

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ГАЗОВЫМ РАЗРЯДОМ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТИПА

Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков

Институт систем обработки изображений РАН,
Самарский государственный аэрокосмический университет

Аннотация

Описан механизм образования газового разряда высоковольтного типа, приведены экспериментальные зависимости, характеризующие параметры разряда при различных условиях его существования.

Введение

Низкотемпературная плазма широко используется в процессах распыления [1], плазмохимического травления [2], очистки поверхности подложек [3] и т.д. Ее получение осуществляется газовыми разрядами тлеющего, высокочастотного (ВЧ), сверхвысокочастотного (СВЧ) и магнетронного типов [4]. Основными недостатками таких разрядов являются:

- явление уменьшения скорости травления с увеличением относительных размеров поверхности [5, 6];
- влияние материала, геометрии и свойств поверхности подложки на параметры газовых разрядов [7, 8];
- загрязнение поверхности обработки малоактивными или неактивными частицами плазмы [9, 10, 11], изменяющими характеристики ее травления;
- зависимость параметров заряженных частиц от режимов работы газоразрядного устройства.

Это приводит к значительным трудностям при формировании топологии интегральных микросхем, дифракционного микрорельефа и оптимизации процесса травления окон в маскирующих слоях.

В работах [12-14] описано применение высоковольтного разряда в газе при вакуумной сварке, изготовлении омических контактов, плазмохимическом травлении кварца и очистки поверхности диэлектрических подложек, что говорит о широких возможностях использования этого вида разряда в разных областях микроэлектроники. Однако в данных работах отсутствуют механизмы образования газового разряда и его математическое описание, которые позволили бы доступными средствами определять условия возникновения разряда, механизмы формирования потока плазмы. Решение этих задач и является целью настоящей работы.

Материалы и методика

Исследования проводились на газоразрядном устройстве высоковольтного типа [15], формирующем направленные потоки плазмы с энергией частиц до 6 кэВ и током, изменяющимся в диапазоне 0-140 мА. В качестве рабочего газа использовался хладон-14 (CF_4).

Параметры плазмы измерялись методами коллектора [16] и вращающегося зонда [17]. Для исключения явления распыления зонда его изготавливали из вольфрама в виде проволоки диаметром $\varnothing 0,1$ мм, что практически исключало влияние на параметры плазмы.

Для увеличения эмиссии электронов катод изготавливали из алюминия [17]. Для увеличения равномерности распределения частиц плазмы по энергиям анод был изготовлен в виде сетки с размером ячейки – $1,8 \times 1,8$ мм и диаметром проволоки – 0,5 мм, выполненной из нержавеющей стали, что значительно снижало ее химическое взаимодействие с частицами плазмы, а также увеличивало стойкость к температурному нагреву. Данное утверждение следует из того, что если осуществить анализ газоразрядного устройства, описанного в работе [12], то каждая ячейка сетки представляет собой отверстие в аноде, а весь поток заряженных частиц, формируемый предлагаемым устройством, будет состоять из одинаковых микропотоков. Параметры данных потоков определяются размерами ячейки сетки и свойствами поверхности материала катода, которые в данном случае одинаковы, а, следовательно, одинаковы и параметры отдельных микропотоков. Это приводит к тому, что равномерность распределения заряженных частиц по сечению потока будет также одинакова, а неравномерность определяется только краевым эффектом конструкции катода, размер области которого минимален. Для параметров, рассматриваемых в данной статье, равномерность распределения заряженных частиц по сечению потока была не хуже 98% [18].

С целью формирования дифракционного микрорельефа был проведен эксперимент по травлению образцов диоксида кремния в плазме CF_4/O_2 , сформированной газовым разрядом высоковольтного типа. В качестве образца использовалась подложка диоксида кремния размером 20×20 мм², на поверхности которой методом фотолитографии была сформирована фоторезистивная маска, представляющая собой периодическую решетку.

Результаты и обсуждение характеристик газового разряда высоковольтного типа

Высоковольтный разряд в газе является аномальной разновидностью тлеющего разряда, поэтому он обладает всеми его достоинствами, и у него полностью отсутствует такой недостаток как зависимость параметров газового разряда от месторасположения в нем подложки и от свойств ее поверхности.

При сближении анода и катода до темного астонового пространства тлеющий разряд прекращается, т.к. выполняется неравенство $nG < 1$, где n и G –

число электронов и ионов, соответственно. Однако если в аноде выполнить сквозное отверстие, то в его области уже нет запрета для выполнения неравенства $nG \geq 1$ [12]. Физически это означает, что данное неравенство выполняется тогда, когда в генерации одного или нескольких пар положительных ионов принимают участие один или более электронов, т.е. возникают условия образования газового разряда за пределами анода. Существование разряда вне электродов газоразрядного устройства позволяет сделать вывод о том, что в образовавшемся разряде его частицы находятся в свободном движении [12]. Это резко снижает зависимость параметров частиц от режимов работы устройства, практически полностью устраняет возможность появления эффекта загрузки и операцию защиты поверхности катода от распыления. Свободное движение частиц, а также резко очерченные границы разряда свидетельствуют об их прямолинейном движении за пределами анода в направлении, перпендикулярном его поверхности. Действительно, как следует из рис. 1, распределение заряженных частиц по сечению плазменного потока является равномерным, а их движение к поверхности образца – нормальным.

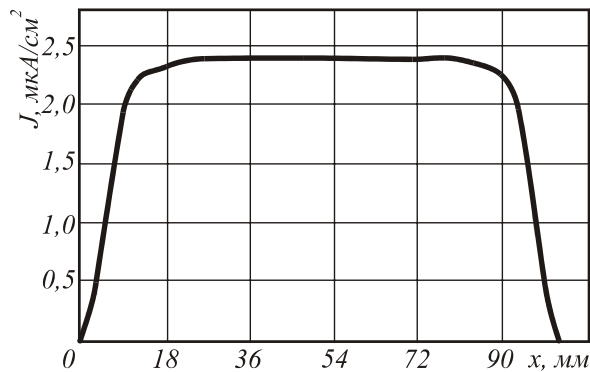


Рис. 1. Характер распределения заряженных частиц по сечению плазменного потока

Анализ вольтамперной характеристики (ВАХ) такого разряда (рис. 2) показывает, что ее формирование обусловлено ионизацией атомов рабочего газа (α – процесс) и материала катода (γ – процесс) [19], причем в диапазоне напряжений $300 \leq U \leq 1000$ В происходит преимущественно ионизация атомов рабочего газа, а при $U \geq 1000$ В – интенсивное распыление материала катода, что приводит к возникновению ионно-электронной эмиссии, которая и формирует оставшийся участок ВАХ.

Однако в области относительно низких давлений ($p \leq 1,5 \cdot 10^{-1}$ торр) в диапазоне $20 \leq I \leq 50$ мА явно просматривается участок ВАХ со слабой зависимостью напряжения от тока. Это позволяет предположить, что в данном диапазоне напряжений при высоких давлениях электроны еще успевают набрать энергию, необходимую для ионизации атомов рабочего газа, и активно участвуют в механизме увеличения тока даже при незначительном увеличении напряжения.

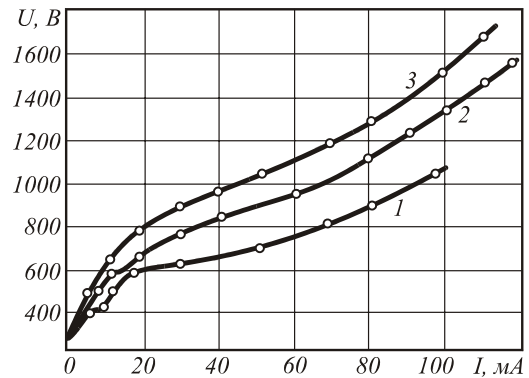


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика газового разряда высоковольтного типа при различных значениях давления в рабочей камере: 1- $1,5 \cdot 10^{-1}$ торр; 2- $1,2 \cdot 10^{-1}$ торр; 3- $9 \cdot 10^{-2}$ торр

Сделанное предположение хорошо сочетается и с зависимостью, представленной на рис. 3: насыщение напряжения в диапазоне давлений $1,8 \cdot 10^{-1}$ торр $\geq p \geq 9 \cdot 10^{-2}$ торр в случае чистого катода (нового) доказывает, что возможности ионизации рабочего газа исчерпаны, а подъем зависимости при $p < 9 \cdot 10^{-2}$ торр объясняется распылением и ионизацией атомов материала катода (ионно-электронной эмиссией).

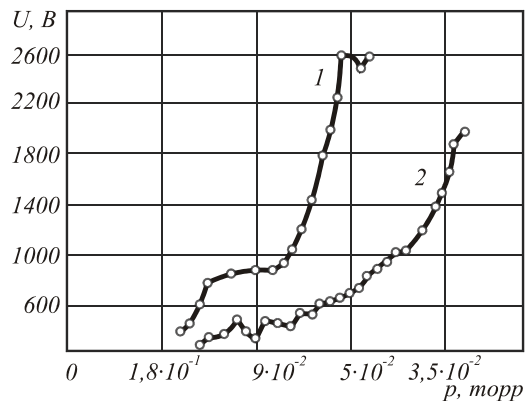


Рис. 3. Зависимость напряжения на катоде от давления в рабочей камере: 1 – для чистого катода (нового), 2 – для грязного катода (после длительной работы)

Для доказательства сделанных утверждений произведем оценку параметров механизмов существования газового разряда. Известно, что ионизация атомов рабочего газа может происходить под действием электронов (α – процесс) и положительных ионов (β – процесс), а эмиссия вторичных электронов с поверхности катода посредством ионной бомбардировки (γ – процесс) и поверхностной ионизацией излучением (δ – процесс) [19]. Выясним, какие из вышеперечисленных процессов являются наиболее определяющими при возникновении и поддержании высоковольтного газового разряда.

Коэффициент объемной ионизации, характеризующий α -процесс, описывается выражением [20]:

$$\alpha_i = \frac{1}{l_i} = \frac{E}{\Phi_i}, \quad (1)$$

где l_i – длина пробега для ионизации, см; ϕ_i – потенциал ионизации, В; E – напряженность неоднородного электрического поля, В/см, рассчитываемая согласно [21] по формуле:

$$E(y) = \frac{4cU / \pi}{(1+h / c\pi) 4c^2 + y^2}, \quad (2)$$

где U – напряжение на катоде, В; c – некоторая постоянная, вычисляемая из системы уравнений [21], которая для отверстия в аноде размером 1,8x1,8 мм равна $c=0,08$ см; h – расстояние между анодом и катодом, см. Для того, чтобы найти напряженность электрического поля, действующего на заряженную частицу на ее первой длине свободного пробега λ (см), необходимо подставить вместо y в выражение (2) значение величины λ , которое определяется как:

$$\lambda = \frac{4\sqrt{2}}{n_0\sigma}, \quad (3)$$

где n_0 – концентрация молекул хладона-14, равная в случае рабочего давления $9 \cdot 10^{-2}$ торр, $n_0 = 0,29 \cdot 10^{16}$ см⁻³; σ – эффективное сечение молекулы хладона-14. Расчет по (3) показал, что $\lambda = 1,3$ см. Так как разряд заигрался при напряжении на катоде $U=300$ В, то, подставляя данное значение U в (2), а также известные $h=0,5$ см и $c=0,08$ см, получим $E=15,4$ В/см. Подставляя данное значение напряженности электрического поля в (1), получим следующее $\alpha_i \approx 1$ см⁻¹, что соответствует условию возникновения газового разряда за пределами анода ($nG \geq 1$). Сравнение же величин λ и l_i при данном напряжении на электродах показало также, что $\lambda > l_i$: ионизация молекул остаточного газа возможна [19].

Эффективность ионизации молекул рабочего газа положительными ионами низка, и β – процесс при исследовании газового разряда можно не учитывать [20]. Поскольку высоковольтный разряд является самостоятельным, а в вакуумной камере, где заигрался разряд, отсутствовали какие-либо посторонние средства излучения, то δ – процесс также можно не рассматривать, следовательно, основным источником образования вторичных электронов, эмитируемых катодом, являются положительные ионы. Степень участия положительных ионов в образовании вторичных электронов характеризуется коэффициентом вторичной эмиссии, который в случае $U=300$ В равен $\gamma=7,16 \cdot 10^{-5}$ [22]. При напряжении же на катоде в 1000 В расчет коэффициентов α_i и γ по вышеизложенным методикам показал следующие их значения: $\alpha_i \approx 4,8$, а $\gamma=0,66$ [22], т.е., как видно из сравнения данных величин, объемная ионизация молекул рабочего газа выросла только в три раза, в то время как ионизация за счет ионно-электронной эмиссии увеличилась в 10^4 раз. Таким образом, при напряжениях на катоде $300 \leq U \leq 1000$ В основную

роль в ионизации молекул рабочего газа играет объемная ионизация электронным ударом, а при $U \geq 1000$ В – ионизация за счет ионно-электронной эмиссии, что хорошо согласуется с зависимостями, представленными на рис. 2 и 3.

Нарушение экспоненциальной зависимости, представленной на рис. 3 при $p=5,5 \cdot 10^{-2} - 4,8 \cdot 10^{-2}$ торр, происходит за счет появления нестабильных микродуговых разрядов между катодом и анодом, видимых визуально. Условия возникновения данного вида паразитных разрядов в этом диапазоне напряжений и давлений становятся такими же, как и у высоковольтного разряда, поэтому они возникают практически одновременно. При дальнейшем увеличении напряжения один из разрядов становится основным, и осуществляется пробой диэлектрического промежутка между анодом и катодом. Следы трех таких пробоев представлены на рис. 4.

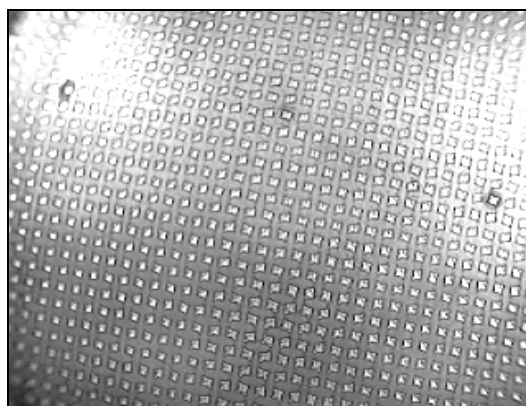


Рис. 4. Следы от пробоев и общий вид поверхности катода после длительной работы

Отсутствие насыщения в случае грязного катода (рис. 3) (после длительной работы) свидетельствует о наличии структурных нарушений в его приповерхностной области, наблюдаемых на рис. 4 в виде следов распыления, формируемых в процессе работы микролучами плазменного потока и повторяющих контур отверстий в аноде. Известно [23], что в области любых нарушений кристаллической решетки связи атомов ослабевают. Потенциал ионизации данных нарушений из-за ионной бомбардировки меньше, чем у основного материала, а, следовательно, стоит ожидать уменьшения потенциала зажигания высоковольтного разряда, что и соответствует характеру кривой рис. 3. Формирование зависимости в этом случае происходит за счет преобладания эмиссии материала катода, которая наступает при более низком давлении. Низкое давление способствует удалению с поверхности катода легко испаряемых загрязнений, возникающих в результате адсорбции различного рода атомов и молекул, и тогда разряд поддерживается только за счет ионно-электронной эмиссии.

Таким образом, при напряжениях на катоде $300 \leq U \leq 1000$ В основную роль в поддержании газового разряда высоковольтного типа играет α -

процесс, а при $U \geq 1000$ В, разряд существует за счет γ – процесса. По мере увеличения длительности работы катода роль γ – процесса повышается.

Эксперимент по травлению диоксида кремния в плазме CF_4/O_2 , газового разряда высоковольтного типа показал возможность формирования в такой плазме дифракционного микрорельефа, представленного на рис. 5.

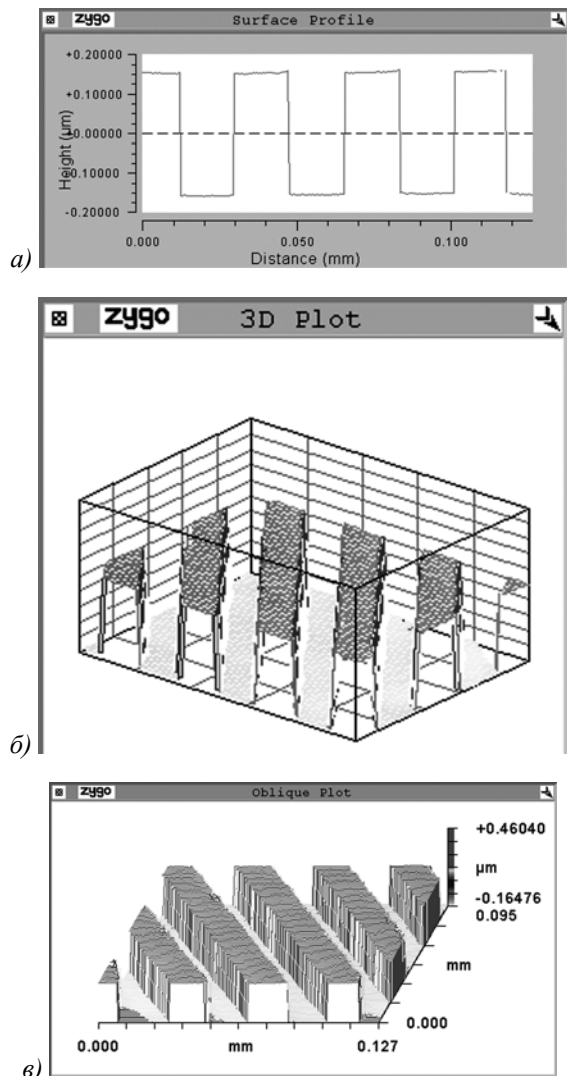


Рис. 5. Дифракционный микрорельеф, сформированный на поверхности подложек диоксида кремния, в плазме CF_4/O_2 газового разряда высоковольтного типа, измеренный на микроинтерферометре New-View-5000 фирмы Zygo. Значения тока, напряжения на катоде и времени травления составляли, соответственно: $I=120$ мА, $U=2$ кВ, $t=70$ с

Анализ профилограммы и вида дифракционного микрорельефа показывает: скорость травления равна ≈ 266 нм/мин, микрорельеф равномерный, без каких-либо неоднородностей с вертикальным профилем стенок, что хорошо согласуется с результатами, изложенными в статье [24], и не противоречит результатам, полученным авторами в настоящей работе.

Заключение

В настоящей работе проведено исследование механизмов формирования низкотемпературной плазмы газовым разрядом высоковольтного типа (ГРВТ). Описан механизм образования ГРВТ. Показано, что основным отличием данного разряда от существующих является возможность его возникновения в области темного астонового пространства при наличии отверстия в аноде. Экспериментально установлено, что распределение заряженных частиц по сечению плазменного потока, сформированного ГРВТ, является равномерным, а их направленность к поверхности образца – нормальной. Приведены экспериментальные зависимости, характеризующие параметры разряда при различных условиях его существования, которые хорошо описываются традиционными уравнениями физики газового разряда.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № НШ-1007.2003.1, а также российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» («BRHE»).

Литература

1. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА // М.: Высшая школа, 1987. 376 с.
2. Ивановский Г.Ф. Ионно-плазменная обработка материалов // М.: Радио и связь, 1986. 232 с.
3. Колпаков А.И., Колпаков В.А., Кричевский С.В. Ионно-плазменная очистка поверхности контактов реле малой мощности // Электронная промышленность. 1996. № 5. С. 41-44.
4. Киреев В.Ю., Данилин Б.С., Кузнецов В.И. Плазмохимическое и ионно-химическое травление микроструктур // М.: Радио и связь, 1983. 126 с.
5. Doh Hyun-Ho, Yeon Chung-Kyu, Whang Ki-Woong. Effects of bias frequency on reactive ion etching lag in an electron cyclotron resonance plasma etching system // J. Vac. Sci. and Technol. A. Vol.15, №3, Pt 1, 1997. P. 664-667.
6. Ковалевский А.А., Малышев В.С., Цыбульский В.В., Сорокин В.М. Исследование процесса изотропного плазмохимического травления пленок диоксида кремния // Микроэлектроника. 2002. Т.31, №5. С. 344-349.
7. Woodworth J.R., Aragon B.P., Hamilton T.W. Effect of bumps on the wafer on ion distribution functions in high-density argon and argon-chlorine discharges // Appl. Phys. Lett. Vol.70. №15. 1997. P. 1947-1949.
8. Hebner G.A., Blain M.G., Hamilton T.W. Influence of surface material on the boron chloride density in inductively coupled discharges // J. Vac. Sci. and Technol. A. 1999. Vol.17. №6. P. 3218-3224.
9. Miyata Koji, Hori Masaru, Goto Toshio CF_x radical generation by plasma interaction with fluoro-

- carbon films on the reactor wall // *J. Vac. Sci. and Technol. A*. 1996. Vol.14. №4. P. 2083-2087.
10. Komine Kenji, Araki Nobusige, Noge Saturu, Ueno Hiroki, Hohkawa Kohji. Residuals caused by the CF₄ gas plasma etching process // *Jap. J. Appl. Phys. Pt.1*. 1996. Vol.35. №5b. P. 3010-3014.
 11. McLane G.F., Dubey M., Wood M.C., Lynch K.E. Dry etching of germanium in magnetron enhanced SF₆ plasmas // *J. Vac. Sci. and Technol. B*. 1997. Vol.15. №4. P. 990-992.
 12. Вагнер И.В. и др. Элементарная ячейка для формирования электронных пучков произвольной формы в высоковольтном разряде в газе // *ЖТФ*. 1974. Т. 44. В.8. С. 1669-1674.
 13. Комов А.Н., Колпаков А.И., Рафаевич Б.Д., Бондарева Н.И. Повышение проводимости контактов к силовым полупроводниковым приборам // *Электронная техника*. 1979. Сер. 7. В. 5 (96). С. 7-10.
 14. Колпаков В.А., Колпаков А.И. Плазмохимическое травление диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа // *Труды III-ей междунар. школы-семинара БИКАМП-01*. Санкт-Петербург, 2001. С. 90-92.
 15. Комов А.Н., Колпаков А.И., Бондарева Н.И., Захаренко В.В. Электронно-лучевая установка для пайки элементов полупроводниковых приборов // *ПТЭ*. 1984. №5. С. 218-220.
 16. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки // М.: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
 17. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов // М.: Машиностроение, 1978. 222 с.
 18. Колпаков В.А., Колпаков А.И. Исследование эффекта увлечения атомов кремния «вакансиями», возникающими в расплаве алюминия при облучении его поверхности ионно-электронным потоком // *Письма в ЖТФ*. 1999. Т.25. В.15. С. 58-65.
 19. Чернетский А.В. Введение в физику плазмы // М.: Атомиздат, 1969. 303 с.
 20. Райзер Ю.П. Физика газового разряда // М.: Наука, 1987. 592 с.
 21. Колпаков А.И., Растегаев В.П. Расчет электрического поля газоразрядной пушки высоковольтного типа // М.: ВИНТИ, 1979. №1381-79.
 22. Измайлов С.В. К термической теории испускания электронов под влиянием удара быстрых ионов // *ЖЭТФ*. 1939. Т. 9. В. 12. С. 1473-1483.
 23. Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках // Под ред. С.А Медведева. М.: Мир, 1974. 463 с.
 24. Колпаков В.А. Моделирование процесса травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа // *Микроэлектроника*. 2002. Т.31. №6. С. 431-440.

Studies into mechanisms of generating a low-temperature plasma in high-voltage gas discharge

N.L. Kazanskiy¹, V.A. Kolpakov²

¹ *Image Processing Systems Institute of RAS*

² *Samara State Aerospace University*

Abstract

The paper describes the mechanism of the formation of a high-voltage gas discharge, provides the experimental dependences characterizing the discharge parameters under various conditions of its existence.

Keywords: low-temperature plasma, high-voltage gas, discharge.

Citation: Kazanskiy NL, Kolpakov VA. Studies into mechanisms of generating a low-temperature plasma in high-voltage gas discharge. *Computer Optics* 2003; 25: 112-116.

References

- [1] Chernyaev VN. Physical and chemical processes in electronics manufacture. Moscow: "Vysshaya Shkola" Publisher; 1987.
- [2] Ivanovsky GF. Ion-plasma processing of materials. Moscow: "Radio i Svyaz" Publisher; 1986.
- [3] Kolpakov AI, Kolpakov VA, Krichevsky SV. Ion-plasma cleaning of low-power relay contacts. *Elektronnaya promyshlennostj* 1996; 5: 41-44.
- [4] Kireev VY, Danilin BS, Kuznetsov VI. Plasma chemical and ion chemical etching of microstructures. Moscow: "Radio i Svyaz" Publisher; 1983.
- [5] Doh H-H, Yeon Ch-K, Whang K-W. Effects of bias frequency on reactive ion etching lag in an electron cyclotron resonance plasma etching system. *J Vac Sci Technol A* 1997; 15(3): 664-667.
- [6] Kovalevsky AA, Malyshev VS, Tsybulsky VV, Sorokin VM. Investigation of the process of isotropic plasma-chemical etching of silicon dioxide films. *Microelectronika* 2002; 31(5): 344-349.
- [7] Woodworth JR, Aragon BP, Hamilton TW. Effect of bumps on the wafer on ion distribution functions in high-density argon and argon-chlorine discharges. *Appl Phys Lett* 1997; 70(15): 1947-1949.
- [8] Hebner GA, Blain MG, Hamilton TW. Influence of surface material on the boron chloride density in inductively coupled discharges. *J Vac Sci Technol A* 1999; 17(6): 3218-3224.
- [9] Miyata K, Hori M, Goto T. CFX radical generation by plasma interaction with fluorocarbon films on the reactor wall. *J Vac Sci Technol A* 1996; 14(4): 2083-2087.
- [10] Komine K, Araki N, Noge S, Ueno H, Hohkawa K. Residuals caused by the CF₄ gas plasma etching process. *Jpn J Appl Phys* 1996; 35(5S): 3010-3014.
- [11] McLane GF, Dubey M, Wood MC, Lynch KE. Dry etching of germanium in magnetron enhanced SF₆ plasmas. *J Vac Sci Technol B* 1997; 15(4): 990-992.
- [12] Wagner IV, et al. Elementary cell for the formation of electron beams of arbitrary shape in a high-voltage discharge in gas. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki* 1974; 44(8): 1669-1674.
- [13] Komov AN, Kolpakov AI, Rafevich BD, Bondareva NI. Increasing the conductance of contacts of power semiconductor devices. *Elektronnaya Tekhnika* 1979; Ser 7, 5(96): 7-10.
- [14] Kolpakov VA, Kolpakov AI. Plasma-chemical etching of silicon dioxide in high-voltage gas discharge plasma. *Proceeding of 3th International Youth School-Workshop BIKAMP-01* 2001: 90-92.
- [15] Komov AN, Kolpakov AI, Bondareva NI, Zakharenko VV. Electron-beam unit for soldering semiconductor devices. *Pribory i Tekhnika Eksperimenta* 1984; 5: 218-220.
- [16] Molokovsky SI, Sushkov AD. Intense electron and ion beams. Moscow: "Energoatomizdat" Publisher; 1991.
- [17] Rykalin NN, Zuev IV, Uglov AA. Fundamentals of electron beam processing of materials. Moscow: "Mashinostroenie" Publisher; 1978.
- [18] Kolpakov VA, Kolpakov AI. Investigation of the entrainment of silicon atoms by "vacancies" formed in an aluminum melt when its surface is exposed to an ion-electron flux. *Tech Phys Lett* 1999; 25(8): 618-620.
- [19] Chernetsky AV. Introduction to plasma physics. Moscow: "Atomizdat" Publisher; 1969.
- [20] Raizer YP. Gas discharge physics. Moscow: "Nauka" Publisher; 1987.
- [21] Kolpakov AI, Rastegaev VP. Electric-field analysis of a high-voltage gas-discharge gun. The manuscript was deposited at VINITI 1979; No. 1381-79.
- [22] Izmailov SV. Thermal theory of electron emission under the impact of fast ions. *Journal of Experiment and Theoretical Physics* 1939; 9(12): 1473-1483.
- [23] Mataré HF. Defect electronics in semiconductors. John Wiley and Sons Inc; 1971.
- [24] Kolpakov VA. Simulation of technological process of silicon dioxide etching in high-voltage gas discharge plasma. *Microelectronika* 2002; 31(6): 431-440.