

- Shan, Q. Analysis of thermal properties of GaInN light-emitting diodes and laser diodes/ Shan Qifeng, Qi Dai, Sameer Jaehee Cho, and Fred Schubert // J. Appl. Physics. – 2010. - V.108, 084504.
- Манего С.А. Анализ переходных тепловых процессов в светодиодах / С.А. Манего, С.И.

Лишик // Наука – образованию, производству, экономике: сборник материалов 8-ой Международной научно-технической конференции, секция «Физика», г. Минск, 15 апреля 2010 г. / под ред. Б.М. Хрусталева, Ф.А. Романюка, А.С. Калиниченко. – Минск: БНТУ, 2010. - Т.3. – С.349.

УДК 535.21; 538.9.

СИНТЕЗ ТОНКИХ ПЛЕНОК СИЛИЦИДОВ И ГЕРМАНИДОВ ТИТАНА ДЛЯ СБИС

Маркевич М.И.¹, Чапланов А.М.², Щербакова Е.Н.¹

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

²Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Одной из наиболее важных проблем при изготовлении СБИС является обеспечение низких сопротивлений проводящих дорожек и контактов со стабильными свойствами при эксплуатации в условиях высоких температур и уровней радиации [1-5].

Использование силицидов металлов таких, как платина, титан, никель, кобальт позволяет снизить сопротивление [2-7]. Для этих же целей могут использоваться и дигерманиды и субгерманиды титана. Кроме того, процессы изготовления СБИС должны проводиться при достаточно низких температурах, чтобы уменьшить диффузию легирующих примесей, либо использовать быструю термическую обработку (БТО) пластин при высоких температурах [1-7].

Импульсные ламповые нагреватели обеспечивают нагрев имплантированного полупроводника за малый промежуток времени [1-3,6,7]. При кратковременном воздействии обработка пластин происходит, как правило, без перераспределения внедренной примеси, которая не успевает диффундировать на большое расстояние, что позволяет сформировать мелкозалегающие *p-n* переходы. [1-3,7]. Целью данной работы являлось формирование пленок силицидов и германидов титана и исследование их фазового состава.

В соответствии с равновесной диаграммой состояний [8], показанной на рисунке 1, в системе Ti-Si в диапазоне температур протекания твердофазных реакций стабильны соединения: Ti_3Si , Ti_5Si_3 , Ti_3Si_4 , $TiSi$, $TiSi_2$.

$TiSi_2(C54)$ – высокотемпературная модификация пространственной группы *Fddd* (орторомбическая гранецентрированная решетка с параметрами $a = 0,8252$ нм, $b = 0,4783$ нм, $c = 0,8540$ нм), которая используется для изготовления проводящих дорожек и контактов со стабильными свойствами.

В процессе твердофазной диффузии полной последовательности фаз, разрешенных равновесной диаграммой состояния не наблюдается в силу ряда лимитирующих факторов: а)

высокий энергетический барьер зародышеобразования; б) низкое значение коэффициента диффузии; в) малая скорость химической реакции. Перечисленные факторы находятся в сильной зависимости от присутствия примесей, в особенности от кислорода, углерода, азота, находящихся на границе раздела пленка-подложка и в пленке.

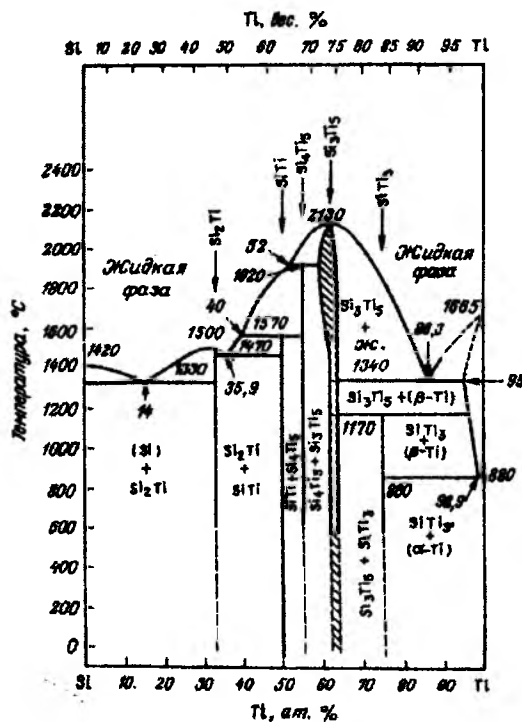


Рисунок 1-Фазовая диаграмма равновесия Si – Ti

Примесь на границе раздела служит барьером для диффузии кремния. Начало образования дисилицидной фазы в пленках, осажденных на чистую поверхность кремния в условиях сверхвысокого вакуума, происходит при температурах ниже 500 °С.

При получении дисилицида титана в модификации C54 предварительно проводилась химическая очистка подложки кремния в буферном

травителе на основе HF, затем в едином вакуумном цикле пластины кремния подвергались ВЧ травлению в атмосфере аргона на глубину 5 нм.

Затем на подложку кремния, имеющего ориентацию (001), методом магнетронного нанесения на установке Varian m2i последовательно осаждались пленки титана и нитрида титана.

Быстрый термический отжиг проводился галогенными лампами в две стадии. Первая проводилась при температуре 600°C-650°C, а вторая при 850°C.

В отличие от ксеноновых ламп спектр излучения галогенных ламп находится в диапазоне выше 0,5 мкм, как показано на рисунке 2. Спектр излучения галогенных ламп смещен в ИК-область.

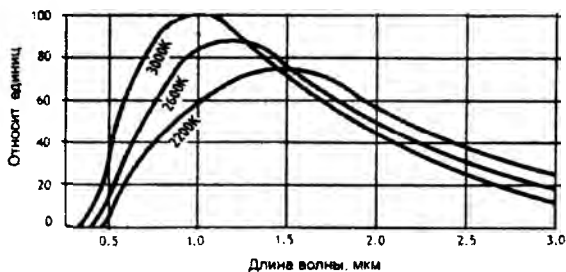


Рисунок 2 - Спектральная характеристика галогенных ламп [9]

Исследования фазового состава пленок проводились методами электронографии (электронограф ЭМР-102) и просвечивающей электронной микроскопии. Для расшифровки электронограмм использовали базу данных «Of the International Centre for Diffraction Data».

Проведенные исследования показали, что после второй стадии отжига при температуре 850°C на поверхности кремния образуется дисилицид титана TiSi₂ в модификации C54 (табл. 1).

Таблица 1 - Результаты расчета электронограмм, полученных при БТО (T=850°C, t=30с) системы TiN/Ti/Si

Экспериментальные d, Å	Теоретические d, Å (ASTM)	hkl	Фазовый состав
3,20	3,19	021	TiSi ₂ (C54)
2,83	2,84	130	TiSi ₂ (C54)
2,24	2,23	131	TiSi ₂ (C54)
1,92	1,935	061	TiSi ₂ (C54)
1,82	1,81	200	TiSi ₂ (C54)
1,54	1,52	132	TiSi ₂ (C54)
1,43	1,42	230	TiSi ₂ (C54)

Для изучения закономерностей формирования германидов титана был проведен плаз-

менный отжиг тонкопленочной системы Ge-Ti-Ge при давлении аргона в рабочей камере ~4,0 Па 5, 10 и 15 импульсами продолжительностью 1 секунда. Как показывают результаты исследований методами электронографии, плазменный отжиг (5 импульсов) приводит к образованию субгерманида титана Ge₃Ti₅ (рисунок 3). При данных режимах обработки происходит взаимная диффузия титана и германия с их последующим взаимодействием [10].

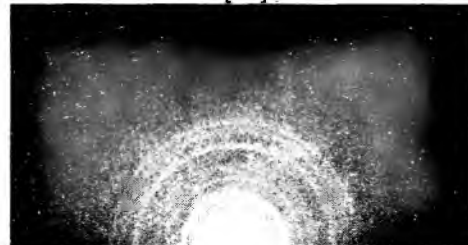


Рисунок 3- Электронограмма от системы Ge-Ti-Ge после импульсного отжига плазмой дугового разряда в среде аргона

Увеличение количества импульсов до 10 и 15 приводит к росту зерен Ge₃Ti₅ и образованию наряду с данным соединением дигерманида титана TiGe₂ модификации C49 (рис.3). Формирования однофазных пленок TiGe₂ при данных режимах плазменного отжига не наблюдалось.

1. Пилипенко, В.А. Быстрые термообработки в технологии СБИС /В.А. Пилипенко.- Мн: Изд. центр БГУ, 2004.- 531 с.
2. Борисенко, В.Е. Твердофазные процессы в полупроводниках при импульсном нагреве/ В.Е. Борисенко. - Мн.: Наука и техника, 1992.- 247 с.
3. Пилипенко, В.А. Электрофизические и механические свойства дисилицида титана, полученного с применением быстрой термообработки / В.А. Пилипенко [и др.] // Вестник БГУ. - 2001. - Сер.1. - №2. - С. 43.
4. Mainstream rapid thermal processing for source-drain engineering from first applications to latest results / J. Niess. [et al.] // Materials Science and Engineering B. - 2004. - V.114-115. - P.141-150.
5. Formation of palladium and titanium silicides by rapid thermal annealing / D. Levy [et al.] // Physica B+C.-1985.-V. 129.- P. 205-209.
6. Иевлев, В.М. Твердофазный синтез силицидов при импульсной фотонной обработке гетеросистем Si-Me (Me: Pt, Pd, Ni, Mo, Ti) / В.М. Иевлев [и др.] // ФХОМ, 2002.- № 1. - С.27-31.
7. Комаров, Ф.Ф. Ионная и фотонная обработка материалов /Ф.Ф. Комаров // Мн.: Из-во «ВУЗ – ЮНИТИ».-1998.-210с.
8. Moffat, W.G. The Handbook of Binary Phase Diagrams / W.G.Moffat [at al.] - New York:

- General Electric Co. Schenectady, 1978. (updated 1982).
9. Mattson Thermal Products GmbH. RTP Course: Theory and Practice. Ed. Z.Nenyei // 4th edition, April 2005. – P. 125.

10. Hong, Q. Z. Formation of a C49 TiGe₂ phase during annealing a coevaporated Ti_{0.33}Ge_{0.67} alloy/ Q. Z. Hong, K. Barmak, F. M. d'Heurle // M.Apl.Phys.Lett.- 1998. - 62(26) – P.3435-3438.

УДК 620.179.14

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТЕРЖНЕЙ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Матюк В.Ф., Короткевич З.М., Осипов А.А.

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси
Минск, Республика Беларусь

При разработке новых методов и средств магнитного контроля качества изделий машиностроения в виде стержней необходимо учитывать распределение индукции вдоль их длины. Сложный характер процессов перемагничивания конкретных тел не позволяет применить для расчета строгие аналитические методы. В связи с этим для решения многих практических задач применяются или приближенные полуэмпирические формулы, или используются численные методы расчета.

При расчете следует учитывать не только размеры стержня, но и магнитные свойства материала, из которого он изготовлен, в зависимости от величины и конфигурации приложенного магнитного поля.

В качестве метода расчета был выбран разработанный в лаборатории магнитных методов контроля Института прикладной физики подход, основанный на методе пространственных интегральных уравнений с применением в качестве выражений для описания кривой намагничивания и петли магнитного гистерезиса функций на основе арктангенсов [1].

Метод заключается в использовании общего интегрального выражения для напряженности магнитного поля или индукции через намагниченность \vec{M} элементов магнитной системы

$$\vec{H}^M(Q) = -\frac{1}{4\pi} \text{grad}_Q \int_{V_M} \vec{M}(Q) \text{grad}_N \left(\frac{1}{r_{NQ}} \right) dV_N, \quad (1)$$

где $\vec{H}^M(Q)$ – напряженность магнитного поля, создаваемая ферромагнитным объектом; \vec{r}_{NQ} – радиус-вектор из точки источника N поля в точку наблюдения Q ; V_M – объем, занимаемый ферромагнетиком.

Для описания гистерезисного цикла использовали следующее выражение из [2]

$$M = \chi_n \frac{H_{cs}^2 H}{H_m^2 + H_{cs}^2} \pm \frac{M_s}{\pi} \frac{H_m^2}{H_m^2 + k_0 H_{cs}^2} \times$$

$$\times \left[2 \arctg \frac{H_{cs} \pm H}{H_0} - \left(\arctg \frac{H_{cs} + H_m}{H_0} + \arctg \frac{H_{cs} - H_m}{H_0} \right) \right],$$

$$H_0 = \frac{H_{cs}}{\text{tg} \left(\frac{\pi M_{rs}}{2 M_s} \right)}, \quad k_0 = \frac{M_s}{\pi} \frac{\arctg \left(2 \frac{H_{cs}}{H_0} \right)}{M_c - \chi_n \frac{H_{cs}}{2}} - 1, \quad (2)$$

где M_s и χ_n – соответственно намагниченность насыщения и начальная магнитная восприимчивость материала стержня, H_{cs} и M_{rs} – коэрцитивная сила и остаточная намагниченность материала стержня по предельному циклу, H_m – максимальная напряженность намагничивающего поля, M_c – значение намагниченности материала стержня на основной кривой при поле H_{cs} .

Результаты расчета распределения индукции B вдоль стержня относительно его длины сравнивали со значениями, определенными по результатам измерения магнитной индукции в квазистатическом магнитном поле. Максимальное значение намагничивающего поля варьировалось в пределах от 40 до 1 кА/м. Частота перемагничивания составляла 0,05 Гц.

Исследование проводили на цилиндрических стержнях из инструментальной стали У10А диаметром 200 мм и длиной 10 мм, закаленных от разных температур.

Сравнение показало, что при описании гистерезисного цикла по (2) различие между результатами расчета и экспериментальными данными может достигать 10 % (расчет дает завышенный результат). При этом максимальное различие наблюдается в центре стержня из более мягкого в магнитном отношении материала (состояние поставки). Размагничивающее поле торцов стержней сводит это различие до нуля. С уменьшением величины H_m оно также уменьшается (рисунки 1 и 2).