

РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

RADIATION SEMICONDUCTOR PHYSICS

УДК 543.423.1

ЗАРЯДОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОВ Si, ЭМИТИРУЕМЫХ
МОНОЭЛЕМЕНТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ, ДО И ПОСЛЕ
 γ - ОБЛУЧЕНИЯ МИШЕНИ

*Сатиболдиев Тошмухаммад Болмухаммад угли**, старший научный сотрудник НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз, Ташкент, Узбекистан.

Азаматов Закиржан Тохирович, д.ф.-м. н, профессор, заведующий лабораторией НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз, Ташкент, Узбекистан. e-mail: zakir.azamatov@mail.ru

Насриддинов Сайфилло Саидович, д.т.н, доцент, заместитель директора НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз, Ташкент, Узбекистан. e-mail: sfera@yandex.uz

Тоџиназаров Фуркат Махсуталиевич, базовый докторант Национального университета Узбекистана, Ташкент, Узбекистан. e-mail: furqattojinazarov@gmail.com.

Кодиров Сардор Рахимберган угли, магистр Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Ташкент, Узбекистан.

Аннотация. Приводится исследование образования многозарядных ионов плазмы в результате взаимодействия лазерного излучения с кремниевыми мишенями до и после их γ -облучения. Экспериментально определено влияние радиационных дефектов на процесс формирования зарядового спектра ионов плазмы.

Ключевые слова: лазерная плазма, многозарядные ионы, γ - облучение, доза, радиационные дефекты.

CHARGE DISTRIBUTION OF Si IONS EMITTED BY MULTI-ELEMENT LASER
PLASMA BEFORE AND AFTER γ -IRRADIATION OF THE TARGET

*Satiboldiev Toshmukhammad Bolmukhammad ugli**, Senior Researcher of the Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at NUUZ., Tashkent, Uzbekistan.

Azamatov Zakirjan Toxirovich, Dr. of Phys. and Math., Professor, Head of the Laboratory of the Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the NUUZ, Tashkent, Uzbekistan. e-mail: zakir.azamatov@mail.ru

Nasriddinov Saifillo Saidovich, Dr. of Tech. Sc., Ass. Professor, Deputy Director of the Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at NUUZ., Tashkent, Uzbekistan. e-mail: sfera@yandex.uz

Tojinazarov Furkat Makhsutaliyevich, Basic Doctoral Student of National University of Uzbekistan. Tashkent, Uzbekistan. e-mail: furqattojinazarov@gmail.com.

Kodirov Sardor Rakhimbergan ugli, Master Student of National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan.

Abstract: The study of the formation of multicharged plasma ions as a result of the interaction of laser radiation with silicon targets before and after their gamma irradiation is

presented. The influence of radiation defects on the formation of the charge spectrum of plasma ions was determined experimentally.

Keywords: laser plasma, multicharged ions, γ -irradiation, dose, radiation defects.

1. Введение

В новых технологиях производства микроэлектроники широко используются ионные имплантаторы, основанные на эффективных инжекторах ионов, образующихся из лазерной плазмы полупроводниковых материалов (мишень). Процессы формирования многозарядных ионов лазерной плазмы инжектора требуют более глубокого их изучения. Так как соотношение между эффективностями рекомбинационных и ионизационных процессов определяется начальным объемом и скоростью разлета плазмы, то представляет актуальность исследование влияния исходного физического состояния мишени на характеристики инжектируемых многозарядных ионов [1-5]. Как известно, способность полупроводника проводить тепло складывается из электронной и фононной теплопроводностей. Измерение электропроводности исследуемого нами образца показало, что с ростом дозы γ -облучения его сопротивление растет. Указанное обстоятельство означает, что электронная теплопроводность кремния, обусловленная свободными электронами, уменьшается. Образование при высокодозным облучением кремния структурных дефектов приводит к ухудшению и решеточной теплопроводности, так как тепловые фононы рассеиваются на них подобно фотонам в мутной среде.

Естественно, что ухудшение теплопроводности мишени и существование в ней областей с меньшей энергией связи не только приближает время начала испарения, но и увеличивает интенсивность данного процесса [3].

2. Методика эксперимента

В настоящей работе исследованы зарядовые спектры многозарядных ионов Si, образующихся при воздействии импульса лазерного излучения на моноэлементный кремний: до облучения и после его предварительного γ - облучения до доз 10^{10} Р. Изменение исходного физического состояния мишени проводилось облучением ее в канале γ - источника ^{60}Co мощностью 1000 Р/с до доз 10^{10} Р. Облучение велось при температуре канала 70°C . Эксперименты проводились на времяпролетном лазерном анализаторе, описанном в [6] при комнатной температуре. Действующий на Si лазерный импульс с $\lambda=1,06$ мкм при длительности $\tau=50$ нс достигал плотности мощности излучение $q\sim 10^{11}$ Вт/см² на поверхности мишени.

3. Результаты и их обсуждение

Исследование зарядовых спектров плазмы, образующейся при воздействии гигантского импульса лазерного излучения на необлученный кремний, показало, что с ростом q лазерного излучения растут кратность заряда Z , максимальная энергия и выход ионов. В плазме, образующейся при воздействии на необлученный кремний лазерного излучения с плотностью мощности $q=10^{11}$ Вт/см², регистрируются ионы, имеющие заряд от 1 до 14 (рис.1).

Как видно из рис.1, при этой q лазерного излучения на осциллограмме, перед пиком, соответствующему иону Si^{9+} , появляется широкий пик в виде «воронки». Расшифровка зарядовых спектров, полученных при различных значениях q лазерного излучения,

воздействующего на мишень, дает основание считать, что указанная «воронка» представляет собой перекрывающиеся сигналы от ионов Si с кратностями заряда $Z=10-14$, накладывающиеся друг на друга. Ионы Si с $Z=10, 11, 12, 13$ и 14 . имеют относительную энергию $E/Z = 500$ эВ на ед. заряда.

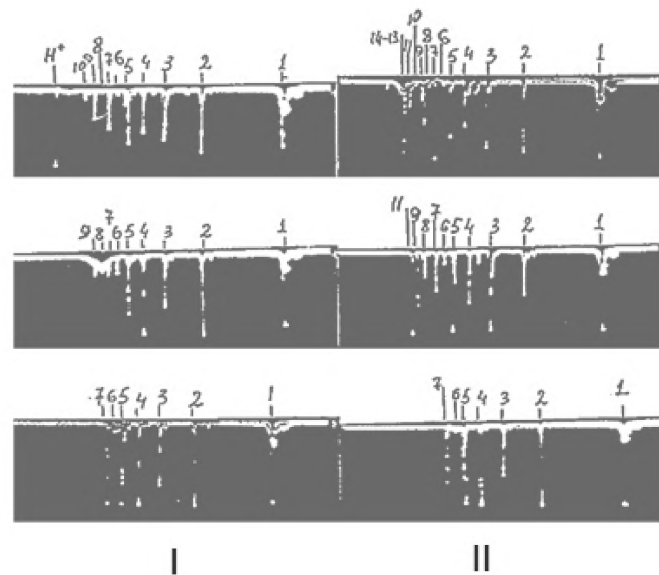


Рис.1. Зарядовые спектры ионов плазмы образующийся при воздействии лазерного излучения с различной плотностью мощности q на необлученный (I) и γ облучённый с потоком $2 \cdot 10^{10}$ P (II)

Экспериментально установлено, что предварительная радиационная обработка кремния, приводящая к появлению в исследуемом образце γ - наведенных дефектов, снижает порог его разрушения. Микроскопические исследования кратера, возникающего на поверхности мишени, показывают, что γ -облучение Si дозами $D \geq 10^6$ P приводит к увеличению области разрушения. Так, например, глубина кратера, образующегося на поверхности Si, облученного до 10^9 P, при воздействии на нее лазерного излучения с $q = 5 \cdot 10^{10}$ Вт/см², на 43 мкм больше, чем в случае необлученного образца; при $D = 10^{10}$ P и той же q лазерного излучения разница достигает 70 мкм.

Сравнение зарядового распределения ионов плазмы, полученной из облученного и необлученного кремния, показало их определенную разницу. Экспериментально установлено, что радиационное повреждение данной мишени отражается на зарядовом состоянии получаемой из нее лазерной плазмы. На рис.2 приведены зарядовые спектры ионов Si, образующихся при $q = 6 \cdot 10^9$ Вт/см² из необлученного и γ - облученного до 10^6 и 10^9 P кремния. Из этого видно, что если до облучения на осциллограммах регистрируются ионы Si, имеющие кратность заряда от +1 до +5 (Si^{1+} - Si^{5+}), то после облучения данной мишени до 10^6 P максимальная кратность зарядов ионов Z_{max} при той же q лазерного излучения увеличивается до +7. С ростом в мишени концентрации радиационных дефектов растет интенсивность как высоко-, так и низкозарядных ионов.

Проведенные исследования показывают, что плазма, образующаяся из мишени, облученной указанными дозами, в течение $t = 5 \cdot 10^8$ с воздействия лазерного импульса прогревается более эффективно, нежели плазма, получаемая из необлученного образца.

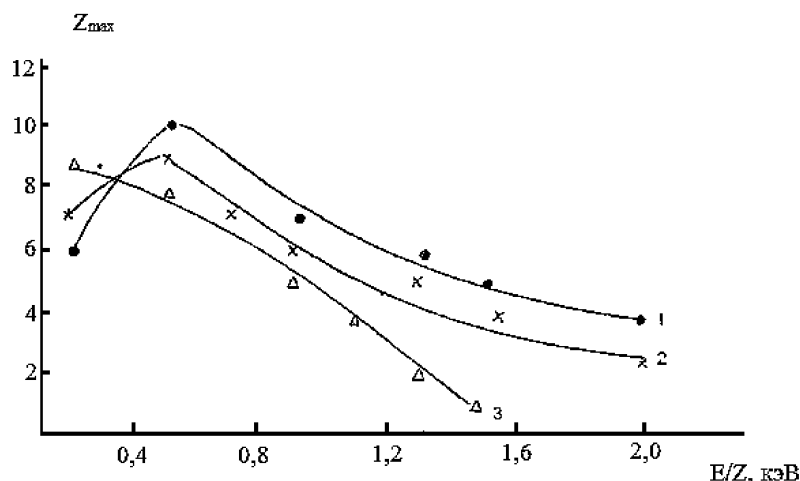


Рис.2. Максимальная кратность заряда в зависимости от энергий ионов Si, образующихся при воздействии лазерного излучения с $q=10^{11}$ Вт/см² на необлученный (1) и γ -облученный Si до 10^6 P (2) и 10^9 P (3)

Например, если в случае необлученного кремния увеличение воздействующей q лазерного излучения (ЛИ) от $6 \cdot 10^9$ Вт/см² до $1,4 \cdot 10^{10}$ Вт/см² способствовало увеличению Z_{\max} ионов Si от +5 до +6, т.е. на один заряд, то после γ -облучения данной мишени до 10^9 P, при изменении q ЛИ в указанных пределах, Z_{\max} ионов Si увеличилась от +7 до +9. Данное обстоятельство указывает на то, что во втором случае доля лазерного излучения, затрачиваемая на ионизацию и нагрев плазменного сгустка больше, нежели в первом.

При дозах γ -облучения, свыше 10^9 P, закономерность изменения Z_{\max} ионов Si от дозы меняется на противоположную: чем выше доза, тем меньше Z_{\max} . Это свидетельствует о том, что плотность образующейся при этом плазмы повышается настолько, что в ней интенсифицируются рекомбинационные процессы. Однако, как и раньше (до облучения), ионы, имеющие относительную энергию 500 эВ на ед. заряда, имеют наиболее высокую кратность ионизации. Следует отметить еще и следующее; для ионов Si, имеющих энергию $E/Z \leq 500$ эВ на ед. заряда, характерно увеличение Z_{\max} с ростом дозы γ -облучения; причем, чем меньше E/Z и больше доза, тем выше кратность заряда иона. Однако, для ионов с $E/Z > 500$ эВ на ед. заряда наблюдается противоположная зависимость: чем больше доза γ -облучения, тем меньше максимальная кратность заряда ионов. Эта особенность в зарядовых спектрах плазмы, образующейся из γ -облученного моноэлементного кремния, наблюдается при всех рассмотренных q лазерного излучения.

4. Заключение

Таким образом, на основании сравнения зарядовых распределений ионов Si, эмитируемых плазмой, источником которой являлась моноэлементная мишень, находящаяся в различном исходном состоянии, а также результатов исследования морфологии кратеров возникающих при этом разрушений можно с уверенностью сказать, что радиационные дефекты, имеющиеся в мишени, способны влиять на процесс её взаимодействия с лазерным излучением [7-9]. Изменение условий, при которых происходит испарение мишени, сказывается на закономерностях формирования зарядового распределения ионов плазмы [10]. Так, например, из анализа зарядовых спектров плазмы, источником которой являлся моноэлементный кремний, с различной концентрацией

радиационных повреждений, видно, что появление в мишени дефектов и рост их до определенной концентрации способствуют росту Z_{\max} , E_{\max} и выхода многозарядных ионов при одном и том же энерговкладе со стороны лазерной системы.

Литература

1. М.Р. Бедилов, Т.Г. Цой, Т.Б. Сатиболдиев. О возможности лазерно-масс-спектрометрического определения элементов, адсорбированных поверхностным слоем. Журнал аналитической химии, 1991, Том. 46, вып. 9, стр. 1742-1746.
2. R.T. Khaydarov, H. Beysembaeva and R. Khaydarov. Improvement of characteristics of Laser Source of Ions by Changing the Parameters of the Target and External Parameters. J. Energy Power Sources, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 43-53.
3. Корбет, Э.Бургуен. Дефектообразование в полупроводниках. 1989, Москва, Мир, стр. 420.
4. Е.А. Болховитдинов, Б.Л. Васин. Особенности образования кратеров в мишени под воздействием мощного лазерного импульса, Физика плазмы. 2004, Том. 30, Вып. 2, стр. 205-208.
5. S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. V. Korneev, and R. Kh. Yakubov. High-voltage vacuum diode switching process by means of plasma from accessory spark discharge. Appl. Phys., No. 4, 19 (2019).
6. R.T. Khaydarov, H.B. Beysenbaeva, T.B. Satiboldyev. Effect of optical radiation of the properties of gamma radiated silicate glass. Journal of Modern Physics, 2014, 5, Published Online July 2014 in SciRes. Available at: <http://www.scirp.org/>
7. Philippe Magaud et al. Plasma Facing Components: Challenges for Nuclear Materials, December 5-7, 2012, CEA – INSTN Saclay, France.
8. С.В. Рогожкин, А.А. Алеев. Исследование влияния тяжелоионного облучения на наноструктуру перспективных материалов ядерных энергетических установок. Физика металлов и металловедение, 2012, Том. 113, стр. 212-224.
9. R.T. Khaydarov, H.B. Beisenbaeva, M.M. Sabitov, Milan Kalal and G.R. Berdiyev. Effect of light gas atom inclusions on the characteristics of laser-produced plasma ions Nuclear. Fusion 51 (2011) 103041 (3pp) doi 10888/0029-5515/51/10/103041
10. R.T. Khaydarov, H. Beysembaeva and R. Khaydarov. Improvement of Characteristics of Laser Source of Ions by Changing the Parameters of the Target and External Parameters. J. Energy Power Sources Vol. 4, No. 2, 2017, pp. 43-53.

References

1. M.R. Bedilov, T.G. Tsoi, Satyboldiev T.B. *O vozmozhnosti lazerno-mass-spektrometricheskogo opredeleniya elementov, adsorbirovannykh poverkhnostnym sloem* [On the possibility of laser-mass spectrometric determination of elements adsorbed by the surface layer]. *Zhurnal analiticheskoi khimii* [Journal of Analytical Chemistry], 1991, vol. 46, no. 9, pp. 1742-1746. (In Russ.)
2. R.T. Khaydarov, H.B. Beysenbaeva, T.B. Satiboldyev. Effect of optical radiation of the properties of gamma radiated silicate glass. Journal of Modern Physics, 2014, 5, Published Online July 2014 in SciRes. Available at: <http://www.scirp.org/>
3. Korbet Dzh., Burguen Zh. *Defektoobrazovanie v poluprovodnikakh* [Defect formation in semiconductors]. 1989, Moscow, Publ. Mir, p. 420. (In Russ.)

4. E.A.Bolkhovitinov, B.L.Vasin, S.Yu.Gus'kov, I.Ya.Doskach, A.A.Erokhin, B.V.Kruglov, M.V.Osipov, V.N.Puzyrev, V.B.Rozanov, A.A.Rupasov, V.B.Studenov, S.I.Fedotov, L.P.Feoktistov, A.S.Shikanov, O.F.Yakushev *Osobennosti obrazovaniya kraterov v misheni pod vozdeistviem moshchnogo lazernogo impul'sa* [Features of the formation of craters in a target under the influence of a powerful pulse], *Fizika Plazmy* [Plasma Physics], 2004, vol. 30, no. 2, pp. 205-208. (In Russ.)
 5. S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. V. Korneev, and R. Kh. Yakubov. High-voltage vacuum diode switching process by means of plasma from accessory spark discharge. *Appl. Phys.*, No. 4, 19 (2019).
 6. R.T. Khaydarov, H. Beysembaeva and R. Khaydarov. Improvement of characteristics of Laser Source of Ions by Changing the Parameters of the Target and External Parameters. *J. Energy Power Sources*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 43-53.
 7. Philippe Magaud et al. Plasma Facing Components: Challenges for Nuclear Materials, December 5-7, 2012, CEA – INSTN Saclay, France.
 8. S.V. Rogozhkin, A.A. Aleev, A.G. Zaluzhny, R.P. Kuybida, T.V. Kuleva, A.A. Nikitin, N.N. Orlov, B. B. Chalykh, V. B. Shishmarev. *Issledovanie vliyaniya tyazhelionnogo oblucheniya na nanostrukturu perspektivnykh materialov yadernix energeticheskix ustanovok* [Investigation of the influence of heavy ion irradiation on the nanostructure of promising materials of nuclear power plants]. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and metal science], 2012, T. 113, C. 212-224. (In Russ.)
 9. R.T. Khaydarov, H.B. Beisinbaeva, M.M. Sabitov, Milan Kalal and G.R. Berdiyrov. Effect of light gas atom inclusions on the characteristics of laser-produced plasma ions *Nuclear Fusion* 51 (2011) 103041 (3pp) doi 10888/0029 -5515/ 51/10/ 103041
 10. R.T. Khaydarov, H. Beysembaeva and R. Khaydarov. Improvement of Characteristics of Laser Source of Ions by Changing the Parameters of the Target and External Parameters . *J. Energy Power Sources* Vol. 4, No. 2, 2017, pp. 43-53.
-

The text of the article was translated by Editorial Team of journal of “Semiconductor Physics and Microelectronics”. For more information contact: ispm_uz@mail.ru

1. Introduction

In new technologies for the production of microelectronics, ion implants based on effective ion injectors formed from the laser plasma of semiconductor materials (target) are widely used. The processes of formation of multiply charged ions of the laser plasma of the injector require a deeper study of them. Since the ratio between the efficiencies of recombination and ionization processes was determined by the initial volume and the rate of expansion of the plasma. It is relevant to study the influence of the initial physical state of the target on the characteristics of injected multiply charged ions [1-5]. As is known, the ability of a semiconductor to conduct heat consists of electronic and phonon thermal conductivities. Measurement of the electrical conductivity of the sample under study showed that with increasing dose of γ -radiation, its resistance increases. This circumstance means that the electronic thermal conductivity of silicon due to free electrons decreases. The formation of structural defects during high-dose irradiation of silicon leads to a deterioration in lattice thermal conductivity, since thermal phonons scatter on them like photons in a turbid medium.

Naturally, the deterioration of the thermal conductivity of the target and the existence of regions with a lower binding energy in it not only approximates the onset of evaporation, but also increases the intensity of this process [3].

2. Experimental technique

In this work, we studied the charge spectra of multiply charged Si ions formed upon exposure to a mono-element silicon laser pulse: before irradiation and after its preliminary γ -irradiation to doses of 10^{10} P. The initial physical state of the target was changed by irradiating it in the channel of a ^{60}Co γ source with a power of 1000 P/s to doses of 10^{10} P. Irradiation was carried out at a channel temperature of 70 °C. The experiments were carried out on a time-of-flight laser analyzer described in [6] at room temperature. A laser pulse acting on Si with $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ for a duration of $\tau = 50$ ns reached a radiation power density $q \sim 10^{11}$ W/cm² on the target surface.

2. Results and discussion

A study of the charge spectra of the plasma produced by the action of a giant laser pulse on unirradiated silicon showed that with increasing q laser radiation the charge multiplicity Z , the maximum energy, and the ion yield increase. In a plasma formed when laser radiation with a power density $q = 10^{11}$ W / cm² is exposed to unirradiated silicon, ions with a charge from 1 to 14 are detected (pic. 1).

As can be seen from fig. 1, with this q laser radiation on the waveform, a wide peak appears in the form of a “funnel” in front of the peak corresponding to the Si^{9+} ion. The decoding of the charge spectra obtained at different q values of the laser radiation acting on the target suggests that this “funnel” represents overlapping signals from Si ions with charge multiplicities $Z = 10-14$ superimposed on each other. Si ions with $Z = 10, 11, 12, 13,$ and 14 . have a relative energy $E / Z = 500$ eV per unit. charge.

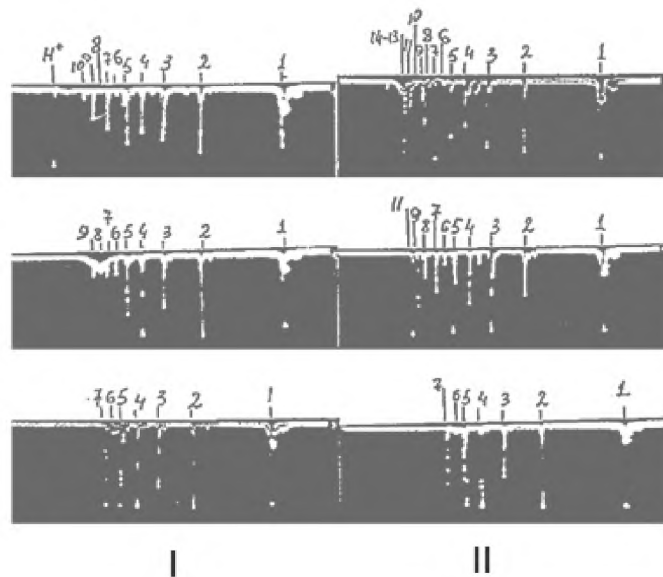


Fig.1. The charge spectra of plasma ions formed at the action of laser radiation with different power densities on unirradiated (I) and γ irradiated with a flux of $2 \cdot 10^{10}$ P (II)

It was experimentally established that preliminary radiation treatment of silicon, leading to the appearance of γ -induced defects in the sample under study, lowers the threshold for its destruction. Microscopic studies of the crater arising on the target surface show that γ -irradiation of Si with doses of $D \geq 10^6$ P leads to an increase in the fracture region. So, for example, the depth of the crater formed on the Si surface irradiated to 10^9 P, when exposed to laser radiation with $q = 5 \cdot 10^{10}$ W / cm^2 , is 43 microns more than in the case of an unirradiated sample; at $D = 10^{10}$ P and the same q laser radiation, the difference reaches 70 μm .

Comparison of the charge distribution of plasma ions obtained from irradiated and unirradiated silicon showed a certain difference. It was experimentally established that radiation damage to this target is reflected in the charge state of the laser plasma obtained from it. Figure 2 shows the charge spectra of Si ions formed at $q = 6 \cdot 10^9$ W / cm^2 from unirradiated and γ -irradiated up to 10^6 and 10^9 P silicon. This shows that if Si ions with a charge multiplicity from +1 to +5 (Si^{1+} - Si^{5+}) are recorded on the oscillograms before irradiation, then after irradiating this target up to 10^6 P, the maximum charge multiplicity of Z_{max} ions at the same q laser radiation increases to +7. With an increase in the concentration of radiation defects in the target, the intensity of both high and low charge ions increases.

Studies have shown that plasma generated from a target irradiated with the indicated doses during a laser exposure $t = 5 \cdot 10^8$ s warms up more efficiently than plasma obtained from an unirradiated sample.

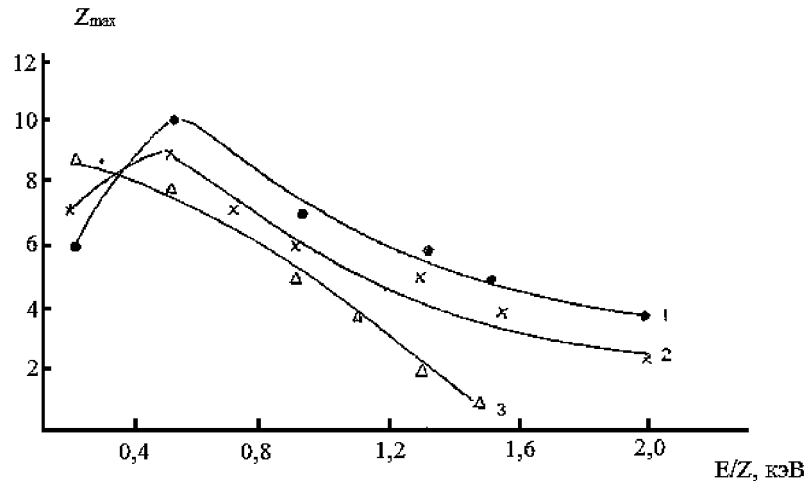


Fig. 2. The maximum charge multiplicity depending on the energies of Si ions generated by the action of laser radiation with $q = 10^{11} \text{ W/cm}^2$ on unirradiated (1) and γ -irradiated Si up to 10^6 P (2) and 10^9 P (3)

For example, if in the case of unirradiated silicon, an increase in the q laser radiation (LI) from $6 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$ to $1,4 \cdot 10^{10} \text{ W/cm}^2$ contributed to an increase in Z_{max} of Si ions from +5 to +6, i.e. per charge, then after γ -irradiation of this target to 10^9 P , with a change in q LI within the indicated limits, Z_{max} of Si ions increased from +7 to +9. This circumstance indicates that in the second case, the fraction of laser radiation spent on ionization and heating of the plasma bunch is larger than in the first.

At doses of γ -radiation above 10^9 P , the pattern of change in Si Z_{max} ions from the dose changes to the opposite: the higher the dose, the lower Z_{max} . This indicates that the density of the plasma formed in this process increases so much that recombination processes are intensified in it. However, as before (before irradiation), ions having a relative energy of 500 eV per unit. charge, have the highest ionization ratio. The following should also be noted; for Si ions having an energy of $E / Z \leq 500 \text{ eV}$ per unit charge, characterized by an increase in Z_{max} with increasing dose of γ -radiation; moreover, the smaller the E / Z and the larger the dose, the higher the ion charge multiplicity. However, for ions with $E / Z > 500 \text{ eV}$ per unit. the opposite dependence is observed: the larger the dose of γ -radiation, the lower the maximum ion charge multiplicity. This feature in the charge spectra of a plasma formed from γ -irradiated mono-element silicon is observed for all q laser radiation considered.

4. Conclusion

Thus, based on a comparison of the charge distributions of Si ions emitted by the plasma, the source of which was a mono-element target in a different initial state. In addition, the results of studying the morphology of the craters of the resulting damage, we can confidently say that the radiation defects present in the target are capable of influence the process of its interaction with laser radiation [7–9]. Changes in the conditions under which the evaporation of the target affects the laws of formation of the charge distribution of plasma ions [10]. For example, from an analysis of the charge spectra of a plasma emitted by mono-element silicon with a different concentration of radiation damage, it can be seen that the appearance of defects in the target and their growth to a certain concentration contribute to the growth of Z_{max} , E_{max} and the yield of multiply charged ions at the same energy input from the laser system.