

## Изучение угловых зависимостей скоростей ионно-пучкового распыления металлов для синтеза заготовок фотошаблонов

© М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,  
607680 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: mikhaylenko@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2023 г.  
В окончательной редакции 12 мая 2023 г.  
Принято к публикации 12 мая 2023 г.

Рассмотрено применение никеля как альтернативного материала-поглотителя при изготовлении заготовки маски для литографии в окрестности длины волны 11.2 nm. Установлено значение оптимального угла для эффективного распыления источниками ускоренных ионов аргона мишеней из Ru, Be и Ni для изготовления многослойной структуры Ru/Be с верхним слоем из Ni. Показано, что при угле 60° скорость травления всех трех материалов составляет  $35 \pm 5$  nm/min для ионов аргона с энергией 800 eV при плотности ионного тока  $0.5$  mA/cm<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** литография, фотошаблон, рентгеновское зеркало, ионное распыление, ионное травление.

DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55768.115-23

### Введение

Повышение разрешающей способности литографического процесса предполагает уменьшение длины волны света, т.е. переход к так называемой BEUV (beyond extreme ultraviolet) литографии. Рассматриваются различные варианты перспективных для данной задачи длин волн, для которых существуют интенсивные источники экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения и высокоотражающие многослойные рентгеновские зеркала [1–3]. В качестве одной из перспективных длин волн рассматривается область в окрестности 11.2 nm, где имеются интенсивные линии излучения Хе плазмы и возможность синтеза Ru/Be многослойных рентгеновских зеркал нормального падения, которые теоретически имеют наиболее высокие пиковые коэффициенты отражения [4]. Более того, в работе [5] показана возможность синтеза зеркал Ru/Be с рекордными коэффициентами отражения и спектральной шириной в окрестности длины волны 11.4 nm до  $R = 72.2\%$  и  $\Delta\lambda_{1/2} = 0.38$  nm соответственно.

Одним из важнейших элементов литографической установки является фотошаблон (маска). Фотошаблон представляет собой многослойное рентгеновское зеркало с нанесенным на поверхность рисунком, позволяющим сформировать соответствующую топологию на кремниевых пластинах, которые, в конечном итоге, становятся чипами. Рисунок формируется в поглощающем слое, имеющем низкое (близкое к нулю) пропускание рентгеновского излучения с рабочей длиной волны литографической установки (рис. 1).

Соответственно, заготовка для фотошаблона или mask blank представляет собой зеркало, оптимизированное

на максимальное отражение рабочей длины волны, на поверхность которого нанесен поглощающий слой. Традиционно для изготовления mask blank для ЭУФ литографии в качестве поглощающего слоя применяются тонкие пленки Cr, Ta или TaN толщиной не более 100 nm [6]. Зависимости коэффициентов прохождения от длины волны для 100-nm пленок Ta, TaN и Cr представлены на рис. 2, a. Из этих зависимостей видно, что прохождение в окрестности длины волны 11.2 nm составляет 3–6% [7].

В настоящей работе предлагается в качестве поглотителя использовать пленки Ni. Зависимость коэффициента прохождения излучения в диапазоне длин волн от 9.5 до 15 nm приведена на рис. 2, b.

Традиционным методом синтеза многослойных рентгеновских зеркал является магнетронное напыление, однако для изготовления mask blank более перспективным выглядит напыление с помощью источников ускоренных ионов. Преимущество этого метода заключается в более качественной структуре пленок. Данный факт связан с

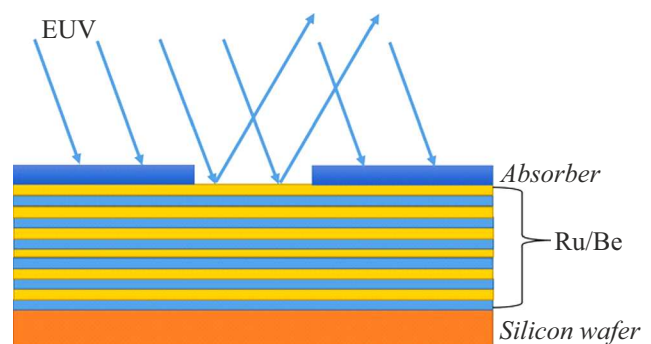


Рис. 1. Схема ЭУФ маски для литографии.

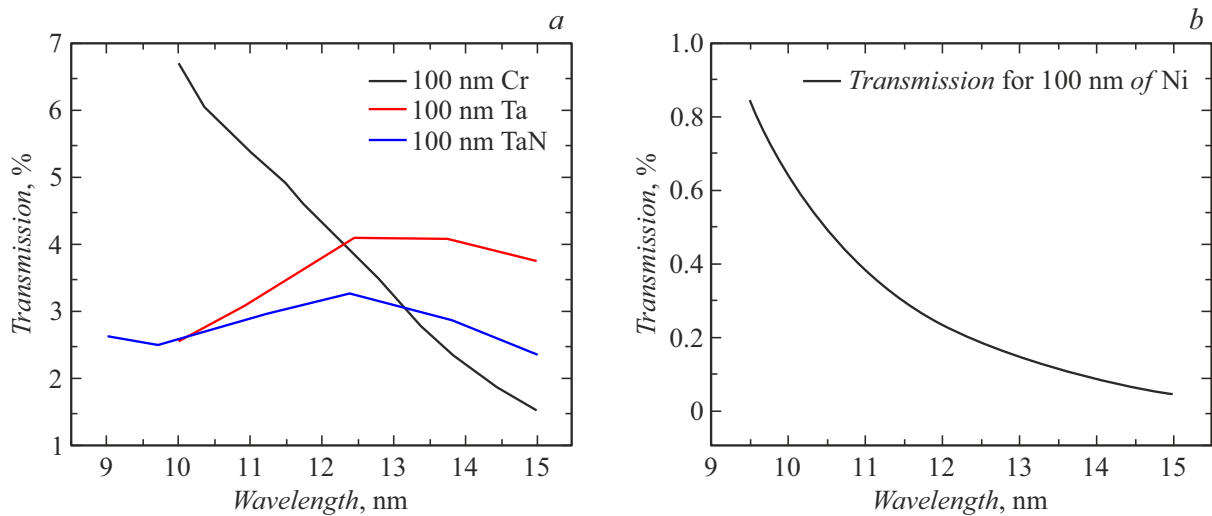


Рис. 2. Зависимости коэффициентов пропускания пленок толщиной 100 nm: *a* — хрома, тантала и нитрида тантала; *b* — никеля.

тем, что ускоренные ионы распыляют мишень более однородно (т.е. вылетают одиночные атомы, так как коэффициент распыления обычно лежит вблизи единицы), нежели при магнетронном распылении, когда возможны вылеты кластеров атомов с поверхности мишени. Кластеры, вылетевшие с поверхности мишени при распылении, могут создавать как амплитудные, так и фазовые дефекты, наличие которых впоследствии может привести к ошибкам в топологии чипа. Фазовый дефект приводит к отклонению лучей, формирующих рисунок, что приводит к искажению его на пластине (чипе), а амплитудный дефект будет затенять отраженное излучение, вследствие чего локально может не засветиться фоторезист [8].

Как уже говорилось выше, оптимальной структурой для синтеза многослойного зеркала на длину волны 11.2 nm является состав Ru/Be, а наиболее перспективным материалом для поглотителя — Ni.

Целью настоящей работы является определение оптимального угла падения (с точки зрения максимальной скорости травления) ускоренных ионов на поверхность мишеней Be, Ru и Ni для синтеза заготовок масок.

## 1. Описание эксперимента

В настоящей работе исследовались угловые зависимости распыления металлов с целью оптимизации процесса синтеза заготовок для фотошаблонов. В качестве мишеней использовались металлические пленки из Ru, Be и Ni толщиной 0.5  $\mu\text{m}$ , нанесенные методом магнетронного распыления на кремниевую подложку. Эксперименты по ионному травлению проводились на стенде [9], оснащенный тремя источниками разными ускоренными ионами, а также 5D столиком. Перед экспериментами давление остаточных газов в вакуумном объеме было на уровне  $2 \cdot 10^{-6}$  Торг. Образцы крепи-

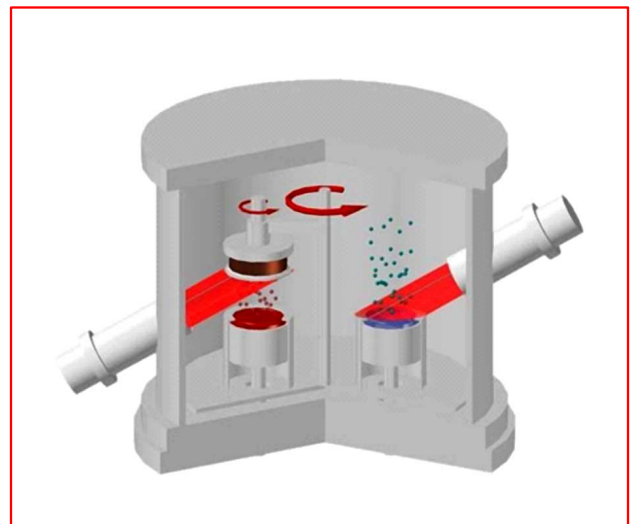
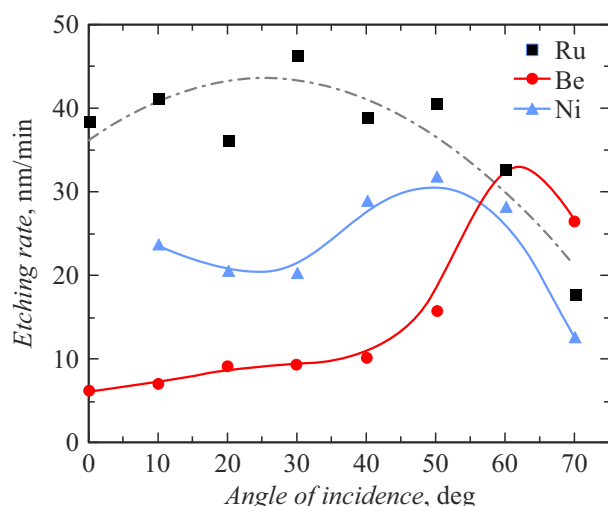


Рис. 3. Схема распыления мишени источником ускоренных ионов.

лись на столик, затем выставлялся угол относительно плоскости апертуры источника. В качестве источника ускоренных ионов использовался КЛАН-104М с полым катодом и выходной апертурой  $\varnothing 100$  mm. Энергия ионов во всех экспериментах составила 800 eV. Для большинства материалов при распылении ионами Ag с энергией ионов вблизи 1000 eV наблюдается выход энергетической зависимости коэффициента распыления на „плато“, т.е. дальнейшее увеличение энергии не приводит к заметному росту количества распыляемого материала из-за более глубокого проникновения ионов в толщу мишени [10]. Плотность ионного тока составляла 0.5 mA/cm<sup>2</sup>. Измерения глубины травления производилось на интерферометре белого света TalySurf CCI 2000.



**Рис. 4.** Угловая зависимость скорости ионного травления от угла падения. Энергия ионов Ar — 800 eV. Плотность ионного тока — 0.5 mA/cm<sup>2</sup>.

## 2. Результаты и обсуждение

В результате серии травлений были получены угловые зависимости скорости травления для мишеней Ru, Be и Ni (рис. 4).

На полученных кривых можно увидеть различное поведение зависимостей скорости травления от угла падения ионов на поверхность мишени. Для малых зарядовых чисел, как в данном случае для Be ( $Z=4$ ), угловая зависимость ведет себя как возрастающая функция  $f(\Theta) \sim A/\cos\Theta$  ( $A$  — константа, определяемая из эксперимента), и, наоборот, для больших  $Z$ , как, например, для Ru ( $Z=44$ ) — как нисходящая. Зависимость для никеля ( $Z=28$ ) имеет две точки перегиба, однако такое же поведение наблюдается и для других материалов, как, например, для Al ( $Z=13$ ), что показано в работе [11].

Из полученных данных следует, что оптимальным углом (где скорость травления наибольшая), под которым целесообразно установить источник ускоренных ионов для наиболее эффективного распыления всех трех материалов (Ru, Be и Ni) при изготовлении mask blank для литографии в окрестности длины волны 11.2 nm, является 60° к нормали поверхности мишеней. Для всех трех материалов скорость травления при таком угле составит  $35 \pm 5$  nm/min.

## Заключение

Предложен альтернативный материал в качестве поглотителя заготовки маски для литографии в окрестности длины волны 11.2 nm — Ni. В работе установлено, что оптимальным углом для эффективного распыления источниками ускоренных ионов аргона мишеней из Ru, Be и Ni для изготовления многослойной структуры Ru/Be с верхним слоем из Ni является угол 60°. При

таком угле скорость травления для всех трех материалов составляет  $35 \pm 5$  nm/min при энергии ионов аргона 800 eV и плотности ионного тока 0.5 mA/cm<sup>2</sup>.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность за содействие в подготовке экспериментов В.Н. Полковникову, Р.С. Плешкову и Е.С. Антюшину. Использовано оборудование ЦКП ИФМ РАН.

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-1350).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] S. Bajt, R.D. Behymer, P.B. Mirkarimi, C. Montcalm, M.A. Wall. *Experimental Investigation of Beryllium-Based Multilayer Coatings for Extreme Ultraviolet Lithography*. Proc. SPIE 3767, **259** (1999).
- [2] P.B. Mirkarimi. *Opt. Eng.*, **38** (7), 1246 (1999).
- [3] N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko. *AIP Advances*, **3**, 082130 (2013).
- [4] А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.Н. Салашченко, Н.И. Чхало. *Опт. и спектр.*, **129** (3), 266 (2021). DOI: 10.21883/OS.2021.03.50652.282-20
- [5] R.M. Smertin, N.I. Chkhalo, M.N. Drozdov, S.A. Garakhin, S.Yu. Zuev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, P.A. Yunin. *Opt. Express*, **30** (26), 46749 (2022).
- [6] P.-Y. Yan, G. Zhang, A. Ma, T. Liang. *TaN EUVL Mask Fabrication and Characterization*. Proc. SPIE 4343, *Emerging Lithographic Technologies V*, (2001). DOI: 10.1117/12.436668
- [7] Электронный ресурс. Режим доступа: [https://henke.lbl.gov/optical\\_constants/](https://henke.lbl.gov/optical_constants/)
- [8] P.-Y. Yan, Y. Liu, M. Kamna, G. Zhang, R. Chen, F. Martinez. *EUVL Multilayer Mask Blank Defect Mitigation for Defect-Free EUVL Mask Fabrication*. Proc. SPIE 8322, *Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography III*, 83220Z (2012). DOI: 10.1117/12.927018
- [9] M.S. Mikhailenko, N.I. Chkhalo, I.A. Kaskov, I.V. Malyshev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, I.G. Zabrodin. *Precision Engineering*, **48**, 338 (2017). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.01.004
- [10] W. Eckstein. *Vacuum*, **82** (9), 930 (2008). DOI: 10.1016/j.vacuum.2007.12.004
- [11] R.E. Lee. *J. Vacuum Sci. Technol.*, **16**, 164 (1979). DOI: 10.1116/1.569897