

УДК 621.3.049.77:621.373.826

**МОДЕЛЬ ТВЕРДОФАЗНОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИ  
НАРУШЕННОГО СЛОЯ КРЕМНИЯ ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ**

**Пилипенко В.А., Омельченко А.А.**

*ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Целью работы являлись разработка модели твердофазной рекристаллизации нарушенного слоя на поверхности кремниевых пластин после химико-механической полировки с применением импульсной фотонной обработки и ее математическое описание. Показано, что за счет снижения энергии активации скорости рекристаллизации нарушенного слоя кремния при его нагреве световыми импульсами до температуры  $\geq 950$  °С происходит полная его рекристаллизация. Описан процесс рекристаллизации с применением БТО, и определены параметры светового импульса, минимизирующие температурную нагрузку на кремниевую пластину.

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

**MODEL SOLID PHASE RECRYSTALLIZATION OF THE MECHANICALLY  
DISRUPTED SILICON LAYER DURING THE RAPID THERMAL TREATMENT**

**Pilipenko V.A., Omelchenko A.A.**

*OJSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The objective of the work was development of the model of solid-phase re-crystallization of the damaged layer on the surface of silicon wafers after chemical and mechanical polishing with application of pulse-photonic processing and its mathematical presentation. It is demonstrated that due to increase of the energy of activating re-crystallization rate of disturbed silicon layer at its being heated by light pulses up to  $\geq 950$  °С there occurs its full re-crystallization. The process of recrystallization using Rapid Thermal Treatment is described and there are defined the parameters of light pulse, that ensure minimizing the temperature impact on a silicon wafer.

**Key words:** rapid thermal treatment, disrupted layer, silicon wafer, solid phase re-crystallization, deformation potential.

*Адрес для переписки: Омельченко А.А., ул. Казинца И.П., 121 А, г. Минск, 220108, Республика Беларусь  
e-mail: AOmelchenko@integral.by*

**Введение.** На сегодняшний день важной задачей при создании современных изделий микроэлектроники является устранение на поверхности пластин механически нарушенного слоя. В настоящее время известно два наиболее приемлемых метода устранения механически нарушенного слоя на рабочей поверхности кремниевых пластин. Первый метод предполагает проведение рекристаллизации нарушенного слоя с применением импульсного фотонного излучения наносекундной длительности [1], а второй метод – импульсного излучения галогенных ламп секундной длительности [2]. В первом случае имеет место жидкофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя кремния, а во втором – твердофазная. При этом, если модель жидкофазной рекристаллизации хорошо описана в [3], то о модели твердофазной рекристаллизации и ее аналитическом описании данные в литературе практически отсутствуют.

**Материалы и методы исследования.** Для описания предполагаемой модели рекристаллизации механически нарушенного слоя на рабочей поверхности кремниевых пластин путем ее быстрой термической обработки (БТО) с применением

импульсных фотонных потоков длительностью ~7 секунд, обеспечивающим нагрев пластины до 1100 °С, использовались экспериментальные результаты, изложенные в работах [2].

**Результаты и их обсуждение** Полученные ранее результаты позволяют предложить следующую модель рекристаллизации механически нарушенного слоя при быстрой термической обработке. Поскольку нарушенный слой представляет собой механически деформированную кристаллическую решетку на поверхности кремния с измененным электрическим полем, то ее поверхностная энергия будет значительно выше, чем свободная энергия недеформированной кристаллической решетки. Образование такого электрического поля, называемого деформационным потенциалом, приводит к возникновению электронного взаимодействия, которое повышает свободную энергию поверхностного слоя. Любая термическая обработка приводит к уменьшению свободной энергии в поверхностном слое кремниевой пластины [4]. Поскольку она во многом связана с деформацией кристаллической решетки, то термическая обработка будет приводить к ее уменьшению за счет 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 решетки за счет уменьшения ее деформации в нарушенном слое.

Поскольку процесс рекристаллизации нарушенного слоя идет от слоев кремния с неискаженной кристаллической решеткой, то скорость его протекания будет определяться величиной внешней энергии, подводимой к такой структуре, а также энергией связи Si-Si. В случае быстрой термообработки нагрев происходит за счет поглощения фотонного потока при фотон-электронном взаимодействии, который путем *последовательного электрон-электронного, электрон-фононного и фонон-фононного взаимодействий передает энергию решетке, тем самым повышая ее 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.

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 введем понятие эффективного времени нагрева ( $\tau_{эф}$ ). Под  $\tau_{эф}$  будем понимать время, в течение которого скорость рекристаллизации падает в  $e$  раз по отношению к ее максимальному значению. На основании расчета динамики нагрева пластины в процессе было определено  $\tau_{эф}$  и установлена зависимость толщины рекристаллизованного механически нарушенного слоя от температуры быстрой термообработки для различных плотностей мощности светового потока при длительности импульса 8 секунд (рисунок 1).

Из рисунка 2 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 1). 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 означает, что для минимизации температурного воздействия при

выборе режима БТО требуется учитывать не только температуру процесса, но и скорость ее набора.

На основании полученных результатов (рисунок 1) 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  $t = 3,7$  секунды.

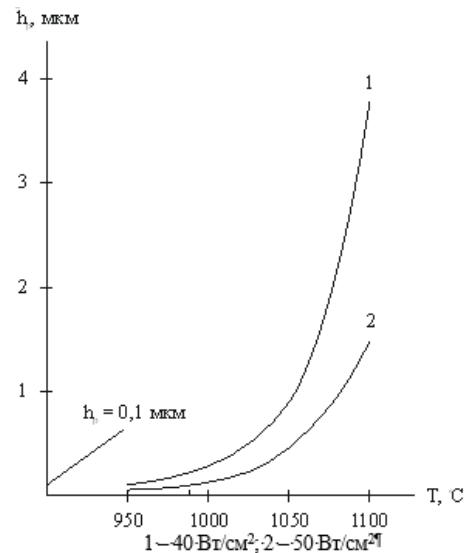


Рисунок 1 – Зависимость толщины рекристаллизованного нарушенного слоя кремния от температуры быстрой термообработки для различных плотностей мощности светового потока при длительности импульса 8 секунд

**Заключение.** Дано описание процесса рекристаллизации данного слоя, показана закономерность изменения его толщины от режимов такого нагрева. Определены параметры быстрой термической обработки, обеспечивающие минимизацию воздействия температуры на кремниевую пластину для полной рекристаллизации механически нарушенного слоя на ее рабочей поверхности.

#### Литература

1. Лазерная обработка поверхности кремниевых пластин / В.А. Пилипенко [и др.] // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1984. – Т. 7. – С. 113–118.
2. Re-crystallization of Silicon during Rapid Thermal Treatment / V. Gorushko [et al.] // Przegląd Electrotechniczny. – 2018. – V. 94, № 5. – P. 196–198.
3. Пилипенко, В.А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В.А. Пилипенко. – Минск : Издательский центр БГУ, 2004. – 531 с.
4. Концевой, Ю.А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур / Ю.А. Концевой, Ю.М. Литвинов, Э.А. Фаттахов. – М. : Радио и связь, 1982. – 240 с.