

ИМПУЛЬСНО-ПУЧКОВЫЕ ОБРАБОТКИ В КРЕМНИЕВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ - ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Р.М. Баязитов

Учреждение Российской Академии наук
Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского,
ул. Сибирский тракт, 10/7, 420029, Казань, Россия,
тел. +7-843-2319102, e-mail: bayaz@kfti.knc.ru

Проведен обзор методов и особенностей импульсных обработок, используемых в кремниевой микроэлектронике. Рассмотрены нестационарные температурные поля в полупроводниковых структурах, обусловленные воздействием интенсивных пучков излучений в широком диапазоне длительности воздействия. Проведен анализ отжига дефектов и диффузионного распределения примесей в твердофазном и жидкофазном режимах импульсных обработок имплантированных слоев и тонкопленочных покрытий. Показано, что роль импульсных термических обработок в значительной мере повышается при переходе микроэлектроники в нанометровый диапазон размеров элементов. Проведен обзор последних публикаций по развитию технических средств и по применению импульсных обработок для создания кремниевых интегральных схем и дискретных приборов.

Рассмотрены перспективы использования импульсных обработок для создания новых функциональных материалов для микро- и оптоэлектроники.

Введение

Импульсные термические обработки широко применяются в микроэлектронике с 80-х годов для устранения постимплантационных дефектов, создания сильнолегированных эпитаксиальных слоев, синтеза соединений, формирования контактов и т.д. Благодаря хорошей совместимости с планарной технологией наибольшее применение в микроэлектронике находят импульсные световые обработки в миллисекундном и секундном диапазонах длительности воздействия, характеризующихся твердофазным механизмом перераспределения примесей и устранения дефектов в имплантированных слоях [1].

В связи с переходом современной микроэлектроники к нанометровым размерам элементов роль импульсных обработок повышается. При этом тенденцией развития импульсной технологии в твердофазном режиме является сокращение длительности термического воздействия вплоть до перехода в микросекундный диапазон с одновременным повышением температуры обработки за счет увеличения интенсивности излучения – “hotter and faster”. При таком воздействии в твердофазном режиме происходит эффективное устранение дефектов кристаллической структуры, повышение степени электрической активации примесей и синтез соединений с одновременной минимизацией диффузионных процессов.

В данной работе рассмотрены температурные и диффузионные поля в кремниевых структурах при импульсных энергетических воздействиях в широком диапазоне длительности импульса. Проведен анализ скорости устранения дефектов и перераспределения примесей в зависимости от температуры при твердофазном и жидкофазном режимах импульсной обработки. Проведен обзор последних публикаций по применению импульсных обработок для создания кремниевых интегральных схем и дискретных приборов [2,3]. Рассмотрены перспективы импульсного создания новых функциональных материалов для микро- и оптоэлектроники.

Основная часть

При выборе источников импульсного нагрева для обработки кремниевых структур необходимо знание температурных полей, вызванных излучением с заданной длительностью, плотностью энергии импульса, пространственным распределением поглощенной энергии. В связи с высокой нелинейностью задачи теплопроводности, компьютерное моделирование проводится путем численного решения задачи. На рис. 1 представлены результаты решения одномерной «обратной» задачи для кремния [4].

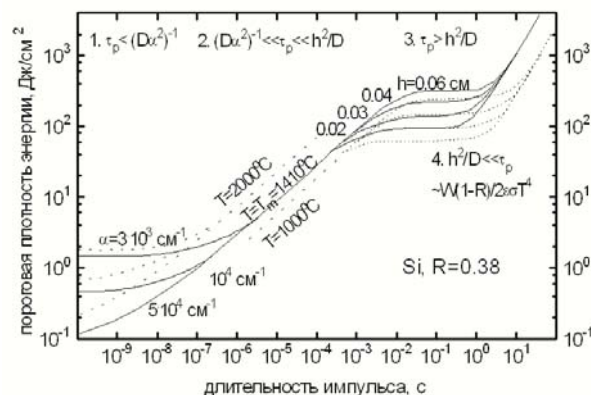


Рис. 1. Зависимость плотности энергии светового импульса, необходимой для достижения заданной температуры поверхности кремния от длительности импульса. Данные приведены для различных коэффициентов поглощения излучения α и толщины пластины h [4].

В рассмотренном диапазоне длительности импульса можно считать, что энергия излучения мгновенно передается в виде тепла решетке кремния. При решении задачи методом конечных разностей учитывались температурные зависимости теплофизических параметров кремния, а также теплота фазового перехода и изменение оптических параметров при плавлении. При заданной максимально достижимой температуре показана зависимость требуемой плотности энергии импульса светового излучения W от его длительности τ_p . Отчетливо выделяются четыре

временные режима обработки: адиабатический режим (существенна зависимость от коэффициента поглощения α), режим теплового потока (поверхностное поглощение, существенна зависимость от коэффициента температуропроводности D), режим равномерного нагрева пластины (зависимость от толщины пластины), режим теплового баланса (определяется излучательной способностью ϵ). Зависимость приведена для фиксированного коэффициента отражения света $R=0.38$, соответствующего аморфизованному кремнию на длине волны 0.69 мкм. При других значениях R полученная пороговая плотность энергии корректируется умножением на $(1-0.38)/(1-R)$. Наиболее практически важными диапазонами являются 10^{-9} - 10^{-7} с и 10^{-4} - 10^1 с. В первом случае имеет место быстрая жидкофазная кристаллизация слоев толщиной до ~ 1 мкм, а во втором – быстрый термический отжиг при температуре ниже точки плавления кремния $T_m = 1410^\circ\text{C}$. В этом диапазоне могут быть использованы различные источники нагрева – импульсные лампы, графитовые нагреватели, сканирующие лучи непрерывных лазеров и т.д.

В зависимости от температуры нагрева имеют место различные механизмы и скорости перераспределения имплантируемых примесей и отжига радиационных дефектов. На рис 2 приведены зависимости времени перераспределения различных примесей на заданную глубину ($h = 0.1$ и 0.03 мкм), а также времени отжига аморфного кремния [5] и дислокаций [6] от температуры. Используются температурные зависимости коэффициентов диффузии различных примесей $D(T)$ [7]. Для заданной глубины время диффузионного перераспределения и устранения дислокаций определялось как $h^2/D(T)$, а для отжига аморфного слоя – как $h/V(T)$, где V – линейная скорость кристаллизации аморфного слоя.

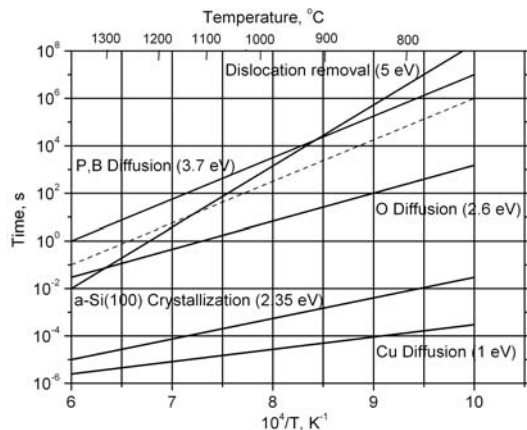


Рис. 2. Зависимость времени диффузии различных примесей на глубину 0.1 мкм, удаления дислокаций и рекристаллизации аморфного слоя с этой глубины от обратной температуры. Пунктирная линия – зависимость времени диффузии фосфора и бора на глубину 0.03 мкм.

Приведенные данные показывают, что уменьшение длительности воздействия с одновременным повышением температуры вплоть до точки плавления приводит к устранению дефек-

тов и уменьшению диффузионного перераспределения как имплантируемых (B, P), так и неконтролируемых примесей (Cu, O). Например, повышение температуры до 1100°C за 10 с приводит к устранению дислокаций в слое ~ 0.1 мкм при минимальном перераспределении легирующих примесей (~ 0.03 мкм). При этом также уменьшается перераспределение неконтролируемых примесей из верхних элементов микроструктур, приводящих к образованию глубоких центров, например, кислорода и межузельных атомов металлов.

Проводимые в последнее время исследования быстрых термических обработок [2,3] направлены на сокращение длительности термического воздействия при переходе на 22 нм технологию микроэлектроники. Одним из перспективных и хорошо управляемых методов импульсного воздействия является Spike Laser Annealing – острый лазерный отжиг путем сканирования специально сфокусированных непрерывных лазерных пучков (рис. 3) [8].

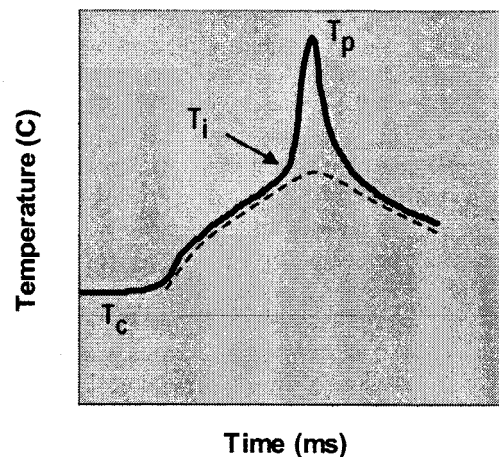
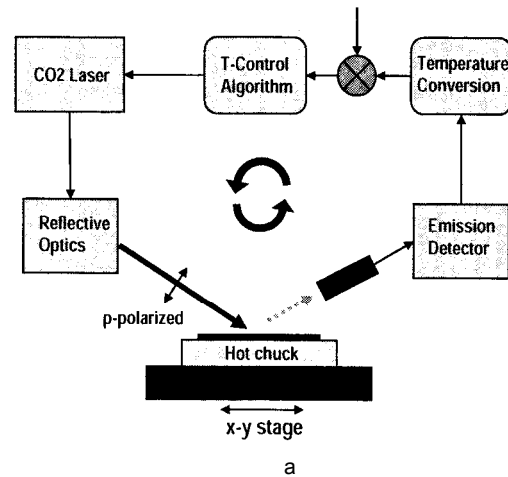


Рис. 3. Блок-схема системы Spike Laser Annealing (a) и рассчитанный временной температурный профиль кремниевого элемента при предварительном нагреве T_c и воздействии излучением CO_2 лазера (b). T_i – температура, достигаемая путем воздействия расфокусированного пучка [8].

При этом в целях увеличения коэффициента поглощения, уменьшения термических напряжений, а также выравнивания температуры нагрева отдельных элементов микросхем применяются специальные меры. Обработываемые пластины находятся при повышенной температуре (~500°C), пучок падающего непрерывного излучения расщепляется на остророфокусированный и расфокусированный, используется поляризованное излучение, падающее под углом Брюстера на поверхность пластины.

Импульсная обработка позволяет также управлять механическими напряжениями канальных областей кремния и соединений в МДП-транзисторах, что увеличивает их быстродействие за счет повышения подвижности носителей заряда (strain engineering).

В связи с жидкофазным механизмом кристаллизации импульсные обработки в наносекундном диапазоне длительностей лазерного излучения плохо совместимы с существующей планарной технологией микроэлектроники, однако могут быть использованы для производства дискретных кремниевых приборов, например, биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и оптоэлектронных элементов. При таком воздействии благодаря высоким скоростям жидкофазной кристаллизации [9] образуются бездефектные сильнолегированные твердые растворы и новые ориентированные вдоль кристаллографических направлений кремния соединения без термического воздействия на базовый материал.

Одним из наиболее актуальных направлений микроэлектроники является интеграция микро- и оптоэлектронных элементов, что может значительно повысить быстродействие микроэлектронных устройств. На настоящий момент эффективность такой интеграции продемонстрирована фирмой INTEL на оптических межпроцессорных коммуникациях. Однако до сих пор остается проблема внутрисхемных оптических соединений, связанная со сложностью получения эффективных светоизлучающих устройств на кремнии. Эта проблема может быть решена путем создания новых функциональных материалов и

структур для микро- и оптоэлектроники. Импульсные обработки позволяют синтезировать на кремнии новые, в том числе нанокристаллические соединения, например, FeSi_2 [10] и GeSi [11], обладающие повышенными светоизлучающими свойствами в ближней ИК области.

Заключение

Проведен анализ температурных полей, кинетики отжига дефектов и перераспределения примесей при воздействии импульсных пучков излучений на кремниевые структуры. На основе проведенного анализа и обзора последних публикаций отмечены основные возможности и перспективы использования импульсных обработок в кремниевой электронике.

Список литературы

1. Пилипенко В.А. Быстрые термообработки в технологии СБИС. – Минск: Изд. центр БГУ, 2004. – 531 с.
2. Proc. 17th IEEE Intern. Conf. on Advanced Thermal Processing of Semiconductors-RTP2009, Albany, NY, USA, 2009, ISBN 978-1-4244-3816-7. – 216 p.
3. Proc. 18th IEEE Intern. Conf. on Advanced Thermal Processing of Semiconductors-RTP2010, Florida, USA, 2010, ISBN 978-1-4244-8393-3. – 175 p.
4. Баязитов Р.М. // Вестн. ДВО РАН. - 2005. - 6. – С. 78.
5. Двуреченский А.В., Качурин Г.А., Нудеев Е.В., Смирнов Л.С. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. – М.: Наука, 1982. – 208 с.
6. Комаров Ф.Ф., Новиков А.П., Соловьев В.С., Ширяев С.Ю. Дефекты структуры в ионно-имплантированном кремнии. – Минск: Университетское, 1990. – 320 с.
7. Глазов В.М., Земсков В.С. Физико-химические основы легирования полупроводников. – М.: Наука, 1967. – 372 с.
8. J. Hebb, J. Wang, S. Chen et al. Proc. 17th IEEE Intern. Conf. on Advanced Thermal Processing of Semiconductors-RTP2009, Albany, NY, USA, 2009. – P. 17.
9. Ivlev G.D., Gatzkevich E.I., Bayazitov R.M. et al // Nucl. Instrum. Meth. B. - 2007. - V. 257. - 1/2. – P. 208.
10. Bayazitov R., Batalov R., Nurutdinov R. et al. // Nucl. Instrum. Meth. B. - 2005. – V. 240. -1/2. – P. 224
11. Пархоменко Ю.Н., Белогорохов А.И., Герасименко Н.Н. и др. // Физ. и техн. полупров. - 2004. - Т. 38. - 5. – С. 593.

PULSED-BEAM TREATMENTS IN SILICON ELECTRONICS – POSSIBILITIES AND PERSPECTIVES

R.M. Bayazitov

Kazan Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences

Kazan 420029 Russia, phone: +7(843)2319102, fax: +7(843)2725075, e-mail: bayaz@kfti.knc.ru

Methods and features of pulsed treatments used in silicon microelectronics are reviewed. Nonstationary temperature fields in semiconductor structures caused by interaction with intense beams of radiation in a wide range of duration are considered. Processes of defect annealing and diffusion distribution of impurities at solid- and liquid phase treatments of implanted layers and thin-film coatings are analyzed. It is shown that the role of pulsed thermal processing is increased at the moving to nanometer size of elements. Recent publications on the development and application of pulsed treatments to create silicon integrated circuits and discrete devices are reviewed. Perspectives of the use of pulsed treatments to create new functional materials for micro-and optoelectronics are discussed.