

---

---

# ФИЗИКА И ТЕХНИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

---

## SEMICONDUCTOR PHYSICS AND ENGINEERING

---

---

УДК 621.382:621.373.820

### ПРИМЕНЕНИЕ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ОТЖИГА ИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ СЛОЕВ В ПОЛИКРЕМНИИ

**В. М. АНИЩИК<sup>1)</sup>, В. А. ГОРУШКО<sup>2)</sup>, В. А. ПИЛИПЕНКО<sup>1)</sup>,  
В. В. ПОНАРЯДОВ<sup>1)</sup>, В. А. СОЛОДУХА<sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Государственный центр «Белмикроанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл»,  
ул. Казинца, 121А, 220108, г. Минск, Беларусь

<sup>3)</sup>ОАО «Интеграл», ул. Казинца, 121А, 220108, г. Минск, Беларусь

Рассмотрена возможность использования быстрой термической обработки для формирования ионно-легированных слоев в поликремнии. Показано, что применение быстрой термической обработки позволяет уменьшить перераспределение внедренной примеси, получить более полную ее электрическую активацию. Объяснен ускоренный процесс диффузии внедренной в поликремний примеси при использовании мощного светового потока.

**Ключевые слова:** быстрая термическая обработка; поликремний; ионно-легированный слой; поверхностное сопротивление.

---

#### Образец цитирования:

Анищик В. М., Горушко В. А., Пилипенко В. А., Понарядов В. В., Солодуха В. А. Применение быстрой термической обработки для отжига ионно-легированных слоев в поликремнии // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 2. С. 63–68.

#### For citation:

Anishchik V. M., Harushka V. A., Pilipenka U. A., Ponariadov V. V., Saladukha V. A. Application of the rapid thermal treatment for annealing the ion-doped layers of polysilicon. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 2. P. 63–68 (in Russ.).

---

#### Авторы:

**Виктор Михайлович Анищик** – доктор физико-математических наук, профессор; декан физического факультета.

**Валентина Алексеевна Горушко** – ведущий инженер.

**Владимир Александрович Пилипенко** – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук; профессор кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета.

**Владимир Васильевич Понарядов** – кандидат физико-математических наук, доцент; заместитель декана физического факультета.

**Виталий Александрович Солодуха** – кандидат технических наук; генеральный директор.

#### Authors:

**Victor Anishchik**, doctor of science (physics and mathematics), full professor; dean of the faculty of physics.

**Valiantsina Harushka**, leading engineer.

**Uladzimir Pilipenka**, corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus, doctor of science (technical); professor at the department of semiconductor physics and nano-electronics, faculty of physics.

*office@bms.by*

**Vladimir Ponariadov**, PhD (physics and mathematics), docent; deputy dean, faculty of physics.

*ponariadov@bsu.by*

**Vitali Saladukha**, PhD (technical); general director.

---

## APPLICATION OF THE RAPID THERMAL TREATMENT FOR ANNEALING THE ION-DOPED LAYERS OF POLYSILICON

V. M. ANISHCHIK<sup>a</sup>, V. A. HARUSHKA<sup>b</sup>, U. A. PILIPENKA<sup>a</sup>,  
V. V. PONARIADOV<sup>a</sup>, V. A. SALADUKHA<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Belarus

<sup>b</sup>«Belmikroanaliz» of the branch «Belmikrosistemy», JSC «Integral»,  
Kazintsa street, 121A, 220108, Minsk, Belarus

<sup>c</sup>JSC «Integral», Kazintsa street, 121A, 220108, Minsk, Belarus

Corresponding author: office@bms.by

The possibility to apply the rapid thermal treatment procedure for the formation of ion-doped layers in polycrystalline silicon is considered. It is demonstrated that such rapid thermal treatment allows one to reduce redistribution of the implanted admixture, to make its electric activation more complete. The accelerated diffusion process of the admixture implanted into polycrystalline silicon with the use of the intense light flux is consistently explained.

**Key words:** rapid thermal treatment; polycrystalline silicon; ion-doped layer; surface resistance.

Одной из важнейших задач микроэлектроники является разработка технологии быстродействующих сверхбольших интегральных схем высокой степени интеграции. Частично эта задача решается путем применения легированного поликристаллического кремния (ПКК), который используется для создания многоуровневой разводки, изготовления резисторов, затворов, пережигаемых переключателей в блоках резервирования [1, с. 66; 2]. Для активации внедренной в поликремний примеси требуются длительные высокотемпературные обработки, которые приводят к неконтролируемому диффузионному перераспределению внедренной примеси как в самом ПКК, так и в ранее сформированных ионно-легированных слоях кремния, загрязнению и деформации полупроводниковых пластин большого диаметра, отслаиванию пленок ПКК.

В последние годы большое внимание уделяется применению лазерного, электронного и импульсного оптического отжига для активации внедренной в ПКК примеси. Такое воздействие вызывает в обрабатываемом материале ряд физических процессов, протекающих как в жидкой, так и в твердой фазе, которые приводят к улучшению его структуры. Использование данных обработок снимает ограничения, наложенные длительными высокотемпературными процессами, и позволяет избежать перераспределения внедренной примеси, получить более полную ее активацию. Однако как лазерный, так и электронный отжиг имеют ряд недостатков, связанных с трудностями при обработке оптически неоднородных материалов и необходимостью применять сложные и дорогостоящие системы сканирования для обработки всей площади пластины. Более простым методом является использование для этих целей импульсного некогерентного излучения газоразрядных и галогенных ламп.

Цель настоящей работы – исследование влияния фотонной обработки импульсами секундной длительности на электрофизические параметры ионно-легированных слоев ПКК и диффузионные процессы, протекающие при такой обработке.

Для проведения данных исследований использовались образцы поликристаллических пленок кремния толщиной 0,3 мкм, полученные методом химического осаждения из газовой фазы при пониженном давлении и температуре 625 °С. В целях имитации формирования базы, эмиттера и инжектора осаждение проводилось на монокристаллические кремниевые пластины КЭФ-0,5. Далее, осуществлялось ионное легирование бором в режиме формирования базы (6,5 мкКл/см<sup>2</sup>, 100 кэВ), после чего часть образцов легировались бором в режиме формирования инжектора (50 мкКл/см<sup>2</sup>), а другая часть – фосфором в режиме формирования эмиттера (1000 мкКл/см<sup>2</sup>, 30 кэВ). После каждого процесса ионного легирования пластины проходили быструю термическую обработку (БТО) как миллисекундными (130 Дж/см<sup>2</sup>, 50 мс), так и секундными (35 Вт/см<sup>2</sup>, 6 и 8 с) импульсами. Для сравнения часть пластин подвергались длительной термообработке (ДТО) в стандартных режимах формирования базы, инжектора и эмиттера (900 °С, 20 мин; 900 °С, 60 мин; 1000 °С, 15 мин) соответственно. При проведении исследований использовались методы ИК-спектроскопии, четырехзондовый и косого шлифа с последующим декорированием.

Изучение электрофизических свойств ионно-легированных слоев в поликристаллическом кремнии после различных видов термообработки позволило установить, что значения величины его поверхностного сопротивления, замеренного четырехзондовым методом, после БТО и ДТО близки друг к другу (табл. 1). При этом наиболее низкие значения данного параметра для слоев, легированных

как бором, так и фосфором, имеют место после БТО импульсами длительностью 8 с. Анализ разброса величины поверхностного сопротивления по площади пластины показал, что после БТО и ДТО она идентична.

Таблица 1

**Значения поверхностного сопротивления легированного поликремния на кремнии после различных видов термообработок**

Table 1

**Surface resistance of doped polycrystalline silicon subjected to different types of thermal treatment**

Тип внедряемых ионов и режим их имплантации	Вид и режим термообработки	Величина поверхностного сопротивления, Ом · м	Разброс поверхностного сопротивления по площади пластины, %
В <sup>+</sup> Д* = 6,5 мкКл/см <sup>2</sup> Е** = 100 кэВ	ДТО – 900 °С, 20 мин, N <sub>2</sub>	2390	6
	БТО – 35 Вт/см <sup>2</sup> , 6 с	2640	7
	БТО – 35 Вт/см <sup>2</sup> , 8 с	2360	6
	БТО – 130 Дж/см <sup>2</sup> , 50 мс	2380	8
В <sup>+</sup> Д = 50 мкКл/см <sup>2</sup> Е = 20 кэВ	ДТО – 900 °С, 20 мин, N <sub>2</sub>	1320	3
	БТО – 35 Вт/см <sup>2</sup> , 6 с	1410	5
	БТО – 35 Вт/см <sup>2</sup> , 8 с	1260	3
	БТО – 130 Дж/см <sup>2</sup> , 50 мс	1350	5
Р <sup>+</sup> Д = 1000 мкКл/см <sup>2</sup> Е = 30 кэВ	ДТО – 900 °С, 20 мин, N <sub>2</sub>	41	3
	ДТО – 1000 °С, 15 мин, N <sub>2</sub>	30	4
	БТО – 35 Вт/см <sup>2</sup> , 6 с	66	5
	БТО – 35 Вт/см <sup>2</sup> , 8 с	37	4
	БТО – 130 Дж/см <sup>2</sup> , 50 мс	78	6

\*Доза легирования.

\*\*Энергия внедрения ионов примеси.

Исследования глубин залегания *p-n*-переходов методом косого шлифа и последующего декорирования для системы легированный поликремний – кремний показали (табл. 2), что минимальное перераспределение примеси имеет место при БТО импульсами миллисекундной длительности. Значения глубин после БТО импульсами секундной длительности занимают промежуточное положение между БТО импульсами миллисекундной длительности и ДТО как при температуре отжига 900 °С, так и при 1000 °С. Такое перераспределение нельзя объяснить на основе обычной теории диффузии, так как глубина залегания *p-n*-переходов после БТО должна быть значительно меньше, чем после длительной термообработки, поскольку время диффузии в первом случае на три порядка меньше.

Таблица 2

**Глубина залегания *p-n*-перехода в кремнии после различных режимов легирования и видов отжига системы поликремний – кремний**

Table 2

**The *p-n* junction depth in silicon after the use of different doping modes and annealing types for the system polycrystalline silicon – silicon**

Тип внедряемых ионов и режим их имплантации	Вид и режим термообработки	Глубина <i>p-n</i> -перехода в кремнии, мкм		
		<i>p</i> <sup>-</sup>	<i>p</i> <sup>+</sup>	<i>n</i> <sup>+</sup>
В <sup>+</sup> Д = 6,5 мкКл/см <sup>2</sup> Е = 100 кэВ	ДТО – 900 °С, 20 мин, N <sub>2</sub>	0,51	–	–
	БТО – 35 Вт/см <sup>2</sup> , 8 с	0,47	–	–
	БТО – 130 Дж/см <sup>2</sup> , 50 мс	0,40	–	–
В <sup>+</sup> Д = 50 мкКл/см <sup>2</sup> Е = 20 кэВ	ДТО – 900 °С, 20 мин, N <sub>2</sub>	0,51	0,18	–
	БТО – 35 Вт/см <sup>2</sup> , 8 с	0,45	0,14	–
	БТО – 130 Дж/см <sup>2</sup> , 50 мс	0,39	0,08	–
Р <sup>+</sup> Д = 1000 мкКл/см <sup>2</sup> Е = 30 кэВ	ДТО – 900 °С, 20 мин, N <sub>2</sub>	0,51	0,41	0,12
	ДТО – 1000 °С, 15 мин, N <sub>2</sub>	0,58	0,47	0,18
	БТО – 35 Вт/см <sup>2</sup> , 8 с	0,46	0,36	0,08
	БТО – 130 Дж/см <sup>2</sup> , 50 мс	0,40	0,30	–

Увеличение скорости диффузионных процессов в случае БТО, очевидно, связано с использованием светового потока. Рассмотрим его вклад в процесс ускоренной диффузии.

Перераспределение примеси в процессе нагрева описывается выражением

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = \bar{\nabla} \left( D_i \bar{\nabla} N_i + z_i \mu_i N_i \bar{E} \right), \quad (1)$$

где  $D_i$  – коэффициент диффузии  $i$ -й примеси;  $N_i$  – концентрация  $i$ -й примеси;  $\mu_i = \frac{D_i}{kT}$  – подвижность  $i$ -й примеси;  $z_i = 1$  для акцепторов;  $z_i = -1$  для доноров;  $\bar{E}$  – вектор напряженности электрического поля во время обработки ионно-легированного слоя.

Поскольку коэффициент диффузии в выражении (1) при БТО зависит от температуры, то изменение температуры пластины в процессе обработки учитывалось путем решения уравнения теплопроводности. Если предположить, что световой поток генерирует электронно-дырочные пары равномерно в области ионно-легированного слоя, то в ней возникает разность потенциалов.

Учитывая, что напряженность электрического поля ( $E$ ) во время такой обработки

$$E = -\bar{\nabla} \varphi = -kT (N_i)^{-1} \bar{\nabla} N_i,$$

то в случае доноров плотность диффузионного потока будет описываться выражением

$$D_d \bar{\nabla} N_d - \mu_d N_d E = D_d \bar{\nabla} N_d - D_d (kT)^{-1} N_d - kT (N_d)^{-1} \bar{\nabla} N_d = 2D_d \bar{\nabla} N_d. \quad (2)$$

Аналогично для акцепторов получаем

$$D_a \bar{\nabla} N_a + \mu_a N_a E = 2D_a \bar{\nabla} N_a. \quad (3)$$

Из выражений (2), (3) видно, что возникающее электрическое поле при импульсной фотонной обработке удваивает коэффициент диффузии примеси в ионно-легированных слоях поликремния и приводит к увеличению глубины залегания  $p$ - $n$ -перехода.

В целях исследования процесса перераспределения концентрации носителей заряда в структуре поликремний – монокремний анализировались профили распределения фосфора ( $D = 1000$  мкКл/см<sup>2</sup>;  $E = 30$  кэВ) после различных видов отжига путем послойного удаления поликремния анодным окислением и последующим измерением поверхностного сопротивления (рис. 1). Результаты анализа полностью подтверждают данные, полученные при измерении глубины залегания  $p$ - $n$ -переходов. Однако при БТО и ДТО наблюдается вытеснение введенной при ионном легировании примеси из ПКК в монокремний с накоплением ее на глубине 0,35–0,40 мкм от поверхности поликремния, где ее концентрация достигает значений  $(2,2-2,5)10^{20}$  см<sup>-3</sup>.

На этих же образцах методом ИК-спектроскопии на отражение проводилась количественная оценка максимальной концентрации носителей заряда ( $N_{\max}$ ), эффективной концентрации носителей заряда ( $N_{\text{opt}}$ ), подвижности носителей заряда  $\mu$ , значения волнового числа  $1/\lambda$ , соответствующего точке перегиба S-образной кривой отражения. Применение данного метода для определения электрофизических параметров неоднородно легированного по толщине слоя ПКК основано на том, что плазменная частота ( $\nu$ ) носителей заряда в однородном слое определяется выражением

$$\nu = N_{\text{opt}} e^2 (\epsilon_0 \epsilon_L m^*)^{-1}, \quad (4)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\epsilon_L$  – диэлектрическая проницаемость нелегированного кремния ( $\epsilon_L = 11,7$ );  $m^*$  – эффективная масса электрона ( $m^* = 0,26m_0$ ).

В пленках ПКК время релаксации импульса носителей заряда короткое (мала подвижность). При этом плазменный край на спектрах отражения сильно размыт и значение плазменной частоты не соответствует минимуму, а определяется точкой перегиба S-образной кривой отражения. Таким образом, из (4) можно вычислить эффективное значение концентрации носителей заряда.

Анализ спектров отражения (рис. 2) показывает, что концентрация и подвижность носителей заряда сходны у образцов после ДТО, а также БТО с длительностью импульса 8 с и резко отличаются у образцов после БТО с длительностью импульса 50 мс. В первом случае хорошо проявляется край плазменного отражения, а также четко выражен минимум. При этом эффективное значение концентрации максимально при БТО с длительностью импульса 8 с, так как спектр отражения данного образца находится в более коротковолновой области спектра. В случае применения БТО с длительностью импульса 50 мс спектр отражения сильно размыт, а минимум не проявляется. Это означает, что подвижность основных носителей заряда в образцах минимальна (табл. 3).

Анализ численных значений максимальной и эффективной концентраций носителей заряда (см. табл. 3) показывает, что наилучшее соответствие между этими величинами наблюдается после БТО импульсами секундной длительности. Это обусловлено тем, что при такой длительности импульса имеет место однородное распределение примеси по всей толщине пленки ПКК. Наихудшее соответствие между вышеуказанными величинами отмечается для пленок ПКК, прошедших БТО импульсами миллисекундной длительности, поскольку в этом случае наблюдается наиболее неоднородное распределение примеси по ее толщине.

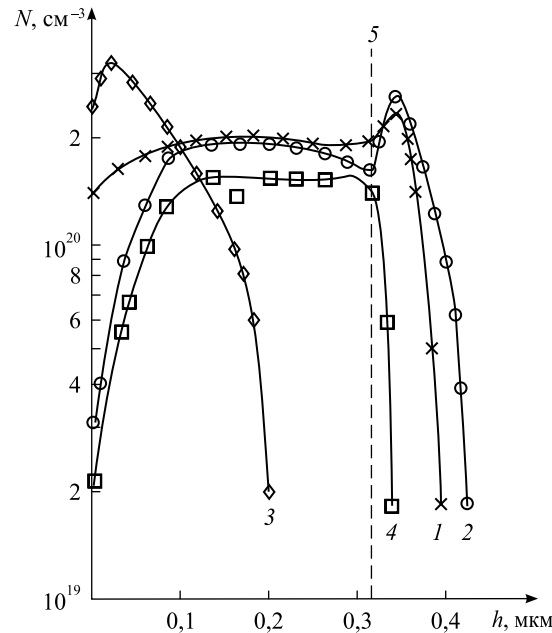


Рис. 1. Профили концентрации носителей заряда в структуре легированной фосфором ( $1000 \text{ мкКл/см}^2$ ,  $30 \text{ кэВ}$ ) пленки поликремний – монокристаллический кремний после ДТО и БТО:  
1 –  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , 60 мин; 2 –  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , 15 мин; 3 –  $130 \text{ Дж/см}^2$ , 50 мс;  
4 –  $35 \text{ Вт/см}^2$ , 8 с; 5 – граница раздела ПКК – монокремний

Fig. 1. The concentration profiles for the charge carriers in the structure of the polycrystalline silicon-monocrystalline silicon film doped with phosphorus ( $1000 \text{ }\mu\text{C/cm}^2$ ,  $30 \text{ keV}$ ) after prolonged and quick heat treatments:  
1 –  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , 60 min; 2 –  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , 15 min; 3 –  $130 \text{ J/cm}^2$ , 50 ms;  
4 –  $35 \text{ W/cm}^2$ , 8 s; 5 – boundary of polycrystalline silicon-monocrystalline silicon

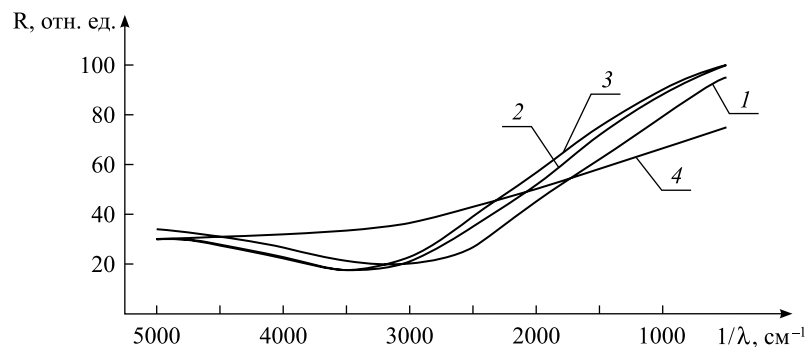


Рис. 2. Спектры отражения пленок поликремния (R), легированных фосфором ( $1000 \text{ мкКл/см}^2$ ,  $30 \text{ кэВ}$ ), на монокристаллическом кремнии после длительной и быстрой термообработок:  
1 –  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , 60 мин; 2 –  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , 15 мин; 3 –  $35 \text{ Вт/см}^2$ , 8 с; 4 –  $130 \text{ Дж/см}^2$ , 50 мс

Fig. 2. Reflection spectra of the phosphorus-doped polycrystalline silicon films ( $1000 \text{ }\mu\text{C/cm}^2$ ,  $30 \text{ keV}$ ) on monocrystalline silicon after prolonged and quick heat treatments:  
1 –  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , 60 min; 2 –  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , 15 min; 3 –  $35 \text{ W/cm}^2$ , 8 s; 4 –  $130 \text{ J/cm}^2$ , 50 ms

Электрофизические параметры легированной пленки ПКК  
на кремнии после различных видов отжига

Table 3

Electrophysical parameters of the doped polycrystalline silicon film  
on silicon after the use of different annealing types

Вид и режим отжига	$N_{\max}$ , $\text{см}^{-3}$	$\mu$ , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	Глубина $p$ - $n$ -перехода, мкм	$1/\lambda$ , $\text{см}^{-1}$	$N_{\text{opt}}$ , $\text{см}^{-3}$
ДТО – 900 °С, 60 мин	$1,7 \cdot 10^{20}$	17	0,4	2125	$1,5 \cdot 10^{20}$
ДТО – 1000 °С, 15 мин	$1,9 \cdot 10^{20}$	31	0,45	2375	$1,8 \cdot 10^{20}$
БТО – 35 Вт/см <sup>2</sup> , 8 с	$2,1 \cdot 10^{20}$	28	0,35	2500	$2,1 \cdot 10^{20}$
БТО – 130 Дж/см <sup>2</sup> , 50 мс	$3,3 \cdot 10^{20}$	15	0,20	2750	$2,5 \cdot 10^{20}$

Таким образом, БТО ионно-легированных слоев в поликристаллическом кремнии в режиме теплового баланса импульсами секундной длительности обеспечивает максимальный коэффициент электрической активации примеси при минимальных величинах ее перераспределения и подвижности основных носителей заряда. При этом имеет место ускоренная диффузия примеси, обусловленная возникновением электрического поля под воздействием фотонного потока.

### Библиографические ссылки

1. Турцевич А. С., Ануфриев Л. П. Пленки поликристаллического кремния в технологии производства интегральных схем и полупроводниковых приборов. Минск, 2006.
2. Vogler D., Doe P. ALD Special Report: Where's the metal? // *Solid State Technol.* 2003. № 1. P. 35–40.

### References

1. Turtsevich A. S., Anufriev L. P. [Polycrystalline Silicon Films in the Production Technology of Integrated Circuits and Semiconductor Devices]. Minsk, 2006.
2. Vogler D., Doe P. ALD Special Report: Where's the metal? *Solid State Technol.* 2003. No. 1. P. 35–40.

Статья поступила в редколлегию 27.12.2016.  
Received by editorial board 27.12.2016.