

УДК 621.382.032.27

С.В. Ишуткин, В.С. Арыков, Ю.С. Жидик, П.Е. Троян

Плазмохимическое травление InP/InGaAs гетероструктуры в индуктивно связанной плазме Cl₂/Ar/N₂ для формирования оптических волноводных структур

Представлены результаты разработки процесса плазмохимического травления InP/InGaAs в индуктивно связанной плазме в газовой смеси Cl₂/Ar/N₂. Показаны зависимости влияния режимов процесса на профиль и шероховатость поверхности формируемых волноводных структур.

Ключевые слова: оптоэлектроника, фосфид индия, плазмохимическое травление, волноводные структуры.
doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-28-32

В настоящее время оптоэлектроника является динамично развивающимся направлением науки и техники. При создании интегральных оптоэлектронных устройств InP является одним из базовых материалов, позволяющих создавать как активные, так и пассивные элементы (в частности, электрооптические модуляторы, волноводы, делители оптического излучения и др.) [1]. Создание оптоэлектронных приборов зачастую требует формирования волноводных структур с высоким аспектным соотношением. Использование методов жидкостного химического травления позволяет получить гладкую поверхность с минимальным уровнем дефектов. Однако контроль профиля травления в данных методах ограничен [2], вследствие чего они редко используются для формирования элементов с высоким аспектным соотношением. Для получения волноводных структур с высоким аспектным соотношением и низкой шероховатостью поверхности используются методы плазмохимического травления (ПХТ). Одним из таких методов, получивших наибольшее распространение, является ПХТ в индуктивно связанной плазме. Преимуществом данного метода является возможность независимого управления плотностью и энергией ионов плазмы, что позволяет гибко управлять режимами травления [3].

Для ПХТ InP наибольшее распространение получили процессы с использованием газовых смесей на основе CH₄/H₂ и Cl₂ [3–15]. Травление в газовой смеси CH₄/H₂ позволяет получить гладкую поверхность после травления с высоким аспектным соотношением формируемых структур. В то же время недостатками процессов на CH₄/H₂ являются низкая скорость травления вследствие образования и пересаживания пассивирующего полимера, а также проникновение водорода в подложку, что может вызывать деградацию параметров устройств [7].

Другим широко используемым подмножеством процессов травления InP является травление в хлорсодержащей плазме. Для получения профиля структур с высоким аспектным соотношением в состав газовой смеси вводятся пассивирующие добавки N₂, O₂ и др. [3–8, 13–15]. Травление InGaAs может быть проведено совместно с InP с использованием хлорсодержащей плазмы. Однако процессам на основе

хлора, также присущи свои недостатки. Образующиеся в процессе травления InCl_x соединения обладают низкой летучестью при комнатной температуре. Пересаживание InCl_x на подложку может приводить к высокому уровню шероховатости поверхности формируемых структур. Для решения данной проблемы обычно перед травлением подложка нагревается до 150 °С и выше [3–6, 8, 9], что повышает требования к установке для травления. В работе [15] представлено травление InP в индуктивно связанной плазме Cl₂/N₂ при комнатной температуре. Показано, что можно эффективно управлять десорбцией InCl_x пленок с поверхности подложки за счет усиления роли физической составляющей процесса травления.

В данной работе представлены результаты разработки процесса ПХТ InP/InGaAs в индуктивно связанной плазме Cl₂/Ar/N₂ без предварительного нагрева подложки для формирования волноводных структур с высоким аспектным соотношением и низкой шероховатостью поверхности.

Методика эксперимента

В экспериментах были использованы полуизолирующие подложки InP, на поверхности которых была сформирована InP/InGaAs *p-i-n*-гетероструктура.

Для травления InP на поверхности подложки формировалась маска нитрида кремния толщиной 300 нм. Осаждение пленки нитрида кремния проводилось методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. Далее в диэлектрике методом ПХТ в индуктивно связанной плазме по однослойной маске фоторезиста выполнялось формирование линий различной ширины (1–3 мкм). Маска фоторезиста формировалась методом контактной литографии.

После снятия фоторезиста пластины делились на образцы с площадью около 1 см². Далее на установке Corial 200IL проводилось ПХТ InP/InGaAs в индуктивно связанной плазме с использованием газовой смеси Cl₂/Ar/N₂ в различных режимах. В режимах травления менялись: состав газовой смеси, величина мощности, приложенной между электродами (radio frequency power – W_{RF}), давление процесса. Величина мощности индуктивного (inductively coupled plasma power – W_{ICP}) разряда во всех

режимах была зафиксирована на уровне 700 Вт, поток Ar составлял 20 см³/мин.

После травления образцы раскалывались поперек сформированных элементов рельефа. Контроль образцов проводился с использованием метода сканирующей электронной микроскопии на установке Raith 150two. На образцах контролировались: профиль, глубина травления и толщина нарушенного слоя.

Результаты эксперимента и обсуждение

На рис. 1 и 2 представлены микроскопические изображения профиля травленных структур и зависимость скорости травления InP в плазме Cl₂/Ar/N₂ от соотношения потоков азота и хлора, при фиксированных значениях W_{RF} мощности 100 Вт и давлении процесса 5 мТорр.

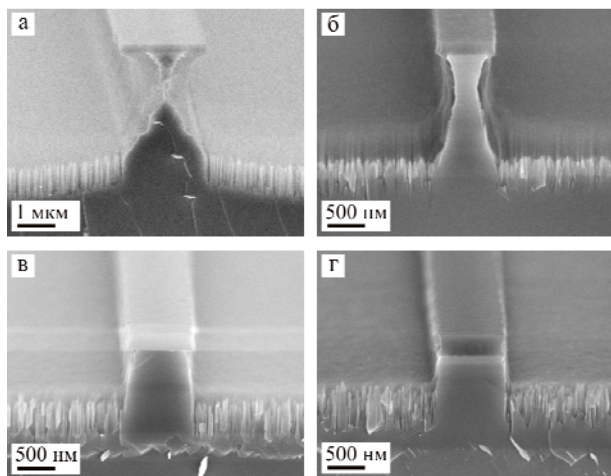


Рис. 1. Микроскопические изображения поперечного сечения структур, сформированных после травления в плазме Cl₂/Ar/N₂ с разным соотношением потоков N₂/Cl₂: (а) 0/30; (б) 10/20; (в) 15/15 и (г) 20/10 см³/мин, при мощности W_{RF}, равной 100 Вт, и давлении процесса 5 мТорр

Как видно из рис. 1, а при травлении в плазме Cl₂/Ar наблюдается значительный боковой подтрав InP. Увеличение доли азота в составе газовой смеси приводило к монотонному уменьшению величины бокового подтрав, и при равных потоках азота и хлора (рис. 1, в) боковой подтрав практически отсутствовал.

Из рис. 2 видно также, что увеличение доли азота в составе газовой смеси приводило к снижению скорости травления InP. Зависимость скорости травления от соотношения потоков азота и хлора имела нелинейный вид с явно прослеживающейся тенденцией к насыщению. Более резкое снижение скорости травления InP в сравнении со снижением содержания хлора в составе газовой смеси свидетельствует о том, что на снижение скорости травления InP помимо снижения концентрации ионов хлора влияло формирование пассивирующего слоя на поверхности InP.

На рис. 3 и 4 представлены микроскопические изображения профиля травленных структур и зависимости скорости травления InP и толщины нарушенного слоя после травления в плазме Cl₂/Ar/N₂ от величины W_{RF} мощности при фиксированных соот-

ношениях потоков азота и хлора 20 и 10 см³/мин соответственно и давлении процесса 5 мТорр.

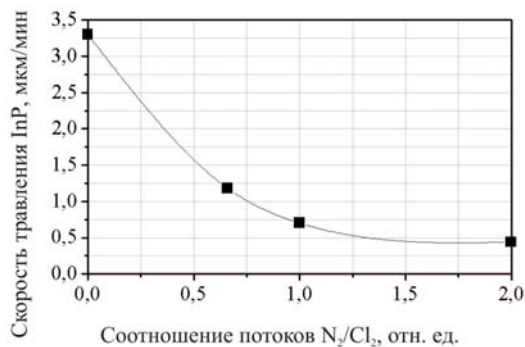


Рис. 2. Зависимость скорости травления InP в плазме Cl₂/Ar/N₂ от соотношения потоков N₂/Cl₂ при общем потоке N₂ + Cl₂, равном 30 см³/мин; мощности W_{RF}, равной 100 Вт, и давлении процесса 5 мТорр

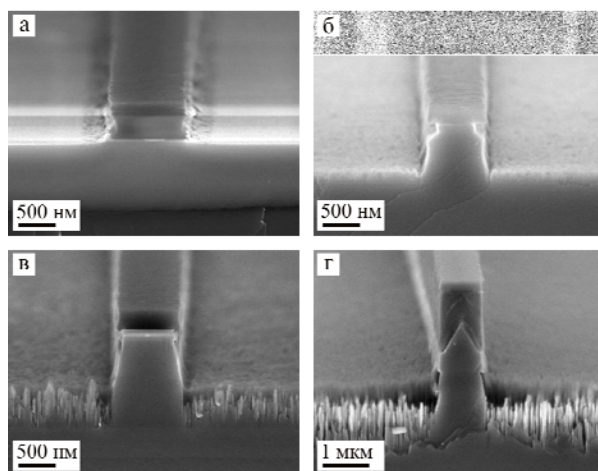


Рис. 3. Микроскопические изображения поперечного сечения травленных структур после травления в плазме Cl₂/Ar/N₂ при разных значениях W_{RF} мощности: (а) 25; (б) 50; (в) 75 и (г) 200 Вт, при соотношении потоков N₂/Cl₂, равном 20/10 см³/мин, и давлении процесса 5 мТорр

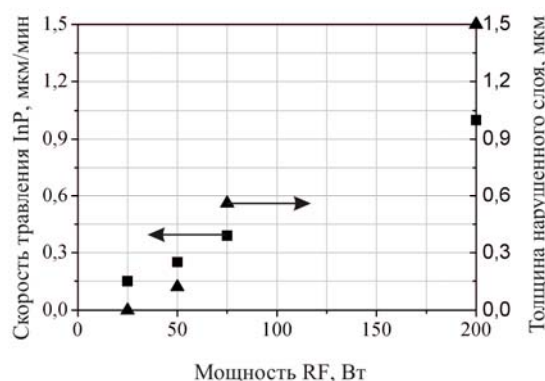


Рис. 4. Зависимости скорости травления InP в плазме Cl₂/Ar/N₂ и толщины нарушенного слоя после травления от W_{RF} мощности, при соотношении потоков N₂/Cl₂, равном 20/10 см³/мин, и давлении процесса 5 мТорр

Как видно из рис. 3 и 4, с повышением величины W_{RF} мощности и фиксированных остальных параметрах процесса скорость травления InP линейно возрастала, достигнув 1 мкм/мин при мощности 200 Вт. Также с повышением мощности увеличива-

лась анизотропия процесса травления. Но еще более резкий рост наблюдался в толщине нарушенного слоя. Если при величине W_{RF} мощности равной 25 Вт, после процесса травления наблюдалась гладкая морфология поверхности InP, формирование нарушенного слоя не прослеживалось, то при повышении мощности до 50 Вт толщина нарушенного слоя после травления составляла порядка 0,13 мкм, а дальнейший рост мощности до 75 Вт приводил к скачкообразному увеличению толщины слоя до 0,55 мкм, достигнув 1,5 мкм при мощности разряда 200 Вт.

На рис. 5 представлены зависимости толщины нарушенного слоя и угла наклона вертикальных поверхностей элементов сформированных после травления в плазме $Cl_2/Ar/N_2$ от величины давления процесса при фиксированных соотношениях потоков азота и хлора 20 и 10 cm^3/min соответственно и величине W_{RF} мощности равной 100 Вт.

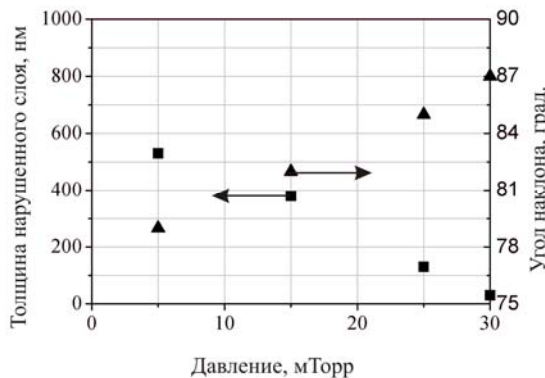


Рис. 5. Зависимости толщины нарушенного слоя и угла наклона профиля формируемых элементов после травления в плазме $Cl_2/Ar/N_2$ от величины давления процесса, при соотношении потоков N_2/Cl_2 , равном 20/10 cm^3/min , и мощности W_{RF} , равной 100 Вт

Из зависимостей на рис. 5 видно, что повышение общего давления процесса с 5 до 30 мТорр при зафиксированных остальных параметрах процесса привело к монотонному уменьшению толщины нарушенного слоя с 0,55 мкм до величины менее 0,03 мкм. Также увеличение давления привело к улучшению анизотропности процесса. При максимальном использованном давлении угол наклона вертикальных поверхностей формируемых элементов достиг 87 град.

Наиболее оптимальное формирование элементов рельефа происходило при следующих параметрах процесса травления: состав газовой смеси $Cl_2/Ar/N_2$ 10/20/20 cm^3/min , мощность W_{RF} равна 100 Вт, при мощности W_{ICP} , равной 700 Вт, и давлении процесса 30 мТорр. На рис. 6 показано микроскопическое изображение поперечного сечения травленной InP/InGaAs гетероструктуры после травления в плазме $Cl_2/Ar/N_2$ с использованием оптимизированного режима травления. Как видно из рисунка, разработанный процесс характеризуется высокой анизотропностью и гладкой морфологией поверхно-

сти InP после травления. Скорость травления InP составила 0,55–0,6 мкм/мин.

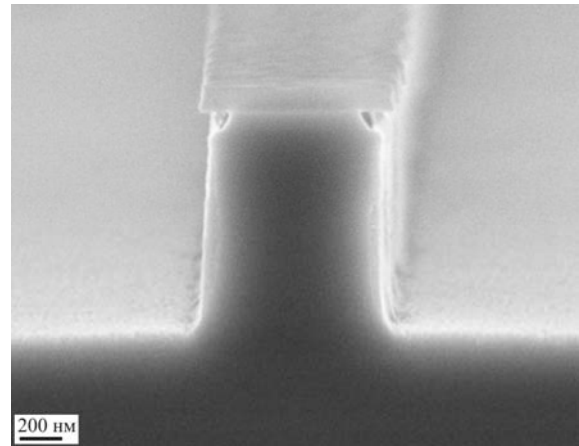


Рис. 6. Микроскопическое изображение поперечного сечения травленной InP/InGaAs гетероструктуры при соотношении потоков N_2/Cl_2 , равном 20/10 cm^3/min , мощности W_{RF} , равной 100 Вт, и давлении процесса 30 мТорр

Заключение

В данной работе представлены результаты исследования процесса плазмохимического травления InP/InGaAs гетероструктуры в индуктивно связанной плазме $Cl_2/Ar/N_2$. Разработанный процесс травления характеризуется высокой анизотропностью (угол наклона профиля травления составляет 87 град), скорость травления InP достигает 0,55–0,6 мкм/мин, при этом глубина нарушенного слоя не превышает 30 нм. Преимуществом процесса также является отсутствие необходимости предварительного разогрева подложки. Разработанный процесс может быть использован для формирования волноводных структур с высоким аспектным соотношением в оптических приборах на InP.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения № 14.577.21.0281 от 23.10.17, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0281.

Литература

1. Status and progress in InP optoelectronic processing: toward higher levels of integration / J.L. Pleumeekers, R.P. Schneider, A. Mathur et al. // CS Mantech Conference. – Vancouver, 2006. – P. 115–118.
2. Wet chemical etching of alignment V-grooves in (100) InP through titanium or $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ masks / R. Klockenbrink, E. Peiner, H.-H. Wehmann, A. Schlachetzki // J. Electrochem. Soc. – 1994. – Vol. 141, № 6. – P. 1594–1599.
3. Deng L. Dry etching of InP-based materials using a high-density ICP plasma system // Semiconductor today Compounds & Advanced Silicon. – 2013. – Vol. 7, № 10. – P. 82–87.
4. Deep etching of DBR gratings in InP using Cl_2 based ICP processes / B. Docter, E.J. Geluk, M.J.H. Sander-Jochem, F. Karouta, M.K. Smit // Proceeding Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter. – Eindhoven, 2006. – P. 97–100.
5. Effect of H_2 on the etch profile of InP/InGaAsP alloys in $Cl_2/Ar/H_2$ inductively coupled plasma reactive ion etching chemistries for photonic device fabrication / S.L. Rommel,

J.-H. Jang, W. Lu et al. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* – 2002. – Vol. 20, № 4. – P. 1327–1330.

6. Carlstrom C.F. Cl₂/O₂-inductively coupled plasma etching of deep hole-type photonic crystals in InP / C.F. Carlstrom, R. van der Heijden, F. Karouta, R.W. van der Heijden, H.W.M. Salemink // *J. Vac. Sci. Technol. B.* – 2006. – Vol. 24, № 1. – P. 1306–1309.

7. Anisotropic etching of InP and InGaAs by using an inductively coupled plasma in Cl₂/N₂ and Cl₂/Ar mixtures at low bias power / J.W. Bae, C.H. Jeong, J.T. Lim et al. // *J. of Korean Phys. Soc.* – 2007. – Vol. 50, № 4. – P. 1130–1135.

8. Comparative study of Cl₂, Cl₂/O₂, and Cl₂/N₂ inductively coupled plasma processes for etching of high-aspect-ratio photonic crystals holes in InP / C.F. Carlstrom, R. van der Heijden, M.S.P. Andriess et al. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* – 2008. – Vol. 26, № 5. – P. 1675–1683.

9. Siwak N.P. Fabrication challenges for indium phosphide microsystems / N.P. Siwak, X.Z. Fan, R. Ghodssi // *J. Micromech. Microeng.* – 2015. – Vol. 25. – P. 1317–1331.

10. Deep dry etching process development for InP-based photonic crystals / R. van der Heijden, E. van der Drift, E.J. Geluk et al. // *Proceeding Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter.* – Enschede, 2003. – P. 257–260.

11. Investigation of InP etching mechanisms in a Cl₂/H₂ inductively coupled plasma by optical emission spectroscopy / L. Gatilova, S. Bouchoule, S. Guilet, P. Chabert // *J. Vac. Sci. Technol. A.* – 2009. – Vol. 27, № 2. – P. 262–275.

12. Effect of Cl₂- and HBr-based inductively coupled plasma etching on InP surface composition analyzed using in situ x-ray photoelectron spectroscopy / S. Bouchoule, L. Vallier, G. Patriarche, T. Chevolleau, C. Cardinaud // *J. Vac. Sci. Technol. A.* – 2012. – Vol. 30, № 3. – P. 1116–1127.

13. ICP etching of InP and its applications in photonic circuits / Y.C. Zhu, F. Karouta, E.J. Geluk et al. // *Proceeding Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter.* – Enschede, 2003. – P. 81–84.

14. Vertical and smooth, etching of InP by Cl₂/CH₄/Ar inductively coupled plasma at room temperature / C.Z. Sun, J.B. Zhou, B. Xiong, J. Wang, Y. Luo // *Chin. Phys. Lett.* – 2003. – Vol. 20, № 8. – P. 1312–1314.

15. Chee-Wei L. Room-temperature inductively coupled plasma etching of InP using Cl₂/N₂ and Cl₂/CH₄/H₂ / L. Chee-Wei, C. Mee-Koy // *Chin. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 23, № 4. – P. 903–906.

Троян Павел Ефимович

Д-р техн. наук, профессор каф. ФЭ,
директор департамента образования ТУСУРа
Тел.: 8 (383-2) 41-39-36
Эл. почта: P.E.Troyan@mail.ru

Ishutkin S.V., Arykov V.S., Zhidik Y.S., Troyan P.E.
Inductively coupled plasma etching of InP/InGaAs heterostructure for optical waveguide structures

In the paper are shown the results of the development of inductively coupled plasma etching process of InP / InGaAs in the gas mixture Cl₂/Ar/N₂. The dependences of the influence of process parameters on the profile and surface roughness of the waveguide structures are shown.

Keywords: optoelectronics, indium phosphide, plasma-chemical etching.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-28-32

References

1. Status and progress in InP optoelectronic processing: toward higher levels of integration / J.L. Pleumeekers, R.P. Schneider, A. Mathur et al. // *CS Mantech Conference.* Vancouver, 2006, pp. 115–118.

2. Wet chemical etching of alignment V-grooves in (100) InP through titanium or In_{0.53}Ga_{0.47}As masks / R. Klockenbrink, E. Peiner, H.-H. Wehmann, A. Schlachetzki // *J. Electrochem. Soc.* 1994., vol. 141, № 6, pp. 1594–1599.

3. Deng L. Dry etching of InP-based materials using a high-density ICP plasma system // *Semiconductor Today Compounds & Advanced Silicon.* 2013, vol. 7, № 10, pp. 82–87.

4. Deep etching of DBR gratings in InP using Cl₂ based ICP processes / B. Docter, E.J. Geluk, M.J.H. Sander-Jochem, F. Karouta, M.K. Smit // *Proceeding Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter.* Eindhoven, 2006, pp. 97–100.

5. Effect of H₂ on the etch profile of InP/InGaAsP alloys in Cl₂/Ar/H₂ inductively coupled plasma reactive ion etching chemistries for photonic device fabrication / S.L. Rommel, J.-H. Jang, W. Lu et al. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2002, vol. 20, № 4, pp. 1327–1330.

6. Cl₂/O₂-inductively coupled plasma etching of deep hole-type photonic crystals in InP / C.F. Carlstrom, R. van der Heijden, F. Karouta, R.W. van der Heijden, H.W.M. Salemink // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2006, vol. 24, № 1, pp. 1306–1309.

7. Anisotropic etching of InP and InGaAs by using an inductively coupled plasma in Cl₂/N₂ and Cl₂/Ar mixtures at low bias power / J.W. Bae, C.H. Jeong, J.T. Lim, H.C. Lee, G.Y. Yeom, I. Adesida // *J. of Korean Phys. Soc.* 2007, vol. 50, № 4, pp. 1130–1135.

8. Comparative study of Cl₂, Cl₂/O₂, and Cl₂/N₂ inductively coupled plasma processes for etching of high-aspect-ratio photonic crystals holes in InP / C.F. Carlstrom, R. van der Heijden, M.S.P. Andriess, F. Karouta et al. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2008, vol. 26, № 5, pp. 1675–1683.

9. Siwak N.P. Fabrication challenges for indium phosphide microsystems / N.P. Siwak, X.Z. Fan, R. Ghodssi // *J. Micromech. Microeng.* 2015, vol. 25, pp. 1317–1331.

10. Deep dry etching process development for InP-based photonic crystals / R. van der Heijden, E. van der Drift, E.J. Geluk et al. // *Proceeding Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter.* Enschede, 2003, pp. 257–260.

11. Investigation of InP etching mechanisms in a Cl₂/H₂ inductively coupled plasma by optical emission spectroscopy /

Ишуткин Сергей Владимирович

Канд. техн. наук, вед. инженер
НПК «Микроэлектроника», АО «НПФ «Микран»
Тел.: +7-923-405-56-58
Эл. почта: ishutkin@micran.ru

Арыков Вадим Станиславович

Канд. техн. наук, м.н.с. каф. ФЭ
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Тел.: +7-903-953-10-37
Эл. почта: apblkob@yandex.ru

Жидик Юрий Сергеевич

Аспирант каф. ФЭ ТУСУРа
Тел.: +7-923-414-12-32
Эл. почта: zhidikyur@mail.ru

L. Gatilova, S. Bouchoule, S. Guilet, P. Chabert // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2009, vol. 27, № 2, pp. 262–275.

12. Effect of Cl₂- and HBr-based inductively coupled plasma etching on InP surface composition analyzed using in situ x-ray photoelectron spectroscopy / S. Bouchoule, L. Vallier, G. Patriarche, T. Chevolleau, C. Cardinaud // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2012, vol. 30, № 3, pp. 1116–1127.

13. ICP etching of InP and its applications in photonic circuits / Y.C. Zhu, F. Karouta, E.J. Geluk et al. // *Proceeding Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter*. Enschede, 2003, pp. 81–84.

14. Vertical and smooth, etching of InP by Cl₂/CH₄/Ar inductively coupled plasma at room temperature / C.Z. Sun, J.B. Zhou, B. Xiong, J. Wang, Y. Luo // *Chin. Phys. Lett.* – 2003. vol. 20, № 8, pp. 1312–1314.

15. Chee-Wei L. Room-temperature inductively coupled plasma etching of InP using Cl₂/N₂ and Cl₂/CH₄/H₂ / L. Chee-Wei, C. Mee-Koy // *Chin. Phys. Lett.* 2006, vol. 23, № 4, pp. 903–906.

Sergey V. Ishutkin

PhD, Principal Engineer of the Technological Research Group of Microelectronics Department, MICRAN, Research and Production Company
51 d, Kirov av., Tomsk, Russia, 634041
Phone: +7-923-405-56-58
Email: ishutkin@micran.ru

Vadim S. Arykov

PhD, Assistant Scientist of the Department of Physical Electronics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-903-953-10-37
Email: apblkob@yandex.ru

Yuriy S. Zhidik

PhD student of the Department of Physical Electronics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-414-12-32
Email: zhidikyur@mail.ru

Pavel E. Troyan

Doctor of Engineering, Professor,
Director of Academic Directorate,
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (383-2) 41-39-36
Email: P.E.Troyan@mail.ru