

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КРЕМНИЕВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Д.Ж.Асанов – ассистент преподаватель

Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза

ТЕЗКОР ТЕРМИК ИШЛОВ БЕРИШ ЖАРАЁНИДА КРЕМНИЙ ГЕТЕРОТУЗИЛМАЛАРИДА ИССИҚЛИК ЖАРАЁНЛАРИНИ МОДЕЛЛАШТИРИШ ВА ТАҲЛИЛ ҚИЛИШ

Д.Ж.Асанов – ассистент ўқитувчи

Ажиниёз номидаги Нукус давлат педагогика институти

MODELING AND ANALYSIS OF HEAT PROCESSES IN SILICON GETEROSTRUCTURES DURING QUICK THERMAL PROCESSING

D.J.Asanov – assistant teacher

Nukus State Pedagogical Institute named after Ajiniyaz

Таянч сўзлар: кремний гетероструктуралари, тезкор иссиқлик билан ишлов бериш, импульсли фотон ишлови, иссиқлик баланси, никел цилиндрлари, моделлаштириш.

Резюме. Мақолада Ni (5 ат. % Pt)/Si кремний гетеротузималарида импусли фотонли ишлов бериш жараёнида юз берадиган иссиқлик жараёнлари моделлаштирилган ва тажрибавий ўрганилган. Адиабатик, иссиқлик оқими ва иссиқлик мувозанати режимлари таҳлил қилинади. 255 J/sm² энергия зичлиги ва 1,8 с давомийликда иссиқлик мувозанати режими ҳосил бўлиши, бу эса Ni₂Si фазасининг шаклланишига олиб келиши аниқланган. Ni қатламининг Pt билан легирланиши структуранинг термобарқарорлигини ошириши ва субстрат деформациясини камайтиришини кўрсатилди.

Ключевые слова: кремниевые гетероструктуры, быстрая термическая обработка, импульсная фотонная обработка, тепловой баланс, силициды никеля, моделирование.

Резюме. В статье проведено моделирование и экспериментальное исследование тепловых процессов в кремниевых гетероструктурах Ni (5 ат. % Pt)/Si при импульсной фотонной обработке. Рассмотрены режимы адиабатического нагрева, теплового потока и теплового баланса. На основе анализа температурных зависимостей установлено, что при плотности энергии 255 Дж/см² и длительности 1,8 с реализуется режим теплового баланса, обеспечивающий равномерный нагрев и образование фазы Ni₂Si. Показано, что легирование Ni платиной повышает стабильность силицидного слоя и снижает деформацию подложки.

Key words: silicon heterostructures, rapid thermal processing, pulsed photon annealing, thermal balance, nickel silicides, modeling.

Summary. The paper presents modeling and experimental study of thermal processes in silicon-based Ni (5 ат. % Pt)/Si heterostructures under rapid photon annealing. Three heat transfer regimes are analyzed: adiabatic, heat-flow, and thermal-balance. Temperature profiles show that at an energy density of 255 J/cm² and a pulse duration of 1.8 s, the system reaches a thermal balance mode enabling uniform heating and the formation of the Ni₂Si phase. Pt-doping improves thermal stability and reduces substrate deformation.

Введение. Современные технологии микро и нанoeлектроники требуют высокоточного контроля температурных параметров при термической обработке кремниевых структур. Ключевым этапом формирования функциональных элементов интегральных схем является создание устойчивых омических контактов и барьерных слоёв на основе силицидов переходных металлов [1-3]. Быстрая термическая обработка (БТО), основанная на воздействии импульсного фотонного излучения, обеспечивает кратковременный нагрев до температур 800-1000°C и быстрое охлаждение, что минимизирует диффузионные процессы и сохраняет кристаллическое качество подложки. Исследование тепловых процессов в кремниевых гетероструктурах металл-полупроводник, в частности Ni (5 ат. % Pt)/Si, при БТО

необходимо для оптимизации фазовых превращений и предотвращения механических деформаций подложки.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования являлись кремниевые структуры с нанесёнными тонкими металлическими плёнками состава Ni (5 ат. % Pt)/Si толщиной 50-80 нм. Образцы подвергались импульсной фотонной обработке с длительностью воздействия 1-2 с и плотностью энергии от 140 до 285 Дж/см². Температурный отклик структуры регистрировался пирометрическим методом с временным разрешением до 10⁻³ с. Для уточнения данных использовались измерения с помощью термопары W-Re, контактирующей с обратной стороной пластины. Поверхностная морфология и фазовый состав исследовались методами растровой

электронной микроскопии (РЭМ, JEOL JSM-6610) и рентгенофазового анализа (XRD, CuK α -излучение, шаг 0,02°). Для моделирования тепловых процессов использовалось уравнение нестационарного теплопереноса, дополненное радиационными потерями и коэффициентом отражения поверхности [4-6]:

$$\rho c h \frac{dT}{dt} = (1 - R)E - 2 \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4)$$

где ρ - плотность материала, c - теплоёмкость, h - толщина структуры, E - плотность мощности светового потока, падающего на структуру, R - отражательная способность, T_0 - температура окружающей среды, t - время, ε - степень черноты, σ - постоянная Стефана-Больцмана, T - температура.

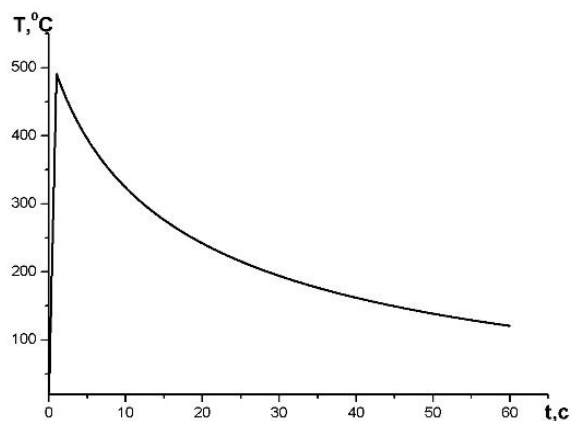
Расчёты проводились с использованием MATLAB и COMSOL Multiphysics с шагом по времени 10^{-5} с. Граничные условия соответствовали отсутствию теплопередачи через подложкодержатель (адиабатическая нижняя граница). Верификация результатов осуществлялась сравнением моделируемых температурных кривых с экспериментальными данными. Расхождение не превышало 5-7 %, что подтверждает корректность принятых допущений.

Результаты и обсуждение. На основе численного и экспериментального анализа установлено, что в кремниевых гетероструктурах Ni (5 ат. % Pt)/Si при импульсной обработке реализуются три характерных режима теплопереноса - адиабатический, теплового потока и теплового баланса. В адиабатическом режиме ($\tau \leq 10^{-6}$ с) энергия поглощается тонким поверхностным слоем, и температура возрастает без теплообмена с подложкой. Такой режим реализуется при лазерных воздействиях пикосекундного диапазона [1-4]. В режиме теплового потока ($10^{-6} \leq \tau \leq 10^{-2}$ с) наблюдается распространение тепловой волны на глубину, сравнимую с толщиной металлического слоя, при этом формируется температурный градиент в подложке. В режиме теплового баланса ($\tau \geq 10^{-2}$ с), реализуемом при БТО длительностью 1-2 с, температура выравнивается по толщине пластины. Экспериментальные данные (табл. 1) показывают, что при плотности энергии 255 Дж/см² температура достигает 820°C, что соответствует началу образования фазы Ni₂Si.

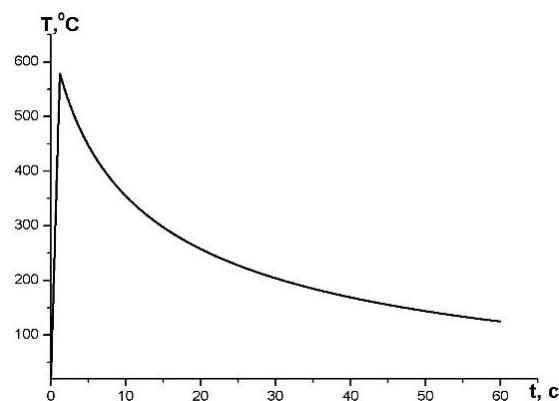
Таблица 1. Режимы быстрой термической обработки (БТО)

Плотность энергии (Дж/см ²)	Время обработки (с)	Температура отжига (С°)
142	1	480
190	1.3	620
230	1.6	745
255	1.8	815
285	2	890

При достижении температур 800-850°C на поверхности образцов в РЭМ наблюдаются зернистые образования, соответствующие фазе Ni₂Si. При дальнейшем повышении температуры (выше 880°C) происходит образование NiSi, что подтверждено по пику ($2\theta = 47,8^\circ$) на рентгенограммах. Дополнительно было установлено, что введение 5 ат. % Pt в никелевый слой способствует стабилизации фазы Ni₂Si и снижению температурного порога перехода в NiSi, что согласуется с данными [7-8].

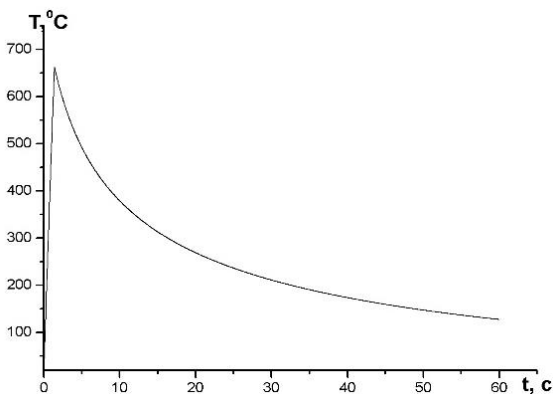


а



б

Рисунок 1.- Зависимость изменения температуры от времени при длительности импульса БТО 1,0 с и плотности энергии 142 Дж/см² (а), а также при длительности импульса БТО 1,2 с и плотности энергии 170 Дж/см² (б)



в

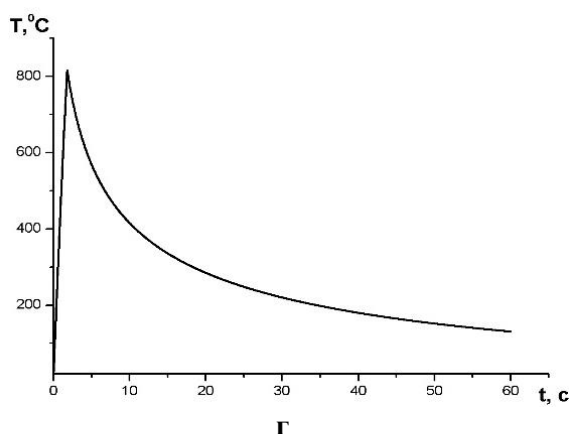


Рисунок 2. Зависимость температуры от времени при длительности импульса БТО 1,4 с и плотности энергии 200 Дж/см² (в), и 1,8 с при 255 Дж/см² (г).

Это объясняется уменьшением диффузионной подвижности атомов кремния и изменением поверхностной энергии границы раздела. Моделирование температурного распределения по толщине структуры показало, что при длительности импульса более 1 с разность температур между поверхностями подложки не превышает 0,5°C, что исключает механические деформации.

Літаратура

1. Борисенко В.Е. Твердофазные процессы в полупроводниках при импульсном нагреве. – Минск: «Наука и техника», 1992.
2. Вейко В.П., Метев С.М. Лазерные технологии в микроэлектронике. – София: «БАН», 1991.
3. Пилипенко В.А. Быстрые термообработки в технологии СБИС. – Минск: Издательский центр БГУ, 2004.
4. Кулагин Н.А. Теплофизика тонких плёнок и микроэлектронных структур. – Москва: «Радио и связь», 1998.
5. Voutsas A. T. et al. Modeling of rapid thermal processes in Si-based systems. // J. Appl. Phys. 85(10), 1999, – P. 7441-7448.
6. Soref R., Liu S. Silicon photonics and thermal effects in microelectronics. // IEEE Trans. Electron Devices, 2007, 54(6), – P. 1201-1210.
7. Маркевич М.И., Камалов А.Б., Асанов Д.Ж., Нажепова С.Р. Исследование элементного состава и фазовых превращений в системе Ni-V-Pt при стационарном отжиге. // Science and World, 2023, № 6(118), – С. 8-10.
8. Асанов Д.Ж., Маркевич М.И., Щербакова Е.Н. Импульсная фотонная обработка тонкоплёночных систем Si/Mg/Si/ситалл. Материалы XVI МНТК молодых учёных и студентов. БНТУ, – Минск: 2023, – С. 128-129.

Таким образом, режим теплового баланса является оптимальным для равномерного нагрева без трещинообразования.

Заклучение. Результаты моделирования и экспериментов показали, что при импульсной фотонной обработке кремниевых гетероструктур Ni (5 ат. % Pt)/Si реализуются три режима теплопереноса. Наиболее технологически эффективным является режим теплового баланса, обеспечивающий равномерный нагрев подложки и стабильность температурного профиля. При плотности энергии 255 Дж/см² и длительности 1,8 с температура достигает 820 °C, что создаёт условия для формирования фазы Ni₂Si. Легирование никелевого слоя платиной способствует улучшению термостабильности системы и качеству силицидного слоя.

Таким образом, импульсная фотонная обработка в режиме теплового баланса представляет собой эффективный метод формирования омических контактов и интерфейсных соединений в кремниевых структурах микро- и нанoeлектроники, обеспечивающий высокую однородность, минимальные термомеханические напряжения и надёжность создаваемых слоёв.