

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-142-150

## Структура планарной поверхности кремниевых пластин до и после быстрой термообработки

В.А. Пилипенко<sup>1</sup>, А.А. Сергейчик<sup>1</sup>, Д.В. Шестовский<sup>1</sup>, В.А. Солодуха<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,  
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь

<sup>2</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси,  
Логойский тракт, 22, г. Минск 220113, Беларусь

Поступила 27.02.2024

Принята к печати 20.05.2024

На сегодня важной задачей при создании современных изделий микроэлектроники является устранение на поверхности пластин механически нарушенного слоя. Быстрая термообработка оптическими импульсами секундной длительности является одним из методов устранения нарушений кристаллической решётки, возникающих после ионного легирования. Однако, остался открытым вопрос восстановления кристаллической структуры поверхностного механически нарушенного слоя на планарной стороне пластины. Проведение данных исследований методами просвечивающей электронной микроскопии, анализа кривых дифракционного отражения и электронной Оже-спектроскопии не позволило получить достоверную информацию о состоянии кристаллической решётки в поверхностном слое толщиной менее 30 нм, который является ответственным за структурное совершенство подзатворных диэлектриков толщиной менее 75 нм. Это, в свою очередь, не позволяло предложить модель твердофазной рекристаллизации и дать её математическое описание. Целями работы являлись: – установление методом дифракции обратно отражённых электронов от поверхности исходных кремниевых пластин состояния кристаллической решётки кремния в поверхностном слое толщиной менее 30 нм до и после быстрой термообработки; – проведение анализа элементного состава загрязнения поверхности исходного кремния до и после быстрой термообработки; – разработка модели твердофазной рекристаллизации поверхностного нарушенного слоя после быстрой термической обработки и её математическое описание. Приведены картины дифракции обратно отражённых электронов от поверхностного слоя исходных кремниевых пластин толщиной менее 30 нм до и после быстрой термообработки, а также результаты очистки планарной поверхности исходных кремниевых пластин от загрязняющих примесей. Предложены процессы, уменьшающие энергию активации процесса рекристаллизации механически нарушенного поверхностного слоя кремния и дано его математическое описание. Определены параметры быстрой термообработки, обеспечивающие минимизацию воздействия температуры на кремниевую пластину для рекристаллизации механически нарушенного слоя на её планарной поверхности.

**Ключевые слова:** быстрая термическая обработка, нарушенный слой, кремниевая пластина, твердофазная рекристаллизация, деформационный потенциал

**Адрес для переписки:**

Сергейчик А.А.  
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга  
«ИНТЕГРАЛ»,  
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь  
e-mail: anna.omelchenko.13177@mail.ru

**Address for correspondence:**

Sergeichik A.A.  
JSC «Integral» – «Integral» Holding Management Company,  
Kazincin str., 121A, Minsk 220108, Belarus  
e-mail: anna.omelchenko.13177@mail.ru

**Для цитирования:**

В.А. Пилипенко, А.А. Сергейчик, Д.В. Шестовский, В.А. Солодуха.  
Структура планарной поверхности кремниевых пластин  
до и после быстрой термообработки.  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 2. С. 142–150.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-142-150

**For citation:**

Pilipenko UA, Sergeichik AA, Shestovski DV, Solodukha VA.  
Structure of Silicon Wafers Planar Surface before and after Rapid  
Thermal Treatment.  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(2):142–150. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-142-150

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-142-150

# Structure of Silicon Wafers Planar Surface before and after Rapid Thermal Treatment

U.A. Pilipenko<sup>1</sup>, A.A. Sergeichik<sup>1</sup>, D.V. Shestovski<sup>1</sup>, V.A. Solodukha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC «Integral» – «Integral» Holding Management Company,  
Kazinka str., 121A, Minsk 220108, Belarus

<sup>2</sup>SSPC «Optics, optoelectronics and laser equipment» National Academy of Sciences,  
Logoiskiy trakt, 22, Minsk 220113, Belarus

Received 27.02.2024

Accepted for publication 20.05.2024

## Abstract

Presently it is important to remove mechanically disturbed layer on wafer surface during creation of up-to-date microelectronic products. Rapid thermal treatment with optical pulses of second duration is one of the applicable methods for removing disturbances in crystal lattice emerging after ion implantation. However the crystal structure of mechanically disturbed layer on wafer planar side is still unclear. Researches by transmission electronic method, analysis of diffraction reflection curve and electronic Auger spectroscopy has failed to provide reliable data about the state of crystal lattice in surface layer of at least 30 nm thickness. Hence it was impossible to suggest a model of solid phase recrystallization and to present its mathematical description. The goals of the work were as follows: – identification of silicon crystal lattice state in surface layer of 30 nm thickness before and after rapid thermal treatment by backward reflected electrons diffraction method using raw Si wafers surface; – analysis of contamination element composition on the surface of raw silicon before and after rapid thermal treatment; – model development for solid phase recrystallization of surface disturbed layer after rapid thermal treatment and its mathematical description. Images of back ward reflected electrons diffraction using surface layer of raw silicon wafers' of 30 nm thickness and also the results of the planar surface of raw silicon wafers' cleaning from impurities are provided. Processes reducing the activating energy of mechanically disturbed silicon layer recrystallization process were suggested and its mathematical description was provided. Parameters of rapid thermal treatment mitigating the thermal impact on silicon wafer for recrystallization of mechanically disturbed layer on its planar surface were defined.

**Keywords:** rapid thermal treatment, disrupted layer, silicon wafer, solid phase recrystallization, deformation potential

---

### Адрес для переписки:

Сергейчик А.А.  
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга  
«ИНТЕГРАЛ»,  
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь  
e-mail: anna.omelchenko.13177@mail.ru

### Address for correspondence:

Sergeichik A.A.  
JSC «Integral» – «Integral» Holding Management Company,  
Kazinka str., 121A, Minsk 220108, Belarus  
e-mail: anna.omelchenko.13177@mail.ru

---

### Для цитирования:

В.А. Пилипенко, А.А. Сергейчик, Д.В. Шестовский, В.А. Солодуха.  
Структура планарной поверхности кремниевых пластин до и после быстрой термообработки.  
Приборы и методы измерений.  
2024. Т. 15. № 2. С. 142–150.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-142-150

### For citation:

Pilipenko UA, Sergeichik AA, Shestovski DV, Solodukha VA.  
Structure of Silicon Wafers Planar Surface before and after Rapid Thermal Treatment.  
Devices and Methods of Measurements.  
2024;15(2):142–150. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-142-150

## Введение

Важным условием создания надёжных изделий микроэлектроники является отсутствие на поверхности пластин механически нарушенного слоя и каких-либо загрязнений [1]. После финишной полировки поверхности на ней остаётся тонкий нарушенный слой, характеризующийся микроскажениями кристаллической решётки и остаточными механическими напряжениями. Наличие такого слоя при высокотемпературной обработке пластин, имеющей место при термическом окислении, отжиге ионно-легированных слоёв, эпитаксии, приводит к образованию дислокаций и повышению роста других дефектов. Качество подготовки поверхности оказывает большое влияние на формирование тонких (менее 0,1 мкм) диэлектрических слоев, т.к. в данном случае влияние дефектов поверхности на их параметры значительно увеличивается [2].

В связи с этим большое значение приобретают методы устранения механически нарушенного слоя на планарной поверхности кремниевых пластин. В настоящее время известно два наиболее приемлемых метода решения данной задачи. Первый метод предполагает проведение рекристаллизации нарушенного слоя с применением импульсного фотонного излучения наносекундной длительности [3], второй – с применением импульсного излучения галогенных ламп секундной длительности [4, 5]. В первом случае имеет место жидкофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя кремния, во втором – твердофазная.

В случае твердофазной рекристаллизации остаётся открытым вопрос: насколько происходит восстановление кристаллической структуры поверхностного слоя менее 30 нм на планарной стороне кремниевой пластины, который имеет очень важное значение для качества подзатворных диэлектриков толщиной менее 75 нм. Методы просвечивающей электронной микроскопии, анализа кривых дифракционного отражения и электронной Оже-спектроскопии до сих пор не позволили получить достоверную информацию о состоянии кристаллической решётки в поверхностном слое кремния менее 30 нм [3].

При этом, если модель жидкофазной рекристаллизации хорошо описана в [6], то о

модели твердофазной рекристаллизации и её аналитическом описании данные в литературе практически отсутствуют. Поскольку процесс твердофазной рекристаллизации более предпочтителен для серийного производства из-за простоты используемого оборудования и его производительности, то описание модели его протекания, обеспечивающей возможность управления этим процессом, является актуальной задачей в области микроэлектроники.

## Методика эксперимента

В качестве образцов для исследования использовались пластины кремния легированные бором (КДБ 10) ориентации  $\langle 111 \rangle$  диаметром 100 мм после химико-механической полировки. Часть пластин проходила быструю термообработку (БТО) в естественных атмосферных условиях путём облучения с планарной стороны пластины некогерентным оптическим излучением в течение 7 с, обеспечивая нагрев пластин до температуры 1100 °С.

Для получения картины дифракции обратно отражённых электронов от поверхности исходного кремния и после БТО использовался растровый электронный микроскоп Versa 3D (ф. FEI, Нидерланды) со встроенной системой энергодисперсионного анализа (EDX) и дифракцией обратно отражённых электронов (ф. EDAX, Нидерланды). Для получения анализа элементного состава загрязнения поверхности исходного кремния и после БТО применялся вторично-ионный масс-спектрометр TOF.SIMS 5 (ф. IONTOF, Германия).

Для описания предполагаемой модели рекристаллизации механически нарушенного слоя на планарной поверхности кремниевых пластин путём её БТО с применением импульсных фотонных потоков длительностью  $\approx 7$  с, обеспечивающей нагрев пластины до 1100 °С, использовались экспериментальные результаты, изложенные в работах [8, 9].

## Результаты и их обсуждение

Электронно-микроскопические исследования для получения картины дифракции обратно отражённых электронов от поверхности исходных кремниевых пластин до и после БТО показали, что после проведения БТО имеют место значительные изменения в структуре

поверхностного слоя на планарной стороне пластины. Так, на пластинах до БТО, имеющих на планарной поверхности тонкий поверхностный слой с микроискажённой кристаллической решёткой и наличием остаточных механических напряжений Кичучи-линии имеют размытый

вид (рисунок 1а). После проведения БТО исходных кремниевых пластин Кичучи-линии стали более чётко выраженными (рисунок 1б). Это свидетельствует о формировании более совершенной кристаллической решётки поверхностного слоя толщиной менее 30 нм.

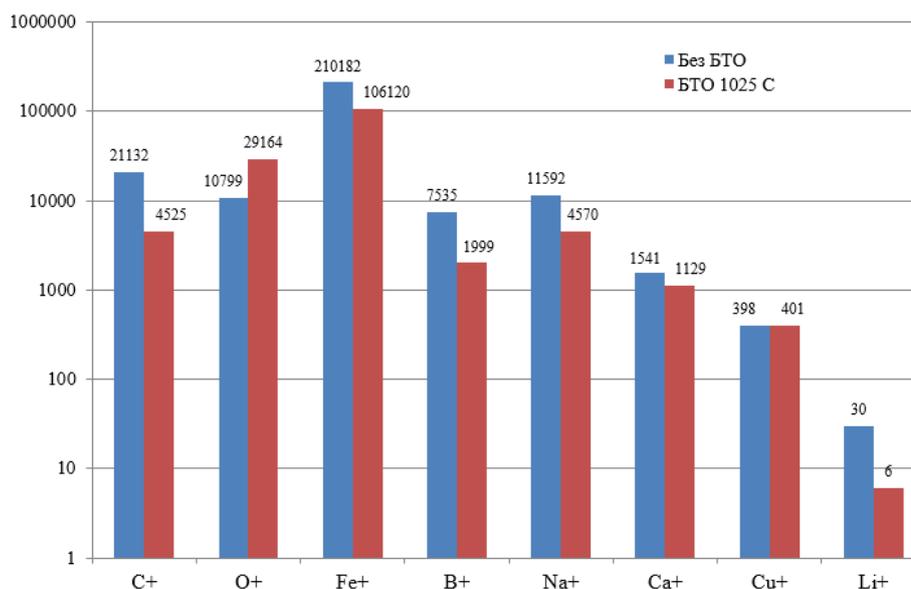


**Рисунок 1** – Картины дифракции обратно отражённых электронов от поверхности: *a* – исходных кремниевых пластин; *b* – после быстрой термообработки

**Figure 1** – Diffraction of back reflected electrons from the surface of: *a* – starting silicon wafers; *b* – after rapid thermal treatment

После проведения электронно-микроскопических исследований картин дифракции обратно отражённых электронов от поверхности исходных кремниевых пластин до и после БТО методом вторично-ионной масс-спектрометрии был сделан анализ элементного состава загрязнения поверхности данных образцов (рисунок 2). Анализ распределения элементного состава загрязнения поверхности показывает,

что абсолютные значения концентраций положительных ионов С, Fe, В, Na, Са, Li после проведения БТО значительно уменьшились. Так, абсолютное значение положительных ионов Fe на поверхности кремния уменьшилось примерно в 2 раза, Na – в 2,5 раза, В – в 3,77 раз, С – в 4,67 раз, Са – в 1,36 раз, Li – в 5 раз. При этом абсолютное значение положительных ионов Си осталось практически неизменным.



**Рисунок 2** – Распределение элементного состава загрязнения поверхности исходного кремния и после быстрой термообработки

**Figure 2** – Distribution of contamination element composition on the surface of starting silicon and after rapid thermal treatment (RTT)

Результаты анализа элементного состава загрязнения поверхности исходных кремниевых платин до и после БТО показывают, что при твердофазной рекристаллизации тонкого поверхностного слоя менее 30 нм происходит также его очистка от ионов металлов и углерода за счёт их диффузии к поверхности и последующей десорбции. Это приводит к уменьшению их концентрации на поверхности пластины. Полученные результаты свидетельствуют о том, что БТО поверхности исходных кремниевых платин обеспечивает как формирование более совершенной кристаллической структуры поверхностного слоя, так и очистку его от загрязняющих примесей.

На основании полученных экспериментальных результатов и экспериментальных результатов, изложенных в работах [4, 5], можно предложить следующую модель рекристаллизации механически нарушенного слоя при БТО. Поскольку нарушенный слой представляет собой механически деформированную кристаллическую решётку на поверхности кремния с изменённым электрическим полем, то её поверхностная энергия будет значительно выше, чем свободная энергия недеформированной кристаллической решётки. Образование такого электрического поля, называемого деформационным потенциалом, приводит к возникновению электрон-фононного взаимодействия, которое повышает свободную энергию поверхностного слоя. Любая термическая обработка приводит к уменьшению свободной энергии в поверхностном слое кремниевой пластины [1]. Поскольку она во многом связана с деформацией кристаллической решётки, то термическая обработка будет приводить к её уменьшению за счёт снижения механических напряжений под воздействием температуры. При этом, чем выше температура обработки, тем быстрее и в большей степени происходит уменьшение данной энергии, а, следовательно, и деформации поверхностного слоя. Это в свою очередь приводит к уменьшению искажения кристаллической решётки за счёт уменьшения её деформации в нарушенном слое.

При использовании традиционной длительной термической обработки наиболее полно данный процесс протекает при температуре, близкой к  $2/3T_{пл}$ . ( $T_{пл}$  – температура

плавления) [1]. В данной работе было показано, что изменение времени обработки в диапазоне от 7 до 60 мин не влияет на процесс релаксации механических напряжений, а, следовательно, и на уменьшение деформации кристаллической решётки поверхностного слоя кремния. Оценка энергии активации скорости такого процесса при длительной термической обработке, проведённая в работе [7], показала, что она составляет 2,7–3,0 эВ. В нашем случае процесс рекристаллизации механически нарушенного слоя (уменьшение деформации) протекает в 60 раз быстрее. При этом температура проведения данного процесса соответствует температуре длительной термообработки, а именно  $\approx 1100$  °С, которая соответствует максимальной скорости его протекания. Увеличение скорости процесса рекристаллизации механически нарушенного слоя при БТО связано, по-видимому, с уменьшением её энергии активации, оценка которой проведённая на основании уравнения Аррениуса, даёт величину 2,1 эВ, что на 0,6–0,9 эВ меньше, чем при длительной термообработке [8]. Столь низкая величина энергии активации при БТО обусловлена тем, что в данном случае рассматривался нарушенный слой с большим количеством разорванных связей Si-Si, а не сформированный за счёт их деформации под действием механических напряжений, возникающих в процессе полировки планарной поверхности кремниевых платин.

Поскольку процесс рекристаллизации нарушенного слоя идёт от слоев кремния с неискаженной кристаллической решёткой, то скорость его протекания будет определяться величиной внешней энергии подводимой к такой структуре, а также энергией связи Si-Si. При длительной термообработке на снижение деформационного потенциала действуют два процесса. Первый процесс связан с возникновением тепловых колебаний решётки при нагреве, вызывающих фонон-фононное взаимодействие, второй процесс обусловлен фонон-электронным взаимодействием. По мере роста температуры происходит усиление действия этих процессов, в результате чего энергия связи Si-Si уменьшается, и обеспечивается рост скорости рекристаллизации механически нарушенного слоя.

В случае БТО количество факторов, действующих на скорость рекристаллизации,

увеличивается до четырёх. Это связано с тем, что в данном случае нагрев происходит за счёт поглощения фотонного потока при фотон-электронном взаимодействии, который путём последовательного электрон-электронного, электрон-фононного и фонон-фононного взаимодействий передаёт энергию решётке, тем самым повышая её температуру и приводя к более быстрому подводу энергии к нарушенному слою по сравнению с длительной термообработкой. Данные механизмы вызывают уменьшение энергии связи Si-Si в большей степени, чем при длительной термообработке, тем самым имеет место более значительное уменьшение энергии активации скорости рекристаллизации.

Предполагаемый механизм рекристаллизации механически нарушенного слоя подтверждается экспериментальными результатами, полученные в работе [9], которые показали, что для восстановления кристаллической решётки после ионного легирования большими дозами требуются температуры ниже, чем при легировании малыми дозами. Это говорит о том, что при большом деформационном потенциале, когда ближний порядок в кристаллической решётке отсутствует, т. е. связи Si-Si либо разорваны, либо очень слабы, даже при столь низких температурах  $\approx 600^\circ\text{C}$  достигается необходимая скорость рекристаллизации для её восстановления. В то же время при небольших нарушениях кристаллической решётки, т. е. малом деформационном потенциале, для достижения данной скорости требуются более высокие температуры  $\geq 900^\circ\text{C}$ .

Видно, что в данном случае энергия активации скорости рекристаллизации нарушенного слоя значительно выше, чем для сильно нарушенных слоев. Данные закономерности касаются как длительной, так и БТО. Следует отметить, что для устранения механически нарушенного слоя облучение исходных кремниевых пластин необходимо проводить с планарной стороны. Это обусловлено тем, что только в этом случае будут действовать все механизмы, ускоряющие процесс рекристаллизации.

Одним из основных параметров, описывающих процесс рекристаллизации нарушенного поверхностного слоя кремния после финишной полировки, является скорость его протекания. Знание данного параметра позволяет определить длительность импульса

и плотность мощности светового потока при БТО, обеспечивающие протекание твердофазной рекристаллизации нарушенного слоя на поверхности кремниевой пластины.

Для определения скорости рекристаллизации и установления её зависимости от параметров БТО воспользуемся известным выражением, описывающим данную закономерность [9]:

$$V_p = V_0 \exp(-E_a/kT), \quad (1)$$

где  $V_0 = 1,55 \cdot 10^6$  см/с – предэкспоненциальный множитель;  $V_p$  – скорость рекристаллизации;  $E_a$  – энергия активации процесса рекристаллизации (для монокристаллического Si  $E_a = 2,7$  эВ, для аморфного Si  $E_a = 2,3$  эВ);  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура образца.

Учитывая, что толщина нарушенного поверхностного слоя составляет 0,1 мкм [10], определим нижний предел температуры нагрева пластины, который обеспечивает необходимую скорость его твердофазной рекристаллизации. Данное требование обусловлено тем, что одно из основных условий при создании современных микроэлектронных изделий это минимизация высокотемпературных нагрузок, оказываемых на полупроводниковую пластину в технологическом цикле их изготовления. Для решения данной задачи на основании выражения (1) был проведен расчёт скоростей рекристаллизации для различных температур нагрева кремниевой пластины при энергии активации процесса 2,6 эВ (рисунок 3). Использование данной величины обусловлено тем, что механически нарушенный слой представляет собой монокристаллический кремний с деформированной кристаллической решёткой, а не кремний, находящийся в аморфном состоянии. В связи с этим использовалась величина энергии активации процесса рекристаллизации на 0,1 эВ меньше, чем для монокристаллического кремния, не имеющего нарушений кристаллической решётки.

Для нахождения толщины рекристаллизованного слоя кремния необходимо знание времени его термообработки, а поскольку при БТО нагрев кремниевой пластины осуществляется секундными длительностями светового потока с последующей стадией остывания, то для характеристики длительности данного процесса введём понятие эффективно-го времени нагрева ( $\tau_{\text{эф}}$ ). Учитывая, что

температура на облучаемой поверхности и по толщине пластины является функцией плотности мощности и длительности импульса, то выражение (1) следует записать в виде:

$$V_p = V_0 \exp[-E_a/kT(E_{M0}, t)], \quad (2)$$

где  $T(E_{M0}, t)$  – решение уравнения (3):

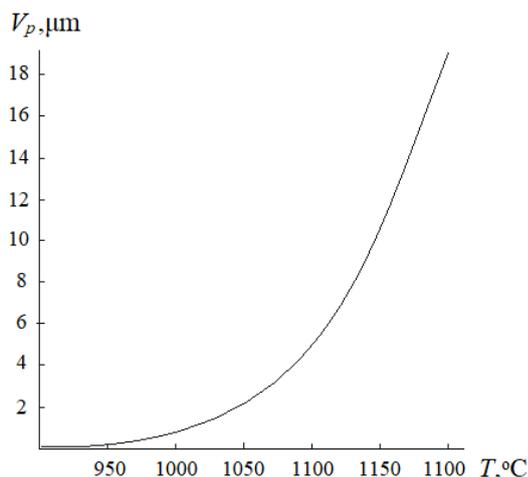
$$\rho c h dT/dt = (1-R)E_{M0} - 2\varepsilon_{с.ч.}\sigma(T^4 - T_0^4), \quad (3)$$

$T = T_0$  при  $t = 0$  – начальное условие,

$$\varepsilon_{с.ч.}\sigma(T_{x=h}^4 - T_0^4) = 0;$$

$$\varepsilon_{с.ч.}\sigma(T_{x=h}^4 - T_0^4) - (1-R)E_{M0} = 0 \text{ – граничные условия,}$$

где  $\rho$  – плотность кремния;  $c$  – теплоёмкость кремния;  $h$  – толщина кремниевой пластины;  $E_{M0}$  – плотность мощности светового потока, падающего на пластину;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $R$  – отражательная способность кремния;  $t$  – время нагрева.

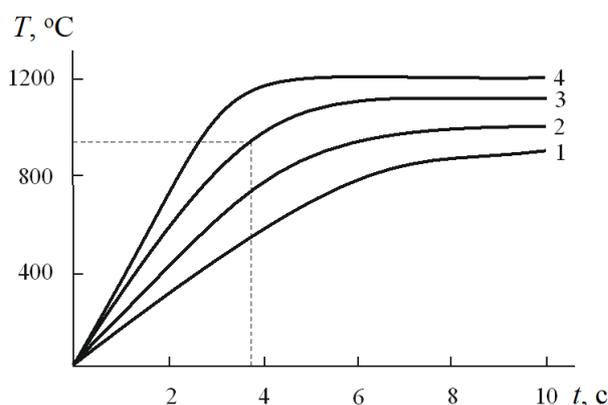


**Рисунок 3** – Зависимость скорости рекристаллизации механически нарушенного слоя кремния от температуры быстрой термообработки

**Figure 3** – Dependence of recrystallization rate of physically disturbed silicon layer upon temperature at rapid thermal treatment

Тогда под  $\tau_{эф}$  будем понимать время, в течение которого скорость рекристаллизации падает в  $e$  раз по отношению к её максимальному значению. Поскольку, как показано в работе [6], при обработке импульсами секундной длительностью основной вклад в  $\tau_{эф}$  вносит время нагрева пластины, то в расчётах не учитывалось влияние на  $\tau_{эф}$  динамики остывания пластины. Для нахождения  $\tau_{эф}$  из выражения (2) определялось такое снижение температуры от её

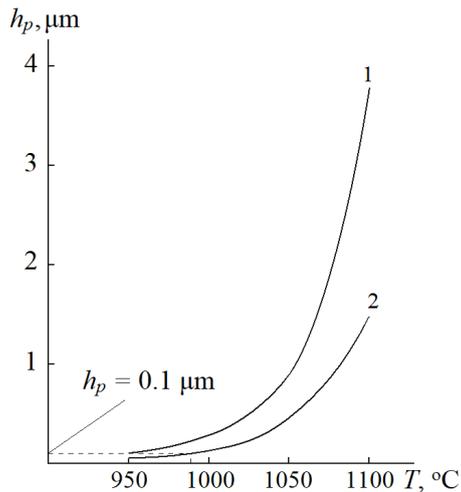
максимального значения, которое приводит к уменьшению скорости рекристаллизации в  $e$  раз. Далее на основании расчёта динамики нагрева пластины в процессе БТО (рисунок 4) определялись  $\tau_{эф}$  и устанавливалась зависимость толщины рекристаллизованного механически нарушенного слоя от температуры БТО для различных плотностей мощности светового потока при длительности импульса 8 с (рисунок 5).



**Рисунок 4** – Зависимость температуры кремниевой пластины от длительности светового импульса при различных плотностях его мощности: 1 – 20 Вт/см<sup>2</sup>; 2 – 30 Вт/см<sup>2</sup>; 3 – 40 Вт/см<sup>2</sup>; 4 – 50 Вт/см<sup>2</sup>

**Figure 4** – Dependence of the silicon wafer temperature on the heating time at various luminous flux power densities: 1 – 20 W/cm<sup>2</sup>; 2 – 30 W/cm<sup>2</sup>; 3 – 40 W/cm<sup>2</sup>; 4 – 50 W/cm<sup>2</sup>

На основании данного расчёта видно, что минимальная температура, обеспечивающая скорости процесса, необходимые для рекристаллизации нарушенного слоя кремния толщиной 0,1 мкм, составляет 950 °С при плотности мощности излучения 40 Вт/см<sup>2</sup> (рисунок 5). При этом с увеличением плотности мощности излучения до 50 Вт/см<sup>2</sup>, что соответствует росту скорости нагрева пластины, необходимая температура для рекристаллизации слоя толщиной 0,1 мкм возрастает до 987 °С. Это обусловлено тем, что за счёт роста скорости нагрева время достижения пластиной температуры 950 °С уменьшается, вызывая тем самым, снижение величины  $\tau_{эф}$ , а, следовательно, и толщины рекристаллизованного слоя, т. е. он становится меньше 0,1 мкм. Это означает, что для минимизации температурного воздействия при выборе режима БТО требуется учитывать не только температуру процесса, но и скорость её набора.



**Рисунок 5** – Зависимость толщины рекристаллизованного нарушенного слоя кремния от температуры быстрой термообработки для различных плотностей мощности светового потока при длительности импульса 8 с: 1 – 40 Вт/см<sup>2</sup>; 2 – 50 Вт/см<sup>2</sup>

**Figure 5** – Dependence of the thickness of re-crystallized disturbed silicon layer upon the temperature of rapid thermal treatment for various luminous flux power densities at 8 second pulse duration: 1 – 40 W/cm<sup>2</sup>; 2 – 50 W/cm<sup>2</sup>

На основании данного расчёта видно, что минимальная температура, обеспечивающая скорости процесса, необходимые для рекристаллизации нарушенного слоя кремния толщиной 0,1 мкм, составляет 950 °С при плотности мощности излучения 40 Вт/см<sup>2</sup> (рисунок 5). При этом с увеличением плотности мощности излучения до 50 Вт/см<sup>2</sup>, что соответствует росту скорости нагрева пластины, необходимая температура для рекристаллизации слоя толщиной 0,1 мкм возрастает до 987 °С. Это обусловлено тем, что за счёт роста скорости нагрева время достижения пластиной температуры 950 °С уменьшается, вызывая тем самым, снижение величины  $\tau_{эф}$ , а, следовательно, и толщины рекристаллизованного слоя, т. е. он становится меньше 0,1 мкм. Это означает, что для минимизации температурного воздействия при выборе режима БТО требуется учитывать не только температуру процесса, но и скорость её набора.

На основании проведённых расчётов (рисунки 4, 5) видно, что наиболее приемлемым режимом БТО, обеспечивающим минимальное время воздействия температуры на кремниевую пластину для проведения твердофазной рекристаллизации нарушенного слоя толщиной

0,1 мкм при температуре 950 °С, является плотность мощности светового потока 40 Вт/см<sup>2</sup> при  $t = 3,7$  с. Такой режим БТО обеспечивает толщину рекристаллизованного слоя 0,11 мкм.

## Заключение

Приведены картины дифракции обратно отражённых электронов от поверхности исходных кремниевых пластин до и после быстрой термообработки, вид которых подтверждает формирование более совершенной кристаллической решётки поверхностного слоя толщиной менее 30 нм в результате быстрой термообработки. При этом имеет место очистка планарной поверхности исходных кремниевых пластин от С, Fe, В, Na, Са, Li, что обеспечивает формирование более совершенной структуры планарной поверхности исходных кремниевых пластин. Предложены процессы, уменьшающие энергию активации процесса рекристаллизации механически нарушенного поверхностного слоя кремния и дано его математическое описание. Определены параметры быстрой термообработки, обеспечивающие минимизацию воздействия температуры на кремниевую пластину для рекристаллизации механически нарушенного слоя на её планарной поверхности.

## Список использованных источников

1. Шаныгин В.Я. Получение атомарно-чистых поверхностей кремния в низкоэнергетической СВЧ-плазме низкого давления / В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79, вып. 12. – С. 73–78.
2. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов: в 2 ч. / Г.Я. Красников – М.: Техносфера, 2002. – Ч. 1. – 416 с.
3. Пилипенко В.А. Свойства поверхности кремния после лазерной обработки импульсами наносекундной длительности / В.А. Пилипенко [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81, № 3. – С. 592–595.
4. Gorushko V. Re-crystallization of Silicon during Rapid Thermal Treatment / V. Gorushko, A. Omelchenko, V. Pilipenko, V. Solodukha // Przegląd Elektrotechniczny. – 2018. – Vol. 94, № 5. – Pp. 196–198.
5. Пилипенко В.А. Твердофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя кремния при быстрой термообработке / В.А. Пилипенко [и др.] // Доклады национальной академии наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 347–352.

6. Достанко А.П. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А.П. Достанко [и др.]; под общ. ред. акад. А.П. Достанко. – Минск: Беларуская навука, 2020. – 260 с.

7. Borisenko V.E. Rapid Thermal Processing of Semiconductors / V.E. Borisenko, P.J. Hesketh – New York: Plenum Press, 1997. – 385 p.

8. Киреев В.Ю. Быстрые термические процессы – новый этап в развитии микроэлектронной технологии / В.Ю. Киреев, А.С. Цимбалов // Микроэлектроника. – 2001. – Т. 30, № 4. – С. 266–278.

9. Пилипенко В.А. Физические основы быстрой термообработки. Геттерирование, отжиг ионнолегированных слоев, БТО в технологии СБИС / В.А. Пилипенко [и др.] – Минск: БГУ, 2001. – 146 с.

10. Солодуха В.А. Измерение глубины нарушенного слоя на поверхности кремниевых пластин методом оже-спектроскопии / В.А. Солодуха, А.И. Белоус, Г.Г. Чигирь // Наука и техника. – 2016. – Т. 15, № 4. – С. 329–334.

## References

1. Shanygin VYa, Yafarov RK. Obtaining atomically clean silicon surfaces in low-energy low-pressure microwaveplasma. Journal of technical physics. 2009;79(12):73–78.

2. Krasnikov GYa. Design and technological features of submicron MOS transistors: In 2 hours. M.: Technosfera, 2002. Part 1. 416 p.

3. Pilipenko VA, Gorushko VA, Vecher DV, Syakersky VS, Petlitskaya TV. Surface properties of silicon after laser treatment with nanosecond pulses. 2008;81(3):592–595.

4. Gorushko V, Omelchenko A, Pilipenko V, Solodukha V. Recrystallization of Silicon during Rapid Thermal Treatment. Przegląd Electrotechniczny. 2018;94(5):196–198.

5. Pilipenko VA. [et al.] Solidphase recrystallization of the mechanically disturbed silicon layer the during the rapid thermal treatment. Reports of the National Academy of Sciences of Belarus. 2018;62(3):347–352.

6. Dostanko AP [etc.] Innovation technologies and equipment of submicron electronics; ed. by Academ. Minsk: Belaruskaya Navuka, 2020:260 p.

7. Borisenko VE, Hesketh PJ. Rapid Thermal Processing of Semiconductors. New York: Plenum Press, 1997:385 p.

8. Kireev VYu, Tsimbalov AS. Rapid thermal processes – a new stage in the development of microelectronic technology. Microelectronics. 2001;30(4):266–278.

9. Pilipenko VA [et al.] Physical foundations of rapid heat treatment. Gettering, annealing of ion-doped layers, BTO in VLSI technology. Minsk: BGU, 2001:146 p.

10. Solodukha VA, Belous AI, Chigir GG. Measurement of the depth of the damaged layer on the surface of silicon wafers by Auger spectroscopy. Science and Technology. 2016;15(4):329–334.