

УДК 621.325

ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК В ТЕХНОЛОГИИ НАНОГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Марончук Игорь Игоревич,

канд. техн. наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией прикладной физики и нанотехнологий в энергетике Севастопольского института ядерной энергии и промышленности, Россия, 299033, г. Севастополь, ул. Курчатова, 7. E-mail: igimar@mail.ru

Марончук Игорь Евгеньевич,

д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории прикладной физики и нанотехнологий в энергетике Севастопольского института ядерной энергии и промышленности, Россия, 299033, г. Севастополь, ул. Курчатова, 7. E-mail: igimar@mail.ru

Кулюткина Тамара Фатыховна,

канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории прикладной физики и нанотехнологий в энергетике Севастопольского института ядерной энергии и промышленности, Россия, 299033, г. Севастополь, ул. Курчатова, 7. E-mail: fizlab@simp.com.ua

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения наногетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками для разработки и создания производства высокоэффективных приборов полупроводниковой энергетики.

Цель работы: выяснение причины образования широкозонного полупроводникового материала из узкозонного при выращивании его в виде квантовых точек, а также исследование возможности применения фазового перехода металл-полупроводник для получения материала, который в виде квантовых точек соответствует узкозонному полупроводнику.

Методы исследования: выращивание наногетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками осуществляли методом жидкофазной эпитаксии с импульсным охлаждением подложки; свойства полученных структур изучали исследованием спектров их фотолюминесценции снятых с образцов с помощью набора спектральной аппаратуры на базе двух монохроматоров МДР-41.

Результаты: Выявлено, что изменение ширины запрещенной зоны InAs в квантовой точке, по сравнению с объемным материалом InAs, обусловлено размерами квантовых точек, величина которых зависит от разности постоянных решеток матричного материала и материала квантовой точки. В наногетероэпитаксиальных структурах с квантовыми точками из металла (иттербия) реализуется фазовый переход металл-полупроводник. Ширина запрещенной зоны полупроводника, образующегося при этом, определяется температурой выращивания. Применение фазового перехода металл-полупроводник позволяет получать в одном технологическом процессе многослойные наногетероэпитаксиальные структуры с массивами квантовых точек, имеющими различные значения ширины запрещенной зоны.

Ключевые слова:

Фазовый переход, металл-полупроводник, иттербий, жидкофазная эпитаксия, наногетероэпитаксиальные структуры, квантовые точки.

Введение

Наногетероэпитаксиальные структуры (НГЭС) с квантовыми точками (КТ) открывают новые возможности в разработках и создании производства высокоэффективных приборов электроники и полупроводниковой энергетики. Так, например, использование НГЭС КТ для изготовления полупроводниковых лазеров позволяет уменьшить плотность их порогового тока с 400 до 10 А/см² [1]. Однако попытки создания высокоэффективных солнечных элементов на основе НГЭС КТ встретились с проблемой, обусловленной образованием напряженного «смачивающего» слоя между КТ, расположенными в одном массиве [2, 3].

Эта проблема выявилась при получении НГЭС КТ из газовой фазы в процессе прецизионных нанотехнологий, основанных на пиролизе металлоорганических соединений и гидридов (МОС-ги-

дريدной технологии) и в молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), которые нашли широкое применение не только в научно-исследовательских работах, но и в промышленном производстве при получении различных НГЭС с квантовыми ямами (КЯ) [4, 5]. В этих технологиях используют полупроводниковые материалы с одинаковыми постоянными решеток, но с различными значениями ширины запрещенной зоны [6].

К основным требованиям при получении НГЭС КТ относится использование материалов с различными значениями постоянной решетки для КТ и для спейсерных слоев (матричного материала) [7]. В начальной стадии формирования НГЭС КТ на поверхности матричного материала образуется псевдоаморфный слой материала КТ, а затем формируется массив монокристаллических КТ. Параллельно с формированием КТ, в промежутке между ни-

ми, образуется напряженный слой из материала КТ, который называется «смачивающим» слоем [8]. Наличие «смачивающего» слоя в солнечных элементах, созданных на основе НГЭС КТ, приводит к уменьшению эффективности преобразования солнечного излучения, что связывается с рекомбинацией носителей заряда в механически напряженных «смачивающих» слоях, расположенных между КТ [2].

НГЭС с «идеальными» квантовыми точками (ИКТ), между которыми отсутствует область напряженного «смачивающего» слоя, выращиваются при постоянной температуре в процессе жидкофазной эпитаксии методом импульсного охлаждения и нагревания подложки (ЖФЭ ИОНП) [9–12].

Особый интерес представляют НГЭС на основе широкозонных полупроводниковых соединений III-V с КТ узкозонного материала, утилизирующего ИК-диапазон спектра излучения. В качестве такого узкозонного материала принято использовать InAs, ширина запрещенной зоны которого $E_g=0,36$ эВ при $T=300$ К. Однако максимум фотолюминесценции (ФЛ) массивов КТ из InAs при $T=300$ К в НГЭС на основе GaAs соответствует $E_g=1,14$ эВ [13], а на основе GaP $E_g=1,5$ эВ [14].

Постановка задачи

Целью работы является выяснение причины образования широкозонного полупроводникового материала из узкозонного при выращивании его в виде КТ, а также исследование возможности применения фазового перехода металл–полупроводник для получения материала, который в виде КТ соответствует узкозонному полупроводнику.

Основные материалы и результаты исследования

Выращивание НГЭС ИКТ осуществлялось из растворов кристаллизуемых материалов в расплаве олова при температуре 400...450 °С методом ЖФЭ ИОНП [9]. В качестве материалов кристаллических подложек, буферных и спейсерных слоев, зарастающих массивы КТ, использовался GaAs или GaP. Массивы КТ выращивались из InAs и из иттербия (Yb).

В табл. 1 приведены параметры кристаллизуемых материалов: ширина запрещенной зоны E_g и размер постоянных решеток a_2 при комнатной температуре (300 К), линейные коэффициенты теплового расширения α_1 и α_2 при температуре формирования НГЭС КТ 700 К и комнатной темпера-

туре (300 К) соответственно, рассчитанные значения постоянной решетки a_1 при температуре формирования НГЭС КТ 700 К, абсолютные значения $\Delta a=a_1-a_2$, при температурах формирования НГЭС КТ 600, 700 и 800 К и относительные изменения $\Delta a/a_2$ при 700 К.

Значения постоянной решетки a_1 рассчитывали с использованием выражения:

$$a_1 = \frac{a_2}{\tilde{\alpha} \cdot (T_2 - T_1) + 1}, \quad (1)$$

где T_2 – температура формирования НГЭС КТ, T_1 – комнатная температура (в расчетах использовали значение 300 К); $\tilde{\alpha}$ – среднее значение коэффициента теплового расширения; a_2 – размер постоянных решеток при комнатной (300 К) температуре.

Выражение (1) было получено при помощи выражения:

$$\tilde{\alpha} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = \frac{1}{a_1} \cdot \frac{\Delta a}{(T_2 - T_1)},$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплового расширения при температуре формирования НГЭС КТ и комнатной соответственно.

Основными характеристиками при формировании НГЭС ИКТ являются постоянные решеток и коэффициенты теплового расширения используемых материалов. Так, период нониуса совершенного строения P , сопрягающихся материалов [15], определяется выражением [16]:

$$P \cdot a = (P+1) \cdot b,$$

где a и b – постоянные решеток этих материалов.

При $a=a_{1,\text{InAs}}$, $b=a_{1,\text{GaAs}}$ или $b=a_{1,\text{GaP}}$ (табл. 1) период нониуса совершенного строения в НГЭС на основе GaAs составляет 15 позиций GaAs и 14 позиций InAs, а в НГЭС на основе GaP соответственно 10 позиций GaP и 9 позиций InAs.

Так как постоянная решетки InAs больше постоянной решетки матричного материала (GaAs и GaP), зарождение КТ InAs происходит там, где имеется максимальное расстояние между атомами кристаллизуемого слоя, т. е. в середине периода нониуса совершенства. При этом размер области оптимальной для формирования КТ InAs больше на матричном материале GaAs, чем на GaP, и поэтому размер КТ InAs на GaAs больше, чем на GaP. Чем больше размер КТ, тем меньше его параметры отличаются от параметров объемного материала. Это относится и к размерам постоянной решетки КТ.

Таблица 1. Параметры кристаллизуемых материалов

Таблица 1. Параметры кристаллизуемых материалов

Материалы	E_g	a_2	$\alpha_2 \cdot 10^6$	$\alpha_1 \cdot 10^6$	a_1	Δa при T_2			$\Delta a/a_2$
	(эВ)	(?)	(К ⁻¹)	(К ⁻¹)	(Å)	600 К	700 К	800 К	(%)
InAs	0,36	6,0584	4,41	5,82	6,0702	0,0055	0,0118	0,0156	0,195
GaAs	1,42	5,6531	5,82	7,2	5,6667	0,0098	0,0136	0,0187	0,24
GaP	2,26	5,4505	5,6	6,0	5,4632	0,0094	0,0127	0,0158	0,232
Yb	Металл $E_g=0$	5,483	24,4	31,6	5,5451	0,0442	0,0621	0,0844	1,12

Из табл. 1 следует, что при охлаждении в интервале температур $\Delta T=300-700$ К постоянные решетки полупроводниковых материалов InAs, GaAs и GaP уменьшаются примерно на одну и ту же величину, соответственно, на 0,2, 0,23, 0,24 %. Это свидетельствует о том, что влияние теплового коэффициента расширения InAs, GaAs и GaP при формировании НГЭС ИКТ на их основе не является существенным, а наблюдаемое различие их спектров ФЛ обусловлено различием размеров постоянных решеток.

При выращивании КТ из Yb в НГЭС на основе GaAs период нониуса совершенства составил 45 позиций GaAs и 46 позиций Yb, а при выращивании КТ из Yb в НГЭС на основе GaP период нониуса совершенства составил 67 позиций GaP и 66 позиций Yb. Наблюдаемое различие размеров нониусов совершенства и количества позиций в этих структурах обусловлено тем, что величина постоянной решетки Yb больше величины постоянной решетки GaP, но меньше величины постоянной решетки GaAs.

Как следует из табл. 1, при снижении температуры в интервале $\Delta T=300-700$ К наблюдается уменьшение постоянной решетки Yb в КТ более чем в 4,5 раза по сравнению с уменьшением постоянных решеток окружающих его материалов GaAs и GaP. Это приводит к образованию отрицательного давления в НГЭС, под действием которого в КТ Yb может осуществляться фазовый переход металл-полупроводник.

Как писал Н.Ф. Мотт: «...любой переход металл-изолятор... должен быть переходом от состояния, когда энергетические полосы перекрываются, к состояниям, когда перекрытия нет... При больших a вещество должно быть изолятором, а при малых a вещество будет металлом... Опыт показывает, что при плотностях ниже 5 г/см^3 ртуть становится полупроводником... Ширина запрещенной зоны должна изменяться как $(a-a_0)$, где a_0 – величина постоянной решетки после превращения, a – до превращения металла в полупроводник» [17]. В нашем случае рассматриваем $a=a_1$ – постоянная решетки при 700 К, а $a_0=a_2$ – постоянная решетки при 300 К.

Известно [18], что полупроводниковый кремний, имеющий при $T=300$ К постоянную решетки $a=5,4304 \text{ \AA}$ и ширину запрещенной зоны $E_g=1,1$ эВ, под давлением 12...15 ГПа становится металлическим кремнием, который при $T \leq 6,7$ К переходит в сверхпроводящее состояние. Это обусловлено тем, что при таких давлениях постоянная решетки кремния существенно уменьшается и величина его запрещенной зоны становится равной нулю.

Естественно, что если металл будет подвержен отрицательному давлению, то у него может образоваться запрещенная зона и он становится полупроводником или диэлектриком, в соответствии с фазовым переходом металл-полупроводник [17, 19]. При наличии отрицательного давления в металлических квантовых точках (МКТ) следует ожидать

образования полупроводниковых свойств. Так как МКТ имеют наноразмерную величину, то фазовый переход металл-полупроводник может реализоваться при отрицательных давлениях, величина которых будет существенно ниже, чем при фазовом переходе в объемных металлах.

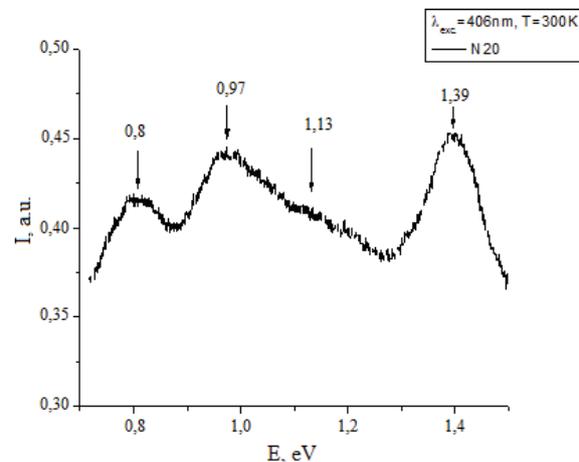


Рис. 1. НГЭС на основе GaAs с МКТ Yb

Fig. 1. Nanoheteroepitaxial structures based on GaAs with metal quantum dots Yb

На рис. 1 представлен спектр ФЛ $p-n$ структуры НГЭС КТ, которая была выращена на подложке GaAs n -типа проводимости при температуре $T_2=730$ К. Как в n -, так и в p -областях эта структура содержала 6 массивов КТ Yb, зарощенных спейсерными слоями InAs, и выращенный на поверхности подконтактного слоя GaAs p -типа проводимости массив КТ Yb. Максимумы ФЛ этой структуры соответствовали: при $E=1,39$ эВ излучению GaAs, при $E=1,13$ эВ и $E=0,97$ эВ излучению спейсерных слоев InAs в n - и p -областях структуры, максимум при $E=0,8$ эВ соответствует КТ Yb, который в результате фазового перехода из металла превратился в полупроводник с шириной запрещенной зоны $E_g=0,8$ эВ.

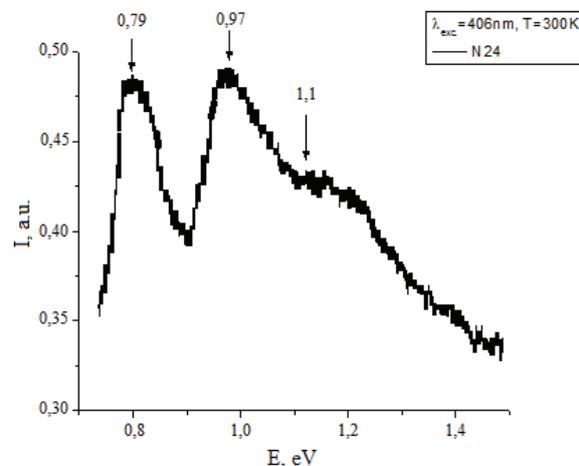


Рис. 2. НГЭС на основе GaP с МКТ Yb

Fig. 2. Nanoheteroepitaxial structures based on GaP with metal quantum dots Yb

На рис. 2 представлен спектр ФЛ *p-n* структуры НГЭС КТ, выращенной при температуре $T_2=730$ К на подложке GaP, которая содержит, как в *n*-, так и в *p*-областях по 6 массивов КТ из InAs, зарощенных спейсерными слоями GaP, и подконтактный слой GaP *p*-типа проводимости, на поверхности которого выращен массив КТ из иттербия. Максимумы ФЛ этой структуры переместились примерно на 0,01 эВ в ИК-диапазон длин волн по сравнению с аналогичными максимумами в спектре структуры, выращенной на GaAs (рис. 1).

В соответствии с табл. 1 в НГЭС на основе GaAs, сформированной при $T_2=700$ К и содержащей КТ из Yb, при охлаждении до $T_1=300$ К, постоянная решетки КТ Yb сокращается на $\Delta a_{Yb}=0,0621$ Å, а размер постоянной решетки спейсерного слоя GaAs при этом сокращается на $\Delta a_{GaAs}=0,0136$ Å (табл. 1). Таким образом, постоянные решеток КТ из Yb и спейсерного слоя GaAs испытывают отрицательное давление, которому соответствует суммарная величина сокращений постоянных решеток Yb и GaAs: $\Delta a_{Yb,GaAs}=\Delta a_{Yb}+\Delta a_{GaAs}=0,0757$ Å (табл. 2).

Таблица 2. Величины суммарных сокращений постоянных решеток

Таблица 2. Величины суммарных сокращений постоянных решеток

Температура (Т, К)	Δa_{InAs}^+	Δa_{InAs}^+	$\Delta a_{InAs,GaAs}^-$	Δa_{Yb}^+	Δa_{Yb}^+	$\Delta a_{Yb,GaAs}^-$
	Δa_{GaAs}	Δa_{GaP}	$\Delta a_{InAs,GaP}$	Δa_{GaAs}	Δa_{GaP}	$\Delta a_{Yb,GaP}$
(Å)						
600	0,0153	0,0149	0,0004	0,0540	0,0536	0,0004
700	0,0254	0,0245	0,001	0,0757	0,0748	0,001
800	0,0343	0,0314	0,003	0,1031	0,1002	0,003

Аналогично в НГЭС на основе GaP, сформированной при $T_2=700$ К и содержащей КТ из Yb, при охлаждении до $T_1=300$ К, постоянная решетки КТ Yb сокращается на $\Delta a_{Yb}=0,0621$ Å, а размер постоянной решетки спейсерного слоя GaP на $\Delta a_{GaP}=0,0127$ Å (табл. 1). Таким образом, постоянные решеток КТ Yb и спейсерного слоя GaP испытывают отрицательное давление, которому соответствует суммарная величина сокращений постоянных решеток $\Delta a_{Yb,GaP}=0,0748$ Å. Разность величин сокращения постоянных решеток НГЭС, сформированных при 700 К на основе GaAs и GaP и содержащих КТ Yb, составляет $\Delta a_{Yb,GaAs}-\Delta a_{Yb,GaP}=0,001$ Å (табл. 2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асрян Л.В., Суриц Р.А. Теория пороговых характеристик полупроводниковых лазеров на квантовых точках // ФТП. – 2004. – Т. 38. – № 1. – С. 3–25.
2. Norman A. G., Hanna M. C., Dippe P. et al. InGaAs/GaAs QD superlattices: MOVPE growth, structural and optical characterization, and application in intermediate-band solar cells // Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition. – Lake Buena Vista, Florida, USA, January 3–7, 2005. – P. 43.

Максимумы ФЛ при $E=0,8$ эВ и $E=0,79$ эВ (рис. 1, 2), соответствуют излучению КТ Yb в НГЭС, выращенных при температуре $T=730$ К. Однако отсутствие в литературе экспериментально определенных значений коэффициентов теплового расширения Yb, GaAs и GaP для температуры $T=730$ К не позволяет получить точные значения сокращений постоянных решеток этих материалов в интервале температур $\Delta T=300-730$ К. Оценка величины этих коэффициентов в соответствии [20] позволяет определить с точностью до 0,001 Å изменения постоянных решеток $\Delta a_{Yb,GaAs}\approx 0,08$ Å и $\Delta a_{Yb,GaP}\approx 0,079$ Å. Таким образом, разность постоянных решеток КТ Yb в НГЭС на основе GaAs и GaP соответствует разности величин энергии максимумов ФЛ в этих НГЭС, т. е. 0,001 Å~0,01 эВ

Аналогичное соответствие наблюдается для разности постоянных решеток КТ InAs в НГЭС на основе GaAs и GaP и энергий максимумов ФЛ для этих материалов, т. е. 0,001 Å~0,01 эВ.

Представленные в табл. 2 данные, рассчитанные для формирования НГЭС КТ при 600, 700 и 800 К, свидетельствуют о том, что путем изменения температуры можно получать КТ с различными размерами постоянной решетки, используя один и тот же материал. Изменение температуры в процессе выращивания методом ЖФЭ ИОНП позволяет получать массивы различных ИКТ не только в разных структурах, но и непосредственно в одной многослойной структуре.

Выводы

1. Изменение ширины запрещенной зоны InAs в КТ, по сравнению с объемным материалом InAs, обусловлено размерами КТ, величина которых зависит от разности постоянных решеток матричного материала и материала КТ.
2. В НГЭС с КТ из металла (иттербия) реализуется фазовый переход металл–полупроводник. Ширина запрещенной зоны полупроводника, образующегося при этом, определяется температурой выращивания.
3. Применение фазового перехода металл–полупроводник позволяет получать в одном технологическом процессе многослойные НГЭС с массивами КТ, имеющими различные значения ширины запрещенной зоны.
3. 40.8 % efficient inverted triple-junction solar cell with two independently metamorphic junctions / J.F. Geisz, D.J. Friedman, J.S. Ward, A. Duda, W.J. Olavarria, T.E. Moriarty, J.T. Kiehl, M.J. Romero, A.G. Norman, K.M. Jones // Appl. Phys. Lett. – 2008. – № 93. – P. 123505.
4. Фоточувствительность структур с квантовыми ямами, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии, при нормальном падении излучения / В.Б. Куликов, Г.Х. Аветисян, Л.М. Василевская, И.Д. Залевский, И.В. Будкин, А.А. Падалица // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38. – № 2. – С. 218–221.

5. Структуры GaAs с квантовыми точками InAs и As, полученные в едином процессе молекулярно-лучевой эпитаксии / В.Н. Неверомский, Н.А. Берг, В.В. Чалдышев, В.В. Преображенский, М.А. Путято, Б.Р. Семягин // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43. – № 12. – С. 1662–1666.
6. Ченга Л., Плога К. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 584 с.
7. Леденцов Н.Н. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры. Обзор // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32. – № 4. – С. 385–410.
8. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. – 1998. – Т. 32. – № 1. – С. 3–18.
9. Марончук И.Е., Марончук А.И., Найденкова М.В. Формирование квантовых точек в процессе жидкофазной эпитаксии методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2005. – № 12. – С. 97–101.
10. Epitaxial growth of structures with nano-dimensional features from liquid phase by pulse cooling of substrate: pat. US, no. 20070089668, 2007.
11. Спосіб вирощування епітаксійних наногетероструктур з масивами квантових точок: патент Укр. UA № 94699; замов. 20.09.2010; опуб. 10.06.2011, Бюл. № 11. – 5 с.
12. Марончук И.И. Получение наногетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками для высокоэффективных солнечных элементов, исследование их свойств // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2013. – № 4 (193). – С. 149–155.
13. Predicted photoreflectance signatures on QD selective contacts for hot carrier solar cells / E. Cánovas, A. Martí, P.G. Linares, E. Antolín, D. Fuertes Marrón, C. Tablero, A. Luque // GCEP Proceedings of 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference. – Spain, 2008. – P. 33–36.
14. Maronchuk I.E., Berezovska N.I., Borkovska O.Yu. Nanoheteroepitaxial Structures for solar cells on basis GaP // Proceedings 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. – Germany, 2009. – P. 421–424
15. Дубровский В.Г. Теория формирования эпитаксиальных структур. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 350 с.
16. Ван дер Мерве Дж.Х. Несоответствие кристаллических решеток и связи на поверхности раздела между ориентированными пленками и подложками // Монокристаллические пленки. – М.: Мир, 1966. – С. 172.
17. Мотт Н.Ф. Переходы металл-изолятор. – М.: Наука, 1979. – 343 с.
18. Физическая энциклопедия / под ред. А.М. Прохорова. – М.: Советская энциклопедия, 1990. – Т. 2. – 703 с.
19. Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. Фазовый переход металл-полупроводник и его применение. – Л.: Наука, 1979. – 183 с.
20. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 290 с.

Поступила 12.05.2014 г.

UDC 621.325

METAL–SEMICONDUCTOR PHASE TRANSITION IN NANOHETEROEPITAXIAL STRUCTURES TECHNOLOGY

Igor I. Maronchuk,

Cand. Sc., Sevastopol Institute of Nuclear Energy and Industry,
7, Kurchatov street, Sevastopol, 299033, Russia. E-mail: igimar@mail.ru

Igor E. Maronchuk,

Dr. Sc., Sevastopol Institute of Nuclear Energy and Industry, 7, Kurchatov street,
Sevastopol, 299033, Russia. E-mail: igimar@mail.ru

Tamara F. Kulyutkina,

Cand. Sc., Sevastopol Institute of Nuclear Energy and Industry,
7, Kurchatov street, Sevastopol, 299033, Russia. E-mail: fizlab@simp.com.ua

Relevance of the work is caused by the necessity of obtain nanoheteroepitaxial structures with quantum dots to design and to develop the production of semiconductor energy high-performance devices.

The main aim of the study is to identify the reasons of forming wide-receiving semiconductor material of narrow-gap one when growing it in the form of quantum dots; to investigate the possibility of applying metal–semiconductor phase transition to obtain the material which in the form of quantum dots corresponds to narrow-gap semiconductor.

The methods used in the study: nanoheteroepitaxial structures with quantum dots were grown by liquid-phase epitaxy with pulse-cooled substrate; properties of the structures obtained were studied by investigation of their photoluminescence spectra taken from the samples using a set of spectral apparatus based on two monochromators MDR-41.

The results: The authors have revealed that the change in InAs bandgap in quantum dot is caused by a quantum dot size as compared with InAs bulk material. The dimension of the dots depends on difference between the lattice constants of the matrix material and quantum dot material. Metal–semiconductor interface phase transition is implemented in nanoheteroepitaxial structures with quantum dots of metal (Yb). The bandgap of the semiconductor formed at the time is determined by the growth temperature. Application of metal–semiconductor phase transition allows obtaining in one process multilayer nanoheteroepitaxial structures with the arrays of quantum dots with different values of the bandgap.

Key words:

Phase transition, metal–semiconductor, ytterbium, liquid phase epitaxy, nanoheteroepitaxial structures, quantum dots.

REFERENCES

- Asryan L.V., Suris R.A. Teoriya porogovykh kharakteristik poluprovodnikovyykh lazerov na kvantovykh tochkakh [The theory of threshold characteristics of semiconductor lasers on quantum dots]. *FTP*, 2004, vol. 38, no. 1, pp. 3–25.
- Norman A. G., Hanna M. C., Dippe P. et al. InGaAs/GaAs QD superlattices: MOVPE growth, structural and optical characterization, and application in intermediate-band solar cells. *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition*. Lake Buena Vista, Florida, USA, January 3–7, 2005. pp. 43.
- Geisz J.F., Friedman D.J., Ward J.S., Duda A., Olavarria W.J., Moriarty T.E., Kiehl J.T., Romero M.J., Norman A.G., Jones K.M. 40.8 % efficient inverted triple-junction solar cell with two independently metamorphic junctions. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, no. 93, pp. 123505.
- Kulikov V.B., Avetisyan G.Kh., Vasilevskaya L.M., Zalevskiy I.D., Budkin I.V., Padalitsa A.A. Fotochuvstvitelnost struktur s kvantovymi yamami, vyroshchennykh metodom MOS-gidritnoy epitaksii, pri normalnom padenii izlucheniya [Photosensitivity of structures with quantum holes grown up by MOCVD method at normal radiation fall]. *FTP*, 2004, vol. 38, no. 2, pp. 218–221.
- Nevdomskiy V.N., Bert N.A., Chaldyshev V.V., Puyato M.A., Semiyagin B.R. Struktury GaAs s kvantovymi tochkami InAs i As, poluchennyye v edinom protsesse molekulyarno-luchevoy epitaksii [GaAs structures with quantum dots InAs and As obtained in MBE unified process]. *FTP*, 2009, vol. 43, no. 12, pp. 1662–1666.
- Chenga L., Ploga K. Molekulyarno-luchevaya epitaksiya i geterostrukturury [MBE and heterostructures]. Translated from English. Moscow, Mir publ., 1989. 584 p.
- Ledentsov N.N. Geterostruktury s kvantovymi tochkami: poluchenie, svoystva, lazery. Obzor [Heterostructures with quantum dots: obtain, properties, lasers. Review]. *FTP*, 1998, vol. 32, no. 4, pp. 385–410.
- Alferov Zh.I. Istoriya i budushchee poluprovodnikovyykh geterestraktur [History and the future of semi-conductor heterostructures]. *FTP*, 1998, vol. 32, no. 1, pp. 3–18.
- Maronchuk I.E., Maronchuk A.I., Naydenkova M.V. Formirovaniye kvantovykh tochek v protsesse zhidkofaznoy epitaksii metodom impulsnogo okhlazhdeniya насыщенный раствор-расплава [Formation of quantum dots in the course of LPE by the of puls cooling method of a saturated solution-melt]. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2005, no. 12, pp. 99–101.
- Maronchuk I.E., Kulyutkina T.F., Maronchuk A.I., Naidenkova M.V. *Epitaxial growth of structures with nano-dimensional features from liquid phase by pulse cooling of substrate: patent US*, no. 20070089668, 2007.
- Maronchuk I.E., Kulyutkina T.F., Maronchuk I.I. *Sposib vyroshchuvannya epitaksiynikh nanogeterostruktur z masyvamy kvantovykh tochok* [Expedient of cultivation epitaxial nanogeterostructures with quantum dots]. Patent UA, no. 94699, 2011.
- Maronchuk I.I. Poluchenie nanogeteroepitaksialnykh struktur s kvantovymi tochkami dlya vysokoeffektivnykh solnechnykh elementov, issledovanie ikh svoystv [Obtaining nanoheteroepitaxial structures with quantum dots for high effective photovoltaic devices, investigation of their properties]. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National university*, 2013, no. 4 (193), pp. 149–155.
- Cánovas E., Martí A., Linares P.G., Antolin E., Fuertes Marrón D., Tablero C., Luque A. Predicted Photoreflectance Signatures on QD Selective Contacts for Hot Carrier Solar Cells. *GCEP Proceedings of 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Spain, 2008. pp. 33–36.
- Maronchuk I.E., Berezovska N.I., Borkovska O.Yu. Nanoheteroepitaxial Structures for Solar Cells on Basis GaP. *Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. Germany, 2009. pp. 421–424.
- Dubrovskiy V.G. Teoriya formirovaniya epitaksialnykh struktur [The theory of formation of epitaxial structures]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009, 350 p.
- Van-der-Merve. Nesootvetstvie kristallicheskiykh reshotok i sily svyazi na poverkhnosti razdela mezhdru orientirovannymi plenkami i podlozhkami [Discrepancy of crystalline lattices and force of communication on an interface between the oriented films and substrates]. *Monokristallicheskie plenki* [Monocrystalline films]. Moscow, Mir Publ., 1966. pp. 172.
- Mott N.F. Perekhod metal-izolyator [Metal-insulator transition]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 343 p.
- Fizicheskaya entsiklopediya [The physical encyclopedia]. Ed. by A.M. Prokhorov. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1990. Vol. 2, 703 p.
- Bugaev A.A., Zakharchenko B.P., Chudnovskiy F.A. Fazovy perekhod metal-poluprovodnik i ego primeneniye [Metal-semiconductor phase transition and its application]. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 183 p.
- Novikova S.I. Teplovoe rashirenije tverdykh tel [Thermal dilatation of solid bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 290 p.

Received: 12 May 2014.