

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК СЕРЕБРА ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ ПЛАЗМОНИКИ ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМОЙ

И.А. Филиппов<sup>1</sup>

Л.Э. Великовский<sup>2</sup>

В.А. Шахнов<sup>1</sup>

ivn.filippov@gmail.com

velikovskiy.l@gmail.com

shakhnov@mail.ru

shakhnov@bmstu.ru

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрены процессы плазмохимического травления пленок серебра для изготовления элементов фотоники (наноразмерных источников света), а также теоретические основы процессов травления и процесс образования плазмы в установках плазмохимического травления. Выполнена оценка предлагаемой технологии при формировании топологических элементов в тонких пленках металла серебра и выделены ключевые проблемы, такие как переосаждение и нелетучесть материала. Приведены результаты моделирования процесса травления для нескольких критических субмикронных размеров. На основе результатов моделирования определены зависимости скоростей травления от мощности источников плазмы. Основное внимание уделено формированию отверстий для создания наноразмерного источника света. Рассмотрены как положительные, так и отрицательные свойства плазмохимического метода травления с использованием источника индуктивно-связанной плазмы, а также изложены особенности технологических установок, используемых для этих процессов. Рассмотрен процесс формирования наноэлементов в пленке серебра и эффект переосаждения частиц материала в результате ионного распыления. Предложен двухэтапный процесс травления, позволяющий сформировать вертикальный профиль стенок изготавливаемых элементов и избежать эффекта

### Ключевые слова

*Фотоника, плазмоника,  
плазмохимическое травление,  
технология, моделирование*

перезащита. Приведены рекомендации для процессов травления через электронно-лучевой резист на установках с источником индуктивно-связанной плазмы. С помощью оптимизации толщин резистивной маски и источников плазмы показаны полученные результаты травления наноразмерных элементов с сохранением геометрических форм

Поступила 20.07.2020

Принята 02.09.2020

© Автор(ы), 2020

---

**Введение.** Фотоника и одна из ее областей — плазмоника предполагают создание устройств, совмещающих в себе миниатюризацию элементов, а также высокие скорости передачи данных. Эти преимущества достигаются за счет использования электромагнитных эффектов с частотой терагерцевого (ТГц) диапазона и оптических мод. Примерами таких устройств являются наноразмерные источники света [1–3], плазменные волноводы [4–6], оптические модуляторы [7–10] и др. Изготовление этих типов устройств требует выполнения сложного комплекса технологических операций, так как диапазон геометрических размеров, в которых изготавливаются фотонные элементы, является субмикронным. Для формирования наноразмерных структур используются электронно-лучевая литография (ЭЛЛ), осаждение тонких пленок с помощью электронно-лучевого испарения или магнетронного распыления, плазмохимическое травление (ПХТ), а также метрологические инструменты с высоким разрешением для характеристики полученных объектов. Материалы, которые используются для создания фотонных устройств, включают в себя металлы, такие как золото, медь и серебро, а также диэлектрики оптического качества, кремний, различные полимеры.

*Цель настоящей работы* — исследование процессов плазмохимического травления тонких пленок серебра для формирования наноразмерного источника света. Серебро используется, поскольку оно имеет низкие омические потери в оптическом диапазоне частот [11], что критично для плазменных устройств.

**Теоретическая часть.** Плазмохимическое травление — это технология формирования топологии в материалах под действием компонентов газоразрядной плазмы. По сравнению с жидкостным травлением ПХТ может обладать высокой анизотропией при отсутствии необходимости проведения дополнительных операций для удаления с поверхности продуктов реакции и сторонних примесей.

Применяя плазму в качестве рабочего вещества, можно выполнять процессы травления различных материалов:

- диэлектрических ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiN}_x$  и др.);
- на основе кремния (Si, поли-Si, a-Si);
- материалов III–V групп (GaAs, InP, GaN и др.);
- металлов (Au, Pt, Ti, Ta, W, Al, Ag и др.);
- алмазоподобных пленок;
- полимеров, фоторезистов, электронных резистов (SPR, ARP, PMMA, SU-8 и др.)

В состав плазмы входят молекулы газа или смеси газов, радикалы, ионы и электроны. Основной объем плазмы, ~ 98 %, занимает неионизированный газ, радикалы составляют ~ 2 %, а ионы и электроны всего ~ 0,001 %. Процесс образования плазмы напрямую связан с каскадной ионизацией. При подаче на электроды реактора высокочастотного переменного напряжения под действием электрического поля электроны ускоряются и, сталкиваясь с атомами газа, образуют новую пару: электрон и ион. Когда число образующихся ионов превышает число рекомбинирующих, процесс приобретает лавинообразный характер, что является одним из условий образования плазмы [12].

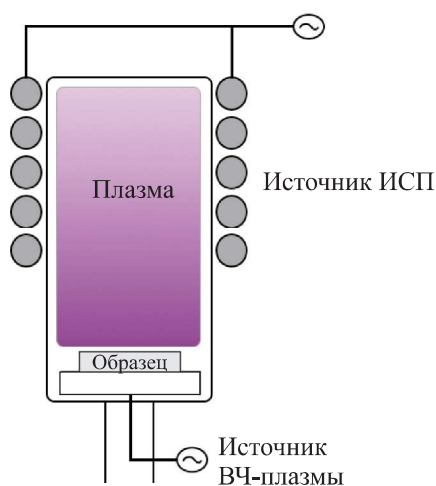
В зависимости от материала, который необходимо травить, подбираются процессные газовые смеси. Для травления металлов наиболее подходят хлорсодержащие газы ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{BCl}_3$ ), поскольку они химически взаимодействуют с металлами, образуя летучие соединения, а также инертные газы ( $\text{Ar}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ), которые физически распыляют материал. Для травления кремния, оксида кремния, стекла, различных полимеров используют фторсодержащие газы ( $\text{SF}_6$ ,  $\text{C}_4\text{F}_8$ ,  $\text{CHF}_3$ ,  $\text{CF}_4$ ), поскольку при взаимодействии с ионами фтора образуется легко удаляемый с поверхности материала тетрафторид кремния  $\text{SiF}_4$ . Фтор и хлор имеют самую высокую электроотрицательность, что позволяет им эффективно взаимодействовать с различными материалами, создавая активную пару электронов и разбивая химические связи различных молекул [13].

Объем плазмы можно условно разделить на несколько областей: прикатодное темное пространство и объем протяженного плазменного столба. Эмиссия фотонов из облака электронов и ионов также характеризует плазму по цвету. Энергия фотонов является функцией электронной структуры газовых молекул и их соединений. За областью тлеющего разряда находится темная область, в которой не происходит излучения фотонов. Эта зона наиболее сильно влияет на траекторию ионов, участвующих в травлении.

Для описания движения и энергии ионов применяются две функции: распределение ионов по энергиям (IEDF) и распределение ионов по уг-

лам (IADF) [14]. Функция распределения ионов по углам наиболее влияет на профиль травления (угол наклона стен). Функция распределения ионов по энергии отвечает за процессы взаимодействия, которые могут возникнуть, когда ионы достигнут поверхности: пассивацию, активацию химическую реакцию, физическое распыление. Эти процессы характеризуют параметры травления и зависят от напряжения смещения, плотности потока ионов, газовых смесей и длин свободного пробега ионов.

Основными параметрами, задаваемыми при выборе режимов ПХТ, являются давление в камере, мощность источника плазмы, температура подложки, потоки газов, время травления, смещение на подложке и скорость откачки.



**Рис. 1.** Схема реактора установки травления с источником индуктивно-связанной плазмы

Процесс травления серебра проводился с помощью установки плазменного травления, включающей в себя вакуумную камеру с двумя источниками плазмы — источником индуктивно-связанной плазмы (ИСП) в верхней части камеры, и источником ВЧ-плазмы в виде плоского электрода (на котором располагался образец при травлении) в нижней части камеры. Схема камеры приведена на рис. 1.

Наличие источников ИСП и ВЧ-плазмы позволяет отдельно контролировать плотность плазмы (определяемую мощностью источника ИСП) и энергию ускоряемых за счет смещения в ВЧ-плазме активных частиц, травящих образец на ВЧ-электроде.

Особенностью плазмохимических процессов травления является образование активных частиц в плазме под действием ВЧ-разряда. Газы, диссоциируя на различные компоненты (ионы, электроны и радикалы), взаимодействуют с образцом, находящимся в камере. Химически активные газы, например содержащие в своем составе фторные или хлорные компоненты ( $\text{SF}_6$ ,  $\text{CHF}_3$ ,  $\text{CF}_4$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{BCl}_3$  и др.), под действием плазменной и температурной стимуляции образуют с материалом травления компоненты, имеющие летучие свойства. Ионная бомбардировка поверхности образца способствует химическим процессам на поверхности, а также обеспечивает десорбцию продуктов реакции. Вакуумная система, как правило, включающая в себя турбомолекулярный, форвакуумный насосы и поддержи-

вающая давление процесса 1...100 мТорр, удаляет продукты реакции. Помимо процессов, протекающих с химической составляющей, есть группа материалов, не образующая при стандартных технологических условиях в камере летучих частиц. К таким материалам относятся металлы. Для протекания процесса травления серебра с образованием частиц  $\text{AgF}$  или  $\text{AgCl}$  требуются температуры более 1500 °С. В табл. 1 приведены различные данные по температуре кипения соединений серебра.

Таблица 1

**Температура кипения серебра для различных химических соединений**

Химическое соединение	Температура кипения, °С
Серебро Ag	2 162
Хлорид серебра AgCl	1 547
Фторид серебра AgF	1 159
Бромид серебра AgBr	1 502

Поэтому для травления тонких пленок Ag или Au используется аргонная газовая фаза [15], которая позволяет посредством ионной бомбардировки распылять атомы металлов. В таких процессах не происходит образование летучих соединений и для них характерно перепыление атомов на близлежащие структуры или камеру установки. Известно несколько исследований процессов травления серебра различными газовыми смесями хрома, брома и аргона [16, 17]. Как было показано в работах [16, 18], использование плазмы на основе  $\text{Cl}_2$  снижает селективность к резистивной маске, особенно из электронно-лучевых резистов, поскольку они имеют низкую плазмостойкость. Недостатки хлорных процессов травления отсутствуют в процессе травления серебра на основе аргонной плазмы, который описывается в настоящей работе.

**Моделирование процесса травления.** По мере усложнения технологических операций, в частности уменьшения линейных размеров, процессы моделирования играют ключевую роль в исследованиях по разработке технологии. Плазмохимическое травление из-за физических особенностей плазмы является сложным и необходимым процессом для моделирования. Используя современные программные комплексы, можно предсказать такие важные параметры, как скорости травления в процессе, углы профиля травления, подтравы, скорость деградации резистивной маски и эффекты загрузки.

Для оценки скоростей травления тонких пленок серебра в плазме аргона, а также результатов профиля травления было проведено моделирование процесса в САПР Silvaco TCAD.

Модель плазменного травления основана на методе Монте-Карло, переноса ионов из нейтральной плазмы через защитную оболочку, окружающую электроды и стенки. Ионы поступают в эту оболочку из плазмы, и затем их движение ускоряется в электрическом потенциале между плазмой и электродами. В методе Монте-Карло рассматривается процесс переноса основного объема и количества ионов, включая их столкновения с различными газовыми составляющими. Найденные методом Монте-Карло распределения ионов используются для расчета потока ионов, падающих на поверхность подложки. Значение этого потока затем используется для расчета скорости травления путем интегрирования потока по области травления в резисте в каждой точке на поверхности.

Для расчета скорости травления  $ER$  в модели применяется следующее уравнение:

$$ER(m) = \sum_n EP(m, i) \cdot v_{abs},$$

где  $n$  — число типов ионов в плазме, заданное параметром ION.TYPES;  $EP(m, i)$  — параметры материала  $m$  и ионов  $i$ , заданные параметрами MS.ETCH1 и MS.ETCH2;  $v_{abs}$  — ионная скорость.

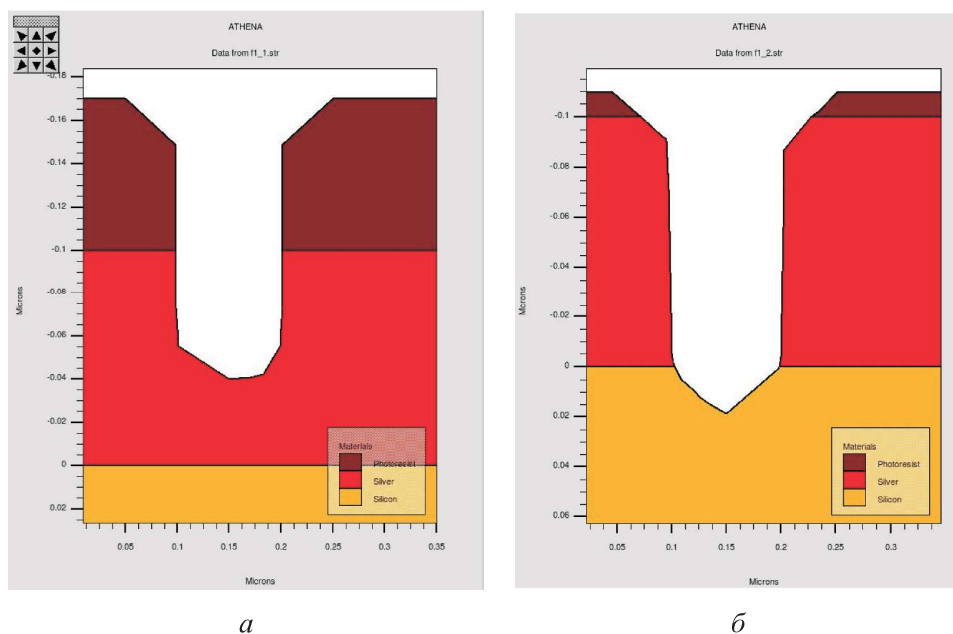
Диапазоны изменений и параметры процесса травления в камере приведены в табл. 2. Толщины серебряной пленки и маски резиста составляли 100 нм. Топология изготавливаемого наноразмерного источника света представляет собой массив отверстий круглой формы и диаметрами 100...500 нм. Для предотвращения возникновения оптических потерь предъявляются следующие требования к геометрии формируемых элементов: шероховатость менее 2 нм; угол профиля 85...89°; селективность к резистивной маске менее 0,9 : 1.

Таблица 2

#### Параметры процесса травления

Параметр	Значение
Давление в камере, мТорр	3–10
Поток газа при 30 см <sup>3</sup> /мин	10
Мощность источника плазмы, Вт	100–300
Напряжение смещения, В	200–500
Частота генератора ИСП плазмы, МГц	13,56
Плотность ионов, см <sup>-3</sup>	10 <sup>11</sup> –10 <sup>12</sup>

На рис. 2 приведен результат моделирования процесса травления с источником ИСП. Моделирование процесса в режиме травления без источника ИСП показало очень низкую скорость травления — менее 10 нм/мин.



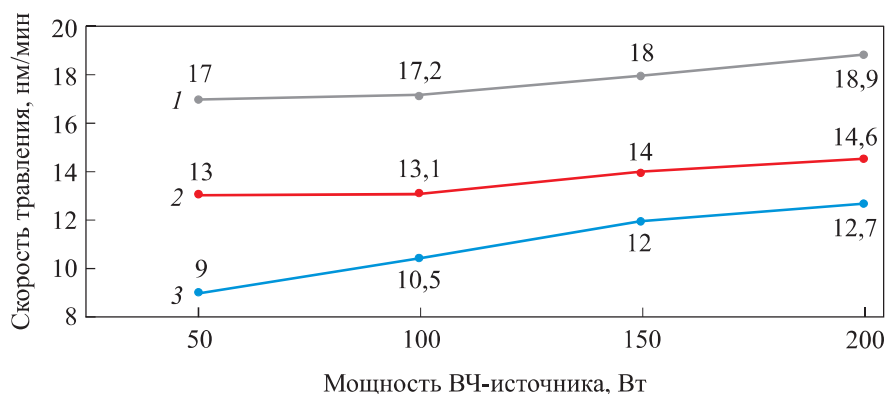
**Рис. 2.** Результат моделирования процесса травления для отверстия с критическим размером 100 нм (*a* — после прохождения 50 % времени процесса, *б* — после 100 % времени процесса)

Скорость травления серебра в режиме ИСП, полученная при давлении 3 мТорр, мощности источника ИСП 100 Вт, мощности ВЧ-источника 200 Вт и смещении 150 В, составляет 190...220 нм/мин, селективность резиста к серебру 0,95 : 1, угол профиля травления составляет 85...87°, температура на подложке равна 15 °С. В данном режиме есть сильный перетрав в подложку кремния, а также растрав маски резиста и верхней части пленки серебра.

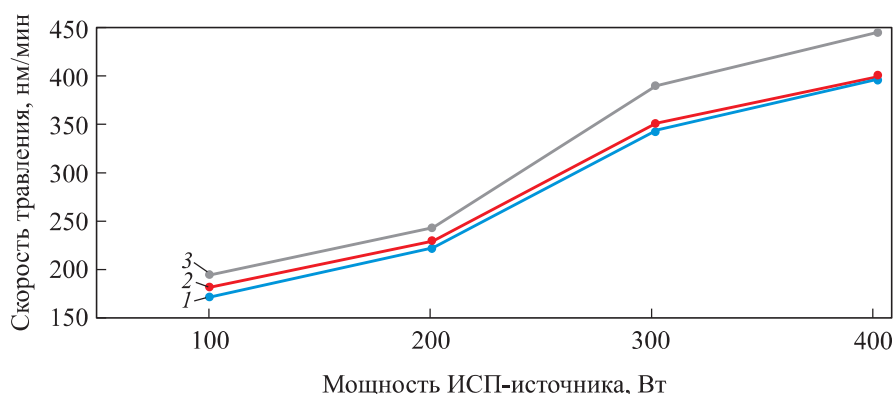
Графики зависимости скоростей травления, полученные в результате моделирования для различных диаметров отверстий, от подаваемой мощности источников ВЧ и ИСП приведены на рис. 3 и 4. Видно, что с увеличением линейного размера немного увеличивается скорость травления. Скорость распыления серебра в плазме аргона линейно зависит от мощности источников ИСП и ВЧ. Энергия ионов аргона для процесса в ИСП составляет более 100 эВ. Однако селективность к резистивной маске из-за интенсивной бомбардировки также оказывается низкой.

Процесс ионного распыления материалов в плазме аргона зависит от метода их осаждения и типа получаемых пленок (аморфные, поликристаллические, монокристаллические). Однако учесть в моделировании эти характеристики пленки не представляется возможным вследствие

ограничений программного обеспечения. Ионы аргона в первую очередь разрывают наиболее слабые связи в пленке, и из-за кристаллографических особенностей пленки может возникнуть изотропия травления. Смоделированный профиль травления имеет углы стенок порядка  $85...87^\circ$ , однако характерной особенностью процессов распыления являются меньшие углы.



**Рис. 3.** Зависимость скорости травления от мощности ВЧ-источника для трех линейных размеров отверстий 100, 200 и 500 нм (кривые 1–3 соответственно)

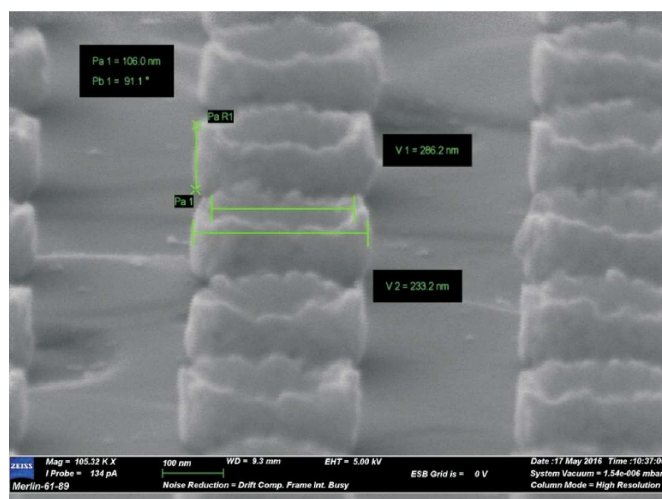


**Рис. 4.** Зависимость скорости травления от мощности ИСП-источника для трех линейных размеров отверстий 100, 200 и 500 нм (кривые 1–3 соответственно)

**Экспериментальная часть.** Полученные пленки серебра были осаждены методом электронно-лучевого испарения толщиной 100 нм. В качестве маски в настоящей работе применен электронно-лучевой резист ПММА толщиной от 100 до 300 нм. Процесс травления проведен на установке Oxford PlasmaPro с источником ИСП. Оценка формы отверстий и размеров выполнена с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Параметры процессов травления соответствуют данным,

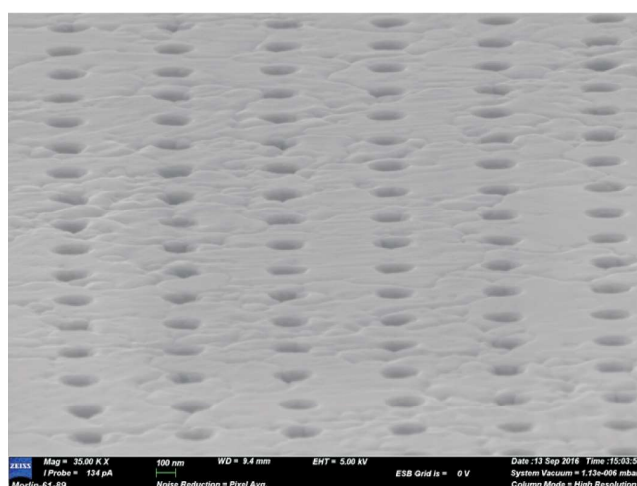


приведенным в табл. 2. Первые процессы ПХТ серебра через маску ПММА толщиной 300 нм показали сильное переосаждение частиц металла на стенку резистивной маски (рис. 5).



**Рис. 5.** Отверстия с переосажденным серебром на резистивную маску после ее удаления (толщина образовавшихся элементов менее 10 нм)

Для устранения эффекта переосаждения серебра на края маски в процессе травления была уменьшена толщина резистивной маски, что снизило аспектное соотношение глубины и линейных размеров элементов травления. Аспектное соотношение играет одну из ключевых ролей в ПХТ-процессах для линейных размеров менее 1 мкм. Полученный после уменьшения толщины маски ПММА результат показан на рис. 6.



**Рис. 6.** Отверстия после оптимизации толщины ЭЛЛ-маски

Другим ограничением для этого процесса стала используемая мощность источника ИСП. Для чувствительных к перегревам и высокоэнергетической бомбардировке ионов резистов ЭЛЛ требуется определение пороговой мощности, до которой резист может выдержать весь процесс травления. Экспериментальным путем получена мощность 300 Вт, меньше которой ПММА не изменял свои свойства и не изменялась форма отверстий. Оценка формы отверстий и профиля травления на СЭМ показала практически полное совпадение с моделью. На рис. 7 хорошо виден перетрав в подложку, и можно оценить профиль, который является практически вертикальным, так как нижнюю грань пленки серебра практически не видно.

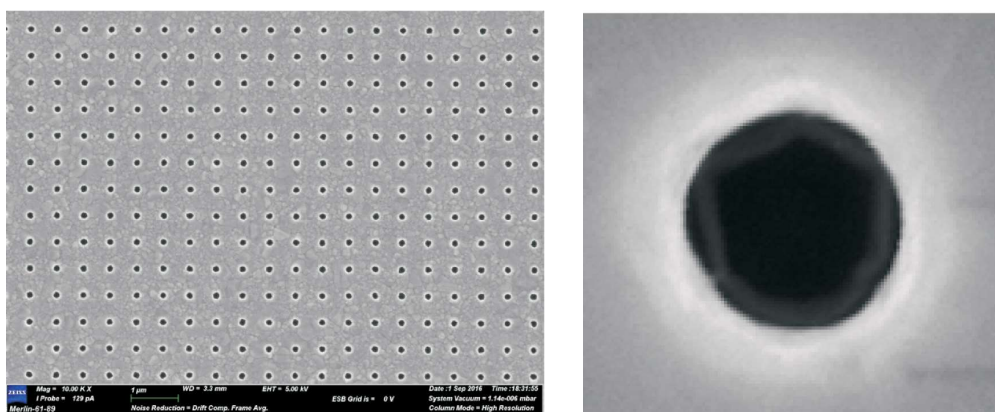


Рис. 7. Отверстия после оптимизации процесса травления

В процессе травления также выявлена зависимость формы отверстий от размеров кристаллитов пленки серебра. На рис. 8 показаны различные типы полученных элементов.

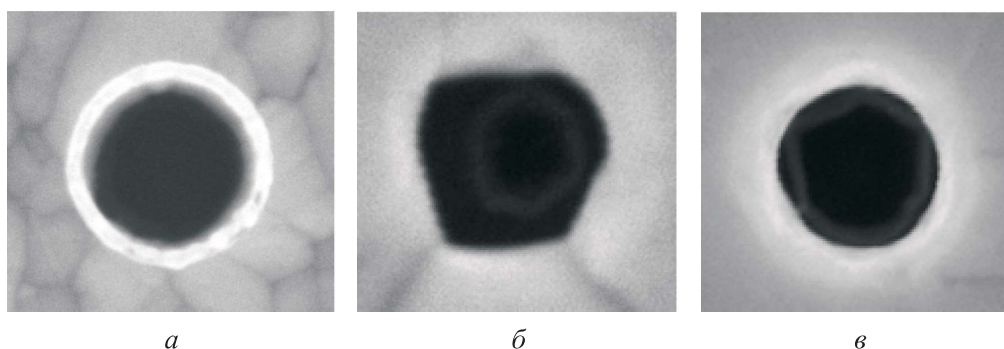


Рис. 8. Отверстия с переосажденным серебром на резистивную маску после ее удаления (толщина образовавшихся элементов менее 10 нм)

Травление отверстий первого типа на образцах с тонкопленочным покрытием серебра, имеющих наименьший размер зерна серебра (5...10 нм), происходит с переосаждением продуктов травления на маску ПММА — из-за чего образуются структуры на кромке, которые формируют ровные отверстия (рис. 8, а).

Второй тип отверстий (рис. 8, б) имеет наилучший угол профиля структуры, но наихудшую форму, так как отверстия расположены на границе зерен, размером более 500 нм.

Третий тип отверстий (рис. 8, в) имеет наилучшую форму и угол профиля, поскольку попадает на поверхность крупного зерна пленки серебра размером более 1 мкм.

Для достижения вертикального профиля травления разработан двухэтапный режим травления в плазме аргона, так как в процессе исследования полученных элементов обнаружено, что при применении одностадийного процесса с постоянным ВЧ-смещением порядка 200 В угол профиля существенно ухудшается и имеет наклон 70...80°. Для улучшения угла профиля после прохождения 70 % глубины серебра увеличивали мощность источника ИСП от 100 до 300 Вт и мощность ВЧ-смещения — от 300 до 500 В. Это позволило увеличить число и энергию доставляемых на большую глубину ионов аргона и улучшить вертикальность профиля ближе ко дну. Полученные скорости травления соответствуют оценкам модели и составляют порядка 170...200 нм/мин для источника ИСП.

**Выводы.** Исследован процесс травления серебра для создания наноисточника света. Удалось получить хорошее совпадение расчета и эксперимента в части полученных скоростей травления, формы отверстий и профиля травления. Для травления с источником ИСП найдены оптимальные режимы подаваемой от генератора мощности, позволяющие для ЭЛЛ-резистов на основе ПММА предотвратить деформацию резистивной маски.

При применении источников ИСП в процессах травления через ЭЛЛ-резисты следует подбирать мощность источников плазмы так, чтобы резист не деформировался, поскольку именно мощность источников ИСП будет оказывать наибольшее влияние. Толщина резиста играет ключевую роль в формировании структур переосаждением материала во время травления, а значит, уменьшение толщины маски позволит избежать проявления данного эффекта. Травление металлов сильно зависит от кристаллической структуры материала, в случае формирования наноструктур соизмеримых с размерами кристаллитов, следует корректировать режимы осаждения и формирования наносимых материалов перед травлением.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Claire D., Jean-Luc P. Plasmon lasers: coherent nanoscopic light sources. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2017, vol. 19, no. 44, art. 29731. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7CP06780A>
- [2] Noginov M., Zhu G., Belgrave A., et al. Demonstration of a spaser-based nanolaser. *Nature*, 2009, vol. 460, pp. 1110–1112. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature08318>
- [3] Baburin A.S., Ivanov A.I., Trofimov I.V., et al. Highly directional plasmonic nanolaser based on high-performance noble metal film photonic crystal. *Proc. SPIE*, 2018, vol. 10672. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2307572>
- [4] Saha S., Chowdhury S., Dutta A., Kildishev A.V., et al. Hybrid photonic-plasmonic waveguides with ultrathin TiN. *OSA Tech. Digest*, 2019, paper JTh2A.40. DOI: [https://doi.org/10.1364/CLEO\\_AT.2019.JTh2A.40](https://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2019.JTh2A.40)
- [5] Krasavin A.V., Zayats A.V. Silicon-based plasmonic waveguides. *Opt. Express*, 2010, vol. 18, no. 11, pp. 11791–11799. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.18.011791>
- [6] Gosciniak J., Rasras M. High-bandwidth and high-responsivity waveguide-integrated plasmonic germanium photodetector. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2019, vol. 36, no. 9, pp. 2481–2491. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.002481>
- [7] Melikyan A., Lindenmann N., Walheim S., et al. Surface plasmon polariton absorption modulator. *Opt. Express*, 2011, vol. 19, no. 9, pp. 8855–8869. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.19.008855>
- [8] Markov A., Reinhardt C., Ung B., et al. Photonic bandgap plasmonic waveguides. *Opt. Lett.*, 2011, vol. 36, no. 13, pp. 2468–2470. DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.36.002468>
- [9] Messner A., Eltes F., Ma P., et al. Leuthold, integrated ferroelectric plasmonic optical modulator. *OSA*, 2017, paper Th5C.7. DOI: <https://doi.org/10.1364/OFC.2017.Th5C.7>
- [10] Zaki A.O., Kirah K., Swillam M.A. Hybrid plasmonic electro-optical modulator. *Appl. Phys. A*, 2016, vol. 122, art. 473.
- [11] Baburin A.S., Merzlikin A.M., Baryshev A.V., et al. Silver-based plasmonics: golden material platform and application challenges [Invited]. *Opt. Mater. Express*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 611–642. DOI: <https://doi.org/10.1364/OME.9.000611>
- [12] Kenro M. Fundamentals of plasma physics and controlled fusion. *NIFS-PROC-48*. Tokyo, National Institute of Fusion Science, 2000.
- [13] Boris D.R. Electron beam generated plasmas produced in fluorine-containing gases: characterizing plasma parameters. *62nd AVS Symp.*, 2015. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2741.5288>
- [14] Shearn M., Sun X., Henry M.D., et al. Advanced plasma processing: etching, deposition, and wafer bonding techniques for semiconductor applications. In: *Semiconductor technologies*. IntechOpen, 2010, pp. 79–104. DOI: <https://doi.org/10.5772/8564>
- [15] Choi T., Hess D.W. Chemical etching and patterning of copper, silver, and gold films at low temperatures. *ECS J. Solid State Sc. Technol.*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 3084–3093. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0111501jss>

[16] Смирнов Ю.Н., Филиппов И.А., Зверев А.В. Технология формирования наноразмерных структур методами плазмохимического травления для изделий наноплазмоники. *Всерос. науч.-техн. конф. «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»*, 2016.

URL: <http://studvesna.ru/?go=articles&id=1557> (дата обращения: 15.06.2020).

[17] Lee. Y.J., Park S.D., Song B.K., et al. Characteristics of Ag etching using inductively coupled Cl<sub>2</sub>-based plasmas. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, vol. 42-1, no. 1, pp. 286–290.

DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.42.286>

[18] Rodionov I.A., Baburin S.A., Zverev A.V., et al. Mass production compatible fabrication techniques of single-crystalline silver metamaterials and plasmonics devices. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10343. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2271643>

**Филиппов Иван Андреевич** — аспирант кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Великовский Леонид Эдуардович** — ведущий специалист НОЦ «Нанотехнологии» Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Российская Федерация, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, д. 40).

**Шахнов Вадим Анатольевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Филиппов И.А., Великовский Л.Э., Шахнов В.А. Плазмохимическое травление тонких пленок серебра для приложений плазмоники индуктивно-связанной аргонной плазмой. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2020, № 4, с. 165–180. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-4-165-180>

## PLASMA-CHEMICAL ETCHING OF THIN SILVER FILMS FOR APPLICATIONS OF PLASMONICS BY INDUCTIVE-COUPLED ARGON PLASMA

I.A. Filippov<sup>1</sup>

L.E. Velikovskiy<sup>2</sup>

V.A. Shakhnov<sup>1</sup>

[ivn.filippov@gmail.com](mailto:ivn.filippov@gmail.com)

[velikovskiy.l@gmail.com](mailto:velikovskiy.l@gmail.com)

[shakhnov@mail.ru](mailto:shakhnov@mail.ru)

[shakhnov@bmstu.ru](mailto:shakhnov@bmstu.ru)

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> TUSUR, Tomsk, Russian Federation

## Abstract

The study focuses on the processes of plasma-chemical etching of silver films for the manufacture of photonic elements — nanoscale light sources, and examines the theoretical foundations of etching processes and the process of plasma formation in plasma-chemical etching facilities. We assessed the introduced technology when forming topological elements in thin films of silver metal, and identified key problems, such as redeposition and non-volatility of the material. The paper presents the results of simulating the etching process for several critical submicron sizes, and, based on the simulation results, shows the dependences of the etching rates on the power of the plasma sources. The focus is on the formation of holes to create a nanoscale light source. Both positive and negative properties of the plasma-chemical etching method using a source of inductive-coupled plasma are considered, and the features of technological facilities used for these processes are outlined. The process of formation of nanoelements in a silver film and the effect of redeposition of material particles as a result of ion sputtering are considered. We propose a two-stage etching process, which makes it possible to form a vertical profile of the walls of the manufactured elements and to avoid the effect of redeposition. We also give recommendations for the processes of etching through an electron-beam resist in facilities with an inductive-coupled plasma source. By optimizing the thicknesses of the resistive mask and plasma sources, we obtained the results of etching nanoscale elements with preservation of geometric shapes

## Keywords

*Photonics, plasmonics, plasma-chemical etching, technology, simulation*

Received 20.07.2019

Accepted 02.09.2020

© Author(s), 2020

---

## REFERENCES

- [1] Claire D., Jean-Luc P. Plasmon lasers: coherent nanoscopic light sources. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2017, vol. 19, no. 44, art. 29731. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7CP06780A>
- [2] Noginov M., Zhu G., Belgrave A., et al. Demonstration of a spaser-based nanolaser. *Nature*, 2009, vol. 460, pp. 1110–1112. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature08318>
- [3] Baburin A.S., Ivanov A.I., Trofimov I.V., et al. Highly directional plasmonic nanolaser based on high-performance noble metal film photonic crystal. *Proc. SPIE*, 2018, vol. 10672. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2307572>

- [4] Saha S., Chowdhury S., Dutta A., Kildishev A.V., et al. Hybrid photonic-plasmonic waveguides with ultrathin TiN. *OSA Tech. Digest*, 2019, paper JTh2A.40. DOI: [https://doi.org/10.1364/CLEO\\_AT.2019.JTh2A.40](https://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2019.JTh2A.40)
- [5] Krasavin A.V., Zayats A.V. Silicon-based plasmonic waveguides. *Opt. Express*, 2010, vol. 18, no. 11, pp. 11791–11799. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.18.011791>
- [6] Gosciniak J., Rasras M. High-bandwidth and high-responsivity waveguide-integrated plasmonic germanium photodetector. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2019, vol. 36, no. 9, pp. 2481–2491. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.002481>
- [7] Melikyan A., Lindenmann N., Walheim S., et al. Surface plasmon polariton absorption modulator. *Opt. Express*, 2011, vol. 19, no. 9, pp. 8855–8869. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.19.008855>
- [8] Markov A., Reinhardt C., Ung B., et al. Photonic bandgap plasmonic waveguides. *Opt. Lett.*, 2011, vol. 36, no. 13, pp. 2468–2470. DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.36.002468>
- [9] Messner A., Eltes F., Ma P., et al. Leuthold, integrated ferroelectric plasmonic optical modulator. *OSA*, 2017, paper Th5C.7. DOI: <https://doi.org/10.1364/OFC.2017.Th5C.7>
- [10] Zaki A.O., Kirah K., Swillam M.A. Hybrid plasmonic electro-optical modulator. *Appl. Phys. A*, 2016, vol. 122, art. 473.
- [11] Baburin A.S., Merzlikin A.M., Baryshev A.V., et al. Silver-based plasmonics: golden material platform and application challenges [Invited]. *Opt. Mater. Express*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 611–642. DOI: <https://doi.org/10.1364/OME.9.000611>
- [12] Kenro M. Fundamentals of plasma physics and controlled fusion. *NIFS-PROC-48*. Tokyo, National Institute of Fusion Science, 2000.
- [13] Boris D.R. Electron beam generated plasmas produced in fluorine-containing gases: characterizing plasma parameters. *62nd AVS Symp.*, 2015. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2741.5288>
- [14] Shearn M., Sun X., Henry M.D., et al. Advanced plasma processing: etching, deposition, and wafer bonding techniques for semiconductor applications. In: *Semiconductor technologies*. IntechOpen, 2010, pp. 79–104. DOI: <https://doi.org/10.5772/8564>
- [15] Choi T., Hess D.W. Chemical etching and patterning of copper, silver, and gold films at low temperatures. *ECS J. Solid State Sc. Technol.*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 3084–3093. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0111501jss>
- [16] Smirnov Yu.N., Filippov I.A., Zverev A.V. [Technology of nanoscale structures formation by plasma-chemical etching methods for nanoplasmonics products]. *Vseros. nauch.-tekh. konf. "Studencheskaya nauchnaya vesna: Mashinostroitel'nye tekhnologii"* [Rus. Sc.-Tech. Conf. "Students Scientific Spring: Machine Engineering Technologies"], 2016 (in Russ.). Available at: <http://studvesna.ru/?go=articles&id=1557> (accessed: 15.06.2020).
- [17] Lee. Y.J., Park S.D., Song B.K., et al. Characteristics of Ag etching using inductively coupled Cl<sub>2</sub>-based plasmas. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, vol. 42-1, no. 1, pp. 286–290. DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.42.286>

[18] Rodionov I.A., Baburin S.A., Zverev A.V., et al. Mass production compatible fabrication techniques of single-crystalline silver metamaterials and plasmonics devices. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10343. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2271643>

**Filippov I.A.** — Post-Graduate Student, Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Velikovskiy L.E.** — Lead Specialist, Scientific and Educational Center “Nanotechnology”, TUSUR (Lenina prospekt 40, Tomsk, 634050 Russian Federation).

**Shakhnov V.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Filippov I.A., Velikovskiy L.E., Shakhnov V.A. Plasma-chemical etching of thin silver films for applications of plasmonics by inductive-coupled argon plasma. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2020, no. 4, pp. 165–180 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-4-165-180>