

Ю.Д.Гричук

## УМЕНЬШЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОБРАТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДИОДА С ПОМОЩЬЮ ДИФФУЗИИ ПЛАТИНЫ

Описывается переключаемый высокоскоростной кремниевый диод на основе  $p^+-n-p^+$  структуры. Быстродействие диода увеличено за счет уменьшения времени жизни неосновных носителей заряда в базе методом диффузии платины с последующим резким охлаждением. Результатом оценки быстродействия этих диодов является время восстановления обратного сопротивления в симметричном режиме переключения тока с 10 мА до -10 мА. В результате получены температурные зависимости времени обратного восстановления, времени жизни носителей заряда в базе и токов утечки для полупроводникового диода при различных технологических режимах диффузии платины. При увеличении температуры диффузии платины от 950°C до 1050°C время обратного восстановления исходной структуры диода уменьшено в 10 раз. Времена жизни неосновных носителей заряда в базе диода были сокращены с 610 нс до 4—5 нс.

**Ключевые слова:** высокоскоростной диод, время жизни неосновных носителей заряда, время обратного восстановления, диффузия платины

### Введение

**В** настоящее время во всем мире радиолокационные станции наземного и морского базирования широко применяются как средства раннего предупреждения объектов для обеспечения безопасности навигации. В приемных и защитных устройствах приемопередающих трактов радиолокационных станций, а также в ограничительных схемах различных устройств используются высокоскоростные диоды [1]. Эти диоды имеют широкий диапазон статических и динамических параметров. В данной работе разработан переключаемый высокоскоростной диод, который имеет время переключения 4 нс, имея при этом емкость не более 1 пФ, а так же прямые напряжения не более 1,25 В при прямом токе 250 мА и обратное напряжение не менее 100 В. Исходя из заданных параметров, был проведен расчет возможных вариантов изготовления данного прибора. Такие характеристики могут быть получены изготовлением диода Шоттки на GaAs. Однако требования к прямой ветви диода и его емкости не позволяют нам использовать данный материал. В то же время предельная рабочая температура данного диода, 125°C, позволяет применить кремниевую технологию. В результате анализа возможностей  $p-i-n$  структур было принято решение использовать ускоренные диоды на основе  $p^+np^+$  структур, т.к. в данном случае получается наилучшее сочетание динамических и статических параметров разрабатываемого прибора.

Из теории переходных процессов [2, 3] следует, что быстродействие можно увеличить, уменьшая время жизни неосновных носителей заряда в базе и уменьшая емкость  $p-n$  перехода. Время жизни неосновных носителей заряда существенно уменьшают за счет введения в базу диода дополнительных каналов рекомбинационных центров, в роли которых выступают глубокие центры, образованные атомами примесей, и радиационные дефекты, вносимые при облучении полупроводника пучками частиц высоких энергий [4, 5].

Наиболее широко для контролируемого снижения времени жизни используется Au и Pt, поскольку «деактивация» их центров наблюдается при температурах существенно более высоких, чем предельная рабочая температура приборов. Примеси этих металлов диффундируют в кремнии по диссоциативному механизму и относятся к примесям внедрения и замещения [6]. Следует отметить, что контролируемое снижение времени жизни с помощью диффузии платины, в отличие от золота, не приводит к высокому темпу генерации носителей в области пространственного заряда, то есть генерационная составляющая обратного тока через  $p-n$  переход не увеличивается [7—9]. В ряде случаев, когда  $p-n$  структуры необходимо использовать при высоких рабочих температурах, резкое возрастание токов утечки накладывает ограничения на область их применения. По этой причине платина является перспективным материалом для увеличения быстродействия диодов [10—13].

### Эксперимент

Рассмотрен метод уменьшения времени обратного восстановления диода, изготовленного на основе кремниевой эпитаксиальной структуры  $n$ -типа, с помощью диффузии платины. Эпитаксиальный слой легирован фосфором, подложка легирована мышьяком. Структура вертикального  $p-n$  перехода сформирована по планарной технологии с помощью двустадийной диффузии бора на глубину 3—4 мкм для создания  $p$ -кармана. Схема вертикального полупроводникового импульсного диода в поперечном сечении кристалла представлена на рис. 1.

Так как коэффициент диффузии  $D$  платины, хоть и определяемый с большой погрешностью, существенно больше, чем у бора или фосфора при одинаковых температурах  $T$ , то диффузия платины

осуществляется после формирования структуры диода

$$D_{Pt \rightarrow Si} = 11 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(-25800/RT) \text{ [см}^2\text{/сек]},$$

$$D_{P, B \rightarrow Si} = 10,5 \cdot \exp(-85000/RT) \text{ [см}^2\text{/сек]},$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная, равная 8,3144 Дж/моль·К.

Коэффициент диффузии сильно зависит от присутствия дефектов в кремнии, а платина, прежде всего, диффундирует в области пластины с высокой концентрацией дефектов, то есть туда, где формируются активные области прибора. Но поскольку контактная металлизация устройств не может выдержать этих температур, диффузия платины выполняется до полного изготовления прибора.

Диффузия платины в кремний проводится из напыленного на обратную сторону пластины слоя. Чтобы определить зависимости времени жизни неосновных носителей заряда и токов утечки от режима диффузии платины, диффузия была проведена при температурах от 950°C до 1050°C в течение 10 мин и 15 мин с последующим резким охлаждением образцов. Также чтобы сравнить влияние вводимых примесей на работу диода, были изготовлены образцы без диффузии платины.

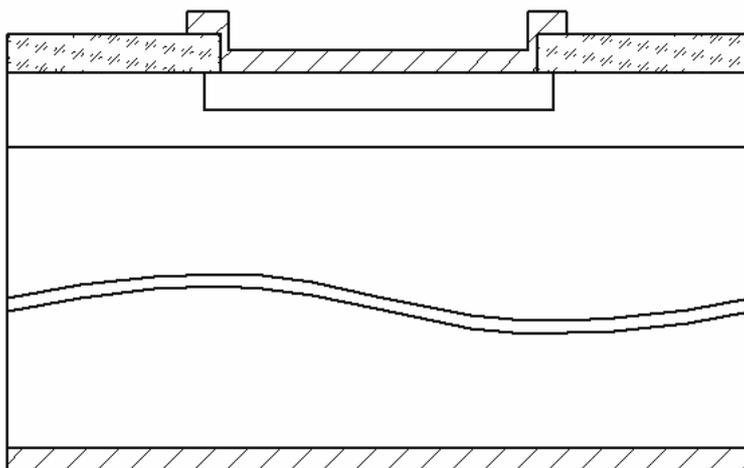


Рис. 1. Схема вертикального переключающего высокоскоростного диода в поперечном сечении кристалла

В работах [6, 14] были определены сечения захвата и изучены созданные платиной активные состояния глубоких примесных уровней: акцепторные уровни  $E_1^-$  -0,19 эВ с сечением захвата электронов  $\sigma_n = 2,4 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$  и  $E_2^-$  +0,42 эВ с сечением захвата электронов  $\sigma_n = 2,7 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$  и один донорный —  $E_1^+$  +0,26 эВ с сечением захвата дырок  $\sigma_p = 1,2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$  при 300 К (рис. 2).

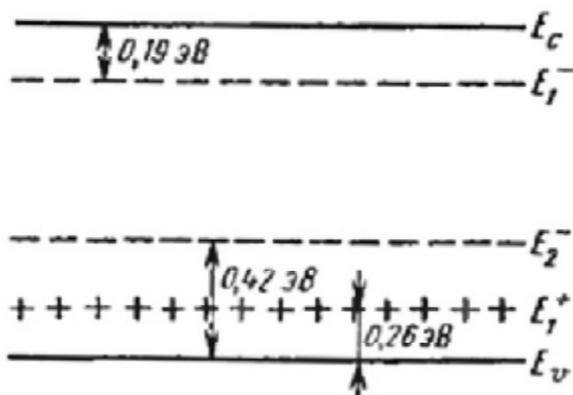


Рис. 2. Энергетические уровни в кремнии, образованные диффузией платины

Длительность и характер времени восстановления обратного сопротивления зависят от накопленного количества неосновных носителей заряда, которые определяются величиной стационарного прямого тока до переключения, и от величины обратного смещения. Таким образом, наиболее показательными будут измерения в симметричном режиме, когда значения прямого и обратного смещения по модулю равны. Так как в этом случае время обратного восстановления будет сохранять свое значение при пропорциональном изменении прямого и обратного токов в режиме его измерения.

Необходимым результатом оценки быстродействия этих диодов является время восстановления обратного сопротивления не превышающее 4 нс в симметричном режиме переключения тока с 10 мА до -10 мА.

### Результаты

На полученных структурах было измерено время обратного восстановления и ток, протекающий через диод при обратном смещении (табл.). На рис. 3 представлена зависимость времени обратного восстановления диода от режимов диффузии платины.

Оценку времени обратного восстановления диода можно провести по формуле [15]:

$$\operatorname{erf} \sqrt{\frac{t_{\varepsilon}}{\tau}} = \frac{1}{1 + \frac{I_{\text{обр}}}{I_{\text{пр}}}}, \quad (1)$$

где  $t_{\varepsilon}$  — время обратного восстановления диода,

$\tau$  — время жизни неосновных носителей заряда,

$I_{\text{пр}}, I_{\text{обр}}$  — прямой и обратный токи через диод, соответственно.

Из полученных значений времен обратного восстановления диода по формуле 1 произведен расчет времен жизни неосновных носителей заряда в базе диода (табл.). На рис. 4 приведена температурная зависимость времени жизни неосновных носителей заряда в базе диода при разной продолжительности диффузии платины.

Однако снижение времени жизни неизбежно ухудшает статические вольт-амперные характеристики структур, а именно прямое падение напряжения и токи утечки p-n перехода. Ток утечки кремниевого p-n перехода обусловлен возникновением заряда в рекомбинационных центрах внутри примыкающего к переходу обедненного слоя и обратно пропорционален времени жизни неосновных носителей заряда. При низких температурах диффузии электрически активной примеси образуется недостаточно для уменьшения времени жизни неосновных носителей заряда, а при слишком высоких получают большие токи утечки. На рис. 5 представлена зависимость обратных токов диода от режимов диффузии платины.

Таблица

Параметры диодов, легированных платиной

Время диффузии Pt, $t_{\text{дифPt}}$ , мин	Температура диффузии Pt $T_{\text{дифPt}}$ , °C	Время обратного восстановления диода $t_{\text{обр вост}}$ , нс	Время жизни неосновных носителей заряда $\tau$ , нс	Токи утечки (при $U_{\text{обр}}=100\text{В}$ ) $I_{\text{обр}}$ , мкА
Структура диода без диффузии Pt		286,8	610,2	5
10	950	22,0	46,8	0,2
	1000	4,2	8,9	2
	1025	2,9	6,2	2,4
	1050	2,2	4,7	3,9
15	950	24,4	51,9	0,6
	1000	3,5	7,5	2,2
	1025	2,5	5,3	2,8
	1050	2,0	4,3	3,6

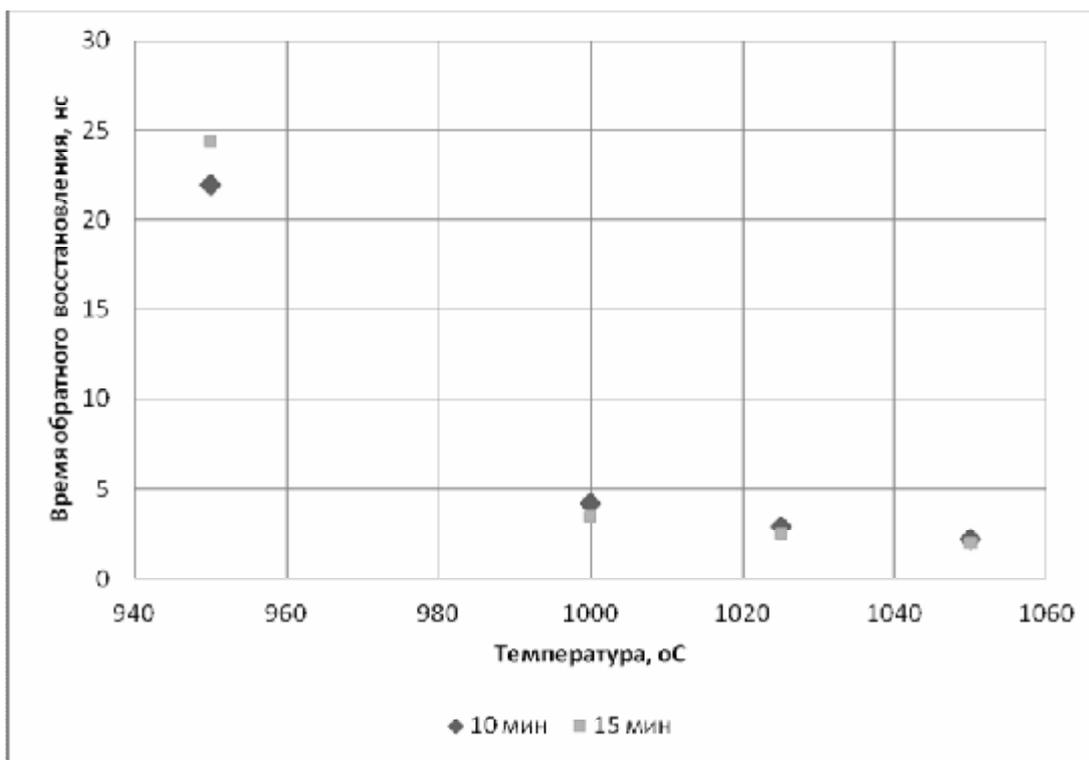


Рис. 3. Температурная зависимость времени обратного восстановления диода при разной продолжительности диффузии платины

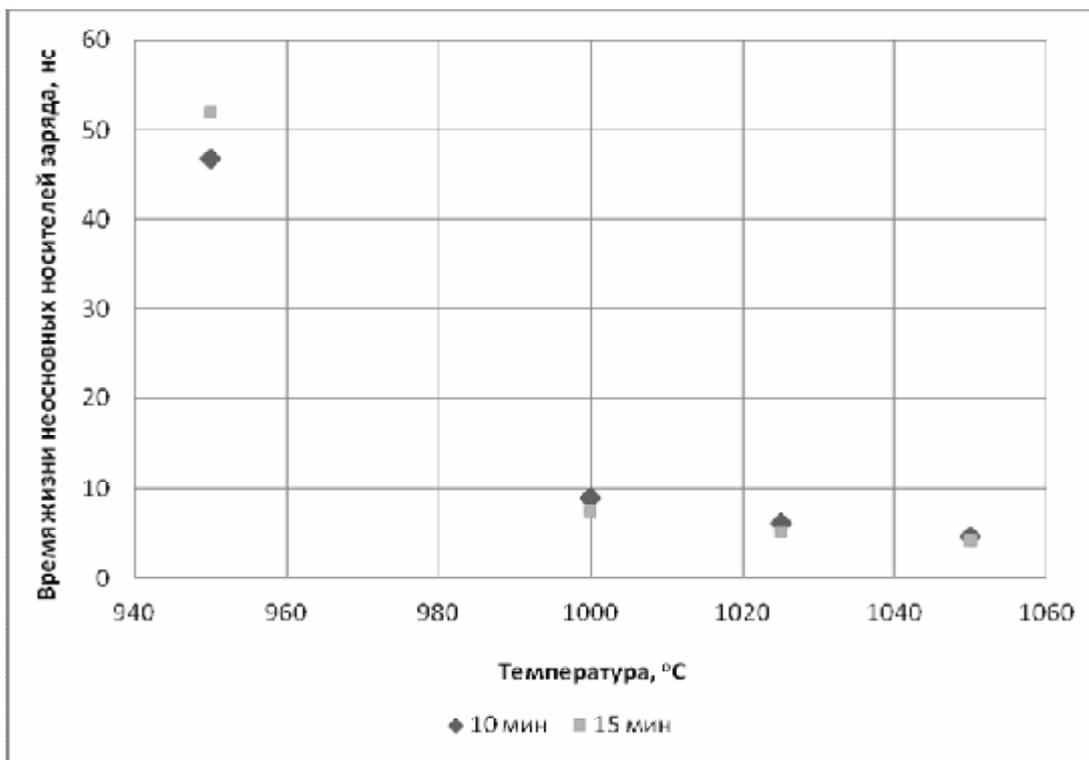


Рис. 4. Температурная зависимость времени жизни неосновных носителей заряда в базе диода при разной продолжительности диффузии платины

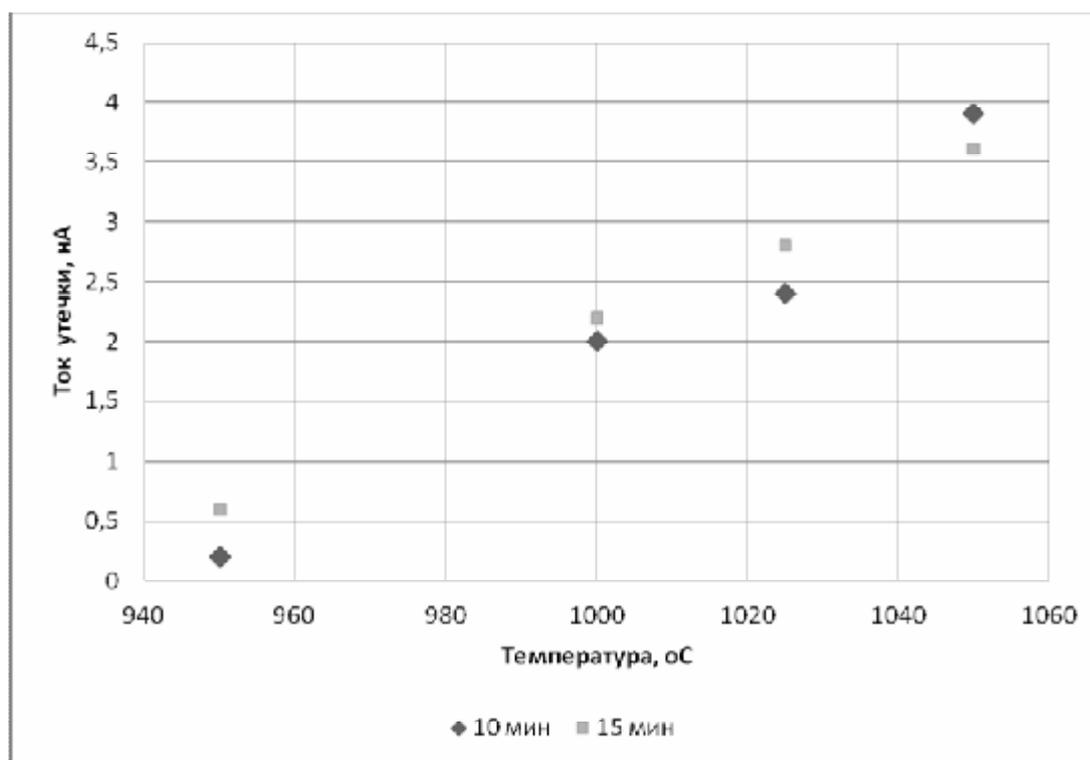


Рис. 5. Температурная зависимость токов утечки диода при разной продолжительности диффузии платины

## Выводы

На основании исследования переходных характеристик кремниевых диодов методом переключения в симметричном режиме определены время обратного восстановления и времена жизни неосновных носителей заряда в базе диода. В настоящей работе рассмотрено уменьшение времени обратного восстановления диода путем легирования кремния платиной методом диффузии.

За счет образования глубоких примесных уровней в кремнии времена жизни неосновных носителей заряда в базе диода были сокращены с 610 нс до 4—5 нс. При увеличении температуры диффузии платины от 950°C до 1050°C время обратного восстановления исходной структуры диода уменьшено в 10 раз. Наиболее оптимальным режимом диффузии платины является продолжительность 15 мин при температуре 1000°C, при котором получен кремниевый высокоскоростной полупроводниковый диод со временем обратного восстановления 3,5 нс, током утечки 2,2 мкА и прямым напряжением 1,12 В (при прямом токе 250 мА).

1. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск: учебник / В.Н.Тяпкин, А.Н.Фомин, Е.Н.Гарин. Красноярск: Сиб. федер. ун-т., 2011. 536 с.
2. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники. М.: Высшее образование, 2009. 464 с.
3. Лысенко А.П. Физические процессы в р-п переходе. М.: МИЭМ, 2009. 97 с.
4. Vobecký J., Hazdra P. Fast recovery diode with novel local lifetime control // Proc. ISPSD. 2006. P. 1-4.
5. Hazdra P., Komarnitsky V. Local lifetime control in silicon power diode by ion irradiation: introduction and stability of shallow donors // IET Circuits Devices Syst. 2007. № 1. P. 321-326.
6. Готра З.Ю. Технология микроволновых устройств. М.: Радио и связь, 1991. С. 153-154.
7. Jia Yun-Peng, Zhao Bao, Yang Fei, Wu Yu, Zhou Xuan, Li Zhe, Tan Jian Effect of combined platinum and electron on the temperature dependence of forward voltage in fast recovery diode // Chinese Physics B. 2015. Vol. 24. № 12. P. 126104-1-126104-4.
8. Siemieniec R., Netzl M., Südkamp W., Lutz J. Temperature dependent properties of different lifetime killing technologies on example of fast power diodes // International Conference on Industrial Electronics, Technology and Automation (IETA). 2001. 465 p.
9. Baliga B.J., Sun E. Comparison of gold, platinum, and electron irradiation for controlling lifetime in power rectifiers // IEEE Trans.Electron.Devices. 1977. Vol. 24. № 6. P. 685-688.
10. Vobecký J., Hazdra P. High-power p-i-n diode with the local lifetime control based on the proximity gettering of platinum // IEEE Electron Device Letters. 2002. Vol. 23. P. 392-394.
11. Buršíková V., Hazdra P., Komarnitsky V. Hydrogenation of platinum introduced in silicon by radiation enhanced diffusion // Mater. Sci. Eng. B. 2009. Vol. 159-160. P. 342-345.
12. Hazdra P., Vobecký J. Controlled gettering of implanted platinum in silicon produced by helium co-implantation // Solid State Phenomena. 2004. Vol. 95-96. P. 559-564.
13. Hazdra P., Komarnitsky V. Combined lifetime killing by platinum and fast light ions in silicon power diode: thermal stability of introduced radiation defects // Solid State Phenomena. 2010. Vol. 156-159. P. 167-172.
14. Carchano H., Juhd C. Electrical properties of silicon doped with platinum // Solid-State Electronics. 1970. Vol. 13. P. 83.

15. Абдулхаев О.А., Асанова Г.О. Исследование переходных процессов в кремниевой p+pn+-структуре // ФИП PSE. 2011. Vol. 9. № 2. P. 188-193.

#### References

1. Osnovy postroeniya radiolokatsionnykh stantsiy radiotekhnicheskikh voysk: uchebnik / V.N.Tyapkin, A.N.Fomin, E.N.Garin. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t., 2011. 536 s.
2. Starosel'skiy V.I. Fizika poluprovodnikovyykh priborov mikroelektroniki. M.: Vysshee obrazovanie, 2009. 464 s.
3. Lysenko A.P. Fizicheskie protsessy v p-n perekhode. M.: MIEM, 2009. 97 s.
4. Vobecký J., Hazdra P. Fast recovery diode with novel local lifetime control // Proc. ISPSD. 2006. P. 1-4.
5. Hazdra P., Komarnitskiy V. Local lifetime control in silicon power diode by ion irradiation: introduction and stability of shallow donors // IET Circuits Devices Syst. 2007. № 1. P. 321-326.
6. Gotra Z.Yu. Tekhnologiya mikroelektronnykh ustroystv. M.: Radio i svyaz', 1991. S. 153-154.
7. Jia Yun-Peng, Zhao Bao, Yang Fei, Wu Yu, Zhou Xuan, Li Zhe, Tan Jian Effect of combined platinum and electron on the temperature dependence of forward voltage in fast recovery diode // Chinese Physics B. 2015. Vol. 24. № 12. P. 126104-1-126104-4.
8. Siemieniec R., Netzel M., Südkamp W., Lutz J. Temperature dependent properties of different lifetime killing technologies on example of fast power diodes // International Conference on Industrial Electronics, Technology and Automation (IETA). 2001. 465 p.
9. Baliga B.J., Sun E. Comparison of gold, platinum, and electron irradiation for controlling lifetime in power rectifiers // IEEE Trans.Electron.Devices. 1977. Vol. 24. № 6. P. 685-688.
10. Vobecký J., Hazdra P. High-power p-i-n diode with the local lifetime control based on the proximity gettering of platinum // IEEE Electron Device Letters. 2002. Vol. 23. P. 392-394.
11. Buršíková V., Hazdra P., Komarnitskiy V. Hydrogenation of platinum introduced in silicon by radiation enhanced diffusion // Mater. Sci. Eng. B. 2009. Vol. 159-160. P. 342-345.
12. Hazdra P., Vobecký J. Controlled gettering of implanted platinum in silicon produced by helium co-implantation // Solid State Phenomena. 2004. Vol. 95-96. P. 559-564.
13. Hazdra P., Komarnitskiy V. Combined lifetime killing by platinum and fast light ions in silicon power diode: thermal stability of introduced radiation defects // Solid State Phenomena. 2010. Vol. 156-159. P. 167-172.
14. Carchano H., Juhd S. Electrical properties of silicon doped with platinum // Solid-State Electronics. 1970. Vol. 13. P. 83.
15. Abdulkhaev O.A., Asanova G.O. Issledovanie perekhodnykh protsessov v kremnievoy p+pn+-strukture // FIP PSE. 2011. Vol. 9. № 2. P. 188-193.

**Grichukh Yu.D. Reduction of the recovery time of a high-speed diode by diffusion of platinum.** In this paper, a switching high-speed silicon diode based on the p + nn + structure was described. The speed of the diode was increased due to a decrease minority charge carriers lifetime in the base by diffusion of platinum with subsequent sharp cooling. The result of the evaluation of the speed of these diodes is the reverse recovery time in the symmetrical switching mode of current from 10mA to -10mA. As a result, the temperature dependencies of the reverse recovery time, carrier lifetime, and leakage currents were obtained for a semiconductor diode at different technological regimes of platinum diffusion. With an increase of temperature in the diffusion of platinum from 950 ° C to 1050 ° C, the reverse recovery time of the original diode structure was reduced by a factor of 10. The lifetimes of the minority charge carriers were reduced from 610.2 ns to 4-5 ns in the diode's base.

**Keywords:** high-speed diode, lifetime of minority charge carriers, reverse recovery time, diffusion of platinum.

Сведения об авторе. Ю.Д.Гричук — магистрант НовГУ по направлению 11.04.04 — электроника и нанoeлектроника; Uklia.076@gmail.com.

Статья публикуется впервые. Поступила в редакцию 15.11.2017.