

ОСОБЕННОСТИ НЕЙТРОННОЙ ТРАНСМУТАЦИИ ЛЕГИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

Сулаймонов А. А.

Институт Ядерной физики АН Узбекистана
sulaymonov1882@gmail.com

Сулаймонова Х. И.

Ташкентский международный университет Кимё
xurshidasulaymonova0@gmail.com

Метод нейтронно трансмутационного легирования (НТЛ) полупроводников основан на ядерных превращениях изотопов полупроводниковых материалов при захвате ими медленных (тепловых) нейтронов.

Ключевые слова: нейтрон, трансмутации, легирования, полупроводников, содержание изотопа, протонов, дейтрон, ядерной трансмутации, интегральный флюенс, тепловых нейтронов.

Известно, что облучение монокристаллического кремния флюенсами тепловых нейтронов приводит к ядерному превращению кремния в донорной примеси фосфора в результате ядерной реакции



При этом концентрацию, введенной примеси фосфора в процессе трансмутации, можно рассчитать по формуле

$$N_P = N_0 k s \Phi_T, \quad (2)$$

где N_0 - количество атомов матрицы в единице объема; k - содержание изотопа; s - эффективное сечение реакции на тепловых нейтронах; Φ_T - интегральный флюенс тепловых нейтронов.

Несмотря на то, что влиянию облучения на свойства кремния, легированного



быстро диффундирующими примесями, посвящено достаточно большое количество работ, возможности получения ядерно-трансмутационного полупроводника из предварительно легированного монокристаллического кремния в литературе нами не обнаружено[1-11]. Во всех работах физические процессы, протекающие при воздействии радиации, рассматриваются в области интегральных флюенсов нейтронов, протонов и дейтронов, где конечный продукт реакции (концентрация ядерно-превращенного изотопа) практически не влияет на свойства материала, а наблюдаемые изменения свойств, связаны с введением радиационных дефектов. Практически нет достоверных данных и о влиянии технологических примесей (P, Al, B) и остаточных примесей (O, C) в кремнии на процесс ядерной трансмутации. Имеющиеся отдельные работы по этим примесям посвящены понижению их содержания в кремнии облучением нейтронами при низких температурах или их геттерированию на поверхность или стоки.

В связи с этим в данной работе проанализированы ядерные реакции и особенности нейтронной трансмутации, происходящие в легированном кремнии и приборах на их основе.

В таблице приведены основные ядерные реакции в легированном кремнии при облучении тепловыми нейтронами и возможности трансмутационного легирования кремния различными примесями.

На основании проведенных экспериментов и анализа полученных результатов по нейтронному облучению с последующим отжигом исследуемых образцов выявлены следующие особенности нейтронной трансмутации легированного кремния и кремниевых p-n-структур.

1. В кремнии, легированного быстро-диффундирующими примесями процессе трансмутации сопровождается не только превращением материнского изотопа в новый, но и превращением введенной примеси в другой изотоп. Последнее может существенно повлиять на свойства нейтронно трансмутационного материала, изменив свое первоначальное состояние в решетке (или микроструктуре) кремния с последующей миграцией по объему материала, которая в свою очередь может быть стимулирована радиацией. Этот процесс многостадийный и для выяснения его особенностей и механизмов требуется проведение комплексных исследований



легированных материалов с различными примесями в широкой области их концентраций.

2. Ввиду большого сечения поглощения над тепловых нейтронов изотопами легированных быстро-диффундирующих примесей (при достаточных их концентрациях), происходит дополнительное ядерное превращение с образованием нового изотопа донорной или акцепторной природы. Вклад их в общую электрически активную концентрацию может быть, сопоставим с концентрацией фосфора, образованного в результате ядерной трансмутации в объеме кремния.

Таблица

Основные реакции медленными нейтронами	с	Энергия электрона β-распада, МэВ	Период полураспада	Концентрация стабильного изотопа, см ⁻³
$^{30}_{14}\text{Si} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{31}_{14}\text{Si} \xrightarrow{\beta^-} {}^{31}_{15}\text{P}$		1,48	2,62 час.	$N_{\text{P}} = 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot \Phi$
$^{31}_{15}\text{P} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{32}_{15}\text{P} \xrightarrow{\beta^-} {}^{32}_{16}\text{S}$		1,707	14,5 дн.	$N_{\text{S}} = 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot \Phi$
$^{63}_{29}\text{Cu} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{63}_{29}\text{Cu} \xrightarrow{\beta^-} {}^{64}_{30}\text{Zn}$		0,573	12,88 час.	$N_{\text{Zn}} = 2,9 \cdot 10^{-6} \cdot \Phi$
$^{65}_{29}\text{Cu} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{66}_{29}\text{Cu} \xrightarrow{\beta^-} {}^{66}_{30}\text{Zn}$		2,63	5,1 мин.	$N_{\text{Zn}} = 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot \Phi$
$^{103}_{45}\text{Rh} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{104}_{45}\text{Rh} \xrightarrow{\beta^-} {}^{104}_{46}\text{Pd}$		2,44	42 с.	$N_{\text{Pd}} = 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot \Phi$
$^{107}_{47}\text{Ag} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{108}_{47}\text{Ag} \xrightarrow{\beta^-} {}^{108}_{48}\text{Gd}$		1,65	2,4 мин.	$N_{\text{Cd}} = 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot \Phi$
$^{109}_{47}\text{Ag} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{110}_{47}\text{Ag} \xrightarrow{\beta^-} {}^{110}_{48}\text{Gd}$		2,87	24,5 с.	$N_{\text{Cd}} = 2,7 \cdot 10^{-5} \cdot \Phi$
$^{114}_{48}\text{Cd} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{115}_{48}\text{Cd} \xrightarrow{\beta^-} {}^{115}_{49}\text{In}$		1,1	2,3 дн.	$N_{\text{Id}} = 9,5 \cdot 10^{-9} \cdot \Phi$
$^{121}_{51}\text{Sb} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{122}_{51}\text{Sb} \xrightarrow{\beta^-} {}^{122}_{52}\text{Te}$		1,97	2,7 дн.	$N_{\text{Te}} = 3,9 \cdot 10^{-5} \cdot \Phi$
$^{123}_{51}\text{Sb} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{124}_{51}\text{Sb} \xrightarrow{\beta^-} {}^{124}_{52}\text{Te}$		2,236	60,1 дн.	$N_{\text{Te}} = 1,0 \cdot 10^{-5} \cdot \Phi$
$^{191}_{77}\text{Ir} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{192}_{77}\text{Ir} \xrightarrow{\beta^-} {}^{192}_{78}\text{Pt}$		0,67	74,4 дн.	$N_{\text{Pt}} = 8,1 \cdot 10^{-6} \cdot \Phi$
$^{193}_{77}\text{Ir} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{194}_{77}\text{Ir} \xrightarrow{\beta^-} {}^{194}_{78}\text{Pt}$		2,236	19,7 час.	$N_{\text{Pt}} = 2,6 \cdot 10^{-6} \cdot \Phi$
$^{197}_{79}\text{Au} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{198}_{79}\text{Au} \xrightarrow{\beta^-} {}^{198}_{80}\text{Hg}$		0,96	2,7 дн.	$N_{\text{Hg}} = 9,6 \cdot 10^{-6} \cdot \Phi$

3. В кремниевых диффузионных и сплавных p-n-структурах в виду высокой концентрации фосфора, сурьмы и золота существенный вклад в изменение свойств и характеристик приборов вносят реакции образования



примесей серы, теллура и ртутя с соответствующими глубокими уровнями в сравнимых с основной примеси концентрациях.

4. В нейтронно трансмутационном легированном кремнии и кремниевых р-п-структурах обнаружены глубокие уровни, обусловленные радиационными дефектами, образующимися в результате β^- -излучения, испускающими нестабильными изотопами легированной примеси с определенным энергетическим спектром электронов.

Литература

1. Karimov M., Makhkamov Sh., Makhmudov Sh.A., Muminov R.A., Rakhmatov A.Z., Sulaimanov A.A., Tursunov N.A. Peculiarities of influence of radiation defects on photoconductivity of silicon irradiated by fast neutrons. (Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc., 2010) vol. 46 (4), pp. 298-300.

Peculiarities of influence of radiation defects on photoconductivity of silicon irradiated by fast neutrons. (Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc., 2010) vol. 46 (4), pp. 298-300.

2. Sh.A. Makhkamov, M.Yu. Tashmetov, Sh.A. Makhmudov, A.K. Rafikov, A.A. Sulaimonov. Диффузия атомов примеси родия в кремнии для датчиков // FRANCE international conference: "Scientific approach to the modern education system" Part 10, 5th December, - Pp. -95-98.y 2022

3. M. Yu. Tashmetov, Sh. A. Makhmudov, A. A. Sulaymonov, A. K. Rafikov, B. Zh. Abdurayimov. Photosensors Based on Neutron Doped Silicon // ISSN 0003-701X, Applied Solar Energy, 2019, Vol. 55, No. 1, pp. 71–73. © Allerton Press, Inc., 2019. Russian Text © The Author(s), 2019, published in Geliotekhnika, 2019, No. 1, pp. 83–85. DOI: 10.3103/S0003701X19010134

4. Sh Makhmudov, A Sulaymonov, A Rafikov, G Xudayberganova. Study of after diffusion regions in highly doped silicon // International scientific journal Science and Innovation, ISSN: 2181-3337, V-1, №6, October 9, 2022, - Pp. -402-404. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7178339>

5. Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н., Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А. Влияние быстрых нейтронов на электрофизические свойства ядерно-легированного кремния р-типа // Известия вузов, Физика. – Томск. 2011. – Вып. 5 – С. 75-78.



6. M Karimov, Sh Makhkamov, NA Tursunov, Sh A Makhmudov, AA Sulaimonov. "The effect of fast neutrons on the electrophysical properties of nuclear-doped p-silicon" // Russian Physics Journal 2011/10. vol 54. Pp589-593.

7. Сулаймонов.А.А. Разработка терморрадиационных датчиков на основе нейтронно-легированного монокристаллического кремния: дис.-кон.-физ.-тех. наук-Тошкент-2021

8. Патент на изобретение РУз № IAP 04796. Способ изготовления кремниевых терморезисторов / Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н. А., Махмудов Ш. А., Сулаймонов А.А. // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. - 29.11.2013.

9. Патент на изобретение РУз № IAP 05339. Способ измерения плотности потока нейтронов кремниевым детектором n-типа / Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н.А., Махмудов Ш.А., Саттиев А.Р., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К. // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. - 27.04.2017.

10. Зайнабидинов С.З. Физические основы образования глубоких уровней в кремнии. - Ташкент: Фан – 1984. – С. 160.

11. Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников / под ред. Дж. Миза; пер. с англ. под ред. В.Н.Мордковича. – М.: Мир, 1982. –С. 259.

