0.13 \pm 0.02$  мкм /  $\text{SiO}_2$   $0.5 \pm 0.1$  мкм составляет 3.13 ГПа. Относительная погрешность теоретических и экспериментальных значений составляет 2.18%. Проведено сравнение зависимости прогиба мембраны от избыточного давления для эксперимента, данных моделирования в среде Comsol и аналитического расчёта по формуле 2 (рис.3).

$$P = C_1 \cdot \frac{\sigma_0 \cdot h \cdot w}{a^2} + C_2 \cdot \frac{E \cdot h \cdot w^3}{(1 - \mu) \cdot a^4} \quad (2)$$

где  $P$  – избыточное давление,  $\sigma_0$  – остаточные механические напряжения в структуре при  $P=0$ ,  $h$  – толщина мембраны,  $w$  – прогиб мембраны,  $a$  – радиус мембраны,  $E$  – модуль Юнга,  $\mu$  – коэффициент Пуассона,  $C_1$  и  $C_2$  – коэффициенты.

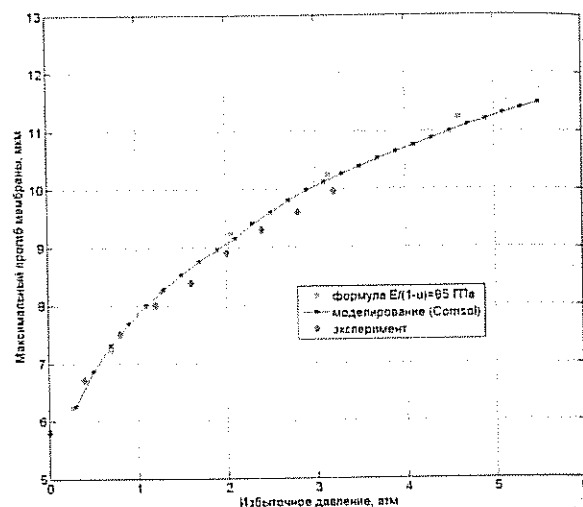


Рис. 3. Зависимость максимального прогиба мембраны диаметром 0.25 мм от избыточного давления

Относительная погрешность формулы с экспериментальными данными составляет 3.24%, а относительная погрешность моделирования с экспериментальными данными составляет 3.02%. Определено, что экспериментальный двухосный модуль упругости  $E/(1-\mu)$  не менее 85 ГПа.

Работы выполнены на оборудовании ЦКП «МСТ и ЭКБ» НИУ МИЭТ при поддержке Минобрнауки РФ (ГК № 14.581.21.0021, УН RFMEFI58117X0021).

## Литература

1. Н.А. Дюжев, Г.Д. Демин, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало // Микроэлектроника-2019, стр. 429.
2. Wu B. // Appl. Phys. Rew. — 2014. — V. 1. — P. 011104; DOI: 10.1063/1.4863412.
3. N.I. Chkhalo *et al.* // Proc. of SPIE. V. 110221M (2019), DOI: 10.1117/12.2522105.
4. E.E. Gusev *et al.* // EIConRus 2019, p. 1990-1994, DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657243.