

УДК 681.7:539.216.22

Поликристаллические слои сплава кремний—германий для неохлаждаемых болометрических приемников ИК-излучения

И. Б. Чистохин, И. П. Михайловский, Б. И. Фомин, Е. И. Черепов
Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Поликристаллические слои $Si_{1-x}Ge_x$ с различным содержанием германия, легированные бором, были получены методом молекулярно-лучевого осаждения на пленках оксида и нитрида кремния при температуре < 500 °С. Изучены структурные свойства этого материала, измерены температурные зависимости сопротивления и спектры шумов. Показано, что температурный коэффициент сопротивления (ТКС) в поликристаллических слоях SiGe, осаждаемых на различные диэлектрические покрытия, достигает 3—4 % на градус и зависит от сопротивления слоя и размера зерна.

В последнее время интенсивно ведутся исследования для разработок неохлаждаемых микро-болометрических матриц ИК-диапазона, использующих терморезистивные свойства чувствительного элемента, теплоизолированного от интегральной схемы считывания. Материалы, необходимые для изготовления болометрических элементов, должны обладать высоким значением ТКС, малыми величинами шумов и теплопроводности, иметь низкую температуру осаждения (< 500 °С) слоев, а также возможность интеграции в стандартные технологические процессы изготовления.

Оксид ванадия — нестандартный материал для интегральной микроэлектронной технологии [1], металлы имеют низкое значение ТКС [2], аморфные полупроводники характеризуются большими уровнями шумов и теплопроводности [3]. Одним из перспективных материалов для этого может быть поликристаллический SiGe [4—6], полученный методом осаждения из газовой фазы при атмосферном или пониженном давлении (APCVD и LPCVD).

Цель данной работы — получение поликристаллических слоев $Si_{1-x}Ge_x$ методом молекулярно-лучевого осаждения на диэлектрических пленках оксида и нитрида кремния и исследование их характеристик.

Нами использовался метод молекулярно-лучевого осаждения (МЛО) кремния и германия в сверхвысоком вакууме. Это связано с целым рядом особенностей:

возможность получения поликристаллических слоев SiGe высокой чистоты (уровень фоновой примеси $\sim 10^{15} - 10^{16}$ см⁻³) за счет роста в сверхвысоком вакууме и чистоты молекулярных потоков;

возможность контроля условий роста встроенными в ростовую камеру аналитическими средствами;

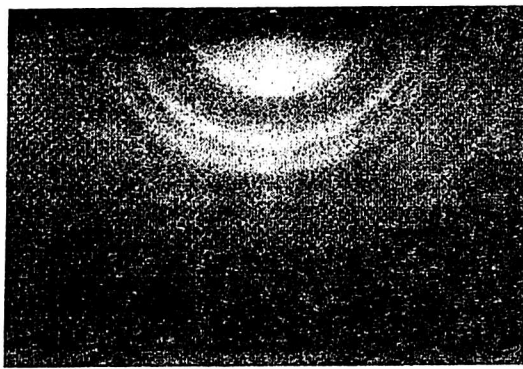
относительно низкие температуры осаждения слоев (< 500 °С).

Осаждение слоев $Si_{1-x}Ge_x$ на диэлектрические пленки оксида, нитрида и оксинитрида кремния проводилось в однокамерной установке типа “Катунь”, оснащенной отдельными кварцевыми датчиками, дифрактометром быстрых электронов и монополярным масс-спектрометром. Молекулярный поток кремния создавался с помощью электронно-лучевого испарителя, тогда как для создания молекулярных потоков германия и лигатуры V_2O_5 использовалось термическое испарение. Подложки монокристаллического кремния с предварительно нанесенными слоями пиролитического оксида толщиной 0,15 мкм или нитрида кремния такой же толщины перед нанесением сплавов кремний—германий подвергались стандартным химическим обработкам кремниевой технологии. Для очистки поверхности в высоковакуумной камере после достижения предельного вакуума предварительно проводился термический отжиг при температуре, на 100 °С выше температуры процесса осаждения кремниевой подложки (350—500 °С). Скорости конденсации кремниевого и германиевого источников контролировались по показаниям кварцевых датчиков.

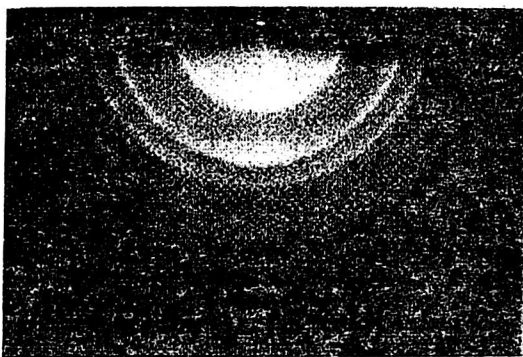
Режимы выращивания были рассчитаны на получение поликристаллических пленок $Si_{1-x}Ge_x$ атомного состава $x = 0,1 - 0,5$ толщиной 0,15—0,5 мкм с задаваемым уровнем легирования бором, обеспечивающим электрическое сопротивление 20—500 кОм/□. Анализ спектров комбинационного рассеяния (фононные моды, соответствующие Si-Si—480, Si-Ge — 400 и Ge-Ge — 315 см⁻¹ связям) и данных масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) полученных слоев показал наличие спла-

ва твердого раствора SiGe и постоянство легирующей примеси по толщине осажденного слоя.

Для оценки структурных параметров полученных сплавов (тип структуры, размер и ориентация зерен) использовался метод дифракции быстрых электронов (ДБЭ) на отражение в процессе роста и дополнительно проводился последующий анализ дифракционных картин на установке EF-Z4. Характерные сравнительные электронограммы полученных поликристаллических слоев кремния и твердых растворов SiGe приведены на рис. 1. Средний размер зерна вычислялся исходя из углового уширения дифракционных максимумов. Полученные оценки величин размеров зерен для дифракционных колец с различными индексами Миллера (022, 133, 004) приведены в таблице для различных диэлектрических покрытий, включая пиролитический окисел, поверхность которых была модифицирована (нанесением в вакууме тонкого поликристаллического слоя чистого кремния).



а



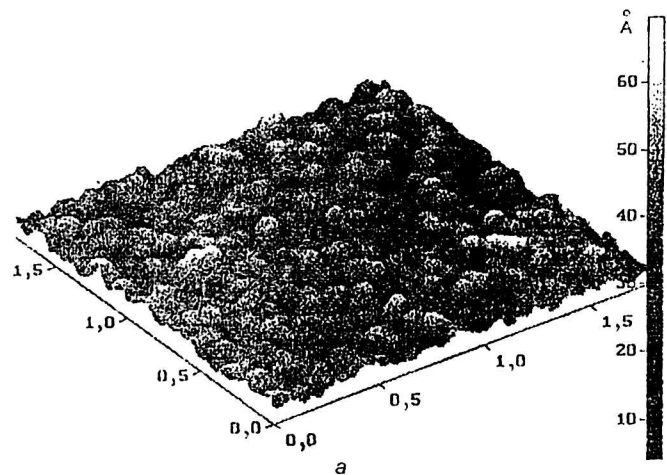
б

Рис. 1. Электронограммы слоев:
 а — сплава $Si_{0,6}Ge_{0,4}$ толщиной $d = 0,26$ мкм, осажденного при температуре $T = 450$ °С на модифицированной поверхности окисла (размер зерна ~80 нм);
 б — нелегированного поликристаллического Si, $d = 0,45$ мкм, осажденного при температуре $T = 600$ °С на поверхности окисла, ось текстуры [011]

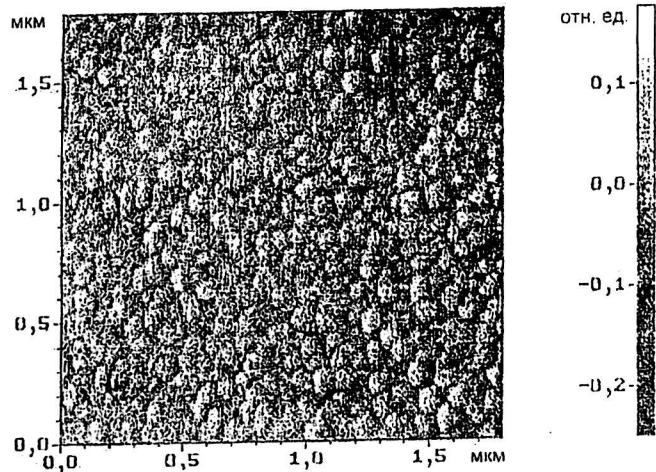
Характеристики слоев $Si_{1-x}Ge_x$

Состав	Диэлектрическое покрытие	Температура подложки, °С	Размер зерна, нм
$Si_{0,6}Ge_{0,4}$	SiO_2	500	20—90
$Si_{0,6}Ge_{0,4}$	SiO_2 (модифицирован)	400—500	80—90
$Si_{0,6}Ge_{0,4}$	Si_3N_4	300—500	130—150
$Si_{0,5}Ge_{0,5}$	$Si_xN_yO_z$	300—350	130—150

С помощью атомно-силового микроскопа (AFM) проводилось исследование морфологии поверхности (рис. 2). Высота шероховатостей рельефа поверхности составляла 3 нм, а латеральный размер линейно возрастал от 50 нм при температуре 350 °С до 130 нм — при 500 °С.



а



б

Рис. 2. AFM топограмма поверхности сплава $Si_{0,6}Ge_{0,4}$ толщиной 0,26 мкм, осажденного при температуре $T = 450$ °С на модифицированной поверхности окисла:
 а — трехмерное изображение в режиме топограммы;
 б — двухмерное изображение в режиме фазового контраста

При этом было получено, что температура образования поликристаллической фазы осажденных слоев зависит от содержания германия.

и при $x = 0,3$ поликристаллическая фаза образуется с температур подложки >500 °С, а при $x = 0,5$ — начиная с 300 °С.

Как известно [7], совершенство границ раздела между кристаллическими блоками в большой степени зависит от угла между ними. При этом различают мало- и большеугловые границы, на которых возникают потенциальные барьеры для переноса носителей заряда, влияющие на электропроводность слоев. В случае малоугловой границы влияние на электропроводимость мало, в то время как наличие большеугловой границы приводит к возрастанию сопротивления. Это связано с возникновением высокой плотности зернограницных дислокаций, формирующихся при углах разориентирования более $15-20^\circ$, что приводит к разупорядочению кристалла вблизи большеугловой границы. Нами была получена оценка величины среднеквадратичного отклонения углов межатомных связей от идеальной тетраэдрической координации, которая, по данным Рамановской спектроскопии, составляла $\sim 11^\circ$.

Для дальнейшего совершенствования технологии нанесения термочувствительного материала на основе сплавов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ необходимо получать зерна больших размеров. Так, в работе [8] показано, что низкое значение теплопроводности поликристаллических структур $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ имеет место при размерах зерен не более 100–200 нм, что дает ограничение сверху.

На подготовленные тестовые структуры наносилились индиевые контакты, качество которых (линейность тока от напряжения) контролировалось измерением вольт-амперных характеристик. Для оценки электрофизических параметров изготовленных структур проводились измерения температурных зависимостей сопротивления и спектров шума.

Температурные зависимости сопротивлений измерялись при постоянном напряжении 1–2 В в диапазоне температур 290–340 К в термостатированной камере.

При комнатной температуре в зависимости от степени легирования образцы имели сопротивление от 20 до 500 кОм/□. Было получено, что с увеличением сопротивления (до определенного предела) и размеров блоков поликристаллического зерна происходит рост ТКС. На рис. 3 представлены температурные зависимости сопротивлений $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}$ структур, осажденных на слой оксинитрида с атомным содержанием $x = 0,5$ и вычисленными значениями ТКС при различных уровнях легирования бором. Вблизи комнатной температуры величина ТКС (для образца N52) составляет 3–4 %/° с энергией активации 0,208 эВ.

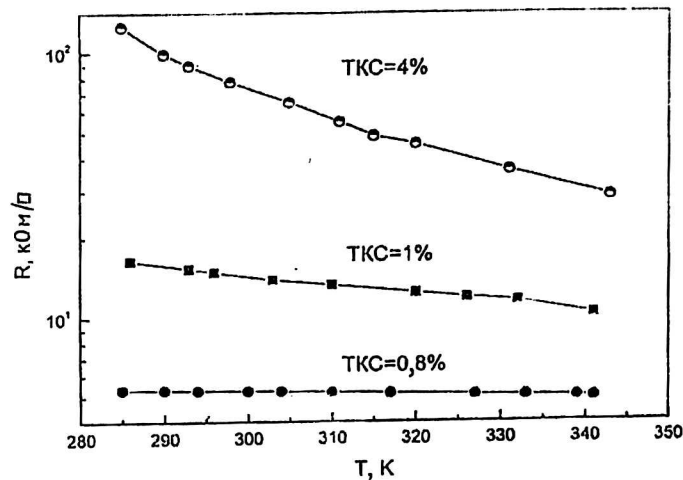


Рис. 3. Температурная зависимость сопротивлений структур $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}$ с различными уровнями легирования, $d = 0,15$ мкм, осажденного при температуре $T = 350$ °С на поверхности оксинитрида:
—○— — № 52; —■— — № 55; —●— — № 56

Спектр шумов исследовался в диапазоне частот $10-5 \cdot 10^5$ Гц при пропускании токов от 1 до 10 мкА. На рис. 4 представлены спектры шумов типичного образца SiGe структуры, измеренной при различных токах. Основной вывод, который можно сделать из показанных зависимостей, заключается в доминировании $1/f$ шума над Джонсоновским. В настоящее время устанавливаются корреляции шумовых характеристик со структурой и технологическими параметрами изготовления поликристаллических пленок SiGe . Такие исследования позволят в дальнейшем улучшить шумовые характеристики микроболометров.

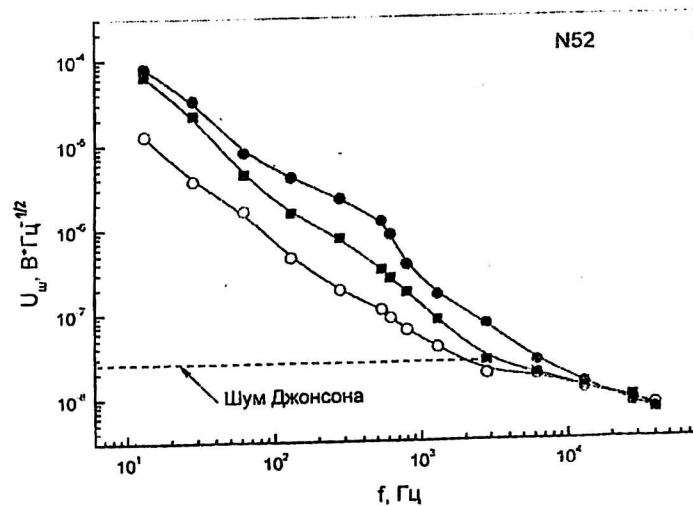


Рис. 4. Частотная зависимость результирующего шума при различных токах структуры $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}$:
—○— — $I = 1$ мкА; —■— — $I = 5$ мкА; —●— — $I = 10$ мкА

Заключение

• Показана возможность получения термочувствительных поликристаллических $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x\langle\text{B}\rangle$ слоев посредством молекулярно-лучевого осаждения требуемого состава ($x = 0,1-0,5$), толщины $0,1-0,5$ мкм и сопротивления $20-500$ кОм/□ на кремниевые подложки с нанесенными слоями окисла, нитрида и оксинитрида кремния при температуре < 500 °С.

• Средний размер зерен слоев твердого раствора SiGe зависит от условий осаждения и типа диэлектрического покрытия и изменяется в диапазоне $100-150$ нм.

• Температурный коэффициент сопротивления в поликристаллических слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, осаждаемых на различные диэлектрические покрытия, зависит от сопротивления слоя и размеров зерна и достигает $3-4$ %/°.

• Доминирующим шумом на исследованных тестовых структурах поликристаллического $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при различных токах является $1/f$ шум, уровень которого зависит от технологии осаждения и диэлектрического покрытия.

Авторы выражают искреннюю благодарность за помощь в работе Л. Д. Покровскому (электронограммы), А. Б. Талочкину (Рамановская спектроскопия), Е. Е. Родякиной (AFM), В. И. Ободникову (SIMS).

Литература

1. Chen C., Xinjian Y., Zhao X., Xiong B.//Sensors and Actuators A. 2001. V. A90. P. 212.
2. Shie J., Chen Y., Ou-Yang M., Chau B.//J. Microelectromech. Syst. 1996. V. 5. № 4. P. 298.
3. Unewisse M., Graig B., Watson R., Liddiard K.//Proc. SPIE. 1995. V. 2554. P. 43.
4. Sedky S., Fiorini P., Caymax M., Verbist A., Baert C.//Sensors and Actuators A. 1998. V. A66. P. 193.
5. Sedky S., Fiorini P., Caymax M., Baert C., Hermans L., Mertens R.//IEEE Electron Device Lett. 1998. V. 19. № 10. P. 376.
6. Sedky S., Fiorini P., Caymax M., Baert C., Hermans L., Mertens R.//IEEE Trans. Electron Devices. 1999. V. 46. № 4. P. 675.
7. Beeman D., Tsu R., Thorple M.//Phys. Rev. B. 1985. V. 32. № 2. P. 874.
8. Slack G., Hussaain M.//J. Appl. Phys. 1991. V. 70. № 5. P. 2694.

Polycrystalline layers of silicon-germanium alloy for uncooled IR bolometers

I. B. Chistokhin, I. P. Michailovsky, B. I. Fomin, E. I. Cherepov
Institute of Semiconductor Physics, Siberian Division, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

Polycrystalline layers of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, of varying germanium fraction, in situ doped with boron, were received by molecular-beam deposition on layers of the silicon oxide and silicon nitride at temperatures < 500 °C. The structural properties of the films were studied, the dependences of the resistivity on the temperature and the low-frequency noise were measured. It has been demonstrated that, the temperature coefficient of resistance in poly SiGe deposited on different dielectric coverings amounts to $(3-4)$ %/° and depends on resistance and grain size.

* * *