

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

Докт. физ.-мат. наук, доц. *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 сверхбольших интегральных схемах (СБИС) возникает проблема межслойных соединений и контактов к активным и пассивным элементам схемы. Используемый ранее алюминий подвержен электромиграции, которая приводит к резкому падению надежности СБИС. В качестве замены применяется дисилицид титана ( $\text{TiSi}_2$ ), обладающий малым удельным сопротивлением [1, 2]. Наряду с  $\text{TiSi}_2$  перспективным материалом для различных электронных устройств является дисилицид железа  $\beta\text{-FeSi}_2$ . 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 импульсных методов обработки систем, которые позволяют снижать тепловую нагрузку на полупроводниковую пластину при создании СБИС. В данной статье рассматривается импульсный фотонный отжиг (ИФО), который применяли для формирования тонких пленок дисилицидов железа и титана.

**Методика эксперимента.** Исходная система для исследования закономерностей формирования дисилицида титана представляла собой

многослойную систему  $\text{TiN-Ti-Si}$ , которая формировалась на подложке кремния ориентации (001) методом магнетронного нанесения на установку Varian m2i. Предварительно проводили химическую очистку подложки кремния в буферном травителе на основе HF с последующим ВЧ травлением в атмосфере аргона на глубину 5 нм. После ИФО системы  $\text{TiN-Ti-Si}$  снимался верхний защитный слой нитрида титана.

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

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

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

Согласно расчетам соотношение толщин слоев в многослойной композиции  $\text{Si-Fe-Si}$ , оптимальное для формирования силицида железа  $\text{FeSi}_2$ , составляло 50–30–50 нм соответственно.

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

Исследования структурных и фазовых превращений в системах проводили методами электронной микроскопии на просвет (элек-

тронный 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 выполняли 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 необлучаемой стороны образца и выравнивает температурный профиль по толщине.

Перспективность импульсной фотонной обработки в режиме теплового баланса связана с равномерным нагревом пластины по толщине, что не позволяет ей деформироваться [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 реализуют 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  $\rho$ ,  $c$  – плотность и 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 графиках рис. 1. Из графиков видно, что в процессе импульсной фотонной обработки происходит резкий подъем температуры за короткий промежуток времени: 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.

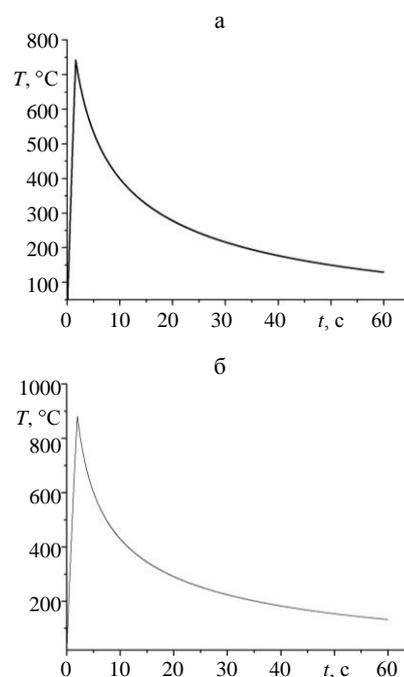


Рис. 1. Изменение температуры образца в зависимости от времени при различных плотностях энергии и длительности облучения: а –  $230 \text{ Дж/см}^2$ , 1,6 с; б –  $285 \text{ Дж/см}^2$ , 2 с

Методами электронной просвечивающей микроскопии провели исследования структуры и фазового состава поверхностного слоя, образовавшегося в результате ИФО системы TiN–Ti–Si. Было установлено, что при плотностях 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.

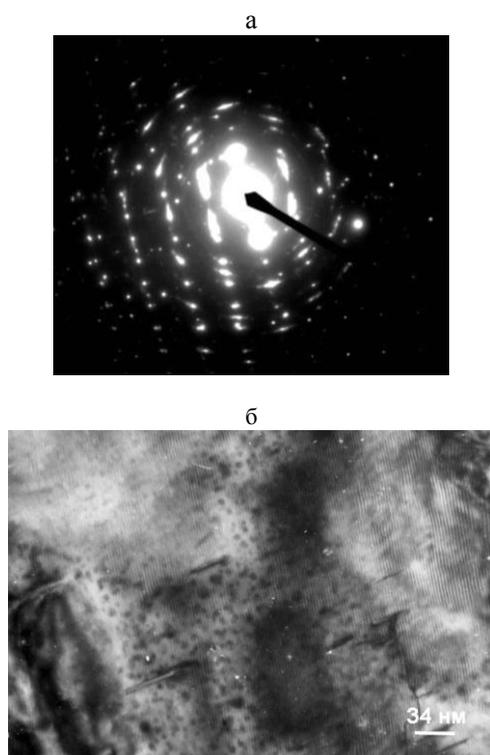


Рис. 2. Электронограмма на просвет (а) и структура (б) тонкопленочной системы TiN–Ti–Si после ИФО при плотности энергии 340 Дж/см<sup>2</sup>

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 с ориентацией (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 ком-

позиции составляет около 1:2, что является оптимальным для формирования дисилицида железа. Кроме того, исходная композиция содержит существенное количество кислорода, что обусловлено абсорбцией остаточных газов при осаждении тонкопленочной системы и вкладом кислорода из слоя оксида на поверхности кремниевой пластины (рис. 3).

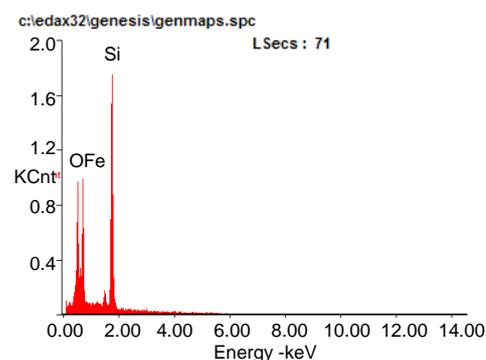


Рис. 3. Рентгеновские спектры исходного образца Si–Fe–Si

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).

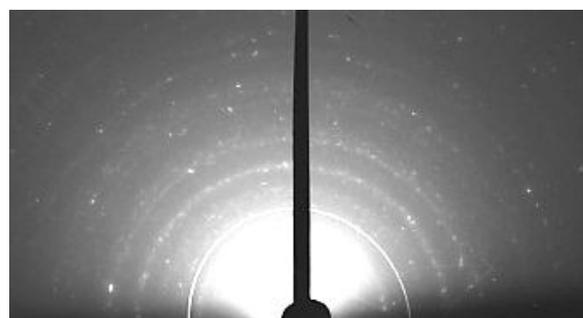


Рис. 4. Электронограмма на отражение от тонкопленочной системы Si–Fe–Si после ИФО при плотности энергии 250 Дж/см<sup>2</sup>

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

### ВЫВОД

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 и титана. При плотностях 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 06.07.2012