

## Получение изотопно-чистых слоев кремния $^{28}\text{Si}$ методом газофазной эпитаксии

© О.Н. Годисов, А.К. Калитеевский, А.Ю. Сафронов, В.И. Королев\*, П.Н. Аруев†, Б.Я. Бер†, В.Ю. Давыдов†, Н.В. Забродская†, В.В. Забродский†, М.А. Калитеевский†, П.С. Копьев†, А.П. Коварский†, В.Л. Суханов†

ПО „Электромеханический завод“, НТЦ „Центробежные технологии“,  
198096 Санкт-Петербург, Россия

\* НПО „Радиовый институт им. В.Г. Хлопина“,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

† Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 26 апреля 2002 г. Принята к печати 15 мая 2002 г.)

Методом газофазной эпитаксии выращен слой изотопно-чистого кремния  $^{28}\text{Si}$  с обогащением 99.96%. Вторично-ионная масс-спектрометрия и рамановские измерения показывают высокое качество полученного эпитаксиального материала.

Природный кремний представляет собой смесь трех стабильных изотопов с атомными массами 28 а.е.м. (содержание 92.21%), 29 а.е.м. (4.70%) и 30 а.е.м. (3.09%). Применение изотопно-чистого кремния открывает дополнительные возможности для конструирования новых полупроводниковых приборов на основе кремния и улучшения свойств существующих приборов. Это связано с повышением теплопроводности в изотопно-чистом кремнии [1,2], с возможностью достигать однородного распределения легирующей примеси с резкими границами легирующей области путем нейтронно-трансмутационного легирования [3,4], исключающего диффузионные процессы перераспределения вводимой примеси, свойственные традиционным технологиям, а также с перспективами создания элементной базы квантового компьютера на основе твердотельных изотопных гетероструктур [5,6].

Цель данной работы — разработка технологии изготовления эпитаксиальных слоев изотопно-чистого кремния методом газофазной эпитаксии. Разделение изотопов кремния осуществлялось по центробежной технологии [7]. Тетрафторид кремния, используемый в технологии разделения изотопов, перерабатывался в силан методом нуклеофильного замещения [7].

Эпитаксиальный рост проводился в кварцевом водоохлаждаемом реакторе вертикального типа с индукционным нагревом. Подложки располагались на боковых гранях графитовой пирамиды.

Процесс эпитаксиального роста проводился в атмосфере очищенного водорода при температуре 1100°C из смеси 4% силана ( $^{28}\text{SiH}_4$ ) и 96% аргона по реакции  $\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$ . В качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния КЭФ-20 толщиной 350 мкм, с ориентацией [100].

Распределение концентраций различных изотопов кремния по глубине выращенного слоя исследовалось методом вторичной ионной масс-спектрометрии на вторично-ионном микрозонде CAMECA IMS4f. Вторичная

эмиссия аналитических ионов изотопов  $\text{Si}^-$  возбуждалась бомбардировкой эпитаксиального слоя ионами цезия  $\text{Cs}^+$  с энергией 14.5 кэВ. При этом использовался режим высокого массового разрешения ( $M/\Delta M = 3500$ ), обеспечивавший уверенное отделение аналитических сигналов вторичных ионов  $\text{Si}^-$  от близких по массе кластеров вида  $\text{SiH}^-$ .

На рис. 1 представлены профили концентрации изотопов  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$  и  $^{30}\text{Si}$  в слое толщиной 2.6 микрона, выращенном на кристаллической подложке естественно-необогащенного кремния. Отношение концентраций различных изотопов кремния в подложке соответствует природному кремнию. В эпитаксиальном слое содержание изотопов  $^{29}\text{Si}$  и  $^{30}\text{Si}$  меньше более чем на 2 порядка: эпитаксиальный слой содержит 99.96% изотопа  $^{28}\text{Si}$  (что в настоящее время является мировым рекордом [8]) и содержит по 0.02% изотопов  $^{29}\text{Si}$  и  $^{30}\text{Si}$ .

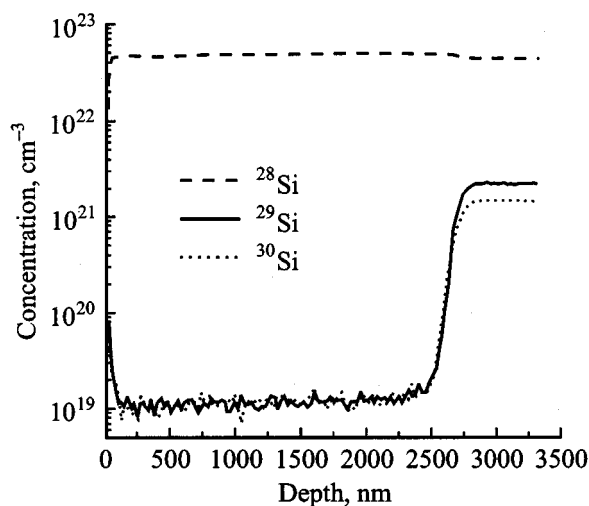


Рис. 1. Профиль концентрации изотопов кремния  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{Si}$  для изотопно-обогащенного слоя, выращенного на подложке с естественным изотопным составом.

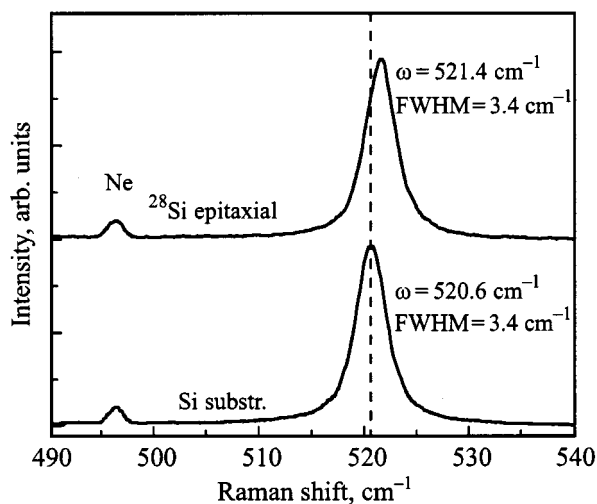


Рис. 2. Спектры рамановского рассеяния изотопно обогащенного слоя, образец Z1. Для сравнения приведен спектр подложки с естественным изотопным составом.  $T = 300$  К.

На рис. 2 представлены рамановские спектры, полученные от изотопно-чистого слоя  $^{28}\text{Si}$ , и, для сравнения, спектр монокристаллической подложки с естественным изотопным составом. Рамановские спектры были измерены на автоматизированной спектральной установке на базе двойного решеточного монохроматора ДФС-24. Спектральная ширина щели составляла  $1\text{ см}^{-1}$ . Все спектры были записаны в геометрии рассеяния назад при комнатной температуре. Возбуждение спектров осуществлялось линией 488 нм аргонового лазера, мощность возбуждающего излучения на образце составляла 30 мВт в пятне 50 мкм.

Можно видеть, что линия изотопно-чистого кремния  $^{28}\text{Si}$  смещена относительно линии природного кремния в высокочастотную сторону. Такое поведение согласуется с зависимостью частоты фонона от массы  $\omega(\mathbf{k}) \propto M^{-1/2}$ , а также с тем фактом, что природный кремний представляет собой смесь трех стабильных изотопов с атомными массами 28, 29 и 30 а.е.м.

Таким образом, получены образцы эпитаксиальных слоев изотопно-чистого кремния  $^{28}\text{Si}$  с рекордной изотопной чистотой 99.96% и высоким кристаллическим совершенством.

Работа выполнена при частичной поддержке МНТЦ (проект № 1354), РФФИ (грант № 02-02-17605) и Министерства науки и технологий РФ (проект „Физика твердотельных наноструктур, Методы комплексной диагностики наноструктур“).

## Список литературы

- [1] W.S. Capinski, H.J. Maris, E. Bauser, I. Silier, M. Asen-Palmer, T. Ruf, M. Cardona, E. Gmelin. *Appl. Phys. Lett.*, **71** (15), 2109 (1997).
- [2] T. Ruf, R.W. Henn, M. Asen-Palmer, E. Gmelin, M. Cardona, H.J. Pohl, G.G. Devyatych, P.G. Sennikov. *Sol. St. Commun.*, **115** (5), 243 (2000).

- [3] M.G. Gornov, O.M. Grebennikova, Y.B. Gurov, M.A. Morokhovets, K.N. Neimark, B.P. Osipenko, V.V. Fedorov, E.S. Yurova. *Instruments and Experimental Techniques*, **33** (3), 554 (1990).
- [4] А.Н. Брыкалов, Е.И. Игнатенко, М.Л. Кожух, А.В. Литовченко, Ю.В. Марков, Ю.В. Петров. *Атом. энергия*, **65** (1), 558 (1988).
- [5] B.E. Kane. *Nature*, **393**, 133 (1998).
- [6] A.A. Larionov, L.E. Fedichkin, A.A. Kokin, K.A. Valiev. *Nanotechnology*, **11** (4), 392 (2000).
- [7] О.Н. Годисов, А.К. Калитеевский, В.И. Королев, Б.Я. Бер, В.Ю. Давыдов, М.А.Калитеевский, П.С. Копьев. *ФТП*, **35** (8), 913 (2001).
- [8] H. Bracht, E.E. Haller, R. Clark-Phelps. *Phys. Rev. Lett.*, **81** (2), 393 (1998).

Редактор Л.В. Беляков

## $^{28}\text{Si}$ isotope-pure layers grown by vapour phase epitaxy

O.N. Godisov, A.K. Kaliteevsky, A.Yu. Safronov, V.I. Korolev\*, P.N. Aruev†, B.Ya. Ber†, V.Yu. Davydov†, N.V. Zabrodskaya†, V.V. Zabrodsky†, M.A. Kaliteevski†, P.S. Kop'ev†, A.P. Kovarsky†, V.L. Sukhanov†.

Science-technical centre „Centrifugal technologies“  
198096 St. Petersburg, Russia  
\* V.G. Khlopin Radium institute  
194021 St. Petersburg, Russia  
† Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The layer of isotope-pure silicon  $^{28}\text{Si}$  (enrichment 99.96%) is grown by a vapour phase epitaxy method. Secondary-ion spectroscopy and Raman measurements show a high quality of epitaxial material.