

Электрические свойства кристаллов твердых растворов $Ge_{1-x}Si_x$, полученных новым способом зонной плавки

Гахраманов Н.Ф.¹, Гашимова А.И.², Нуруллаев Ю.Г.³, Гараев Э.С.⁴

¹ Гахраманов Надир Фаррух оглу / *Gahramanov Nadir Farrux oglu* – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра общей физики,

Бакинский Государственный Университет, г. Баку, Республика Азербайджан;

² Гашимова Айнуур Ихтияр / *Gashimova Aynur Ikhtiyar* – диссертант, кафедра общей физики, Сумгаитский Государственный Университет, г. Сумгаит, Республика Азербайджан;

³ Нуруллаев Юсиф Гушу оглу / *Nurullayev Yusif Gushu oglu* – доктор физико-математических наук, профессо;

⁴ Гараев Эльдар Самед оглу / *Garayev Eldar Samed oglu* – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра общей физики,

Бакинский Государственный Университет, г. Баку, Республика Азербайджан

Аннотация: в статье рассмотрен новый метод получения однородных монокристаллов твердого раствора $Ge-Si$ и приведены результаты исследования физических свойств образцов полученных кристаллов. Монокристаллы твердых растворов $Ge_{1-x}Si_x$ состава x : 5; 6; 8; 10; 15 ат.% Si были получены зонной плавкой с использованием нового метода, предложенного В. Таировым. Степень монокристалличности полученных кристаллов проверялась соответствующим рентгенографическим анализом.

Ключевые слова: монокристалл $Ge_{1-x}Si_x$ бинарный твердый раствор, зонная плавка, сплав, рентгенографический анализ.

Достигнутые в последние годы выдающиеся результаты в области физики полупроводников связаны с их уникальными физическими свойствами. В этой области классические полупроводники – германий и кремний играют ключевую роль. Их получение в чистом виде, выращивание их высокосовершенных монокристаллов и целенаправленное легирование различными примесями открыло путь для рождения современной твердотельной электроники. Необычные физические свойства полупроводниковых материалов и возникший большой интерес к ним в дальнейшем привело к синтезу в большом количестве новых двойных, тройных и более сложных веществ. В настоящее время подавляющее большинство преобразующих и управляющих устройств, широко применяемых в различных областях науки и техники, изготавливается на основе полупроводников Si и Ge. Германий и кремний между собой образуют систему бинарных твердых растворов, охватывающую широкий интервал. Эти твердые растворы сохраняют все положительные свойства чистых компонентов, и эти свойства непрерывно меняются с изменением состава кристалла. Поэтому с использованием этих твердых растворов можно расширить интервал значений параметров и область применения приборов, изготовленных на их основе. Возможность регулирования физических свойств твердого раствора $Ge-Si$ в широком диапазоне способствует широкому практическому применению этого соединения. Вследствие этого на основе этих твердых растворов можно создавать преобразовательные элементы различного назначения [1, 2].

Германий и кремний являются элементами IV группы периодической системы элементов Менделеева и при образовании совместного соединения кристаллизуются алмазоподобной структуре. Элементарная решетка представляет собой гранцентрированный куб. На вершинных точках ребер куба располагаются соответствующие атомы. Каждый атом, окруженный 4 смежными атомами, образует систему. Одной из наиболее интересных особенностей является возможность управления физическими свойствами кристалла изменением отношения его составных компонентов. Из литературы известно [4], что ширина запрещенной зоны кристалла твердого раствора $Ge-Si$ с ростом в составе кремния в определенном интервале изменяется по линейному закону и при количестве кремния равном 15% наблюдается некоторое отклонение от линейной зависимости. Ширина запрещенной зоны при изменении Si в составе от 0 до 15% определяется выражением

$$E_g = 0,72 + 1,5\alpha \quad (\alpha = 0 \div 0,15), \quad (1)$$

а при изменении Si в составе от 15% до 100% определяется выражением

$$E_g = 0,93 + 0,31\alpha \quad (\alpha = 0,15 \div 1) \quad (2)$$

Для исследования монокристаллы твердых растворов $Ge_{1-x}Si_x$ состава x : 5; 6; 8; 10; 15 ат.% Si были получены зонной плавкой с использованием нового метода, предложенного В. Таировым [6].

При исследовании различных электронных процессов, происходящих в полупроводниковых материалах, одним из удобных методов, дающих более подробную информацию, является измерение кинетических параметров в слабых электрических полях при различных условиях. Именно поэтому

для исследованных образцов в первую очередь была изучена электропроводность, эффект Холла в широком диапазоне температур.

При отверждении $Ge_{1-x}Si_x$ в кристалле образуются термодфекты – центры прилипания с различной энергией активации.

В настоящей работе для кристаллов твердых растворов $Ge_{1-x}Si_x$ с различным содержанием кремния x : 5; 6; 8; 10; 15 at.% Si изучена электропроводность, коэффициент Холла и термо-эдс в интервале температур 100÷700 К. Электропроводность и коэффициент Холла измеряли методом компенсации.

На рис. 1 представлена температурная зависимость электропроводности, а на рис. 2 - коэффициента Холла.

Из зависимостей $\lg \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$ и $\lg(|R|T^{3/2}) = f\left(\frac{1}{T}\right)$ определены ширины запрещенной зоны для исследованных образцов. Установлено, что ширина запрещенной зоны в зависимости от количества кремния в составе кристалла увеличивается по линейному закону. Эта наблюдаемая закономерность полностью согласуется с существующей зонной теорией [7].

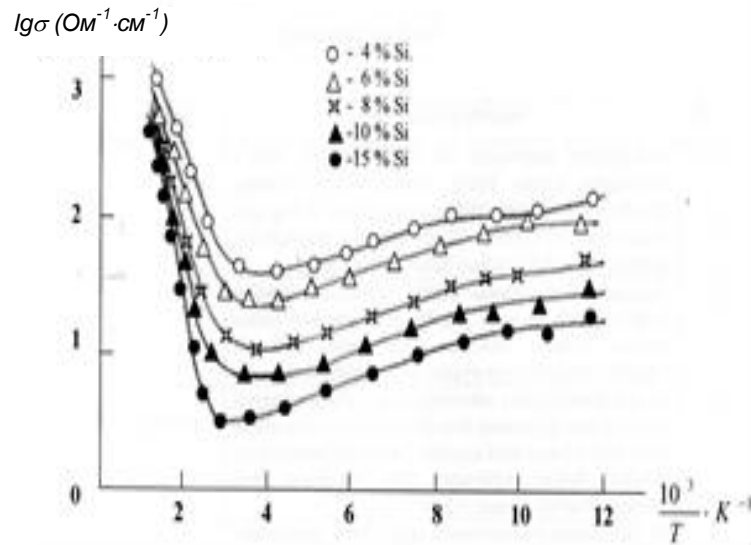


Рис. 1. Температурная зависимость электропроводности для образцов различного состава

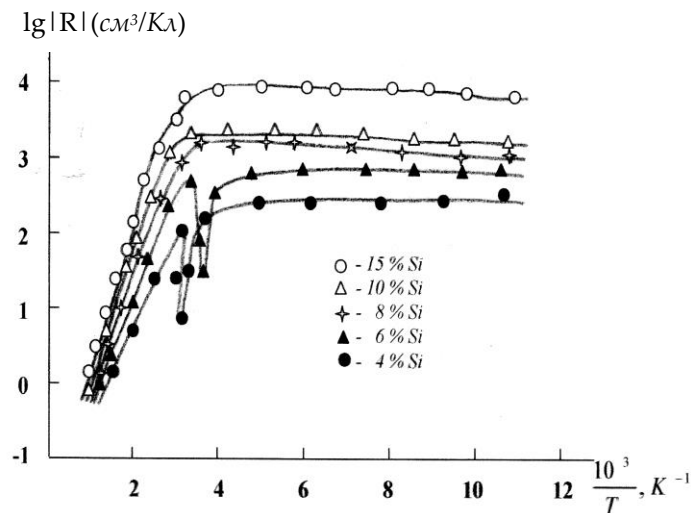


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента для образцов различного состава

На рис. 3 показана зависимость ширины запрещенной зоны от содержания. Из рисунка видно, что с изменением количества Si в составе кристалла Ge-Si от нуля до 15 % ширина запрещенной зоны изменяется от 0,73 эВ до 0,93 эВ. По известному значению концентрации определена подвижность дырок. Концентрация дырок в области примесной проводимости остается постоянной.

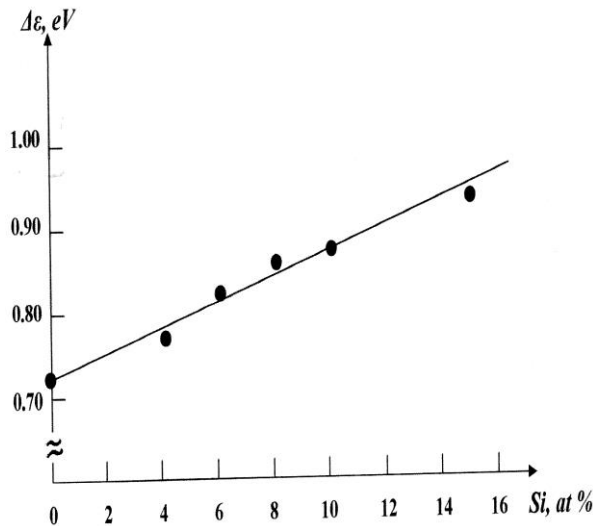


Рис. 3. Зависимость ширины запрещенной зоны для образцов различного состава

Некоторые изменения, наблюдаемые в эффекте Холла, не зависят от изменения концентрации носителей заряда, а связаны с изменением механизма рассеяния легких и тяжелых дырок. В случае легких и тяжелых дырок в сильном магнитном поле коэффициент Холла определяется следующим образом [7]:

$$R = \frac{1}{e(n_h + n_l)} \quad (1)$$

Здесь e - заряд электрона, n_h - концентрация тяжелых дырок, n_l - концентрация легких дырок. По экспериментальным результатам для образцов различного состава рассчитана концентрация дырок. Установлено, что с увеличением компоненты Si в составе, подвижность дырок при температуре жидкого азота уменьшается на $\approx 20\%$, а при комнатной температуре – на $\approx 45\%$.

На рис. 4 показан график температурной зависимости подвижности дырок в логарифмическом масштабе ($\lg n_d = f(\lg T)$). Нарушение линейности в рассматриваемом интервале температур связано не только с рассеянием на колебаниях решетки, но также связано с рассеянием на дефектных центрах различной природы, образующихся в кристаллах Ge-Si.

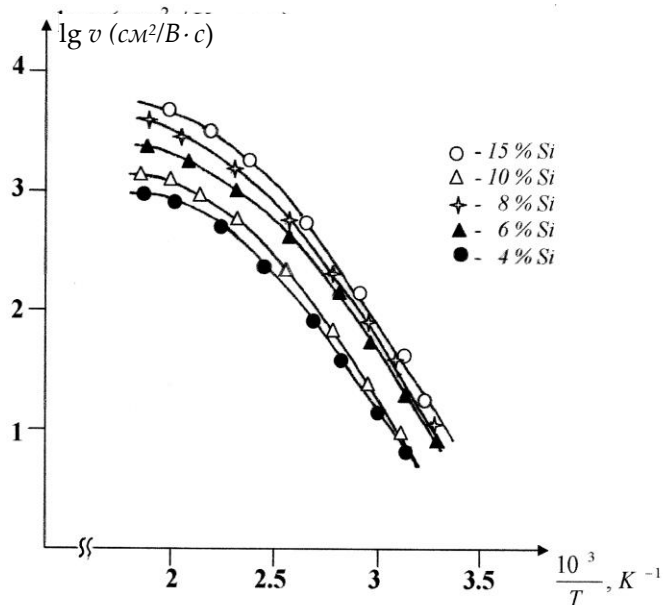


Рис. 4. Температурная зависимость подвижности дырок для образцов различного состава

Установлено, что температурная зависимость подвижности $\mu_n(T)$ связана с изменениями, происходящими в неупорядоченных твердых растворах при переходе состава из одной области в другую. С увеличением кремния в составе подвижность дырок с температурой уменьшается по закону $T^{-1,5}$.

Установлено, что при температуре жидкого азота для твердого раствора $Ge_{1-x}Si_x$ при изменении состава от нуля до значения $x = 0,15$ подвижность дырок уменьшается, приблизительно, в два раза (от 7000 до 3200 $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$). Твердый раствор $Ge_{1-x}Si_x$ состава $x \approx 0,15$, благодаря своим физическим свойствам более похож на полупроводниковый материал, близкий германию и наличие атомов Si не приводит к достаточно большим внутренним структурным изменениям.

Литература

1. Тагиров В. И. Полупроводниковые твердые растворы германий-кремний. - Баку: Элм, 1983.
2. Нуруллаев Ю.Г. Электрон-дефектное взаимодействие в частично-неупорядоченных кристаллах: автореф... дисс. . д. ф-м.н. Баку, 2005. 28 с.
3. Джафаров К. А., Тагиров С. И., Тагиров В. И. Исследование поведения термических акцепторов в твердых растворах германий-кремний. // Изв. АН Азерб. ССР. Сер. физ. мат. Наук, 1986. Т. 5. № 4. С. 15 - 19.
4. Болховитянов Ю. Б., Гуматовский А. К., Верябин А. С., Пчеляков О. П. Возможности и основные принципы управления пластической релаксацией пленок GeSi/Si и Ge/Si ступенчатого изменяемого состава. // Физика и техника полупроводников, 2008. Т. 42. №1. С. 32 - 35.
5. Емишев В. В., Абросимов Н. В., Козловский В. В., Оганесян Г. А. Электрические свойства твердых растворов n- и p-Si_{1-x}Ge_x при малых x // Физика и техника полупроводников, 2014. Т. 48. № 12. С. 1592 - 1594.
6. Тагиров В. И., Тагиров У. В., Гулиев А. Ф., Гахраманов Н. Ф. Получение монокристаллов бинарного твердого раствора с большим поперечным размером методом зонной плавки // Научные Известия Сумгаитского Государственного Университета, 2011. Т. 11. № 2. С. 3 - 13.
7. Мотт Н., Девис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. - М: Наука, 1994. 180 с.