

---



---

## НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

---



---

УДК 621.315:621.785.3

### ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ФОТОННОГО ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ И ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

*Докт. физ.-мат. наук МАРКЕВИЧ М. И.<sup>1)</sup>, докт. физ.-мат. наук, проф. ЧАПЛАНОВ А. М.<sup>2)</sup>,  
канд. физ.-мат. наук ЩЕРБАКОВА Е. Н.<sup>2)</sup>*

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет,

<sup>2)</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси

С увеличением плотности тока в сверх-больших интегральных схемах (СБИС) возникает проблема межслойных соединений и контактов с активными и пассивными элементами схемы. Используемый ранее алюминий подвержен электромиграции, которая приводит к резкому падению надежности СБИС. В качестве замены применяется дисилицид титана ( $TiSi_2$ ), обладающий малым удельным сопротивлением [1, 2]. Наряду с  $TiSi_2$  перспективным материалом для применения в различных электронных устройствах является дисилицид железа  $\beta$ -модификации  $FeSi_2$ . В силу своих электрофизических, оптических и теплофизических свойств он находит применение в солнечных элементах для повышения их коэффициента полезного действия, в источниках излучения с  $\lambda \sim 1,5$  мкм, в волоконно-оптических линиях связи [3, 4]. На основе силицидов железа создают термоэлектрические элементы для термоэлектрических генераторов и резистивные материалы с низким температурным коэффициентом сопротивления [5].

Следует отметить, что дальнейшее увеличение степени интеграции невозможно без применения импульсных методов обработки систем, которые позволяют снижать тепловую нагрузку на полупроводниковую пластину при создании СБИС. В проводимых авторами исследованиях для формирования тонких пленок дисилицидов железа и титана применялся импульсный фотонный отжиг (ИФО).

**Методика эксперимента.** Исходная система для исследования закономерностей форми-

рования дисилицида титана представляла собой многослойную систему  $TiN-Ti-Si$ , которая формировалась на подложке кремния ориентации (001) методом магнетронного нанесения на установке Varian m2i. Предварительно проводилась химическая очистка подложки кремния в буферном травителе на основе HF с последующим ВЧ травлением в атмосфере аргона на глубину 5 нм. После ИФО системы  $TiN-Ti-Si$  снимался верхний защитный слой нитрида титана.

Тонкопленочная система  $Si-Fe-Si$  была сформирована на кремниевой подложке методом электронно-лучевого осаждения. Верхний слой кремния необходим для предотвращения окисления железа. Состав осажденной композиции рассчитывался по формуле

$$P_{Fe} = \rho_{Fe}d_{Fe}/A_{Fe}(\rho_{Fe}d_{Fe}/A_{Fe} + \rho_{Si}d_{Si}/A_{Si}), \quad (1)$$

где  $\rho_{Fe}$  и  $\rho_{Si}$  – плотность железа и кремния;  $A_{Fe}$  и  $A_{Si}$  – атомный вес железа и кремния;  $d_{Fe}$  и  $d_{Si}$  – толщина осажденной пленки железа и кремния;  $P_{Fe}$  – атомное процентное содержание железа.

Согласно расчетам соотношение толщин слоев в многослойной композиции  $Si-Fe-Si$ , оптимальное для формирования дисилицида железа  $FeSi_2$ , составляло 50–30–50 нм.

Напыленные тонкопленочные системы подвергались ИФО на установке УОЛ.П-1, нагрев образцов в рабочей камере осуществлялся излучением трех газоразрядных ксеноновых ламп ИПП 16/250 в вакууме при  $P_{ост} = 3 \cdot 10^{-3}$  Па.

Исследования структурных и фазовых превращений в системах проводили методами

электронной микроскопии на просвет (электронный микроскоп JEM 200-CX) и электронографии на отражение (электронограф малоугловой регистрирующий ЭМР-102). Для расшифровки электронограмм использовали базу данных of the International Centre for Diffraction Data. Исследования элементного состава проводили с помощью системы энергодисперсионного микроанализа для сканирующих микроскопов, установленной на микроскопе SEM 515. Качественный и количественный анализы проводили с помощью пакета программного обеспечения Genesis SEM Quant ZAF software, использующего матрицу ZAF коррекции. Величина ускоряющего напряжения в процессе проведения исследований составляла 6,3 кВ.

**Результаты и их обсуждение.** Режимы термообработки существенно зависят от плотности энергии и длительности обработки. Выделяют три наиболее важных случая [6]:

- адиабатический режим ( $10^{-10}$ – $10^{-6}$  с) реализуется в диапазоне коротких световых импульсов;

- режим теплового потока ( $10^{-6}$ – $10^{-2}$  с) реализуется, когда за время импульсной фотонной обработки область диффузионного перераспределения теплоты становится больше толщины слоя, в котором происходит поглощение излучения, но не распространяется на всю толщину образца [4];

- режим теплового баланса ( $10^{-2}$  с и более) реализуется, когда тепловой фронт достигает не облучаемой стороны образца и выравнивает температурный профиль по толщине.

Перспективность импульсной фотонной обработки в режиме теплового баланса связана с равномерным нагревом пластины по толщине, что обеспечивает отсутствие ее деформаций [4]. При такой обработке кремниевой пластины и гетероструктур на основе кремния с использованием секундных импульсов следует учитывать потери теплоты на излучение от самой пластины. Процесс нагрева пластины и гетероструктуры TiN–Ti–Si импульсами секундной длительности представляют при допущениях [7]:

- импульс излучения имеет прямоугольную форму;

- перед облучением температура гетероструктуры постоянна по всему объему;

- отсутствует теплообмен между пластиной и подложкодержателем;

- отсутствуют градиенты температуры по всем координатам.

Процесс нагрева кремниевой пластины и структуры на ней описывается уравнением теплового баланса [8]

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

где  $\rho$  – плотность кремния;  $c$  – теплоемкость кремния;  $h$  – толщина кремниевой пластины;  $E$  – плотность мощности светового потока, падающего на структуру;  $R$  – отражательная способность;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $t$  – время;  $\varepsilon$  – степень черноты;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана.

Характерные зависимости изменения температуры от времени в исследуемых авторами режимах приведены на рис. 1. На приведенных графиках видно, что в процессе импульсной фотонной обработки происходит резкий подъем температуры за короткий промежуток времени. Согласно рис. 1 за 2 с при плотности энергии  $285 \text{ Дж/см}^2$  температура достигает более  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ . При достижении такой температуры в гетероструктуре TiN–Ti–Si создаются условия для формирования дисилицида титана  $\text{TiSi}_2$  в модификации C54.

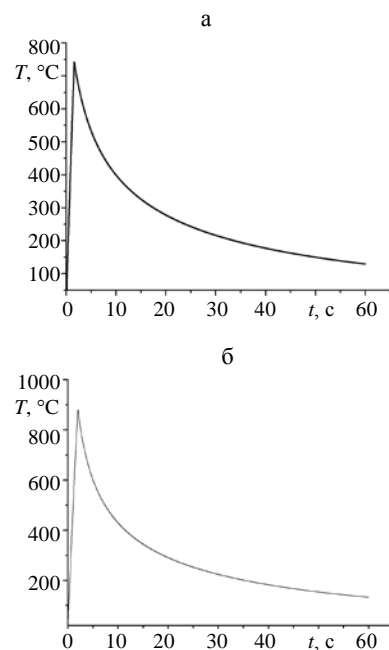


Рис. 1. Изменение температуры образца в зависимости от времени при различных плотности энергии и длительности облучения: а –  $230 \text{ Дж/см}^2$ , 1,6 с; б –  $285 \text{ Дж/см}^2$ , 2,0 с

Методами электронной просвечивающей микроскопии были проведены исследования структуры и фазового состава поверхностного слоя, образовавшегося в результате ИФО системы TiN–Ti–Si. Было установлено, что при плотности энергии 170 Дж/см<sup>2</sup> на поверхности кремния образуется силицид титана TiSi. Увеличение плотности энергии до 300 Дж/см<sup>2</sup> приводит к образованию дисилицида титана TiSi<sub>2</sub> модификации C54 (рис. 2а). На рис. 2б приведена структура пленок, подвергнутых ИФО.

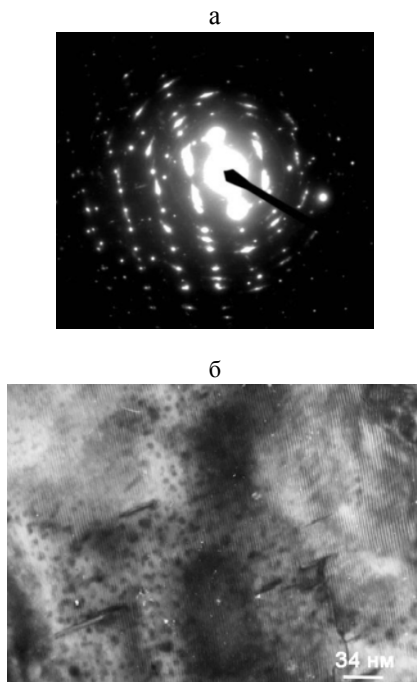


Рис. 2. Электронограмма на просвет (а) и структура (б) тонкопленочной системы TiN–Ti–Si после ИФО при плотности энергии 340 Дж/см<sup>2</sup>

При импульсной фотонной обработке плотностью энергии 340 Дж/см<sup>2</sup> и длительностью 2,2 с происходит эпитаксиальный рост пленок дисилицида титана в модификации C54 на поверхности кремния ориентации (001), о чем свидетельствует наличие муаровых полос на электронно-микроскопическом изображении структуры слоя TiSi<sub>2</sub>–Si (рис. 2). Средний размер зерен составляет 150–200 нм.

Исследования композиции Si–Fe–Si с помощью системы энергодисперсионного рентгеновского микроанализа показали, что атомное соотношение железо:кремний в исходной композиции составляет около 1:2, что является оптимальным для формирования дисилицида железа. Кроме того, исходная композиция содер-

жит существенное количество кислорода, что обусловлено абсорбцией остаточных газов при осаждении тонкопленочной системы и вкладом кислорода из слоя оксида на поверхности кремниевой пластины (рис. 3).

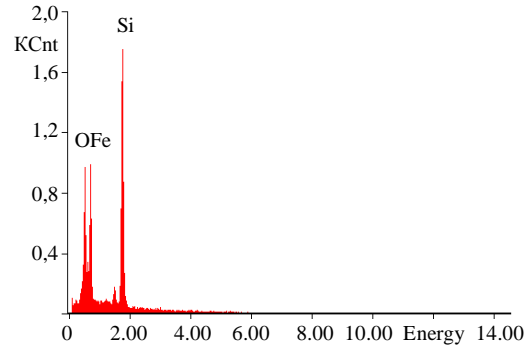


Рис. 3. Рентгеновские спектры исходного образца Si–Fe–Si

Электронографические исследования систем Si–Fe–Si показали, что осажденные пленки являлись аморфными, на электронограммах присутствует характерное гало. Импульсный отжиг при плотности энергии 100–150 Дж/см<sup>2</sup> не приводит к изменению вида электронограмм, пленки остаются аморфными. Как показывает расшифровка полученных электронограмм от образцов после ИФО с плотностью энергии 200 Дж/см<sup>2</sup> и длительностью импульса 1,4 с (температура 670 °С), на поверхности системы образуется поликристаллическая пленка, состоящая из дисилицида железа β-модификации FeSi<sub>2</sub>. При увеличении плотности энергии до 250 Дж/см<sup>2</sup> вид электронограммы не изменяется (рис. 4).

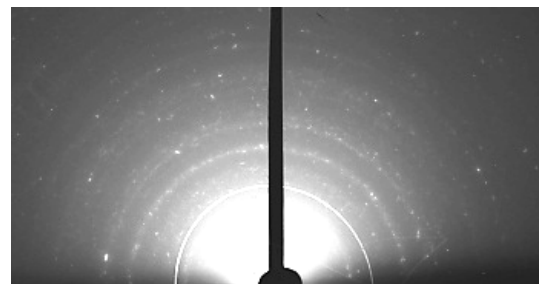


Рис. 4. Электронограмма на отражение от тонкопленочной системы Si–Fe–Si после ИФО при плотности энергии 250 Дж/см<sup>2</sup>

Результаты рентгеноспектральных измерений с дисперсией по энергии согласуются с данными, полученными с использованием электронографии.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлены основные закономерности структурных и фазовых превращений, происходящих в тонкопленочных системах TiN–Ti–Si и Si–Fe–Si при воздействии импульсов некогерентного излучения ксеноновых ламп с плотностью энергии от 100 до 340 Дж/см<sup>2</sup>. Определены оптимальные режимы импульсного фотонного отжига для формирования на кремнии тонких пленок дисилицидов железа FeSi<sub>2</sub> и титана TiSi<sub>2</sub>. При плотности энергии более 275 Дж/см<sup>2</sup> происходит формирование дисилицида титана в модификации C54. Результаты исследований свидетельствуют о перспективности использования импульсного фотонного отжига для синтеза тонких пленок силицидов титана и железа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Синтез пленок TiSi<sub>2</sub> в процессе вакуумной конденсации и методом импульсной фотонной обработки /

В. М. Иевлев [и др.] // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2009. – Т. 11, № 3. – С. 216–220.

2. Ion beam synthesized silicides: growth, characterization and devices / K. Homewood [et al.] // Thin Solid Films. – 2001. – Vol. 381, Issue 2. – P. 188–193.

3. Experimental investigation of the band edge anisotropy of the b-FeSi<sub>2</sub> semiconductor / M. Marinova [et al.] // Solid State Sciences. – 2008. – Vol. 10. – P. 1369–1373.

4. Исследование сверхтонких пленок силицида железа, выращенных твердофазной эпитаксией на поверхности Si (001) / В. В. Балашев [и др.] // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 52, вып. 2. – С. 370–376.

5. Формирование резистивных свойств двухфазных систем полупроводник – металл на основе FeSi<sub>1+x</sub> при малых отклонениях от стехиометрии / А. А. Повзнер [и др.] // ЖТФ. – 2001. – Т. 71, вып. 8. – С. 109–111.

6. Пилипенко, В. А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В. А. Пилипенко. – Минск: Издательский центр БГУ, 2004. – 531 с.

7. Электрофизические и механические свойства дисилицида титана, полученного с применением быстрой термообработки / В. А. Пилипенко [и др.] // Вестник БГУ. – 2001. – Сер. 1. – № 2. – С. 43.

8. Борисенко, В. Е. Твердофазные процессы в полупроводниках при импульсном нагреве / В. Е. Борисенко. – Минск: Наука и техника, 1992. – 247 с.

Поступила 06.02.2012