

05

## Выращивание монокристаллов твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ( $0 < x < 0.35$ ) и исследование их свойств

© И.Г. Атабаев, Н.А. Матчанов, М.У. Хажиев, Ш.А. Юсупова

Физико-технический институт НПО „Физика–Солнце“, АН РУз,  
Ташкент, Узбекистан

Department of Electrical and Computer Engineering,  
Michigan State University, East Lansing, USA

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: sh.yusupova@mail.ioffe.ru

*В окончательной редакции 21 сентября 2009 г.*

Методом бестигельной зонной плавки выращены монокристаллы  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  диаметром 10 mm и длиной до 10 cm с содержанием германия до 35 at.%, характеризующиеся однородным распределением Ge и низкой плотностью дислокаций. Исследованы структурные и электрофизические свойства полученного материала. Определены значения удельного объемного сопротивления, времени жизни, подвижности и концентрации носителей заряда в монокристаллах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  в зависимости от содержания Ge.

Твердые растворы  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  сохраняют многие лучшие свойства чистого Si и Ge, причем большинство свойств может плавно меняться в зависимости от содержания второго компонента. Это обстоятельство позволяет получать объемные  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  монокристаллы с заданными свойствами. На основе таких материалов в настоящее время изготавливаются эффективные детекторы ядерного излучения [1–4], монохроматоры тепловых нейтронов и приборы рентгеновской дифрактометрии [5,6], датчики давления, терморезисторы, работающие при низких температурах, эффективные высокотемпературные термоэлементы и т.п.

Основными способами выращивания объемных поли- и монокристаллов твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  являются методы Чохральского и бестигельной зонной плавки (БЗП). Качество выращенных кристаллов в первую очередь характеризуется удельным объемным сопротивлени-

ем  $\rho_v$  и временем жизни неосновных носителей заряда  $\tau$ . Несмотря на большое количество публикаций, посвященных изучению свойств объемных монокристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , в литературе отсутствует информация по исследованию зависимости этих параметров от содержания Ge.

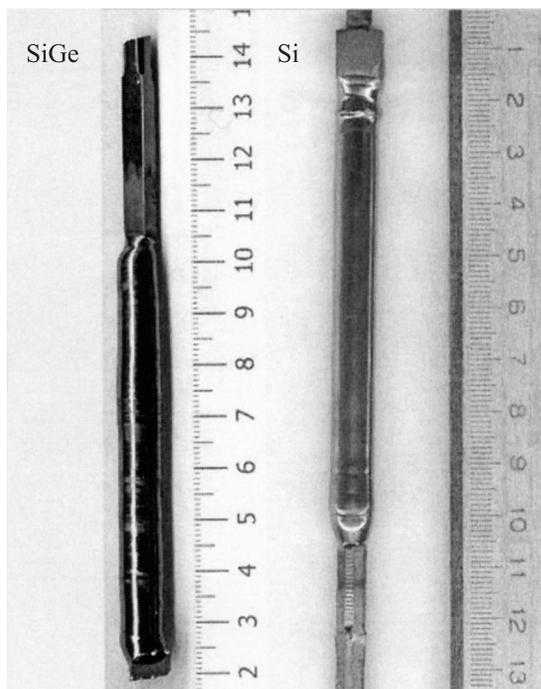
Целью данной работы является получение монокристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 < x < 0.35$ ) методом БЗП и исследование их структурных и электрических характеристик.

Монокристаллические слитки  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  постоянного и переменного по длине слитка состава выращивались из затравок монокристаллического кремния и германия ориентации  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$  методом электронно-лучевой БЗП в вакууме  $\sim 10^{-5} - 10^{-7}$  Торр на установке JEBZ-3B (Japan). В качестве заготовок и затравочных материалов использовались кремний марок КДБ и КЭФ с  $\rho_v \sim 0.1 - 1 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ , германий марки ГДГ с  $\rho_v \sim 0.1 - 40 \Omega \cdot \text{cm}$ , а также монокристаллы Si и Ge высокого качества, предоставленные Институтом роста кристаллов (IKZ, Berlin, Germany). При скорости роста  $\sim 0.5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$  скорость вращения нижнего штока варьировалась в диапазоне  $\sim 3.5 - 5.5 \cdot 10^{-2} \text{ rot/s}$ . Выращенные слитки при длине до 10 см имели диаметр около 10 мм. На рис. 1 приведены фотографии выращенного слитка  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  постоянного по длине состава, и Si, выращенного в идентичных условиях.

Полученные слитки  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  были разрезаны перпендикулярно направлению роста на пластины (образцы) толщиной  $\sim 0.7 - 1.0 \text{ mm}$ . После стандартной химико-механической обработки образцы дополнительно подвергались химическому травлению в растворе  $\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH}$  с целью получения зеркально-гладкой поверхности. В зависимости от условий роста образцы имели электронный или дырочный тип проводимости с удельным объемным сопротивлением  $0.001 - 700 \Omega \cdot \text{cm}$ .

Во всех экспериментах в качестве контрольных образцов были использованы кремниевые пластины, отрезанные от слитка, выращенного в идентичных с исследуемыми  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  кристаллами условиях.

Содержание Ge в объеме образцов определялось как методом гидростатического взвешивания [7], так и микроспектральным анализом с помощью сканирующего электронного микроскопа с интегрированной микроаналитической системой JED-2200, а структурное качество — по лауэграммам и по фигурам травления с помощью металлографического микроскопа МЕТАМ-Р1.



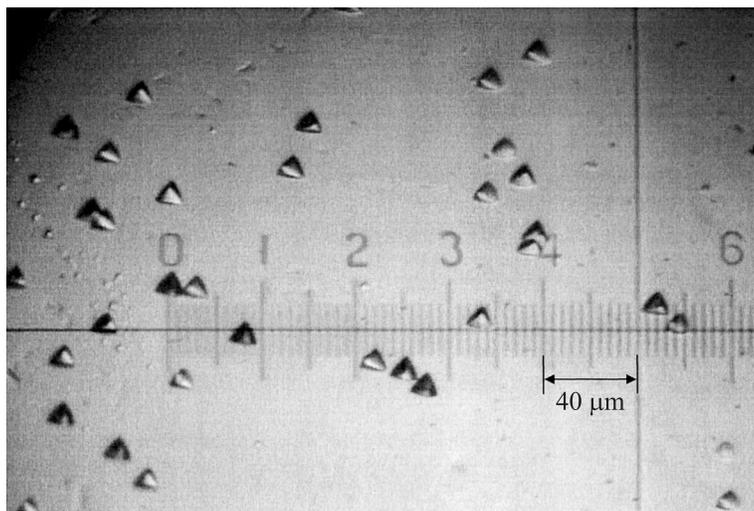
**Рис. 1.** Фотографии монокристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  и Si: постоянного по длине слитка состава.

Для определения удельного объемного сопротивления был применен стандартный четырехзондовый метод; концентрация и подвижность свободных носителей измерялись методом Холла, время жизни  $\tau$  — методом модуляции проводимости в точечном контакте [8].

Проведенные в работе исследования показали, что выращенные слитки представляли собой монокристаллы. На рис. 2 приведена рентгеновская лауэграмма кристалла  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с содержанием Ge 14.3 at.% и ориентацией поверхности (001).

При выращивании монокристаллов твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с большим содержанием германия обычно применяются максимально низкие скорости роста ( $\sim 0.5 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-4}$  cm/s). Результаты наших экспериментов показали, что в монокристаллах переменного по длине





**Рис. 3.** Микрофотография поверхности образцов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x = 0.14$ ). Плотность ямок травления, соответствующих выходам дислокаций на поверхность образца,  $N_d = 10^4 \text{ cm}^{-2}$ .

Однородность распределения Ge по площади пластин контролировалась методом EDX (Energy Dispersive X-ray Analysis) на установке JEOL JSM-7001F. Было установлено, что атомы Ge в кристалле распределены достаточно равномерно, включений второй фазы не наблюдалось.

На рис. 4 представлено распределение Ge по длине нескольких слитков, определенное по данным гидростатического взвешивания. Концентрация Ge изменялась от 0.5 до 35% (слиток NU-1), от 0 до 15% (слиток N 05-07) и от 0 до 2.5% (слиток N 05-05). Видно, что результаты измерения концентрации Ge как методом гидростатического взвешивания, так и рентгеновским микроанализом (слиток NU-1) практически совпадают.

Как известно, время жизни носителей заряда  $\tau$  является одним из наиболее чувствительных к структурному совершенству материала параметров, который может сильно влиять на работу полупроводниковых приборов. В [10,11] было показано, что в монокристаллах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с

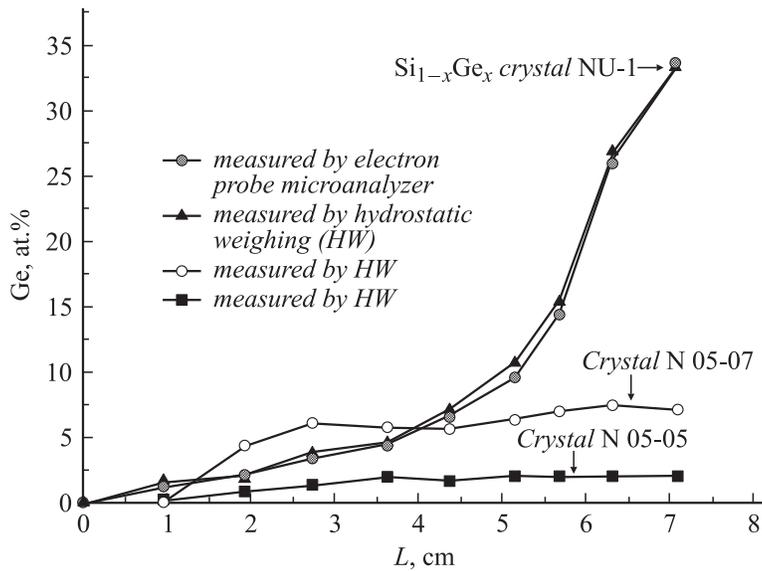


Рис. 4. Распределение Ge по длине  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  слитков.

увеличением концентрации Ge  $\tau$  уменьшается. В наших экспериментах при возрастании концентрации Ge по длине слитка от  $\sim 2.5$  до 10 at. % время жизни менялось слабо — от 0.15 до 0.45  $\mu\text{s}$ , что не позволяет говорить о зависимости этой величины от структуры в данном диапазоне концентраций германия (см. рис. 5). Однако при этом удельное объемное сопротивление материала  $\rho_v$  уменьшалось с 80 до 50  $\Omega \cdot \text{cm}$ . Падение  $\rho_v$  может быть связано с тем, что в диапазоне достаточно малых концентраций Ge доминирует не влияние количества дефектов, а присутствие в нем материала (Ge) с собственной концентрацией носителей на 3 порядка выше, чем в чистом кремнии ( $2 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$  против  $2 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ). Концентрация и подвижность дырок в  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$   $p$ -типа проводимости с содержанием Ge  $\sim 15$  at.%, определенные методом Холла при комнатной температуре, составляли соответственно  $3.8 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-3}$  и  $320 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ . Как видно, подвижность дырок в объемном сформированном БЗП  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ниже, чем в чистом кремнии, что может быть отнесено к наличию упругих напряжений, возникающих

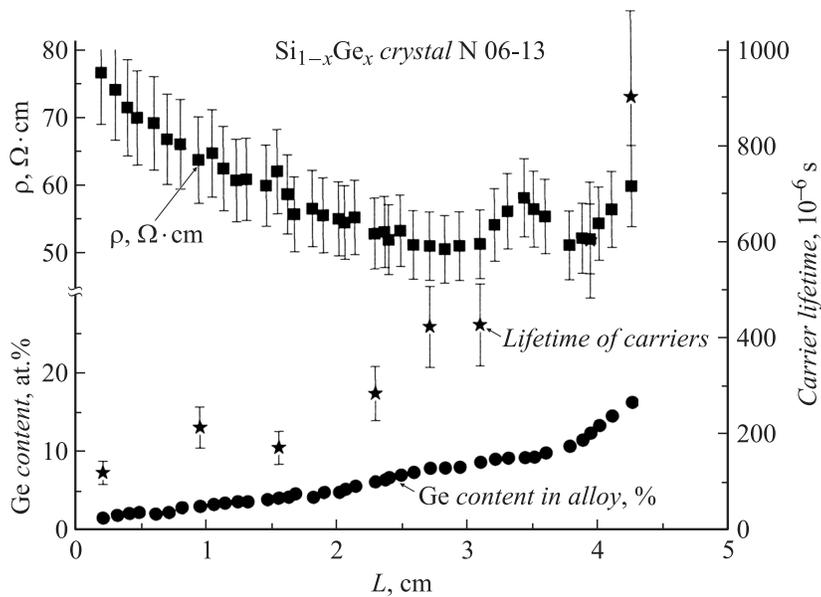


Рис. 5. Содержание Ge,  $\rho_v$  и  $\tau$  по длине слитка.

в процессе роста. Однако подвижность существенно выше, чем в слиточном  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , выращенном методом Чохральского в работе [12].

Полученные в настоящей работе данные, по мнению авторов, подтверждают возможность использования метода БЗП для формирования монокристаллов твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с высоким содержанием Ge (до 0.35 at. %).

Результаты дальнейшего, более детального исследования электрических характеристик объемных БЗП кристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  как постоянного, так и переменного по длине выращенных слитков состава будут представлены авторами в последующих публикациях.

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам IKZ (Berlin, Germany) Dr. H. Reeman и Н.В. Абросимову за предоставленные исходные заготовки (затравочные материалы), Э.Н. Бахранову за помощь при проведении экспериментов и Л.С. Костиной за полезные обсуждения.

Работа выполнена при частичной поддержке координационным центром по науке и технологиям Республики Узбекистан (контракт № Ф030-Ф096) и фондом УНТЦ (контракт № 3126).

## Список литературы

- [1] *Бачо И., Калинка Г., Келетий Й.* и др. // ПТЭ. 1981. № 2. С. 221–222.
- [2] *Саидов М.С., Муминов Р.А., Атабаев И.Г.* и др. // Атомная энергия. 1996. Т. 81. В. 4. С. 270–273.
- [3] *Ruzin A., Marunko S., Gusakov Y.* // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. Iss. 9. P. 5081–5087.
- [4] *Ruzin A., Marunko S., Abrosimov N.V., Riemann H.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. 2004. V. 518. Iss. 1–2. P. 373–375.
- [5] *Кожух М.Л., Белокурова И.Н., Вахрушев С.Б., Трунов В.А.* // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 11. С. 686–688.
- [6] *Erko A., Abrosimov N.V., Alex S.V.* // J. Crystal. Res. Technol. 2002. V. 37. N 7. P. 685–704.
- [7] *Бошмедт-Куллетская Э.* Определение удельного веса минералов. М.: Изд. АН СССР, 1951. 128 с.
- [8] *Lax D., Neustadter S.T.* // J. Appl. Phys. 1954. V. 25. P. 1148–1154.
- [9] *Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников /* Под ред. Б.Д. Луфт. М.: Радио и связь, 1982. 136 с.
- [10] *Ulyashin A.G., Abrosimov N.V., Bentzen A.* et al. // Materials Science in Semiconductor Processing. 2006. V. 9. Iss. 4–5. P. 772–776.
- [11] *Грехов И.В., Белякова Е.И., Костина Л.С.* и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 23. С. 66–72.
- [12] *Gaworzewski P., Tittelbach-Helmrich K., Penner U., Abrosimov N.V.* // J. Appl. Phys. 1998. V. 83. N 10. P. 5258–5263.