

УДК 546.28.65.92:54.01

КРЕМНИЕВЫЙ УГОЛ ТРОЙНОЙ СИСТЕМЫ Yb–Pt–Si ПРИ 850°C

© 2019 г. С. Е. Сафронов^{1, *}, А. В. Грибанов^{1, **}, С. Ф. Дунаев¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Ленинские горы, 1

*e-mail: supernov87@gmail.com

**e-mail: avgri@mail.ru

Поступила в редакцию 02.11.2018 г.

После доработки 14.02.2019 г.

Принята к публикации 18.02.2019 г.

Изучено взаимодействие компонентов системы Yb–Pt–Si в области высокого содержания кремния. 22 сплава были приготовлены стандартной электродуговой плавкой в атмосфере аргона и отожжены при температуре 850°C. Для физико-химического анализа образцов использованы методы: электронной микроскопии, локального рентгеноспектрального анализа, рентгеновской дифракции и дифференциального термического анализа. Подтверждено существование 4 известных тройных интерметаллических соединений: YbPtSi, YbPt₂Si₂, Yb₃Pt₄Si₆, Yb₂Pt₃Si₅. Кроме того, обнаружены 3 новые фазы: YbPtSi₂, Yb₃₃Pt₁₇Si₅₀, Yb₁₁Pt₃₃Si₅₆. Определен структурный тип соединения YbPtSi₂. Приведены статистические кристаллографические данные тройных фаз. Построены фазовые равновесия в исследованной области на изотермическом сечении Yb–Pt–Si при 850°C.

Ключевые слова: интерметаллиды, тройные силициды, Yb-соединения, фазовые равновесия, монокристалл, рентгеновская порошковая дифракция

DOI: 10.1134/S0002337X19070157

ВВЕДЕНИЕ

Многие интерметаллические соединения (ИМС) редкоземельных элементов (РЗЭ) являются сильно коррелированными электронными системами, так как они демонстрируют такие физические свойства, как поведение Кондо-решеток, тяжелофермионное состояние, необычную сверхпроводимость, неферми-жидкостное поведение, флуктуации валентности [1, 2]. Среди них наиболее интенсивно изучаются соединения церия, так как именно они чаще других обладают уникальными физическими характеристиками вследствие сильных электронных корреляций. Известно, что электронные структуры атомов церия и иттербия являются “зеркальными” по отношению друг к другу: один неспаренный *f*-электрон у церия и одна дырка на *f*-подуровне у иттербия. Это обстоятельство стало основой для теоретических прогнозов о возможных необычных свойствах тройных соединений с Yb, подобных свойствам цериевых ИМС. Поэтому из соединений с другими РЗЭ значительный интерес представляют именно ИМС с участием иттербия. Сделанные для них ранее прогнозы во многом подтверждены экспериментально: соединения иттербия демонстрируют флуктуации валентности, поведение Кондо-решеток, неферми-жидкостное поведение и квантовые критические

явления. А после открытия в 2008 г. сверхпроводимости в соединении YbAlB₄ [3] интерес к ним значительно вырос. Позднее были обнаружены и другие соединения иттербия со сверхпроводимостью: YbGa_{1,1}Si_{0,9} [4] и YbC₆ [5].

Однако синтез и изучение ИМС, содержащих иттербий, значительно затруднены из-за высокого давления его паров, что зачастую не позволяет получать сплавы заданного химического состава, в том числе и однофазные образцы, пригодные для физических измерений. Поэтому, несмотря на повышенный интерес к соединениям иттербия, для многих тройных систем с его участием доступная информация весьма ограничена и часто нуждается в дополнительной проверке.

Для исследования нами выбрана тройная система Yb–Pt–Si, так как для аналогичной системы с церием (Ce–Pt–Si) установлено образование большого числа тройных ИМС с разнообразными кристаллическими структурами, большинство из которых обладали необычными физическими свойствами [6].

В настоящее время в литературе описаны кристаллические структуры и физические свойства 7 тройных ИМС системы Yb–Pt–Si: YbPt₂Si₂, Yb₂Pt₃Si₅, YbPt₂Si, YbPt₃Si, Yb₃Pt₂₃Si₁₁, Yb₃Pt₄Si₆, YbPtSi [7–16].

Взаимодействие компонентов тройной системы Yb–Pt–Si в полном концентрационном интервале при 600°C изучалось О.Л. Борисенко в 1993 г. [17]. Однако из-за сложности приготовления сплавов итербия и относительного несовершенства примененных методик анализа полученные тогда результаты можно считать предварительными и требующими уточнения. Современные усовершенствованные методы синтеза и анализа дают возможность получить более точную информацию о химических составах, кристаллических структурах и свойствах тройных ИМС. Подобные случаи, когда дополнительные исследования значительно улучшили первичные данные, можно проиллюстрировать на примерах систем Ce–Pt–Si и Ce–Rh–Si, которые также исследовались дважды [6, 18].

Целью данной работы стало изучение взаимодействия компонентов в системе Yb–Pt–Si при 850°C в области высокого содержания кремния, определение химических составов, кристаллических структур тройных ИМС и построение части изотермического сечения диаграммы состояния. Выбор температуры отжига 850°C основан на результатах наших пробных исследований сплавов этой системы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методом электродуговой плавки чистых элементов (Yb > 99.9 мас. %, Pt > 99.99 мас. %, Si > 99.999 мас. %) на водоохлаждаемом медном поддоне были приготовлены 22 сплава с массой около 1 г. Из-за высокого давления паров итербия плавку образцов выполняли приблизительно в 30 этапов с добавлением чистого итербия для компенсации потерь.

Для приведения сплавов в состояние равновесия они отжигались в вакуумированных кварцевых ампулах при 850°C в течении 60–90 дней, после чего закачивали в холодную воду.

Так как электродуговая плавка образцов с итербием сопряжена со значительными трудностями, нами была предпринята попытка получения сплавов из чистых элементов методом механохимического синтеза, а именно, сплавов с составами YbPt₂Si₂ и Yb₃Pt₄Si₆. Для этого необходимые навески компонентов в виде небольших кусочков подвергались шаровому помолу. Затем полученные порошки прессовались в таблетки, которые отжигались наряду с другими сплавами.

Подготовленные сплавы в литом и отожженном состояниях изучались методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), локаль-

ного рентгеноспектрального (ЛРСА) и рентгенофазового (РФА) анализов.

Шлифы сплавов для СЭМ и ЛРСА готовились по стандартным методикам с использованием абразивных бумаг разной зернистости с окончательной полировкой на алмазных пастах. Анализ проводился в электронном микроскопе Carl Zeiss LEO EVO 50XVP, оснащенном энергодисперсионным анализатором Oxford INCA Energy 450. Замеры концентраций компонентов были получены при ускоряющем напряжении от 20 кВ и токе зонда 100 мкА. Точность определения концентраций компонентов составляла 1 ат. %.

РФА выполняли в автодифрактометре STOE STADI P на медном монохроматизированном излучении CuK_{α1} ($\lambda = 1.540598 \text{ \AA}$) в интервале $2\theta 5^\circ - 90^\circ$. Для определения параметров элементарных ячеек применяли комплекс программ STOE WinXrow [19]. Уточнение кристаллографических параметров атомов методом Ритвельда по порошковому рентгенограммам проводилось с помощью комплекса программ FullProf Suite [20, 21].

В дополнение к РФА для изучения кристаллической структуры применяли метод рентгеноструктурного анализа (РСА). Монокристаллы для исследования отбирали с поверхности литого образца. РСА был осуществлен на автодифрактометре Bruker APEX-II. Регистрация отражений монохроматизированного MoK_α-излучения ($\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$) осуществлялась с применением CCD-детектора. Матрица ориентации и параметры элементарной ячейки определялись с помощью программы Bruker SAINT [22].

Дифференциальный термический анализ (ДТА) проводился на сканирующем калориметре NETZCH Leading Thermal Analysis STA 449 F1 Jupiter Platinum RT в атмосфере гелия высокой чистоты. Масса навески образца составляла 80 мг. ДТА-кривые получены в интервале температур от 25 до 1450°C при скорости нагрева 20°C/мин. Точность определения температуры превращения составила $\pm 1^\circ\text{C}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изотермическое сечение и фазовые равновесия. Предварительные исследования участков 2 и 3 тройной системы Yb–Pt–Si, отмеченных на рис. 1, показали, что участок 2 отличается большей сложностью фазовых равновесий, а приготовление сплавов из области концентраций участка 3 (концентрация итербия более 34 ат. %) методом электродуговой плавки сопровождается значительными потерями итербия.

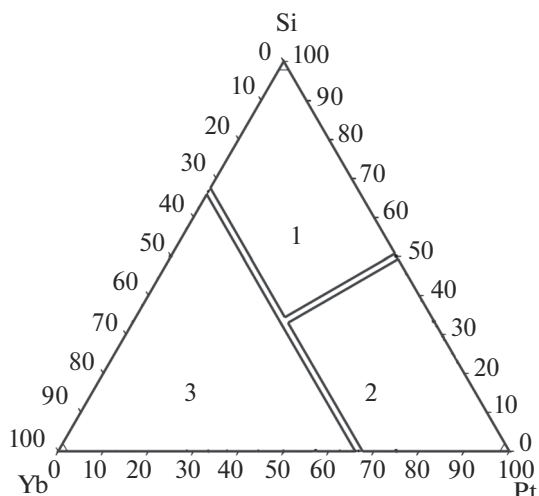


Рис. 1. Три концентрационные области системы Yb–Pt–Si.

В данной статье мы представляем результаты, полученные при исследовании участка 1 системы Yb–Pt–Si.

Фазовые равновесия в кремниевом углу тройной системы Yb–Pt–Si при 850°C показаны на рис. 2.

На основании полученных данных подтверждено образование известных из литературы соединений PtSi, YbSi_{2-x}, Yb₂Pt₃Si₅, Yb₃Pt₄Si₆, YbPt₂Si₂, YbPtSi [8, 14, 15, 23–25]. Кроме них, обнаружены новые тройные силициды YbPtSi₂, Yb₁₁Pt₃₃Si₅₆, Yb₃₃Pt₁₇Si₅₀. Установлено, что соединения Yb₂Pt₃Si₅, Yb₃Pt₄Si₆, YbPt₂Si₂, YbPtSi при 850°C являются фазами фиксированного состава, а для трех других ИМС возможно существование областей гомогенности.

Определение структур. Составы и основные кристаллохимические параметры фаз, образующих трехфазные равновесия в исследуемой области диаграммы при 850°C, показаны в табл. 1.

Ввиду сложности синтеза сплавов в табл. 2 представлены уточненные в STOE параметры ячейки тройных фаз для всех образцов.

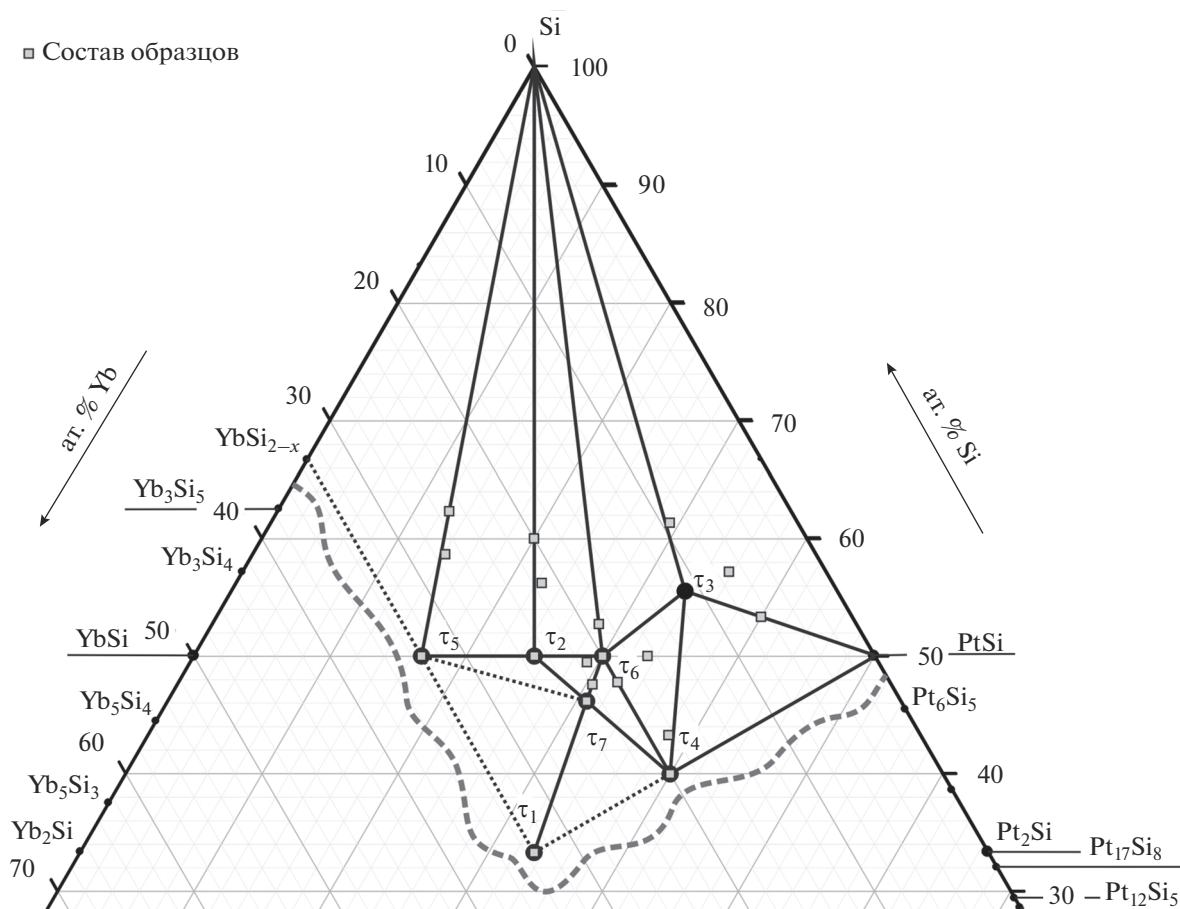


Рис. 2. Изотермическое сечение диаграммы Yb–Pt–Si в области с высоким содержанием кремния при 850°C.

Таблица 1. Кристаллографические данные фаз в системе Yb–Pt–Si

Фаза	Пр. гр.	Стр. тип	Параметры ячейки, нм			Источник
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
Si	<i>Fd3m</i>	C (алмаз)	0.54306			[25]
PtSi	<i>Pnma</i>	MnP	0.5577	0.3587	0.5916	[25]
YbSi _{2-x}	<i>hP3–P6/mmm</i>	AlB ₂	0.3781		0.4101	[23]
τ ₁ , YbPtSi	<i>Pnma</i>	TiNiSi	0.683535(11)	0.421898(8)	0.736841(13)	НР
			0.6844	0.4314	0.7410	[8]
τ ₂ , YbPtSi ₂	<i>Immm</i>	YIrGe ₂	0.419384(8)	1.57949(3)	0.842082(16)	НР
τ ₃ , Yb ₁₁ Pt ₃₃ Si ₅₆	Ромб.		0.89744(7)	0.79085(11)	0.68392(7)	НР
τ ₄ , YbPt ₂ Si ₂	<i>P4/nmm</i>	CaBe ₂ Ge ₂	0.410211(4)		0.995333(17)	НР*
			0.41235(5)		0.98851(13)	НР**
			0.41221		0.99091	[9]
			0.40959		0.99834	[15]
τ ₅ , Yb ₃₃ Pt ₁₇ Si ₅₀	Гекс.		0.85201(6)		1.60458(1)	НР
τ ₆ , Yb ₂ Pt ₃ Si ₅	<i>Ibam</i>	U ₂ Co ₃ Si ₅	0.99902(3)	1.13203(3)	0.593017(13)	НР
			1.0005	1.1334	0.5952	[15]
τ ₇ , Yb ₃ Pt ₄ Si ₆	<i>P2₁/m</i>	Y ₃ Pt ₄ Ge ₆	0.84417(7)	0.42043(8)	1.27638(2)	НР
				β = 99.496(8)°		
			0.84560	0.42109	1.27864	[14]
				β = 99.537°		

Примечание. НР – настоящая работа.

* Данные получены методом Ритвельда.

** Данные получены для монокристалла.

Для ИМС YbPt₂Si₂, Yb₂Pt₃Si₅, YbPtSi, YbPtSi₂ структура была подтверждена методом Ритвельда (табл. 3).

YbPt₂Si₂. Кристаллическая структура соединения YbPt₂Si₂ изучена методом РСА монокристалла (табл. 4) и подтверждена методом РФА порошка. Полученные данные подтверждают структурный тип CaBe₂Ge₂ [9, 15].

В связи с наличием в литературе информации о структурном типе ThCr₂Si₂ для этого соединения [7] (*I4/mmm*, *a* = 0.4097 нм, *c* = 0.9962 нм) был проведен дифференциальный термический анализ. Результаты показали обратимый фазовый переход при 1064(1)°С. Точки плавления нагревом сплава до 1450°С достичь не удалось. После остывания до комнатной температуры кристаллическая структура соединения YbPt₂Si₂ по-прежнему была примитивной тетрагональной.

Yb₃₃Pt₁₇Si₅₀. Новое соединение с относительно высоким содержанием иттербия имеет состав Yb₃₃Pt₁₇Si₅₀ и находится на границе исследуемой области диаграммы Yb–Pt–Si. Рентгеновские отражения индицируются в гексагональной сингонии с параметрами *a* = 0.80522(6) нм, *c* = 1.6041(2) нм, FoM (Figure of Merit) F(30) = 25.5 (0.011, 106). Структурный тип, вероятно, является производным от Lu₂CoGa₃ и принадлежит семейству структур AlB₂ [26].

Yb₁₁Pt₃₃Si₅₆. Соединение с неизвестным структурным типом и предположительным составом Yb₁₁Pt₃₃Si₅₆ появляется после отжига при 850°С. Это проиллюстрировано на рис. 3 и 4 микроструктурой соответственно литого и отожженно-го образцов сплава Yb_{6.7}Pt₄₀Si_{53.3}, на микрофотографиях видно, как Si сменяется новой фазой. Более того, изображенные на рис. 5 и 6 образцы

Таблица 2. Кристаллографические данные тройных фаз в образцах системы Yb–Pt–Si (STOE)

Фаза	Параметры ячейки, нм		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
YbPtSi	0.68340(6)	0.42195(5)	0.73677(6)
YbPtSi ₂	0.41886(12)	1.5784(2)	0.84117(13)
YbPtSi ₂	0.41906(2)	1.57849(8)	0.84134(3)
YbPtSi ₂	0.4191(3)	1.5799(5)	0.84174(12)
YbPtSi ₂	0.41934(3)	1.57947(14)	0.84197(7)
YbPtSi ₂	0.41942(8)	1.5802(3)	0.84205(16)
YbPtSi ₂	0.4197(3)	1.5798(7)	0.8421(3)
Yb ₁₁ Pt ₃₃ Si ₅₆	0.89693(8)	0.79042(10)	0.68362(5)
Yb ₁₁ Pt ₃₃ Si ₅₆	0.89723(16)	0.7910(2)	0.68342(12)
Yb ₁₁ Pt ₃₃ Si ₅₆	0.89738(11)	0.79093(14)	0.68337(10)
Yb ₁₁ Pt ₃₃ Si ₅₆	0.89744(7)	0.79085(11)	0.68392(7)
YbPt ₂ Si ₂	0.41013(3)		0.99565(11)
YbPt ₂ Si ₂ *	0.41014(4)		0.9932(2)
YbPt ₂ Si ₂	0.41037(4)		0.9958(2)
YbPt ₂ Si ₂	0.41050(6)		0.9929(5)
YbPt ₂ Si ₂ *	0.41254(3)		0.98612(10)
Yb ₃₃ Pt ₁₇ Si ₅₀	0.80528(19)		1.6050(10)
Yb ₃₃ Pt ₁₇ Si ₅₀	0.80522(6)		1.6041(2)
Yb ₂ Pt ₃ Si ₅ *	0.9977(2)	1.13049(14)	0.59038(9)
Yb ₂ Pt ₃ Si ₅	0.99782(13)	1.13085(8)	0.59204(4)
Yb ₂ Pt ₃ Si ₅	0.9982(3)	1.1311(3)	0.59266(13)
Yb ₂ Pt ₃ Si ₅	0.99821(14)	1.13110(14)	0.59278(6)
Yb ₂ Pt ₃ Si ₅	0.9983(3)	1.1313(2)	0.59243(9)
Yb ₂ Pt ₃ Si ₅	0.99847(19)	1.13166(15)	0.59283(8)
Yb ₂ Pt ₃ Si ₅	0.9985(3)	1.1314(4)	0.5924(3)
Yb ₂ Pt ₃ Si ₅	0.99892(14)	1.13203(14)	0.59262(6)
Yb ₂ Pt ₃ Si ₅	0.99893(16)	1.13127(12)	0.59260(5)
Yb ₂ Pt ₃ Si ₅	0.99896(4)	1.13216(4)	0.59265(2)
Yb ₂ Pt ₃ Si ₅	0.99896(4)	1.13216(4)	0.59265(2)
Yb ₂ Pt ₃ Si ₅	0.99897(11)	1.13155(13)	0.59271(6)
Yb ₂ Pt ₃ Si ₅	0.9990(3)	1.13198(19)	0.59279(9)
Yb ₂ Pt ₃ Si ₅	0.9991(3)	1.13183(17)	0.59295(8)
Yb ₃ Pt ₄ Si ₆ *	0.84323(5)	0.42071(2)	1.27685(14)
Yb ₃ Pt ₄ Si ₆	0.84404(11)	$\beta = 99.495(13)^\circ$ 0.42044(10)	1.27658(12)
Yb ₃ Pt ₄ Si ₆	0.84412(6)	$\beta = 99.508(13)^\circ$ 0.42062(8)	1.27655(8)
Yb ₃ Pt ₄ Si ₆	0.84417(7)	$\beta = 99.529(7)^\circ$ 0.42043(8)	1.2764(2)
Yb ₃ Pt ₄ Si ₆	0.84459(6)	$\beta = 99.496(8)^\circ$ 0.42081(5)	1.2771(2)
Yb ₃ Pt ₄ Si ₆	0.84450(12)	$\beta = 99.520(10)^\circ$ 0.42062(7)	1.27662(16)
Yb ₃ Pt ₄ Si ₆		$\beta = 99.473(12)^\circ$	

* Механохимический синтез.

Таблица 3. Кристаллографические данные тройных фаз системы Yb–Pt–Si (метод Ритвельда)

Фаза	YbPt ₂ Si ₂					
Пр. гр.	<i>P4/nmm</i>					
Структурный тип	CaBe ₂ Ge ₂					
Параметры ячейки, нм	$a = 0.410211(4),$	$c = 0.995333(17)$				
Число отражений	64					
2θ, град	$10 \leq 2\theta \leq 90$		шаг 0.01			
Число уточняемых параметров	20					
R-фактор Брэгга	0.047					
R _f -фактор	0.026					
χ ²	1.94					
Атомные параметры	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>B</i> _{изо}	<i>μ</i>	<i>N</i>
Yb1	0.25	0.25	0.7466(3)	2.59(10)	0.13(8)	2
Pt1	0.25	0.25	0.3744(2)	2.77(11)	0.13(8)	2
Pt2	0.75	0.25	0	2.46(11)	0.11(7)	2
Si1	0.25	0.25	0.1464(14)	1.6(7)	0.11(7)	2
Si2	0.75	0.25	0.5	5.1(5)	0.18(12)	2
Фаза	Yb ₂ Pt ₃ Si ₅					
Пр. гр.	<i>Ibam</i>					
Структурный тип	U ₂ Co ₃ Si ₅					
Параметры ячейки, нм	$a = 0.99902(3),$	$b = 1.13203(3),$	$c = 0.593017(13)$			
Число отражений	175					
2θ град	$8 \leq 2\theta \leq 90$		шаг 0.005			
Число уточняемых параметров	23					
R-фактор Брэгга	0.053					
R _f -фактор	0.035					
χ ²	6.09					
Атомные параметры	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>B</i> _{изо}	<i>μ</i>	<i>N</i>
Yb1	0.2702(2)	0.3708(4)	0	1.55(8)	0.5	8
Pt1	0.11543(18)	0.1383(3)	0	1.34(8)	0.5	8
Pt2	0.5	0	0.25	1.40(11)	0.25	4
Si1	0.3592(13)	0.1085(15)	0	1.5(4)	0.5	8
Si2	0	0.2739(13)	0.25	2.5(5)	0.5	8
Si3	0	0	0.25	2.9(7)	0.25	4
Фаза	YbPtSi					
Пр. гр.	<i>Pnma</i>					
Структурный тип	TiNiSi					
Параметры ячейки, нм	$a = 0.683535(11),$	$b = 0.421897(8),$	$c = 0.736840(13)$			
Число отражений	113					
2θ, град	$10 \leq 2\theta \leq 90$		шаг 0.01			
Число уточняемых параметров	17					
R-фактор Брэгга	0.067					
R _f -фактор	0.036					

Таблица 3. Окончание

χ^2	2.38					
Атомные параметры	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	$B_{\text{изо}}$	μ	<i>N</i>
Yb1	0.2015(3)	0.25	0.5840(4)	0.71(6)	0.5	4
Pt1	-0.0006(4)	0.25	0.1988(4)	4.50(9)	0.5	4
Si1	0.819(2)	0.25	0.593(3)	4.9(4)	0.5	4
Фаза	YbPtSi ₂					
Пр. гр.	<i>Immm</i>					
Структурный тип	YIrGe ₂					
Параметры ячейки, нм	<i>a</i> = 0.419384(8),	<i>b</i> = 1.57949(3),	<i>c</i> = 0.842082(16)			
Число отражений	167					
2 θ , град	8 ≤ 2 θ ≤ 90					
Число уточняемых параметров	24					
<i>R</i> -фактор Брэгга	0.041					
<i>R_f</i> -фактор	0.033					
χ^2	6.09					
Атомные параметры	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	$B_{\text{изо}}$	μ	<i>N</i>
Yb1	0	0	0.2625(3)	1.60(4)	0.25	4
Yb2	0	0.20152(10)	0.5	1.53(5)	0.25	4
Pt1	0.5	0.14815(5)	0.24724(17)	1.44(3)	0.5	8
Si1	0.5	0.0738(7)	0	3.4(3)	0.25	4
Si2	0.5	0.0862(6)	0.5	2.6(3)	0.25	4
Si3	0.5	0.2990(5)	0.3535(8)	5.1(2)	0.5	8
Параметры асимметрии	0.148(5)	0.0391(7)				

Примечание. μ – заселенность, *N* – кратность.

состава Yb_{18.5}Pt_{38.2}Si_{43.3}, находящегося в соседнем фазовом треугольнике, демонстрируют такое же изменение. 36 выделенных рефлексов Yb₁₁Pt₃₃Si₅₆

индицируются в ромбической решетке с параметрами *a* = 0.89744(7) нм, *b* = 0.79085(11) нм, *c* = 0.68392(7) нм. Согласно данным STOE, при

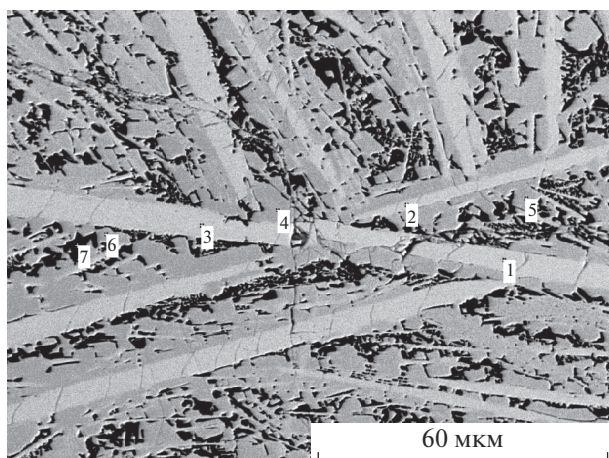


Рис. 3. Микроструктура литого образца Yb_{6.7}Pt₄₀Si_{53.3}: светлая фаза – YbPt₂Si₂, серая – PtSi, темная – Si.

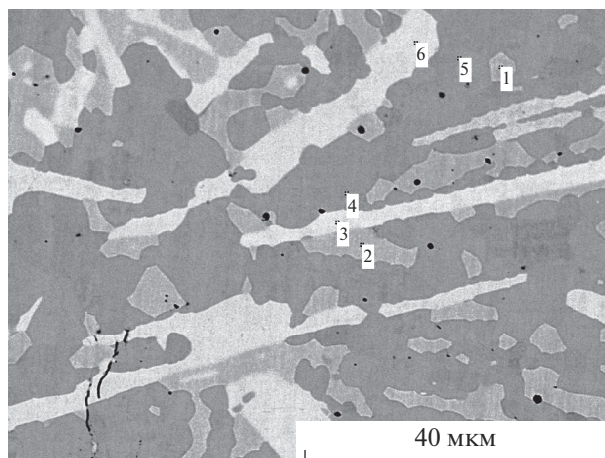


Рис. 4. Микроструктура отожженного образца Yb_{6.7}Pt₄₀Si_{53.3}: светлая фаза – YbPt₂Si₂, серая – PtSi, темная – Yb₁₁Pt₃₃Si₅₆.

Таблица 4. Кристаллографические данные монокристалла YbPt₂Si₂

Состав сплава	Yb ₂₀ Pt ₄₀ Si ₄₀
Размер кристалла, нм	40 × 40 × 40
Пр. гр.	<i>P4/nmm</i> (№ 129), Начало в центре инверсии
Прототип	CaBe ₂ Ge ₂
Символ Пирсона	<i>tP10</i>
Параметры элементарной ячейки, нм	$a = 0.41235(5)$ $c = 0.98851(13)$
Объем элементарной ячейки, нм ³	0.16808(5)
Химическая формула из уточнения	YbPt ₂ Si _{2-x} ($x = 0.19$)
Молекулярная масса, г/моль	611.0
<i>Z</i>	2
Расчетная плотность, г/см ³	12.239
Коэффициент абсорбции, мм ⁻¹	111.04
θ (min, max), град	2.06, 38.16
Отражения в уточнении	$254 \geq 4\sigma(F_o)$ из 318
Диапазон <i>hkl</i>	$-7 \leq h \leq 7$ $-7 \leq k \leq 7$ $-16 \leq l \leq 16$
Число уточняемых параметров	16
$R = \sum \ F_o\ - F_c / \sum F_o $	0.038
$R_{\text{инт}}$	0.030
$wR2$	0.101
$GoF, S = \{\sum [w(F_o^2 - F_c^2)^2] / (n - p)\}^{1/2}$	1.114
Коэффициент экстинкции	0.0069(13)
Остаточная плотность, е/Å ³ (max, min)	5.32, -4.86
Атомная позиция 1	2 Yb1 в $2c$ (0.25, 0.25, z); $z = 0.75299(9)$
Заселенность	1.00
$U_{\text{экв}}$	0.0103(3)
Атомная позиция 2	2 Pt1 в $2c$ (0.25, 0.25, z); $z = 0.12703(8)$
Заселенность	1.00
$U_{\text{экв}}$	0.0105(2)
Атомная позиция 3	2 Pt2 в $2b$ (0.75, 0.25, 0.5)
Заселенность	1.00
$U_{\text{экв}}$	0.0170(3)
Атомная позиция 4	2 Si1 в $2c$ (0.25, 0.25, z); $z = 0.3639(6)$
Заселенность	0.898(5)
$U_{\text{экв}}$	0.0097(18)
Атомная позиция 5	2 Si2 в $2a$ (0.75, 0.25, 0)
Заселенность	1.00
$U_{\text{экв}}$	0.0126(12)

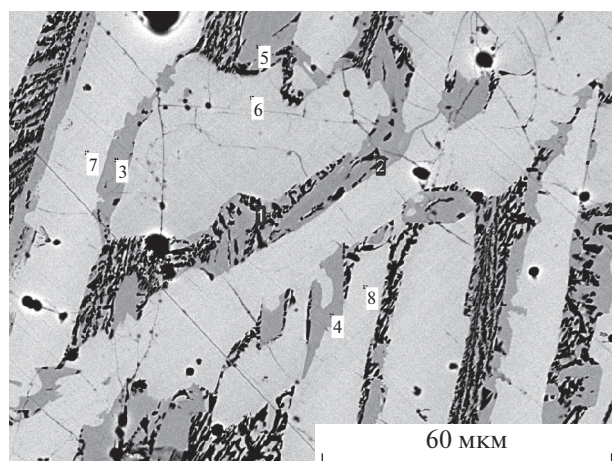


Рис. 5. Микроструктура литого образца $\text{Yb}_{18.5}\text{Pt}_{38.2}\text{Si}_{43.3}$: светлая фаза – YbPt_2Si_2 , серая – $\text{Yb}_2\text{Pt}_3\text{Si}_5$, темная – Si.

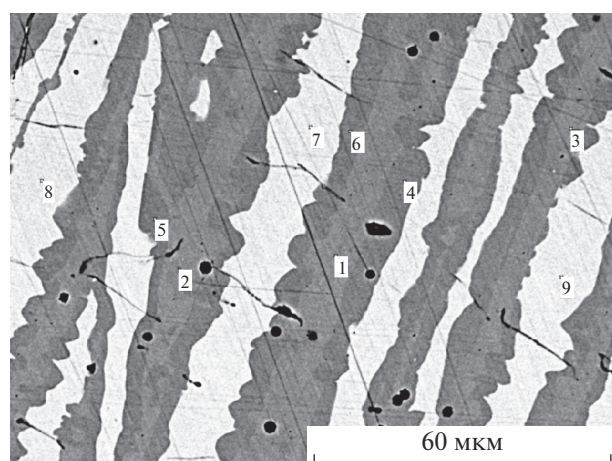


Рис. 6. Микроструктура отожженного образца $\text{Yb}_{18.5}\text{Pt}_{38.2}\text{Si}_{43.3}$: светлая фаза – YbPt_2Si_2 , серая – $\text{Yb}_{11}\text{Pt}_{33}\text{Si}_{56}$, темная – $\text{Yb}_2\text{Pt}_3\text{Si}_5$.

уточнении полученных параметров элементарной ячейки в каждой из пр. гр. с 16 по 74 номер подходят только пять: $Pmmm$ FoM F(30) = 79.1 (0.007, 57), $P222$ FoM F(30) = 79.1 (0.007, 57), $P222_1$ FoM F(30) = 82 (0.007, 55), $Pmm2$ FoM F(30) = 79.1 (0.007, 57), $Pmn2_1$ FoM F(30) = 92 (0.007, 49).

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-03-00656а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ott H.R., Walti Ch. Trends in Superconductivity of Heavy-Electron Metals // *J. Supercond. Novel Magn.* 2000. V. 13. № 5. P. 837.

2. Арсеев П.И., Демидов С.В., Рыжов В.Н., Стишов С.М. Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления // УФН. 2005. Т. 175. № 10. С. 1125–1139. doi 10.3367/UFNr.0175.200510m.1125
3. Nakatsuji S., Kuga K., Machida Y. Superconductivity and Quantum Criticality in the Heavy-Fermion System $\beta\text{-YbAlB}_4$ // *Nat. Phys.* 2008. V. 4. P. 603–607.
4. Imai M., Sato A., Aoyagi T., Kimura T., Matsushita Y., Tsujii N. Superconductivity in the AlB_2 -Type Ternary Rare-Earth Silicide $\text{YbGa}_{1.1}\text{Si}_{0.9}$ // *J. Am. Chem. Soc.* 2008. V. 130. P. 2886–2887.
5. Weller T.E., Ellerby M., Saxena S.S., Smith R.P., Skipper N.T. Superconductivity in the Intercalated Graphite Compounds C_6Yb and C_6Ca // *Nat. Phys.* 2005. V. 1. P. 39–41.
6. Griбанов А., Grytsiv А., Royanian E., Rogl P., Bauer E., Giester G., Seropegin Y. On the System Cerium–Platinum–Silicon // *J. Solid State Chem.* 2008. V. 181. P. 2964–2975.
7. Rossi D., Marazza R., Ferro R. Ternary RMe_2X_2 Alloys of the Rare Earths with the Precious Metals and Silicon (or Germanium) // *J. Less-Common Met.* 1979. V. 66. P. 17–25.
8. Rossi D., Mazzone D., Marazza R., Ferro R. A Contribution to the Crystallochemistry of Ternary Rare Earth Intermetallic Phases // *Z. Anorg. Allg. Chem.* 1983. V. 507. P. 235–240.
9. Hiebl K., Rogl P. Magnetism and Structural Chemistry of Ternary Silicides: $(\text{RE}, \text{Th}, \text{U})\text{Pt}_2\text{Si}_2$ (RE = Rare Earth) // *J. Magn. Magn. Mater.* 1985. V. 50. P. 39–48.
10. Dhar S.K., Sampathkumaran E.V., Nambudripad N., Vijayaraghavan P.R. Heat Capacity and Magnetic Susceptibility of Mixed Valent YbPt_2Si_2 // *Solid State Commun.* 1988. V. 67. P. 949–951.
11. Griбанов А., Grytsiv А.V., Rogl P., Seropegin Y.D., Giester G. Crystal structures of $\text{RPt}_{3-x}\text{Si}_{1-y}$ (R = Y, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb) Studied by Single Crystal X-ray Diffraction // *J. Solid State Chem.* 2009. V. 182. P. 1921–1928.
12. Griбанов А., Grytsiv А.V., Rogl P., Seropegin Y.D., Giester G. X-ray Structural Study of Intermetallic Alloys RT_2Si and RTSi_2 (R = Rare Earth, T = Noble Metal) // *J. Solid State Chem.* 2010. V. 183. P. 1278–1289.
13. Kaczorowski D., Griбанов А., Safronov S., Rogl P., Seropegin Y. Formation and Physical Properties of a Novel Compound $\text{Yb}_3\text{Pt}_{23}\text{Si}_{11}$ // *J. Alloys Compd.* 2011. V. 509. P. 8987–8990.
14. Griбанов А., Rogl P., Grytsiv А.V., Seropegin Y.D., Giester G. Novel Intermetallic $\text{Yb}_3\text{Pt}_4\text{Si}_{6-x}$ ($x = 0.3$) – A Disordered Variant of the $\text{Y}_3\text{Pt}_4\text{Ge}_6$ -Type // *J. Alloys Compd.* 2013. V. 571. P. 93–97.
15. Fikáček J., Prchal J., Sechovský V. Magnetic, Thermal and Transport Properties of YbPt_2Si_2 and $\text{Yb}_2\text{Pt}_3\text{Si}_5$ Single Crystals // *Acta Phys. Pol. A.* 2014. V. 126. P. 310–311.
16. Opagiste C., Barbier C., Haettel R., Galéra R.M. Physical Properties of the $\text{R}_3\text{Pt}_{23}\text{Si}_{11}$ Compounds with Volatile Rare Earth: Sm, Eu, Tm and Yb // *J. Magn. Magn. Mater.* 2015. V. 378. P. 402–408.
17. Борисенко О.Л. Фазовые равновесия и некоторые физико-химические свойства сплавов систем Yb–

- {Pt,Pb}–{Si,Ge}: Дис. ... канд. хим. наук, 02.00.01. М. 1993. С. 134.
18. *Lipatov A., Gribanov A., Grytsiv A., Safronov S., Rogl P., Rousnyak J., Seropegin Y., Giester G.* The Ternary System cerium–rhodium–silicon // *J. Solid State Chem.* 2010. V. 183. P. 829–843.
 19. STOE WINXPOW (Version 1.06). Stoe & Cie GmbH, Darmstadt, Germany. 1999.
 20. *Rodriguez-Carvajal J.* FULLPROF: a program for rietveld refinement and pattern matching analysis // Abstracts of the Satellite Meeting on Powder Diffraction of the XV Congress of the IUCr. Toulouse, 1990. P. 127.
 21. *Roissnel T., Rodriguez-Carvajal J.* Materials Science Forum, Proceedings of the European Powder Diffraction Conference (EPDIC7). 2000. P. 118.
 22. *Sheldrick G.M.* XPRER 6.14, Bruker saint, BRUKER APEX2. 2003.
 23. *Palenzona A., Manfrinetti P., Brutti S., Balducci G.* The Phase Diagram of the Yb–Si System // *J. Alloys Compd.* 2003. V. 348. P. 100–104.
 24. *Iandelli A., Palenzona A., Olcese G.L.* Valence Fluctuations of Ytterbium in Silicon-Rich Compounds // *J. Less-Common Met.* 1979. V. 64. P. 213–220.
 25. *Massalski T.B.* Binary Alloy Phase Diagrams, second ed. Materials Park: ASM International, 1990.
 26. *Gladyshevskii R.E., Cenjual K., Parthe E.* Er₂RhSi₃ and R₂CoGa₃ (R – Y, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb) with Lu₂CoGa₃ Type Structure: New Members of the AlB₂ Structure Family // *J. Alloys Compd.* 1992. V. 189. P. 221–228.