

ВЫРАЩИВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР 3C-SiC/(100) Si ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

М. В. Лобанок¹, С. Л. Прокопьев¹, М. А. Моховиков², П. И. Гайдук¹

¹) Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,

²) Белорусский государственный университет, Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко, ул. Курчатова 7, 220045 Минск, Беларусь,
e-mail: mishalobanok@gmail.com

Разработан и апробирован метод выращивания тонких слоев SiC на подложке (100) Si при быстрой термической обработке (БТО). БТО проводился при 1100 °С в течение 30 сек в вакуумной камере при остаточном давлении 1×10^{-2} Па. В качестве источника углерода использована смесь пропан-аргон (10 % C₃H₈/Ar), или пары масла, используемого в вакуумной системе установки БТО. Методами просвечивающей электронной микроскопии и электронной дифракции установлено, что в указанных режимах на подложке (100) Si формируются тонкие пленки β-SiC, эпитаксиальные подложке.

Ключевые слова: карбид кремния; углеродсодержащая атмосфера; быстрая термическая обработка.

3C-SiC/Si (100) HETEROSTRUCTURE FORMATION DURING RAPID THERMAL TREATMENT

M. V. Lobanok¹, S. L. Prakopyeu¹, M. A. Makhavikou², P. I. Gaiduk¹

¹) Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus

²) Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University, 220045 Minsk, Belarus
Corresponding author: M. V. Lobanok (mishalobanok@gmail.com)

Thin epitaxial layers of SiC were grown on (100) Si by rapid thermal processing (RTP) in a vacuum of $1 \cdot 10^{-2}$ Pa with a residual propane-argon mixture atmosphere. A formation of two-phase system of single- and polycrystalline cubic SiC was investigated by transmission electron microscopy and diffraction.

Key words: silicon carbide; residual carbon atmosphere; rapid thermal processing.

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые приборы силовой электроники, способные работать при высоких температурах и в агрессивных средах, востребованы для решения задач автоматизации машин различного назначения, а также в области сетевых коммуникаций. Карбид кремния (SiC) и его политипы представляют огромный интерес в области развития силовых и оптоэлектронных устройств. SiC имеет уникальную комбинацию физических и химических свойств [1]. С другой стороны, гетероструктуры SiC/Si являются альтернативой дорогим в производстве монокристаллическим подложкам SiC. Вместе с тем, различие коэффициентов термического расширения и несоответствия параметров кристаллических решеток Si и SiC приводит к формированию дефектов кристаллического строения, что негативно сказывается на электрофизических

характеристиках приборных структур [2]. Для снижения интенсивности формирования дефектов в процессе роста в последние годы используют различные буферные слои [2–4], из чего следует, что гетероструктуры SiC/Si в качестве буферных слоев для активных структур на основе SiC, GaN, AlN на подложках Si могут быть интегрированы в кремниевую технологию [5–7]. Основным способом формирования гетероструктуры SiC/Si является карбидизация кремниевых пластин [3–5]. Однако, с точки зрения диапазона температур режимы карбидизации в большинстве случаев не совместимы с режимами формирования полупроводниковых структур для кремниевых приборов. Для изучения низкотемпературных режимов карбидизации можно использовать оборудование для быстрой термической обработки (БТО) кремниевых пластин, позволяющее точно соблюдать заданные условия процесса. В случае SiC, БТО в основном применялась для термообработки имплантированных слоев [6–7], формирования омических контактов [8–10] и контактов Шоттки [11], карбидизации кремниевых подложек и эпитаксиального роста SiC на Si путем быстрого термического химического осаждения из паровой фазы [12–14].

В настоящей работе исследованы процессы формирования тонких слоев SiC в процессе быстрой вакуумно-термической обработки пластины кремния. Изучается влияние остаточной атмосферы на структурные характеристики выращиваемых слоев SiC.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве подложек для выращивания SiC (карбидизации) использовались монокристаллические пластины кремния марки КДБ-12 с ориентацией (100). Перед проведением процесса карбидизации все подложки разрезались на образцы прямоугольной формы со стороной не более 5 см, которые затем очищались в 5 % водном растворе плавиковой кислоты (HF: H₂O) с последующей промывкой в деионизированной воде, затем осушались сжатым азотом и помещались в камеру. Система быстрой термической обработки (БТО), используемая в данном исследовании, представляла собой модифицированную установку Jipelec JetFirst-100. Реакционная камера позволяла работать в вакууме и обрабатывать большие площади (диаметром до 100 мм) с использованием ксеноновых ламп на верхней стороне камеры. Типичное достижимое давление в камере для проведения процесса составляло 1×10^{-2} Па. Процесс карбидизации Si-пластин включал в себя следующие этапы: повышение температуры до 1100 °С при давлении 1×10^{-2} Па и карбидизация при 1100 °С в течение 30 в остаточной углеродсодержащей атмосфере (в смеси пропан-аргон (10% C₃H₈/Ar), либо в парах вакуумного масла, используемого в вакуумной системе установки БТО).

Структурные свойства структур SiC/Si изучали методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и просвечивающей электронной дифракции (ПЭД) с использованием микроскопа Hitachi H-800. С целью обнаружения влияния состава рабочей атмосферы на структурные свойства слоев SiC проводились сравнительные ПЭД исследования структур, выращенных как в атмосфере пропан-аргон (C₃H₈/Ar), так и в атмосфере с остаточными углеводородами из-за присутствия паров вакуумного масла. Образцы для исследований утонялись в планарном виде химико-динамическим методом в смеси концентрированных кислот HF: HNO₃ = 1:5.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ключевые выводы о формировании тонких слоев SiC высокого структурного качества на кремниевых подложках, т.е. формировании преимущественно эпитаксиальной тонкой пленки формулировались на основании анализа электронограмм (ПЭД-микрофотографий), приведенных на рисунках 1 (*а* и *б*).

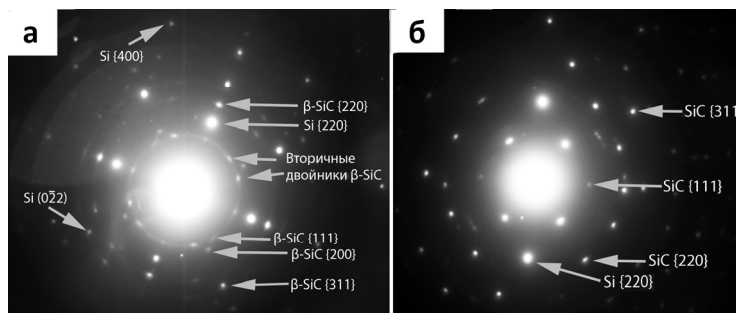


Рисунок 1. – ПЭД-микрофотография образца структуры SiC/Si, сформированной при температуре 1100 °С в течение 30 сек на кремниевой пластине (100) ориентации: *а* – в атмосфере остаточных углеводородов, *б* – в остаточной атмосфере смесь пропан-аргон (10 % C₃H₈/Ar)

На рисунке 1, *а* представлена ПЭД-микрофотография образца структуры SiC/Si, выращенной в атмосфере остаточных углеводородов из-за паров вакуумного масла при 1100 °С в течение 30 секунд. На изображении присутствуют рефлексы типа {220} и {400} от подложки кремния. Хорошо различимы рефлексы типа {111}, {220} и {311}, соответствующие кубическому типу решетки карбида кремния (β -SiC, 3C-SiC). Различимые тонкие кольца на ПЭД-микрофотографии свидетельствует о наличии поликристаллических включений 3C-SiC в структуре. Рефлексы типа {111} 3C-SiC свидетельствуют о присутствии в выращенном слое SiC микродвойников 2-го порядка. Из рассмотрения электронограммы можно сделать несколько важных выводов: 1) выращенная структура представляет собой смесь моно- и поликристаллической фазы 3C-SiC; 2) из сравнения интенсивности точечных рефлексов SiC с дифракционными кольцами следует преобладание монокристаллической фазы SiC.

На рисунке 1, *б* приведена ПЭД-микрофотография образца SiC/Si структуры выращенной при карбидизации в остаточной атмосфере смеси пропана-аргона при 1100 °С в течение 30 сек. На ПЭД-микрофотографии отчетливо видны две группы точечных рефлексов: кремниевой подложки типа {220} Si, а также {111}, {220} и {311}, соответствующие 3C-SiC. Рефлексы, индексируемые как 3C-SiC, свидетельствуют о некоторой разориентации зерен β -SiC.

На рисунке 2 показаны светлопольное и темнопольное изображения ПЭМ, характеризующие гетероструктуру SiC/Si сформированную при температуре 1100 °С в течение 30 сек в остаточной атмосфере смеси пропана-аргона. Как видно из этих изображений, отдельные участки структуры на границе и внутри пор имеют поликристаллическую структуру. Размер этих зерен определялся по изображениям темного поля, полученного в рефлексе {111} 3C-SiC и не превышал 30 нм.

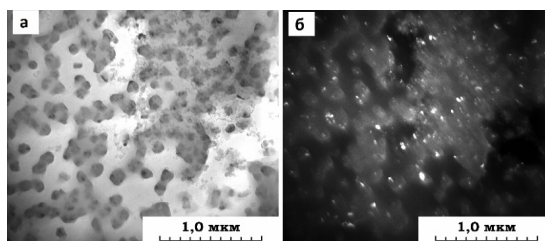


Рисунок 2. – ПЭМ-микрофотографии в планарном сечении в режиме светлого (а) и темного (б) поля образца структуры SiC/Si, сформированной при температуре 1100 °C в течение 30 сек на кремниевой пластине (100) ориентации в остаточной атмосфере смесь пропан-аргон (10% C₃H₈/Ar)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформированы гетероструктуры SiC/Si с помощью быстрой вакуумно-термической обработки пластины кремния. С использованием методов ПЭМ и ПЭД показано, что при условиях процесса 1100 °C в течение 30 сек в остаточной атмосфере пропан-аргон (10% C₃H₈/Ar) выращен слой преимущественно монокристаллического кубического поли типа β-SiC (3C-SiC) с поликристаллическими включениями.

Исследования выполнены в рамках проекта 3.2.04 ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника», номер госрегистрации 20190644.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Shenai, K. Optimum semiconductors for high-power electronics / Shenai, K., Scott, R. S., Baliga, B. J. // IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 36, issue 9, pp. 1811-1823.
2. Ferro, G. 3C-SiC Heteroepitaxial Growth on Silicon: The Quest for Holy Grail/ G. Ferro // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. - 2015. - №76. – p. 40-56.
3. Bosi M. 3C-SiC carbonization optimization and void reduction on misoriented Si substrates: from a research reactor to a production scale reactor / M. Bosi, C. Ferrari, D. Nilsson, P. J. Ward // Crys-tEngComm, 2016,18, 7478-7486.
4. Zimbone M. Protrusions reduction in 3C-SiC thin film on Si / M. Zimbone, M. Mauceri, G. Litrico, E.G. Barbagiovanni, C.Bongiorno, F. La Via // Journal of Crystal Growth - 2018, vol. 498, p. 248–257.
5. Skibarko, I.A. Structural and optical properties of GaN/SiC/Si heterostructures grown by MBE / I.A. Skibarko, O.V. Milchanin, P.I. Gaiduk, [et al.] // Inst.Phys.Conf.Ser. – 1999. – № 166. – P. 465–469.
6. Pezoldt, J.; Kalnin, A.A.; Moskkwna, D.R.; Savalyev, W.D. Polytype transitions in ion implanted silicon carbide. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B 1993, 80–81, 943–948.
7. Ottaviani, L.; Lazar, M.; Locatelli, M.L.; Chante, J.P.; Heera, V.; Skorupa, W. Annealing studies of Al-implanted 6H-SiC in an induction furnace. Mater. Sci. Eng. B 2002, 91–92, 325–328.
8. Wang, Z.; Liu, W.; Wang, C. Recent progress in ohmic contacts to silicon carbide for high-temperature applications. J. Electron. Mater. 2016, 45, 267–284.
9. Porter, L.M.; Davis, R.F. A critical review of ohmic and rectifying contacts for silicon carbide. Mater. Sci. Eng. B 1995, 34, 83–105.
10. Vasilevskiy, K.; Zekentes, K.; Wright, N. Processing and characterization of ohmic contacts to silicon carbide. Adv. Res. Found. 2018, 37, 27–126.
11. Roccaforte, F.; Brezeanu, G.; Ganmon, P.M.; Giannazzo, F.; Rascuna, S.; Saggio, M. Schottky contacts to silicon carbide: Physics, technology and applications. Adv. Res. Found. 2018, 37, 127–190.
12. Steckl, A.J.; Li, J.P. Epitaxial growth of beta-SiC on Si by RTCVD with C₃H₈ and SiH₄. IEEE Trans. Electron Dev. 1992, 39, 64–74.
13. Cimalla, V.; Pezoldt, J.; Ecke, G.; Eichhorn, G. The buffer layer in RTCVD of SiC. Inst. Phys. Conf. Ser. 1996, 142, 153–156.
14. Skorupa, W.; Panknin, D.; Anwand, W.; Voelskow, M.; Ferro, G.; Monteil, Y.; Leycuras, A.; Pezoldt, J.; McMahon, R.; Smith, M.; et al. Flash lamp supported deposition of 3C-SiC (FLASiC) – A promising technique to produce high quality cubic SiC layers. Mater. Sci. Forum 2004, 457–460, 175–180.