

THE AUTOMATED SYSTEM FOR MEASURING THE IMPULSE OF THE MHD THRUSTER

Tsar'gorodsev Yu.P., Associate Prof. Department of Physics MFSU, Cand., Usatov I.I., chief engineer Department of Physics MFSU, Poluektov N.P., Professor Dr technical. Sciences Department of Physics MFSU, Evstigneev A.G., chief engineer Department of Physics MFSU, Zhuravlev A.A., MGUPI, Gorshkov V.V., MGUPI, Kubarev Yu.V., prof. Department tools and information-measuring systems, Dr. Sc Sciences MGUPI

poluekt@mgul.ac.ru

Moscow State Forest University (MSFU) 1st Institut'skaya st., 1, 141005, Mytischy, Moscow reg., Russia
Moscow State University of Instrument Engineering and Informatics 107 996, Moscow st/ Stromыnka, 20

The article describes the automated system for measuring the impulse of the MHD thruster designed for spaceflight. Light stainless steel disk with a diameter of 50 mm mounted on a thin ceramic tube length of 250 mm. A counterweight and an aluminum plate, with both ends of which are set optocoupler are installed at the opposite end of the tube. The tube is attached to the tungsten filament $\varnothing = 0,35$ mm in the center of mass. One end of the spring is attached to the filament and the other end is connected to the screw. The screw can be rotated by a stepping motor. Operation of a motor and optocoupler is carried out by a computer via a control unit NI-6008. Plasma jet deflects a disk and spring spins. Stepper motor returns the disk to the original position using control program. Measurement error depends on the accuracy to return to its original position. Starting position is controlled by signals optocouplers. The compensating force and thrust force are proportional to the number of steps N . The calibration apparatus of the engine includes both determination of the zero position, and the power factor motor step k : $F = kN$. A force acting disk plate of about $5 \cdot 10^{-3}$ H (0.5 grams) is obtained at flow rate 0,2 mg / s and the discharge power 1,8 kW. Moving the disk across plasma jet one can calculate the total thrust of a engine.

Key words: specific impulse magneto-plasma-dynamic engine.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СТЕПЕНИ ИОНИЗАЦИИ ПОТОКА АТОМОВ МЕТАЛЛА

Ю.П. ЦАРЬГОРОДЦЕВ, доц. каф. физики МГУЛ, канд. техн. наук,
Н.П. ПОЛУЭКТОВ, проф. каф. физики МГУЛ, д-р техн. наук,
И.И. УСАТОВ, ведущий инженер каф. физики МГУЛ,
А.Г. ЕВСТИГНЕЕВ, ведущий инженер каф. физики МГУЛ

poluekt@mgul.ac.ru

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1, МГУЛ

Разработан оптический метод определения степени ионизации потока атомов металла, используемого для осаждения пленок в глубоких субмикронных структурах, применяемых при создании современных СБИС. Степень ионизации потока атомов металла определяется как отношение потока ионов к полному потоку металла, состоящего из атомов и ионов. Нами разработан новый метод с использованием лазерного излучения, позволяющий измерять γ непосредственно в плазме (in situ). Этот метод основан на свойстве тонких металлических пленок, когда коэффициент отражения линейно зависит от толщины пленки. В качестве подложки использовалась прозрачная кварцевая пластина размером 120x30x20 мм². На переднюю (обращенную к плазме) поверхность пластины осаждается металлическая пленка. Луч полупроводникового лазера направлялся на заднюю поверхность пластины, проходит через нее и отражается от поверхности, на которой осаждается пленка металла. Большая толщина пластины (20 мм) выбиралась для того, чтобы возможно дальше развести лучи, отраженные от передней и задней поверхностей кварцевой пластины и, таким образом, устранить интерференцию. Толщина напыляемой пленки (порядка 10 нм) много меньше длины волны, поэтому интерференцией в пленке можно пренебречь. Угол падения порядка 3°. Перед передней поверхностью пластины устанавливается система из двух сеток. Первая сетка электрически изолирована и находится под плавающим потенциалом (его значение находится в диапазоне -24 В \div -5 В). Назначение 1-ой сетки – не пропускать большую часть электронов плазмы и тем самым уменьшить возмущения плазмы. Вторая сетка изолирована от первой и от фланца, на котором сетки закреплены. На вторую сетку можно подавать потенциал в диапазоне от 0 до +40 В. Данный метод был испытан в магнетронном разряде с полым катодом мощностью 0,5–4 кВт. Сравнение результатов, полученных оптическим методом и с помощью сеточных кварцевых микровесов, показало совпадение в пределах 5 %.

Ключевые слова: степень ионизации потока атомов, осаждение пленок, магнетронный разряд с полым катодом.

При металлизации структур субмикронных размеров и глубиной в 3–10 раз больше (аспектное отношение 3–10) с помощью широко используемого в электронной промышленности обычного магнетронного разряда (с мишенью в виде плоского диска)

возникают серьезные проблемы. Поток распыленного металла состоит почти на 100 % из атомов, так как плазма в этом разряде сосредоточена вблизи мишени и ее продольные размеры (порядка сантиметра) слишком малы, чтобы ионизовать атомы металла. Их

угловое распределение в первом приближении описывается функцией косинуса (по отношению к нормали). Изотропное распределение частиц приводит к тому, что на верхней части субмикронной структуры образуется навес, а внутри – полость (рис. 1а). Чтобы провести анизотропную металлизацию узкого отверстия, необходим поток частиц, приходящий на поверхность подложки вдоль нормали. Одним из возможных способов решения данной проблемы является ионизация распыляемого металла, так как на ионы можно воздействовать электрическим полем слоя перед подложкой (рис. 1б). Для увеличения вероятности ионизации распыленных атомов мишени необходимо создавать плазму высокой концентрации во всем объеме между мишенью и подложкой.

Существуют несколько источников, способных создавать такую высокоплотную плазму на основе следующих разрядов: совмещенный магнетронный и индуктивно-связанный разряд [1–3], сверхвысокочастотный разряд в условиях электрон-циклотронного резонанса [4, 5], магнетронный разряд с полым катодом (МПК) [6, 7].

Большая степень ионизации распыленных атомов мишени в МПК достигается за счет высокой концентрации плазмы (до 10^{12} см^{-3} при давлении 1–20 мТорр), создаваемой в объеме $10^3\text{--}10^4 \text{ см}^{-3}$, что увеличивает вероятность ионизации. МПК применяется для создания адгезионных, диффузионных и за-

травочных слоев в канавках (трэнчах) и межслойных отверстиях субмикронных структур интегральных схем, а также для кремниевых структур микроэлектромеханических систем. Поэтому определение степени ионизации потока представляет актуальную задачу.

Степень ионизации потока γ определяется как отношение потока ионов Γ_{Cu^+} к полному потоку металла, состоящего из атомов и ионов

$$\gamma = \Gamma_{\text{Cu}^+} / (\Gamma_{\text{Cu}^+} + \Gamma_{\text{Cu}}), \quad (1)$$

где потоки атомов и ионов меди равны соответственно

$$\Gamma_{\text{Cu}} = 0,25n_{\text{Cu}} \sqrt{\frac{8k_B T_{\text{Cu}}}{\pi M_{\text{Cu}}}}, \quad \Gamma_{\text{Cu}^+} = 0,6n_{\text{Cu}^+} \sqrt{\frac{k_B T_e}{M_{\text{Cu}}}} \quad (2)$$

где k_B – константа Больцмана;

M_{Cu} – масса атома меди;

T_{Cu}, T_e – температура атомов меди и электронов.

Для определения степени ионизации потока распыленных атомов γ применялись различные методы. Измеряя толщину пленки на дне субмикронной канавки (трэнча) с поперечным размером менее 0,5 мкм и глубиной в 5 и более раз больше (аспектное отношение более 5), и на поверхности, можно вычислить γ , если принять допущение, что на дно приходят только ионы металла, а на поверхности подложки в образовании пленки участвуют как ионы, так и атомы металла. Такой метод применялся в работах [1, 2]. Yamashita [3] ис-

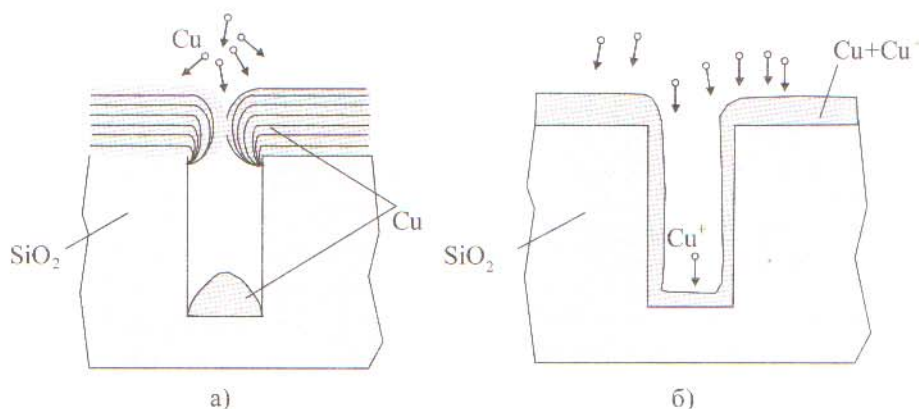


Рис. 1. Металлизация субмикронной канавки нейтральными атомами меди в магнетронном разряде с дисковой мишенью а) и ионами меди б)

Fig. 1. Metallization submicron grooves neutral copper atoms in a magnetron discharge with a circular target а) and copper ions б)

пользовал сеточный анализатор энергии перед подложкой и потом измерял толщину пленок, осажденных с положительным (задерживающим ионы) потенциалом на сетке, когда на подложку приходят только нейтральные частицы, и без задерживающего потенциала, когда приходят как нейтралы, так и ионы. Метод, позволяющий определять величину γ непосредственно в плазме (*in situ*), использовали в [8]. В этом методе сеточный анализатор устанавливался перед кварцевыми микровесами. Основу кварцевых микровесов составляет кварцевая пластина, вырезанная из монокристалла кварца под определенным углом. Сверху и снизу на этой пластине нанесены золотые электроды. При подключении к этим электродам переменного напряжения пластина начинает колебаться за счет явления обратного пьезоэффекта. При определенной частоте переменного напряжения в такой колебательной системе наступает резонанс. При осаждении вещества на поверхности этого устройства происходит изменение резонансной частоты пластины, на основании которого рассчитывается масса осажденного вещества.

Нами разработан новый метод с использованием лазерного излучения, позволяющий измерять γ непосредственно в плазме (*in situ*). Этот метод основан на свойстве тонких металлических пленок, когда коэффициент отражения линейно зависит от толщины

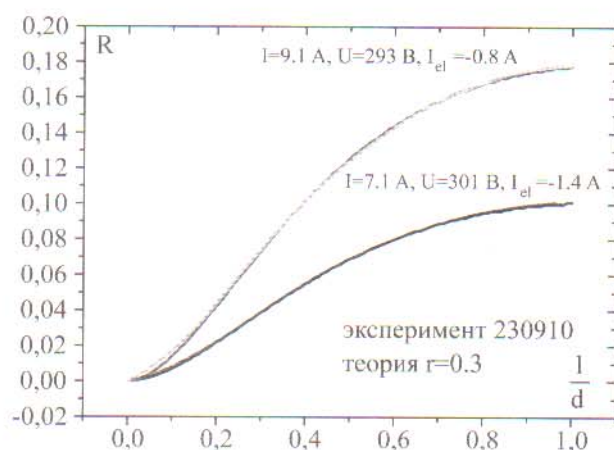


Рис. 2. Сравнение теоретических и экспериментальных кривых коэффициента R для медных пленок для длины волны 650 нм

Fig. 2. Comparison of theoretical and experimental curves of the R factor for copper films for a wavelength of 650 nm

пленки. Задача о взаимодействии электромагнитной волны со слоем проводящего материала длительное время привлекает к себе внимание. Это связано как с теоретическим интересом к этой проблеме, так и с многочисленными практическими приложениями. В работе [6] была рассмотрена теория отражения от тонких пленок света разных поляризаций (параллельной и перпендикулярной плоскости падения). При углах падения, близких к нулю, коэффициент отражения одинаков для различных поляризаций.

На рис. 2 приведены рассчитанные теоретически и экспериментальные кривые коэффициента отражения, полученные для медных пленок разных толщин. Здесь ось абсцисс выражена в относительных единицах: отношение толщины пленки l к величине скин-слоя δ , который выражается формулой

$$\delta = \frac{c}{\sqrt{2\pi\sigma\omega}}, \quad (3)$$

где σ – удельная проводимость металла;
 ω – частота волны.

Для частот видимого диапазона света эта величина порядка десятков нанометров. Из рис. 2 видно, что на кривой отражения имеется линейный участок зависимости коэффициента отражения от толщины пленки.

Измерение степени ионизации производится следующим образом (рис. 3). В качестве подложки использовалась прозрачная кварцевая пластина размером 120x30x20 мм³. На переднюю (обращенную к плазме) поверхность пластины осаждается металлическая пленка. Луч полупроводникового лазера направлялся на заднюю поверхность пластины, проходит через нее и отражается от поверхности, на которой осаждается пленка металла. Большая толщина пластины (20 мм) выбиралась для того, чтобы возможно дальше развести лучи, отраженные от передней и задней поверхностей кварцевой пластины и, таким образом, устранить интерференцию. Толщина напыляемой пленки (порядка 10 нм) много меньше длины волны, поэтому интерференцией в пленке можно пренебречь. Угол падения порядка 3°. Перед передней поверхностью пластины устанавливается система из двух сеток. Первая сетка электрически изолирована и находится

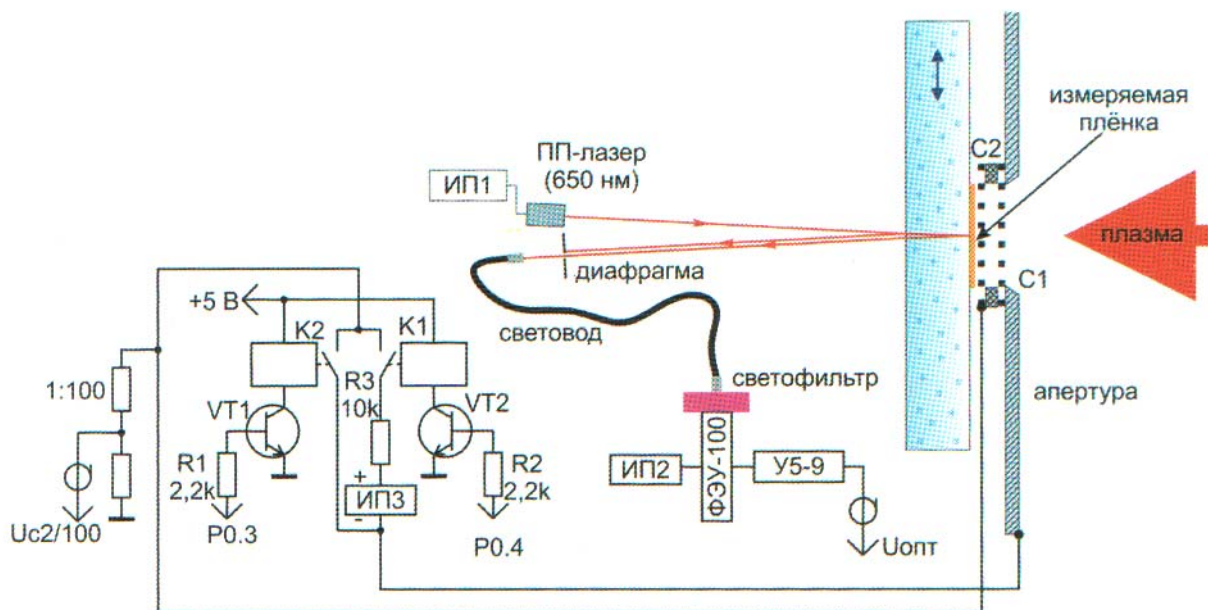


Рис. 3. Схема автоматизированной системы измерения степени ионизации потока атомов меди
 Fig. 3. Scheme automated system to measure the degree of ionization of the flow of the copper atoms

под плавающим потенциалом (его значение находится в диапазоне -24 В ч -5 В). Назначение 1-ой сетки – не пропускать большую часть электронов плазмы и тем самым уменьшить возмущения плазмы. Вторая сетка изолирована от первой и от фланца, на котором сетки закреплены. Между сетками расположен изолятор из слюды толщиной 0.8 мм . На вторую сетку можно подавать потенциал в диапазоне от 0 до $+30\text{ В}$, который тормозит ионы, и при значении, превышающем потенциал плазмы, не дает ионам проходить на подложку. Таким образом, при положительном потенциале (относительно потенциала плазмы) на 2-ой сетке на подложку осаждались только нейтральные атомы, а при нулевом потенциале – и атомы и ионы.

Толщина осажденной тонкой пленки металла контролируется по ее коэффициенту отражения. Для этого отраженный от пленки луч полупроводникового лазера (длина волны 650 нм) через световод фокусируется на интерференционный светофильтр, который отсекает излучение других линий плазмы, и далее регистрируется фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). Сигнал с ФЭУ подается на усилитель У5-9, а затем на один из каналов измерительной системы. Кварцевая пластина закреплена на рамке, которую можно передвигать без разгерметизации разрядной

камеры. На переднюю поверхность пластины предварительно была нанесена медная пленка, которая после травления образует две полоски шириной 10 мм , расположенные по краям пластинки, а центральная часть пластинки

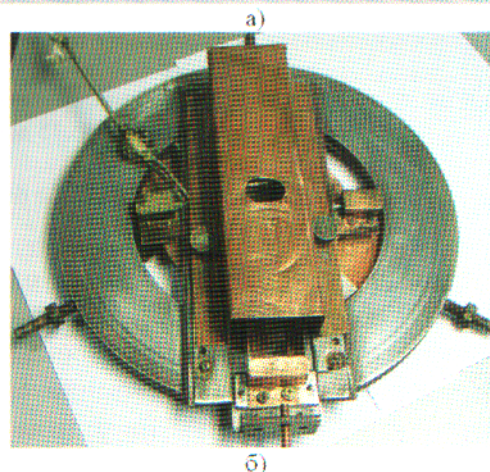


Рис. 4. а) кварцевая пластина с 3-мя осажденными пленками на подвижной рамке; б) устройство для измерения степени ионизации потока распыленных атомов металла оптически

Fig. 4. а) quartz plate with 3 films deposited on a movable frame; б) a device for measuring the degree of ionization of the metal atoms sputtered flux optically

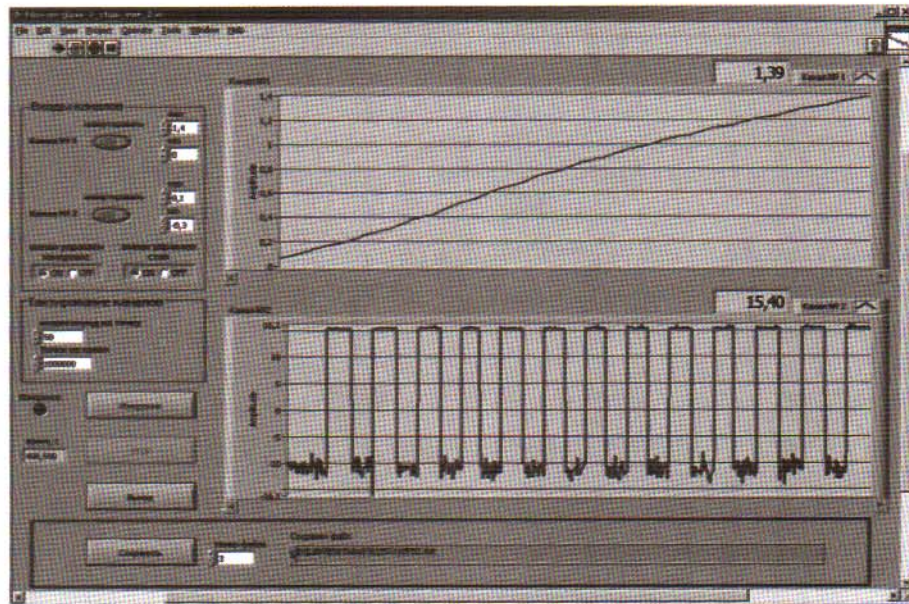


Рис. 5. Интерфейс программы для измерения степени ионизации распыленных атомов металла оптическим методом
 Fig. 5. Interface program to measure the degree of ionization of sputtered metal atoms by optical method

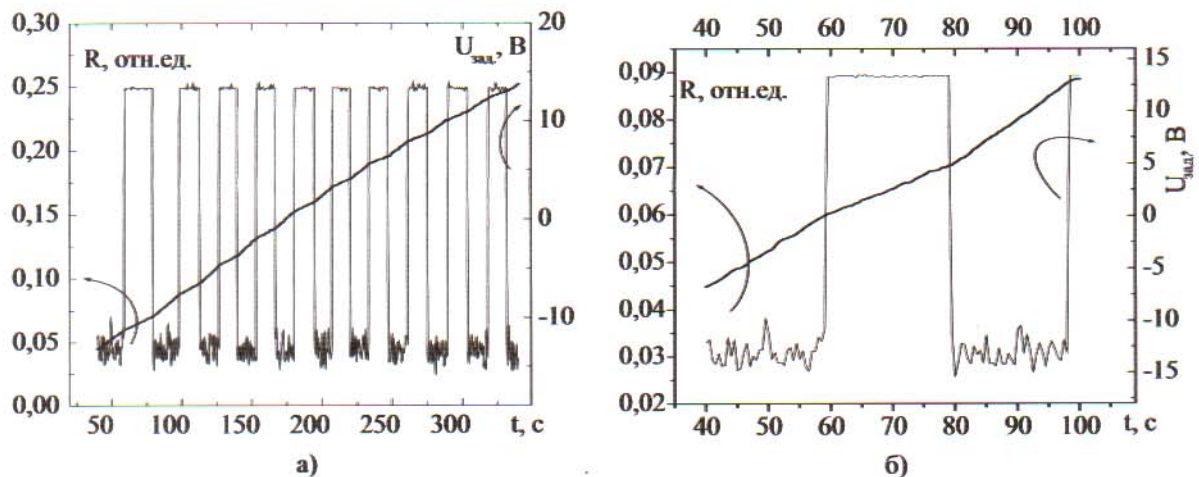


Рис. 6. а) Коэффициент отражения осаждаемой пленки Cu как функция времени и задерживающего потенциала сетки. 15 мТорр, $W = 2,5$ кВт, $I_{эм} = -3,5$ А, 20 см от магнетрона, б) увеличенный масштаб

Fig. 6. а) The reflection coefficient of the deposited Cu film as a function of time and retarding potential grid. 15 mTorr, $W = 2,5$ kW, $I_{эм} = -3,5$ A, 20 cm from the magnetron, б) zoomed

тины предназначена для осаждения пленки из плазмы. Крайние части осажденной пленки контактируют с медными полосками на стекле, через них происходит стекание заряда (рис. 4а). Сетки закреплены на тонком медном фланце с отверстием диаметром 15 мм. Расстояние между сетками и стеклом 5 мм. Таким образом, пленка на стекле имеет вид круга такого же диаметра. Поэтому, передвигая пластину, можно осаждать 7 пленок при различных параметрах разряда без разгерметизации камеры. Кварцевая пластина за-

крывается кожухом для того, чтобы избежать запыления задней поверхности. Вся конструкция закреплена на алюминиевом кольцевом фланце диаметром 200 мм, который устанавливается в камере на изолированных стержнях.

На рис. 4б показана вся конструкция, устанавливаемая в разрядную камеру. Управление задерживающим напряжением на сетке и регистрация данных осуществляется автоматизированной измерительной системой. Интерфейс программы приведен на

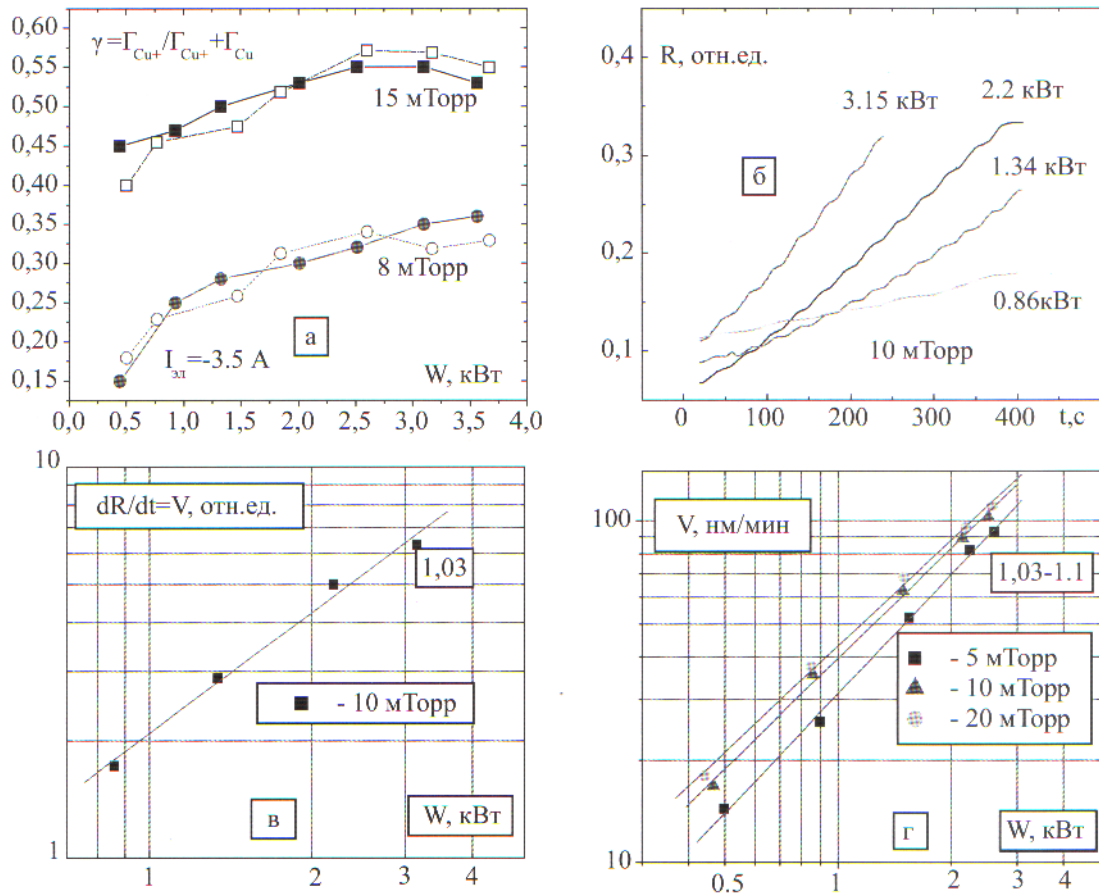


Рис. 7. а) степень ионизации потока γ в зависимости от мощности разряда, полученная оптическим методом (светлые значки), и методом сеточных кварцевых микровесов (сплошные значки); б) зависимость коэффициента отражения (толщины пленки) от времени при различных мощностях разряда; в) скорость изменения коэффициента отражения (скорость роста пленки) как функция мощности разряда; г) скорости роста пленки в зависимости от мощности разряда по результатам измерений сеточными кварцевыми микровесами. $I_{эл} = -3,5A$, 19 см от магнетрона

Fig. 7. а) the degree of ionization flow γ depending on the discharge power obtained by the optical method (open circles), and the method of mesh quartz crystal microbalance (solid symbols); б) the dependence of the reflection coefficient (film thickness) from time to time in various capacities discharge; в) the rate of change of the reflection coefficient (the film growth rate) as a function of the discharge power; г) the film growth speed depending on the discharge capacity as measured by grid quartz microbalance. $I_{el} = -3,5A$, 19 cm from the magnetron

рис. 5. Одновременно регистрируются 2 канала: на первом – сигнал с усилителя ФЭУ, на втором – задерживающее напряжение на сетке. На рис. 6 а,б показана зависимость коэффициента отражения (пропорционального толщине пленки) от времени напыления. Коэффициент наклона графика пропорционален скорости напыления. Черной линией показан коэффициент отражения $R_{отраж.}$ в процессе роста толщины пленки, синей – задерживающий ионы потенциал. Видно, что при включении задерживающего потенциала скорость возрастания (наклон) коэффициента отражения существенно уменьшалась.

Степень ионизации атомов металла определяют по отношению скоростей напыления на двух этапах: торможение ионов и прохождение ионов. Тогда, $\gamma = 1 - tg(Cu)/tg(Cu + Cu^+)$, где tg – тангенс наклона $R_{отраж.}$. На рис. 7а приведена зависимость величины $\gamma = \Gamma_{Cu^+}/(\Gamma_{Cu} + \Gamma_{Cu^+})$ для потока меди от мощности разряда для различных давлений. Она увеличивается с ростом мощности и давления разряда, так как в этом случае возрастает концентрация электронов, которые вызывают ионизацию атомов. Оптический метод позволяет измерять γ непосредственно в плазме (*in situ*).

Для сравнения и калибровки результатов разработанного оптического метода степень ионизации потока была измерена другим методом – с помощью сеточных кварцевых микровесов. В качестве кварцевых микровесов использовался промышленный датчик фирмы Inficon (Германия), перед которым были установлены 2 сетки. На рис. 7а показаны величины степени ионизации потока распыленного металла в зависимости от мощности разрядов, измеренные двумя способами. Результаты величины γ , полученные этим датчиком, в пределах 5 % совпали с величинами, измеренными с помощью разработанных нами оптических методов. Кроме того, надежность полученных результатов была проверена с помощью профилометра по измерениям толщины пленок, осажденных за одинаковое время при включении задерживающего потенциала на 2-ю сетку и без него.

На рис. 7б показаны зависимости коэффициента отражения для различных мощностей разряда. Видно, что чем выше мощность разряда, тем быстрее происходит возрастание коэффициента отражения, т.е. толщины пленки. Из этих графиков можно определить зависимость скорости осаждения пленки от мощности (рис. 7с). Из графика на рис. 7с, построенного в логарифмических масштабах, следует, что скорость осаждения пленки возрастает с мощностью разряда линейно (коэффициент пропорциональности 1.03). Такая зависимость хорошо согласуется с теорией [10]. На рис. 7г представлены скорости роста пленки в зависимости от мощности разряда по результатам измерений сеточными кварцевыми микровесами. Для разных давлений разряда эта зависимость линейная (коэффициент пропорциональности 1.02–1.1), что также подтверждает результаты оптического метода. По проведенным измерениям получены следующие результаты: при мощности разряда 3 кВт степень ионизации распыленных атомов меди достигает 35 % при давлении 10 мТорр, при давлении 20 мТорр – 60 %.

Разработан метод и изготовлена конструкция устройства для измерения степе-

ни ионизации потока распыленных атомов металла γ оптическим способом. Этот метод позволяет измерять γ непосредственно в плазме (*in situ*). Надежность и достоверность результатов разработанного оптического метода измерения степени ионизации потока были подтверждены измерениями с помощью сеточных кварцевых микровесов и профилометра.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Плазменные технологии микро- и нанопленок»

Библиографический список References

1. Nickols C.A., Rossnagel S.M., Hamaguchi S. Ionized physical vapor deposition of Cu for high aspect ratio damascene trench fill applications. *J. Vac. Sci. Technol.* 1996, V. 14B, pp. 3270-3275.
2. Zhong G., Hopwood J. *J. Vac. Sci. Technol.* Ionized titanium deposition into high aspect ratio vias and trenches, 1999. V. 17B, pp. 405-409.
3. Yamashita M. Fundamental characteristics of built-in high-frequency coil-type sputtering apparatus. *J. Vac. Sci. Technol.* 1989. V. 7A, pp. 151-158.
4. Gorbatkin S.M., Rossnagel S.M. Cu metallization using a permanent magnet ECR microwave plasma/sputtering hybrid system. *J. Vac. Sci. Technol.* 1996. V. 14B. № 3. pp. 1853-1859.
5. Poluektov N. P., Kharchenko V. N. Usatov I. G. Ionization of Sputtered Metal Atoms in a Microwave ECR Plasma Source. *Plasma Physics Reports.* 2001. V. 27, № 7, pp. 625-633.
6. Meng L., Raju R., Flauta R., Shin H., Ruzic D. N. In situ plasma diagnostics study of a commercial high-power hollow cathode magnetron deposition tool. *J. Vac. Sci. Technol.* 2010. V. 28A, № 1. pp. 112-118.
7. Poluektov N.P., Tsar'gorodsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kamyshev I.A. Probe and emission spectrometry diagnostics in hollow cathode magnetron. *J. Modern Physics.* 2012. V. 10. № 3. pp. 1494-1502.
8. Green K.M., Hayden D.B., Juliano D.R., Ruzic D.N. Determination of flux ionization fraction using a quartz crystal microbalance and a gridded energy analyzer in an ionized magnetron sputtering system. *Rev. Sci. Instrum.* 1997. V. 68, pp. 4555-4560.
9. Jones W.E., Kliewer K.L., Fuchs R. Nonlocal theory of the optical properties of thin metallic films. *Physical Review*, 1969. V. 178, № 3, pp. 1201-1203.
10. Vyas V., Kushner M.J. Scaling of hollow cathode magnetron or ionized metal physical vapor deposition. *J. Vac. Sci. Technol.* 2006. V. 24 A, pp. 1955-1969.

METHOD FOR MEASURING OF THE IONIZATION FRACTION OF THE METAL ATOM FLUX

Tsar'gorodsev Yu.P., Associate Prof. Department of Physics MFSU, Cand., Poluektov N.P., Professor Dr technical. Sciences Department of Physics MFSU, Usatov I.I., chief engineer Department of Physics MFSU, Evstigneev A.G., chief engineer Department of Physics MFSU

poluekt@mgul.ac.ru

Department of Physics, Moscow State Forest University 1st Institutskaya street, 1, 141005, Mytishi, Moscow region, Russia

An optical method for determining the degree of ionization of the metal atom flux γ used for the films deposition in deep submicron structures used for the creation of modern VLSI. The degree of ionization of the metal atoms flux is defined as the ratio of the ion flux to the total flux, which includes atoms and ions. We have developed a new method using laser radiation, which allows to measure directly γ in plasma (in situ). This method is based on the reflection of the thin metal film when the reflection coefficient is linearly dependent on the film thickness. On the front of the wafer surface (facing to plasma) is deposited metal film. Semiconductor laser beam was directed onto the back surface plate and passing through it is reflected from the surface on which the deposited metal film. Large thickness (20 mm) of the plate was chosen to dilute away beams reflected from the front and back surfaces of the quartz plate, and thereby eliminate interference. The substrate used transparent quartz plate size 120Ч30Ч20 mm³. The thickness of the deposited film (about 10 nm) is much smaller than the wave length, therefore the interference in the film can be neglected. The incidence angle is about 30. In front of the substrate were installed two grids with cells of 70 μ m. The first grid is electrically isolated and has a floating potential (its value is in the range $-24 \div -5$ V). First mesh does not miss much of the plasma electrons and thereby reduces plasma perturbation. The second mesh is isolated from the first and flange on which are fixed. In the second grid may be bias to the positive potential from 0 to 30 V, which inhibits the ions flow and the ions does not take place on the substrate. In this case, the film is deposited by metal atoms only. At zero potential on the second grid the film is deposited by metal atoms and ions. This method was tested in a magnetron discharge with a hollow cathode with power of 0.5 – 4 kW. Results obtained by the optical method have an agreement within 5 % with results by the gridded quartz microbalance.

Key words: ionization fraction of atom flux, film deposition, hollow cathode magnetron discharge.

This work was supported CCU «Plasma technology of micro and nano-films»