Физика конденсированного состояния

Condensed state physics

УДК 620.191:621.373.820

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСИ В ИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ СЛОЯХ ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

***В. М. АНИЩИК*[1)], *В. А. ГОРУШКО*[2)], *В. А. ПИЛИПЕНКО*[1)], *В. В. ПОНАРЯДОВ*[1)], *В. А. СОЛОДУХА*[3)]**

[1)]*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь*
[2)]*Государственный центр «Белмикроанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл», ул. Казинца, 121А, 220108, г. Минск, Беларусь*
[3)]*ОАО «Интеграл», ул. Казинца, 121А, 220108, г. Минск, Беларусь*

Введение. Приведены результаты исследования влияния быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика на поверхностное сопротивление и глубину залегания ранее сформированных ионно-легированных слоев.

Образец цитирования:
Анищик ВМ, Горушко ВА, Пилипенко ВА, Понарядов ВВ, Солодуха ВА. Перераспределение примеси в ионно-легированных слоях при быстрой термообработке подзатворного диэлектрика. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2019;2:48–53.
https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-2-48-53

For citation:
Anishchik VM, Harushka VA, Pilipenka UA, Ponariadov VV, Saladukha VA. Redistribution of impurity in ion-doped layers during fast heat treatment of gate dielectric. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2019;2:48–53. Russian.
https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-2-48-53

Авторы:
Виктор Михайлович Анищик – доктор физико-математических наук; профессор кафедры физики твердого тела физического факультета.
Валентина Алексеевна Горушко – ведущий инженер.
Владимир Александрович Пилипенко – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук; профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета.
Владимир Васильевич Понарядов – кандидат физико-математических наук, доцент; заместитель декана физического факультета.
Виталий Александрович Солодуха – кандидат технических наук; генеральный директор.

Authors:
Victor M. Anishchik, doctor of science (physics and mathematics); professor at the department of solid-state physics, faculty of physics.
anishchik@bsu.by
Valiantsina A. Harushka, leading engineer.
office@bms.by
Uladzimir A. Pilipenka, corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus, doctor of science (engineering); professor at the department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics.
office@bms.by
Vladimir V. Ponariadov, PhD (physics and mathematics), docent; deputy dean of the faculty of physics.
ponariadov@bsu.by
Vitali A. Saladukha, PhD (engineering); general director.
vsaladukha@integral.by

Методика эксперимента. На кремниевых пластинах различного типа проводимости формировался подзатворный диэлектрик толщиной 42,5 нм и проводилось легирование кремния ионами бора и фосфора с последующим отжигом в диффузионной печи при температуре 1150 °С в течение 90–270 мин в среде азота. Далее часть пластин подвергалась быстрой термической обработке путем облучения их нерабочей стороны некогерентным световым потоком в естественных атмосферных условиях в течение 7 с при температуре 1100 °С.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Установлено, что данная обработка подзатворного диэлектрика, полученного путем пирогенного окисления кремния, приводит к уменьшению величины поверхностного сопротивления ранее сформированных ионно-легированных слоев на 1–2 % и увеличению глубины залегания введенной примеси на 0,05 мкм для фосфора и на 0,02 мкм для бора.

Заключение. Уменьшение величины поверхностного сопротивления связано с электрической доактивацией введенной примеси в процессе быстрой термической обработки, а увеличение глубины ее залегания – с удвоением коэффициента диффузии, обусловленным электрическим полем, возникающим под воздействием фотонного потока.

Ключевые слова: ионно-легированные слои; быстрая термическая обработка; поверхностное сопротивление; коэффициент диффузии.

REDISTRIBUTION OF IMPURITY IN ION-DOPED LAYERS DURING FAST HEAT TREATMENT OF GATE DIELECTRIC

V. M. ANISHCHIK [a], ***V. A. HARUSHKA*** [b], ***U. A. PILIPENKA*** [a], ***V. V. PONARIADOV*** [a], ***V. A. SALADUKHA*** [c]

[a] *Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*
[b] *«Belmikroanaliz» of the branch «Belmikrosistemy», JSC «Integral», 121A Kazinca Street, Minsk 220108, Belarus*
[c] *JSC «Integral», 121A Kazinca Street, Minsk 220108, Belarus*
Corresponding author: V. V. Ponariadov (ponariadov@bsu.by)

Introduction. The investigation results are shown about influence of the rapid thermal treatment of the gate dielectric for the surface resistance and the location depth of the previously formed ion-doped layers.

Experimental methods. On the silicon wafers of the different type of conductivity a gate dielectric was formed with the thickness of 42.5 nm and silicon was doped with the boron and phosphorus ions with the subsequent annealing in the diffusion oven at the temperature of 1150 °C during 90–270 min in the nitrogen medium. Further, some wafers were subjected to the rapid thermal treatment by means of irradiation of the non-working side with the non-coherent light beam under the natural atmospheric conditions during 7 s at the temperature of 1100 °C.

Experimental results and discussion. It was determined, that the given treatment of the gate dielectric, obtained by means of the silicon pyrogenic oxidation, results in reduction of the surface resistance value of the previously formed ion-doped layers by 1–2 % and in increase of the bulk depth of the introduced admixture for 0.05 μm for phosphorus and for 0.02 μm for boron.

Conclusion. It was demonstrated, that reduction of the surface resistance value is in correlation with the electric preactivation of the introduced admixture in the rapid thermal treatment, and increase of its bulk depth – with the doubled value of the diffusion ratio, determined by the electric field, occurring under influence of the photon stream.

Keywords: ion-doped layer; fast heat treatment; surface resistance; diffusion factor.

Введение

Основное место в технологическом процессе изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем занимает термическая обработка [1–4]. При современном уровне интеграции, когда с уменьшением топологических размеров элементов уменьшается толщина всех пассивных и активных слоев, а также глубина залегания p – n-переходов, все большее значение приобретает снижение тепловой нагрузки, оказываемой на полупроводниковую пластину в процессе формирования на ней полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Это требует применения технологических

процессов, уменьшающих отрицательное воздействие высоких температур на параметры изготавливаемых изделий электронной техники. Одним из таких процессов является быстрый термический отжиг некогерентным световым излучением секундной длительности, который в последнее время находит широкое применение в электронной промышленности. В отличие от термического отжига он существенно уменьшает время температурной нагрузки, что не позволяет развиваться трудноконтролируемым диффузионным процессам, приводящим к нежелательным изменениям в характеристиках структуры [5–7]. В [8] показано улучшение свойств подзатворного диэлектрика при использовании данной обработки, однако не исследовано ее воздействие на ранее сформированные ионно-легированные слои.

Цель работы – изучение влияния быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика на перераспределение примеси в ранее сформированных ионно-легированных слоях.

Методика эксперимента

Для изучения влияния быстрой термической обработки на параметры ранее сформированных ионно-легированных слоев использовалось два подхода по созданию *p*- и *n*-канального МОП-транзистора. На эпитаксиальных структурах 18КДБ-6,0/КДБ-0,005 и 28КЭФ-5,5/КЭМ-0,01 ориентации <100> путем их пирогенного окисления при 850 °С формировался подзатворный диэлектрик толщиной 42,5 нм. Затем на пластинах КЭМ-0,01 проводилось ионное легирование бором дозой 85 мкКл/см^2 и энергией 60 кэВ с последующим отжигом при 1150 °С в течение 270 мин, а на пластинах КДБ-0,005 – легирование фосфором дозой 3 мКл/см^2 и энергией 75 кэВ с последующим отжигом при 1150 °С в течение 90 мин в среде азота. Далее на части пластин, легированных как бором, так и фосфором, проводилась быстрая термическая обработка путем облучения нерабочей стороны пластины некогерентным световым потоком в естественных атмосферных условиях при температуре 1100 °С в течение 7 с.

Поверхностное сопротивление R_s, характеризующее объемное (интегральное) сопротивление, приходящееся на квадрат поверхности, находили с помощью четырехзондовой установки RS-30. Через два токовых зонда пропускался ток 100 мА, а на двух потенциальных зондах определялась величина падения напряжения. Погрешность измерений при доверительной вероятности 0,997 составляла ±4 %.

Глубины залегания *p* – *n*-переходов исследовали методом косого шлифа с последующим его декорированием и проведением измерений на интерференционном микроскопе МИИ-4 [9; 10].

Результаты эксперимента и их обсуждение

В итоге проведенных исследований установлено, что быстрая термическая обработка подзатворного диэлектрика приводит к уменьшению величины поверхностного сопротивления ранее сформированных ионно-легированных слоев (см. таблицу). Это означает, что в результате отжига происходит электрическая доактивация внедренной примеси. При этом глубина залегания *p* – *n*-перехода незначительно увеличивается. Такое поведение внедренной примеси за столь малое время (при быстрой термообработке) невозможно объяснить только ускоренной диффузией по вакансиям и междоузлиям. В связи с этим следует рассмотреть вклад в данный процесс мощного светового потока.

Параметры ионно-легированных слоев после различных видов обработки

Parameters of the ion-doped layers after different types of treatment

Тип и режимы внедрения ионов	Термообработка		Поверхностное сопротивление, Ом/□	Глубина *p* – *n*-перехода, мкм
	Вид	Режим		
B^+ Д = 85 мкКл/см^2 *E* = 60 кэВ	Длительная	1150 °С, 270 мин	92,8	2,10
	Быстрая	1100 °С, 7 с	90,9	2,12
P^+ Д = 3 мКл/см^2 *E* = 75 кэВ	Длительная	1150 °С, 90 мин в среде азота	352,9	4,60
	Быстрая	1100 °С, 7 с	348,6	4,65

Примечание. Д и *E* – доза и энергия легирования соответственно.

Перераспределение примеси в процессе нагрева описывается уравнением

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

где N_i – концентрация *i*-й примеси; D_i – коэффициент диффузии *i*-й примеси;

$$z_i = \begin{cases} 1 \text{ для акцепторов,} \\ -1 \text{ для доноров;} \end{cases}$$

$\mu_i = \dfrac{D_i}{kT}$ – подвижность i-й примеси; $\bar{E}$ – вектор напряженности электрического поля во время обработки ионно-легированного слоя.

При быстрой термообработке коэффициент диффузии в выражении (1) зависит от температуры, поэтому его изменение 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 φ. Учитывая, что во время такой обработки напряженность электрического поля

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

то в случае доноров плотность диффузионного потока можно описать выражением

$$D_д\bar{\nabla}N_д - \mu_д N_д E = D_д\bar{\nabla}N_д - D_д\left(kT\right)^{-1}N_д - kT\left(N_д\right)^{-1}\bar{\nabla}N_д = 2D_д\bar{\nabla}N_д. \quad (2)$$

Аналогично для акцепторов получим

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

Из (2) и (3) видно, что совместная диффузия носителей заряда и примеси приводит к появлению электрического поля, которое удваивает коэффициент диффузии примеси в ионно-легированных слоях кремния и обусловливает увеличение глубины залегания p – n-перехода. В случае традиционного отжига ионно-легированных слоев такое удвоение коэффициента диффузии имеет место в первоначальный момент отжига, поскольку в силу высокой подвижности носителей заряда они быстро рассасываются, и в дальнейшем происходит диффузия только внедренной примеси. При быстрой термообработке идет постоянное «подкачивание» электронов и дырок световым потоком, вызывая ускоренный процесс диффузии (в отличие от длительной термообработки).

Приведенные выше данные о глубине залегания p – n-перехода после быстрой термообработки подзатворного диэлектрика свидетельствуют о том, что в случае фосфора она увеличилась на 0,05 мкм, а в случае бора – на 0,02 мкм. Для объяснения этого проведем расчет перераспределения примеси при быстрой термообработке ионно-легированных слоев путем решения уравнения (1) с учетом (2), (3) и условия нестационарности нагрева кремниевых пластин.

В качестве начального распределения примесей, которыми являются бор и фосфор, после ионного легирования бралось общепринятое гауссово распределение

$$N\left(x\right) = D\exp\left(-\frac{x - R_p}{\sqrt{2}\Delta R_p}\right)\left(\sqrt{2\pi}\Delta R_p \operatorname{erfc}\left(-\frac{R_p}{\sqrt{2}\Delta R_p}\right)\right)^{-1},$$

где $D = \int_0^\infty N\left(x\right)dx$ – полная доза легирования; R_p и ΔR_p – нормальная длина пробега ионов и его дисперсия.

Поскольку легирование бора и фосфора в нашем случае осуществлялось в эпитаксиальную пленку, расположенную над высоколегированными областями кремния, то при расчете учитывалось наличие такого высоколегированного скрытого слоя, распределение которого задавалось экспериментально полученным выражением

$$N_0\left(x\right) = \frac{N_{\max}}{1 + \exp\left(-\left(x - h\right)/a\right)},$$

где $N_{\max} = 5 \cdot 10^{18}$ см$^{-2}$ – максимальная поверхностная концентрация примеси в скрытом высоколегированном n^+-слое; h – толщина эпитаксиальной пленки, мкм; a – параметр, характеризующий крутизну переходной области эпитаксиальная пленка – скрытый n^+-слой (a = 0,07 мкм для хлоридно-гидридной эпитаксии).

Аналитическое решение для (1) находили с использованием функции Грина. По определению она удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial G\left(x - x', t\right)}{\partial t} = \check{D}\left(t\right)\frac{\partial^2 G\left(x - x', t\right)}{\partial x^2} + \delta\left(x - x'\right), \quad (4)$$

где $\check{D}(t)$ – коэффициент диффузии примеси:

$$\check{D}(t)=\begin{cases} D\left(T(t)\right) & \text{при длительной термообработке,} \\ 2D\left(T(t)\right) & \text{при быстрой термообработке;} \end{cases}$$

$\delta(x-x')$ – дельта-функция Дирака.

Поскольку решение уравнения (4) при условии отсутствия утечки через поверхность есть

$$G(x-x',\,t)=\frac{1}{\sqrt{4\pi D_t}}\left(\exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4D_t}\right)+\exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4D_t}\right)\right), \tag{5}$$

где $D_t=\int D(t)\,dt$, то после быстрой термообработки распределение примеси определяется выражением

$$N_1(x)=\int G(x-x',\,t_1)\,N_0(x')\,dx'. \tag{6}$$

После *m*-й операции быстрой термообработки равенство (6) примет вид

$$N_m(x)=\int G(x-x_m,\,t_m)\,N_{0m-1}(x_m)\,dx_m. \tag{7}$$

Используя соотношения (5) и (7), прямым интегрированием получаем окончательное распределение примеси после разных видов и режимов обработок:

$$N(x)=D\left(\sqrt{2\pi\left(2D^*+\Delta R_p^2\right)}\,\operatorname{erfc}\left(-R_p\left(\sqrt{2}\Delta R_p\right)^{-1}\right)\right)^{-1}\times$$

$$\times\sum_{i=\pm}\exp\left(-\left(x-iR_p\right)^2\left(4D^*+2\Delta R_p^2\right)^{-1}\right)\operatorname{erfc}\left(-\tau_i\right),$$

где $\tau_\pm=\left(\pm x\sqrt{\Delta R_p^2\left(2D^*\right)^{-1}}+R_p\sqrt{2D^*\left(\Delta R_p^2\right)^{-1}}\right)\left(4D^*+2\Delta R_p^2\right)^{-1/2}$; $D^*=\sum_{i=1}^{m}\int_0^{t_i}\check{D}\left(T(t)\right)dt$, $t_i=\tau_i+\tau_i'$ – полное время одной *i*-й обработки; τ_i' – время остывания пластины кремния после *i*-го процесса быстрой термической обработки.

Данные расчеты показали, что за один процесс быстрой термообработки в случае бора происходит его перераспределение на величину 0,02 мкм, а фосфора – на 0,045 мкм, что полностью соответствует приведенным выше результатам.

Заключение

Быстрая термическая обработка подзатворного диэлектрика, полученного путем пирогенного окисления кремния, приводит к уменьшению величины поверхностного сопротивления ранее сформированных ионно-легированных слоев на 1–2 % за счет электрической доактивации введенной примеси. При этом имеет место увеличение глубины ее залегания на 0,05 мкм для фосфора и 0,02 мкм для бора за счет удвоения коэффициента их диффузии, обусловленного электрическим полем, возникающим под воздействием фотонного потока.

Библиографические ссылки

1. Мазель ЕЗ, Пресс ФП. *Планарная технология кремниевых приборов.* Москва: Энергия; 1974.
2. *Технология СБИС. Книга 1, 2.* Зи СМ, редактор. Москва: Мир; 1986.
3. Зи СМ. *Физика полупроводниковых приборов. Том 1.* Сурис РА, редактор. Москва: Мир; 1984. 456 с.
4. Достанко АП. *Технология интегральных схем.* Минск: Вышэйшая школа; 1982.
5. Красников ГЯ. *Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов.* Москва: Техносфера; 2002.
6. Двуреченский АВ, Качурин ГА, Нидаев ЕВ, Смирнов ЛС. *Импульсный отжиг полупроводниковых материалов.* Москва: Наука; 1982.
7. Пилипенко ВА. *Быстрые термообработки в технологии СБИС.* Минск: Издательский центр БГУ; 2004.
8. Солодуха ВА, Пилипенко ВА, Горушко ВА. Влияние быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика на параметры мощных полевых MOSFET транзисторов. *Доклады БГУИР.* 2018;5(115):99–103.
9. Емельянов ВА, Баранов ВВ, Буйко ЛД, Петлицкая ТВ. *Методы контроля параметров твердотельных структур СБИС.* Минск: Бестпринт; 1998.
10. Буйко ЛД, Гойденко ПП, Пилипенко ВА, Ухов ВА. Измерение угла косого шлифа с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4. *Электронная техника. Серия 8.* 1974;6:83–85.

References

1. Mazel EZ, Press FP. *Planarnaya tekhnologiya kremnievykh priborov* [Planar technology of silicon devices]. Moscow: Energiya; 1974. Russian.

2. *VLSI technology.* Sze SM, editor. New York: McGraw-Hill; 1983. 654 p.
Russian edition: *Tekhnologiya SBIS. Kniga 1, 2.* Zi SM, editor. Moscow: Mir, 1986.

3. Sze SM. *Physics of semiconductor devices. Volume 1.* New York: John Wiley and Sons; 1981. 878 p.
Russian edition: Zi SM. *Fizika poluprovodnikovykh priborov. Kniga 1.* Suris RA, editor. Moscow: Mir, 1984. 456 p.

4. Dostanko AP. *Tekhnologiya integral'nykh skhem* [Technology of integrated circuits]. Minsk: Vysheishaya shkola; 1982. Russian.

5. Krasnikov GYa. *Konstruktivno-tekhnologicheskie osobennosti submikronnykh MOP-tranzistorov* [Design and technological characteristics of submicron MOS transistors]. Moscow: Tekhnosfera; 2002. Russian.

6. Dvurechensky AV, Kachurin GA, Nidaev EV, Smirnov LS. *Impul'snyi otzhig poluprovodnikovykh materialov* [Pulsed annealing of semiconductor materials]. Moscow: Nauka; 1982. Russian.

7. Pilipenko VA. *Bystrye termoobrabotki v tekhnologii SBIS* [Fast heat treatments in VLSI technology]. Minsk: Publishing Center of Belarusian State University; 2004. Russian.

8. Solodukha VA, Pilipenko VA, Gorushko VA. Influence of rapid thermal treatment of the gate dielectric on the parameters of power field MOSFET transistors. *Doklady BGUIR.* 2018;5(115):99–103. Russian.

9. Emelyanov VA, Baranov VV, Buiko LD, Petlitskaya TV. *Metody kontrolya parametrov tverdotel'nykh struktur SBIS* [Methods for monitoring the parameters of solid-state VLSI structures]. Minsk: Bestprint; 1998. Russian.

10. Buiko LD, Goydenko PP, Pilipenko VA, Ukhov VA. [Angle lap measurement using an MII-4 interference microscope]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 8.* 1974;6:83–85. Russian.

Статья поступила в редколлегию 14.01.2019.
Received by editorial board 14.01.2019.